



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

**ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΡΑΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ
ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗΝ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ
ΙΣΧΥΟΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΟΥΑΧΑΜΠ ΤΑΟΥΦΙΚ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής ΚΩΣΤΑΣ ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Καθηγητής ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ

Διδάσκων Π.Δ 407/80 ΑΝΤΩΝΗΣ ΤΣΙΚΑΛΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ, 2013

Ευχαριστίες

Η παρούσα ερευνητική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια των Προπτυχιακών μου σπουδών του Τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εκπόνηση του εργαστηριακού μέρους πραγματοποιήθηκε σε εξωτερικό χώρο εντός του Πολυτεχνείου σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας κατά τη χρονική περίοδο Ιανουαρίου έως Σεπτέμβριο 2013, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Καλαϊτζάκη.

Με την ολοκλήρωση της εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη, για την ουσιαστική υποστήριξη, καθοδήγηση και εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αλλά και για την ευκαιρία που μου δόθηκε για την ενασχόληση μου με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα όπως είναι ο τομέας των Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Τις θερμές μου ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω επίσης στον Καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρακάκη καθώς και στον κ. Αντώνιο Τσικαλάκη για την αξιολόγηση της διπλωματική μου εργασίας

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στην κα. Αριάδνη Βασιλομιχελάκη, για την άψογη συνεργασία μας, την ουσιαστική καθοδήγηση της αλλά τον προσωπικό χρόνο που αφιέρωσε για την επιτυχή διεκπεραίωση του πειραματικού μέρους της έρευνας.

Τέλος, δε θα μπορούσα να παραλείψω τους συναδέλφους αλλά και φίλους, Άρη Λαθιωτάκη, Νικόλαο Αψούρη & Στέλιο Παπααργηγόριου, για τη βοήθεια και εμπύχωση τους όλη αυτή τη περίοδο, αλλά και την οικογένεια μου που με στηρίζει σε όλα μου τα βήματα.

Ταουφίκ Ουαχάμπ

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η ασύρματη τεχνολογία ενέργειας έχει ενσωματωθεί σε μια πληθώρα ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης, με σκοπό να βελτιωθεί η αξιοπιστία των ηλεκτρονικών συσκευών καθώς επίσης και να επεκταθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Αρκετά σύντομα, αναπτύχθηκαν μικρογραφίες ασύρματων αισθητήρων που θα περιλαμβάνουν μονάδες συγκομιδής ενέργειας μικροκυμάτων για τροφοδότηση θα εντοπίζονται σε σημεία (εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος, εσωτερικό χάλυβα ή σκυροδέματος κτιρίων καθώς και στον πυρήνα επικίνδυνων χημικών εγκαταστάσεων), όπου θα ήταν σχεδόν αδύνατη η αντικατάσταση των μπαταριών τους. Ωστόσο έως και σήμερα, ακόμη και οι πιο ισχυροί ασύρματοι κόμβοι έχουν διάρκεια ζωής λίγων μόνο χρονών και αυτό εξαιτίας της ύπαρξης μπαταρίας. Στην ιδανική περίπτωση οι μηχανικοί χρειάζονται έναν αισθητήρα που μπορεί να διαρκέσει για πάντα χωρίς εξωτερικές πηγές ρεύματος ή μπαταρίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας που θα παρουσιαστεί στην παρούσα εργασία, το όνειρο αυτό είναι πλέον εφικτό.

Στην παρούσα ερευνητική εργασία προτείνονται νέα κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας ή αλλιώς κυκλώματα ανόρθωσης, με είσοδο διάφορους τύπους Κεραιών και με τη χρήση Τεχνητής Γείωσης, κάποια από τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση στην Τάση (V) εξόδου, ενώ άλλα παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση στην Ένταση του ρεύματος (I) εξόδου. Από το συνδυασμό των παραπάνω και μέσω της “Εξίσωσης Ισχύος”, επιτεύχθηκε η εύρεση κυκλωμάτων, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση μετατροπής ισχύος.

Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε η φόρτιση σε διάφορα είδη μπαταρίας (διαφορετικής χωρητικότητας (mAh)) με τη χρήση breadboard (Διάταξη 9), καθώς επίσης επιτεύχθηκε η άμεση τροφοδότηση δύο αισθητήρων θερμοκρασίας. Η πρώτη μέτρηση θερμοκρασίας έγινε με Θερμίστορ σε σειρά με αντίσταση μέσω τροφοδότησης από το βασικό κύκλωμα (Διάταξη 1), ενώ η δεύτερη πραγματοποιήθηκε με το Τρανζίστορ 2N4401 μέσω τροφοδότησης από παράλληλα κυκλώματα (Διάταξη 8).

Τέλος, τα κυκλώματα με τα βέλτιστα αποτελέσματα απόδοσης ισχύος τυπώθηκαν, ώστε να αυξηθεί κατά το δυνατόν περισσότερο η απόδοση τους και να μειωθεί το μέγεθος τους με απώτερο στόχο τη χρήση τους σε εμπορικές εφαρμογές.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : Εισαγωγή	8
1.1. Σχετικές Εργασίες	10
1.2. Κίνητρα	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : Θεωρητικό Υπόβαθρο	14
2.1. Ανόρθωση	14
2.1.1. Απλή Ανόρθωση	14
2.1.2. Απλή Ανόρθωση Χωρίς Πυκνωτή Εξομάλυνσης	14
2.1.3. Απλή Ανόρθωση με Πυκνωτή Εξομάλυνσης	15
2.2. Διπλή Ανόρθωση	18
2.2.1. Διπλή Ανόρθωση με Δυο Διόδους	18
2.2.2. Διπλή Ανόρθωση με Γέφυρα	22
2.2.3. Διπλή Ανόρθωση με Πυκνωτή Εξομάλυνσης	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : Μεθοδολογία Πειράματος	25
3.1. Κεραία	25
3.2. Γείωση	28
3.3. Αντλία Φορτίου (Charge Pump)	29
3.3.1. Προδιαγραφές του Συστήματος	32
3.3.2. Αριθμός Επιπέδων	33
3.3.3. Χωρητικότητα Σταδίου	33
3.3.4. Χωρητικότητα Εξόδου	35
3.3.5. Μοντέλα Διόδων	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο : Πειραματικό Μέρος και Αποτελέσματα	39
4.1. Στάδιο Διερεύνησης	39
4.2 Στάδιο Βελτιστοποίησης	49
4.2.1 Φόρτιση μπαταριών	49
4.2.2. Μεθοδολογία Πειράματος Σταδίου Βελτιστοποίησης	50
4.3. Πειραματικά Αποτελέσματα Μεθοδολογίας	58

4.3.1. Αποτελέσματα Θερμίστορ σε Σειρά με Αντιστάτη	59
4.3.2. Αποτελέσματα Μέτρησης Θερμοκρασίας με Τρανζίστορ	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο: Συμπεράσματα και Προτάσεις για το Μέλλον.....	72
5.1 Γενικά Συμπεράσματα.....	72
5.2. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Εισαγωγή

Η χρήση ασύρματων πομπών για τη δημιουργία ενός “ωκεανού” από ραδιοσυχνότητες ενέργειας (Radian Frequency-RF) με σκοπό την τροφοδοσία απομακρυσμένων συσκευών, αποτέλεσε ένα από τα όνειρα του *Nikola Tesla*, οδηγώντας τον στην εφεύρεση των ασύρματων επικοινωνιών.

Η τεχνολογία της ασύρματης συγκομιδής ενέργειας δεν αποτελεί μια νέα έννοια, αφού έχει αποδειχθεί πάνω από 100 χρόνια από τον *Nikola Tesla* [1]. Η συγκομιδή ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιείτε ευρέως για την τροφοδότηση απομακρυσμένων συσκευών αλλά δεν αποτελεί τη μοναδική πηγή, καθώς υπάρχουν διάφορα άλλα είδη συγκομιδής ενέργειας για την τροφοδότηση ηλεκτρονικών συσκευών χαμηλής ισχύος. Τέτοιες πηγές συγκομιδής ενέργειας αποτελούν η κινητική, η θερμική καθώς και η ηλεκτρομαγνητική ενεργεία, από τις οποίες η συγκομιδή ενέργεια μέσω RF, είναι η μόνη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας για εφαρμογές χωρίς τη χρήση μπαταρίας. Χάριν των κινητών τηλεφώνων και της ύπαρξης δικτύων Wi-Fi, η ενέργεια RF είναι πανταχού παρούσα στο περιβάλλον, αφού πάνω από ένα εκατομμύριο smartphones ενεργοποιούνται κάθε μέρα αντιπροσωπεύοντας μια μεγάλη πηγή συγκομιδής ενεργείας (RF).

Τον τελευταίο καιρό, η τεχνολογία RFID (Radio Frequency Identification) αποτελεί ένα σαφές παράδειγμα της ασύρματη μετάδοσης ενέργειας. Όταν οι ετικέτες RFID βρεθούν στην εμβέλεια της κεραίας του αναγνώστη, τότε η μονάδα ελέγχου επικοινωνεί με ραδιοκύματα με την κεραία των ετικετών RFID [2]. Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμοί στην άμεση τροφοδότηση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων (ΑΔΑ/ Wireless Sensor Network - WSN).

Η RFID δεν είναι σε θέση να παράγει αρκετή ενέργεια για να “τρέξει” τις τοπικές εργασίες επεξεργασίας στον κόμβο, όπως η τροφοδοσία του μικροελεγκτή Atmel

ATmega128L στο MICA2 Mote (Crossbow Technology, Milpitas, CA). Σύμφωνα με τις πρόσφατες εξελίξεις στην ενεργειακή απόδοση που αφορούν τα στοιχεία κυκλώματος ενός αισθητήρα, υπάρχουν διόδοι που απαιτούν μικρότερη τάση ανόδου αλλά και λειτουργίες χαμηλής ισχύος που υποστηρίζονται από την ίδια τη συσκευή (όπως το sleep mode) που καταναλώνουν μόνο λίγα mV. Από τα παραπάνω είναι εμφανή η ανάγκη για την κατασκευή κυκλωμάτων συγκομιδής ενέργειας, τα οποία θα είναι ικανά να λειτουργήσουν με επιτυχία ένα κόμβο αισθητήρων.

Στη Διάταξη 1 του Πειραματικού Μέρους, παρουσιάζετε το βασικό κύκλωμα συγκομιδής ενέργειας, όπου τα στοιχεία που περιλαμβάνει είναι διόδοι και πυκνωτές. Το κύκλωμα λειτουργεί παίρνοντας ως είσοδο μια κεραία, διασφαλίζοντας έτσι τη μέγιστη απόδοση ισχύος από την κεραία στον πολλαπλασιαστή τάσης. Η αποθήκευση ενέργειας εξασφαλίζει την ομαλή παροχή ισχύος στο φορτίο, κυρίως όταν δεν είναι διαθέσιμη κάποια εξωτερική πηγή ενέργεια (π.χ. μπαταρία). Ένα τέτοιο κύκλωμα πρέπει να είναι προσεκτικά σχεδιασμένο διότι η αύξηση των επιπέδων του πολλαπλασιαστή τάσης δίνει υψηλότερη τάση στο φορτίο, ενώ ταυτόχρονα μειώνει το ρεύμα από το τελικό φορτίο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες καθυστερήσεις όσον αφορά το χρόνο φόρτισης, δηλαδή στη διαδικασία αποθήκευσης ενέργειας στον πυκνωτή. Αντίστροφα, λιγότερα στάδια πολλαπλασιαστών μπορούν να εξασφαλίσουν ταχύτερη φόρτιση του πυκνωτή, αλλά η τάση που παράγεται μπορεί να είναι ανεπαρκής για τη τροφοδότηση του αισθητήρα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε διάφορα κυκλώματα, τα οποία έχουν ως πρότυπο το βασικό κύκλωμα της Διάταξης 1. Επίσης, δοκιμάστηκαν διάφοροι τύποι κεραίων ώστε να εντοπιστούν οι περιοχές συχνοτήτων όπου δίνουν τη βέλτιστη απόδοση στην τεχνολογία της συγκομιδής ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων RF (Energy Harvesting).

1.1. Σχετικές Εργασίες

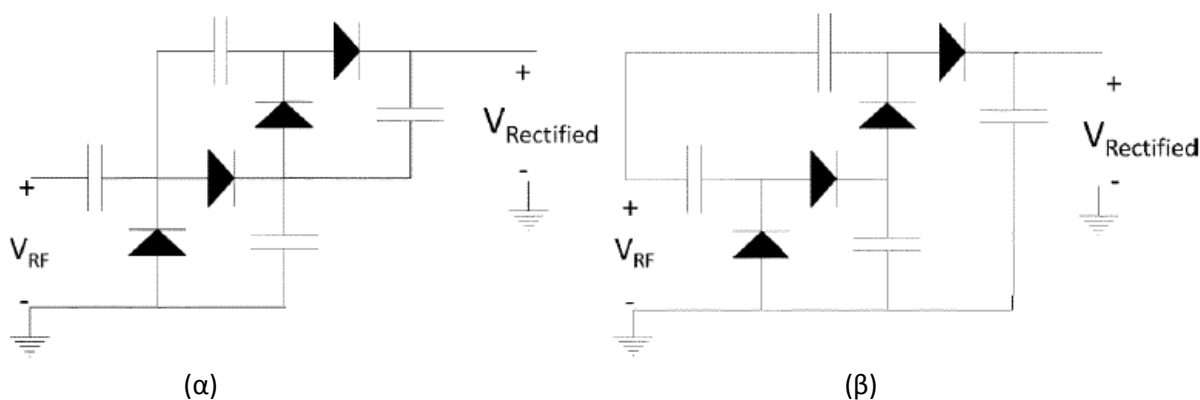
Τα τελευταία χρόνια η συγκομιδή ενέργειας βρίσκεται στο επίκεντρο της ερευνητικής κοινότητας καθώς υπάρχουν πολλές πηγές ενέργειας από όπου η τεχνολογία της συγκομιδή ενέργειας μπορεί να επωφεληθεί. Η ηλιακή συγκομιδή ενέργειας είναι ένα από τα βασικά παραδείγματα δεδομένου ότι έχει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα μεταξύ των υπολοίπων. Ωστόσο, τα βασικά μειονέκτημα της έγκειται την ικανότητα της να λειτουργεί μόνον παρουσία του ηλιακού φωτός.

Σε βιβλιογραφική αναφορά [3], μια ηλιακή μονάδα συγκομιδής ενέργειας χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει ένα αισθητήρα *mote*. Η παλμική συγκομιδή ενέργειας παρουσιάζεται στο [4] ενώ η συγκομιδή ενέργειας από θερμοηλεκτρική συσκευή που συνδέεται με άνθρωπο παρουσιάζετε στο [5]. Ασύρματο σύστημα φόρτισης μπαταρίας με συγκομιδή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες συζητείται στο [6]. Στο [7], ενέργεια 60μw συλλέγεται από τους πύργους τηλεόραση, που βρίσκονται σε απόσταση 4,1 km, τέθοντας σε λειτουργία μια μικρή ηλεκτρονική συσκευή. Η συγκομιδή ενέργειας RF από το περιβάλλον με δύο συστήματα, έχει μελετηθεί στο [8]. Το πρώτο είναι ένα ευρυζωνικό (*broadband*) σύστημα χωρίς *matching*, ενώ το δεύτερο είναι *narrow band* με *matching*. Δυστυχώς τα ειδή υπάρχοντα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συγκομιδή ενέργειας δεν είναι επαρκής για την άμεση τροφοδότηση ηλεκτρονικών συσκευών, αλλά μέσω αυτής θα μπορούσαν να αποθηκεύουν ενέργεια για μεταγενέστερη χρήση.

Στη βιβλιογραφική αναφορά [9], οι συγγραφείς αναλύουν τη σκοπιμότητα και τα πιθανά οφέλη από τη χρήση παθητικών RFID, όπως ένα ραδιόφωνο-ξυπνητήρι. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση ενός παθητικού RFID ραδιόφωνο-ξυπνητήρι προσφέρει σημαντικά οφέλη στην ενεργειακή απόδοση, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους υλικό του RFID. Πρόσφατα πρότυπα για τέτοιες μηχανές RF έχουν αναπτυχθεί

στον ακαδημαϊκό χώρο [10], [11], καθώς και σε εμπορικά προϊόντα [12]. Το βασικό κύκλωμα συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες βασίζεται στο κύκλωμα πολλαπλασιαστή τάσης, που εφευρέθηκε από τον *Heinrich Greinacher* (1919).

Αργότερα, οι *Cockcroft & Walton* (1951), χρησιμοποίησαν αυτήν την έννοια στην έρευνα τους για να επιταχύνουν σωματίδια ώστε να μελετήσουν τον ατομικό πυρήνα, όπου και τους απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ Φυσικής. Το βασικό σχήμα ενός διπλασιαστή τάσης (voltage doubler) Villard, γνωστός και ως πολλαπλασιαστή τάσης Cockcroft-Walton, αλλά και ο πολλαπλασιαστή τάσης Dickson παρουσιάζονται στο Σχήμα 1 (α) και (β), αντίστοιχα. Σύμφωνα με το [13], από την τοπολογία των δύο πολλαπλασιαστών τάσης Villard και του Dickson συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά κατά την απόδοση.

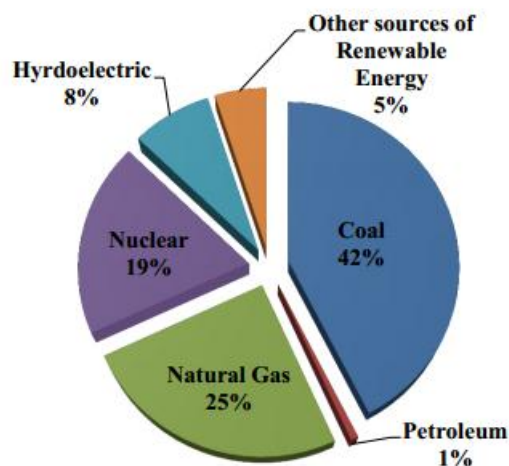


Σχήμα 1: (α) Πολλαπλασιαστής Villard (β) Πολλαπλασιαστής Dickson

1.2. Κίνητρα

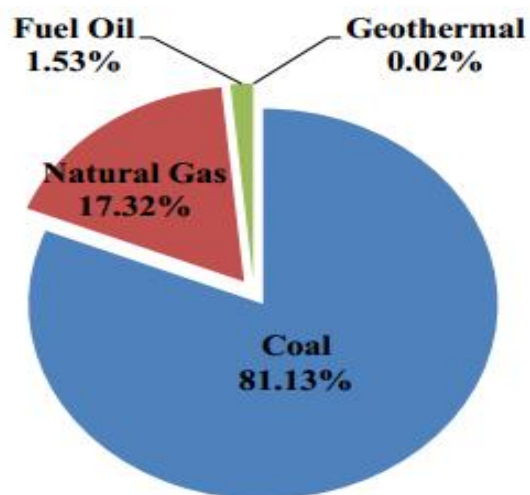
Μετά την πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1970, οι νέοι τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας συνέχισαν να αποτελούν ύψιστη προτεραιότητα για τους μελετητές ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η αύξηση του πληθυσμού, σε συνδυασμό με μια ακόρεστη αναζήτηση για νεότερες ηλεκτρονικές τεχνολογίες, έχουν οδηγήσει σε αυξανόμενη

ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Δυστυχώς, δεν είναι ακόμη σαφές αν η ανθρωπότητα είναι προετοιμασμένη να συμβαδίσει με τη ζήτηση αυτή στο μέλλον. Η έκθεση World Energy Outlook εκτιμά ότι θα υπάρξει αύξηση 76% στη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των ετών 2007-2030, με μέσο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης της τάξεως του 2,5% [14]. Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας έχει υπερβεί τη δύναμη ισχύος μετάδοσης κατά 25% από το 1982 [15]. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό λαμβάνοντας υπόψη ότι περίπου 2 δισεκατομμύρια άνθρωποι επί του παρόντος δεν έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια [14]. Επιπλέον, περίπου το 20% των συνολικών εκπομπών CO₂ παγκοσμίως είναι αποτέλεσμα εκπομπών των ΗΠΑ μέσω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και μόνο [16]. Στα Σχήματα 2 και 3 παρουσιάζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ από διάφορες πηγές, καθώς και οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ από ορυκτά καύσιμα. Μόνο λίγο πάνω από 13% των αναγκών μας σε ηλεκτρική ενέργεια παράγεται μέσω ανανεώσιμων πηγών, με αποτέλεσμα οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα να συνεχίσουν να θέτουν σε κίνδυνο την υγεία του πλανήτη για τα επόμενα χρόνια.



