



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ,
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**Κατασκευή και χαρακτηρισμός ηλεκτρονικού κυκλώματος για
μικρομηχανικές γεννήτριες συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Κ. Γαλάνης

Επιβλέπων Καθηγητής Σχολής ΗΜΜΥ: Δημήτριος Τσαμάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων Ερευνητής ΕΚΕΦΕ “Δ”: Δρ Χρήστος Τσάμης, Διευθυντής Ερευνών ΕΚΕΦΕ
“Δημόκριτος”

Αθήνα, Ιούλιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ,
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

**Κατασκευή και χαρακτηρισμός ηλεκτρονικού κυκλώματος για
μικρομηχανικές γεννήτριες συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Κ. Γαλάνης

Επιβλέπων Καθηγητής Σχολής ΗΜΜΥ: Δημήτριος Τσαμάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων Ερευνητής ΕΚΕΦΕ “Δ”: Δρ Χρήστος Τσάμης, Διευθυντής Ερευνών
ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 25^η Ιουλίου 2016

.....
Δ. Τσαμάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ι. Ξανθάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρ. Τσάμης
Διευθυντής Ερευνών,
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

.....
Παναγιώτης Κ. Γαλάνης

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

Αθήνα, Ιούλιος 2016

*Copyright © Παναγιώτης Κ. Γαλάνης, Αθήνα, 2016
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος». Ολοκληρώνοντας αυτή την εργασία, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου, στον επιβλέποντα μου, Δρ Χ. Τσάμη, Διευθυντή Ερευνών του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», για την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξη του, καθώς και τη συνεχή θεωρητική και πρακτική του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τον επιβλέποντα της εργασίας Καθ. Δ. Τσαμάκη, καθώς και τον Καθ. Ι. Ξανθάκη για τις χρήσιμες υποδείξεις και παρατηρήσεις τους. Ευχαριστώ την ερευνήτρια του INN Δρ Ε. Μακαρώνα για τις πολύτιμες συμβουλές της. Ευχαριστώ επίσης όλους τους φίλους και τους συνεργάτες μου στο Εργαστήριο Συλλογής Ενέργειας και Αυτόνομων Αισθητήρων του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας για το άριστο κλίμα συνεργασίας και τη βοήθειά τους.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για τη συνεχή στήριξη που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός, η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός κυκλωμάτων για μικρογεννήτριες συλλογής της μηχανικής ενέργειας του περιβάλλοντος. Αρχικά, έγινε η ανάλυση ενός αυτόνομου συστήματος, των μερών από τα οποία απαρτίζεται, καθώς και οι εφαρμογές του. Στη συνέχεια, έγινε καταγραφή των κυκλωμάτων συλλογής ενέργειας από τη βιβλιογραφία και έγινε κατασκευή και χαρακτηρισμός των κυκλωμάτων που επιλέχθηκαν (απλό κύκλωμα ανόρθωσης, διπλασιαστής και τετραπλασιαστής τάσης). Για την ανάλυση των κυκλωμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης Multisim, τα αποτελέσματα του οποίου συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα αξιολόγησης των κυκλωμάτων. Η αξιολόγηση των κυκλωμάτων έγινε με την χρήση δύο μικρογεννητριών συλλογής ενέργειας των οποίων η λειτουργία βασίζεται σε διαφορετικές φυσικές αρχές: μίας πιεζογεννήτριας και μίας τριβογεννήτριας. Μελετήθηκε η απόδοση των κυκλωμάτων στις δύο περιπτώσεις και βελτιστοποιήθηκε η λειτουργία τους.

Τέλος, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν διατάξεις επίδειξης, που έχουν τη δυνατότητα να τροφοδοτήσουν μία απλή ηλεκτρονική διάταξη (LED) ή ένα πιο σύνθετο ηλεκτρονικό κύκλωμα (αισθητήρας με οθόνη και ηλεκτρονικά ελέγχου) αξιοποιώντας την αποθηκευμένη ενέργεια.

Λέξεις Κλειδιά

Συλλογή ενέργειας, συλλέκτες ενέργειας, μικρογεννήτριες, νανογεννήτριες, αυτόνομα συστήματα, ανορθωτής πλήρους κύματος, διπλασιαστής τάσης, τετραπλασιαστής τάσης, πιεζογεννήτρια, τριβογεννήτρια, αισθητήρας, Multisim

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the design, manufacturing and characterization of circuits that are used for the storage of energy collected by microgenerators by harvesting the environment's ambient mechanical energy. As a first step, an analysis of an autonomous system, the parts it is composed of and its potential applications was carried out. As a second step, various types of energy collecting circuits were recorded from literature and three selected circuits, namely the full wave rectifier, the voltage doubler and the quadrupler were realized and characterized. Multisim simulation software was used for the theoretical analysis of the circuits, the results of which were compared with the experimental results. The evaluation of the circuits was conducted with the use of two energy collecting microgenerators the operation of which is based on different physical principles: a piezoelectric and a triboelectric generator. The performance of these two circuits was studied and optimized.

Finally, several circuits that have the ability to power up via the collected and stored energy single electronic devices (such as single or an array of LEDs) or more complex electronic circuits (temperature and humidity sensor with display and control electronics), , were designed, realized and demonstrated.

Key Words

Energy harvesting, energy harvesters, microgenerators, nanogenerators, autonomous systems, full wave rectifier, voltage doubler, quadrupler, piezoelectric generator, triboelectric generator, sensor, Multisim

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ABSTRACT	vi
Κατάλογος Πινάκων	xi
Κατάλογος Εικόνων	xii
Εισαγωγή	1
1. Αυτόνομα Συστήματα	3
1.1. Χαρακτηριστικά και εφαρμογές των αυτόνομων συστημάτων	3
1.2. Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN)	7
1.3. Διατάξεις Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage)	10
1.3.1. Μπαταρίες.....	10
1.3.1.1. Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Lithium Ion).....	12
1.3.2. Πυκνωτές.....	15
1.3.2.1. Supercapacitors	15
1.4. Συλλέκτες Ενέργειας-Νανογεννήτριες	18
1.4.1. Πιεζοηλεκτρικές Γεννήτριες (Piezoelectric Generators).....	18
1.4.2. Τριβοηλεκτρικές Γεννήτριες (Triboelectric Generators).....	21
1.4.3. Θερμοηλεκτρική ενέργεια	23
2. Κυκλώματα για διατάξεις συλλογής ενέργειας.....	27
2.1. Είδη κυκλωμάτων.....	27
2.1.1. Παθητικά Κυκλώματα	27

2.1.2.	Ενεργά Κυκλώματα	29
2.2.	Κυκλώματα για συλλέκτες ενέργειας.....	30
2.2.1.	Κύκλωμα συλλογής ενέργειας ενός σταδίου-Ανορθωτής Γέφυρας.....	30
2.2.2.	Κυκλώματα συλλογής ενέργειας δύο σταδίων-Μετατροπέας DC-DC για τη ρύθμιση της αντίστασης.....	31
2.2.3.	Κυκλώματα για συλλέκτες ηλιακής ενέργειας	35
2.2.4.	Κυκλώματα για Συλλέκτες θερμικής ενέργειας.....	40
2.2.5.	Κύκλωμα Συλλογής Μηχανικής Ενέργειας και Ραδιοκυμάτων	41
2.2.5.1.	Μηχανική Ενέργεια.....	42
2.2.5.2.	Ραδιοκύματα-RF	45
2.2.6.	Κύκλωμα Συλλογής Ενέργειας με τη Μέθοδο Συγχρονισμένης Εξαγωγής Φορτίου	46
2.2.7.	Κύκλωμα Συλλογής Ενέργειας με τη Μέθοδο Συγχρονισμένου Διακόπτη Πάνω σε Πηνίο.....	49
3.	Κατασκευή και χαρακτηρισμός κυκλωμάτων	53
3.1.	Ανορθωτής Πλήρους Κύματος (Full Wave Rectifier).....	54
3.1.1.	Τρόπος λειτουργίας	54
3.1.2.	Ανάλυση και προσομοίωση κυκλώματος	55
3.2.	Διπλασιαστής τάσης (Voltage Doubler)	60
3.2.1.	Τρόπος λειτουργίας	60
3.2.2.	Ανάλυση και προσομοίωση κυκλώματος	61
3.3.	Τετραπλασιαστής τάσης (Quadrupler).....	62
3.3.1.	Κύκλωμα Cockroft-Walton.....	62
3.3.2.	Dickson Charge Pump.....	64

3.3.3.	Τροποποίηση για RF Harvesting	67
3.3.4.	Κατασκευή κυκλώματος στο εργαστήριο	68
3.4.	Θόρυβος από το περιβάλλον του εργαστηρίου	75
4.	Χαρακτηρισμός συλλεκτών μηχανικής ενέργειας.....	79
4.1.	Αποτελέσματα πειραμάτων με τη χρήση τριβογεννητριών	79
4.2.	Αποτελέσματα πειραμάτων με τη χρήση πιεζογεννητριών	83
4.3.	Προβλήματα και τρόποι αντιμετώπισης.....	86
4.3.1.	Απώλειες οργάνων μέτρησης	87
4.3.2.	Επιλογή τύπου διόδων των κυκλωμάτων	87
4.3.3.	Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος	88
4.4.	Μέγιστη απόδοση μικρογεννητριών.....	88
4.5.	Συνδυαστικό Κύκλωμα (hybrid) Thermoelectric – Triboelectric.....	92
4.6.	Κυκλώματα Επίδειξης.....	95
4.6.1.	Κύκλωμα RC-Αποφόρτιση πυκνωτή.....	96
4.6.2.	LED.....	97
4.6.2.1.	LED με αποθήκευση ενέργειας.....	97
4.6.2.2.	LED χωρίς αποθήκευση ενέργειας	98
4.6.3.	Αισθητήρας Θερμοκρασίας και Υγρασίας	99
	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	101
	Παράρτημα Α, Αποφόρτιση Πυκνωτή (Κύκλωμα RC).....	103
	Παράρτημα Β, Ανάλυση Fourier	105
	Παράρτημα Γ, Συλλογή Ηλεκτρομαγνητικού Θορύβου από το περιβάλλον	108

Γ.1 Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος από το περιβάλλον	108
Γ.2 Περιορισμοί	110
Αναφορές	111

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1 Διάφορα σενάρια των αυτόνομων συστημάτων σύμφωνα με τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται.....	6
Πίνακας 1-2 Σύγκριση μεταξύ των μπαταριών και των supercapacitors	16
Πίνακας 4-1 Μέγιστες τάσεις των φορτίσεων (πειραματικών και του προγράμματος προσομοίωσης) των τριών κυκλωμάτων	83
Πίνακας 4-2 Σύγκριση της αποθηκευμένης ενέργειας των κυκλωμάτων σε χρόνο 5 λεπτών λόγω των τριβογεννητριών και των πιεζογεννητριών.....	86
Πίνακας 4-3 Μέγιστη ενέργεια και ισχύς των τριών τριβογεννητριών που αξιολογήθηκαν .	92

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Δομή ενός αυτόνομου συστήματος ενέργειας.....	3
Εικόνα 1.2 Ενεργειακές πυκνότητες πηγών.....	5
Εικόνα 1.3 Ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας για διαφορετικές τεχνολογίες στα αυτόνομα συστήματα	5
Εικόνα 1.4 Κατανεμημένος ασύρματος μετεωρολογικός σταθμός όπου “H” είναι οι αισθητήρες υγρασίας, “L”, οι αισθητήρες φωτός, “T”, οι αισθητήρες θερμοκρασίας και “S” είναι ο κόμβος.....	8
Εικόνα 1.5 Σχεδιάγραμμα κόμβου	9
Εικόνα 1.6 Αισθητήριος κόμβος.....	10
Εικόνα 1.7 Σύγκριση των βαρομετρικών (Wh/Kg) και ογκομετρικών (Wh/L) ενεργειακών πυκνοτήτων των μπαταριών ιόντων λιθίου με εκείνες των άλλων επαναφορτιζόμενων μπαταριών.....	12
Εικόνα 1.8 Η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης που γίνεται σε ένα στοιχείο ιόντος λιθίου που αποτελείται από γραφίτη για άνοδο και επικάλυψη LiCoO_2 για κάθοδο.....	13
Εικόνα 1.9 Σχηματική τομή τμήματος της μπαταρίας λεπτού υμενίου	14
Εικόνα 1.10 Παραδείγματα μπαταριών που φτιάχτηκαν από τις (a) Oak Ridge Micro-Energy, (b) Infinite Power Solutions, (c) Excellatron, (d) Front Edge Technology και (e) Cymbet Corporation	14
Εικόνα 1.11 Διάγραμμα σύγκρισης Πυκνότητας Ισχύος-Τάση κοινών αναγεννητικών και λιθίου/ ιόντων λιθίου μπαταρίες	19
Εικόνα 1.12 Πιεζοηλεκτρικός πρόβολος harvester υπό διέγερση και η σχηματική του αναπαράσταση.....	20
Εικόνα 1.13 Σχηματική αναπαράσταση ενός ολοκληρωμένου πιεζοηλεκτρικού συστήματος	21
Εικόνα 1.14 Οι τέσσερις θεμελιώδεις λειτουργίες των τριβοηλεκτρικών γεννητριών α) λειτουργία κάθετης επαφής-διαχωρισμού, β) πλευρική συρόμενη λειτουργία γ) λειτουργία μονού ηλεκτροδίου δ) λειτουργία ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων	22
Εικόνα 1.15 Σχηματική απεικόνιση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Πολλά θερμοηλεκτρικά ζεύγη (κάτω εικόνα) n-type και p-type τα οποία συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά και θερμικά παράλληλα σχηματίζουν μία θερμοηλεκτρική μονάδα (πάνω εικόνα). Το	

ύψος των θερμοηλεκτρικών στοιχείων και της περιοχής των υποστρωμάτων, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θερμικής αντίστασης της μονάδας (2009 Priya Energy harvesting Technologies)	25
Εικόνα 1.16 Seiko Thermic, ένα ρολόι χεριού που τροφοδοτείται από τη θερμότητα του σώματος χρησιμοποιώντας έναν θερμοηλεκτρική μετατροπέα ενέργειας. (Αριστερά) το ρολόι, (Δεξιά) η σχηματική απεικόνιση λειτουργίας του	26
Εικόνα 2.1 Τοπολογίες κυκλωμάτων ανόρθωσης πλήρους κύματος: (α) ανορθωτής διόδου, (β)-(δ) ανορθωτικές διατάξεις με τρανζίστορ MOS	28
Εικόνα 2.2 Ενεργό κύκλωμα ανορθωτή με διακόπτες PMOS.....	29
Εικόνα 2.3 (α) Κλασικό κύκλωμα συλλογής ενέργειας με μετατροπέα AC-DC και (β) ισοδύναμη απεικόνιση κυκλώματος	31
Εικόνα 2.4 Γενικευμένο κύκλωμα δύο σταδίων συλλογής ενέργειας από πιεζογεννήτρια ...	32
Εικόνα 2.5 Μετατροπέας DC-DC δύο σταδίων	33
Εικόνα 2.6 α) Απόδοση ενός μετατροπέα DC-DC που προκύπτει από την εξίσωση της απόδοσης και προσομοιώσεις του SPICE και β) σύγκριση της αποδοτικότητας των κυκλωμάτων ανόρθωσης ενός σταδίου και δύο σταδίων	33
Εικόνα 2.7 Κύκλωμα ταιριάσματος αντίστασης με έναν μετατροπέα buck-boost.....	34
Εικόνα 2.8 Κύκλωμα για τη συλλογή ηλιακής ενέργειας	36
Εικόνα 2.9 Ρεύμα και ισχύς σε συνάρτηση με την τάση του ηλιακού στοιχείου το οποίο βρίσκεται κάτω από το φως ηλιακής λάμπας γραφείου.....	37
Εικόνα 2.10 Κύκλωμα συλλογής ηλιακής ενέργειας	38
Εικόνα 2.11 Κύκλωμα που τροφοδοτείται από αρκετές ηλιακές κυψέλες σε σειρά, μέσω μιας διόδου	39
Εικόνα 2.12 Σχηματικό διάγραμμα ενός pulse-oximeter το οποίο τροφοδοτείται από μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια	40
Εικόνα 2.13 Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια του Fraunhofer η οποία διαθέτει ένα κύκλωμα το οποίο εκκινεί με χαμηλή τάση	40
Εικόνα 2.14 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος διαχείρισης ισχύος πολλαπλών γεννητριών	41
Εικόνα 2.15 Σχηματικό διάγραμμα χωρητικού μετατροπέα	41

Εικόνα 2.16 Ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας για μία πιεζοηλεκτρική γεννήτρια.....	43
Εικόνα 2.17 Κύκλωμα διαχείρισης ενέργειας για πιεζοηλεκτρική γεννήτρια.....	43
Εικόνα 2.18 Ολοκληρωμένο κύκλωμα ανορθωτή χωρίς πτώση τάσης στις διόδους	44
Εικόνα 2.19 Σχηματική αναπαράσταση του ανορθωτή πλήρους γέφυρας για πολυφασικό πιεζοηλεκτρικό harvester.....	45
Εικόνα 2.20 Τύπος ανορθωτή NMOS με αποσυνδεδεμένα τρανζίστορ	46
Εικόνα 2.21 Τύπος ανορθωτή NMOS.....	46
Εικόνα 2.22 Κύκλωμα Synchronous charge extraction.....	47
Εικόνα 2.23 Το σήμα μεταγωγής και η κυματομορφή της τάσης πάνω στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο	48
Εικόνα 2.24 Ένα από τα κυκλώματα SCE	49
Εικόνα 2.25 Οι κυματομορφές του εκπομπού του T1 και του συλλέκτη του T3	49
Εικόνα 2.26 Κύκλωμα synchronized switch harvesting on the inductor - SSHI.....	50
Εικόνα 2.27 Κυματομορφές των τάσεων και των μετατοπίσεων	51
Εικόνα 2.28 Κύκλωμα SSHI.....	52
Εικόνα 3.1 Ανορθωτής Πλήρους Κύματος (Full Wave Rectifier) α) σχηματική απεικόνιση β) φωτογραφία κατασκευασμένου κυκλώματος	54
Εικόνα 3.2 Ισοδύναμο κύκλωμα της ανόρθωσης όταν άγουν οι διόδοι D1 και D4	55
Εικόνα 3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα της ανόρθωσης όταν άγουν οι διόδοι D2 και D3	55
Εικόνα 3.4 Κυματομορφές τάσεων ανορθωτή α) τάση εισόδου, β) τάσεις των διόδων γ) κυματομορφή εξόδου	56
Εικόνα 3.5 Σήμα στο οποίο έγινε ανάλυση Fourier	57
Εικόνα 3.6 Ανάλυση Fourier σήματος.....	57
Εικόνα 3.7 Παλμογράφος εργαστηρίου.....	58
Εικόνα 3.8 Ηλεκτρόμετρο εργαστηρίου.....	58

Εικόνα 3.9 Καμπύλες φόρτισης Full Wave Rectifier για διαφορετικές συχνότητες πλάτους 500mVpp και θεωρητική καμπύλη από πρόγραμμα προσομοίωσης.....	59
Εικόνα 3.10 Κύκλωμα διπλασιαστή τάσης	61
Εικόνα 3.11 Φωτογραφία κυκλώματος Voltage Doubler κατασκευασμένο πάνω σε διάτρητη πλακέτα	61
Εικόνα 3.12 Καμπύλες φόρτισης Voltage Doubler για διαφορετικές συχνότητες πλάτους 500mVpp και θεωρητική καμπύλη από πρόγραμμα προσομοίωσης.....	61
Εικόνα 3.13 Πολλαπλασιαστής τάσης δύο σταδίων Cockcroft-Walton	63
Εικόνα 3.14 Απλή διάταξη Dickson Charge Pump 4 σταδίων.....	65
Εικόνα 3.15 Dickson Charge Pump με MOSFET στη γραμμική λειτουργία σε παράλληλη σύνδεση με το MOSFET-DIODE.....	67
Εικόνα 3.16: Τροποποιημένο κύκλωμα Dickson charge pump	68
Εικόνα 3.17 Σχηματική αναπαράσταση Quadrupler που κατασκευάστηκε για τα πειράματα	69
Εικόνα 3.18 Φωτογραφία κυκλώματος Quadrupler κατασκευασμένο πάνω σε διάτρητη πλακέτα	69
Εικόνα 3.19 Σύγκριση μέτρησης φόρτισης ανά διαφορετικά διαστήματα χρόνου	70
Εικόνα 3.20 Καμπύλες φόρτισης Quadrupler για διαφορετικές συχνότητες πλάτους 500mVpp και θεωρητική καμπύλη από πρόγραμμα προσομοίωσης.....	71
Εικόνα 3.21 Γραφική Quadrupler 50Hz,1Vp-p μαζί με τη γραφική από το Multisim.....	72
Εικόνα 3.22 Κυματομορφή Quadrupler 50Hz,2Vp-p μαζί με την κυματομορφή από το Multisim.....	73
Εικόνα 3.23 Κυματομορφές τετραπλασιαστή τάσης για τρεις διαφορετικές τάσεις με σταθερή συχνότητα 50Hz	73
Εικόνα 3.24 Σύγκριση τριών κυκλωμάτων.....	75
Εικόνα 3.25 Πάγκος εργαστηρίου με τη γραμμή μεταφοράς και το διακόπτη	76
Εικόνα 3.26 Σήμα παλμογράφου σε διάφορα σενάρια θορύβου α) Περίπτωση 1: με συσκευή που φορτίζει δίπλα στα καλώδια του κυκλώματος β) Περίπτωση 2: χωρίς ενεργοποιημένες συσκευές και καλώδια τροφοδοσίας, γ) Περίπτωση 3: με ενεργοποιημένες συσκευές και καλώδια τροφοδοσίας	77

Εικόνα 3.27 Ενδεικτικές φορτίσεις πυκνωτών λόγω του θορύβου από το εργαστήριο.....	78
Εικόνα 4.1 Επιφάνεια Karton κολλημένη σε φύλλο αλουμινίου.....	79
Εικόνα 4.2 Συσκευή τριβής των επιφανειών	80
Εικόνα 4.3 Σήμα τριβογεννήτριας από παλμογράφο	81
Εικόνα 4.4 Σύγκριση της πειραματικής φόρτισης του πυκνωτή και της φόρτισης μέσω του προγράμματος προσομοίωσης α) απλού κυκλώματος ανόρθωσης, β) κύκλωμα διπλασιαστή τάσης, γ) κύκλωμα τετραπλασιαστή τάσης	82
Εικόνα 4.5 Συγκριτική φόρτιση των 3 κυκλωμάτων που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο και φορτίστηκαν με την ίδια τριβογεννήτρια.....	83
Εικόνα 4.6 Πιεζογεννήτρια εμπορίου V21B.....	84
Εικόνα 4.7 Σχηματική απεικόνιση πιεζογεννήτριας	84
Εικόνα 4.8 Σήμα πιεζογεννήτριας στον παλμογράφο όταν αυτή διεγείρεται με το χέρι.....	85
Εικόνα 4.9 Συγκριτική φόρτιση των 3 κυκλωμάτων που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο και φορτίστηκαν με την ίδια πιεζογεννήτρια	85
Εικόνα 4.10 Σύγκριση των φορτίσεων ανάμεσα στα κυκλώματα του διπλασιαστή τάσης κατασκευασμένα με απλές διόδους και διόδους Schottky	87
Εικόνα 4.11 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε.....	89
Εικόνα 4.12 Στιγμιότυπα της μέγιστης τάσης των υλικών από τον παλμογράφο στη διάρκεια μιας περιόδου για α) Karton/SiO ₂ β) Karton/Al ₂ O ₃ και γ) Karton/HfO ₂	90
Εικόνα 4.13 Πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας τριών υλικών σε σχέση με την αντίσταση στα άκρα της τριβογεννήτριας.....	91
Εικόνα 4.14 Φωτογραφία συνδυαστικού κυκλώματος συλλογής ενέργειας από δύο πηγές	93
Εικόνα 4.15 Υβριδικό κύκλωμα συλλογής ενέργειας από δύο πηγές : α) από μία πηγή η οποία παράγει εναλλασσόμενο σήμα όπως είναι μία τριβογεννήτρια ή μια πιεζογεννήτρια και β) από μία πηγή η οποία παράγει σταθερό τάση DC όπως είναι ένα θερμοστοιχείο ή ένα ηλιακό panel. Στο κύκλωμα υπάρχει επίσης και LED με αντίσταση και διακόπτη για τη λειτουργία του. Το υβριδικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε, παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο	94
Εικόνα 4.16 Εποπτική φωτογραφία της πειραματικής διάταξης όπου φαίνονται από αριστερά προς τα δεξιά η εύκαμπτη πιεζογεννήτρια, το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας, τα δύο θερμοζεύγη για την καταγραφή της θερμοκρασιακής βαθμίδας στα άκρα της	

Θερμοηλεκτρικής διάταξης, και η encapsulated θερμοηλεκτρική διάταξη με την ψύκτρα επάνω στο θερμαντικό στοιχείο	95
Εικόνα 4.17 Κύκλωμα RC.....	96
Εικόνα 4.18 Πειραματική αποφόρτιση πυκνωτή.....	97
Εικόνα 4.19 Φωτογραφία με αναμμένο LED	98
Εικόνα 4.20 Διάταξη επίδειξης η οποία κάτω από το κόκκινο κουμπί είχε μια τριβογεννήτρια και με χτύπημα άναβαν τα LED του Δημόκριτου. Χρησιμοποιήθηκε για το Athens Science Festival 2016	98
Εικόνα 4.21 Αυτοκινητάκι με φώτα LED	99
Εικόνα 4.22 Αισθητήρας της εταιρίας Sensirion για μέτρηση της υγρασίας και της θερμοκρασίας στο χώρο	99
Εικόνα 4.23 Σχηματική απεικόνιση κυκλώματος αισθητήρα	100

Εισαγωγή

Στη σύγχρονη κοινωνία, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο, διότι έχουν τη δυνατότητα να τοποθετηθούν στα πιο απομακρυσμένα μέρη και να στείλουν τα δεδομένα που συλλέγουν σε έναν κόμβο επεξεργασίας. Ωστόσο, για να πραγματοποιηθεί αυτό πρέπει να τροφοδοτηθούν από συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, όπως είναι οι μπαταρίες και οι πυκνωτές, οι οποίες όμως έχουν πεπερασμένη ενέργεια. Για την αδιάλειπτη λειτουργία των αισθητήρων, χρησιμοποιούνται μικρογεννήτριες (energy harvesters), οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν ηλεκτρική ενέργεια από τις μηχανικές δονήσεις του περιβάλλοντος. Οι αισθητήριοι κόμβοι, οι μικρογεννήτριες, καθώς και οι συσκευές αποθήκευσης, αποτελούν κάποια από τα στοιχεία ενός αυτόνομου συστήματος ενέργειας

Ένα από τα πιο κρίσιμα στοιχεία του αυτόνομου συστήματος ενέργειας είναι η διαχείριση της διαθέσιμης ενέργειας μέσω των κατάλληλων κυκλωμάτων. Ο ρόλος των κυκλωμάτων αυτών είναι η ανόρθωση του σήματος (όπου χρειάζεται), η ανύψωση ή ο υποβιβασμός της τάσης, ώστε να επιτευχθεί το κατάλληλο επίπεδο για την τροφοδοσία του φορτίου και τέλος, η αποθήκευση της ενέργειας. Η βιωσιμότητα του αυτόνομου συστήματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την απόδοση και την κατανάλωση του κυκλώματος.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε, σε πρώτο στάδιο, η κατασκευή και η μελέτη κυκλωμάτων, που εκμεταλλεύονται τη μηχανική ενέργεια του περιβάλλοντος, ενώ, παράλληλα, έγινε και ανάλυση του σήματος των τριβογεννητριών για την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών τους και άρα, τη βέλτιστη κατασκευή των κυκλωμάτων. Επίσης, κατασκευάστηκαν και διατάξεις επίδειξης, δηλαδή κυκλώματα, που έχουν τη δυνατότητα να τροφοδοτήσουν ένα φορτίο με την αποθηκευμένη ενέργεια των στοιχείων αποθήκευσης ενέργειας.