Σχήμα 2 : Καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πηγή ενέργειας για το 2011

*Πηγή: [17]



Σχήμα 3: Εκπομπές CO₂ από ορυκτά καύσιμα λόγω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το 2009

*Πηγή: [16]

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με ορισμένες μελέτες έχει βρεθεί η σχέση μεταξύ της υπερθέρμανσης του πλανήτη και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ([18], [19] και [20]), σύμφωνα με τις οποίες οι φυσικοί πόροι μειώνονται συνεχώς για την κάλυψη αναγκών παραγωγής ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1. Ανόρθωση

Ως ανόρθωση ορίζεται μια διάταξη μέσω της οποίας μετατρέπεται το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Η ανόρθωση διαχωρίζεται σε δυο βασικά είδη: α) Απλή ανόρθωση και β) Διπλή ανόρθωση

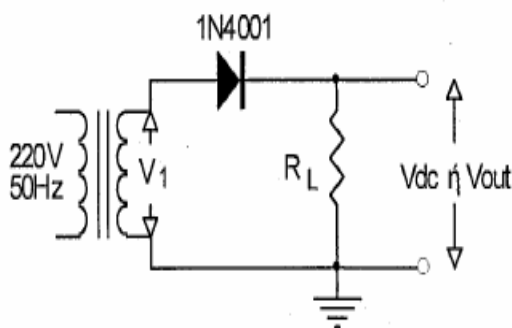
2.1.1. Απλή Ανόρθωση

Όταν μια διόδος πολώνεται ορθά (η τάση ανόδου είναι κατά 0,7 V μεγαλύτερη της καθόδου) παρουσιάζει μικρή αντίσταση και άγει, ενώ όταν πολώνεται ανάστροφα παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση και δεν άγει. Αυτή η συμπεριφορά της διόδου, δηλαδή η μονόπλευρη αγωγιμότητα, την καθιστά χρήσιμη σε κυκλώματα ανόρθωσης. Κατά την ανόρθωση χρησιμοποιείται η τάση του δικτύου της ΔΕΗ, η οποία ως γνωστόν είναι ημιτονοειδής και σταθερής ενεργής τιμής ($220V_{rms} \pm 10\%$) με συχνότητα 50Hz. Επειδή αυτή η τάση είναι μεγάλη, χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντοτε μετασχηματιστές (M/T) για τον υποβιβασμό της. Η περίοδος της κυματομορφής αυτής είναι $T = 1/F = 1/50Hz = 0,02 \text{ sec}$ ή αλλιώς 20 msec, δηλαδή σε χρόνο 20 msec έχουμε μια πλήρη θετική και αρνητική εναλλαγή.

2.1.2. Απλή Ανόρθωση Χωρίς Πυκνωτή Εξομάλυνσης

Στην απλή ανόρθωση μια διόδος συνδέεται στο δευτερεύον του M/T, σε μια τάση V_1 που είναι εναλλασσόμενη και έχει τη μορφή της κυματομορφής (Σχήματος 6-α). Σε θετική ημιπερίοδο, η τάση V_j που εμφανίζεται στο δευτερεύον του M/T έχει το (+) επάνω και το (-) κάτω. Η διόδος πολώνεται ορθά και άγει (μόλις η τάση ανόδου ξεπεράσει τα 0,7 V ως προς την κάθοδο), με αποτέλεσμα να κλείνει κύκλωμα και

δημιουργώντας ροή ρεύματος από το (+) της V διαμέσου της διόδου, της αντίστασης φορτίου R_L και πάλι πίσω στο (-) της πηγής. Η ροή του ρεύματος δημιουργεί μια τάση στα άκρα της R_L με τη μορφή της κυματομορφής του Σχήματος 6-β. Στην αρνητική ημιπερίοδο της V , η διόδος πολώνεται ανάστροφα και δεν άγει με αποτέλεσμα να μη περνάει ρεύμα από το φορτίο R_L και η τάση να είναι μηδέν.



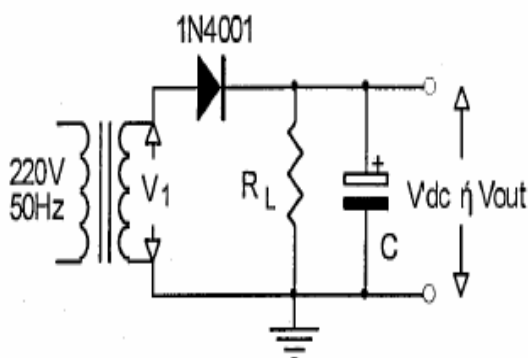
Σχήμα 4: Κύκλωμα απλής ανόρθωσης χωρίς πυκνωτή εξομάλυνσης

Αυτό το ρεύμα που ρέει μέσα από το φορτίο μόνο στη θετική ημιπερίοδο ονομάζεται ημιανορθωμένο ρεύμα, ενώ η αντίστοιχη τάση στα άκρα του φορτίου ονομάζεται ημιανορθωμένη τάση. Η όλη διαδικασία ονομάζεται ημιανόρθωση ή απλή ανόρθωση ή ανόρθωση μισού κύματος.

2.1.3. Απλή Ανόρθωση με Πυκνωτή Εξομάλυνσης

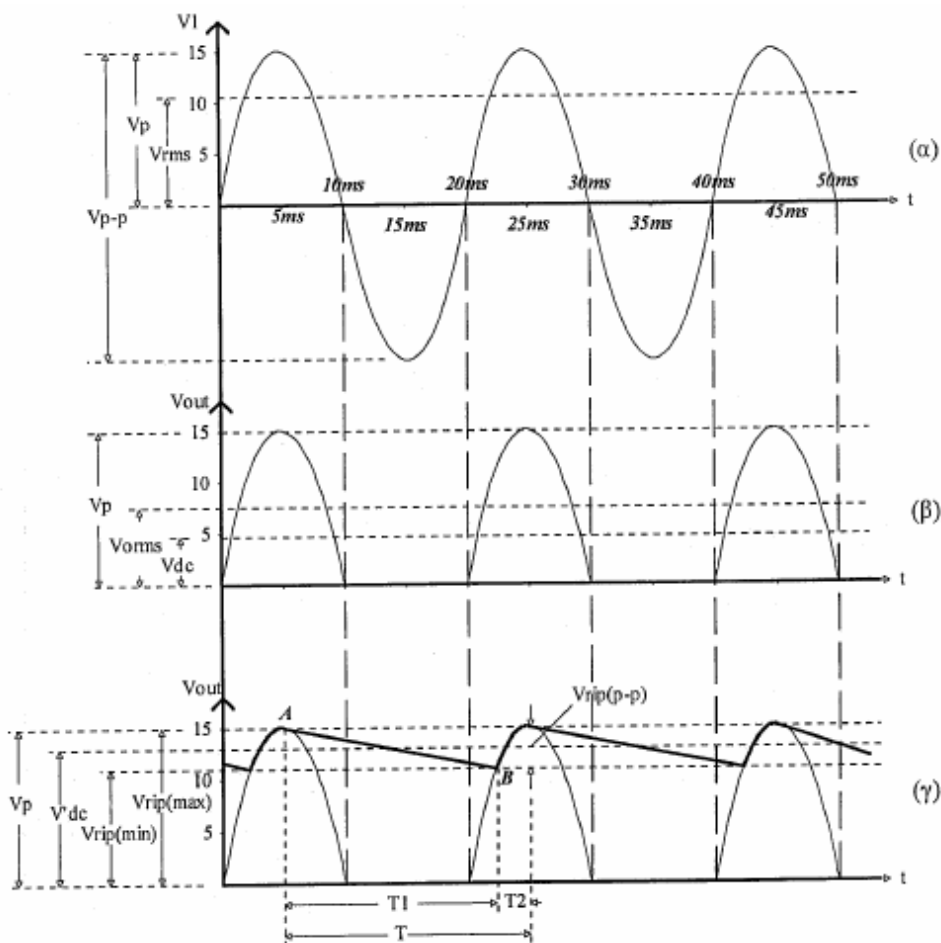
Στη περίπτωση που τοποθετηθεί ένας πυκνωτής παράλληλα με την αντίσταση R_L όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, τότε στη θετική ημιπερίοδο και μέχρι να πάρει τη μέγιστη τιμή, ο πυκνωτής φορτίζει γρήγορα στην τάση κορυφής από την πηγή μέσα από τη μικρή αντίσταση της διόδου που άγει, μειωμένη βέβαια κατά $0,7\text{ V}$ που κρατάει στα άκρα της η διόδος (2^ο Κανόνας Kirchhoff). Έτσι αν η τάση κορυφής V_p της πηγής V_j είναι π.χ.

10 V, τότε η άνοδος της διόδου επειδή ακουμπάει στη V_j θα έχει 10 V, η κάθοδος όμως θα έχει 9,3 V η οποία είναι και τάση του πυκνωτή, καθώς αυτός ακουμπάει στην κάθοδο της διόδου.



Σχήμα 5: Κύκλωμα απλής ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης

Καθώς η τάση V_p αρχίζει να μειώνεται, η διόδος παύει να άγει εξαιτίας του ότι η άνοδος έχει μικρότερη τάση από 0,7 V ως προς την κάθοδο (π.χ. 9,9 V η άνοδος και 9,3 V η κάθοδος). Από το σημείο αυτό (Σχήμα 6-γ), η διόδος διακόπτει το κύκλωμα με την πηγή και το μόνο κύκλωμα που απομένει είναι αυτό του πυκνωτή με την αντίσταση R_L . Έτσι ο πυκνωτής εκφορτίζεται αργά μέσα από τη μεγάλη αντίσταση φορτίου R_L . Η αργή εκφόρτωση φαίνεται με πιο οριζοντιωμένη καμπύλη (Σχήμα 6-γ). Η εκφόρτωση θα συνεχιστεί μέχρι να ξανασυνδεθεί η πηγή στο κύκλωμα μέσω της διόδου. Αυτό θα συμβεί στο σημείο B, όπου η επόμενη θετική ημιπερίοδος της πηγής θα πολώσει και πάλι ορθά την διόδο δίνοντας της στην άνοδο 0,7 V, περισσότερη τάση από όση έχει εκείνη τη στιγμή η κάθοδος ή ο πυκνωτής που είναι παράλληλα. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται συνεχώς.



Σχήμα 6: (α) Τάση δικτύου ΔΕΗ, (β) Απλή ανόρθωση χωρίς πυκνωτή εξομάλυνσης, (γ) Απλή ανόρθωση με πυκνωτή εξομάλυνσης

Η ροή του ρεύματος μέσα από την αντίσταση φορτίου RL , δημιουργεί μια τάση που έχει τη μορφή του Σχήματος 6-γ (παχιά γραμμή). Η τάση αυτή λέγεται τάση κυμάτωσης (V_{rip}) και μπορεί να μετρηθεί με παλμογράφο σε τιμή ρ-ρ και χαρακτηρίζει την ποιότητα των τροφοδοτικών με το συντελεστή κυμάτωσης (r). Ο συντελεστής κυμάτωσης υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$r = [V_{rip(rms)} / V_{dc}] * 100\% \quad (1)$$

Όπου:

r ο συντελεστής κυμάτωσης

V_{rip} η τάση κυμάτωσης (rms)

VDC η τάση εξόδου με πυκνωτή (άκρα της RL) που μετράται με βολτόμετρο DC

Η σχέση που συνδέει τη $V_{rip(p-p)}$ με τη $V_{rip(rms)}$ είναι :

$$V_{rip(rms)} = V_{rip(p-p)} / \sqrt{3} \quad (2)$$

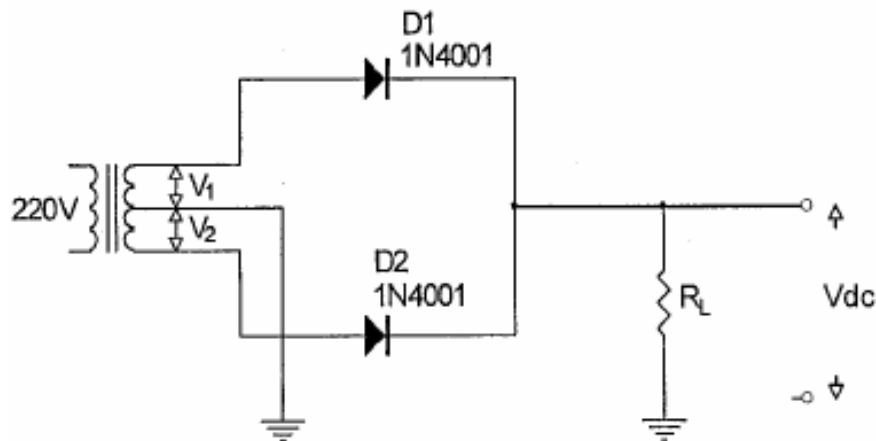
Ο πυκνωτής εκφορτίζεται στο διάστημα T_1 και φορτίζει στο διάστημα T_2 . Το άθροισμα $T_1 + T_2$ είναι σταθερό και ίσο με T που είναι η περίοδος της συχνότητας της ΔΕΗ. Αν τοποθετηθεί μεγαλύτερος πυκνωτής, θα δέχεται περισσότερα φορτία και θα εκφορτίζεται πιο αργά. Σε περιπτώσεις μεγαλύτερης τιμής αντίστασης και πάλι ο πυκνωτής θα εκφορτίζεται πιο αργά μέσα από αυτήν. Συνεπώς και στις δυο περιπτώσεις το T_1 μεγαλώνει ενώ το T_2 μικραίνει άρα και η κυμάτωση.

2.2. Διπλή Ανόρθωση

Η διπλή ανόρθωση μπορεί να γίνει με δυο τρόπους, είτε με δυο διόδους, είτε με τέσσερις διόδους. Στα παρακάτω υποκεφάλαια οι δυο τρόποι εξετάζονται διεξοδικά.

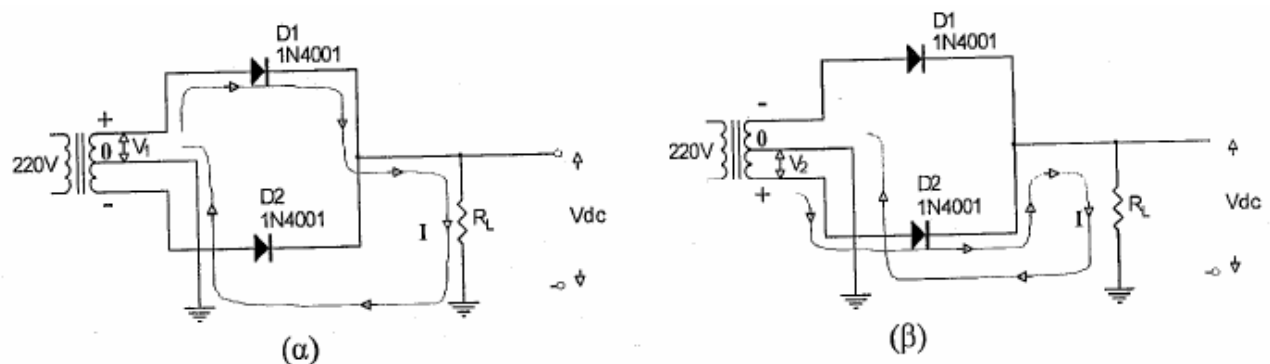
2.2.1. Διπλή Ανόρθωση με Δυο Διόδους

Στη διπλή ανόρθωση με δυο διόδους συνδέονται οι δυο διόδοι στο δευτερεύον ενός Μ/Τ, ο οποίος όμως πρέπει να έχει δυο τυλίγματα με μεσαία λήψη όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7: Διπλή ανόρθωση με δυο διόδους

Το κάθε τυλίγμα αποτελεί ξεχωριστή πηγή με τάσεις V_1 και V_2 , ίδιου μέτρου με διαφορά φάσης 180° . Όταν εφαρμοστεί η μια ημiperiodos της τάσης του δικτύου στο πρωτεύον του Μ/Τ, στα δευτερεύοντα τυλίγματα θα εμφανιστούν οι τάσεις V_1 και V_2 όπως φαίνεται στο Σχήμα 8 (α) και (β) αντίστοιχα. Στην άλλη ημiperiodo της τάσης του δικτύου θα εμφανιστούν ανάποδα.



Σχήμα 8: Πολικότητες κατά τη διπλή ανόρθωση με δυο διόδους

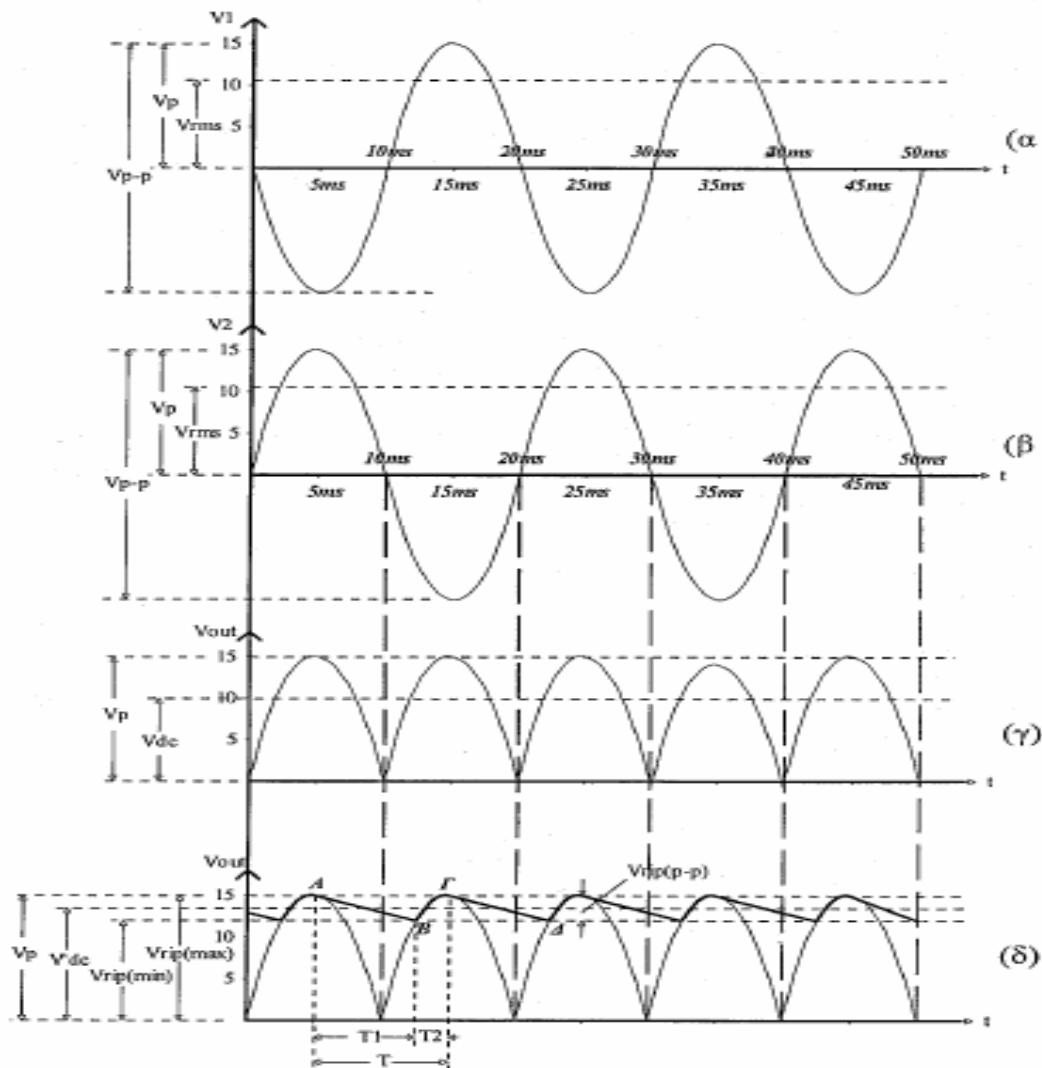
Οι δίοδοι συνδέονται μια σε κάθε τυλίγμα, δημιουργώντας δυο ξεχωριστά κυκλώματα απλής ανόρθωσης που δουλεύουν εναλλάξ. Στη θετική ημιπερίοδο δουλεύει μόνο η D_1 και στην αρνητική μόνο η D_2 . Η τάση που τελικά ανορθώνεται είναι του ενός μόνο τυλίγματος του M/T .

Βάση της υπόθεσης ότι εμφανίζεται πρώτα η θετική ημιπερίοδος, οι πολικότητες είναι όπως φαίνονται στο Σχήμα 8-α. Το (+) επάνω, το (-) κάτω και το (0) στη μέση. Το (0) αποτελεί και το σημείο αναφοράς των μετρήσεων, δηλαδή τη γείωση του κυκλώματος. Από τις τάσεις V_1 και V_2 , μόνο η V_1 είναι ενεργή γιατί πολώνει ορθά τη D_1 και δημιουργείται κύκλωμα, ενώ η V_2 είναι ανενεργή γιατί πολώνει ανάστροφα τη D_2 και δε δημιουργείται κύκλωμα. Επομένως υπάρχει κύκλωμα μεταξύ $+V_1$, D_1 , RL και το ρεύμα θα ακολουθήσει το δρόμο του Σχήματος 8-α..

Βάση της υπόθεσης ότι εμφανίζεται η αρνητική ημιπερίοδος, οι πολικότητες είναι όπως φαίνονται στο Σχήμα 8-β. Το (-) επάνω, το (+) κάτω και το (0) πάλι στη μέση. Από τις τάσεις V_1 και V_2 , μόνο η V_2 είναι ενεργή γιατί πολώνει ορθά τη D_2 και δημιουργείται κύκλωμα, ενώ η V_1 είναι ανενεργή γιατί πολώνει ανάστροφα τη D_1 και δε δημιουργείται κύκλωμα. Επομένως υπάρχει κύκλωμα μεταξύ $+V_2$, D_2 , RL . Το ρεύμα τώρα θα ακολουθήσει το δρόμο του Σχήματος 8-β.

Σύμφωνα με τα παραπάνω παρατηρείται ότι μια λειτουργεί η μια δίοδος και μια η άλλη. Το ρεύμα (I) όμως και στις δυο περιπτώσεις περνάει μέσα από την αντίσταση RL με την ίδια φορά. Έτσι η τάση εξόδου έχει τη μορφή της κυματομορφής (Σχήμα 9-γ). Αυτό το ρεύμα που ρέει μέσα από το φορτίο ονομάζεται πλήρως ανορθωμένο ρεύμα και η αντίστοιχη τάση στα άκρα του φορτίου ονομάζεται πλήρως ανορθωμένη τάση. Η όλη διαδικασία ονομάζεται διπλή ανόρθωση.

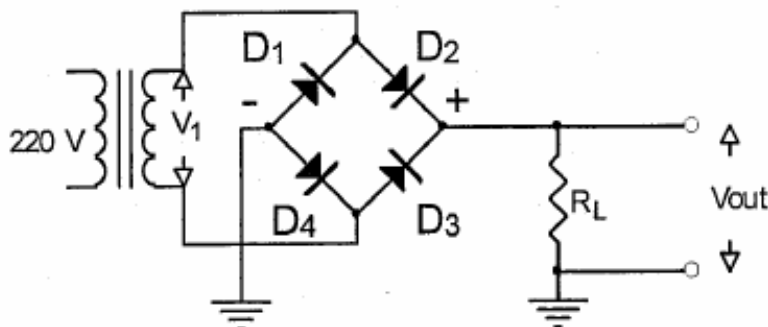
Παρατηρώντας την ανορθωμένη τάση είναι εμφανές ότι αυτή έχει τη μισή περίοδο από αυτή που εφαρμόστηκε, έχει δηλαδή τη διπλάσια συχνότητα (100 Hz). Επίσης η μέγιστη τάση που λαμβάνεται είναι η μισή από όση βγάζει ο M/T από το ένα του άκρο ως το άλλο.



Σχήμα 9 : (α) Τάση δικτύου ΔΕΗ, (β) Τάση στην έξοδο του μετασχηματιστή, (γ) Διπλή ανόρθωση χωρίς πυκνωτή εξομάλυνσης, (δ) Διπλή ανόρθωση με πυκνωτή εξομάλυνσης.

2.2.2. Διπλή Ανόρθωση με Γέφυρα

Στη διπλή ανόρθωση με γέφυρα συνδέονται τέσσερις διόδοι στο δευτερεύον ενός Μ/Τ, χωρίς μεσαία λήψη όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.



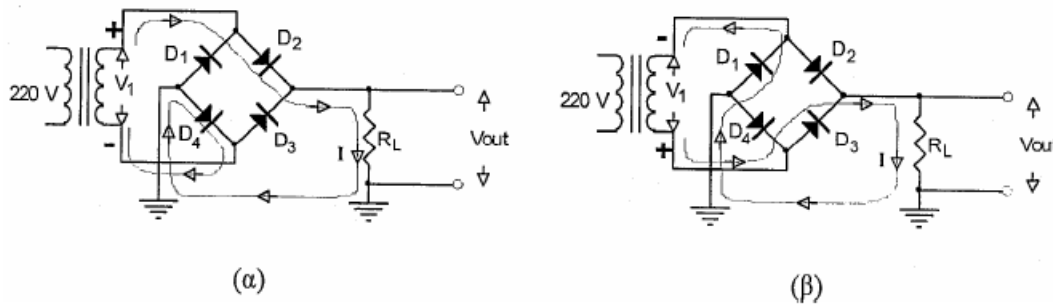
Σχήμα 10: Διπλή ανόρθωση με γέφυρα

Οι διόδοι συνδέονται ως εξής: οι δύο διόδοι π.χ. D_2 και D_3 με τις καθόδους ενωμένες να αποτελούν την έξοδο (+). Οι άλλες δύο διόδοι D_1 και D_4 με τις ανόδους ενωμένες να αποτελούν την έξοδο (-). Τέλος ενώνονται μεταξύ τους τα δυο αυτά συμπλέγματα και τα σημεία της ένωσης τους συνδέονται στο δευτερεύον του Μ/Τ μεταξύ των σημείων (+) και (-) συνδέεται το φορτίο R_L .

Υποθέτοντας τώρα ότι εμφανίζεται πρώτα η θετική ημiperίoδος, η πολικότητα στο δευτερεύον του Μ/Τ είναι όπως φαίνονται στο Σχήμα 11-α. Το (+) επάνω, το (-) κάτω. Οι διόδοι D_2 και D_4 πολώνονται ορθά και άγουν, ενώ οι D_1 και D_3 πολώνονται ανάστροφα και δεν άγουν. Οπότε δημιουργείται κύκλωμα μεταξύ + V_1 , D_2 , R_L , D_4 και - V_1 . Το ρεύμα θα ακολουθήσει το δρόμο του Σχήματος 11-α.

Στην αρνητική ημiperίoδος, η πολικότητα στο δευτερεύον του Μ/Τ είναι όπως φαίνονται στο Σχήμα 11-β. Το (-) επάνω, το (+) κάτω. Οι διόδοι D_1 και D_3 πολώνονται ορθά και άγουν, ενώ οι D_2 και D_4 πολώνονται ανάστροφα και δεν άγουν. Οπότε

δημιουργείται κύκλωμα μεταξύ $+V_1$, D_3 , R_L , D_1 και $-V_1$ το ρεύμα θα ακολουθήσει το δρόμο του Σχήματος 11-β.

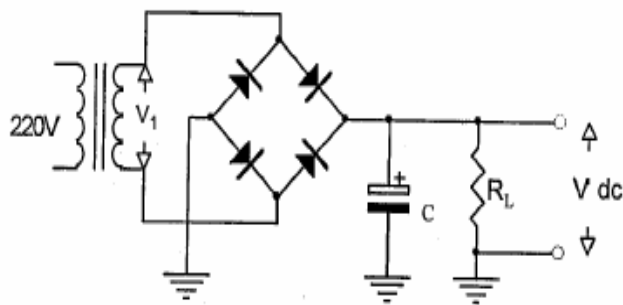


Σχήμα 11: Διπλή ανόρθωση με γέφυρα (α) θετική ημιπερίοδος και (β) αρνητική ημιπερίοδος

Παρατηρείται λοιπόν ότι στη μια ημιπερίοδο λειτουργούν οι δύο διόδοι και στην άλλη οι άλλες δύο. Το ρεύμα (I) όμως και στις δυο περιπτώσεις περνάει μέσα από την αντίσταση R_L με την ίδια φορά. Έτσι η τάση που παίρνεται στην έξοδο έχει και πάλι τη μορφή της κυματομορφής (Σχήμα 9-γ). Το ρεύμα που ρέει μέσα από το φορτίο ονομάζεται πλήρως ανορθωμένο ρεύμα και η αντίστοιχη τάση στα άκρα του φορτίου ονομάζεται πλήρως ανορθωμένη τάση. Η όλη διαδικασία ονομάζεται ανόρθωση με γέφυρα.

2.2.3. Διπλή Ανόρθωση με Πυκνωτή Εξομάλυνσης

Στην περίπτωση που τοποθετηθεί ένας πυκνωτής παράλληλα με την αντίσταση R_L (Σχήμα 12), τότε με την ίδια λογική που προαναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο θα διεξαχθεί η κυματομορφή του Σχήματος 9-δ.



Σχήμα 12: Διπλή ανόρθωση χωρίς πυκνωτή εξομάλυνσης

Στη θετική ημiperίοδο και μέχρι να πάρει τη μέγιστη τιμή, ο πυκνωτής φορτίζεται γρήγορα στην τάση κορυφής από την πηγή μέσα από τη μικρή αντίσταση των δυο διόδων που άγουν, μειωμένη βέβαια κατά $1,4\text{ V}$ που κρατάνε στα άκρα τους οι διόδοι, σημείο Α. Καθώς η τάση εισόδου αρχίζει να μειώνεται, οι διόδοι παύουν να άγουν και ο πυκνωτής εκφορτίζεται αργά μέσα από τη μεγάλη αντίσταση φορτίου R_L , μέχρι το σημείο Β (Σχήμα 9-δ). Στην αρνητική ημiperίοδο, ξαναφορτίζεται ο πυκνωτής στην τιμή κορυφής μέσα από τις άλλες δυο διόδους μέχρι το σημείο Γ και όταν η τάση εισόδου της αρνητικής ημiperιόδου αρχίσει και αυτή να μειώνεται, οι διόδοι παύουν να άγουν και ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέχρι το σημείο Δ (Σχήμα 9-δ). Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται συνεχώς.

Η τάση κυμάτωσης V_{rip} που δημιουργείται είναι σαφώς μικρότερη από αυτή της απλής ανόρθωσης, γιατί ο πυκνωτής εκφορτίζεται με τον ίδιο ρυθμό μεν, αλλά στο μισό χρόνο από ότι στην απλή ανόρθωση, επομένως όταν έρθει η επόμενη ημiperιόδος βρίσκει τον πυκνωτή με περισσότερα φορτία και συνεπώς με μεγαλύτερη τάση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Μεθοδολογία Πειράματος

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές κεραίες που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και ο ορθός τρόπος τοποθέτησης τους για την αποτελεσματική λειτουργία των κυκλωμάτων. Επίσης, περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής της τεχνητής γείωσης που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραματικών μετρήσεων, άλλα και το Θεωρητικό Υπόβαθρο για τα κυκλώματα Διπλασιαστή Τάσης.

3.1. Κεραία

Κατά την πειραματική διαδικασία που διεξάχθηκε στα κυκλώματα δόθηκαν ως είσοδοι διάφοροι τύποι κεραιών. Τα πρώτα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με κεραίες που αποτελούνται από απλά σύρματα χαλκού, τα οποία κατασκευάστηκαν απογυμνώνοντας καλώδια Ethernet. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για διάφορα τυχαία μήκη καλωδίων ώστε να βρεθεί αρχικά το βέλτιστο μήκος κεραίας στο δεδομένο εύρος τιμών. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με διπολική κεραία τύπου (AM Loop Antenna), η οποία απεικονίζεται στη Φωτογραφία 1, μέσω της οποίας συλλέγονται ραδιοσυχνότητες σε περιοχή συχνοτήτων μεταξύ των 300–3000 kHz. Με τη χρήση της παραπάνω κεραίας εξάχθηκαν τα πρώτα ικανοποιητικά αποτελέσματα τάσης εξόδου της τάξεως των 1,5 - 2 V.



Φωτογραφία 1: Κεραία AM Loop Antenna

Μετά από μια σειρά διάφορων δοκιμών για την εύρεση της βέλτιστης κεραίας, οι πειραματικές δοκιμές με τα καλύτερα αποτελέσματα διεξάγονται με τη χρήση κεραίας η οποία αποτελείται από καλώδιο χαμηλού θορύβου διαστάσεων 2x0,5x18m (Φωτογραφία 2), του οποίου η μια άκρη μονώθηκε πάνω σε ένα κομμάτι πλαστικού και τοποθετήθηκε σε ύψος περίπου 19 m, ενώ η άλλη άκρη του αποτελεί την είσοδο του κυκλώματος. Σε κάποια από τα πειράματα (Διάταξη 4, 9, 10) χρησιμοποιήθηκε και δεύτερη κεραία με τα ίδια χαρακτηριστικά, με σκοπό την ενίσχυση της τάσης και της έντασης του ρεύματος της εξόδου, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του Πινάκα Αποτελεσμάτων στο πειραματικό μέρος (Πίνακας 4.1). Αξίζει να σημειωθεί και να αναφερθεί, ότι οι μετρήσεις που έγιναν χρησιμοποιώντας το κύκλωμα της Διάταξης 1 για τις δυο διαφορετικές κεραίες του ίδιου τύπου έδωσαν και διαφορετικά αποτελέσματα.



Φωτογραφία 2: Καλώδιο χαμηλού θορύβου διαστάσεων 2x0,5x18m

Η κεραία η οποία τοποθετήθηκε σε μεγαλύτερο ύψος είχε και τα καλύτερα αποτελέσματα. Συνεπώς είναι αναγκαίο να αναφερθούν κάποια βασικά πράγματα ως προς την τοποθέτηση της κεραίας. Η κεραία θα πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν ψηλότερα, κατά την πορεία της για το κύκλωμα δεν πρέπει να βρίσκεται σε επαφή με αλλά αντικείμενα, δεν πρέπει να δημιουργεί γωνίες και τέλος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν τεντωμένη.

Τέλος, στο πείραμα της Διάταξης 17 χρησιμοποιήθηκε μονοπολική κεραία συντονισμένη στα 915 Mhz (Φωτογραφία 3), η οποία έκανε το κύκλωμα πιο μικρό άρα και συνάμα πιο εμπορικό, με καλά αποτελέσματα αλλά όχι συγκρίσιμα με αυτά της προαναφερθείσας κεραίας.



Φωτογραφία 3: Μονοπολική κεραία συντονισμένη στα 915Mhz

3.2. Γείωση

Η γείωση όπως είναι γνωστό είναι απαραίτητη για τη λειτουργία των κυκλωμάτων. Όσο πιο καλή είναι η γείωση τόσο πιο καλά είναι και τα αποτελέσματα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η τεχνική της συγκομιδής ενεργείας από ραδιοσυχνότητες για την άμεση τροφοδότηση αισθητήρων και για τη φόρτιση μπαταριών. Απώτερο σκοπό της εργασίας αποτελεί η λειτουργία τέτοιων κυκλωμάτων και σε οποιονδήποτε εξωτερικό χώρο (π.χ στην έξοχη, στην παράλια, στο χωράφι). Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε μια τεχνητή γείωση η οποία είναι μεταφέρσιμη και περιγράφεται ως ακολούθως.

Για την κατασκευή της γείωσης χρησιμοποιήθηκε χάλκινος σωλήνας μήκους 1,6 m, ο οποίος πρέπει να τοποθετηθείσε βάθος τουλάχιστον 1 m. Πάνω στο σωλήνα κολλήθηκε, με κολλητήρι και καλάι, καλώδιο ίδιων χαρακτηριστικών με αυτά της κεραίας (2Χ0,5Χ18) (Φωτογραφία 4). Έτσι η μια άκρη του καλωδίου είναι πάνω στο χάλκινο σωλήνα, ο οποίος βρίσκεται εντός του εδάφους όπως προαναφερθήκαμε, ενώ η δεύτερη άκρη πηγαίνει στο κύκλωμα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το καλώδιο που ξεκινά από το σωλήνα και καταλήγει στο κύκλωμα δεν πρέπει να ακουμπήσει στο έδαφος κατά την πορεία του για το κύκλωμα καθώς επίσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν τεντωμένο.



Φωτογραφία 4: Τεχνητή Γείωση

3.3. Αντλία Φορτίου (Charge Pump)

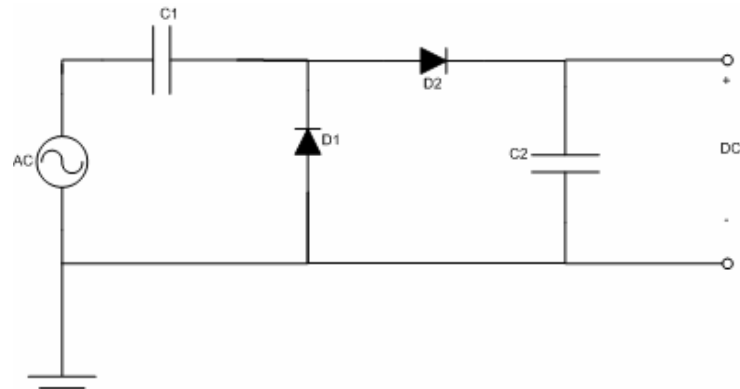
Η αντλία φορτίου είναι ένα κύκλωμα που όταν του δίνετε μια είσοδο σε AC (Alternating Current) είναι ικανή να παράγει στην έξοδο τάση σε DC (Direct Current), μεγαλύτερη από ότι θα μπορούσε να τροφοδοτήσει ένας απλός ανορθωτής. Στα κυκλώματα αυτά επιτυγχάνεται η μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές, όπου ανορθώνετε το σήμα AC και ανυψώνετε το επίπεδο DC. Η παραπάνω διαδικασία αποτελεί το βασικό “θεμέλιο” της μετατροπής ισχύος και χρησιμοποιείται για τη λειτουργία πολλών ηλεκτρονικών συσκευών.

Βεβαία τα κυκλώματα αυτά είναι πιο πολύπλοκα (όπως παρουσιάστηκαν πιο πάνω) από το κύκλωμα που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Τα κυκλώματα μετατροπής ρεύματος αποτελούνται από πολλά κυκλώματα προστασίας σε συνδυασμό με κυκλώματα μείωσης θορύβου. Στην πραγματικότητα πρόκειται για μια ρύθμιση ασφάλειας, όπου κάθε power-conversion κύκλωμα χρησιμοποιεί ένα μετασχηματιστή για να απομονώσει την είσοδο από την έξοδο. Η ρύθμιση αυτή αποτρέπει την υπερφόρτωση του κυκλώματος καθώς και τυχόν τραυματισμούς των χρηστών, μέσω της απομόνωσης των στοιχείων από αιχμές επί της γραμμής εισόδου.

Σε παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε επίπεδο πολύ χαμηλής ισχύος. Όπως προαναφέρθηκε κατά τη χρήση πολύπλοκων κυκλωμάτων οι απαιτήσεις σε ισχύ είναι μεγάλες, με αποτέλεσμα το υπό μελέτη κύκλωμα πιθανόν να οδηγηθεί σε αστοχία κατά τη λειτουργία του, καθώς η απαιτούμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από ότι η διαθέσιμη. Συνεπώς στη παρούσα εργασία κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν κυκλώματα με πιο απλή σχεδίαση.

Το κύκλωμα ανόρθωσης φορτίου είναι φτιαγμένο από πολλά επίπεδα διπλασιασμού τάσης (voltage doubler). Το κύκλωμα καλείται ως διπλασιαστής τάσης διότι θεωρητικά η τάση που λαμβάνεται κατά την έξοδο είναι διπλασία από αυτήν που δόθηκε στην είσοδο.

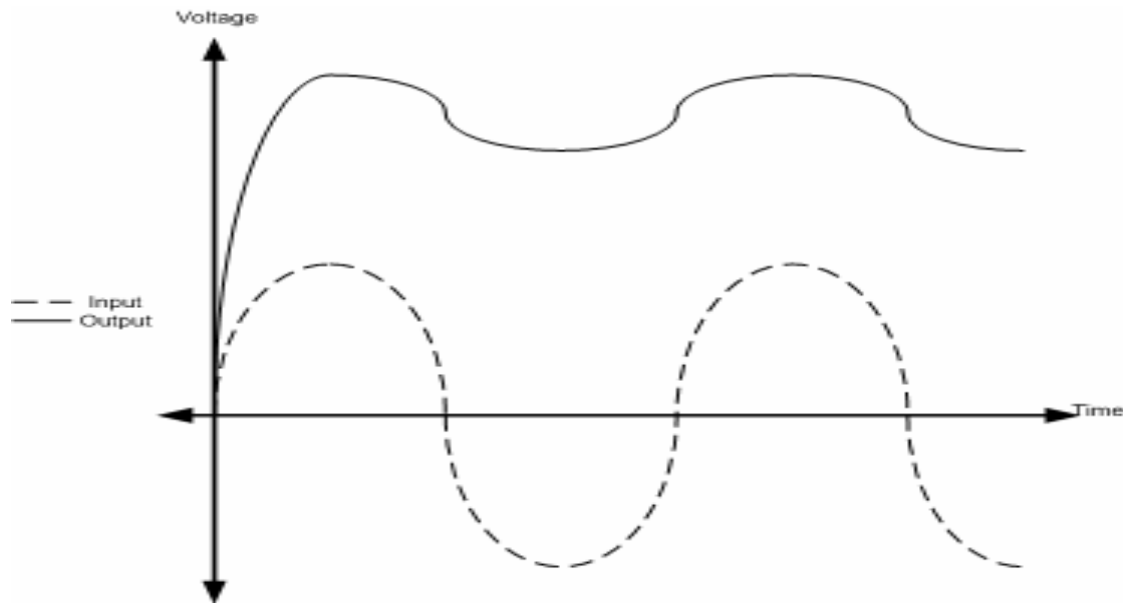
Στο Σχήμα 13 δίνεται το 1^ο επίπεδο του κυκλώματος του διπλασιαστή τάσης, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται κυκλώματα με πιο πολλά επίπεδα από διπλασιαστή τάσης.