Η κατασκευή των κυκλωμάτων και τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Αισθητήρων του Ινστιτούτου Μικροηλεκτρονικής και Νανοτεχνολογίας του ΕΚΕΦΕ « Δημόκριτος ».

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει τα παρακάτω κεφάλαια :

Το κεφάλαιο 1, στο οποίο γίνεται βιβλιογραφική αναφορά στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, στους τρόπους τροφοδοσίας τους (μπαταρίες, πυκνωτές), στα βασικά είδη των συλλεκτών ενέργειας (energy harvesters), καθώς επίσης και στην έννοια των αυτόνομων συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιούν όλα τα παραπάνω.

Το κεφάλαιο 2, στο οποίο γίνεται η καταγραφή ορισμένων κυκλωμάτων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, καθώς επίσης και ο διαχωρισμός των κυκλωμάτων σε ενεργά και παθητικά.

Το κεφάλαιο 3, στο οποίο παρουσιάζεται η κατασκευή των τριών κυκλωμάτων, ο χαρακτηρισμός τους με τη χρήση της γεννήτριας σήματος και τα αποτελέσματα της μεταξύ τους σύγκρισης. Επίσης, μελετήθηκε ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος από τα καλώδια μεταφοράς ρεύματος, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτός μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις ή ακόμα και να βοηθήσει στη συλλογή ενέργειας.

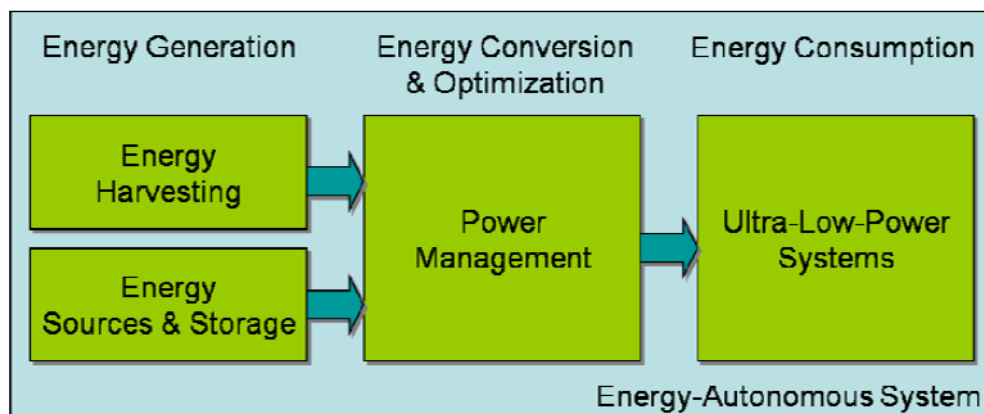
Το κεφάλαιο 4, στο οποίο έγινε χαρακτηρισμός των κυκλωμάτων, χρησιμοποιώντας δύο είδη μικρογεννητριών (τριβογεννήτριες και πιεζογεννήτριες). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε ανάλυση Fourier στο σήμα των γεννητριών και μελετήθηκαν οι συνθήκες της μέγιστης ισχύος των γεννητριών. Τέλος, κατασκευάστηκε ένα συνδυαστικό-υβριδικό κύκλωμα, το οποίο έχει δύο εισόδους για τη συλλογή ενέργειας, όπως και διάφορα κυκλώματα επίδειξης της αποθηκευμένης ενέργειας (τροφοδοσία αισθητήρια και διόδων LED).

Το κεφάλαιο 5, που περιλαμβάνει τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, καθώς και ορισμένες ιδέες για μελλοντική έρευνα.

1. Αυτόνομα Συστήματα

1.1. Χαρακτηριστικά και εφαρμογές των αυτόνομων συστημάτων

Ένα αυτόνομο σύστημα ενέργειας (Energy Autonomous System) είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα το οποίο έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί ή/και να επικοινωνεί όσο το δυνατόν περισσότερο σε γνωστά/άγνωστα περιβάλλοντα παρέχοντας, επεξεργάζοντας και αποθηκεύοντας πληροφορίες χωρίς να είναι συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο. Τα συστήματα αυτά θα μπορούσαν να λειτουργήσουν σε εξωτερικά, φυσικά ή βιομηχανικά περιβάλλοντα, καθώς επίσης και σε εφαρμογές in-vivo στο διαγνωστικό και θεραπευτικό τομέα. Ο σημερινός στόχος είναι η δημιουργία ενός ανεξάρτητου ενεργειακά συστήματος. Τα σημερινά συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν με λιγότερα από μερικές εκατοντάδες μW . Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι οι νομαδικές συσκευές που λειτουργούν με εξαιρετικά χαμηλή ισχύ (ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, in vivo δέκτες και πομποί, συσκευές περιβάλλουσας νοημοσύνης, «έξυπνη σκόνη»). Τα κινητά τηλέφωνα ή οι φορητές συσκευές δεν ανήκουν αυτή τη στιγμή σε αυτή την κατηγορία.



Εικόνα 1.1 Δομή ενός αυτόνομου συστήματος ενέργειας

Τα αυτόνομα συστήματα ενέργειας απαρτίζονται από τρία μέρη (Εικόνα 1.1) :

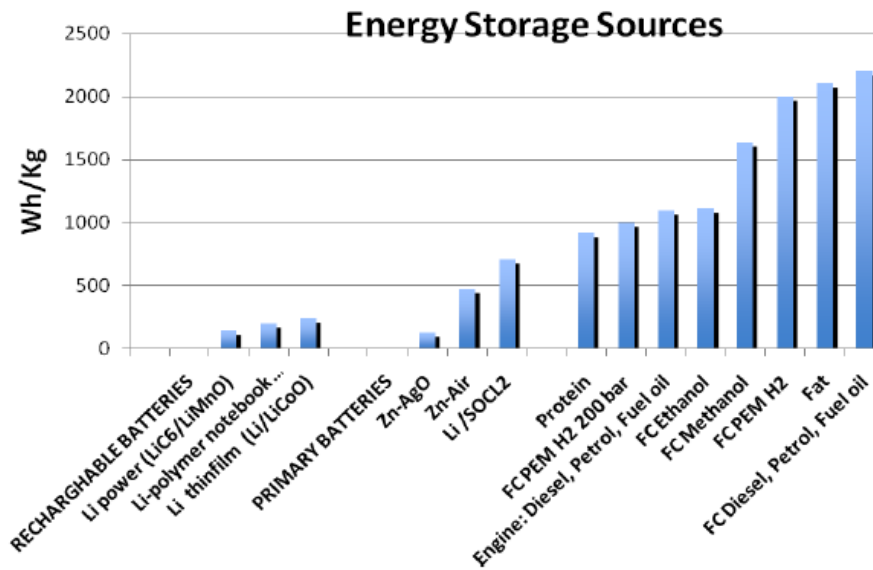
- **Την παραγωγή ενέργειας**, που αποτελείται από:
 - **Συλλογή Ενέργειας (Energy Harvesting)**: περιλαμβάνει κάθε διάταξη ή σύστημα που μπορεί να συλλέξει ενέργεια οποιασδήποτε μορφής από το περιβάλλον και να τη μετατρέψει σε ηλεκτρική. Αποτελούνται συνήθως από διάφορες τεχνικές, οι οποίες

ταξινομούνται με βάση το είδος της ενέργειας που χρησιμοποιείται: διαφορές της θερμοκρασίας, ακτινοβολία φως, ηλεκτρομαγνητικά πεδία, κινητική ενέργεια κλπ.

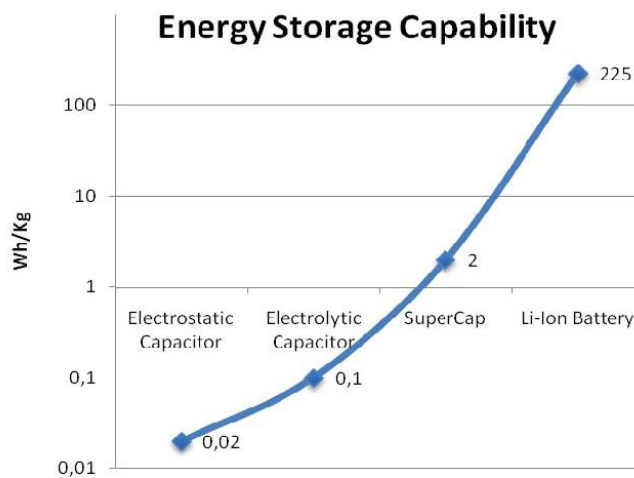
- **Διατάξεις Αποθήκευσης Ενέργειας:** περιλαμβάνει κάθε είδους στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας που συλλέγεται από τον συλλέκτη ενέργειας όταν αυτή δεν χρησιμοποιείται ή για να χρησιμοποιηθεί αργότερα συσσωρευτικά. Συνήθως, οι πηγές ενέργειας αποτελούνται από ηλεκτροχημικά στοιχεία, όπως οι μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμου και τα ηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης (πυκνωτές).
- **Μετατροπή ενέργειας και βελτιστοποίηση:** περιλαμβάνει όλες τις μετατροπές της ενέργειας εντός του συστήματος. Η ενέργεια που καταναλώνεται πρέπει να είναι μικρότερη από την ενέργεια που συλλέγεται για να είναι αποδοτικό το σύστημα.
- **Κατανάλωση Ενέργειας:** το σκέλος αυτό σχετίζεται με την αξιοποίηση της συλλεχθείσας ενέργειας για την απόκτηση δεδομένων, την αποθήκευση και τη μετάδοση τους. Είναι θεμελιώδους σημασίας, δεδομένου ότι οι περισσότερες από τις ευκαιρίες για τη συλλογή ενέργειας σχετίζονται με την αποδοτικότητα αυτού του τμήματος του συστήματος.

Οι εφαρμογές των αυτόνομων συστημάτων ενέργειας, αποκτούν όλο και περισσότερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια λόγω της μείωσης της υπολογιστικής ενέργειας, της αύξησης των δυνατοτήτων των πηγών αποθήκευσης και της αποδοτικότητας των ενεργειακών μετατροπών. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι αν η απαιτούμενη ενέργεια των συστημάτων είναι μικρότερη από την ενέργεια που συλλέγεται, είναι δυνατόν ένας συλλέκτης ενέργειας να τροφοδοτήσει εξολοκλήρου ένα αυτόνομο σύστημα. Αν όχι, τότε μπορεί να συμβάλει στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Σε αυτή την περίπτωση, το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας και της ενέργειας που συλλέγεται, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από την ενέργεια που καταναλώνεται.

Στην Εικόνα 1.2 φαίνονται οι ενεργειακές πυκνότητες (Wh/Kg) διαφόρων πηγών ενέργειας, ενώ στην Εικόνα 1.3 γίνεται μια σύγκριση, η οποία σχετίζεται με την ικανότητα αποθήκευσης των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Σε αυτή φαίνεται ότι η ικανότητα των μπαταριών ιόντων λιθίου, είναι τέσσερις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή των ηλεκτροστατικών πυκνωτών και δύο φορές μεγαλύτερη από την ικανότητα των supercapacitors. Πιο συγκεκριμένα,



Εικόνα 1.2 Ενεργειακές πυκνότητες πηγών



Εικόνα 1.3 Ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας για διαφορετικές τεχνολογίες στα αυτόνομα συστήματα

Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας είναι το είδος της εφαρμογής των αυτόνομων συστημάτων που παρουσιάζεται στον Πίνακα 1-1. Σύμφωνα με αυτόν, τα αυτόνομα συστήματα θα μπορούσαν να έχουν δραματικά διαφορετική συμπεριφορά, ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται.

Πίνακας 1-1 Διάφορα σενάρια των αυτόνομων συστημάτων σύμφωνα με τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται

<u>Σενάρια</u>	<u>Χαρακτηριστικά</u>	<u>Παραδείγματα</u>
Αισθητήρες, επεξεργασία και φυσική συλλογή δεδομένων	Οι αισθητήρες μπορούν να λειτουργούν μέχρι να μπορούν να τους υποστηρίξουν ενεργειακά οι πηγές. Τα δεδομένα συλλέγονται με τη φυσική παρουσία	Έξυπνα χάπια, εξελιγμένα In vino διαγνωστικά συστήματα
Αισθητήρες, επεξεργασία και συλλογή δεδομένων με εξωτερική πηγή ενέργειας	Οι αισθητήρες μπορούν να λειτουργούν μέχρι να μπορούν να τους υποστηρίξουν ενεργειακά οι πηγές. Τα δεδομένα ανακτώνται με την παροχή εξωτερικής τεχνητής ενέργειας	Ενεργή μέθοδος ταυτοποίησης μέσω ραδιοσυχνοτήτων
Αισθητήρες, επεξεργασία και μετάδοση δεδομένων RF	Αισθητήρες, επεξεργασία και μετάδοση δεδομένων. Η ενέργεια θα πρέπει να παρέχεται στο σύστημα για μια ζωή (lifelong)	Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Τα ενεργειακά αυτόνομα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές διαφορετικών κλάδων:

- Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (αναλύεται παρακάτω)
- Επί τόπου παρακολούθηση για τα κινητά συστήματα (π.χ. παρακολούθηση της πίεσης των ελαστικών, βιομηχανική διαδικασία ελέγχου)
- Δίκτυα στην περιοχή του σώματος (π.χ. παρακολούθηση της υγείας, ενεργά είδη ένδυσης, φορητές πηγές ενέργειας)
- Βιοϊατρικές συσκευές (π.χ. βηματοδότες, συστήματα συνεχούς παρακολούθησης βιολογικών παραμέτρων, αυτόματη χορήγηση φαρμάκων)
- Παραγωγή ενέργειας για φορητές συσκευές

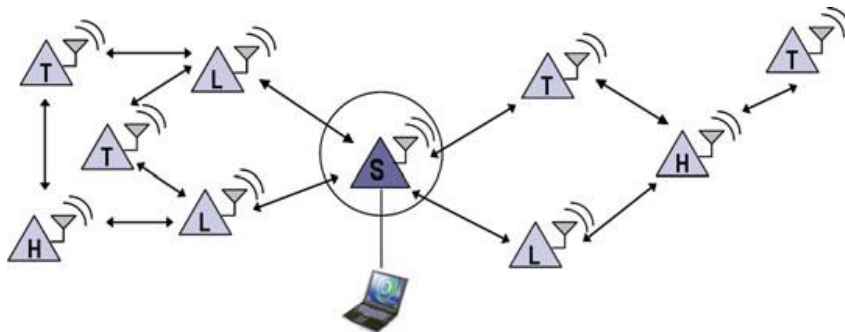
1.2. Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSN)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μια από τις εφαρμογές των αυτόνομων συστημάτων ενέργειας είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από χωρικά αυτόνομους κατανεμημένους αισθητήρες που μετρούν ένα σύνολο φυσικών ποσοτήτων, ανάλογα με την εφαρμογή, και στη συνέχεια μεταδίδουν αυτή την πληροφορία σε ένα κεντρικό σταθμό. Εναλλακτικά, το ασύρματο δίκτυο μπορεί να αποτελείται από έξυπνους κόμβους οι οποίοι να επεξεργάζονται την πληροφορία πριν την μεταδώσουν. Τα πιο σύγχρονα δίκτυα είναι διπλής κατεύθυνσης και επιτρέπουν τον έλεγχο της δραστηριότητας των αισθητήρων. Αρχικά, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αναπτύχθηκαν για να καλύψουν ορισμένες στρατιωτικές ανάγκες, όπως η καλύτερη εποπτεία μιας μάχης. Σήμερα, τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται σε πολλές βιομηχανικές και καταναλωτικές εφαρμογές, όπως είναι η βιομηχανική διαδικασία παρακολούθησης και ελέγχου, κάποιες συσκευές παρακολούθησης της υγείας των ασθενών κλπ. Κάποιες από αυτές τις εφαρμογές είναι οι εξής:

1. Παρακολούθηση της ποιότητας του νερού: Η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού περιλαμβάνει την ανάλυση των ιδιοτήτων του νερού στα φράγματα, τα ποτάμια, τις λίμνες, τους ωκεανούς καθώς και τα υπόγεια αποθέματα νερού. Η χρήση πολλών ασύρματων αισθητήρων, επιτρέπει την ακριβή χαρτογράφηση της κατάστασης των υδάτων χωρίς την ανάγκη χειροκίνητης ανάκτησης των δεδομένων¹
2. Παρακολούθηση της υγείας των ασθενών: Οι ιατρικές εφαρμογές μπορεί να είναι δύο τύπων: εκείνες που εμφυτεύονται και εκείνες που μπορούν να φορεθούν (wearable). Οι συσκευές οι οποίες μπορούν να φορεθούν χρησιμοποιούνται πάνω στην επιφάνεια του σώματος ενός ανθρώπου ή απλά σε πολύ κοντινή απόσταση. Οι εμφυτεύσιμες ιατρικές συσκευές εισάγονται μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Τέτοιες εφαρμογές αφορούν τη μέτρηση της γλυκόζης και του οξυγόνου στο αίμα, την κατανάλωση ενέργειας ενός ατόμου, τις ζωτικές λειτουργίες του κλπ²³
3. Παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης: Ασύρματοι αισθητήρες έχουν τοποθετηθεί σε πόλεις όπως το Λονδίνο και η Στοκχόλμη με σκοπό την παρακολούθηση της συγκέντρωσης των αερίων τα οποία είναι επικίνδυνα για τον ανθρώπινο οργανισμό

4. Ανίχνευση πυρκαγιάς: Ένα τέτοιο δίκτυο ασύρματων αισθητήρων τοποθετείται στα δάση και είναι ικανό να ανιχνεύσει την εκδήλωση πυρκαγιάς. Οι κόμβοι μπορούν να εξοπλιστούν με αισθητήρες για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των αερίων που παράγονται από τη φωτιά. Αξίζει να σημειωθεί ότι η έγκαιρη ανίχνευση είναι ζωτικής σημασίας για τον περιορισμό μιας πυρκαγιάς.

Στη συνέχεια περιγράφεται ένα σύστημα παρακολούθησης περιβαλλοντικών συνθηκών, με τη χρήση ενός μετεωρολογικού σταθμού, και παρουσιάζονται τα μέρη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων εξαιρετικά χαμηλής ισχύος, καθώς και οι ιδιότητες των εξαρτημάτων που απαρτίζουν ένα σύστημα μεγάλης κλίμακας.



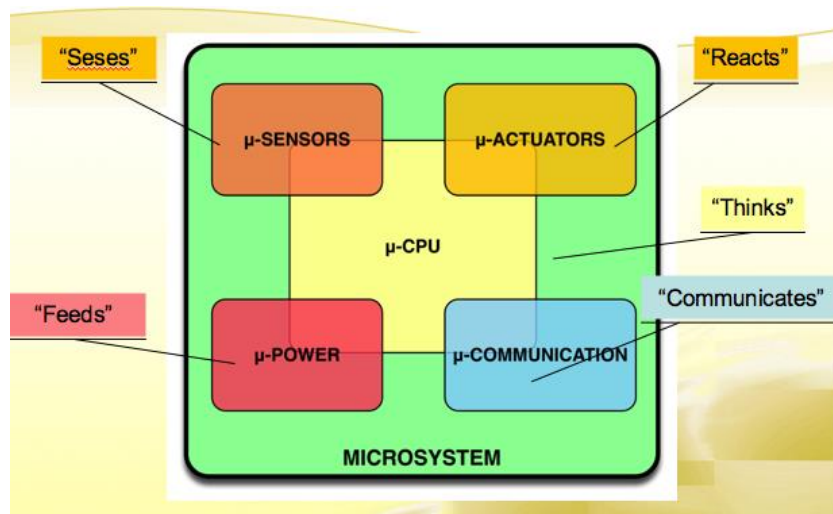
Εικόνα 1.4 Κατανεμημένος ασύρματος μετεωρολογικός σταθμός όπου “H” είναι οι αισθητήρες υγρασίας, “L”, οι αισθητήρες φωτός, “T”, οι αισθητήρες θερμοκρασίας και “S” είναι ο κόμβος

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.4, το συνολικό σύστημα αποτελείται από διάφορους αισθητήρες υγρασίας, φωτός, θερμοκρασίας που συμβολίζονται με “H”, “L” και “T” αντίστοιχα. Αυτοί οι αισθητήρες λειτουργούν ξεχωριστά για να πετύχουν τις μετρήσεις τους, αλλά συνεργάζονται και μεταξύ τους, για να δημιουργήσουν ένα ασύρματο δίκτυο επικοινωνίας. Στο παράδειγμα, ο κόμβος “S”, λαμβάνει όλα τα δεδομένα των αισθητήρων που υπάρχουν στο ασύρματο δίκτυο.

Στη γενικότερη περίπτωση ένας κόμβος ενός ασύρματου δικτύου αποτελείται από 5 υποσυστήματα τα οποία μπορεί να είναι είτε διακριτά είτε πάνω στο ίδιο ολοκληρωμένο κύκλωμα (Εικόνα 1.5) :

- Μονάδα αισθητήρων για ανίχνευση του περιβάλλοντος
- Μονάδα ενεργοποιητών για ανάδραση στο περιβάλλον
- Μονάδα επικοινωνίας

- Μονάδα επεξεργασίας της πληροφορίας (πχ μ CPU)
- Μονάδα ισχύος για τροφοδοσία του κυκλώματος



Εικόνα 1.5 Σχεδιάγραμμα κόμβου

Μία από τις βασικές παραμέτρους που καθορίζει την αποτελεσματικότητα ενός δικτύου είναι η διάρκεια λειτουργίας των ανεξάρτητων κόμβων του δικτύου. Όσο πιο μεγάλη είναι η κατανάλωση ενός κόμβου, τόσο γρηγορότερα εξαντλούνται τα ενεργειακά του αποθέματα (πχ μπαταρία). Προκειμένου να επιμηκύνουμε το χρόνο ζωής κάθε κόμβου είναι αναγκαίο να χρησιμοποιήσουμε ηλεκτρονικά κυκλώματα και αισθητήρες χαμηλής κατανάλωσης ώστε να επιτύχουμε:

- Μείωση της μέσης κατανάλωσης ρεύματος σε μερικά μ A
- Μείωση του χρόνου λειτουργίας του (duty cycles < 1%)
- Μικρός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (1-50 kbps ή ακόμα μικρότερος ρυθμός)
- Χρήση κυκλωμάτων εξαιρετικά χαμηλής ισχύος
- Σωστή διαχείριση πόρων/εξοικονόμηση ενέργειας

Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες και λειτουργικές διεργασίες, που επηρεάζουν σημαντικά τις βασικές ιδιότητες των εν λόγω συστημάτων. Αυτοί οι παράγοντες είναι, για παράδειγμα, η αποδεκτή καθυστέρηση στη μετάδοση των δεδομένων, η οποία μπορεί να εμφανίσει μεγάλες διακυμάνσεις (από μερικά κλάσματα του δευτερολέπτου έως μερικές μέρες), καθώς και ο ρυθμός μετάδοσης. Για τα κλασικά ασύρματα δίκτυα και τα δίκτυα πλέγματος (mesh networks), η απόσταση μεταξύ των κόμβων (μερικά εκατοστά έως μερικά

χιλιόμετρα) είναι επίσης πολύ σημαντική, αφού έχει σημαντική επίπτωση στην απαιτούμενη ισχύ τροφοδοσίας τους. Επίσης, η απαιτούμενη διάρκεια ζωής χωρίς την παρουσία εξωτερικής πηγής ενέργειας είναι ένας κρίσιμος παράγοντας, ο οποίος σχετίζεται άρρηκτα με την κατανάλωση ενέργειας. Για ένα δοσμένο χρονικό διάστημα, οι παράμετροι της κατανάλωσης, αλλά και της παραγωγής (συλλογή ενέργειας και αποθήκευση σε μπαταρία ή πυκνωτή), πρέπει να εξισωθούν ανάλογα. Πρέπει να αναφερθεί, ότι το κόστος ενός δικτύου συνδέεται με την ποσότητα των αισθητήρων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, οι οποίοι κυμαίνονται από μερικές δεκάδες έως μερικές χιλιάδες. Συνεπώς, όσο μεγαλώνει η ποσότητα, τόσο αυξάνεται το κόστος του υλικού (hardware) και της παραγωγικής διαδικασίας.



Εικόνα 1.6 Αισθητήριος κόμβος

Ωστόσο, για τη λειτουργία των αισθητήρων σε απομακρυσμένες περιοχές, αλλά και σε εφαρμογές οι οποίες απαιτούν φορητότητα, η αλλαγή των μπαταριών είναι δύσκολη ή ακόμα και ακατόρθωτη ειδικά στα συστήματα τα οποία αποτελούνται από εκατοντάδες ή χιλιάδες αισθητήρες. Για αυτό το λόγω είναι αναγκαία η επαναφόρτιση τους.

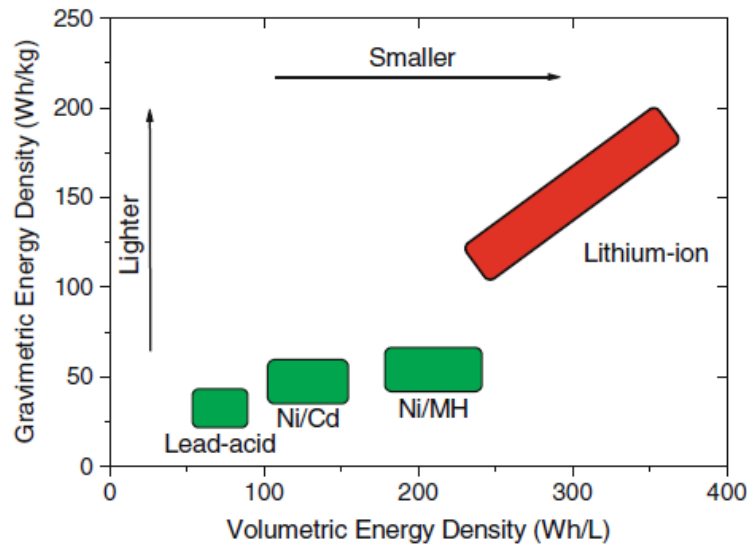
1.3. Διατάξεις Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage)

1.3.1. Μπαταρίες

Οι μπαταρίες είναι μια από τις κυριότερες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας της σύγχρονης κοινωνίας, με ποικίλες εφαρμογές στην καθημερινότητα μας (κινητά τηλέφωνα, φορητές συσκευές αναπαραγωγής ήχου, αυτοκίνητα, κλπ). Οι μπαταρίες είναι, επίσης, ζωτικής

σημασίας και για την αποθήκευση της ενέργειας που συλλέγεται από τις ανανεώσιμες πηγές (ηλιακή, αιολική, θερμική), με στόχο την χρήση της σε περίπτωση ανάγκης. Οι μπαταρίες Li-ion και οι μπαταρίες Li-polymer που είναι επαναφορτιζόμενες, έχουν τη μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα φόρτισης και εκφόρτισης. Η φόρτιση μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι περίπλοκη και συνήθως γίνεται από ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα φόρτισης (charging IC). Σε όλες αυτές τις εφαρμογές, η ενεργειακή πυκνότητα της μπαταρίας, η οποία είναι η ποσότητα της ενέργειας που αποθηκεύεται ανά μονάδα όγκου (Wh/L) ή η ποσότητα της ενέργειας που αποθηκεύεται ανά μονάδα βάρους (Wh/Kg), είναι μια πολύ κρίσιμη παράμετρος. Το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται εξαρτάται από τη χωρητικότητα (ποσότητα φορτίου που αποθηκεύεται) ανά μονάδα όγκου (Ah/L) ή από τη χωρητικότητα ανά μονάδα βάρους (Ah/L) και την τάση (V) που μπορεί να προσφέρει κάθε στοιχείο της μπαταρίας (battery cell). Επιπλέον, σημαντικά χαρακτηριστικά μιας μπαταρίας είναι η δυνατότητα επαναφόρτισης, ο κύκλος ζωής τους λόγω των φορτίσεων/αποφορτίσεων, καθώς και ο ρυθμός με τον οποίο μπορεί να φορτιστεί/αποφορτιστεί κάθε στοιχείο της. Επίσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη το κόστος και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Όλες αυτές οι ιδιότητες των μπαταριών, σχετίζονται με τη χημεία τους και τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένες.

Μεταξύ των διαφόρων ειδών επαναφορτιζόμενων μπαταριών που υπάρχουν σήμερα, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου προσφέρουν την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τις άλλες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, όπως οι μπαταρίες μολύβδου (lead-acid), οι νικελίου-καδμίου (nickel-cadmium) και οι νικελίου-υδριδίου μετάλλου (nickel-metal hydride) (Εικόνα 1.7).

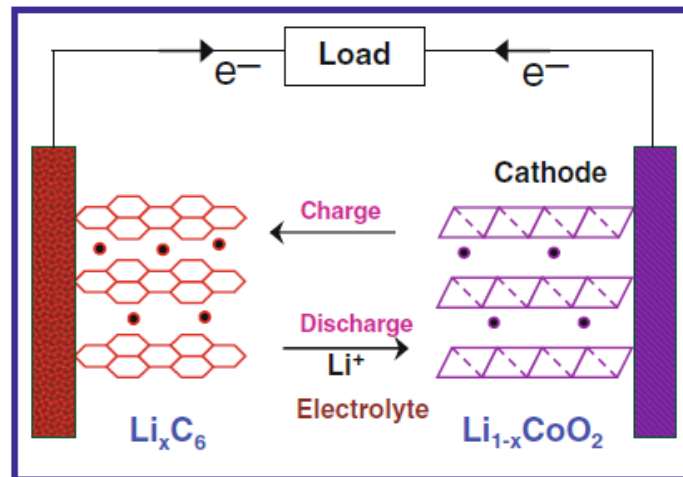


Εικόνα 1.7 Σύγκριση των βαρομετρικών (Wh/Kg) και ογκομετρικών (Wh/L) ενεργειακών πυκνοτήτων των μπαταριών ιόντων λιθίου με εκείνες των άλλων επαναφορτιζόμενων μπαταριών

1.3.1.1. Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Lithium Ion)

Η μπαταρία ιόντων λιθίου (Lithium-ion batteries) έχει επιλεγεί ως η βασικότερη δομή επαναφορτιζόμενης ενέργειας, καθώς προσφέρει πολύ υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τα υπόλοιπα συστήματα. Ωστόσο, οι παράγοντες απόδοσης των ιόντων λιθίου, όπως η ενεργειακή πυκνότητα, η πυκνότητα ισχύος και ο κύκλος ζωής τους, εξαρτώνται από τα υλικά των ηλεκτροδίων. Οι υψηλότερες ογκομετρικές και βαρομετρικές πυκνότητες των στοιχείων των ιόντων λιθίου οφείλονται στις υψηλότερες τάσεις των στοιχείων ($\approx 4V$) που επιτυγχάνονται με τη χρήση μη υδατικών ηλεκτρολυτών, σε αντίθεση με τα περισσότερα υδατικά ηλεκτρολυτικά στοιχεία που επιτυγχάνουν μέχρι 2V.

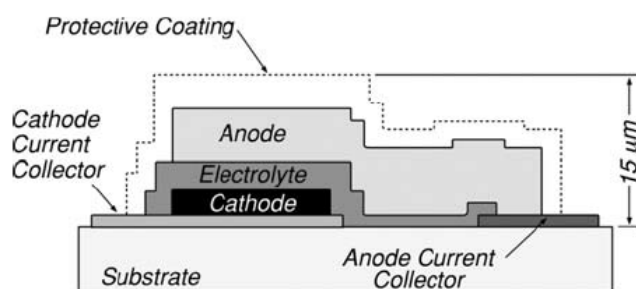
Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου περιλαμβάνουν μια αναστρέψιμη διαδικασία εισαγωγής/εξαγωγής από ιόντα λιθίου από και προς μια μήτρα υποδοχής κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης/εκφόρτισης (Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8 Η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης που γίνεται σε ένα στοιχείο ιόντος λιθίου που αποτελείται από γραφίτη για άνοδο και επικάλυψη LiCoO_2 για κάθοδο

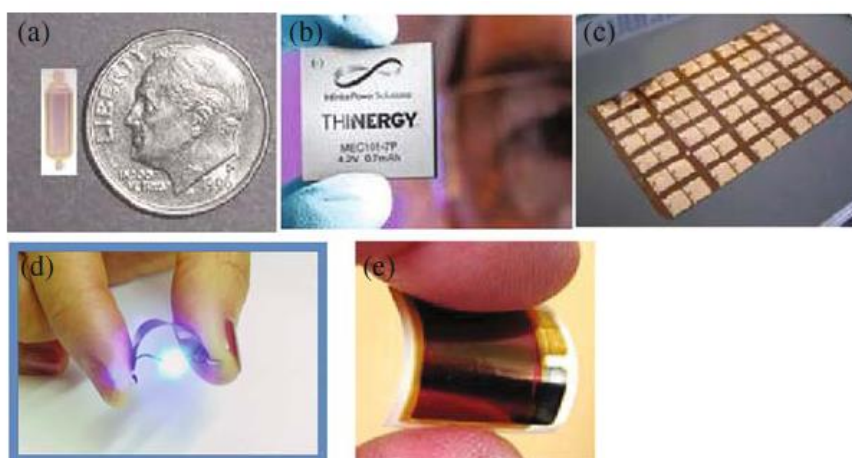
Η μήτρα υποδοχής χρησιμεύει ως ηλεκτρόδιο για το στοιχείο. Η σημερινή γενιά των στοιχείων ιόντων λιθίου χρησιμοποιεί κυρίως γραφίτη και επικάλυψη LiCoO_2 , οι οποίες χρησιμεύουν ως υλικά ανόδου και καθόδου. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται ένα διάλυμα άλατος λιθίου (π.χ. LiPF_6) σε μίγμα απρωτικών διαλυτών όπως το ανθρακικό αιθυλένιο (EC) ή το ανθρακικό διαιθύλιο (DEC). Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, τα ιόντα λιθίου που εξάγονται από την επικάλυψη του LiCoO_2 της καθόδου, ρέουν μέσω του ηλεκτρολύτη και εισάγονται μέσα στα στρώματα της ανόδου του γραφίτη, ενώ τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος από το LiCoO_2 της καθόδου προς την άνοδο του γραφίτη, προκειμένου να διατηρηθεί η ισορροπία του φορτίου. Μπαταρίες Λεπτού Υμενίου (Thin-Film Batteries)

Οι μπαταρίες λεπτού υμενίου (Thin-Film Batteries) είναι εύκαμπτες μπαταρίες πολύ μικρού μεγέθους, οι οποίες αποτελούνται από διάφορα στρώματα υλικών. Αυτές οι πολύ μικρές μπαταρίες αναφέρονται συχνά και ως μικρομπαταρίες και έχουν τις συνηθισμένες μονάδες ισχύος, ενέργειας και χωρητικότητας. Όπως κατασκευάστηκε και από την ORNL (Bates et. al. 2000a, Dudney 2005), μία μπαταρία λεπτού υμενίου είναι εξολοκλήρου σε στερεά κατάσταση και κατασκευάζεται από μια διαδοχική σειρά διαδικασιών εναπόθεσης ατμού. Η τομή για μια κοινή διάταξη μπαταρίας που βρίσκεται σε μονωτικό υπόστρωμα, φαίνεται στην Εικόνα 1.9.



Εικόνα 1.9 Σχηματική τομή τμήματος της μπαταρίας λεπτού υμενίου

Κάθε επιμέρους στρώμα υλικού, έχει πάχος από 0,3 έως μερικά μικρόμετρα. Στην ιδανική περίπτωση το υπόστρωμα, αποτελεί και ένα από τα υλικά της συσκευής. Γενικά, το βάρος και ο όγκος της μπαταρίας καθορίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την βάση πάνω στην οποία θα δημιουργηθούν τα στρώματα των υλικών. Οι μπαταρίες λεπτού υμενίου αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας μια ποικιλία από βάσεις στήριξης από υλικά, όπως το πυρίτιο, η μίκα, η αλουμίνα, διάφορα πολυμερή και μεταλλικά φύλλα. Όπως και φαίνεται και στην Εικόνα 1.10, πολλές μπαταρίες δεν είναι μόνο λεπτές, αλλά και πολύ εύκαμπτες.



Εικόνα 1.10 Παραδείγματα μπαταριών που φτιάχτηκαν από τις (a) Oak Ridge Micro-Energy, (b) Infinite Power Solutions, (c) Excellatron, (d) Front Edge Technology και (e) Cymbet Corporation

Μέχρι σήμερα, οι μπαταρίες λεπτού υμενίου περιορίζονται μόνο σε ένα στρώμα πάνω στην επιφάνεια του υποστρώματος, καθώς υπάρχουν προβλήματα στην εναπόθεση πολλών στρωμάτων. Οι τυπικές ενεργές επιφάνειες είναι μερικά τετραγωνικά εκατοστά, αν και έχουν κατασκευαστεί στοιχεία με ενεργές περιοχές από 1mm^2 μέχρι 25cm^2 . Οι χωρητικότητές τους κυμαίνονται από 1 έως 10mAh. Για την άνοδο και την κάθοδο των

μπαταριών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ποικιλία υλικών τα οποία καθορίζουν το προφίλ της τάσης των στοιχείων της μπαταρίας και σε κάποιο βαθμό, τη χωρητικότητα, την ενέργεια και την ισχύ.

1.3.2. Πυκνωτές

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, λόγω της καθημερινής χρήσης ασύρματων δικτύων αισθητήρων, καθώς και των έξυπνων συστημάτων ανίχνευσης, υπάρχει η ανάγκη για την αποθήκευση ηλεκτρικού φορτίου και τη χρήση του στον κατάλληλο χρόνο. Για την τροφοδοσία αυτών, χρησιμοποιούνται κυρίως επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Ωστόσο, στην πράξη, οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες μπορεί να υποφέρουν από το φαινόμενο μνήμης (memory effect), ή από μία φανερή απώλεια της χωρητικότητας αν επαναφορτιστεί χωρίς να έχει αποφορτιστεί πλήρως. Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες έχουν επίσης έναν περιορισμένο αριθμό κύκλων φορτίσεων που φτάνει τους 1000. Γι αυτούς του λόγους, τα τελευταία χρόνια σε αρκετές εφαρμογές χρησιμοποιούνται οι πυκνωτές.

Ένας πυκνωτής είναι ένα παθητικό ηλεκτρικό στοιχείο δύο ακροδεκτών το οποίο χρησιμοποιείται για την προσωρινή αποθήκευση ηλεκτρικού φορτίου σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα πυκνωτών, αλλά όλοι αποτελούνται τουλάχιστον από δύο αγώγιμες πλάκες που χωρίζονται από ένα διηλεκτρικό υλικό, δηλαδή ένα μονωτή ο οποίος αποθηκεύει ενέργεια αφού αποκτήσει φορτίο. Η σημαντικότερη κατηγορία πυκνωτών είναι οι υπερπυκνωτές (supercapacitors), πυκνωτές δηλαδή οι οποίοι στο ίδιο μέγεθος με έναν συμβατικό, μπορούν να αποθηκεύσουν πολλαπλάσια ποσότητα φορτίου. Στη συνέχεια, αναλύονται τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας των πυκνωτών αυτών.

1.3.2.1. Supercapacitors

Χάρη στους πάρα πολλούς κύκλους φόρτισης/αποφόρτισης, οι supercapacitors λαμβάνουν αυξανόμενο ενδιαφέρον σαν συσκευές αποθήκευσης ενέργειας. Στον Πίνακα 1-2 φαίνονται οι διαφορές μεταξύ των μπαταριών και των supercapacitors. Παρόλο που η χωρητικότητά τους είναι ακόμα αρκετά μικρότερη από αυτή των μπαταριών, ένας supercapacitor μπορεί να αποθηκεύσει αρκετή ενέργεια για να τροφοδοτήσει πολλούς ασύρματους αισθητήρες.

Ειδικότερα, ο πολύ μεγάλος αριθμός των κύκλων φορτίσεων, του επιτρέπει να χρησιμοποιείται για εφαρμογές μακράς διάρκειας.

Οι supercapacitors έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, αλλά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτόματα ως αντικαταστάτες των μπαταριών και να μην λαμβάνονται υπόψη τα εγγενή χαρακτηριστικά τους, όπως είναι η καμπύλη της αποφόρτισης (γράφημα με άξονες την τάση και την ενέργεια), η διαρροή, η ανακατανομή του φορτίου καθώς και η πυκνότητα της ενέργειας. Η τάση τους εξαρτάται από την ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας και λειτουργούν ως ένα εικονικό βραχυκύκλωμα κατά τη φάση της φόρτισης. Επιπλέον, οι supercapacitors έχουν μεγαλύτερο ρεύμα διαρροής από τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες.

Πίνακας 1-2 Σύγκριση μεταξύ των μπαταριών και των supercapacitors

<u>Χαρακτηριστικά</u>	<u>Μπαταρία</u>	<u>Supercapacitor</u>
Κύκλοι ζωής επαναφορτίσεων	<10 ³ κύκλοι φορτίσεων	>10 ⁶ κύκλοι φορτίσεων
Ρυθμός αυτό-αποφόρτισης	5%	30%
Τάση	3,7V-4,2V	0V-2,7V
Πυκνότητα ενέργειας (Wh/Kg)	Υψηλή (20-150)	Χαμηλή (0,8-10)
Πυκνότητα ισχύος (W/Kg)	Χαμηλή (50-300)	Υψηλή (500-400)
Χρόνος φόρτισης	Ώρες	Δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά
Χρόνος αποφόρτισης	0,3 έως 3 ώρες	< μερικά λεπτά
Κύκλωμα φόρτισης	Πολύπλοκο	Απλό

Ένα από τα μειονεκτήματα των πυκνωτών είναι ότι όταν η τάση του πυκνωτή είναι μικρότερη από το επιτρεπτό όριο για να λειτουργήσει ο μετατροπέας DC-DC, υπάρχει μέσα του ενέργεια που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ονομάζεται εναπομένουσα ενέργεια (residual energy), $E_{residual}$ και η οποία μεταφράζεται μέσω της εξίσωσης (1.1).

$$E_{residual}(t) = \begin{cases} E_{held}(t) & \text{αν } V(t) < V_{conv,min} \\ \frac{1}{2} C (V_{conv,min})^2 & \text{αν } V(t) \geq V_{conv,min} \end{cases} \quad (1.1)$$

όπου η $V_{conv,min}$ είναι η ελάχιστη τάση πάνω από την οποία μπορεί να δουλέψει ένας μετατροπέας DC-DC. Μία τέτοια τυπική τάση είναι περίπου στα 0,7V, που μεταφράζεται σε περίπου $E_{residual}=0.245J$ για έναν πυκνωτή 1F.

Η διαθέσιμη ενέργεια μέσα στον πυκνωτή όταν αυτός χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει φορτίο, E_{usable} αυτή εκφράζεται μέσω της (1.2)

$$E_{usable}(t) = E_{helid}(t) - E_{residual}(t) \quad (1.2)$$

Οι περισσότεροι πυκνωτές που είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο έχουν ένα εύρος τάσης 0-2,7V. Τα περισσότερα φορτία απαιτούν τάση 3-5V για να λειτουργήσουν άρα για ένα πυκνωτή ο οποίος μπορεί να φορτιστεί μέχρι τα 2,7V (πυκνωτής εμπορίου) απαιτείται ένας μετατροπέας DC-DC. Ωστόσο η ελάχιστη τάση για να λειτουργήσει αυτός ο μετατροπέας είναι τα 0,7V. Οι πυκνωτές μπορούν έχουν μέχρι και $\frac{1}{2}C(0.7V)^2$ μη χρησιμοποιήσιμη ενέργειας. Για παράδειγμα, η μη χρησιμοποιήσιμη ενέργεια για έναν συλλέκτη ενέργειας που χρησιμοποιεί έναν supercapacitor χωρητικότητας 300F είναι 73,5J. Οι περισσότεροι αισθητήρες καταναλώνουν 100-150mW όταν λειτουργούν κανονικά, άρα απομένει ενέργεια η οποία θα μπορούσε να τροφοδοτήσει τον αισθητήρα για πάνω από 23 λεπτά.

Ωστόσο, και οι δύο αυτές μορφές τροφοδοσίας (μπαταρίες και πυκνωτές) των αισθητήρων, έχουν ορισμένα μειονεκτήματα. Καταρχάς, μια μπαταρία έχει περιορισμένη διάρκεια ζωής και η αντικατάσταση της σε κάθε συνιστώσα του δικτύου είναι μια εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία. Δεύτερον, με τη χρήση ενός τεράστιου αριθμού μπαταριών, υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας τεράστιας περιβαλλοντολογικής καταστροφής, σε περίπτωση διαρροής των χημικών ουσιών των μπαταριών. Τρίτον, οι πυκνωτές, παρόλο που είναι λιγότερο ακίνδυνοι από τις μπαταρίες, έχουν πολύ μικρή αποθηκευτική ενέργεια, άρα χρειάζονται συνεχώς φόρτιση. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί καινούργιες τεχνολογίες για τη συλλογή της ενέργειας από το περιβάλλον. Αυτές ονομάζονται νανογεννήτριες και με τη χρήση των νανοϋλικών και της νανοτεχνολογίας είναι ικανές να συλλέξουν ενέργεια (Ενότητα 1.4).

1.4. Συλλέκτες Ενέργειας-Νανογεννήτριες

Η συλλογή ενέργειας από τις μηχανικές δονήσεις του περιβάλλοντος, έχει λάβει πολύ μεγάλη προσοχή την τελευταία δεκαετία. Η ανάπτυξη αυτού του επιστημονικού πεδίου οφείλεται στην ανάγκη για την αυτονόμηση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και την αδιάλειπτή λειτουργία τους. Υπάρχουν πολλές μορφές ενέργεια που μπορούν να συλλεχθούν από το περιβάλλον, όπως η μηχανική ενέργεια, η θερμική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, κλπ.

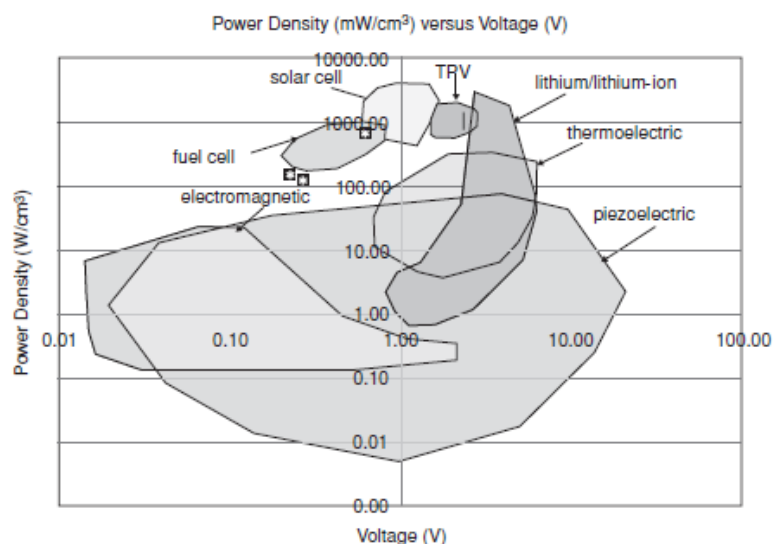
Βασικό αντικείμενο έρευνας του πεδίου αυτού είναι η τροφοδότηση μικρών ηλεκτρονικών συσκευών με τη χρήση της ενέργειας της δόνησης που υπάρχει στο περιβάλλον. Αν αυτό επιτευχθεί, τότε η καταναλισκόμενη ενέργεια από ηλεκτρονικά κυκλώματα (π.χ. δίκτυο αισθητήρων), το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης των μπαταριών, καθώς και τα χημικά τους απόβλητα, θα ελαττωθούν.

Σε αυτή την ενότητα γίνεται αναφορά στους μετατροπείς μηχανικής ενέργειας (πιεζογεννήτριες, τριβογεννήτριες, ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες) και στους μετατροπείς θερμικής ενέργειας.

1.4.1. Πιεζοηλεκτρικές Γεννήτριες (Piezoelectric Generators)

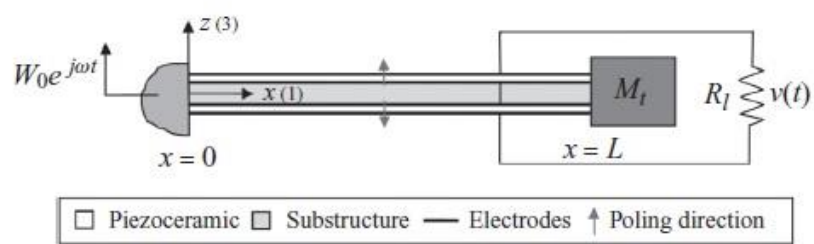
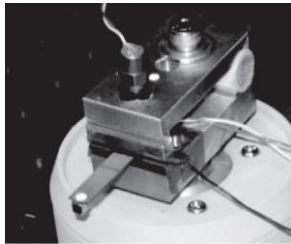
Πιεζοηλεκτρισμός είναι το ηλεκτρικό φορτίο που συσσωρεύεται σε ορισμένα στερεά υλικά (όπως είναι οι κρύσταλλοι, ορισμένα κεραμικά και βιολογική ύλη), ως αποτέλεσμα εφαρμογής της μηχανικής πίεσης. Τα βασικά πλεονεκτήματα των πιεζοηλεκτρικών υλικών στη συλλογή ενέργειας (σε σύγκριση με τους άλλους δύο μηχανισμούς) είναι οι μεγάλες πυκνότητες ισχύος και η ευκολία στην εφαρμογή τους. Η πυκνότητα ισχύος σε σχέση με την τάση, δίνεται στην Εικόνα 1.11. Η πυκνότητα ισχύος ενός συλλέκτη ενέργειας είναι η ισχύς εξόδου διαιρούμενη με τον όγκο της συσκευής για μια καθορισμένη είσοδο. Στις διατάξεις που βασίζονται στη συλλογή ενέργειας από δονήσεις, η είσοδος (διέγερση) χαρακτηρίζεται συνήθως από το επίπεδο επιτάχυνσης και τη συχνότητα (συνήθως χρησιμοποιείται μία αρμονική). Συνεπώς, εκτός και αν παρέχεται η ενέργεια εισόδου, η πυκνότητα ισχύος είναι συνήθως μία ανεπαρκής παράμετρος για τη σύγκριση διαφορετικών συλλεκτών ενέργειας. Από την Εικόνα 1.11 φαίνεται ότι η συλλογή πιεζοηλεκτρικής ενέργειας καλύπτει τη

μεγαλύτερη περιοχή στο γράφημα, με την πυκνότητα ισχύος να είναι συγκρίσιμη με εκείνες που αφορούν τις μπαταρίες thin-film και thick-film lithium-ion, όπως και τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες. Η τάση εξόδου στη συλλογή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας είναι χαρακτηριστικά πολύ μικρή και τις περισσότερες φορές χρειάζεται ένας πολλαπλασιαστής τάσης, ώστε η τάση να φτάσει στο απαιτούμενο επίπεδο για να φορτίσει ένα εξάρτημα αποθήκευσης. Ωστόσο, στη συλλογή πιεζοηλεκτρικής ενέργειας, η χρησιμοποιήσιμη τάση εξόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν από το πιεζοηλεκτρικό υλικό. Όταν πρόκειται για τη συλλογή ηλεκτροστατικής ενέργειας, πρέπει να εφαρμοστεί μια τάση εισόδου έτσι ώστε η σχετική δονητική κίνηση των στοιχείων του πυκνωτή να δημιουργήσουν μια εναλλασσόμενη τάση εξόδου. Αντιθέτως, η τάση εξόδου του πιεζοηλεκτρικού υλικού προκύπτει από την εγγενή συμπεριφορά του ίδιου του υλικού, το οποίο εξαλείφει την ανάγκη για εξωτερική τάση εισόδου. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα σε σχέση με τις ηλεκτρομαγνητικές συσκευές αποτελεί το γεγονός ότι μπορούν να κατασκευαστούν και σε μικροκλίμακα, αλλά και σε μακροκλίμακα, λόγω των καθιερωμένων τεχνικών thick-film και thin-film. Οι φτωχές ιδιότητες των επίπεδων μαγνητών και του περιορισμένου αριθμού των στροφών που επιτυγχάνονται με τη χρήση των επίπεδων πηνίων είναι μόνο μερικοί από τους πρακτικούς περιορισμούς που δημιουργούνται κατά την κατασκευή ηλεκτρομαγνητικών harvesters σε μικροκλίμακα.



Εικόνα 1.11 Διάγραμμα σύγκρισης Πυκνότητας Ισχύος-Τάση κοινών αναγεννητικών και λιθίου/ ιόντων λιθίου μπαταρίες

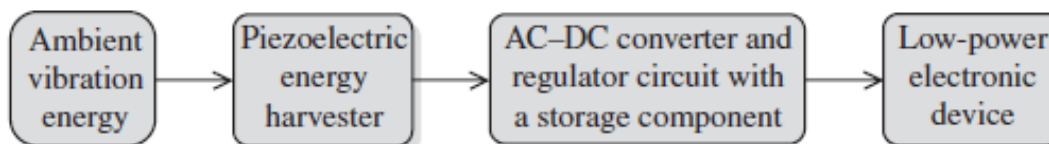
Οι περισσότεροι πιεζοηλεκτρικοί harvesters κατασκευάζονται στη μορφή προβόλων με ένα ή δύο πιεζοηλεκτρικά στρώματα. Ο πρόβολος του συλλέκτη βρίσκεται σε μία δονούμενη δομή υποδοχής και λόγω της δυναμικής τάσεως που επάγεται στο πιεζοκεραμικό στρώμα(-τα), το αποτέλεσμα είναι μια εναλλασσόμενη τάση εξόδου κατά μήκος των ηλεκτροδίων του. Παράδειγμα προβόλου στον οποίο εφαρμόζεται διέγερση παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.12 μαζί με τη σχηματική αναπαράστασή του.



Εικόνα 1.12 Πιεζοηλεκτρικός πρόβολος harvester υπό διέγερση και η σχηματική του αναπαράσταση

Η εναλλασσόμενη τάση εξόδου προκύπτει από την αρμονική κίνηση της συσκευής που εφαρμόζεται στη βάση του προβόλου. Στα πειράματα που πραγματοποιούνται για την εκτίμηση της απόδοσης της συσκευής, όσον αφορά την παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος, είναι κοινή πρακτική να θεωρείται και μία αντίσταση στην έξοδο, για την αναπαράσταση και του ηλεκτρικού φορτίου.