Σχήμα 13: 1^ο Επίπεδο διπλασιαστή τάσης ('voltage doubler')

Τα κύματα ραδιοσυχνοτήτων ανορθώνονται από την δίοδο D_2 και των πυκνωτή C_2 κατά το θετικό μισό του κύκλου. Το ίδιο συμβαίνει και για το αρνητικό μισό από τα D_1, C_1 . Όμως κατά τη διάρκεια του θετικού μισού η αποθηκευμένη τάση στο C_1 από το αρνητικό μισό μεταφέρεται στο C_2 . Γι' αυτό η τάση C_2 είναι περίπου διπλασία από την τάση κορυφής της πηγής RF, εξ' αυτού και η ονομασία "voltage doubler".

Ικανοποιητικά αποτελέσματα λαμβάνονται όταν πολλά τέτοια κυκλώματα ενωθούν σε σειρά ή παράλληλα. Έτσι δημιουργούνται στοίβες όπως συμβαίνει και με τις μπαταρίες με στόχο την παραγωγή περισσότερης Τάσης (volt) στην έξοδο. *Μεγάλο ερώτημα αποτελεί το γιατί παράγεται περισσότερη τάση στην έξοδο από το πρώτο επίπεδο; Μήπως επειδή η έξοδος του επίπεδου είναι DC;* Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα είναι ότι η τάση είναι σχεδόν DC. Κατ' ουσίαν είναι ένα AC σήμα με DC_OFFSET. Αυτό είναι ισοδύναμο με το ότι το DC σήμα περιλαμβάνει θόρυβο όπως φαίνετε και στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 14).



Σχήμα 14: Κυματομορφή του voltage doubler

Σε αυτό το σημείο έρχονται να παίξουν το ρολό τους τα υπόλοιπα εν σειρά επίπεδα. Όποτε αν ένα ακόμα επίπεδο προστεθεί πάνω από το πρώτο, το μόνο κύμα που θα αντιλαμβάνεται το δεύτερο επίπεδο θα είναι ο θόρυβος του πρώτου επίπεδο. Αυτός ο θόρυβος στη συνέχεια διπλασιάζεται και προστίθεται στο DC του πρώτου επιπέδου. Έτσι θεωρητικά όσα πιο πολλά επίπεδα προστεθούν τόσο μεγαλύτερη θα είναι η τάση στην έξοδο του κυκλώματος ασχέτως από την είσοδο του.

Κάθε ανεξάρτητο επίπεδο που εμπεριέχει διπλασιαστές τάσης μπορεί να θεωρηθεί ως μπαταρία με ανοιχτό κύκλωμα τάσης εξόδου V_0 και εσωτερικής αντίστασης R_0 . Όταν “n” από αυτά τα κυκλώματα τοποθετούνται σε σειρά και συνδέονται με ένα φορτίο R_L η τάση εξόδου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{out} = \frac{nV_0}{nR_0 + R_L} R_L = V_0 \frac{1}{\frac{R_0}{R_L} + \frac{1}{n}} \quad (3)$$

Από την παραπάνω εξίσωση γίνεται κατανοητό ότι η τάση εξόδου V_{out} προσδιορίστηκε με την προσθήκη του R_0/R_L του $1/n$ και του V_0 .

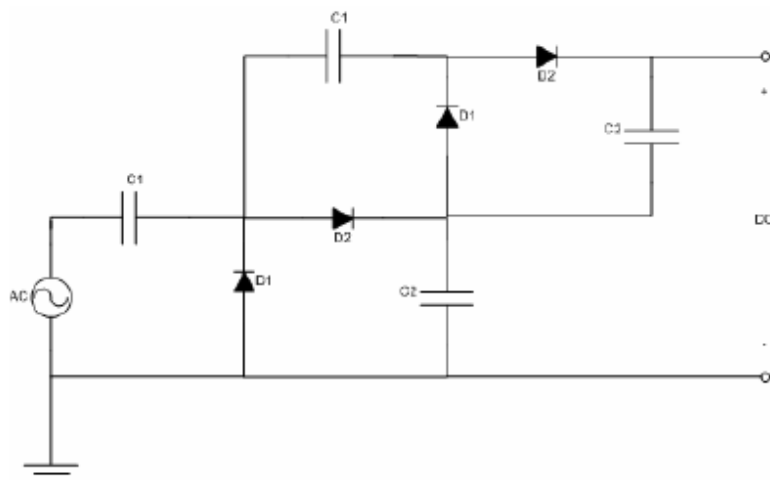
Με τα V_0 , R_0 , R_L σταθερές, διαπιστώνετε ότι όσο το “ n ” αυξάνεται, τότε η αύξηση της τάση εξόδου είναι μικρότερη κάθε φορά. Από κάποια στιγμή και μετά, το κέρδος τάσης είναι αμελητέο.

3.3.1. Προδιαγραφές του Συστήματος

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι κυρίως εμπειρική. Υπάρχουν πολλές μεταβλητές στο σύστημα που μπορεί να αλλάξουν την τάση εξόδου. Οι πυκνωτές σε κάθε επίπεδο πρέπει να βελτιστοποιηθούν, ώστε να καταγραφούν όσο το δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα. Ο αριθμός των επιπέδων πρέπει επίσης να καθοριστεί σε συνδυασμό με τις τιμές των πυκνωτών σε κάθε επίπεδο, ώστε να οδηγηθεί το κάθε κύκλωμα σε ένα αρκετά υψηλό επίπεδο τάσης με σκοπό την τροφοδότηση των αισθητήρων ή τη φόρτιση μπαταριών. Επίσης, ένας πυκνωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην έξοδο ως φίλτρο για να παρέχει ακόμα πιο ομαλό σήμα DC εξόδου, ώστε η τροφοδοτήση/φόρτιση αντίστοιχα, να γίνεται με σταθερότητα και αξιοπιστία. Στα πειράματα η τιμή του πυκνωτή που επιλέχτηκε ήταν (1000μf στα 25V). Πραγματικά δεν υπάρχουν σταθερές παράμετροι για οποιαδήποτε από αυτές τις τιμές. Όπως συζητήθηκε στο Κεφάλαιο 1.1. έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες εργασίες, οι οποίες έχουν θέσει τις βάσεις για την έρευνα αυτή. Σε μια από τις εργασίες προβλεπόταν η άμεση φόρτιση μπαταρίας μέσω μιας αντλίας φορτίου. Τα αποτελέσματα του πειράματος ήταν επαρκή για να παρέχουν ένα σημείο εκκίνησης ταχύτερης φόρτισης καθώς και άμεσης τροφοδότησης αισθητήρων θερμοκρασίας χαμηλής ισχύος.

3.3.2. Αριθμός Επιπέδων

Ο αριθμός των σταδίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 15, έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην τάση εξόδου. Η χωρητικότητα, τόσο στα στάδια όσο και στο τέλος του κυκλώματος, επηρεάζει την ταχύτητα παροδικής απόκρισης αλλά και τη σταθερότητα του σήματος εξόδου. Ο αριθμός των σταδίων ουσιαστικά είναι ανάλογος με το μέγεθος της τάσης που λαμβάνεται στην έξοδο του συστήματος. Γενικά, η τάση της εξόδου αυξάνεται καθώς ο αριθμός των σταδίων αυξάνεται (μέχρι ενός σημείου όπως απορρέει από την Εξίσωση 3). Αυτό οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί ο πολλαπλασιαστής τάσης σύμφωνα με όσα εξηγήθηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 15: Κύκλωμα δυο επιπέδων του διπλασιαστή τάσης Dickson

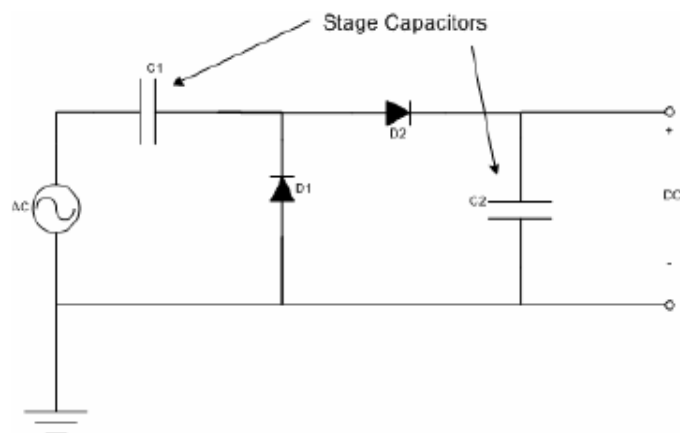
3.3.3. Χωρητικότητα Σταδίου

Η χωρητικότητα σε κυκλώματα με επίπεδα, όπως στο Σχήμα 15, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί διότι μερικές φορές ελάχιστη αλλαγή της χωρητικότητας έχει δραστική επίδραση στην τάση εξόδου, ενώ άλλες φορές η αλλαγή αυτή είναι αμελητέα συνεπώς η παράμετρος της χωρητικότητας χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευαισθησία. Υπάρχουν δύο

διαφορετικά ζευγάρια τιμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αλλαγή της χωρητικότητας. Η πρώτη και πιο προφανή, είναι η διατήρηση σταθερών τιμών των πυκνωτών σε όλα τα επίπεδα, όπως και έγινε για όλα τα τελικά κυκλώματα της εργασίας. Ένας δεύτερος τρόπος είναι η σταδιακή μείωση των τιμών των πυκνωτών κάθε επίπεδου, καθώς ο αριθμός των επιπέδων αυξάνεται. Κάθε επίπεδο χρησιμοποιεί δύο πυκνωτές, όπου οι τιμές αυτών διατηρούνται οι ίδιες, η αλλαγή γίνεται από το ένα επίπεδο στο επόμενο. Αν το πρώτο επίπεδο χρησιμοποιεί πυκνωτές 100pF, τότε το επόμενο επίπεδο θα χρησιμοποιήσει πυκνωτές 50pF. Έτσι, η μείωση της τιμής των πυκνωτών κατά το ήμισυ στο επόμενο επίπεδο φαίνεται λογική. Το γεγονός αυτό προέρχεται από την εξίσωση φόρτισης πυκνωτή που δίνεται από την Εξίσωση 4.

$$Q = C \times v(t) \quad (C_b) \quad (4)$$

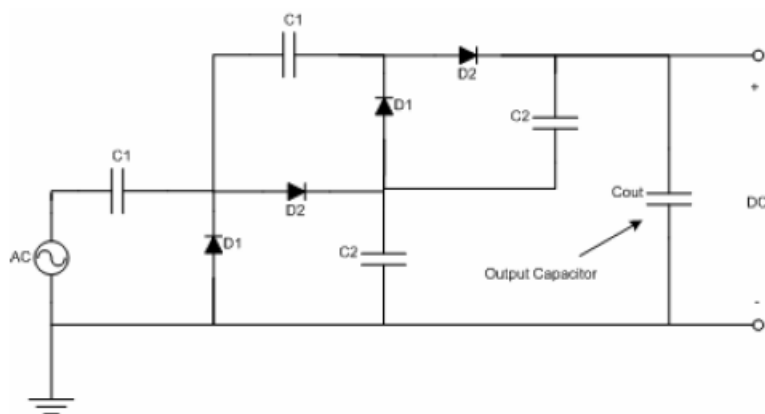
Από την Εξίσωση 4 παρατηρείται ότι η τάση του πυκνωτή είναι αντιστρόφως ανάλογη της χωρητικότητας σε σχέση με το φορτίο. Μέσω της σχέσης αυτής περιγράφεται η περίπτωση όπου όταν η τάση σε ένα σύστημα αυξάνεται απαιτούνται χαμηλότερες τιμές χωρητικότητας ώστε να διατηρηθεί σταθερό το φορτίο. Αυτές οι δύο διαφορετικές μέθοδοι χρήσης της χωρητικότητας κάθε επιπέδου πραγματοποιήθηκαν πειρατικά σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 16: Πυκνωτές στο 1^ο επίπεδο του διπλασιαστή τάσης

3.3.4. Χωρητικότητα Εξόδου

Η χωρητικότητα εξόδου αποτελεί τη μεταβλητή με τη μικρότερη επίδραση επί του συνολικού συστήματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 17. Γενικά, η τιμή του πυκνωτή επηρεάζει μόνο την ταχύτητα της παροδικής απόκρισης, όπου στα πειράματα ήταν σχετικά μεγάλη (1000μf 25V). Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της χωρητικότητας εξόδου, τόσο πιο αργός είναι ο χρόνος της τάσης ανόδου στην έξοδο. Αυτό δεν σημαίνει ωστόσο ότι μικρότερες τιμές πυκνωτών θα ανταποκρίνονταν καλύτερα ή αντιθέτως ότι δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται πυκνωτές στην έξοδο. Χωρίς πυκνωτή στην έξοδο δεν θα υπήρχε ένα καλό σήμα DC εξόδου, αλλά περισσότερο ένα ολισθαίνον AC σήμα (offset AC signal) εξόδου, πράγμα που υποδηλώνει την ύπαρξη μιας έξοδο συνεχούς ρεύματος (DC) με κυματισμός.



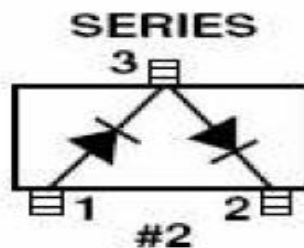
Σχήμα 17: Κύκλωμα δυο επιπέδων διπλασιαστή τάσης με πυκνωτή στην έξοδο

3.3.5. Μοντέλα Διόδων

Τα δυο διαφορετικά μοντέλα διόδων που χρησιμοποιηθήκαν στα πειράματα ήταν η Agilent HSMS-2822 δίοδος Schottky και η 1N34 δίοδος γερμανίου. Η δίοδος 1N34 αποτέλεσε την κυρία δίοδος που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα, τα όποια έγιναν στο breadboard, κυρίως για την ευκολία που παρείχε κατά τη διαδικασία αλλαγής των

συνδεσμολογιών, εν συγκρίσει με την Agilent Schottky δίοδο. Η Agilent Schottky δίοδος είναι smd και συνεπώς είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί για πειραματικό σκοπό, εφόσον θα έπρεπε να κολλάτε και να ξεκόλλητε για κάθε διαφορετική συνδεσμολογία, πράγμα που θα καθιστούσε την πειραματική διαδικασία δύσκολη, χρονοβόρα και δαπανηρή καθώς η τιμή της διόδου HSMS-2822 είναι σχετικά ακριβή. Γενικά, η σειρά διόδων της Agilent είναι κατάλληλη για κυκλώματα RF mixer/detector.

Εφόσον αρχικά η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε με τη δίοδο 1N34A, τα βέλτιστα αποτελέσματα τα οποία αξιολογήθηκαν βάσει της ισχύος, εν συνεχεία μελετήθηκαν με τη χρήση διαφορετικής διόδου, HSMS-2822. Η HSMS-2822 χρησιμοποιήθηκε με σκοπό τη μείωση του μεγέθους του τυπωμένου κυκλώματος, καθιστώντας έτσι το κύκλωμα αποδοτικότερο και κατάλληλο για εμπορικό σκοπό. Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται το εσωτερικό μέρος της HSMS 2822, η οποία αποτελείται από δυο διόδους συνδεδεμένες σε σειρά.



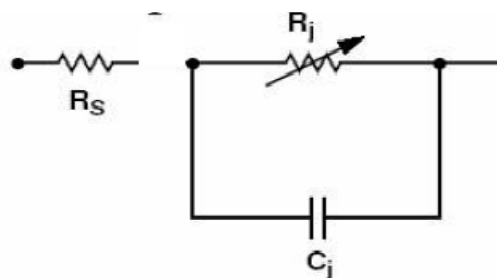
Σχήμα 18: Εσωτερικό της διόδου HSMS-2822

Οι παράμετροι μοντελοποίησης των διόδων σειράς HSMS 282x, δίνονται από την εταιρία Agilent σε φυλλάδια δεδομένων (datasheet). Αυτές οι παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση του προγράμματος SPICE. Επίσης, το πρόγραμμα Ansoft Designer είναι σε θέση να λαμβάνει αυτές τις παραμέτρους για σκοπούς Μοντελοποίησης-Προσομοίωσης. Οι παράμετροι SPICE παρουσιάζονται στον ακόλουθο συγκεντρωτικό Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Παράμετροι Διόδου HSMS-282x για το SPICE

Parameter	Units	Value
B_V	V	15
C_{J0}	pF	0.7
E_G	eV	0.69
I_{BV}	A	1E-4
I_S	A	2.2E-8
N	<i>no units</i>	1.08
R_S	Ω	6.0
P_B	V	0.65
P_T	<i>no units</i>	2
M	<i>no units</i>	0.5

Η μοντελοποίηση γίνεται με την μετατροπή της διόδου σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα με χρήση παθητικών στοιχείων. Αυτά τα ισοδύναμα εξαρτήματα περιγράφονται από τις παραμέτρους στον Πίνακα 3.1. Το ισοδύναμο κύκλωμα για μια δίοδο δείχνεται στο Σχήμα 19.

**Σχήμα 19:** Το ισοδύναμο κύκλωμα της διόδου

Στο παρόν ισοδύναμο κύκλωμα, R_S είναι η αντίσταση σειράς και C_j είναι η χωρητικότητα διασταύρωσης, οι οποίες και δίνονται στον Πίνακα 3.1. Οι δυο αυτοί παράγοντες έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στη δίοδο καθώς ενεργοποιούν την τάση και τον χρόνο ανόδου. Όσο χαμηλότερη είναι η αντίσταση σειράς, τόσο χαμηλότερη είναι η τάση που απαιτείται για να ενεργοποιηθεί η δίοδος και όσο χαμηλότερη είναι η χωρητικότητα διασταύρωσης τόσο πιο γρήγορα αυξάνεται η τάση. Ένα μεγάλο C_j και

R_s θα μειώσουν την τάση εξόδου, ειδικά σε υψηλές συχνότητες (π.χ. τα 915MHz στα όποια έχουν γίνει πολλές προσομοιώσεις από παλαιότερες εργασίες). Η αντίσταση R_j είναι η αντίσταση διασταύρωσης και υπολογίζεται από την Εξίσωση 5 βάσει παραμέτρων του Πίνακα 3.1. Η Εξίσωση 5 προέρχεται από το φύλλο δεδομένων (datasheet) των διόδους και δίνεται ως εξής:

$$R_j = \frac{8.33 \times 10^{-5} \cdot N \cdot T}{I_b + I_s} \quad (5)$$

Για την Εξίσωση 5 οι τιμές των N και I_s δίνονται από τις παραμέτρους του SPICE του Πίνακα 3.1. Το N είναι ο παράγοντας ιδανικότητας, το I_s είναι το ρεύμα κορεσμού ενώ οι δύο άλλες παράμετροι εφαρμόζονται εξωτερικά. Ως παράμετρος T είναι η θερμοκρασία και δίνεται σε βαθμούς Kelvin, ενώ το I_b είναι το ρεύμα πόλωσης για το κύκλωμα, αν υπάρχει, και όπου υπάρχει αυτό. Οι παράμετροι T και I_b παρέχονται από το πρόγραμμα προσομοίωσης. Με αυτές τις παραμέτρους το πρόγραμμα μπορεί να κάνει ακριβή προσομοίωση.

Το άλλο μοντέλο διόδου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση ήταν το 1N34A διόδος γερμανίου. Αυτό είναι ένα παλιό μοντέλο που έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές RF λόγω ορισμένων χαρακτηριστικών, τα όποια είναι η χαμηλή τάση ανόδου και ο γρήγορος χρόνος ανόδου. Το πρόβλημα με το μοντέλο αυτό είναι ότι υπάρχουν πολύ λίγες πληροφορίες διαθέσιμες. Μόνο ένα μοντέλο SPICE μπορεί να δώσει τις κατάλληλες παραμέτρους για την παρούσα διόδο, ενώ όταν χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα Ansoft Designer, το κύκλωμα δεν λειτουργεί καθόλου. Έτσι για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων θα χρησιμοποιηθούν αναγκαστικά διόδοι smd της Agilent HSMS-282x. Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε περισσότερο σε αποτελέσματα για πραγματικό χρόνο και όχι σε περιβάλλον προσομοίωσης, απλά τέθηκαν βάσεις για την προσομοίωση των κυκλωμάτων σε μεταγενέστερες εργασίες.