Από ηλεκτρολογικής άποψης, η εναλλασσόμενη τάση εξόδου πρέπει να μετατραπεί σε ανορθωμένη τάση μέσω μιας γέφυρας ανόρθωσης και ενός πυκνωτή εξομάλυνσης (τα οποία αποτελούν ένα μετατροπέα AC-DC) για τη φόρτιση μιας μικρής μπαταρίας ή ενός πυκνωτή, χρησιμοποιώντας την ενέργεια ενός συλλέκτη. Σε αρκετές περιπτώσεις, εφαρμόζεται ένα δεύτερο στάδιο (μετατροπέας DC-DC) για τη ρύθμιση της τάσης εξόδου του ανορθωτή, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η μεταφορά ρεύματος στη συσκευή αποθήκευσης (Εικόνα 1.13)



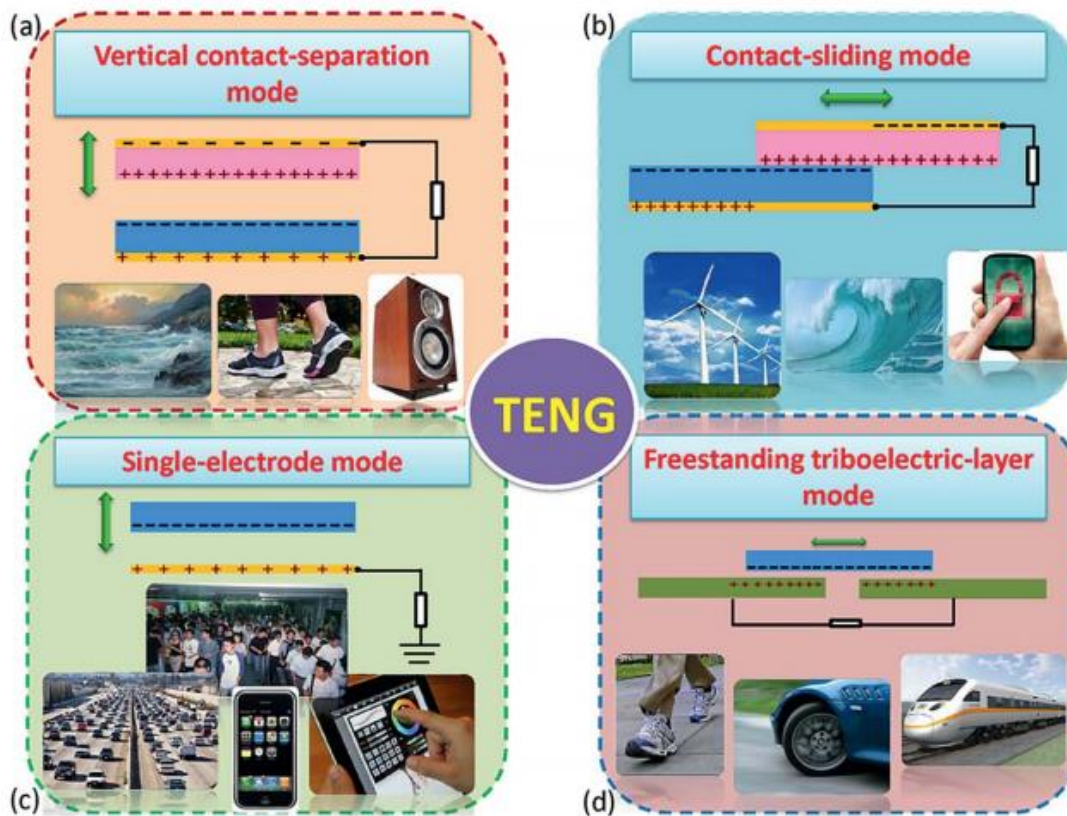
Εικόνα 1.13 Σχηματική αναπαράσταση ενός ολοκληρωμένου πιεζοηλεκτρικού συστήματος

1.4.2. Τριβοηλεκτρικές Γεννήτριες (Triboelectric Generators)

Ο τριβοηλεκτρισμός είναι ένα από τα πιο συχνά φαινόμενα στην καθημερινή μας ζωή, αλλά τις περισσότερες φορές λαμβάνεται ως ένα πολύ αρνητικό αποτέλεσμα με περιορισμένες εφαρμογές. Για την αξιοποίηση αυτής της ενέργειας κατασκευάστηκαν οι τριβοηλεκτρικές νανογεννήτριες (triboelectric nanogenerators-TENG), οι οποίες μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Οι τριβογεννήτριες βασίζονται στο συνδυασμό του στατικού ηλεκτρισμού και της ηλεκτροστατικής επαγωγής και χρησιμοποιούν τα πιο κοινά υλικά που είναι διαθέσιμα στην καθημερινή μας ζωή, όπως χαρτί, υφάσματα, PTFE, PDMS, AI, PVC κλπ. Η πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας φτάνει τα $1200\text{W}/\text{m}^2$, η πυκνότητα όγκου τα $490\text{KW}/\text{m}^3$ και η απόδοση της μετατροπής της ενέργειας το 50-85%. Οι τριβογεννήτριες συλλέγουν όλα τα διαθέσιμα είδη μηχανικής ενέργειας της καθημερινής μας ζωή, όπως είναι η ανθρώπινη κίνηση, το περπάτημα, οι δονήσεις, ο άνεμος, ένα κινούμενο αυτοκίνητο, το τρεχούμενο νερό, οι σταγόνες της βροχής, η παλίρροια και τα κύματα του ωκεανού. Επιπλέον, μια τριβογεννήτρια, όπως επίσης και μια πιεζογεννήτρια, μπορεί να αποτελέσει έναν αισθητήρα, ο οποίος θα μετατρέπει άμεσα μια μηχανική διέγερση σε ένα ηλεκτρικό σήμα για την ανίχνευση της κίνησης, των κραδασμών, της σωματικής επαφής και της βιολογικής κίνησης. Ένας κοινός παράγοντας που καθορίζει την απόδοση του συνόλου των τριβογεννητριών είναι η πυκνότητα φορτίου των δύο επιφανειών.

Όσον αφορά τη λειτουργία των τριβογεννητριών, γενικά πιστεύεται ότι όταν δύο διαφορετικά υλικά έρχονται σε επαφή, δημιουργείται ένας χημικός δεσμός μεταξύ ορισμένων τμημάτων των δύο επιφανειών και φορτία κινούνται από το ένα υλικό στο άλλο, ώστε να εξισωθεί το ηλεκτροχημικό τους δυναμικό. Τα μεταφερόμενα φορτία μπορεί να είναι ηλεκτρόνια ή ιόντα/μόρια. Όταν διαχωρίζονται, μερικά από τα συνδεδεμένα άτομα έχουν την τάση να κρατούν επιπλέον ηλεκτρόνια και άλλα την τάση να δίνουν ηλεκτρόνια,

παράγοντας έτσι τριβοηλεκτρικά φορτία πάνω στις επιφάνειες. Η παρουσία των τριβοηλεκτρικών φορτίων στις διηλεκτρικές επιφάνειες μπορεί να είναι η δύναμη η οποία οδηγεί τα ηλεκτρόνια να ρέουν στο ηλεκτρόδιο, προκειμένου να εξισορροπηθεί το ηλεκτρικό δυναμικό που δημιουργήθηκε. Συνεπώς, με βάση αυτή την αρχή, εφευρέθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι λειτουργίας των τριβογεννητριών (Εικόνα 1.14).



Εικόνα 1.14 Οι τέσσερις θεμελιώδεις λειτουργίες των τριβοηλεκτρικών γεννητριών α) λειτουργία κάθετης επαφής-διαχωρισμού, β) πλευρική συρόμενη λειτουργία γ) λειτουργία μονού ηλεκτροδίου δ) λειτουργία ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων⁴

A) Λειτουργία κάθετης επαφής-διαχωρισμού (Vertical contact-separation mode)

Στη λειτουργία κάθετης επαφής-διαχωρισμού χρησιμοποιούνται δύο διηλεκτρικά υμένα από διαφορετικά υλικά τα οποία τοποθετούνται το ένα απέναντι στο άλλο. Στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια της διάταξης τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια (Εικόνα 1.14α). Η φυσική επαφή ανάμεσα στα δύο υλικά δημιουργεί αντίθετα φορτισμένες επιφάνειες. Όταν οι δύο επιφάνειες διαχωρίζονται, δημιουργείται ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα της διάταξης. Αν τα δύο ηλεκτρόδια είναι συνδεδεμένα με ένα φορτίο-αντίσταση, ελεύθερα ηλεκτρόνια ρέουν από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο, για να δημιουργήσουν ένα αντίθετο ηλεκτρικό δυναμικό

και να εξισοροποιηθεί το ηλεκτροστατικό πεδίο. Όταν το διάκενο κλείσει, το δυναμικό που δημιουργήθηκε εξαφανίζεται και τα ηλεκτρόνια ρέουν προς τα πίσω.

B) Πλευρική συρόμενη λειτουργία (Contact-sliding mode)

Σε αυτόν τον τύπο λειτουργίας, η διάταξη είναι η ίδια με αυτή της λειτουργίας κάθετης επαφής-διαχωρισμού. Όταν δύο διηλεκτρικά film είναι σε επαφή, μια σχετική ολίσθηση παράλληλα με την επιφάνεια δημιουργεί επίσης τριβοηλεκτρικά φορτία στις δύο επιφάνειες (Εικόνα 1.14b). Μία πλευρική πόλωση δημιουργείται κατά μήκος της κατεύθυνσης της ολίσθησης, η οποία οδηγεί τα ηλεκτρόνια να ρέουν στα ηλεκτρόδια, με στόχο να εξισοροποιηθεί το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργήθηκε.

Γ) Λειτουργία μονού ηλεκτροδίου (Single-electrode mode)

Οι δύο προηγούμενες μέθοδοι έχουν δύο ηλεκτρόδια συνδεδεμένα στο φορτίο. Σε κάποιες περιπτώσεις, το αντικείμενο, το οποίο αποτελεί μέρος της τριβογεννήτριας, δεν μπορεί να συνδεθεί ηλεκτρικά στο φορτίο επειδή είναι ένα κινητό αντικείμενο όπως ένας άνθρωπος που κινείται σε ένα πάτωμα. Στη λειτουργία του ενός ηλεκτροδίου, το αντίστοιχο κάτω ηλεκτρόδιο της διάταξης είναι γειωμένο (Εικόνα 1.14c).

Δ) Λειτουργία ελεύθερων τριβοηλεκτρικών στρωμάτων (Freestanding triboelectric-layer mode)

Στη φύση, ένα κινούμενο αντικείμενο είναι φυσικά φορτισμένο λόγω της επαφής του με τον αέρα ή άλλα αντικείμενα, όπως, για παράδειγμα, τα παπούτσια με τα οποία περπατάμε. Τα φορτία παραμένουν στις επιφάνειες για ώρες, χωρίς να υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω επαφή ή τριβή. Άρα στην περίπτωση που μπορεί να μπει κάτω από το στρώμα των επιφανειών ένα ηλεκτρόδιο, μπορεί να δημιουργηθεί ηλεκτροστατικό δυναμικό (Εικόνα 1.14d)

1.4.3. Θερμοηλεκτρική ενέργεια

Είναι γνωστό ότι στη φύση υπάρχει ενέργεια με τη μορφή θερμότητας. Αυτή η ροή θερμότητας έχει τη δυνατότητα να παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω ειδικών μετατροπών θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. Η διαφορά της θερμοκρασίας επιτρέπει την αποτελεσματική μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε άλλη μορφή, ενώ η ροή της θερμότητας παρέχει την απαραίτητη ισχύ. Δηλαδή οι θερμοηλεκτρικές διατάξεις λειτουργούν λόγω των διάφορων βαθμίδων θερμοκρασίας. Ωστόσο, ακόμα και με πολύ μεγάλη ροή θερμότητας, η εξαγόμενη ενέργεια είναι σχετικά χαμηλή λόγω του κύκλου Carnot. Επίσης, η περιορισμένη διαθέσιμη θερμότητα, περιορίζει και την παραγόμενη ισχύ.

Για τα συστήματα που έχουν πολύ μικρές απαιτήσεις σε ισχύ, όπως είναι οι ασύρματοι αισθητήρες, η συλλογή ενέργειας από τους μετατροπείς της θερμοηλεκτρικής ενέργειας έχει αποδειχθεί ότι είναι μια βιώσιμη τεχνολογία και υπόσχεται να γίνει ακόμα πιο διαδεδομένη όταν οι απαιτήσεις των συστημάτων μειωθούν ακόμα περισσότερο.

Οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες διατάξεις είναι στερεάς κατάστασης χωρίς κινούμενα μέρη. Είναι αθόρυβες και αξιόπιστες και ιδανικές για μικρές εφαρμογές όπου χρειάζεται μια σταθερή τάση με πολύ μικρές απαιτήσεις σε ισχύ και ρεύμα τροφοδοσίας.

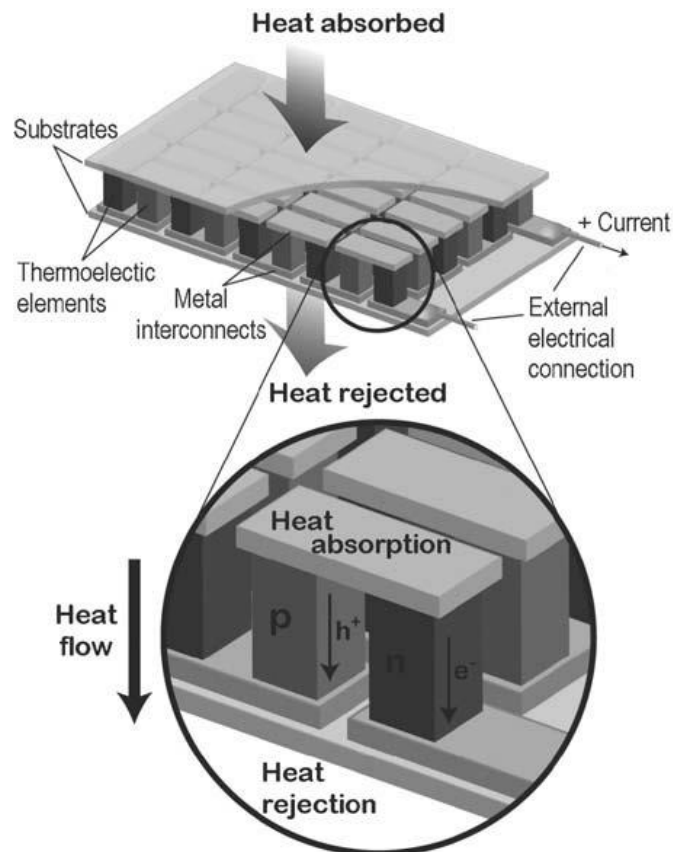
Μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια χρησιμοποιεί τη ροή της θερμότητας που δημιουργείται λόγω της διαφοράς της θερμοκρασίας για να τροφοδοτήσει ένα ηλεκτρικό φορτίο διαμέσου ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος. Η διαφορά θερμοκρασίας παρέχει την τάση ($\Delta V = \alpha \Delta T$) από το φαινόμενο Seebeck (συντελεστής α του Seebeck), ενώ η ροή θερμότητας οδηγεί το ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο καθορίζει την ισχύ της εξόδου. Η απορριφθείσα θερμότητα πρέπει να απομακρυνθεί μέσω μιας ψύκτρας. Ο θερμοηλεκτρικός συντελεστής κέρδους των υλικών (zT) εξαρτάται από το συντελεστή Seebeck (α), την απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας (T), την ηλεκτρική αντίσταση (ρ) και την θερμική αγωγιμότητα (κ) του υλικού:

$$zT = \frac{\alpha^2 T}{\rho \kappa}$$

Η μέγιστη αποδοτικότητα μιας θερμοηλεκτρικής συσκευής καθορίζεται από το συντελεστή κέρδους (zT), ο οποίος σε πολύ μεγάλο βαθμό αποτελεί το μέσο όρο των τιμών zT των συστατικών των υλικών.

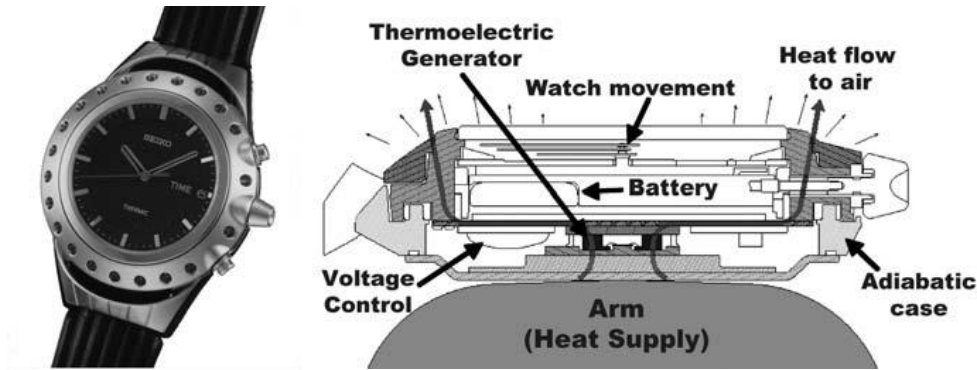
Το φαινόμενο της μετατροπής της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια προκύπτει διότι τα ελεύθερα φορτία στα μέταλλα και τους ημιαγωγούς είναι ελεύθερα να κινηθούν όπως τα μόρια του αερίου, μεταφέροντας παράλληλα φορτίο και θερμότητα. Όταν μια διαφορά θερμοκρασίας εφαρμόζεται σε ένα υλικό, τα ελεύθερα φορτία μεταφέρονται από το θερμότερο τμήμα της διάταξης στο ψυχρότερο άκρο. Η συσσώρευση των φορέων των φορτίων έχει ως αποτέλεσμα ένα καθαρό φορτίο (αρνητικό για τα ηλεκτρόνια e^- και θετικό για τις οπές h^+) στο ψυχρότερο σημείο της διάταξης δημιουργώντας έτσι ένα ηλεκτροστατικό δυναμικό (τάση). Επιτυγχάνεται έτσι μια ισορροπία μεταξύ του χημικού δυναμικού της διάχυσης και της ηλεκτροστατικής άπωσης λόγω συσσώρευσης του φορτίου.

Αυτή η ιδιότητα που είναι γνωστή ως φαινόμενο Seebeck, είναι η βάση για τη θερμοηλεκτρική παραγωγή ενέργειας.



Εικόνα 1.15 Σχηματική απεικόνιση μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας. Πολλά θερμοηλεκτρικά ζεύγη (κάτω εικόνα) n-type και p-type τα οποία συνδέονται ηλεκτρικά σε σειρά και θερμικά παράλληλα σχηματίζουν μία θερμοηλεκτρική μονάδα (πάνω εικόνα). Το ύψος των θερμοηλεκτρικών στοιχείων και της περιοχής των υποστρωμάτων, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θερμικής αντίστασης της μονάδας (2009 Priya Energy harvesting Technologies)

Ένα παράδειγμα θερμοηλεκτρικής μετατροπής αποτελεί ένα ειδικό ρολόι χεριού το οποίο λειτουργεί με θερμοηλεκτρική ενέργεια δηλαδή από τη μετατροπή της θερμότητας του σώματος σε ηλεκτρική ενέργεια. Έχουν δημιουργηθεί τουλάχιστον δύο τέτοια μοντέλα, ένα από την εταιρεία Seiko και ένα άλλο από τη Citizen. Το ρολόι της Seiko υπό φυσιολογικές συνθήκες, παράγει 22μW ηλεκτρικής ενέργειας (Εικόνα 1.16). Με πτώση της θερμοκρασίας μόνο κατά 1.5K (βαθμούς Kelvin) κατά μήκος των θερμοηλεκτρικών διατάξεων, η τάση ανοιχτοκυκλώματος είναι 300mV και η αποδοτικότητα της θερμοηλεκτρικής μετατροπής είναι 0,1%.



Εικόνα 1.16 Seiko Thermic, ένα ρολόι χεριού που τροφοδοτείται από τη θερμότητα του σώματος χρησιμοποιώντας έναν θερμοηλεκτρική μετατροπέα ενέργειας. (Αριστερά) το ρολόι, (Δεξιά) η σχηματική απεικόνιση λειτουργίας του

Τα τελευταία 40 χρόνια, οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες προσφέρουν ενέργεια σε απομακρυσμένες χερσαίες και διαστημικές τοποθεσίες, όπως το διαστημόπλοιο Voyager. Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτών των γεννητριών, είναι η δυνατότητα κατασκευής τους σε μικρά μεγέθη, γεγονός που τις καθιστά την καταλληλότερη τεχνολογία μετατροπής θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική στον τομέα της συλλογής ενέργειας (energy harvesting)⁵. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί, ότι σε αντίθεση με τις πιεζογεννήτριες και τις τριβογεννήτριες, οι οποίες παράγουν εναλλασσόμενο σήμα, οι θερμογεννήτριες παράγουν DC, και έτσι δεν απαιτείται κυκλωματικό στοιχείο ανόρθωσης τάσης (AC-DC converter) καθιστώντας το κύκλωμα μετατροπής και αποθήκευσης ενέργειας απλούστερο.

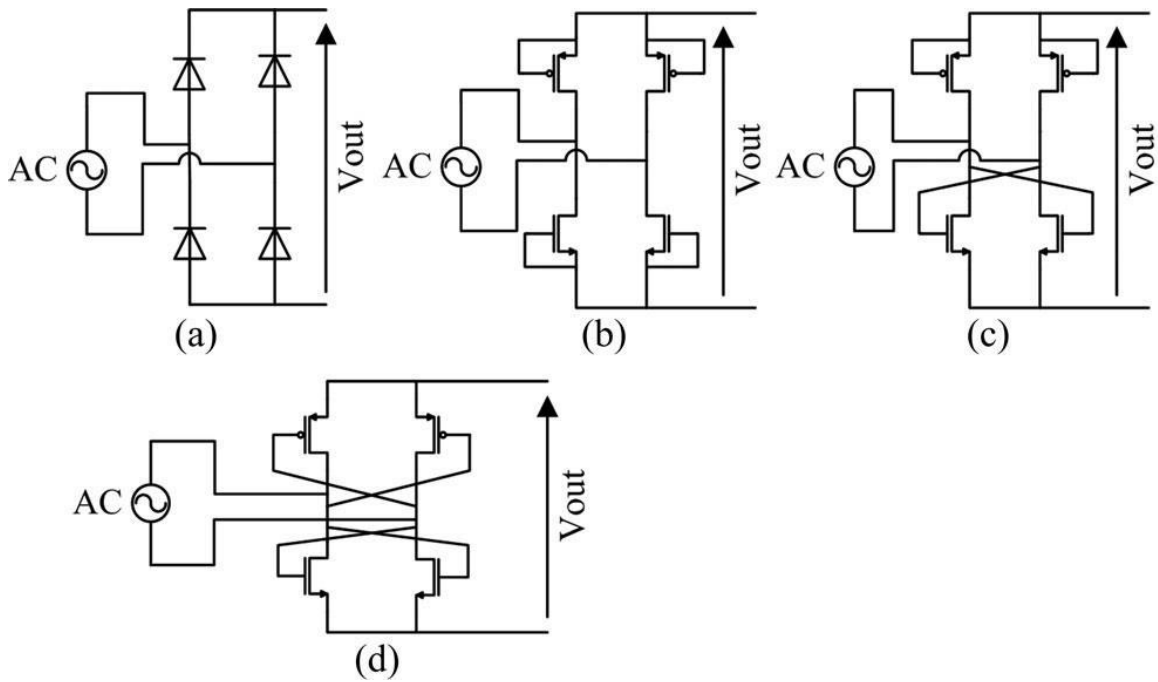
2. Κυκλώματα για διατάξεις συλλογής ενέργειας

2.1. Είδη κυκλωμάτων

Το σήμα των τριβογεννητριών και των πιεζογεννητριών είναι τυχαίο και χρονικά μεταβαλλόμενο και εξαρτάται από τη διέγερση των γεννητριών. Τα κυκλώματα των συλλεκτών ενέργειας ως σκοπό έχουν την ανόρθωση και τη διαχείριση του σήματος ενώ η βιωσιμότητα ενός αυτόνομου συστήματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την απόδοση του κυκλώματος. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται δύο μεγάλες κατηγορίες κυκλωμάτων: τα παθητικά κυκλώματα (passive) και τα ενεργητικά (active). Οι διαφορές και τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στη συνέχεια αυτής της ενότητας.

2.1.1. Παθητικά Κυκλώματα

Η απλούστερη τοπολογία για την ανόρθωση του σήματος είναι ο ανορθωτής πλήρους κύματος που αποτελείται από 4 διόδους ή διακόπτες τρανζίστορ (Εικόνα 2.1α). Η ανόρθωση πλήρους κύματος είναι το πιο κοινό κύκλωμα που αναφέρεται στη βιβλιογραφία των κυκλωμάτων συλλογής ενέργειας⁶⁷. Μερικές φορές αναφέρεται και ως πρότυπο κύκλωμα⁸⁹, και συγκρίνεται σχεδόν πάντα με πιο εξελιγμένες τεχνικές. Οι κύριες πηγές απώλειας ισχύος στους ανορθωτές διόδων πλήρους κύματος είναι συνήθως η πτώση τάσης πάνω στις διόδους και τα ρεύματα διαρροής όταν η διάδος είναι ανάστροφα πολωμένη¹⁰. Στα ενσωματωμένα κυκλώματα, οι διόδοι συχνά αντικαθίστανται από MOSFET'S σε λειτουργία διόδου¹¹¹² (Εικόνα 2.1b), όπου η πηγή των τρανζίστορ είναι μόνιμα βραχυκυκλωμένη με την πύλη έτσι ώστε το τρανζίστορ να είναι στοιχείο δύο ακροδεκτών. Η απόδοση αυτών των τοπολογιών είναι πολύ ευαίσθητη στις τάσεις κατωφλίου των τρανζίστορς ιδιαίτερα στις περιπτώσεις των τρανζίστορ-διόδων όπου αυτά δεν έχουν ενεργοποιηθεί/απενεργοποιηθεί πλήρως¹³. Το γεγονός αυτό μπορεί να αυξήσει σημαντικά την πτώση τάσης πάνω στα εξαρτήματα.



Εικόνα 2.1 Τοπολογίες κυκλωμάτων ανόρθωσης πλήρους κύματος: (α) ανορθωτής διόδου, (β)-(δ) ανορθωτικές διατάξεις με τρανζίστορ MOS

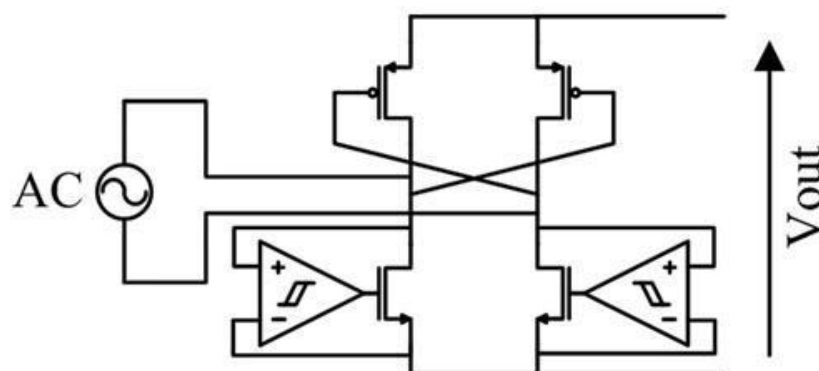
Η μείωση της πτώσης τάσης αυξάνει την αποδοτικότητα της μετατροπής ισχύος και της μετατροπής της τάσης. Οι διόδοι Schottky προσφέρουν χαμηλότερες πτώσεις τάσης με κόστος τα αυξημένα ρεύματα διαρροής όταν αυτές είναι αντίστροφα πολωμένες. Το κόστος κατασκευής είναι υψηλότερο δεδομένου ότι δεν είναι άμεσα συμβατές με τις διαδικασίες των MOS. Η πτώση τάσης μειώνεται επίσης σε παθητικά κυκλώματα ανορθώσεων που είναι κατασκευασμένα από τρανζίστορ όταν τα εξαρτήματα οδηγούνται κατευθείαν από την είσοδο. Για παράδειγμα οι Le et al¹⁴ αναφέρουν ένα παθητικό κύκλωμα ανορθωτή πλήρους κύματος το οποίο χρησιμοποιεί διακόπτες τρανζίστορ σε παράλληλη σύνδεση. Τέτοιες τοπολογίες (gate cross-coupled) φαίνονται στην Εικόνα 2.1 (c)-(d) και είναι πολύ δημοφιλείς λύσεις για τη βελτίωση της απόδοσης μετατροπής σε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Σε επαγωγική συλλογή ενέργειας χρησιμοποιούνται συνήθως οι ανορθωτές πλήρους γέφυρας με MOSFET¹⁵. Οι τοπολογίες εγκάρσιας σύζευξης αυξάνουν την αποδοτικότητα κατά 70-80% η οποία είναι διαθέσιμη ακόμα και για πολύ χαμηλές τάσεις εισόδου όπως φαίνεται και στη δημοσίευση των Hashemi et al¹⁶. Παρά τη μείωση της πτώσης τάσεως κάτω από 0,1V, οι τάσεις εισόδου από 1 έως 1,5V είναι απαραίτητες προκειμένου να ενεργοποιηθούν/απενεργοποιηθούν πλήρως τα τρανζίστορ. Προκειμένου να μειωθεί η

τάση κατωφλίου της ενεργοποίησης, προ-φορτισμένα τρανζίστορ μεταβλητής πύλης¹⁷ και κυκλώματα bootstrapping¹⁸ μπορούν να προστεθούν στο κύκλωμα.

Σε περιπτώσεις όπου το ρεύμα διαρροής είναι η πιο σημαντική απώλεια ενέργειας στο σύνολο, ανορθωτές πολύ χαμηλής ισχύος οι οποίοι βασίζονται στις διόδους, έχουν αναφερθεί ότι προσφέρουν καλύτερη απόδοση ενέργειας¹⁹. Αυτές οι διόδους πραγματοποιούνται από τη σύνδεση ενός NMOS-διόδου και ενός PMOS-διόδου σε σειρά.

2.1.2. Ενεργά Κυκλώματα

Σχέδια ενεργών (active) ή σύγχρονων ανορθωτών (synchronous rectifier) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της αποδοτικότητας μειώνοντας παράλληλα τις απώλειες αγωγιμότητας. Ωστόσο, το κύκλωμα ελέγχου ενός κυκλώματος μιας ενεργής τοπολογίας καταναλώνει περισσότερη ενέργεια και απαιτεί κατάλληλη προσαρμογή της τάσης. Οι συσκευές μεταγωγής στα σύγχρονα κυκλώματα αναφέρονται ως «ενεργές διόδους» και αποτελούνται από ένα MOSFET που οδηγείται από ένα συγκριτή ο οποίος παρακολουθεί την τάση των ακροδεκτών της πηγής-υποδοχής του τρανζίστορ²⁰. Η βελτιστοποιημένη σχεδίαση του συγκριτή είναι απαραίτητη για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση μετατροπής. Οι αναφερόμενες καταναλώσεις ενέργειας κυμαίνονται από microwatts (περίπου 3,3μΑ και ±2,75V) μέχρι nanowatts (περίπου 165nW-50nA και 3,3V). Στην έξοδο πρέπει να υπάρχει μια επαρκής υστέρηση για την πρόληψη των ταλαντώσεων και της απώλειας ισχύος κατά τη διάρκεια της διέλευσης του μηδενός στην είσοδο²¹.



Εικόνα 2.2 Ενεργό κύκλωμα ανορθωτή με διακόπτες PMOS

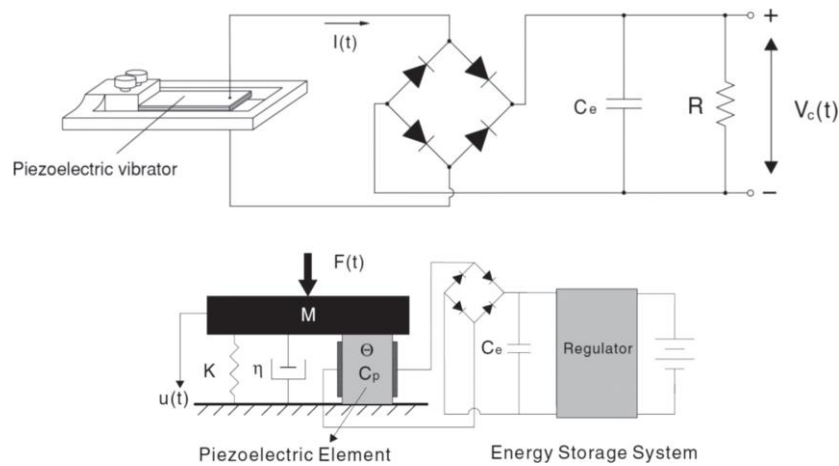
Τοπολογίες που περιλαμβάνουν δύο MOSFETs ενεργών διακοπών και δύο MOSFETs με συζευγμένη την πύλη εμφανίζονται στην Εικόνα 2.2. Οι αποδόσεις μετατροπής ενέργειας για τάσεις εισόδου μεγαλύτερες από $\pm 2V_{pk}$ φτάνουν το 80-85%²² (αυτό το ποσοστό αναφέρεται σε ισχύ 10-20mW) ενώ η απόδοση μετατροπής της τάσης μπορεί να φτάσει έως και 95% σε συνθήκες ελαφρού φορτίου της τάξης του 1mA σε 2V²³. Τέλος, το σύγχρονο κύκλωμα πλήρους κύματος είναι πιο αποτελεσματικό από το αντίστοιχο παθητικό κύκλωμα αλλά αν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές χαμηλής τάσης, τότε οι παθητικοί ανορθωτές θα μπορούσαν ενδεχομένως να προσφέρουν ανώτερες επιδόσεις.

2.2. Κυκλώματα για συλλέκτες ενέργειας

Η ανάπτυξη ενός αποδοτικού κυκλώματος συλλογής ενέργειας με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες που προκαλούνται από τα εξαρτήματα του κυκλώματος είναι ζωτικής σημασίας για την αυτονόμηση των διατάξεων. Όπως αναλύεται παρακάτω, δεν υπάρχει ιδανικό κύκλωμα συλλογής ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με όλους τους συλλέκτες και για όλα τα επίπεδα διέγερσης. Για παράδειγμα, όπως θα δούμε στη συνέχεια, η τοπολογία SSHI (Synchronized switch harvesting on inductor) είναι μια πολύ καλή επιλογή για έναν συλλέκτη ενέργειας με ασθενή σύζευξη ενώ ο ανορθωτής γέφυρας μπορεί να προτιμηθεί για μια πιο ισχυρή. Για το σκοπό αυτό έχουν προταθεί διάφορες εναλλακτικές υλοποιήσεις στην βιβλιογραφία και οι κυριότερες από αυτές αναλύονται στη συνέχεια.

2.2.1. Κύκλωμα συλλογής ενέργειας ενός σταδίου-Ανορθωτής Γέφυρας

Η Εικόνα 2.3α δείχνει ένα πιεζοηλεκτρικό πρόβολο συλλογής ενέργειας ο οποίος συνδέεται με ένα μετατροπέα AC-DC (κύκλωμα συλλογής ενέργειας ενός σταδίου) πριν από το ωμικό φορτίο R. Ο ανορθωτής πλήρους κύματος ακολουθείται από ένα πυκνωτή εξομάλυνσης (Ce) έτσι ώστε να αποκτήσει μια σταθερή ανορθωμένη τάση (Vc). Οι Shu και Lien²⁴ μελέτησαν την απόδοση του κυκλώματος αντικαθιστώντας την πιεζοηλεκτρική γεννήτρια από ένα ισοδύναμο σύστημα συγκεντρωμένων παραμέτρων όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.3β έχοντας με αυτό το τρόπο τη δυνατότητα εκτίμησης της συλλογής της ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη και την ανορθωμένη DC τάση.



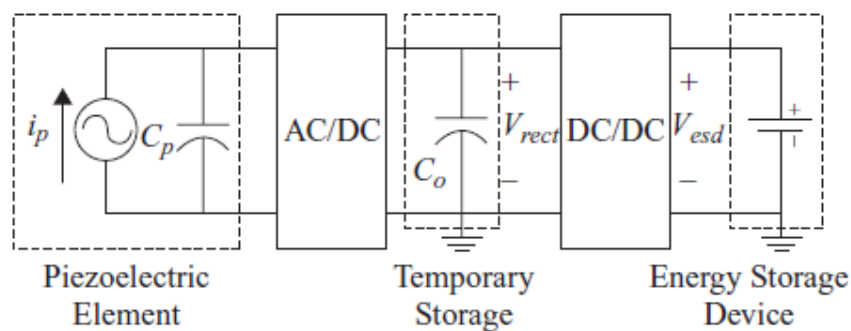
Εικόνα 2.3 (α) Κλασικό κύκλωμα συλλογής ενέργειας με μετατροπέα AC-DC και (β) ισοδύναμη απεικόνιση κυκλώματος

Αυτή η απεικόνιση βελτιώνει τα αρχικά μοντέλα που δόθηκαν από τους Ottman et al²⁵ (οι οποίοι υπέθεσαν ότι το ρεύμα που δημιουργείται από την πιεζοηλεκτρική γεννήτρια είναι ανεξάρτητο από την αντίσταση του φορτίου) και τους Guyomar et al²⁶ (οι οποίοι υπέθεσαν ότι η εξωτερική περιοδική διέγερση είναι σε φάση με την ταχύτητα της απόκρισης του συλλέκτη). Χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρομηχανικό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων με ένα μόνο μηχανικό βαθμό ελευθερίας, οι Shu και Lien έλαβαν υπόψη την επίδραση της παραγωγής της πιεζοηλεκτρικής ενέργειας επί του συλλέκτη, έτσι ώστε το ρεύμα εξόδου του να είναι μία εξαρτημένη μεταβλητή. Επιπλέον, εξέτασαν τη γωνία της φάσης μεταξύ της εξωτερικής διέγερσης και της απόκρισης των δονήσεων. Το κύκλωμα του ανορθωτή γέφυρας περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

2.2.2. Κυκλώματα συλλογής ενέργειας δύο σταδίων-Μετατροπέας DC-DC για τη ρύθμιση της αντίστασης

Από τη στιγμή που το επίπεδο της μηχανικής διέγερσης και ως εκ τούτου και το επίπεδο της ανορθωμένης τάσης δεν είναι σταθερό στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, στην ίδια δημοσίευση που αναφέρθηκε και παραπάνω, οι Ottman et al πρότειναν τη χρήση ενός μετατροπέα DC-DC αμέσως μετά το στάδιο του μετατροπέα AC-DC (που περιγράφηκε προηγουμένως). Έτσι η έξοδος DC του ανορθωτή μπορεί να ρυθμίζεται ώστε να μεγιστοποιείται η μεταφορά ρεύματος στη συσκευή αποθήκευσης. Γι αυτό το σκοπό εισήγαγαν ένα προσαρμοστικό μετατροπέα DC-DC και παρατήρησαν μια αύξηση της ροής της ενέργειας της τάξης του 400% στη μπαταρία σε σχέση με έναν απλό μετατροπέα AC-DC.

Σε μεταγενέστερη δημοσίευση²⁷, παρουσίασαν έναν μετατροπέα υποβίβασης τάσης DC-DC, ο οποίος βρίσκεται κατάσταση λειτουργίας ασυνεχούς αγωγής (discontinuous conduction mode – DCM). Ο μετατροπέας υποβίβασης τάσης χρησιμοποιείται όταν η πιεζογεννήτρια ή η τριβογεννήτρια δημιουργούν μια υψηλότερη τάση από την απαιτούμενη τάση της μπαταρίας. Οι Ottman et al βελτιστοποίησαν, ακόμη, τον κύκλο λειτουργίας του μετατροπέα υποβίβασης τάσης και παρατήρησαν τρεις φορές μεγαλύτερη ροή ενέργειας προς τη μπαταρία.

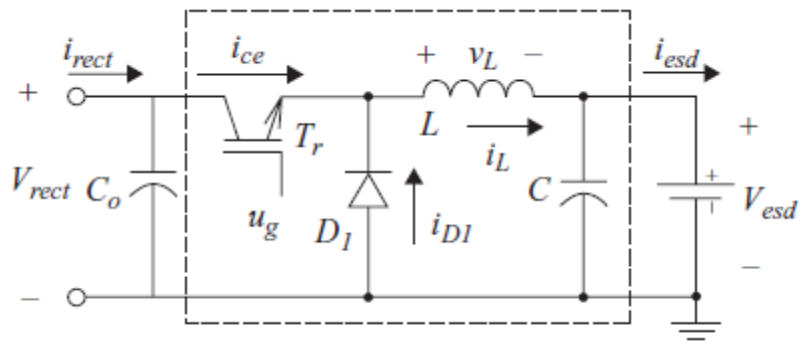


Εικόνα 2.4 Γενικευμένο κύκλωμα δύο σταδίων συλλογής ενέργειας από πιεζογεννήτρια

Οι Guan και Liao²⁸ συνόψισαν το βελτιστοποιημένο κύκλωμα των Ottman et al. (Εικόνα 2.4) και παρέιχαν μια εκτίμηση της απόδοσης του μετατροπέα. Στο γενικευμένο κύκλωμα δύο σταδίων που φαίνεται στην Εικόνα 2.4, η πιεζοηλεκτρική ισχύς εξόδου ανορθώνεται αρχικά και αποθηκεύεται προσωρινά σε ένα πυκνωτή αποθήκευσης C_o , του οποίου η τάση διατηρείται στη μέγιστη τάση του ανορθωτή. Η ισχύς εισόδου, στη συνέχεια, μεταφέρεται στη συσκευή αποθήκευσης (η οποία έχει τάση V_{esd}) μέσω του μετατροπέα DC-DC. Το αποτέλεσμα της απόδοσης του μετατροπέα είναι:

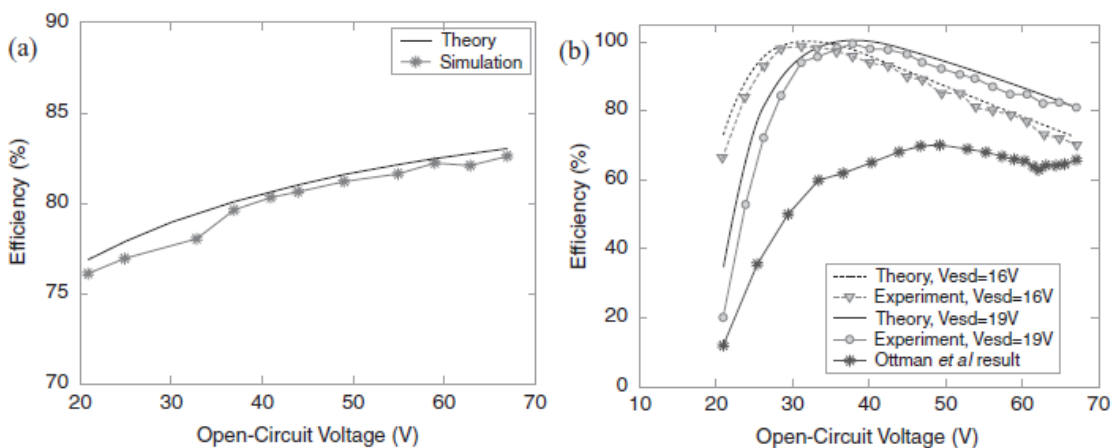
$$\eta_c = \frac{V_{rect} + V_D - V_{ces}}{V_{rect}} \frac{V_{esd}}{V_{esd} + V_D}$$

όπου η τάση V_{rect} είναι η ανορθωμένη τάση, V_{esd} είναι η τάση της συσκευής αποθήκευσης, V_D είναι η τάση σε κατάσταση αγωγής της διόδου και V_{ces} είναι η πτώση τάσης στον διακόπτη T_r .



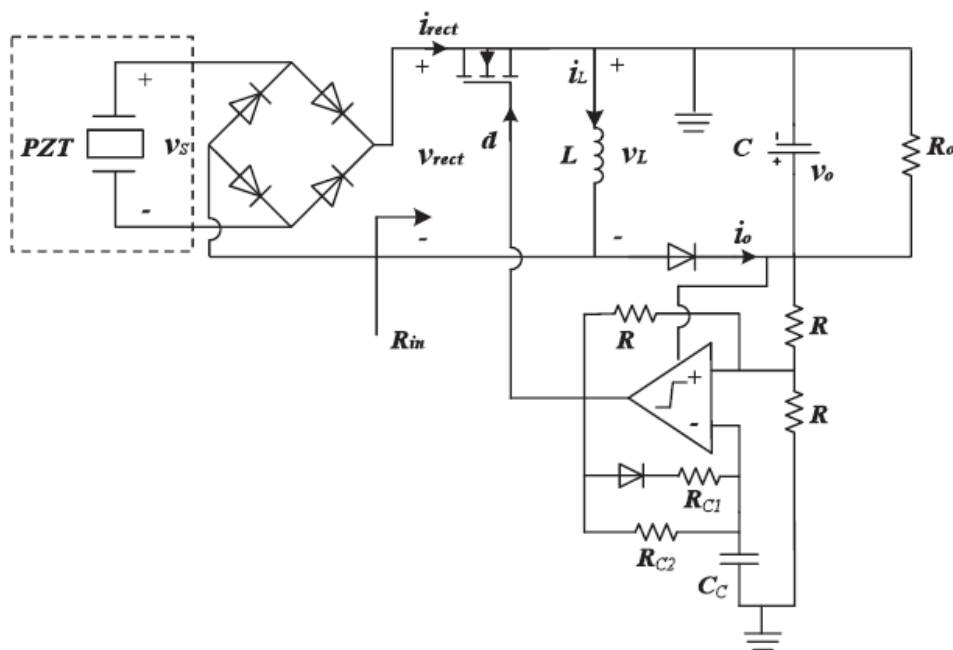
Εικόνα 2.5 Μετατροπέας DC-DC δύο σταδίων

Σε αντίθεση με αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση του SPICE (Simulation Program with Integrates Circuit Emphasis), (Εικόνα 2.6α) οι Guan και Liao απέδειξαν θεωρητικά και πειραματικά ότι το τυπικό κύκλωμα ανόρθωσης μπορεί να έχει καλύτερη απόδοση από το κύκλωμα των δύο σταδίων, ανάλογα με την τάση που έχει η συσκευή αποθήκευσης (Εικόνα 2.6β). Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αν έχει επιλεγεί μια βέλτιστη τάση για τη συσκευή αποθήκευσης, το κύκλωμα της ανόρθωσης του ενός σταδίου μπορεί να είναι πολύ πιο αποδοτικό σε σχέση με εκείνο των δύο σταδίων (Εικόνα 2.5), καθώς το ποσό της ενέργειας που συλλέγεται από έναν μετατροπέα DC-DC μπορεί να ακυρώσει τα οφέλη της χρήσης του κυκλώματος των δύο σταδίων. Ωστόσο, πολύ συχνά, λόγω των απαιτήσεων της εκάστοτε εφαρμογής, δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η βέλτιστη τάση.



Εικόνα 2.6 α) Απόδοση ενός μετατροπέα DC-DC που προκύπτει από την εξίσωση της απόδοσης και προσομοιώσεις του SPICE και β) σύγκριση της αποδοτικότητας των κυκλωμάτων ανόρθωσης ενός σταδίου και δύο σταδίων

Οι Kong et al²⁹ παρουσίασαν ένα κύκλωμα ταιριάσματος αντίστασης (impedance matching) δηλαδή το ταιρίασμα της αντίστασης του συλλέκτη με το κύκλωμα ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη μεταφορά ενέργειας (Εικόνα 2.7). Στο κύκλωμα αυτό, ένας μετατροπέας buck-boost λειτουργεί σε κατάσταση ασυνεχούς λειτουργίας και συνδέεται ακριβώς μετά τον ανορθωτή για να προσομοιώσει ένα ωμικό φορτίο. Ως εκ τούτου, σε αντίθεση με τις προσεγγίσεις που έκανε ο Ottman, οι Lefeuvre et al³⁰ δεν συμπεριέλαβαν στο κύκλωμα τους το μεγάλο πυκνωτή εξομάλυνσης αμέσως μετά τη γέφυρα του ανορθωτή. Ο διακόπτης λειτουργίας τροφοδοτείται από έναν ταλαντωτή χαμηλής ισχύος. Ο κύκλος λειτουργίας καθώς επίσης και η συχνότητα του ταλαντωτή μπορούν να συντονιστούν ώστε να ταιριάζουν με τη σύνθετη αντίσταση της πηγής. Ο Kong αναφέρει στη δημοσίευσή του ότι η σύνθετη αντίσταση της πηγής είναι περισσότερο ωμική παρά χωρητική υπό την προϋπόθεση ότι η συχνότητα συντονισμού του συλλέκτη ταυτίζεται με τη συχνότητα μηχανικής διέγερσης. Άρα, η χρήση μια καθαρά ωμικής αντίστασης για το ταιρίασμα που αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι απαραίτητη για την εξαγωγή της μέγιστης ισχύος.



Εικόνα 2.7 Κύκλωμα ταιριάσματος αντίστασης με έναν μετατροπέα buck-boost

Υποθέτοντας ότι χρησιμοποιούνται διακόπτες οι οποίοι δεν καταναλώνουν ενέργεια καθώς επίσης και δίοδοι αλλά και LC φίλτρα χωρίς απώλειες, η σύνθετη αντίσταση εισόδου του DCM μετατροπέα buck-boost δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

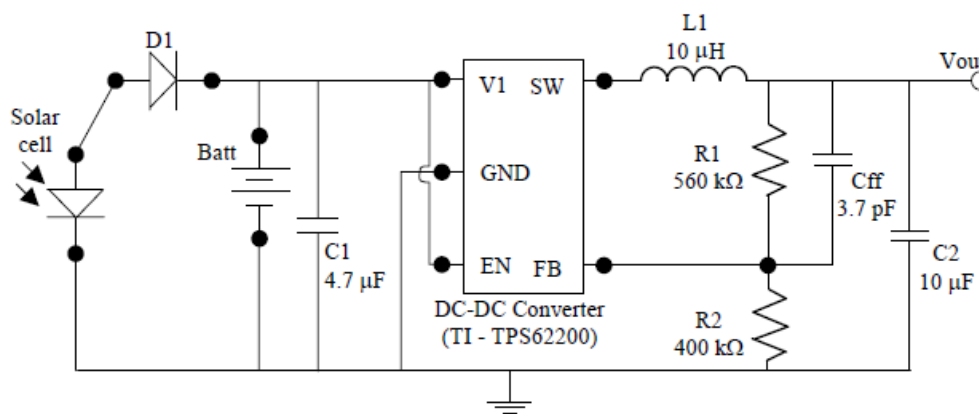
$$R_{in} = \frac{V_{rect}}{\frac{1}{T_S} \int_0^{D_1 T_S} i_L dt} = \frac{V_{rect}}{\frac{1}{T_S} \int_0^{D_1 T_S} \frac{V_{rect}}{L} dt} = \frac{V_{rect}}{\frac{1}{T_S} \frac{V_{rect}}{L} \frac{(D_1 T_S)^2}{2}} = \frac{2L}{D^2 T_S}$$

όπου D_1 είναι ο χρόνος λειτουργίας (duty cycle), T_S είναι η περίοδος εναλλαγής (switching period) και L είναι η αυτεπαγωγή (Εικόνα 2.7).

2.2.3. Κυκλώματα για συλλέκτες ηλιακής ενέργειας

Ο Roundy στη διατριβή του³¹ σχεδίασε κυκλώματα για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Για να γίνει αυτό έπρεπε να επιλεγεί πρώτα ο τύπος του ρυθμιστή τάσης. Ένας γραμμικός ρυθμιστής, όπως είναι ο TOS72501 της εταιρίας Texas Instruments, είναι ο πιο απλός τύπος. Η τάση εξόδου του ρυθμιστή ελέγχεται απορρίπτοντας ενέργεια σε ένα τρανζίστορ διέλευσης, η ενεργός αντίσταση του οποίου ελέγχεται πολύ προσεκτικά. Έτσι αν η τάση εισόδου είναι στα 3 Volts και η επιθυμητή τάση είναι στα 2, το ένα τρίτο της συνολικής ενέργειας καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση. Ως εκ τούτου, η αποδοτικότητα του εξαρτάται από την αναλογία της τάσης εισόδου προς την τάση της εξόδου και είναι τυπικά χαμηλότερη από τους μετατροπείς μεταγωγής DC-DC. Ωστόσο, είναι απλοί, μικροί και απαιτούν πολύ λίγα εξωτερικά εξαρτήματα. Οι μετατροπείς μεταγωγής DC-DC (DC-DC switching converters) (συχνά ονομάζονται και ρυθμιστές μεταγωγής) λειτουργούν με διαφορετικές αρχές λειτουργίας. Αντί να καταναλώνουν την ενέργεια πάνω σε ένα τρανζίστορ διέλευσης, ρυθμίζουν την έξοδο με γρήγορη ενεργοποίηση και απενεργοποίηση ενός στοιχείου διακλάδωσης ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου ελέγχεται από τον κύκλο λειτουργίας του διακόπτη (μεταγωγέας) και η τάση εξόδου εξομαλύνεται σε μία σταθερή τιμή με τη λειτουργία ενός μεγάλου πηνίου. Οι μετατροπείς DC-DC συνήθως εμφανίζουν πολύ καλύτερη συνολική απόδοση από τους γραμμικούς ρυθμιστές τάσης, ωστόσο είναι πιο περίπλοκοι και απαιτούν περισσότερα εξωτερικά παθητικά στοιχεία.

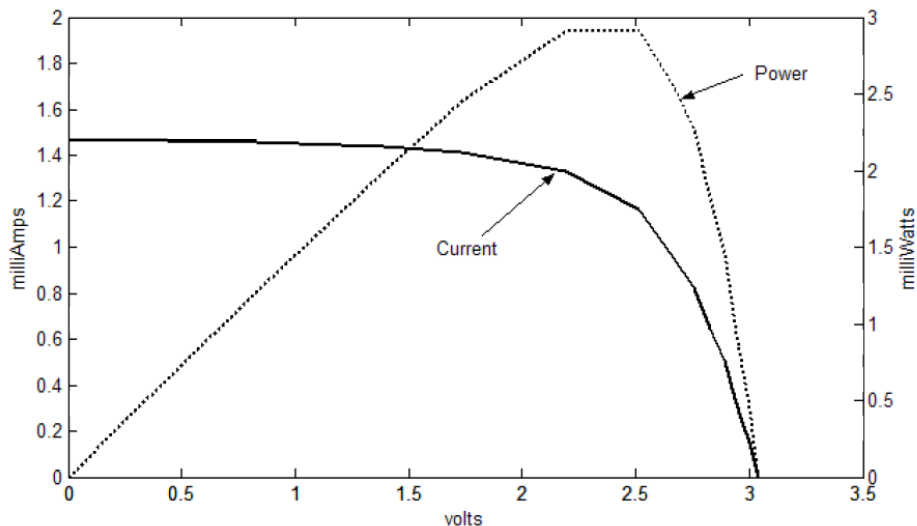
Ένα κυκλωματικό διάγραμμα συλλογής ηλιακής ενέργειας φαίνεται στην Εικόνα 2.8. Η λειτουργία του κυκλώματος είναι πολύ απλή. Το ηλιακό κύτταρο φορτίζει άμεσα τη μπαταρία μέσω της διόδου D₁. Ο μετατροπέας DC-DC μετατρέπει την τάση της μπαταρίας σε τάση εξόδου 1,2V. Σε αυτή την εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία λιθίου από την Panasonic (ML2020). Η μπαταρία είχε ονομαστική τάση λειτουργίας 2,5V. Χρησιμοποιήθηκε επίσης ένας μετατροπέας DC-DC (TPS62200) της Texas Instruments.