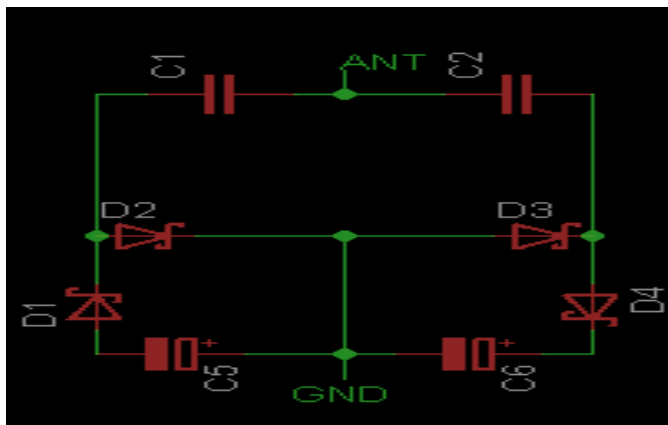
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο: Πειραματικό Μέρος και Αποτελέσματα

4.1. Στάδιο Διερεύνησης

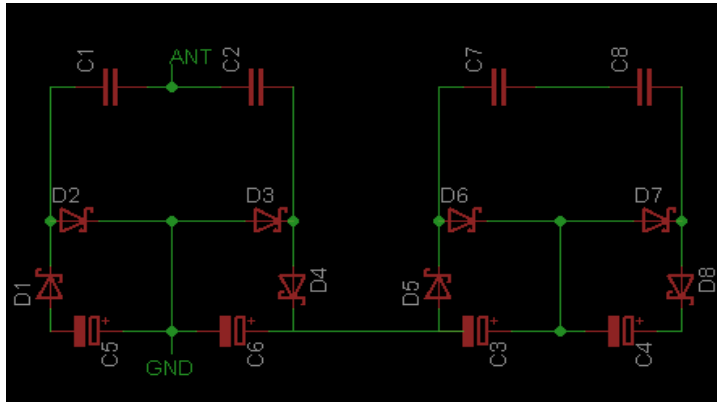
Κατά την πειραματική διαδικασία όλα τα κυκλώματα του Πινάκα 4.1. δοκιμάστηκαν αρχικά με τη χρήση του breadboard κυρίως για ευκολία κατά την αλλαγή των συνδέσεων, τη μείωση του χρόνου και του κόστους των πειραματικών μετρήσεων καθώς ώστε να πραγματοποιηθεί και η τύπωση των κυκλωμάτων. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για διαφόρους τύπους κεραιών, οι οποίες περιγράφηκαν παραπάνω. Σε όλα τα κυκλώματα χρησιμοποιήθηκε επίσης τεχνητή γείωση, μέσω της οποίας μπορούν να λαμβάνονται αποτελέσματα σε εξωτερικούς χώρους. Τέλος, για τα βέλτιστα αποτελέσματα βάσει της παραγόμενης ισχύος, τυπώθηκαν τα αντίστοιχα κυκλώματα με απώτερο σκοπό την εμπορική εκμετάλλευσή τους (Πίνακας 4.2).

Στις Διατάξεις 1- 18 που ακολουθούν απεικονίζονται τα κυκλώματα της πειραματικής διαδικασίας με τη χρήση breadboard.

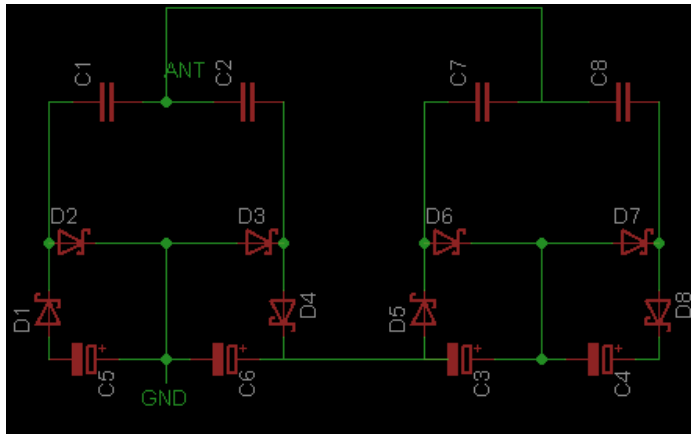
Διάταξη 1: Βασικό Κύκλωμα



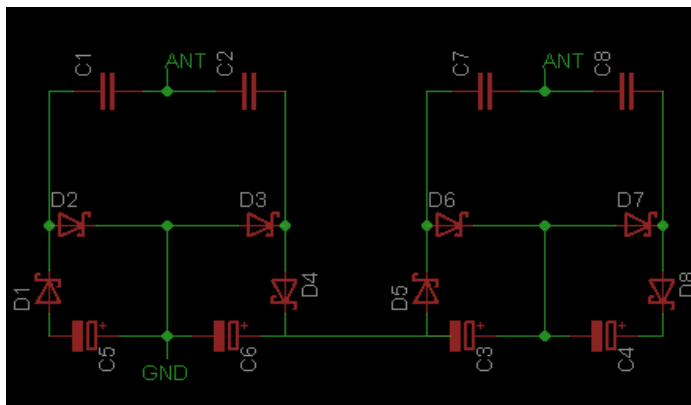
Διάταξη 2: Κυκλώματα σε Σειρά



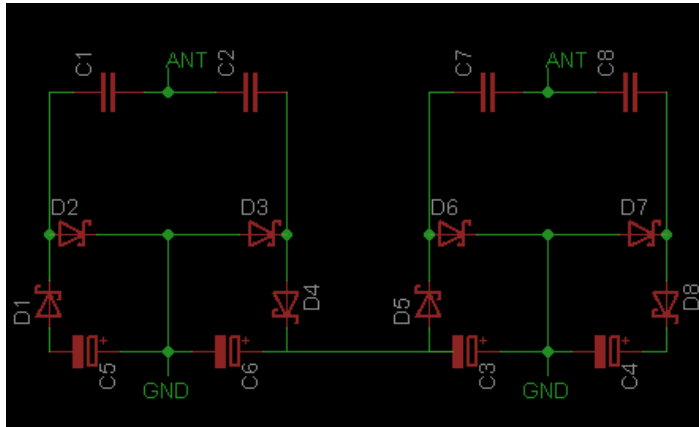
Διάταξη 3: Κυκλώματα σε Σειρά



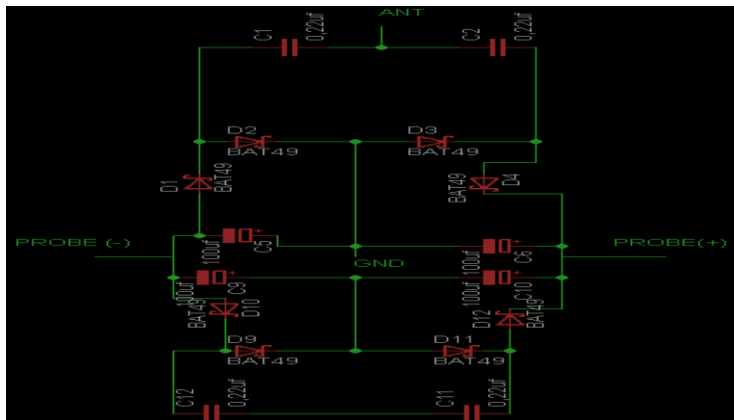
Διάταξη 4: Κυκλώματα σε Σειρά



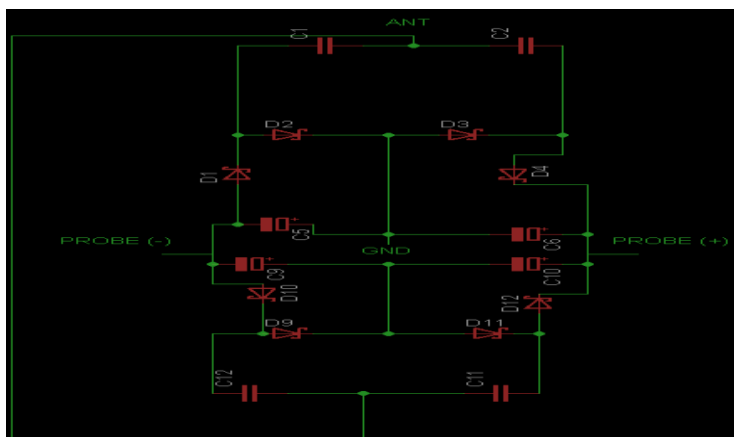
Διάταξη 5: Κυκλώματα σε Σειρά



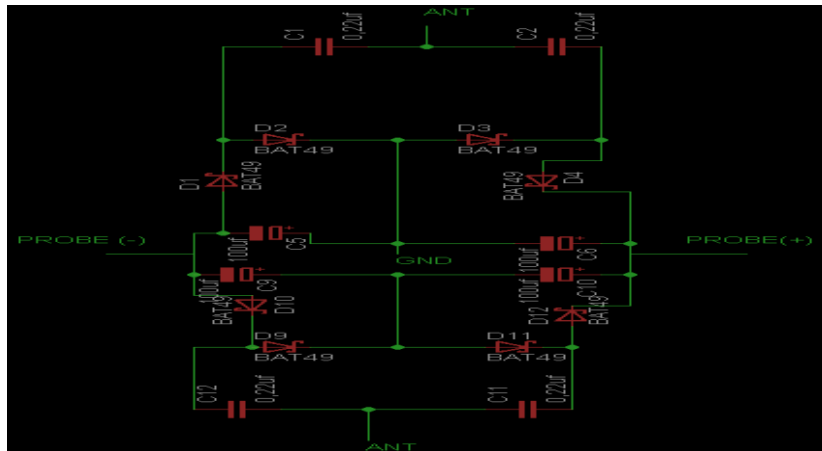
Διάταξη 6: Παράλληλα Κυκλώματα



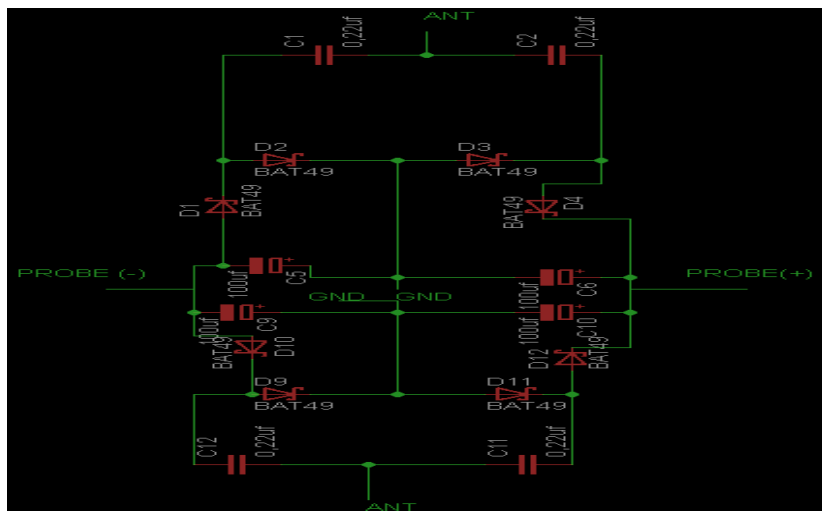
Διάταξη 7: Παράλληλα Κυκλώματα



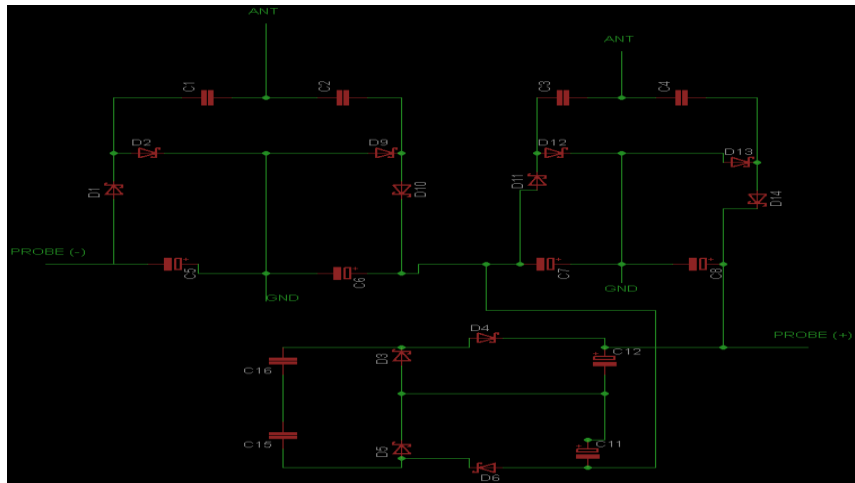
Διάταξη 8: Παράλληλα Κυκλώματα



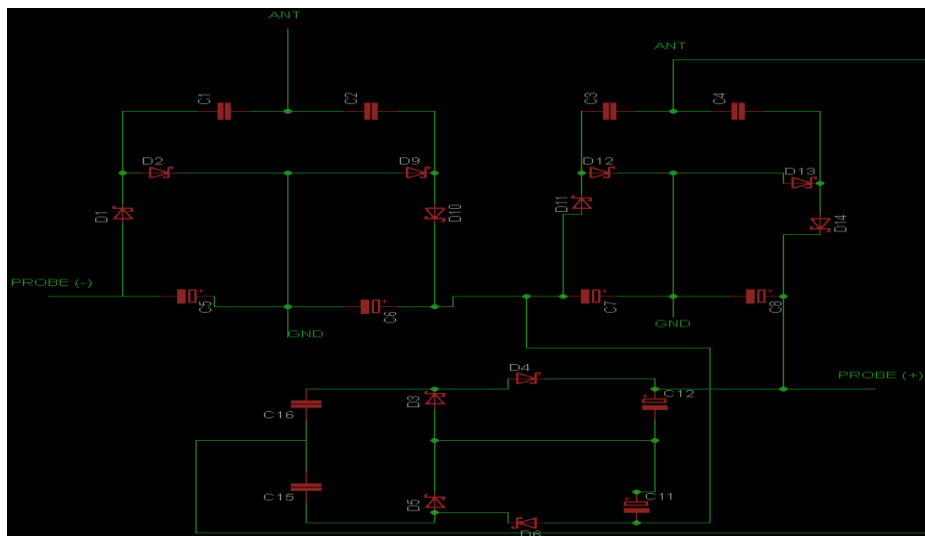
Διάταξη 9: Παράλληλα Κυκλώματα



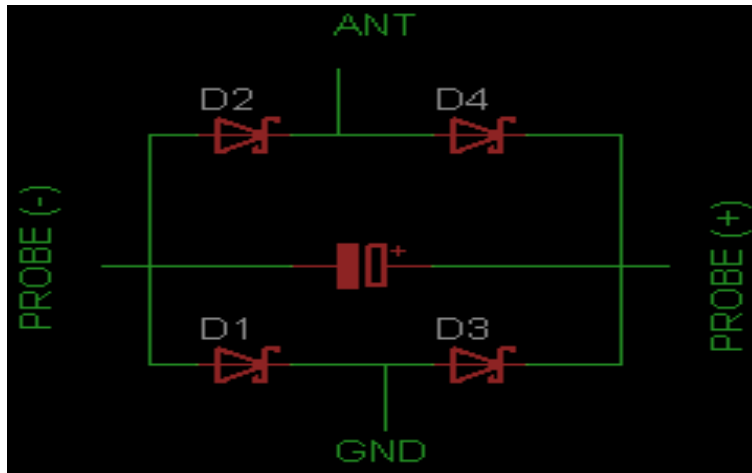
Διάταξη 12: 2 Παράλληλα Κυκλώματα Μεταξύ τους και σε Σειρά με το 3ο



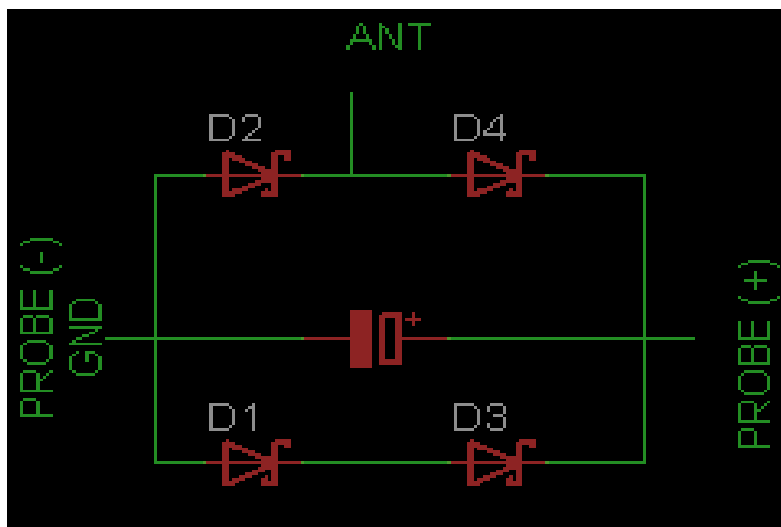
Διάταξη 13: 2 Παράλληλα Κυκλώματα Μεταξύ τους και σε Σειρά με το 3ο



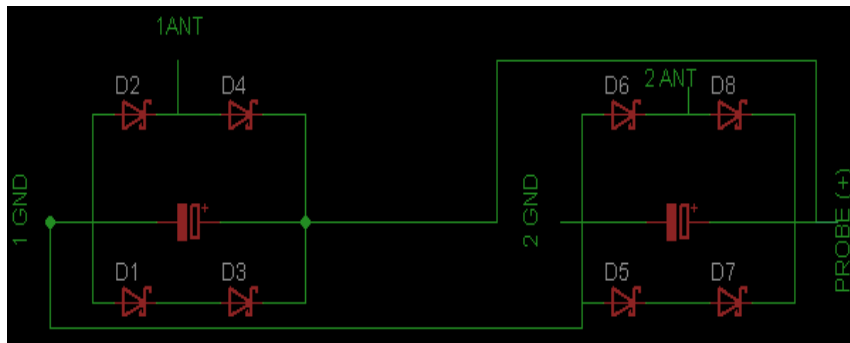
Διάταξη 14: Συνδεσμολογία Γέφυρας



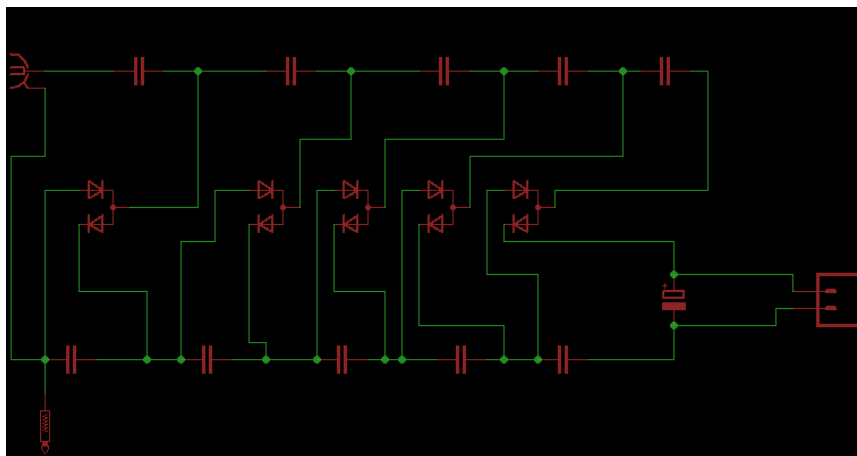
Διάταξη 15: Συνδεσμολογία Γέφυρας



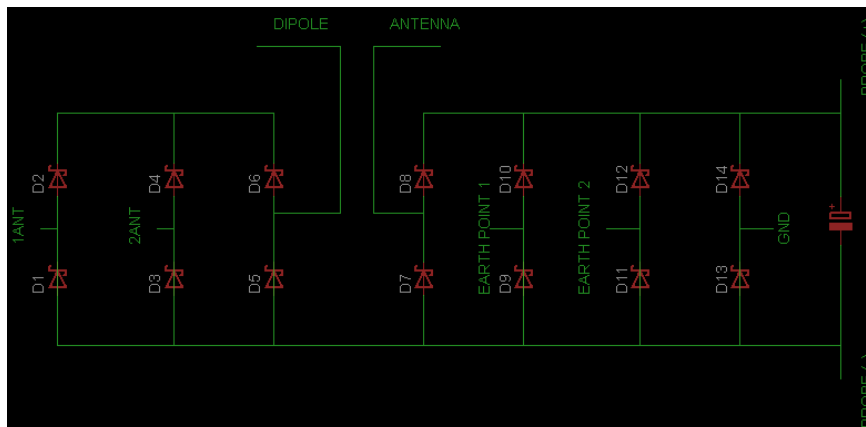
Διάταξη 16: Συνδεσμολογία Γέφυρας



Διάταξη 17: Συνδεσμολογία 5 Επιπέδων



Διάταξη 18: Συνδεσμολογία Πάμπας



Τα αποτελέσματα των πειραματικών διατάξεων με τη χρήση breadboard που μελετήθηκαν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Πειραματικές Διατάξεις και Αποτελέσματα Σταδίου Διερεύνησης