Εικόνα 2.8 Κύκλωμα για τη συλλογή ηλιακής ενέργειας

Ένα μειονέκτημα αυτού του κυκλώματος είναι ότι δεν υπάρχει έλεγχος φόρτισης της μπαταρίας. Ως εκ τούτου η διάρκεια ζωής της θα είναι κατά πάσα πιθανότητα μικρότερη σε σχέση με τη διάρκεια ζωής μίας μπαταρίας με έλεγχο φόρτισης. Ωστόσο, τέτοια κυκλώματα καταναλώνουν ενέργεια και σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος όπως και η παρούσα, θεωρήθηκε ότι η ελαχιστοποίηση της ισχύος ήταν πιο σημαντική από τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Παρομοίως, δεν υπάρχει ενεργός έλεγχος της τάσης λειτουργίας του ηλιακού στοιχείου. Η τάση λειτουργίας του ηλιακού στοιχείου καθορίζεται απλά από την τάση της μπαταρίας. Η Εικόνα 2.9 παρουσιάζει τη το ρεύμα και την ισχύ του ηλιακού κυττάρου σε σχέση με την τάση του όταν αυτό βρίσκεται κάτω από το φως μιας λάμπας γραφείου. Το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του είναι μεταξύ 2,25V και 2,5V. Η μπαταρία και το ηλιακό στοιχείο επιλέχθηκαν ειδικά έτσι ώστε η μέση τάση της μπαταρίας να είναι κοντά στη βέλτιστη τάση λειτουργίας του ηλιακού στοιχείου. Ως εκ τούτου, χάνεται πολύ λίγη ενέργεια με το να μην ελέγχεται πιο ενεργά η τάση λειτουργίας του ηλιακού στοιχείου. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταβολή της έντασης της πηγής του φωτός, έχει

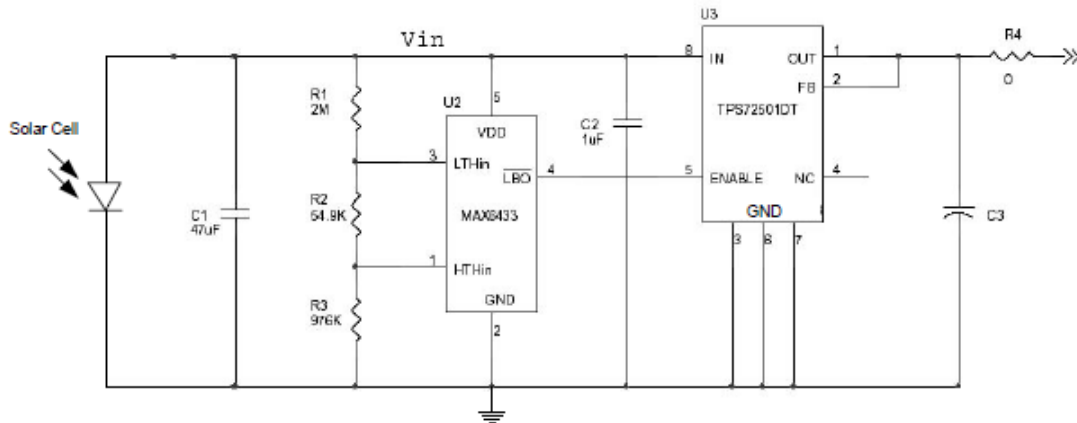
μεγάλη επίδραση στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως του ηλιακού κυττάρου αλλά πολύ μικρή επίδραση στην τάση ανοιχτού κυκλώματος. Έτσι, ακόμη και κάτω από διαφορετικές συνθήκες φωτισμού, η βέλτιστη τάση λειτουργίας δεν αλλάζει σημαντικά.



Εικόνα 2.9 Ρεύμα και ισχύς σε συνάρτηση με την τάση του ηλιακού στοιχείου το οποίο βρίσκεται κάτω από το φως ηλιακής λάμπας γραφείου

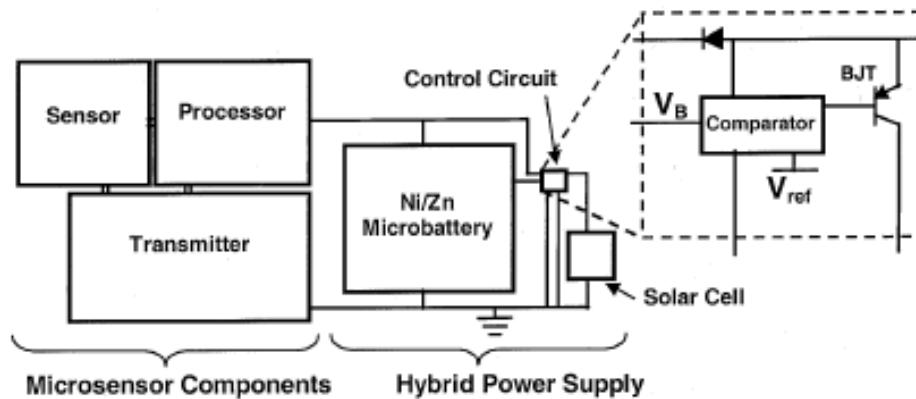
Ένα κυκλωματικό διάγραμμα συλλογής της ηλιακής ενέργειας φαίνεται στην Εικόνα 2.10. Η λειτουργία αυτού του κυκλώματος δεν είναι τόσο απλή. Ο πυκνωτής αποθήκευσης C_1 , λειτουργεί ως συσκευή αποθήκευσης της ενέργειας. Όταν ο πυκνωτής φορτίζεται σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο τάσης, τότε το κύκλωμα του φορτίου ενεργοποιείται και η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον πυκνωτή καταναλώνεται. Επειδή το φορτίο καταναλώνει την ενέργεια γρηγορότερα από ότι την παράγει το ηλιακό πάνελ, η τάση στα άκρα του πυκνωτή πέφτει όταν το φορτίο (εδώ : ραδιόφωνο) είναι ενεργοποιημένο. Μόλις η ενέργεια εξαντληθεί και η τάση πέσει σε ένα προκαθορισμένο χαμηλό επίπεδο, το κύκλωμα του φορτίου απενεργοποιείται και ο πυκνωτής επαναφορτίζεται. Το μέγιστο και το χαμηλότερο επίπεδο τάσης καθορίζεται από το ολοκληρωμένο MAXIM IC (MAX6433) που συμβολίζεται ως U_2 στο σχήμα. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η ελάχιστη περίοδος που καθορίζεται από το MAXIM IC είναι περίπου 225ms. Επιπλέον, αν ο πυκνωτής αποφορτίζεται ή φορτίζεται γρηγορότερα από αυτό, το κύκλωμα περιμένει να περάσουν 225ms προτού ενεργοποιήσει το ρυθμιστή τάσης και δώσει ισχύ στο φορτίο. Ένας ρυθμιστής τάσης απόρριψης ενέργειας από την εταιρία Texas Instruments (TPS72051DT), ο

ο οποίος σημειώνεται ως U_3 στο κύκλωμα, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσεως εξόδου στην επιθυμητό επίπεδο των 1,2V. Σε αυτή την περίπτωση, η τάση λειτουργίας του ηλιακού στοιχείου καθορίζεται από την τάση στα άκρα του πυκνωτή C_1 . Αυτή η τάση ελέγχεται μέσα σε ένα στενό εύρος (περίπου 1,8V-1,9V) από το ολοκληρωμένο MAXIM (U_2).



Εικόνα 2.10 Κύκλωμα συλλογής ηλιακής ενέργειας

Ένα κοινό χαρακτηριστικό των κυκλωμάτων διαχείρισης ενέργειας που εφαρμόζονται σε φωτοβολταϊκές γεννήτριες είναι η χρήση ενός DC-DC μετατροπέα με σταθερό συντελεστή μετατροπής για τη μείωση της ενέργειας που καταναλώνεται από το σύστημα ελέγχου. Το απλούστερο σύστημα ελέγχου φορτίζει μια μπαταρία και τροφοδοτεί ένα κύκλωμα χρησιμοποιώντας μόνο μία δίοδο και μερικά ηλιακά κύτταρα σε σειρά. Εάν ο κατάλληλος αριθμός ηλιακών κυττάρων τεθεί σε σειρά, δεν απαιτείται καμία DC-DC μετατροπή. Ένα τέτοιο κύκλωμα παρουσιάζεται στην εικόνα 2.11³². Αυτό οδηγεί σε εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας από το κύκλωμα ελέγχου (<7µA). Όταν η τάση της μπαταρίας πλησιάσει την τάση αναφοράς, υποδεικνύοντας έτσι μία πλήρη φόρτιση, ο συγκριτής στο κύκλωμα ελέγχου διακόπτει τη φόρτιση της μπαταρίας αλλά εξακολουθεί να επιτρέπει τη διέλευση κάποιας ενέργειας ως ρεύμα αναμονής. Το πλεονάζον ρεύμα καταναλώνεται πάνω σε μία αντίσταση.



Εικόνα 2.11 Κύκλωμα που τροφοδοτείται από αρκετές ηλιακές κυψέλες σε σειρά, μέσω μιας διόδου

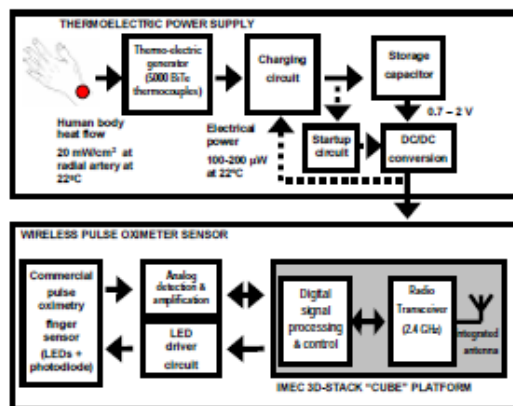
Η εταιρία True Solar Autonomy³³ κατασκευάζει κυκλώματα τα οποία έχουν σταθερό συντελεστή μετατροπής. Το κύκλωμα μπορεί να φορτίσει μια μπαταρία από ένα ηλιακό κύτταρο. Η χρήση ενός μόνου ηλιακού κυττάρου αυξάνει την αξιοπιστία και μειώνει τον όγκο του συστήματος, αλλά απαιτείται και ένας μετατροπέας DC-DC για τη ρύθμιση της τάσης.

Ένα από τα πιο μικρά κυκλώματα που έχουν παρουσιαστεί μέχρι σήμερα χρησιμοποιεί την ενέργεια από μια ενσωματωμένη φωτοδίοδο η οποία χρησιμοποιείται και ως ηλιακό κύτταρο³⁴. Ενεργοποιεί έναν on-chip ταλαντωτή δακτυλίου. Το πρωτότυπο αποτελείται από μία πηγή φωτός, ενσωματωμένες φωτοδιόδους συλλογής ενέργειας, συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, έναν ταλαντωτή δακτυλίου και buffers για την οδήγηση του σήματος εκτός του chip. Έχει αποδειχθεί ότι αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την εξαγωγή περισσότερης ενέργειας³⁴. Το σημείο λειτουργίας των ηλιακών κυψελών καθορίζεται από την αλλαγή του συντελεστή μετατροπής του μετατροπέα DC-DC. Τα πειράματα δείχνουν ότι είναι δυνατόν να βρεθεί αυτό το σημείο λειτουργίας, μεγιστοποιώντας απλά τις παραμέτρους εξόδου του συστήματος διαχείρισης ενέργειας όπως είναι η τάση, το ρεύμα και η ισχύς. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν με τη μεγιστοποίηση του ρεύματος εξόδου του συστήματος.

2.2.4. Κυκλώματα για συλλέκτες θερμικής ενέργειας

Το πρώτο σύστημα που παρουσιάστηκε το 2002³⁵, αποδεικνύει ότι μπορεί να συλλεχθεί περισσότερη ισχύς από την ίδια θερμογεννήτρια όταν ο συντελεστής μετατροπής του μετατροπέα DC-DC ρυθμίζεται ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του. Το σύστημα που θα παρουσιαστεί εδώ, βελτιστοποιήθηκε για ισχύ 1W.

Στο ερευνητικό κέντρο IMEC³⁶ έχουν αναπτυχθεί αυτόνομα συστήματα τα οποία τροφοδοτούνται από θερμοηλεκτρικές γεννήτριες χρησιμοποιώντας διακριτά εξαρτήματα. Για την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης του μετατροπέα, το σύστημα αποτελείται από δύο μέρη (Εικόνα 2.12). Το πρώτο στάδιο, το στάδιο της φόρτισης, είναι μία ιδανική δίοδος η οποία δεν έχει πτώση τάσης. Αποτελείται από ένα διακόπτη MOS με ένα συγκριτή πάνω του. Αυτή η «δίοδος» ακολουθείται από ένα μετατροπέα ανύψωσης τάσης υψηλής απόδοσης. Το κύκλωμα ελέγχου καταναλώνει 16μW και έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί με 100μW στην είσοδο. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει ένα παλμικό οξύμετρο (pulse-oximeter).



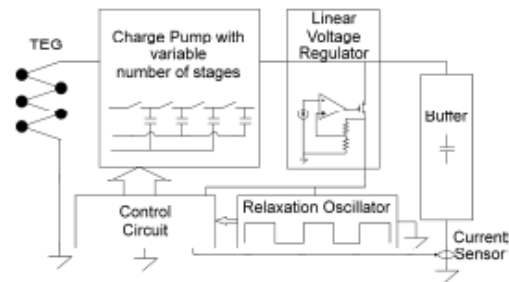
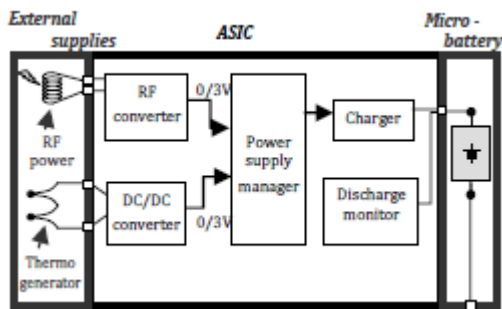
Εικόνα 2.12 Σχηματικό διάγραμμα ενός pulse-oximeter το οποίο τροφοδοτείται από μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια

Εικόνα 2.13 Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια του Fraunhofer η οποία διαθέτει ένα κύκλωμα το οποίο εκκινεί με χαμηλή τάση

Το Fraunhofer στη Γερμανία³⁷ επικεντρώθηκε στα κυκλώματα τα οποία εκκινούν από πολύ χαμηλή τάση διότι οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες παράγουν χαμηλές τάσεις. Το κύκλωμα μπορεί να ξεκινήσει να λειτουργεί από μια τάση εισόδου 0,13V και έχει σχεδιαστεί για να μεταφέρει περίπου 2mW. Η ισχύς που καταναλώνεται για τον έλεγχο είναι 0,4mW. Στην Εικόνα 2.13 φαίνεται αυτό το σύστημα.

Το ερευνητικό κέντρο CEA-LETI³⁶ παρουσίασε ένα κύκλωμα διαχείρισης ισχύος για δύο πηγές εισόδου: μία θερμική και μία για RF Harvesting (Εικόνα 2.14). Η διαχείριση της ενέργειας που παράγεται από το θερμοηλεκτρικό στοιχείο χρησιμοποιεί έναν ενσωματωμένο μετατροπέα ανύψωσης τάσης με ένα εξωτερικό πηνίο. Το κύκλωμα καταναλώνει 70μW και μπορεί να μεταφέρει περίπου 1mW.

Το 2008, η IMEC³⁸ παρουσίασε ένα κύκλωμα συλλέκτη για εφαρμογές πολύ χαμηλής ισχύος, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να εκκινείται μόνος του πάνω από την τάση των 0,76V (Εικόνα 2.15). Ως μετατροπέας DC-DC χρησιμοποιείται μια αντλία φορτίου (charge pump). Ο ελεγκτής καταναλώνει μόνο 2,1μW, γεγονός που καθιστά το κύκλωμα κατάλληλο για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 10μW.



Εικόνα 2.14 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος διαχείρισης ισχύος πολλαπλών γεννητριών

Εικόνα 2.15 Σχηματικό διάγραμμα χωρητικού μετατροπέα

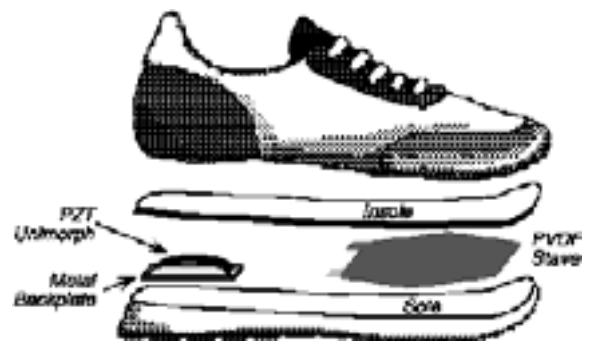
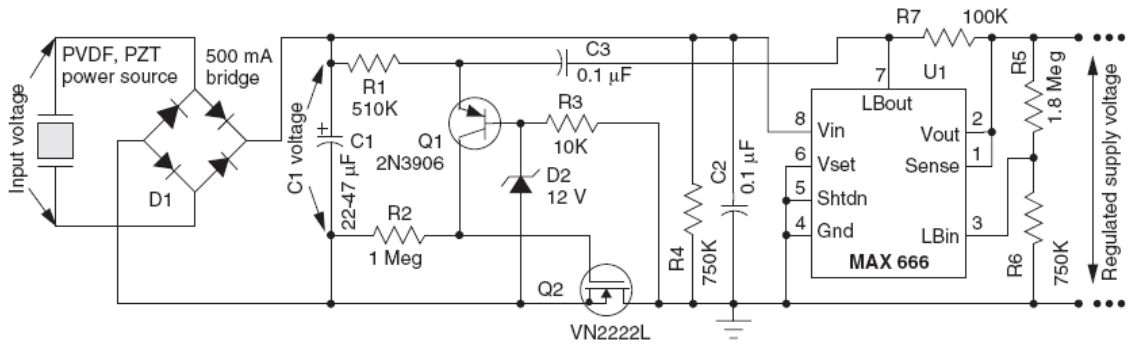
2.2.5. Κύκλωμα Συλλογής Μηχανικής Ενέργειας και Ραδιοκυμάτων

Όταν χρησιμοποιούνται συλλέκτες ενέργειας είτε για ραδιοκύματα είτε για μηχανικές δονήσεις, δημιουργείται μια εναλλασσόμενη τάση. Συνεπώς, η τάση εισόδου στο κύκλωμα συλλογής ενέργειας μπορεί να είναι και αρνητική. Δεδομένου ότι οι περισσότεροι τύποι φορτίου δεν μπορεί να λειτουργήσουν με αρνητική τάση, το κύκλωμα πρέπει να ανορθώσει την τάση και να προσαρμόσει το επίπεδο της DC τάσης. Ανάλογα με το εύρος των συχνοτήτων χρησιμοποιούνται διαφορετικές τεχνικές συλλογής ενέργειας. Η συχνότητα των δονήσεων είναι περίπου 1-2kHz, ενώ για RF harvesting χρησιμοποιούνται οι εξής συχνότητες: 13,65kHz, 860-960MHz και 2,45GHz.

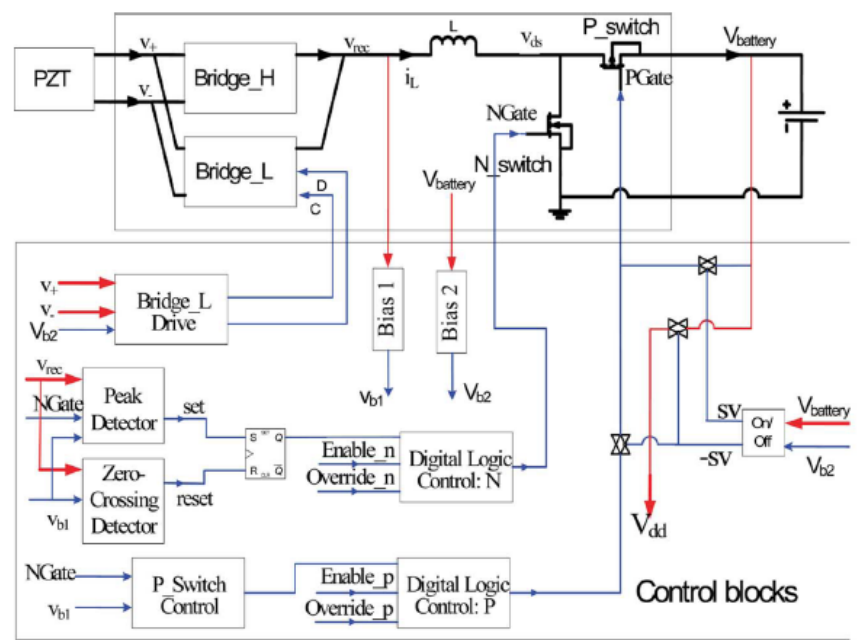
2.2.5.1. Μηχανική Ενέργεια

Ένας πολύ γνωστός συλλέκτης μηχανικής ενέργειας (Vibration), που προτάθηκε από τον Joe Paradiso³⁹ και ενσωματώθηκε σε παπούτσια, έχει έναν πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα και εκμεταλλεύεται την ενέργεια των δονήσεων. Το σύστημα λειτουργεί από την ενέργεια που δημιουργείται από τα βήματα (Εικόνα 2.16). Η ανόρθωση πραγματοποιείται από μία γέφυρα διόδων. Αυτό είναι εφικτό λόγω της τάσης ανοιχτού κυκλώματος που φτάνει τα 200V. Επιπλέον χρησιμοποιεί ένα γραμμικό ρυθμιστή για τη ρύθμιση της τάσης το οποίο όμως μειώνει την απόδοση του μετατροπέα DC-DC. Το πλεονέκτημα είναι ότι το πλήρες κύκλωμα ελέγχου καταναλώνει μόνο 15μΑ. Η ισχύς εισόδου είναι περίπου 1,3mW για έναν κανονικό σε βάρος άνθρωπο που περπατάει.

Η ισχύς εξόδου μπορεί να βελτιστοποιηθεί περαιτέρω με τη χρήση της ακόλουθης στρατηγικής που προτείνεται στη δημοσίευση²⁶ (Εικόνα 2.17) και βασίζεται στην τεχνική που αφορά τους προβόλους των πιεζοηλεκτρικών γεννητριών. Όταν ο πιεζοηλεκτρικός πρόβολος κάμπτεται στο μέγιστο του, η τάση του πυκνωτή αντιστρέφεται χρησιμοποιώντας την αυτεπαγωγή L. Με αυτό τον τρόπο απαιτείται η μεταφορά περισσότερης μηχανικής ενέργειας στον επόμενο κύκλο και επιτυγχάνεται υψηλότερη ισχύς εξόδου και υψηλότερη τάση. Αυτή η τροποποίηση αυξάνει την ενέργεια που συλλέγεται κατά 150%. Ένα από τα μειονεκτήματα του συστήματος είναι η κατανάλωση ισχύος του κυκλώματος ελέγχου.



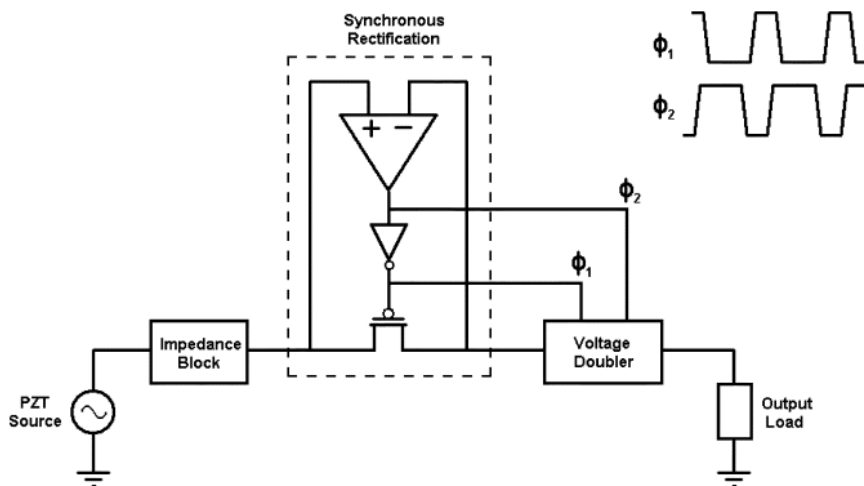
Εικόνα 2.16 Ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας για μία πιεζοηλεκτρική γεννήτρια



Εικόνα 2.17 Κύκλωμα διαχείρισης ενέργειας για πιεζοηλεκτρική γεννήτρια

Αν και οι περισσότεροι μετατροπείς ενέργειας AC-DC χρησιμοποιούν διόδους, η πτώση τάσης στα άκρα τους προσθέτει και άλλες απώλειες. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση έχει προταθεί ανόρθωση με διακόπτες. Οι διακόπτες έχουν χαμηλότερη πτώση τάσης επειδή τα τρανζίστορ αντικαθιστούν τις διόδους. Για την ενεργοποίηση του ελέγχου χρησιμοποιήθηκε ένα επιπλέον κύκλωμα⁴⁰.

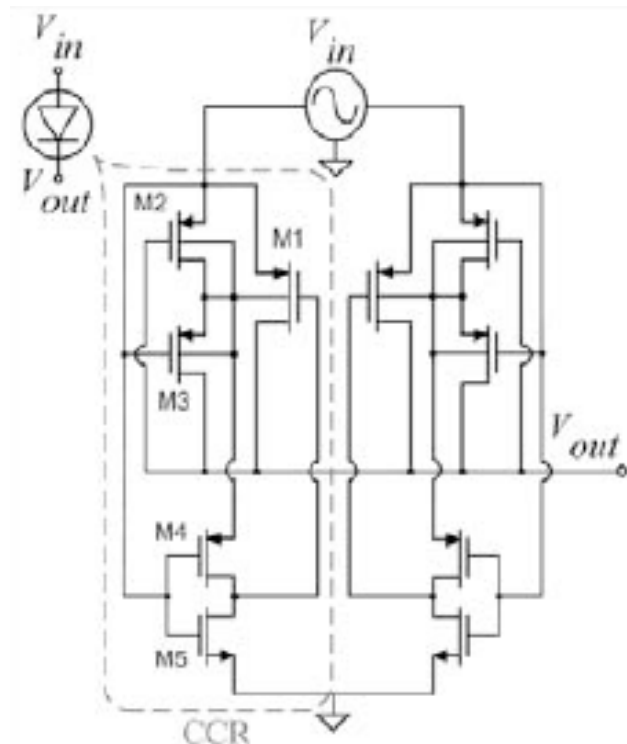
Ο Le από τον Oregon State University στη δημοσίευση⁴¹ του υλοποίησε αυτή τη λύση ως ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Ο συνδυασμός ενός MOS τρανζίστορ και ενός συγκριτή αντικαθιστούν μια δίοδο (Εικόνα 2.18). Αυτό μετατρέπει το διακόπτη σε μία ιδανική δίοδο. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του κυκλώματος είναι ότι απαιτείται ένας συγκριτής ο οποίος όμως καταναλώνει κάποια mW. Συνολικά, αυτό το κύκλωμα έχει μία αποδοτικότητα μεγαλύτερη του 90%.