ΔΙΑΤΑΞΗ	1 ΚΕΡΑΙΑ	2 ΚΕΡΑΙΑ	1 ΓΕΙΩΣΗ	2 ΓΕΙΩΣΗ	ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ (V)	ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ (mA)	ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ (W)
1	✓	X	✓	X	4.90	0.300	1.70×10^{-3}
2	✓	X	✓	X	8,10	0.170	1.377×10^{-3}
3	✓	X	✓	X	4.30	0.220	0.946×10^{-3}
4	✓	✓	✓	X	7.40	0.190	1.406×10^{-3}
5	✓	✓	✓	✓	2.00	0.260	0.520×10^{-3}
6	✓	X	✓	X	4.20	0.300	1.260×10^{-3}
7	✓	X	✓	X	4.30	0.350	1.505×10^{-3}
8	✓	✓	✓	X	4.15	0.374	1.552×10^{-3}
9	✓	✓	✓	✓	3.90	0.520	2.028×10^{-3}
10	✓	✓	✓	X	10.2	0.195	$1,989 \times 10^{-3}$
11	✓	✓	✓	X	14.0	0.120	$1,680 \times 10^{-3}$
12	✓	✓	✓	✓	8.60	0.260	2.236×10^{-3}
13	✓	✓	✓	✓	8.60	0.320	2.752×10^{-3}
14	✓	X	✓	X	0.86	0.520	0.447×10^{-3}
15	✓	X	✓	X	1.80	0.495	0.891×10^{-3}
16	✓	✓	✓	✓	1,67	0.850	$1,410 \times 10^{-3}$
17	✓	X	✓	X	12.5	0.083	$1,037 \times 10^{-3}$

	1 ΚΕΡΑΙΑ	2 ΚΕΡΑΙΑ	3 ΚΕΡΑΙΑ (Διπολική)	1 ΓΕΙΩΣΗ	2 ΓΕΙΩΣΗ	3 ΓΕΙΩΣΗ	ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ (V)	ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ (mA)	ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ (W)
18	✓	✓	✓	✓	✓	✓	2.2	1	2.2×10^{-3}

Τα κυκλώματα με τα καλύτερα επιθυμητά αποτελέσματα σε απόδοση ισχύος, με τα όποια επιτεύχθηκε η φόρτιση των μπαταριών αλλά και η άμεση τροφοδότηση των δυο αισθητήρων θερμοκρασίας, τυπώθηκαν για τους δυο τύπους διόδων και παρατίθενται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα Τυπωμένων Κυκλωμάτων

Διάταξη	1 ΚΕΡΑΙΑ	2 ΚΕΡΑΙΑ	1 ΓΕΙΩΣΗ	2 ΓΕΙΩΣΗ	ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ (V)	ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ (mA)	ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ (W)
Διάταξη 1	✓	X	✓	X	4.00	0.175	0.70x10^-3
Διάταξη 8 με Δίοδο HSMS	✓	✓	✓	X	2.80	0.108	0.30x10^-3
Διάταξη 9 με Δίοδο HSMS	✓	✓	✓	✓	3.70	0.300	1.11x10^-3
Διάταξη με Δίοδο HSMS	ΤΥΠΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ	1 ΓΕΙΩΣΗ	ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ (V)	ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ (mA)	ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ (W)		
Διάταξη 17	ΚΑΛΩΔΙΟ	✓	4.3	0.075	0.32x10^-3		
	AM Loop Antenna	✓	2.2	0.035	0.077x10^-3		
	915 Mhz	✓	2.48	0.025	0.062x10^-3		

Τα αποτελέσματα των τυπωμένων κυκλωμάτων έχουν μικρότερη απόδοση σε σχέση με την απόδοση από τα πειραματικά αποτελέσματα που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του breadboard. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι οι διεξαγωγές των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν υπό νεφελώδη καιρό, οπότε η μειωμένη απόδοση ήταν μάλλον αναμενόμενη. Για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονα δυο μετρήσεις για την Διάταξη 1, μια με τη χρήση του breadboard και μια με τη χρήση του τυπωμένου κυκλώματος. Εκεί επιβεβαιώθηκε ότι ο νεφελώδης καιρός όντως επηρεάζει την απόδοση των κυκλωμάτων ανόρθωσης καθώς τα αποτελέσματα που καταγραφθήκαν ήταν όμοια για τις δυο μετρήσεις και ταυτόχρονα διαφορετικά από εκείνα του Πινάκα 4.1 που διεξήχθησαν με καλό καιρό.

4.2 Στάδιο Βελτιστοποίησης

Στο στάδιο αυτό κύριο στόχο αποτελεί η φόρτιση μπαταριών με διαφορετικές χωρητικότητες, καθώς και η άμεση τροφοδότηση δυο αισθητήρων θερμοκρασίας.

4.2.1 Φόρτιση μπαταριών

Για τη φόρτιση των μπαταριών, διαφορετικής χωρητικότητας, χρησιμοποιήθηκε το κύκλωμα της Διάταξης 9. Η πρώτη μπαταρία που επιλέχτηκε ήταν τύπου NI-MH στα 1.2V με χωρητικότητα 650mAh, η δεύτερη ήταν ιδίου τύπου στα 1.2V με χωρητικότητα 170mAh, ενώ η τρίτη ήταν ένας συνδυασμός των δυο παραπάνω μπαταριών σε σειρά, δηλαδή συνδέθηκαν σε σειρά 2 μπαταριές δημιουργώντας έτσι μια τρίτη στα 2.4V με χωρητικότητα 170mAh. Οι διαφορές που παρατηρηθήκαν ήταν στο χρόνο φόρτισης των μπαταριών, πράγμα λογικό, εφόσον οι μπαταριές έχουν διαφορετικές χωρητικότητες το οποίο φαίνεται και από τον τύπο της φόρτισης ($Q=I \times t$) όπου Q είναι το φορτίο σε Cb, I είναι το ρεύμα σε A και t ο χρόνος σε sec. Οι χρόνοι φόρτισης παρατίθενται στον Πινάκα 4.3.

Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα Φόρτισης μπαταριών

Κύκλωμα τροφοδότησης	Τάση μπαταρίας	Χωρητικότητα	Αρχική Τάση-Ωρα 1 ^η ς Μέτρησης	Τελική Τάση-Ωρα 2 ^η ς Μέτρησης	Συνολικός χρόνος φόρτισης (h)
Διάταξη 9	1.2 V	170 mAh	0.800V-8:20	1.234V-14:30	2h και 10 min
	1.2 V	650 mAh	0.610V-14:24	1.180V-7:00	17h και 20min
	2.4 V	170 mAh	2.00 V-21:50	2.45 V- 1:50	4 h

4.2.2. Μεθοδολογία Πειράματος Σταδίου Βελτιστοποίησης

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή των παρακάτω πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που δίνεται από τις εργαστηριακές σημειώσεις του Εργαστηρίου Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Αισθητήρες

(i) Γενικές Παρατηρήσεις

1. Για τη θέρμανση των αισθητήρων χρησιμοποιείται ένας αντιστάτης μεγάλης ονομαστικής ισχύος (τουβλάκι) συνδεδεμένος σε χωριστή έξοδο του τροφοδοτικού V_H , ώστε να είναι δυνατή η ρύθμιση της τάσης στα άκρα του και επομένως και της θερμοκρασίας στην επιθυμητή τιμή. Στις επόμενες εργαστηριακές διαδικασίες χρησιμοποιείται αντιστάτης $R_H = 100 \Omega$ ονομαστικής ισχύος 10W και τοποθετείται σε επαφή με τον αισθητήρα (ή τους αισθητήρες), χρησιμοποιώντας ανάμεσα θερμοαγώγιμη αλοιφή ώστε να επιτυγχάνεται καλή θερμική αγωγιμότητα.
2. Κάθε φορά που αλλάζεται η V_H πρέπει να δίνεται ο χρόνος μέχρι να αποκατασταθεί θερμική ισορροπία.
3. Σε όλες τις πειραματικές διαδικασίες που ακολουθούν, πρέπει να λαμβάνονται μετρήσεις κοντά στις ενδεικτικές θερμοκρασίες που περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4.4. Δεν είναι απαραίτητο κατά την εργαστηριακή διαδικασία να επιτυγχάνεται η ακριβής θερμοκρασία του Πίνακα, αλλά μια παραπλήσια και να καταγράφεται η ένδειξη του θερμομέτρου.

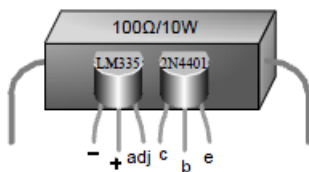
Πίνακας 4.4. Πίνακας Ενδεικτικών Τιμών Θερμοκρασίας

α/α	Θερμοκρασία
1	Περιβάλλοντος
2	25°C
3	30°C
4	35°C
5	40°C
6	45°C
7	50°C

4. Επειδή όλα τα εξαρτήματα επηρεάζονται από τη θερμοκρασία, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη σύνδεση όλων των παρακάτω διατάξεων, ώστε ο συνδυασμός του αισθητήρα θερμοκρασίας (θερμίστορ, τρανζίστορ, κλπ.) και αντίστασης θέρμανσης, να βρίσκεται σε όσο το δυνατό μεγαλύτερη απόσταση από το υπόλοιπο κύκλωμα.

5. Πριν την τοποθέτηση κάθε αντιστάτη στο αντίστοιχο κύκλωμα, πρέπει να μετράται η τιμή του (εκτός κυκλώματος) με το ωμόμετρο και να καταγράφεται. Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, σε όλους τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται για τον κάθε αντιστάτη η πειραματική τιμή που μετρήθηκε και όχι η ονομαστική.

6. Για την επιτάχυνση των μετρήσεων, δεδομένου ότι η αποκατάσταση της θερμικής ισορροπίας κάθε φορά που ρυθμίζεται νέα θερμοκρασία απαιτεί χρόνο, μπορούν να συνδέονται πάνω στο breadboard περισσότερα κυκλώματα και να εκτελούνται οι σχετικές μετρήσεις σχεδόν ταυτόχρονα.



Σχήμα 20: Θερμική Επαφή Αντιστάτη με Ημιαγωγούς

(ii) Αισθητήρες Θερμοκρασίας με Θερμίστορ

Όσον αναφορά τους αισθητήρες θερμοκρασίας στο πρώτο πείραμα με το θερμίστορ χρησιμοποιήθηκε το κύκλωμα της Διάταξης 1.

Η σχέση που συνδέει τη θερμοκρασία T_K σε Kelvin και τη θερμοκρασία T_C σε βαθμούς Celsius είναι:

$$T_K \text{ (K)} = 273.2 \text{ K} + T_c \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (6)$$

Σε πολλές εφαρμογές είναι απαραίτητη η μέτρηση της θερμοκρασίας σε βαθμούς της κλίμακας Fahrenheit. Η σχέση που συνδέει τη θερμοκρασία T_c σε Celsius με τη θερμοκρασία T_f σε Fahrenheit είναι :

$$T_C = \frac{5}{9} \cdot (T_F - 32) \quad (7)$$

➤ **Θερμίστορ**

Η σχέση θερμοκρασίας - αντίστασης ενός θερμίστορ δίνεται από την Εξίσωση 8 ως εξής:

$$R_T(T) = R_o \cdot \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right) \right] \quad (8)$$

Όπου:

T είναι η θερμοκρασία σε Kelvin

R_0 είναι η αντίσταση σε θερμοκρασία T_0 (θερμοκρασία αναφοράς, συνήθως 298 K)

β είναι παράμετρος που εξαρτάται από το θερμίστορ και τη θερμοκρασία

Πίνακας 4.5 Χαρακτηριστικά του Θερμίστορ Τύπου NTSA0WF104FE1B0

R_T (k Ω) @ 25°C	β (K) @ 25 50°C	Max operating current (mA) @ 25°C	Rated electrical power (mW) @ 25°C	Typical dissipation constant (mW/°C) @ 25°C	Thermal time constant (s) @ 25°C	Operating Temperature Range (°C)
100	4143 $\pm$ 1%	0.14	21	21	< 7	-40 to 125

(iii) Θερμίστορ Σε Σειρά με Αντιστάτη

➤ Προεργασία

Το κύκλωμα του Σχήματος 21 είναι μια διάταξη για τη μέτρηση θερμοκρασίας με τη χρήση θερμίστορ. Η τιμή του αντιστάτη R_s επιλέγεται έτσι ώστε να επιτευχθεί όσο κατά το δυνατό γραμμική μεταβολή της μετρούμενης τάσης, V_o , (επομένως και της τάσης στα άκρα του θερμίστορ) με τη θερμοκρασία, στην επιθυμητή περιοχή θερμοκρασιών μέτρησης και υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 9 :

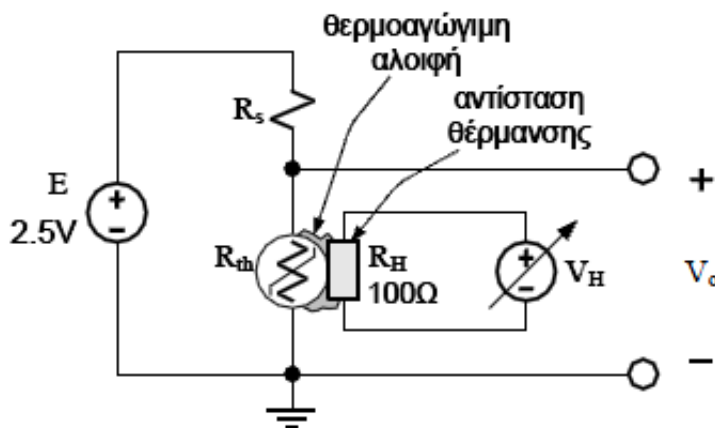
$$R_s = \frac{R_{T,mid} \cdot [R_{T,low} + R_{T,high}] - [2 \cdot R_{T,low} \cdot R_{T,high}]}{R_{T,low} + R_{T,high} - 2 \cdot R_{T,mid}} \quad (9)$$

Όπου:

$R_{T,high}$ η αντίσταση του θερμίστορ στο άνω όριο της περιοχής μέτρησης

$R_{T,low}$ η αντίσταση του θερμίστορ στο κάτω όριο της περιοχής μέτρησης

$R_{T,mid}$ η αντίσταση του θερμίστορ στη μέση της περιοχής μέτρησης



Σχήμα 21: Τροφοδοσία Θερμίστορ σε Σειρά με Αντιστάτη

(α) Χρησιμοποιώντας τις τιμές της θερμοκρασίας του Πίνακα 4.4 και με βάση την Εξίσωση 8, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές της αντίστασης του θερμίστορ $R_{T,theor}$.

(β) Υπολογίζεται η αντίσταση R_s στο κύκλωμα του Σχήματος 21, σύμφωνα με την Εξίσωση 9, για περιοχή μέτρησης 0 - 50 °C, δηλαδή, $R_{T,low} = 0$ °C και, $R_{T,high} = 50$ °C.

➤ Πειραματική διαδικασία

(α) Χρησιμοποιώντας το probe θερμοκρασίας, καταγράφεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_a (K).

(β) Σύνδεση κύκλωμα του Σχήματος 21 τοποθετώντας στη θέση της R_s αντιστάτης με την πλησιέστερη εμπορική τιμή με αυτή που υπολογίστηκε κατά την προεργασία. Για

την τάση $E=2.5V$ γίνεται χρήση της εξόδου Α του τροφοδοτικού. Έπειτα, συνδέεται η τροφοδοσία V_H του αντιστάτη θέρμανσης R_H στην έξοδο Β του τροφοδοτικού. Ρυθμίζοντας την V_H σε διάφορες τιμές, καταγράφονται οι αντίστοιχες τιμές της τάσης εξόδου V_0 και της θερμοκρασίας T (K) ακολουθώντας τον Πίνακα 4.4 .

➤ **Επεξεργασία των αποτελεσμάτων**

(α) Χρησιμοποιώντας τις τιμές της τάσης εξόδου V_0 που μετρήθηκαν, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές της αντίστασης του θερμίστορ RT_{meas} από το *Νόμο Πευμάτων* του κυκλώματος.

(β) Με βάση τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς που έγιναν στα μέρη (α) και (β) της πειραματικής διαδικασίας, σχεδιάζονται στο ίδιο διάγραμμα οι χαρακτηριστικές της αντίστασης του θερμίστορ RT_{meas} και RT_{theor} σε σχέση με τη θερμοκρασία.

(γ) Δικαιολόγηση τυχόν διαφορών στις καμπύλες για τα RT_{meas} και RT_{theor} , και αναφορά στους κυριότερους λόγους στους οποίους μπορούν να οφείλονται.

(δ) Με βάση τις μετρήσεις, σχεδιάζεται η χαρακτηριστική τάση εξόδου V_0 σε σχέση με τη θερμοκρασία T .

(ε) Αναφορά διάφορων εφαρμογών της συνδεσμολογίας.

(iv) Αισθητήρας Θερμοκρασίας με Ημιαγωγό

Για το δεύτερο πείραμα με το τρανζίστορ χρησιμοποιήθηκε το κύκλωμα της Διάταξης 8.

➤ **Ολοκληρωμένοι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας**

Εκτός από τα θερμίστορ, ευρεία χρήση στη μέτρηση θερμοκρασίας βρίσκουν και οι ολοκληρωμένοι αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, το τρανζίστορ

2N4401 είναι ένας αισθητήρας θερμοκρασίας του οποίου η τάση εξόδου μειώνεται κατά 2 mV για κάθε βαθμό Kelvin (K) ή Celsius (C).

➤ Η επαφή PN (δίοδοι και τρανζίστορ)

Η μέτρηση της θερμοκρασίας βασίζεται στη μεταβολή της τάσης V στα άκρα μιας επαφής PN που είναι ορθά πολωμένη, καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Η επαφή PN μπορεί να είναι μια δίοδος ή η επαφή βάσης- εκπομπού ενός τρανζίστορ. Το ρεύμα I της επαφής PN εξαρτάται από την τάση V στα άκρα της και τη θερμοκρασία, σύμφωνα με τη Εξίσωση 10:

$$I = I_s \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V}{k \cdot T}} - 1 \right) \quad (10)$$

Όπου:

I_s το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού

K η σταθερά του Boltzmann ($K=1.3806504 \times 10^{-23}$ J)

$q = 1.602 \times 10^{-19}$ Cb το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο (χωρίς πρόσημο)

T η θερμοκρασία της επαφής (K)

Το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού εξαρτάται επίσης έντονα από τη θερμοκρασία και μάλιστα διπλασιάζεται όταν η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 5K. Μια προσεγγιστική σχέση για το I_s δίνεται από την Εξίσωση 11:

$$I_s \simeq I_{s0} \cdot 2^{(T-298,2)/5} \quad (11)$$

Όπου:

I_{s0} είναι το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού στους 25 °C και ανάλογα με τις φυσικές ιδιότητες της επαφής PN κυμαίνεται στην περιοχή από 10^{-14} A μέχρι 10^{-12} A

Έτσι, η Εξίσωση 10 γίνεται:

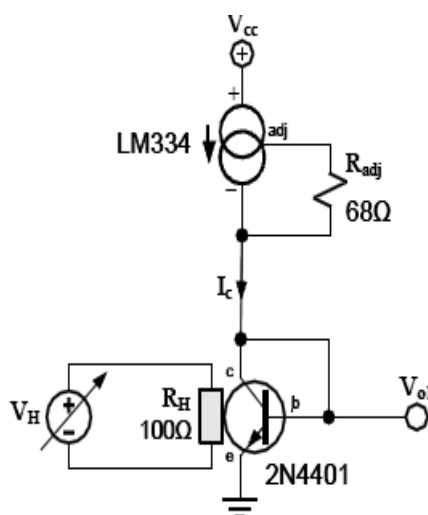
$$I_s \simeq I_{so} \cdot 2^{\frac{T-298,2}{5}} \cdot \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (12)$$

Στη γενική περίπτωση, αν το ρεύμα I_s κρατείται σταθερό, από την Εξίσωση 12 προκύπτει μια πτώση της τάσης V της επαφής PN κατά περίπου 2mV K ή 2mV °C.

(v) Μέτρηση Θερμοκρασίας με Τρανζίστορ

➤ Προεργασία

Η διάταξη της θερμοκρασίας με τρανζίστορ, φαίνεται στο Σχήμα 22. Το ολοκληρωμένο LM334 είναι ρυθμιζόμενη πηγή ρεύματος, δηλαδή διαρρέεται από σταθερό ρεύμα ανεξάρτητα από την τάση στα άκρα του.



Σχήμα 22: Διάταξη της Θερμοκρασίας με Τρανζίστορ

Η τιμή του ρεύματος του LM334 καθορίζεται από την τιμή της αντίστασης R_{adj} και δίνεται, για θερμοκρασία 25°C, από τη σχέση:

$$I_c = \frac{0.06764}{R_{adj}} \quad (13)$$

Η μέτρηση της θερμοκρασίας βασίζεται στη μεταβολή της τάσης V_{be} καθώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Η τάση V_{be} εξαρτάται από το ρεύμα I_c του συλλέκτη, το οποίο παραμένει σταθερό λόγω της πηγής ρεύματος και δίνεται από την Εξίσωση 13. Δεδομένο ότι ισχύει $V_{be} = V_{01}$, η Εξίσωση 12 γίνεται:

$$\frac{0.06764}{R_{adj}} \simeq I_{so} \cdot 2^{\frac{T-298.2}{5}} \cdot \left(e^{\frac{qV_{01}}{kT}} - 1 \right) \quad (14)$$

Για το 2N4401 το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού στους 25°C είναι $I_{so} = 0.5 \times 10^{-13}$ A. Σύμφωνα με την Εξίσωση 14 αν μετρηθεί η τάση εξόδου V_{01} , η θερμοκρασία T μπορεί να υπολογιστεί με αριθμητική επίλυση.

Με βάση την Εξίσωση 14 υπολογίζονται θεωρητικά οι τιμές της τάσης εξόδου V_{01} για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας T (K) ακολουθώντας τον Πίνακα 4.4 .

4.3. Πειραματικά Αποτελέσματα Μεθοδολογίας

Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε παραπάνω, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται και αναλύονται στο παρόν Υποκεφάλαιο.

4.3.1. Αποτελέσματα Θερμίστορ σε Σειρά με Αντιστάτη

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Προεργασίας χρησιμοποιώντας τις τιμές της θερμοκρασίας του Πίνακα 4.4 και με βάση την Εξίσωση 8, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές της αντίστασης του θερμίστορ $R_{T,theor}$, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Υπολογισμός Τιμών Αντίστασης Θερμίστορ $R_{T,theor}$ βάσει της Θερμοκρασίας

A/A	Θερμοκρασία (°C)	Θερμοκρασία (K)	Αντίσταση θερμίστορ (kΩ)
1	0	273.2	355.224
2	25	298.2	99.999
3	30	303.2	79.237
4	35	308.2	63.184
5	40	313.2	52.948
6	45	318.2	40.904
7	50	323.2	33.195

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η τιμή της αντίστασης R_s του κυκλώματος που δίνεται στις σημειώσεις για περιοχή μέτρησης από 0 - 50 °C βάσει της Εξίσωσης 9 για τιμές $R_{T,low}$, $R_{T,mid}$ και $R_{T,high}$ η τιμή της αντίστασης θερμίστορ που αντιστοιχεί στους 0 °C, 25 °C και 50 °C, αντίστοιχα.

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στην Εξίσωση 6 προκύπτει ότι:

$$R_s = 80.9792 \text{ K}\Omega$$

Χρησιμοποιώντας το probe θερμοκρασίας καταγράφηκε η θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a (K) και προέκυψε $T_a = 300.7$ K.

Στη συνέχεια συνδέθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 21 και ρυθμίζοντας τη V_H σε διαφορετικές τιμές καταγράφηκαν οι αντίστοιχες τιμές τις V_0 και της θερμοκρασίας $T(^{\circ}\text{C})$ ακολουθώντας τον Πινάκα 4.4 και για $R_S=81.6\text{K}\Omega$ αντίσταση κοντά στην επιθυμητή τιμή. Παρακάτω ακολουθούν δυο πίνακες αποτελεσμάτων, ένας που χρησιμοποιεί πηγή για το κύκλωμα τροφοδοτικού από το εργαστήριο και ένας που χρησιμοποιεί πηγή το κύκλωμα της Διάταξης 1.

Πινάκας 4.7: Με είσοδο 2.5 V από το Τροφοδοτικό

Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Τάση V_H του Αντιστάτη (V)	Τάση εξόδου V_0 (V)
28 $^{\circ}\text{C}$	0.30 V	1.290 V
30 $^{\circ}\text{C}$	4.14 V	1.250 V
33 $^{\circ}\text{C}$	6.22 V	1.165 V
37 $^{\circ}\text{C}$	7.08 V	1.100 V
43 $^{\circ}\text{C}$	9.01 V	0.960 V
52 $^{\circ}\text{C}$	11.04 V	0.760 V

Πινάκας 4.8: Με είσοδο 2.9 V από το Κύκλωμα της Διάταξης 1

Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Τάση V_H του Αντιστάτη (V)	Τάση Εξόδου V_0 (V)
27 $^{\circ}\text{C}$	0.30 V	1.520 V
30 $^{\circ}\text{C}$	4.15 V	1.420 V
33 $^{\circ}\text{C}$	6.25 V	1.310 V
37 $^{\circ}\text{C}$	7.06 V	1.245 V
43 $^{\circ}\text{C}$	9.05 V	1.015 V
55 $^{\circ}\text{C}$	11.06 V	0.750 V

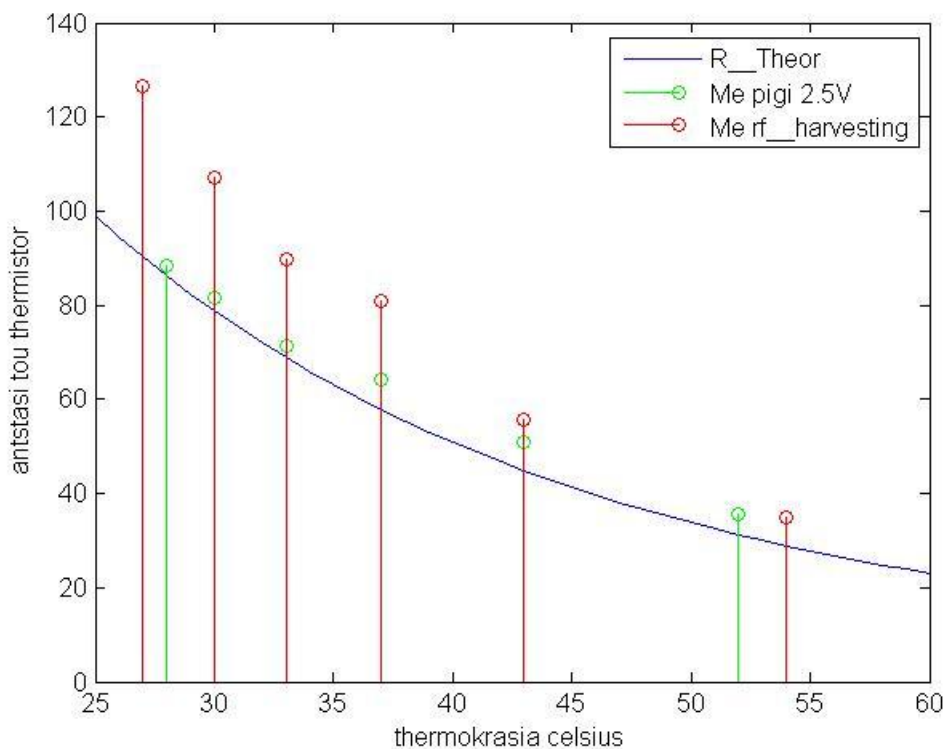
Χρησιμοποιώντας τις τιμές της τάσης εξόδου V_0 που μετρήθηκαν, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τιμές της αντίστασης του θερμίστορ $R_{T, meas}$ από το Νόμο Ρευμάτων του κυκλώματος τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στον Πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.9: Υπολογισμός R_{meas1} - R_{meas2} βάσει του V_0

V_0 με πηγή το τροφοδοτικό (V)	V_0 με πηγή το κύκλωμα του Σχ. 21 (V)	R_{meas1} από το τροφοδοτικό (kΩ)	R_{meas2} από το κύκλωμα Διάταξη 1 (kΩ)
1.299	1.520	88.25	126.5
1.250	1.420	81.60	107.2
1.165	1.310	71.20	89.82
1.100	1.245	64.11	80.94
0.960	1.015	50.86	55.77
0.760	0.750	35.61	34.97

Με βάση τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς που έγιναν στα μέρη (α) και (β) της πειραματικής διαδικασίας, σχεδιάζονται στο ίδιο διάγραμμα οι χαρακτηριστικές της αντίστασης του θερμίστορ $R_{T, meas}$ και $R_{T, theor}$ σε σχέση με τη θερμοκρασία (Διάγραμμα 1).

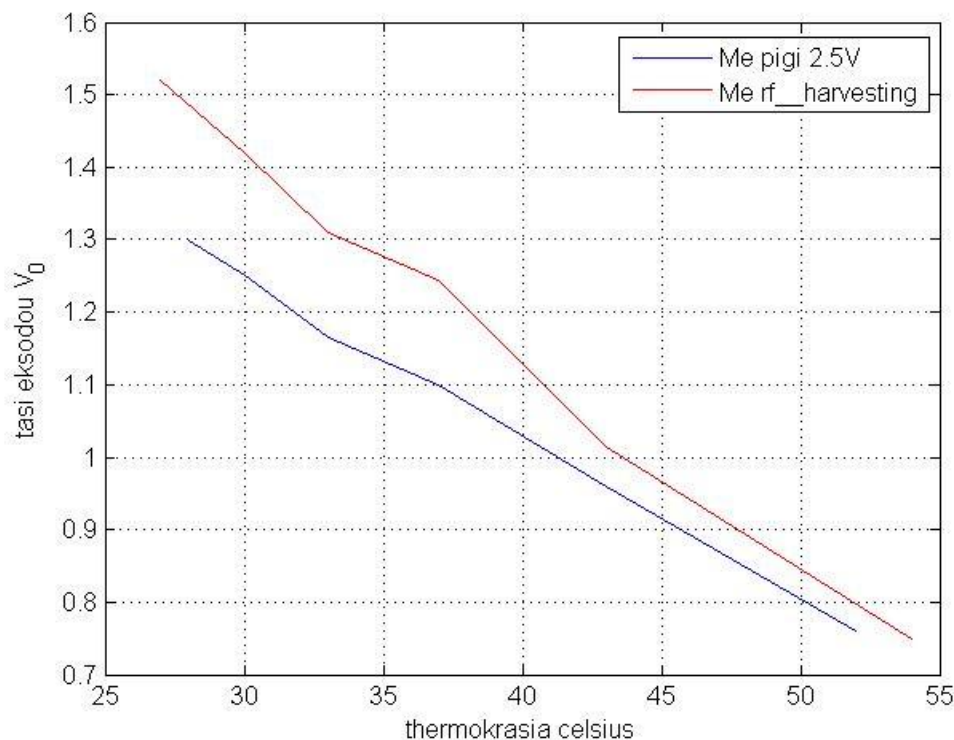
Διάγραμμα 1: Χαρακτηριστικές για την αντίσταση των $R_{T,meas}$ και $R_{T,theor}$ σε σχέση με τη θερμοκρασία



Παρατηρείτε ότι υπάρχουν διαφορές κοιτώντας τα σημεία και την καμπύλη. Για τα σημεία με κόκκινο και πράσινο χρώμα που εκφράζουν τις πηγές τροφοδοσίας, παρατηρείτε ότι έχουν μικρή διάφορα οι όποια οφείλετε στην διαφορά τάσης που έχουν οι δυο εισοδοι. Το τροφοδοτικό παρείχε 2.5 V ενώ το κύκλωμα της Διάταξης 1 παρείχε 2.9V στην έξοδο. Εκτός των παραπάνω οι διαφορές μπορεί να οφείλονται από ανθρώπινο σφάλμα κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων όπως και λόγω πιθανούς σφάλματος από τα όργανα του εργαστηρίου.

Με βάση τις μετρήσεις σχεδιάζεται η χαρακτηριστική τάση εξόδου V_0 σε σχέση με τη θερμοκρασία T η οποία απεικονίζεται στο Διάγραμμα 2.

Διάγραμμα 2 : Χαρακτηριστική της V_0 για τις δυο πηγές καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία



Η παραπάνω συνδεσμολογία βρίσκει χρήση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως στα κλιματιστικά, σε ορισμένες κεραμικές κουζίνες στις οποίες υπάρχει σύστημα το οποίο αν αντληφθεί ιδιαίτερα αυξημένη θερμοκρασία χωρίς την παρουσία κάποιου σκεύους απενεργοποιεί την κουζίνα ενώ κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στους φούρνους ψησίματος.

4.3.2. Αποτελέσματα Μέτρησης Θερμοκρασίας με Τρανζίστορ

Με βάση την Εξίσωση 14 υπολογίζονται θεωρητικά οι τιμές της τάσης εξόδου V_{01} για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας T (K) ακολουθώντας τον Πίνακα 4.4, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στον Πίνακα 4.10. Η επίλυση της Εξίσωσης 14

πραγματοποιήθηκε με χρήση Matlab, η οποία παρατίθεται αναλυτικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

Πινάκας 4.10: Θεωρητικά V_{01} και Θερμοκρασία

V_{01} (V)	Θερμοκρασία (°C)
0.609	25 °C
0.601	30 °C
0.592	35 °C
0.583	40 °C
0.574	45 °C
0.563	50 °C

Κατά την πειραματική διαδικασία μετρήθηκαν και καταγραφθήκαν οι τιμές της τάσης V_H του Αντιστάτη και η τάση εξόδου V_{01} . Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν για δυο πειράματα. Για το πρώτο πείραμα οι μετρήσεις έγιναν με τροφοδοσία από το τροφοδοτικό του εργαστηρίου με τιμή εισόδου τα 9.29 V, ενώ το δεύτερο πραγματοποιήθηκε με το κύκλωμα της Διάταξης 8 με τιμή εισόδου τα 4V. Τα αποτελέσματα της καταγραφής της V_H και της V_{01} για διαφορές θερμοκρασίες με χρήση τροφοδοτικού με είσοδο 9.29 V με τη χρήση Διάταξης 6 με είσοδο 4 V παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.11 και 4.12, αντίστοιχα.

Πινάκας 4.11 Καταγραφή της V_H και της V_{01} για διαφορές θερμοκρασίες με χρήση τροφοδοτικού με είσοδο 9.29 V

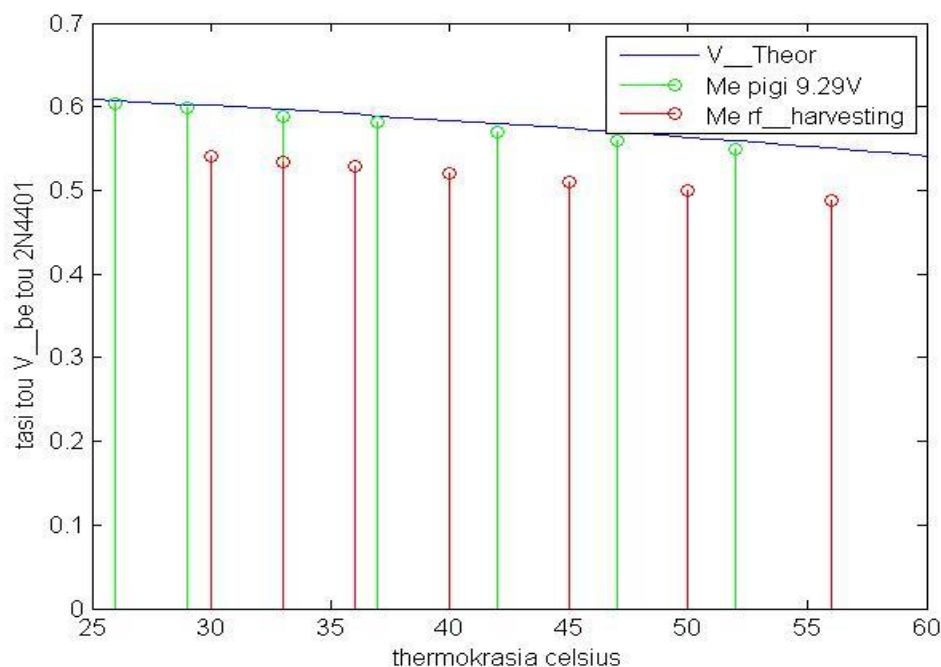
Θερμοκρασία (°C)	Τάση V_H του Αντιστάτη (V)	Τάση Εξόδου V_{01} (V)
26 °C	0.31 V	0.603 V
29 °C	4.13 V	0.598 V
33 °C	6.18 V	0.588 V
37 °C	7.28 V	0.582 V
42 °C	9.16 V	0.570 V
47 °C	10.80 V	0.560 V
52 °C	11.62 V	0.550 V

Πινάκας 4.12 Καταγραφή της V_H και της V_{01} για διαφορές θερμοκρασίες με τη χρήση Διάταξης 6 με είσοδο 4 V

Θερμοκρασία (°C)	Τάση V_H του Αντιστάτη (V)	Τάση Εξόδου V_{01} (V)
30 °C	0.31 V	0.540 V
33 °C	4.18 V	0.534 V
36 °C	6.15 V	0.528 V
40 °C	7.22 V	0.520 V
45 °C	8.70 V	0.510 V
50 C	9.14 V	0.500 V
56 C	10.17 V	0.488 V

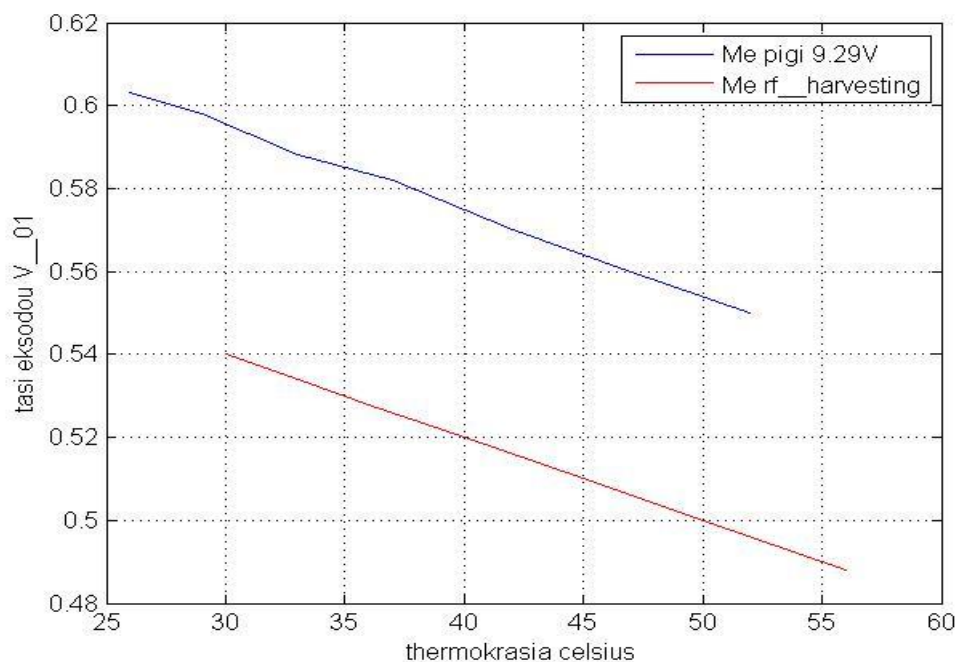
Με βάση τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα των Πινάκων 4.10, 4.11 και 4.12, σχεδιάζονται στο ίδιο διάγραμμα οι χαρακτηριστικές των τάσεων σε σχέση με τη θερμοκρασία (Διάγραμμα 3).

Διάγραμμα 3 : Χαρακτηριστικές των Τάσεων

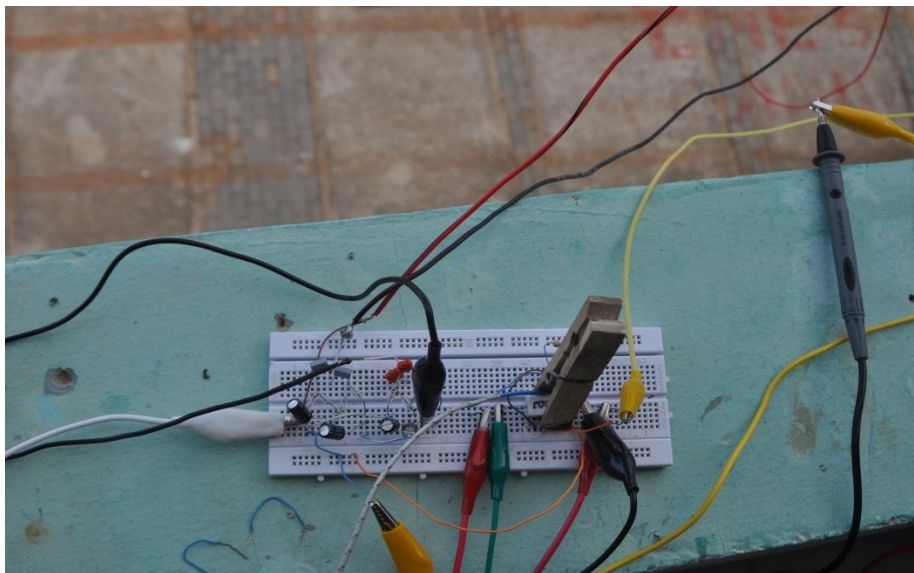


Παρατηρείται ότι υπάρχουν διαφορές κοιτώντας τα σημεία και την καμπύλη. Για τα σημεία με κόκκινο και πράσινο χρώμα που εκφράζουν τις πηγές τροφοδοσίας, παρατηρείτε ότι έχουν μικρή διάφορα οι όποια οφείλετε στην διαφορά τάσης που έχουν οι δυο εισοδοι. Το τροφοδοτικό παρείχε 9.29V ενώ το κύκλωμα της Διάταξης 8 παρείχε 4V στην έξοδο. Εκτός των παραπάνω διαφορές μπορεί να οφείλονται από ανθρώπινο σφάλμα κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων όπως και λόγω πιθανούς σφάλματος από τα όργανα του εργαστηρίου.