Εικόνα 2.18 Ολοκληρωμένο κύκλωμα ανορθωτή χωρίς πτώση τάσης στις διόδους

Η πιο πρόσφατη έρευνα σε αυτόν τον τομέα προέρχεται από τον N.J. Guilar και παρουσιάζει έναν ανορθωτή πλήρους κύματος για μία πολυφασική πιεζοηλεκτρική γεννήτρια⁴². Το κύκλωμα φαίνεται στην Εικόνα 2.19 και αποτελείται από δύο ελεγχόμενους CMOS ανορθωτές συνδεδεμένους παράλληλα. Δύο τρανζίστορ συνδεδεμένα στις ενώσεις των σωμάτων τους (M2-M3) διασφαλίζουν ότι η σύνδεση pn που συνδέεται με το πηγάδι n του μεγάλου PMOS τρανζίστορ ισχύς M1 δεν θα πολωθεί κανονικά. Έτσι όπως είναι συνδεδεμένα τα τρανζίστορ λειτουργούν επίσης και ως ανιχνευτές κορυφών (peak detectors). Ένας ενισχυτής CMOS λειτουργεί ως συγκριτής χαμηλής ισχύος βασίζοντας τη λειτουργία του στην ανίχνευση των κορυφών της τάσης εισόδου. Ο μετατροπέας

ενεργοποιεί το διακόπτη M1 όταν η τάση ανεβαίνει πάνω από το μισό της κορυφής της τάσης εισόδου. Η απόδοση του κυκλώματος μπορεί να φτάσει μέχρι και το 98%.



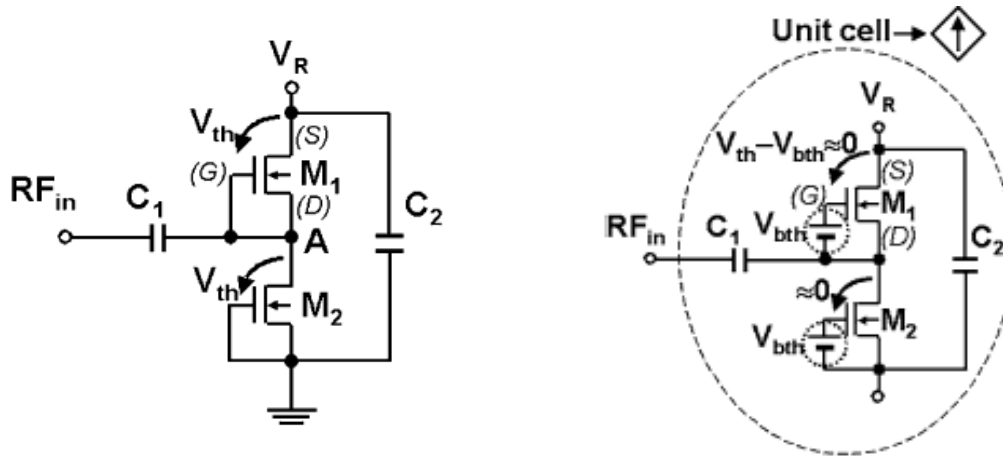
Εικόνα 2.19 Σχηματική αναπαράσταση του ανορθωτή πλήρους γέφυρας για πολυφασικό πιεζοηλεκτρικό harvester

2.2.5.2. Ραδιοκύματα-RF

Ο συνολικός σχεδιασμός ενός κυκλώματος διαχείρισης ενέργειας για συλλογή μηχανικής ενέργειας και ραδιοκυμάτων είναι πανομοιότυπος. Η κύρια διαφορά είναι η μείωση των απωλειών ισχύος λόγω της πτώσης τάσης πάνω στις διόδους η οποία δεν μπορεί να αποφευχθεί με τη χρήση διακοπών. Λόγω της υψηλής συχνότητας, οι συγκριτές πρέπει να αλλάζουν πάρα πολύ γρήγορα, αυξάνοντας έτσι τις απώλειες μεταγωγής.

Μία εναλλακτική τεχνική για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του μετατροπέα DC-DC στη συχνότητα των 950MHz παρουσιάστηκε σε δημοσίευση⁴³. Ο ανορθωτής που φαίνεται στην Εικόνα 2.20 αποτελείται από τρανζίστορ MOS τα οποία είναι συνδεδεμένα για να λειτουργούν ως διόδοι. Για τη μείωση της τάσης κατωφλίου των τρανζίστορ προστέθηκε ένας πυκνωτής μεταξύ της πύλης και της πηγής του τρανζίστορ (Εικόνα 2.21). Αυτός ο πυκνωτής φορτίζεται μέχρι την τάση κατωφλίου του τρανζίστορ. Τα τρανζίστορ στον

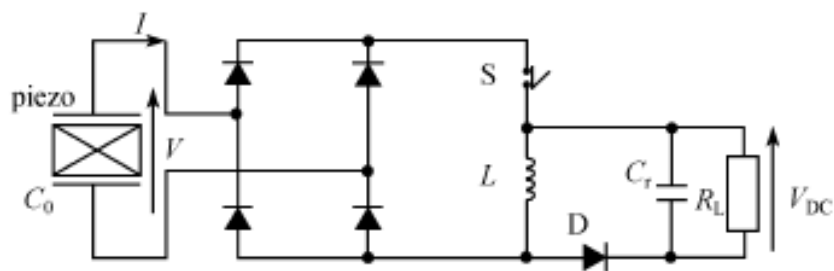
ανορθωτή μπορούν να αρχίσουν να άγουν τη στιγμή που η τάση εισόδου αρχίζει να αυξάνεται. Χάρη σε αυτό το κύκλωμα η μέγιστη απόσταση λειτουργίας του harvester από την πηγή αυξάνεται από 3 έως 10 μέτρα.



Εικόνα 2.20 Τύπος ανορθωτή NMOS με αποσυνδεδεμένα τρανζίστορ⁴⁴ **Εικόνα 2.21** Τύπος ανορθωτή NMOS

2.2.6. Κύκλωμα Συλλογής Ενέργειας με τη Μέθοδο Συγχρονισμένης Εξαγωγής Φορτίου

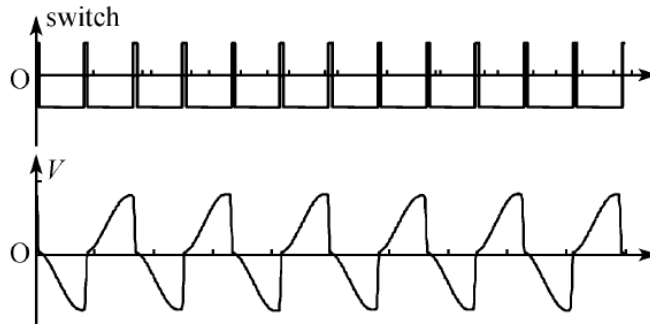
Η αρχή λειτουργίας ενός κυκλώματος συλλογής ενέργειας με τη μέθοδο της συγχρονισμένης εξαγωγής φορτίου (Synchronous Charge Extraction-SCE) είναι η περιοδική μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας που συσσωρεύεται στον πυκνωτή C_0 του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου στο φορτίο ή στο στοιχείο αποθήκευσης της ενέργειας. Το κυριότερο χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής είναι ότι η περιοδική εξαγωγή της ενέργειας η οποία είναι συγχρονισμένη με τις μηχανικές δονήσεις. Μια άλλη ιδιαιτερότητα του είναι το γεγονός ότι το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο βρίσκεται τις περισσότερες φορές σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος.



Εικόνα 2.22 Κύκλωμα Synchronous charge extraction

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.22, το κύκλωμα διαθέτει ένα διακόπτη S σε σειρά με ένα πηνίο L το οποίο ενεργοποιεί τη διαδικασία εξαγωγής του φορτίου. Ο διακόπτης S είναι απενεργοποιημένος όταν η τάση V στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο αυξάνεται έτσι ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να συσσωρεύεται πάνω στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Μόλις η τάση V φτάσει σε μία μέγιστη τιμή, ο διακόπτης ενεργοποιείται και ο πυκνωτής C_0 του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου αποφορτίζεται μέσω του πηνίου L . Κατά τη διαδικασία της εκφόρτισης, το υψηλό ρεύμα επάγεται στο πηνίο L και η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τον πυκνωτή στο πηνίο. Όταν το φορτίο έχει αφαιρεθεί τελείως από τον πυκνωτή C_0 , ο διακόπτης S απενεργοποιείται και το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο βρίσκεται και πάλι σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος. Επειδή το ρεύμα στο πηνίο δεν μπορεί να σταματήσει ξαφνικά, ρέει μέσω των κλάδων στη δεξιά πλευρά. Η ηλεκτρική ενέργεια πάνω στο πηνίο L μεταφέρεται στον πυκνωτή C_r και στο ηλεκτρικό φορτίο R_L εξαιτίας της επίδρασης της ταλάντωσης. Η διόδος D εδώ χρησιμοποιείται για να μπλοκάρει τη ροή του ρεύματος προς την αντίθετη κατεύθυνση, έτσι ώστε το ηλεκτρικό φορτίο να μπορεί να συσσωρευτεί στον πυκνωτή C_r .

Το σήμα μεταγωγής και η κυματομορφή της τάσης πάνω στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο φαίνεται στην Εικόνα 2.23. Ο χρόνος τον οποίο είναι ενεργοποιημένος ο διακόπτης S είναι πολύ μικρός, περίπου το $1/50$ της περιόδου T της δόνησης.



Εικόνα 2.23 Το σήμα μεταγωγής και η κυματομορφή της τάσης πάνω στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο

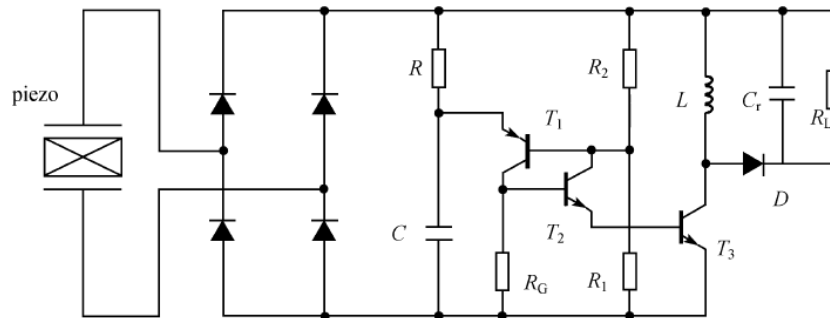
Η μέση ισχύς μπορεί να υπολογιστεί με βάση την παραδοχή ότι η ηλεκτρική ενέργεια που μεταφέρεται ανά περίοδο ισούται με τη μέγιστη ενέργεια που συσσωρεύεται στον πυκνωτή C_0 του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Ως εκ τούτου, η έκφραση της μέσης ισχύος που παρέχεται από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο προκύπτει ως εξής:

$$P = 2 \frac{a^2 U^2 \omega}{\pi C_0}$$

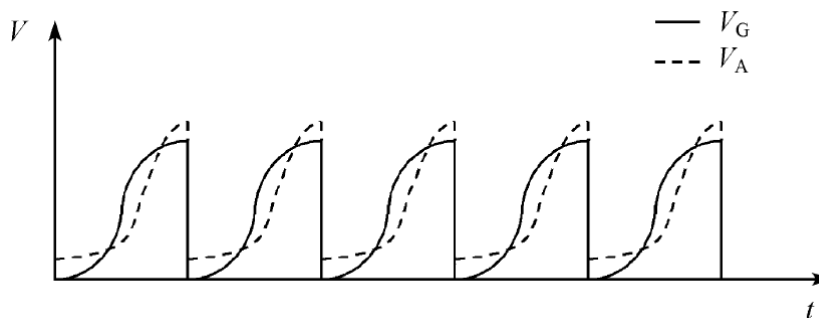
όπου a είναι ο συντελεστής δύναμης και U είναι η μέγιστη τάση.

Το κύκλωμα SCE το οποίο βασίζεται στους διακόπτες σκανδάλης χωρίς πηγή φαίνεται στην Εικόνα 2.24. Η αντίσταση R , ο πυκνωτής C και τα τρανζίστορ T_1 και T_2 σχηματίζουν το κύκλωμα σκανδάλης. Το τρανζίστορ T_1 είναι τύπου PNP ενώ τα τρανζίστορ T_2 και T_3 είναι τύπου NPN. Τα T_1 και T_2 σχηματίζουν ένα προγραμματιζόμενο τρανζίστορ μονής σύνδεσης (programmable unijunction transistor-PUT) το οποίο χρησιμοποιείται ως έναυσμα και κάνει τον αναλογικό διακόπτη T_3 να ενεργοποιείται ή να απενεργοποιείται στο σωστό χρόνο. Όταν η τάση V στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο φτάσει σε μία μέγιστη τιμή, η τιμή V_A στον εκπομπό του T_1 μειώνεται την τάση V_G στο συλλέκτη του T_2 μεγιστοποιείται και δημιουργείται ένα υψηλό επίπεδο ανάμεσα στον εκπομπό του T_2 και στη βάση του T_3 . Ως εκ τούτου, ο αναλογικός διακόπτης T_3 ενεργοποιείται αμέσως και η ηλεκτρική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μεταφέρεται στη συνέχεια εντός του επαγωγέα L . Όταν το ηλεκτρικό φορτίο απομακρύνεται τελείως από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, η τάση στη βάση του T_3 αλλάζει από υψηλό δυναμικό σε χαμηλό και ο αναλογικός διακόπτης T_3 ανοίγει ξανά και η ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στο πηνίο L μεταφέρεται στον

πυκνωτή C_r μέσω στις διόδους D . Συμπερασματικά, γίνεται φανερό ότι οι μηχανικές δονήσεις είναι αυτές που ενεργοποιούν τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω δηλαδή τη μεταφορά του φορτίου από τον ένα πυκνωτή στον άλλο. Οι κυματομορφές του εκπομπού του T_1 και του συλλέκτη του T_3 φαίνονται στην Εικόνα 2.25.



Εικόνα 2.24 Ένα από τα κυκλώματα SCE

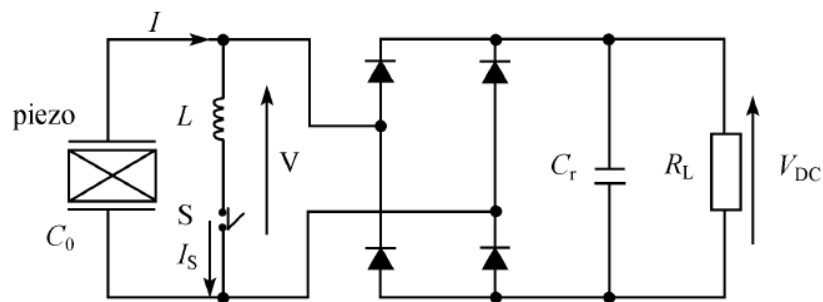


Εικόνα 2.25 Οι κυματομορφές του εκπομπού του T_1 και του συλλέκτη του T_3

2.2.7. Κύκλωμα Συλλογής Ενέργειας με τη Μέθοδο Συγχρονισμένου Διακόπτη πάνω σε Πηνίο

Το κύκλωμα συλλογής ενέργειας με τη μέθοδο συγχρονισμένου διακόπτη πάνω σε πηνίο (synchronized switch harvesting on the inductor - SSHI) χρησιμοποιεί ένα κύκλωμα επεξεργασίας μη γραμμικής λειτουργίας το οποίο είναι συνδεδεμένο στα ηλεκτρόδια του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και στην είσοδο του ανορθωτή γέφυρας. Το μη γραμμικό κύκλωμα επεξεργασίας είναι πολύ απλό, αποτελούμενο από ένα πηνίο και ένα διακόπτη όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.26. Αυτό το κύκλωμα μπορεί να αυξήσει το πλάτος της τάσης στον πυκνωτή του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, λόγω της διαδικασίας αντιστροφής της

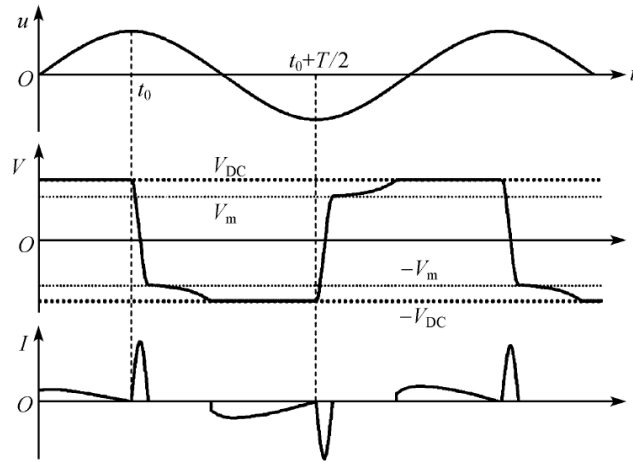
τάσης. Ο διακόπτης S είναι ενεργοποιημένος όταν η τάση V στον πυκνωτή C_0 του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου φτάσει σε ένα μέγιστο ή ένα ελάχιστο. Κατά τη διαδικασία, δημιουργείται ένα ταλαντώμενο ηλεκτρικό κύκλωμα μεταξύ του πηνίου L και του πυκνωτή C_0 ενώ η τάση V πάνω στον πυκνωτή C_0 αντιστρέφεται. Ο διακόπτης S απενεργοποιείται ξανά μετά από τη διαδικασία αντιστροφής της τάσης. Λόγω της αντιστροφής της τάσης, η τάση V πάνω στον C_0 αυξάνεται με το χρόνο επειδή δημιουργούνται ηλεκτρικά φορτία από τις μηχανικές πιέσεις.



Εικόνα 2.26 Κύκλωμα synchronized switch harvesting on the inductor - SSHI

Κατά τη διαδικασία αντιστροφής της τάσης, η απόλυτη τιμή της τάσης V είναι μικρότερη από την τάση V_{DC} πάνω στον πυκνωτή C_r έτσι ώστε το ρεύμα μέσω του ανορθωτή γέφυρας να είναι μπλοκαρισμένο. Η αντιστροφή της τάσης, δεν είναι τέλεια, άρα η απόλυτη τιμή της τάσης μετά την αναστροφή γίνεται μικρότερη. Η απώλεια της τάσης λόγω της αναστροφής οφείλεται κυρίως στην ισοδύναμη αντίσταση σειράς του πηνίου και μπορεί να μοντελοποιηθεί από τον ηλεκτρικό συντελεστή ποιότητας Q του κυκλώματος του ταλαντωτή. Η Εικόνα 2.27 , δείχνει τις κυματομορφές της τάσης και της μετατόπισης. Η σχέση μεταξύ του Q και των τάσεων του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου πριν και μετά τη διαδικασία αναστροφής (V_{DC} και V_m αντίστοιχα) λαμβάνεται από την εξίσωση:

$$V_m = -V_{DC} e^{-\pi/2Q}$$



Εικόνα 2.27 Κυματομορφές των τάσεων και των μετατοπίσεων

Το ηλεκτρικό φορτίο που ρέει μέσα από την ισοδύναμη αντίσταση R_L του τερματικού φορτίου κατά μία μηχανική περίοδο $T/2$ εξισορροπείται από το φορτίο που δίνει το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Αυτό οδηγεί στην εξίσωση:

$$-\left(\int_{t_0}^{t_0+\frac{T}{2}} Idt - \int_{t_0}^{t_0+\frac{T}{2}} I_S dt \right) = \frac{V_{DC} T}{R_L 2}$$

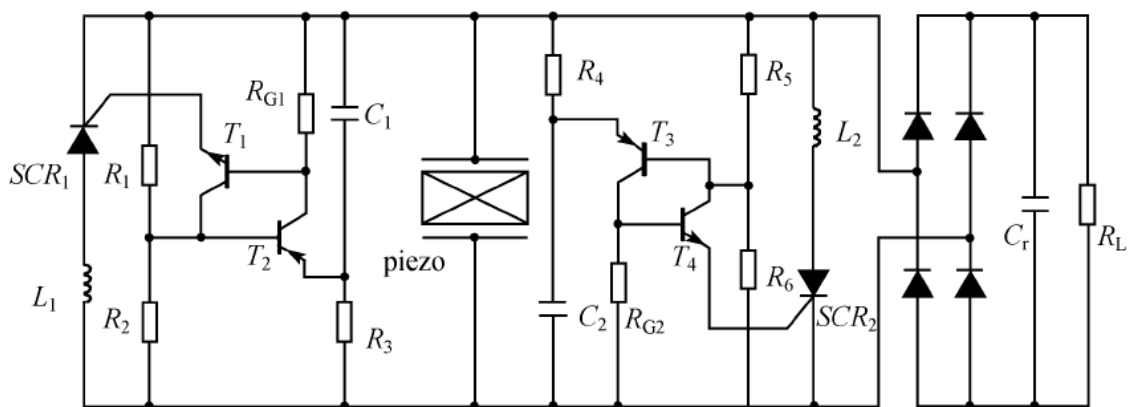
όπου I_S είναι το ρεύμα που ρέει μέσα στο πηνίο. Ως εκ τούτου, είναι μη μηδενικό, μόνο κατά τη διάρκεια της αναστροφής της τάσης. Το πρώτο ολοκλήρωμα είναι το συνολικό φορτίο που εκρέει από τα ηλεκτρόδια του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και το δεύτερο ολοκλήρωμα αντιστοιχεί στο φορτίο που ρέει μέσα από το πηνίο κατά τη διάρκεια της αναστροφής της τάσης. Συνεπώς, το δεύτερο ολοκλήρωμα θα πρέπει να είναι το άθροισμα του φορτίου που αποθηκεύεται πάνω στον πυκνωτή C_0 πριν την αντιστροφή της τάσης και του φορτίου που είναι αποθηκευμένο στον C_0 μετά την αναστροφή, το οποίο εκφράζεται ως:

$$\int_{t_0}^{t_0+\frac{T}{2}} I_S dt = C_0 V_{DC} (1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}})$$

Η μέση ισχύς προκύπτει από τον κλασικό τύπο: $P = \frac{V_{DC}^2}{R_L}$

Στην Εικόνα 2.28, φαίνεται το κύκλωμα SSHI το οποίο αποτελείται από δύο σύνολα κυκλωμάτων διακοπών συνδεδεμένα παράλληλα με τα ηλεκτρόδια του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και την είσοδο της γέφυρας του ανορθωτή. Κάθε κύκλωμα διακόπτη αποτελείται από ένα πηνίο L σε σειρά με ένα ελεγχόμενο ανορθωτή πυριτίου (silicon controlled rectifier - SCR), ο οποίος ελέγχεται από ένα κύκλωμα διακόπτη σκανδάλης. Όταν η μετατόπιση του προβόλου είναι μέγιστη ή ελάχιστη, το ένα κύκλωμα διακοπών είναι ενεργό ενώ το άλλο όχι. Το ενεργό κύκλωμα ενεργοποιεί το διακόπτη του και δημιουργείται ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό κύκλωμα L - C_0 . Η ηλεκτρική περίοδος ταλάντωσης επιλέγεται πολύ μικρότερη από τη μηχανική περίοδο δονήσεων T . Ο διακόπτης απενεργοποιείται και η διαδικασία ταλάντωσης σταματά αυτόματα μόλις το ρεύμα που ρέει μέσα από τον SCR φτάσει στο μηδέν.

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των κυκλωμάτων με τους ενεργούς διακόπτες είναι ότι τα κυκλώματα επεξεργασίας δεν χρειάζονται επιπλέον παροχή ισχύος. Ως εκ τούτου, η ενέργεια που συλλέγεται ισούται με την καθαρή παραγωγή ενέργειας του συστήματος⁴⁶.



Εικόνα 2.28 Κύκλωμα SSHI

3. Κατασκευή και χαρακτηρισμός κυκλωμάτων

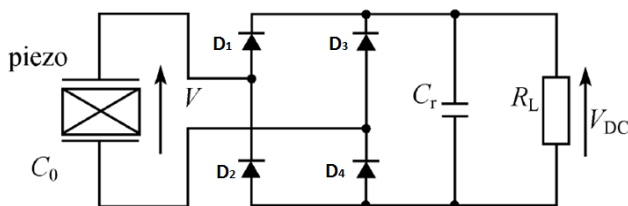
Η ενέργεια που παράγεται από ένα συλλέκτη μηχανικής ενέργειας, είτε πρόκειται για ένα πιεζοηλεκτρικό ή ένα τριβοηλεκτρικό στοιχείο, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν από τις άλλες ηλεκτρονικές συσκευές επειδή το ηλεκτρικό σήμα είναι χρονικά μεταβαλλόμενο, τόσο με θετική όσο και με αρνητική πολικότητα. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η χρήση κάποιου ηλεκτρικού κυκλώματος για την εξασφάλιση της συμβατότητας της τάσης ανάμεσα στον συλλέκτη και το ηλεκτρικό φορτίο ή το στοιχείο αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας⁴⁶. Επίσης το σήμα χρειάζεται να ανορθωθεί και να ρυθμιστεί η τάση του, για να ταιριάζει με την τάση του φορτίου πριν αποθηκευτεί σε κάποιον πυκνωτή ή σε κάποια μπαταρία. Επιπλέον, αν η εξωτερική μηχανική διέγερση είναι μικρής έντασης, τότε και η τάση εξόδου θα είναι μικρή και κρίνεται απαραίτητη η χρήση ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης για την αποθήκευση περισσότερης ενέργειας στον πυκνωτή. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν προτιμάται η χρήση ενεργών διακοπών (active switches) λόγω των απωλειών ενέργειας. Γι αυτό το λόγο οι περισσότερες ερευνητικές ομάδες χρησιμοποιούν κυκλώματα συλλογής ενέργειας που αποτελούνται από παθητικά στοιχεία και διόδους. Κάποια χαρακτηριστικά κυκλώματα είναι ο ανορθωτής γέφυρας ή ανορθωτής πλήρους κύματος (full wave rectifier), το κύκλωμα ημιανόρθωσης (half wave rectifier) και ο διπλασιαστής τάσης (voltage doubler circuit). Με αντίστοιχο τρόπο γίνεται και η συλλογή ενέργειας από ραδιοκύματα⁴⁵.

Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκαν για κατασκευή και χαρακτηρισμό τρία παθητικά κυκλώματα, δηλαδή κυκλώματα κατασκευασμένα αποκλειστικά με πυκνωτές και διόδους. Τα τρία αυτά κυκλώματα είναι: 1) ένας ανορθωτής πλήρους κύματος (Full Wave Rectifier), 2) ένας διπλασιαστής τάσης πλήρους κύματος (Full Wave Voltage Doubler) και 3) ένας τετραπλασιαστής τάσης (Quadripler). Η μελέτη του απλού ανορθωτή επιλέχθηκε λόγω της απλότητας του ενώ οι δύο πολλαπλασιαστές τάσης επιλέχθηκαν διότι το σήμα από τις μηχανικές διεγέρσεις ήταν αρκετά μικρό. Τα τρία αυτά κυκλώματα συγκρίνονται ως προς την τάση εξόδου τους και άρα την ενέργεια αποθήκευσης του πυκνωτή τους.

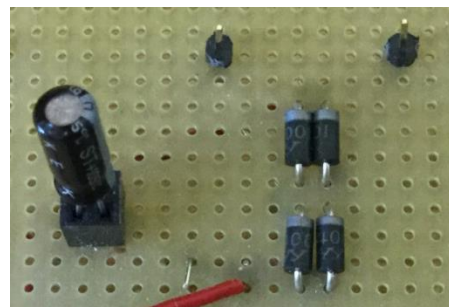
3.1. Ανορθωτής Πλήρους Κύματος (Full Wave Rectifier)

3.1.1. Τρόπος λειτουργίας

Η σχηματική διάταξη ενός ανορθωτή πλήρους κύματος φαίνεται στην Εικόνα 3.1α. Ένας ανορθωτής είναι μια ηλεκτρονική διάταξη η οποία μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σε συνεχές ρεύμα. Το κύκλωμα περιλαμβάνει διόδους και πυκνωτή για την αποθήκευση της ενέργειας και την εξομάλυνση της τάσης. Το ηλεκτρικό φορτίο αντικαθίσταται από μια ισοδύναμη αντίσταση R_L .