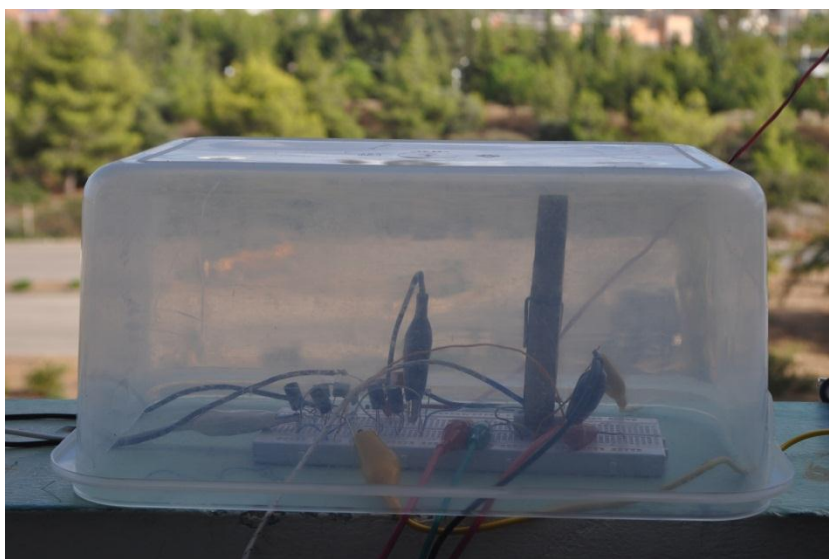
Ωστόσο το σημαντικότερο είναι ότι η τροφοδοσία από την Διάταξη 8 ήταν βέλτιστη, εφόσον όσο αυξάνονταν οι βαθμοί °C λόγω του Αντιστάτη, η πτώση τάσης της V_{01} έπεφτε ακριβώς 2mV K ή 2mV °C, όπως και έπρεπε να γίνετε βάσει των εργαστηριακών σημειώσεων.

Διάγραμμα 4: Καμπύλη πτώσης τάσης της V_{01} για τα δυο πειράματα

Παρακάτω ακολουθούν φωτογραφίες κατά την τροφοδότηση του αισθητήρα θερμοκρασίας με το τρανζίστορ του Σχήματος 22 με το κύκλωμα συγκομιδής ενέργειας από ραδιοσυχνότητες (rf_harvesting) της Διάταξης 8, καθώς και φωτογραφίες που επιβεβαιώνουν αποτελέσματα του Πινάκα 4.12.



Φωτογραφία 5: Κύκλωμα Διάταξης 6 όπου τροφοδοτεί τη Διάταξη του Σχήματος 22



Φωτογραφία 6 : Καλυμμένο κύκλωμα

Ο λόγος που είναι καλυμμένο το ολικό κύκλωμα μέτρησης θερμοκρασίας (Φωτογραφία 6), είναι για την επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερης μέτρησης, διότι τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν εκτός εργαστηριακού χώρου και την ημέρα που

πραγματοποιήθηκαν υπήρχε αέρα, ο οποίος και άλλαζε αισθητά τις μετρήσεις του πειράματος στην περίπτωση ακάλυπτης διάταξης.



Φωτογραφία 7: Καταγραφή της τάση V_{01} στα 0.540V για 30 °C



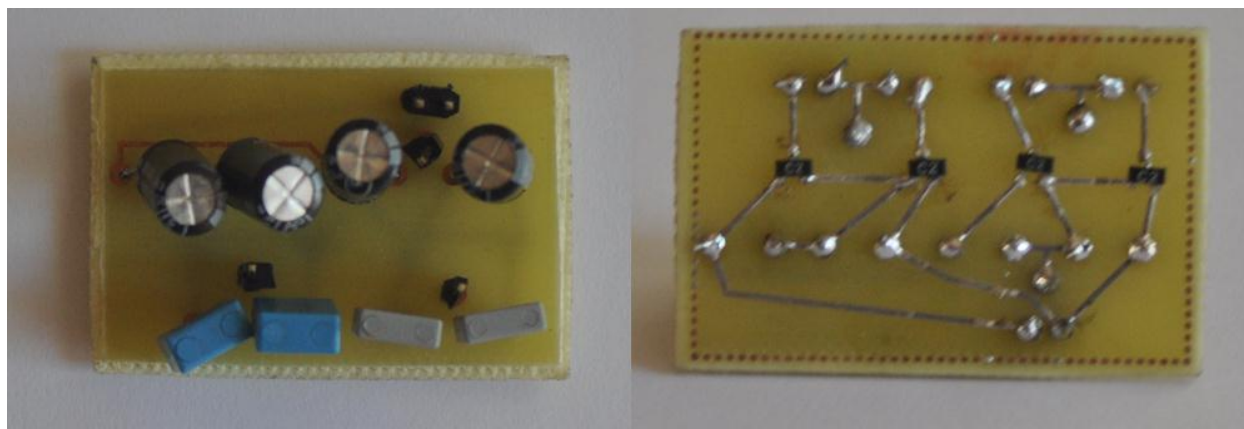
Φωτογραφία 8: Καταγραφή της τάση V_{01} στα 0.500V για 50 °C

Συγκρίνοντας τις Φωτογραφίες 7 και 8 παρατηρείτε ότι: Στη Φωτογραφία 7 για θερμοκρασία 30 °C η τάση V_{01} είναι στα 0.540V, ενώ στη Φωτογραφία 8 για θερμοκρασία 50 °C η τάση V_{01} είναι στα 0.500V. Τα αποτελέσματα αυτά είναι ακριβή και ικανοποιητικά διότι επαληθεύουν την θεωρία όπου για κάθε αύξηση ενός βαθμού °C ή K, παρατηρείται πτώση τάσεως της τάξης των 2mV K ή 2mV °C. Πράγμα το οποίο και επαληθεύετε από τις Φωτογραφίες 7 και 8.

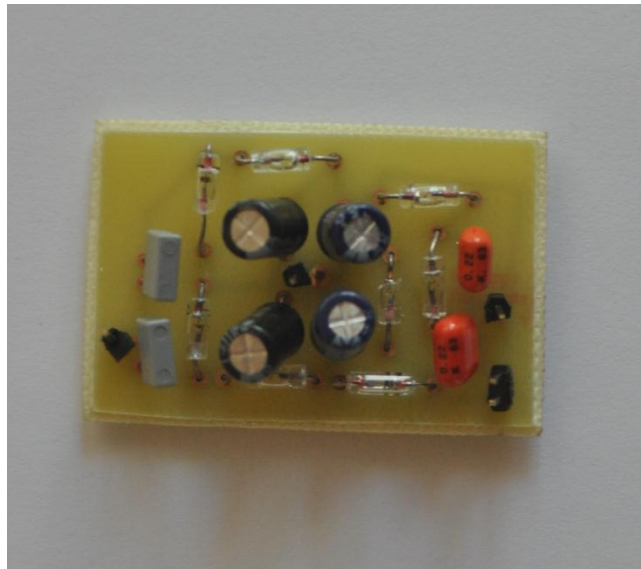
Τέλος, παρουσιάζονται και τα τυπωμένα κυκλώματα για κάποιες από τις διατάξεις (Φωτογραφία 9, 10, 11 και 12).



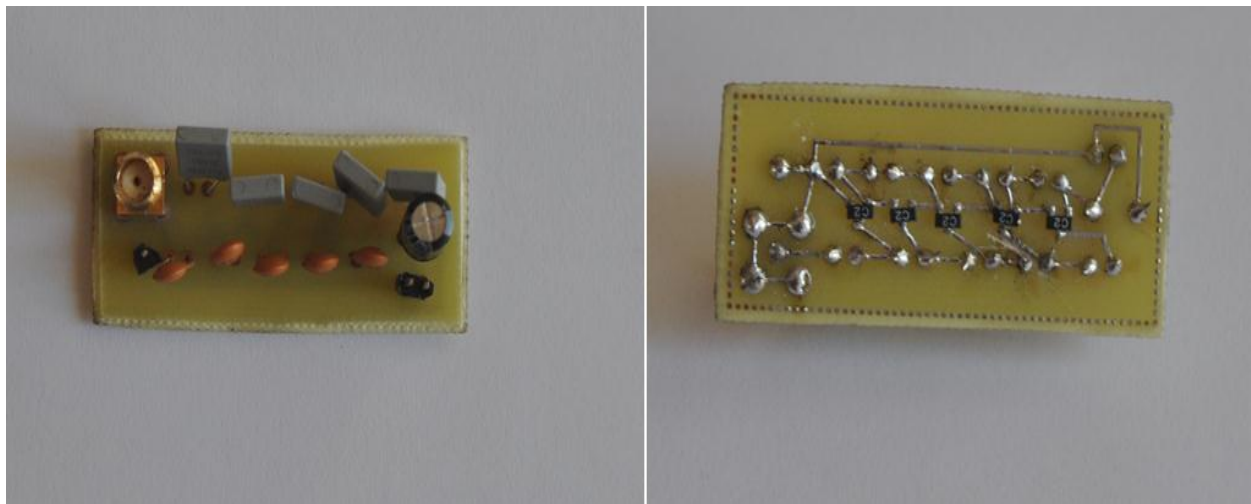
Φωτογραφία 9: Τυπωμένο Κύκλωμα Διάταξης 1



Φωτογραφία 10: Τυπωμένο Κύκλωμα Διάταξης 8



Φωτογραφία 11: Τυπωμένο Κύκλωμα Διάταξης 9



Φωτογραφία 12: Τυπωμένο Κύκλωμα Διάταξης 17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο: Συμπεράσματα και Προτάσεις για το Μέλλον

5.1 Γενικά Συμπεράσματα

Μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν σημαντικές παρατηρήσεις οι οποίες συμβάλλουν στην εξέλιξη των συστημάτων τροφοδότησης και κατά συνέπεια της λειτουργίας των ηλεκτρονικών συσκευών στο μέλλον και αξίζει να σημειωθούν:

1. Επιτεύχθηκε βέλτιστη φόρτιση μπαταριών μικρής χωρητικότητας της τάξεως των 170 mAh με ταχύ ρυθμό φόρτισης. Αντιθέτως, για μπαταρίες με χωρητικότητα της τάξεως των 650 mAh ο χρόνος φόρτισης ήταν αρκετά μεγάλος. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται και από τον Τύπο της Φόρτισης ($Q=I \times t$) από τον οποίο παρατηρείται ότι ο χρόνος είναι ανάλογος της χωρητικότητας.
2. Η Διάταξη 1, η οποία αποτελεί και το βασικό κύκλωμα των πειραμάτων, ήταν ικανή να τροφοδοτήσει το κύκλωμα Θερμίστορ σε σειρά με Αντιστάτη (Σχήμα 21) με σκοπό τη μέτρηση θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα από τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν ικανοποιητικά, καθώς παρατηρούνταν συνεχής πτώση τάσης V_o όσο η θερμοκρασία αυξανόταν σε ένα εύρος τιμών θερμοκρασίας 25 - 50 °C.
3. Με την τοποθέτηση 2 βασικών κυκλωμάτων εν παραλλήλω (Διάταξη 8) των πειραμάτων, κατορθώθηκε η επιτυχής τροφοδότηση του κυκλώματος μέτρησης θερμοκρασίας με Τρανζίστορ (Σχήμα 22). Τα αποτελέσματα από τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν ικανοποιητικά, καθώς παρατηρούνταν συνεχής πτώση τάσης V_{o1} κατά 2mV K ή 2mV °C όσο η θερμοκρασία αυξανόταν σε ένα εύρος τιμών θερμοκρασίας 25 - 50 °C.

4. Τα κυκλώματα των Διατάξεων 1, 6, 9 και 17 τυπώθηκαν ώστε να γίνουν ποιο αποδοτικά και μικρότερα σε μέγεθος, καθιστώντας τα με αυτό τον τρόπο ελκυστικά σε εμπορική κλίμακα. Για το σκοπό αυτό, ορισμένες από τις παραπάνω Διατάξεις τυπώθηκαν και για τις δυο διόδους (1N34 και HSMS-2822).

5.2. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η τεχνική της “Συγκομιδής Ενέργειας από Ραδιοσυχνότητες” παρόλο που δεν είναι πρόσφατη, δεν έχει διερευνηθεί διεξοδικά. Μπορεί να αποτελέσει μια ελπιδοφόρα τεχνική για μια ριζική αλλαγή στα συστήματα τροφοδότησης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Όπως προαναφέρθηκε η παρούσα εργασία αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσπάθεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κύματα ραδιοσυχνοτήτων, τα οποία υπάρχουν σε πληθώρα στο περιβάλλον, δίνοντας έτσι μια λύση στη εκμετάλλευση αυτής της άφθονης μορφής ενεργείας. Η παρούσα εργασία μπορεί να συμβάλει στην αξιοποίηση τέτοιων μορφών ενεργείας, δίνοντας ένα σημαντικό έναυσμα για μελλοντική έρευνα. Μελλοντικές πειραματικές προσπάθειες μπορούν να επικεντρωθούν στα εξής:

- ❖ Περαιτέρω βελτιστοποίηση της παρούσας εργασίας συμπεριλαμβάνοντας στη μελέτη την επίδραση και άλλων παραγόντων, όπως η μελέτη στις συμπεριφορές του κυκλώματος σε διαφορές περιοχές συχνοτήτων.
- ❖ Προσπάθεια για τη δημιουργία διάταξης ικανής για την άμεση τροφοδότηση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων (ΑΔΑ/ Wireless Sensor Network - WSN).
- ❖ Ενδιαφέρουσα μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην άμεση τροφοδότηση κινητών τηλεφώνων μέσω τέτοιων συστημάτων, ακόμα και χωρίς τη χρήση μπαταρίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. Tesla, "The transmission of electric energy without wires," in *13th Anniversary Number of the Electrical World and Engineer*, 1904.
- [2] J. Curty, M. Declercq, C. Dehollain, and N. Joehl, *Design and Optimization of Passive UHF RFID Systems*. New York: Springer, 2007.
- [3] K. Lin, J. Yu, J. Hsu, S. Zahedi, D. Lee, J. Friedman, A. Kansal, V. Raghunathan, and M. Srivastava, "Helimote: Enabling long-lived sensor networks through solar energy harvesting," in *3rd Int. Conf. Embedded Networked Sensor Syst.*, Nov. 2–4, 2005, p. 309.
- [4] J. A. Paradiso, "Systems for human-powered mobile computing," in *Proc. 43rd Design Automation Conf. (DAC)*, Jul. 24–28, 2006, pp. 645–650.
- [5] C. R. V. Leonov, T. Torfs, P. Fiorini, and C. Van Hoof, "Thermoelectric converters of human warmth for self-powered wireless sensor nodes," *IEEE Sensors J.*, vol. 7, no. 5, pp. 650–657, May 2007.
- [6] D. W. Harrist, "Wireless battery charging system using radio frequencyenergy harvesting," M.S. thesis, Univ. Pittsburgh, Pittsburgh, PA, 2004.
- [7] A. Sample and J. R. Smith, "Experimental results with two wireless power transfer systems," in *IEEE Radio Wireless Symp.*, Jan. 2009, pp. 16–18.
- [8] D. Bouchouicha, F. Dupont, M. Latrach, and L. Ventura, "Ambient RF energy harvesting," in *IEEE Int. Conf. Renewable Energies Power Quality (ICREPQ'10)*, Mar. 2010, pp. 486–495.

- [9] H. Ba, I. Demirkol, and W. Heinzelman, "Feasibility and benefits of passive RFID wake-up radios for wireless sensor networks," in *IEEE GolbeCom 2010*, Dec. 2010, pp.1-5.
- [10] T. Urgan and L. M. Reindl, "Harvesting low ambient RF-sources for autonomous measurement systems," in *Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf.*, May 2008, pp. 62-65.
- [11] H. Javaheri and G. Noubir, "iPoint: A platform-independent passive information kiosk for cell phones," in *Proc. 7th IEEE SECON 2010*, Jun. 2010, pp. 1-9.
- [12] P2000 Series 902-928 MHz Powerharvester Development Kit Powercast Corp. [Online]. Available: <http://www.powercastco.com/products/development-kits/>
- [13] H. Yan, J. G. M. Montero, A. Akhnoukh, L. C. N. de Vreede, and J. N. Burghart, "An integration scheme for RF power harvesting," presented at the 8th Annu. Workshop Semiconductor Advances Future Electron. Sensors, Veldhoven, The Netherlands, 2005.
- [14] <<<http://world-nuclear.org/info/inf16.html>>>.
- [15] U.S. Department of Energy Brochure, "The Smart grid: An Introduction," Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, Sep. 2008.
- [16] U.S. Environmental Protection Agency, "INVENTORY OF U.S. GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND SINKS: 1990 - 2009", Washington, DC, April, 2011.
- [17] http://www.eia.gov/cneaf/electricity/epm/epm_sum.html

[18] S. Fred Singer, "HOT TALK, COLD SCIENCE: Global Warming's Unfinished Debate", The Independent Institute, CA, 1999.

[19] Jarret Wollstein, "Global Warming: Myths and Reality", <<<http://www.isil.org/resources/fnn/2007june/global-warming-hoax.html>>>.

[20] "What Really Happened", <<[http:// whatreallyhappened.com/ WRHARTICLES/globalwarming.html](http://whatreallyhappened.com/WRHARTICLES/globalwarming.html). >>.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρακάτω παρουσιάζονται οι Κώδικες Matlab για την επίλυση του πειράματος με το Θερμίστορ, καθώς επίσης και του Τρανζίστορ.

```
clc;
close all;
clear all;

%Pirama me Thermistor

%Thermokrasia (C)
T_c = [25:1:60];
%Thermokrasia (K)
T_k = 273.2 + T_c;
T = T_k;

%Thermokrasia anaforas 25C (K)
T_0 = 298*ones(1,length(T));
%Antistasi se thermokrasia T_0 (?)
R_0 = 100;
%Parametros thermistor (K)
b = 4143;
%Rs (kΩ)
R_s = 81.6;

R_T = R_0.*exp(b.*(1./T)-(1./T_0));

figure;
plot(T_c, R_T);
hold on;
xlabel('thermokrasia celsius');
ylabel('antstasi tou thermistor');

%Metriseis me pigi sta 2.5V
V_in = 2.5;
T_metr_p1 = [28, 30, 33, 37, 43, 52];
V_0_p1 = [1.299, 1.250, 1.165, 1.1, 0.96, 0.760];

%Antistasi Thermistor apo nomo reumatwn (k?)
R_meas_p1 = (V_0_p1./(V_in-V_0_p1)).*R_s;

stem(T_metr_p1, R_meas_p1, 'g');
```

```
%Metriseis me to kuklwma
V_in_k = (2.9+2.85+2.80+2.85+2.7+2.6)/6;
T_metr_p2 = [27, 30, 33, 37, 43, 54];
V_0_p2 = [1.52, 1.42, 1.31, 1.245, 1.015, 0.750];

%Antistasi Thermistor apo nomo reumatwn (k?)
R_meas_p2 = (V_0_p2./(V_in-V_0_p2)).*R_s;

stem(T_metr_p2, R_meas_p2, 'r');
hold off;
legend('R_Theor', 'Me pigi 2.5V', 'Me rf_harvesting');

figure;
plot(T_metr_p1, V_0_p1);
hold on;
xlabel('thermokrasia celsius');
ylabel('tasi eksodou V_0');

plot(T_metr_p2, V_0_p2, 'r');
hold off;
legend('Me pigi 2.5V', 'Me rf_harvesting');
grid on;
```

Για το πείραμα με το τρανζίστορ 2N4401.

```
clc;
close all;
clear all;

% Pirama me lm334 kai 2n4401

%R tou 334 (?)
R_adj = 68;
%Boltzmann (J/K)
k = 1.380*(10^(-23));
%(Cb)
q = 1.602*(10^(-19));
%I apo 334 (A)
I_c = 0.06764/R_adj;
%Anastrofo I koresmou (A)
I_so = 0.5*(10^(-13));

%Thermokrasia (C)
T_c = [25:1:60];
%Thermokrasia (K)
```

```
T_k = 273.2 + T_c;
T = T_k;

%V_be = V_o1 του 2n4401
V_o1 = (k.*T/q).*log(1+(I_c/I_so).*2.^-((T-298.2)/5));

figure;
plot(T_c, V_o1);
hold on;
xlabel('thermokrasia celsius');
ylabel('tasi tou V__be του 2N4401');

%Metriseis me pigi sta 9.29V
T_metr_p1 = [26, 29, 33, 37, 42, 47, 52];
V_0_p1 = [0.603, 0.598, 0.588, 0.582, 0.570, 0.560, 0.550];

stem(T_metr_p1, V_0_p1, 'g');

%Metriseis me kuklwma sta 1.22V
T_metr_p2 = [30, 33, 36, 40, 45, 50, 56];
V_0_p2 = [0.540, 0.534, 0.528, 0.520, 0.510, 0.500, 0.488];

stem(T_metr_p2, V_0_p2, 'r');
hold off;
legend('R__Theor', 'Me pigi 9.29V', 'Me rf__harvesting');

figure;
plot(T_metr_p1, V_0_p1);
hold on;
xlabel('thermokrasia celsius');
ylabel('tasi eksodou V_0');

plot(T_metr_p2, V_0_p2, 'r');
hold off;
legend('Me pigi 9.29V', 'Me rf__harvesting');
grid on;
```