α)



β)

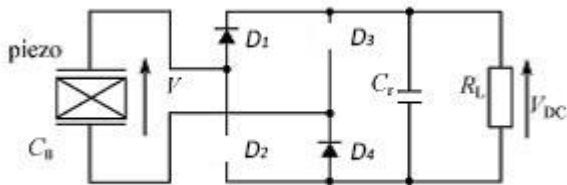
Εικόνα 3.1 Ανορθωτής Πλήρους Κύματος (Full Wave Rectifier) α) σχηματική απεικόνιση β) φωτογραφία κατασκευασμένου κυκλώματος

Για τη διεξαγωγή των θεωρητικών υπολογισμών και των προσομοιώσεων καθώς και για τον υπολογισμό της απόδοσης του κυκλώματος, είναι απαραίτητο να γίνουν κάποιες υποθέσεις και παραδοχές. Αρχικά, έγινε η παραδοχή ότι οι μηχανικές μετατοπίσεις είναι καθαρά ημιτονικές και η τάση ανοιχτού κυκλώματος και στα πιεζοηλεκτρικά αλλά και στα τριβοηλεκτρικά στοιχεία είναι καθαρά ημιτονική. Ωστόσο ο ανορθωτής είναι σε κατάσταση αποκοπής και το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είναι σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος όταν η απόλυτη τιμή της τάσης V είναι χαμηλότερη από την τάση V_{DC} δηλαδή την τάση που έχουν οι οπλισμοί του πυκνωτή. Όταν όμως η απόλυτη τιμή της τάσης V είναι μεγαλύτερη από την V_{DC} , τότε ένα ρεύμα I ρέει μέσα από τις διόδους. Το ρεύμα τότε χωρίζεται σε δύο μέρη, το ένα μέρος ρέει στον κλάδο του πυκνωτή και το άλλο μέρος στον κλάδο του φορτίου. Η ισχύς P του στοιχείου μπορεί να βρεθεί πειραματικά όταν το σύστημα δουλεύει μετρώντας απλά την τάση V_{DC} και την αντίσταση του φορτίου R_L και χρησιμοποιώντας τη σχέση

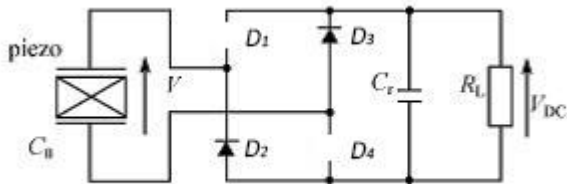
$$P = \frac{V_{DC}^2}{R_L}$$

Η ισχύς αλλάζει ανάλογα με την αντίσταση R_L και είναι μέγιστη μόνο για μία συγκεκριμένη τιμή της αντίστασης. Για όλες τις άλλες, η ισχύς αποκτά μικρότερες τιμές⁴⁶ (Ενότητα 4.4).

Σε ότι αφορά τη λειτουργία του κυκλώματος, οι δίοδοι D_1 και D_4 είναι θετικά πολωμένες κατά το διάστημα της πρώτης ημιπεριόδου της τάσης τροφοδοσίας, ενώ οι δίοδοι D_2 και D_3 είναι θετικά πολωμένες κατά το διάστημα της δεύτερης ημιπεριόδου της τάσης τροφοδοσίας. Στις εικόνες 3.2 και 3.3 παρουσιάζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα λειτουργίας της ανόρθωσης ενώ στην Εικόνα 3.4⁴⁷ παρουσιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων του ανορθωτή.



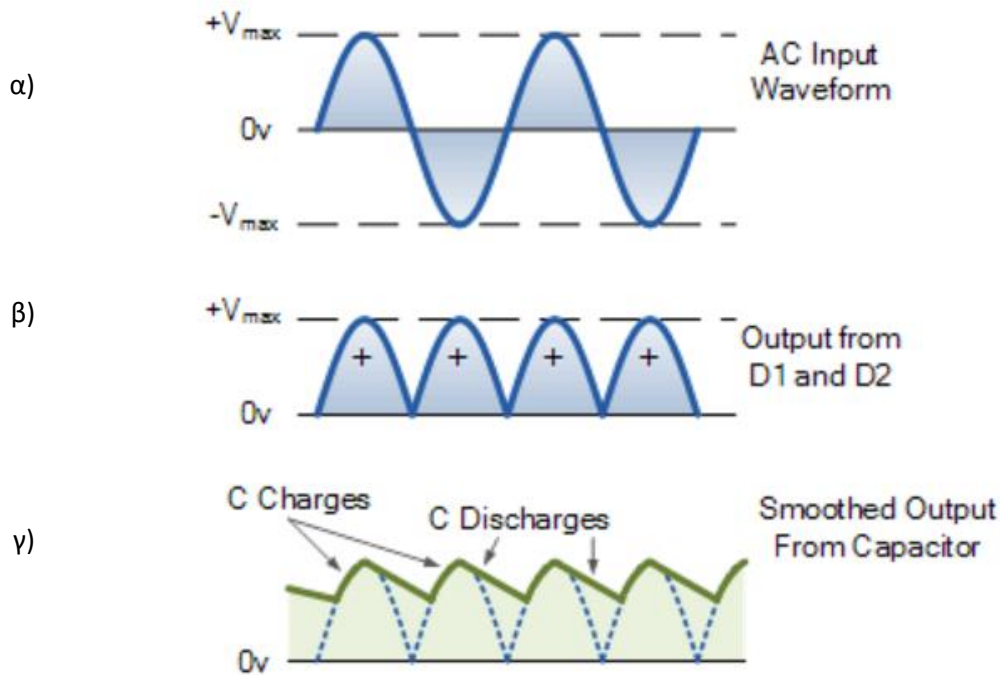
Εικόνα 3.2 Ισοδύναμο κύκλωμα της ανόρθωσης όταν άγουν οι δίοδοι D_1 και D_4



Εικόνα 3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα της ανόρθωσης όταν άγουν οι δίοδοι D_2 και D_3

3.1.2. Ανάλυση και προσομοίωση κυκλώματος

Το κύκλωμα της ανόρθωσης (Εικόνα 3.1β), είναι κατασκευασμένο πάνω σε μια διάτρητη πλακέτα με απλές διόδους 1N4001 και για την αποθήκευση της ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτρολυτικός πυκνωτής χωρητικότητας 0,47μF. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τους θεωρητικούς υπολογισμούς και τις προσομοιώσεις είναι το Multisim της εταιρίας National Instruments. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης και σχεδιασμού κυκλωμάτων για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και τη μείωση των σφαλμάτων σχεδιασμού.

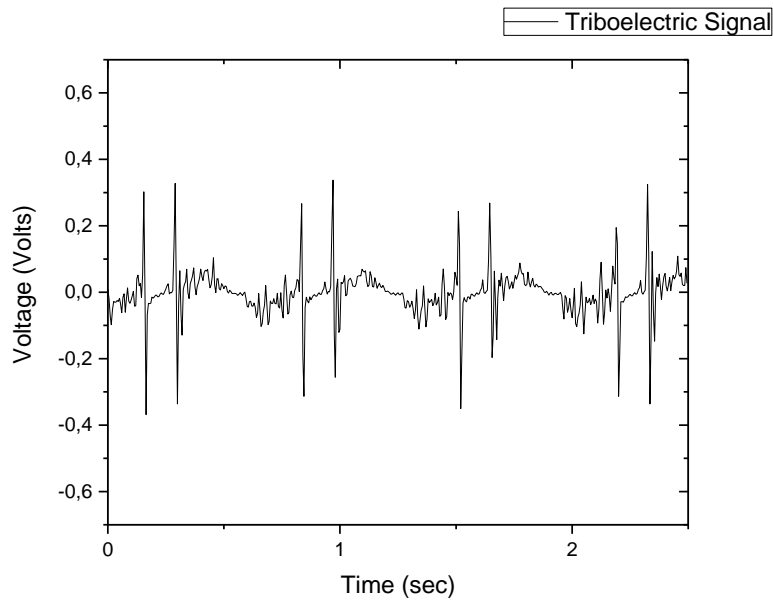


Εικόνα 3.4 Κυματομορφές τάσεων ανορθωτή α) τάση εισόδου, β) τάσεις των διόδων γ) κυματομορφή εξόδου

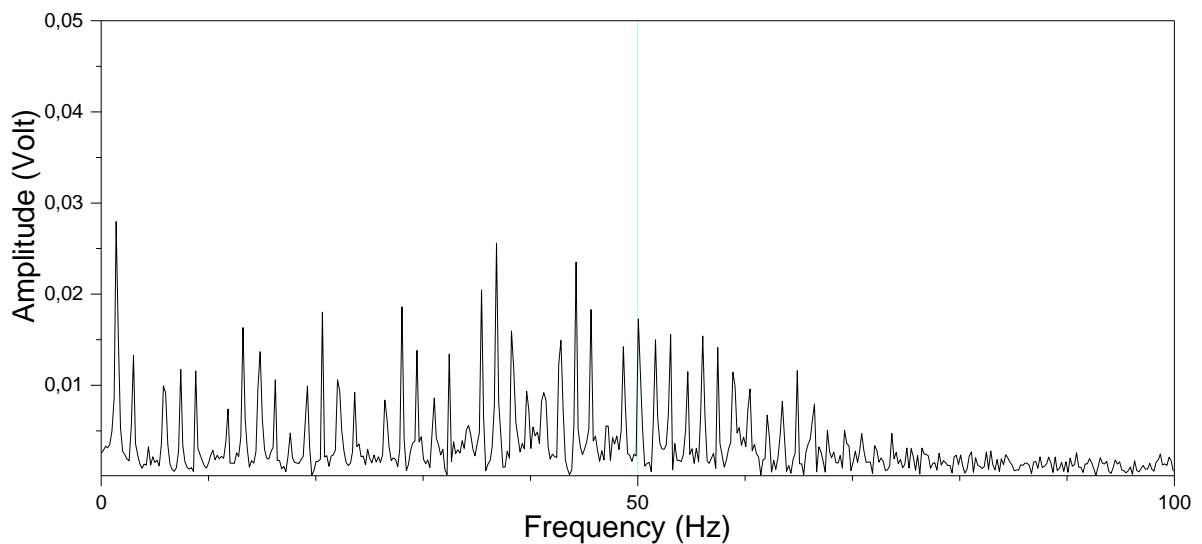
Πριν γίνει η επιλογή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τα κυκλώματα, έγινε ανάλυση Fourier στο σήμα μιας τριβογεννήτριας (Εικόνα 3.5). Η ανάλυση Fourier έγινε με το πρόγραμμα Origin της εταιρίας Originlab. Η ανάλυση Fourier ήταν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για αρκετούς λόγους. Με μια πρώτη ματιά, τα σήματα των τριβογεννητριών και των πιεζογεννητριών φαινόταν τυχαία. Με μια πιο προσεκτική παρατήρηση όμως, έγινε αντιληπτό ότι το σήμα επαναλαμβάνεται, δηλαδή έχει περίοδο και συχνότητα. Για να γίνει η κατασκευή των κυκλωμάτων έπρεπε να είναι γνωστό σε ποια συχνότητα θα λειτουργήσουν. Έπειτα, για την επιλογή των εξαρτημάτων που συνιστούν τα κυκλώματα, έπρεπε να επιλεγούν τα κατάλληλα εξαρτήματα τα οποία θα λειτουργούσαν ιδανικά σε αυτές τις συχνότητες. Αν επιλεγούν εξαρτήματα τα οποία δεν συμβαδίζουν με αυτές τις συχνότητες, το κύκλωμα θα δουλεύει και θα αποθηκεύεται ενέργεια αλλά θα υπάρχουν τεράστιες απώλειες ισχύος.

Η γνώση της συχνότητας λειτουργίας των πιεζογεννητριών και των τριβογεννητριών είναι απαραίτητη και για τον χαρακτηρισμό των κυκλωμάτων. Στον πειραματικό χαρακτηρισμό

στο εργαστήριο αλλά και στο πρόγραμμα προσομοίωσης, οι δοκιμές γινόντουσαν με τη γεννήτρια σήματος, άρα ήταν απαραίτητη η γνώση του εύρους των συχνοτήτων.



Εικόνα 3.5 Σήμα στο οποίο έγινε ανάλυση Fourier



Εικόνα 3.6 Ανάλυση Fourier σήματος

Όπως φαίνεται και από την ανάλυση (Εικόνα 3.6), η πλειοψηφία των συχνοτήτων του σήματος είναι μικρότερες των 60Hz. Γι αυτό το λόγο επιλέχθηκαν οι δίοδοι 1N4001 οι

οποίες λειτουργούν ιδανικά για συχνότητες μέχρι 60Hz. Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και οι δίοδοι Schottky, αλλά επειδή εκείνες έχουν μεγαλύτερη μέγιστη συχνότητα λειτουργίας, θα υπήρχαν και μεγαλύτερες απώλειες ισχύος. Επίσης, οι συχνότητες του σήματος της τριβογεννήτριας είναι κυρίως στα 2-3Hz και όλες οι υπόλοιπες φτάνουν περίπου τα 70Hz. Για το λόγο αυτό, η γεννήτρια συχνοτήτων του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε, ρυθμίστηκε να δίνει ημιτονικό σήμα συχνότητας 1Hz (κοντά στη συχνότητα που λειτουργεί η τριβογεννήτρια), 50Hz (κοντά στο όριο που λειτουργούν ιδανικά οι δίοδοι) και 10KHz (δυσμενής περίπτωση αφού η συχνότητα αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη από την ιδανική λειτουργία της διόδου). Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι το ίδιο κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου αποδοτικά και για τις πιεζογεννήτριες.

Όλες οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση ηλεκτρόμετρου το οποίο κατέγραφε την τάση του πυκνωτή αποθήκευσης (Εικόνα 3.7). Επιπλέον, ο παλμογράφος (Εικόνα 3.8) κατέγραφε το σήμα των γεννητριών (δίνει δεδομένα τάσης και χρόνου). Αυτά τα δεδομένα δόθηκαν σαν είσοδος στο κύκλωμα του προγράμματος προσομοίωσης (Ενότητα 4.1). Σε αυτό το κεφάλαιο όμως όπου ο χαρακτηρισμός των κυκλωμάτων γίνεται με τη γεννήτρια σήματος, το σήμα εισόδου στο πρόγραμμα προσομοίωσης είναι ημιτονικής μορφής. Ως έξοδος από το Multisim λήφθηκε η τάση του πυκνωτή σε συνάρτηση με το χρόνο. Με αυτό τον τρόπο ήταν εύκολη η σύγκριση των θεωρητικών αποτελεσμάτων με τα πειραματικά.



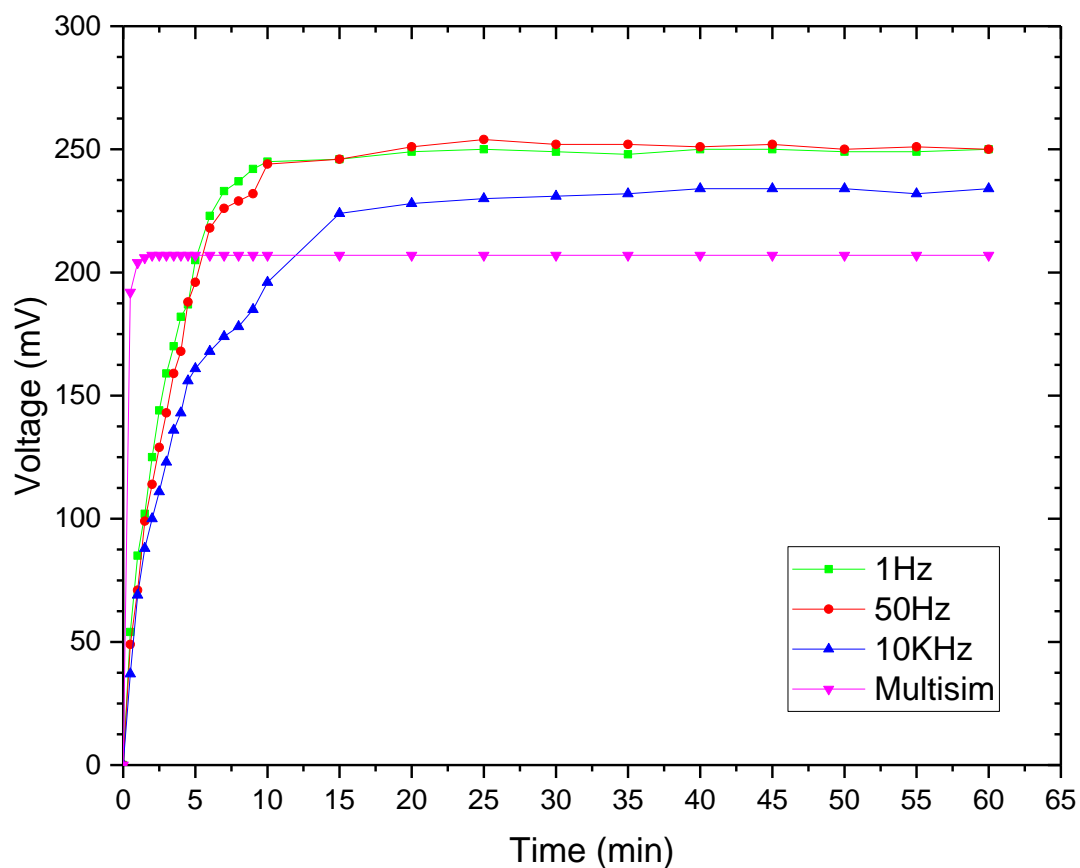
Εικόνα 3.7 Παλμογράφος εργαστηρίου



Εικόνα 3.8 Ηλεκτρόμετρο εργαστηρίου

Στην Εικόνα 3.9, φαίνεται η φόρτιση του πυκνωτή για διαφορετικές συχνότητες, καθώς και η θεωρητική καμπύλη από το πρόγραμμα προσομοίωσης. Η έξοδος της γεννήτριας σήματος

και άρα η είσοδος του κυκλώματος, είναι ημιτονικής μορφής με τάση 500mVpp. Κάθε κύκλωμα φορτίστηκε για 60 λεπτά με τη συχνότητα της μέτρησης της φόρτισης να είναι μεταβλητή, δηλαδή τα πρώτα πέντε λεπτά η μέτρηση γινόταν κάθε 30 δευτερόλεπτα, στο διάστημα 5-10 λεπτά κάθε ένα λεπτό και στο διάστημα 10-60 λεπτά κάθε πέντε λεπτά. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι το όργανο της μέτρησης δεν έμεινε μόνιμα συνδεδεμένο πάνω στο κύκλωμα αλλά συνδεόταν μόνο κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Η συχνότητα λήψης των δεδομένων επιλέχθηκε λόγω των απωλειών που είχαμε κάθε φορά που συνδέαμε πάνω τα καλώδια του ηλεκτρομέτρου (παράγραφος 3.3, κύκλωμα Quadrupler).



Εικόνα 3.9 Καμπύλες φόρτισης Full Wave Rectifier για διαφορετικές συχνότητες πλάτους 500mVpp και θεωρητική καμπύλη από πρόγραμμα προσομοίωσης

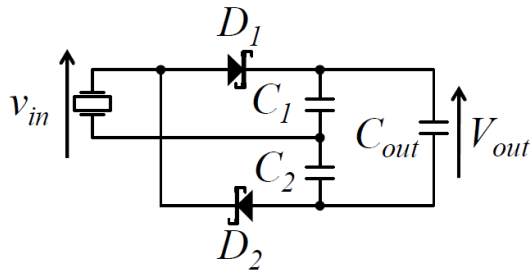
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.9, στα 1 και στα 50Hz (δηλαδή ημιτονικό σήμα συχνότητας 1 και 50Hz) οι γραφικές παραστάσεις σχεδόν ταυτίζονται και φαίνεται ότι η τάση πλησιάζει τα 250mV διότι οι δίοδοι λειτουργούν στο ιδανικό εύρος συχνοτήτων τους. Αντιθέτως, για

τα 10KHz η τάση του πυκνωτή βρίσκεται σε χαμηλότερο επίπεδο, επειδή οι δίοδοι βρίσκονται εκτός του εύρους συχνοτήτων στο οποίο λειτουργούν ιδανικά. Από το πρόγραμμα προσομοίωσης προκύπτει μια τάση κοντά τα 207mV η οποία είναι και η χαμηλότερη. Σε αντίθεση με τις πειραματικές μετρήσεις όπου η αλλαγή της συχνότητας επηρεάζει την τάση του πυκνωτή, η αλλαγή της συχνότητας της γεννήτριας στο κύκλωμα του Multisim δεν επηρέαζε το αποτέλεσμα και γι αυτό δε δόθηκε περισσότερη βαρύτητα (χρησιμοποιήθηκε μόνο μία συχνότητα στο Multisim σε αυτές τις προσομοιώσεις). Επίσης, η γραφική της προσομοίωσης, έχει μεγαλύτερη κλίση από τις πειραματικές (παράγραφος 3.3) διότι τα όργανα μέτρησης καθώς και τα στοιχεία των κυκλωμάτων δεν είναι ιδανικά. Απώλειες υπάρχουν επίσης και λόγω των κολλήσεων των εξαρτημάτων.

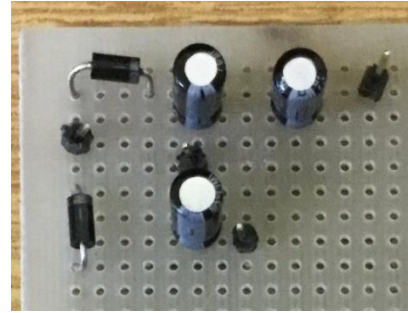
3.2. Διπλασιαστής τάσης (Voltage Doubler)

3.2.1. Τρόπος λειτουργίας

Η σχηματική αναπαράσταση του διπλασιαστή τάσης φαίνεται στην Εικόνα 3.10. Το κύκλωμα του διπλασιαστή τάσης Cockcroft-Walton μπορεί να δημιουργήσει υψηλότερη τάση από μία χαμηλή τάση εναλλασσομένου ρεύματος. Το κύκλωμα είναι αρκετά πρακτικό για ορισμένες εφαρμογές, δηλαδή όταν το ηλεκτρικό φορτίο με υψηλή αντίσταση χρειάζεται μεγαλύτερη ισχύ. Η χρήση τέτοιων κυκλωμάτων μπορεί να βελτιστοποιήσει την ισχύ για διαφορετικά ηλεκτρικά φορτία. Για παράδειγμα, αν το βέλτιστο φορτίο για το κύκλωμα του ανορθωτή είναι R και η βέλτιστη ισχύς του είναι P , τότε στην περίπτωση που το φορτίο γίνει $4R$, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας διπλασιαστής για να βελτιστοποιηθεί εκ νέου η ισχύς. Εάν το φορτίο-αντίσταση αλλάξει σε $9R$, τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας τριπλασιαστής τάσης⁴⁵.



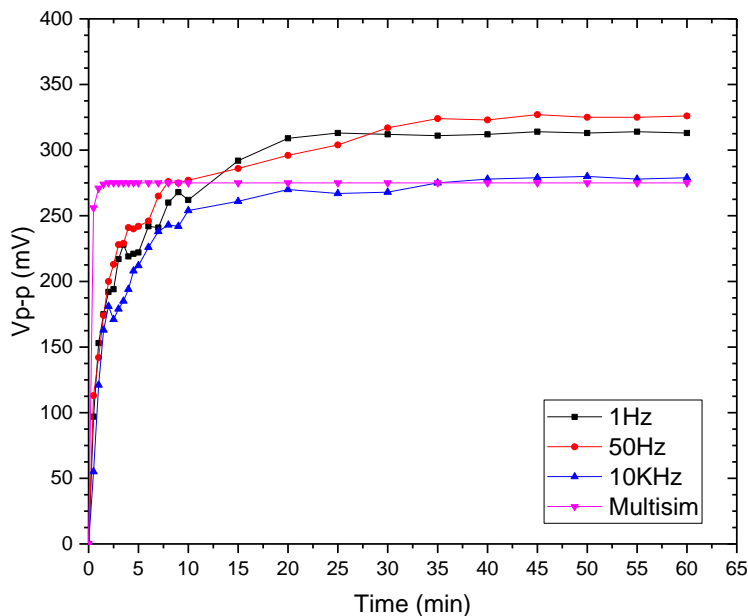
Εικόνα 3.10 Κύκλωμα διπλασιαστή τάσης



Εικόνα 3.11 Φωτογραφία κυκλώματος Voltage Doubler κατασκευασμένο πάνω σε διάτρητη πλακέτα

3.2.2. Ανάλυση και προσομοίωση κυκλώματος

Η φωτογραφία του κυκλώματος κατασκευασμένο στην πλακέτα φαίνεται στην Εικόνα 3.11. Στην παρακάτω γραφική παράσταση (Εικόνα 3.12), φαίνονται οι φορτίσεις του πυκνωτή χωρητικότητας $0.47\mu\text{F}$ για διαφορετικές συχνότητες, με τάση εισόδου ημιτονικής μορφής και πλάτους 500mV_{pp} από τη γεννήτρια σήματος του εργαστηρίου. Στη γραφική παράσταση, περιλαμβάνεται επίσης και η γραφική από το πρόγραμμα προσομοίωσης Multisim.



Εικόνα 3.12 Καμπύλες φόρτισης Voltage Doubler για διαφορετικές συχνότητες πλάτους 500mV_{pp} και θεωρητική καμπύλη από πρόγραμμα προσομοίωσης

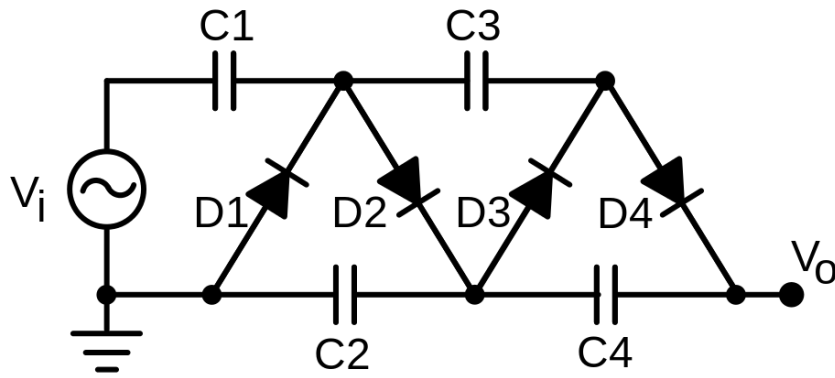
Όπως φαίνεται και από το γράφημα (Εικόνα 3.12), οι καμπύλες για συχνότητες 1 και 50Hz σχεδόν ταυτίζονται, με εκείνη των 50Hz να έχει ελαφρώς μεγαλύτερη τάση (313mV). Για συχνότητα 10KHz και σε αυτό το γράφημα, η καμπύλη φόρτισης έχει μικρότερη τάση από τις άλλες δύο (279mV). Η θεωρητική καμπύλη φόρτισης λόγω των απωλειών που αναφέρθηκαν παραπάνω, έχει μέγιστη τάση 275mV, δηλαδή είναι πιο κοντά σε εκείνη των 10KHz.

3.3. Τετραπλασιαστής τάσης (Quadrupler)

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές του πολλαπλασιαστή τάσης 4 σταδίων. Κάποιες από αυτές είναι : α) το Cockcroft-Walton κύκλωμα 4 σταδίων, β) η Villard charge pump 4 σταδίων και γ) η Dickson charge pump 4 σταδίων. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των χαρακτηριστικών των κυκλωμάτων. Μια τροποποίηση του τελευταίου κυκλώματος κατασκευάστηκε και μελετήθηκε μέσω πειραμάτων και στο εργαστήριο. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο κύκλωμα, διότι, ενώ το κύκλωμα Cockcroft-Walton χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο σε εφαρμογές υψηλής τάσης, το κύκλωμα Dickson charge pump χρησιμοποιείται σε εφαρμογές χαμηλής τάσης.

3.3.1. Κύκλωμα Cockcroft-Walton

Το κύκλωμα Cockcroft-Walton (CW) είναι μία συνδεσμολογία πολλαπλασιαστή τάσης η οποία μετατρέπει την εναλλασσόμενη χαμηλή τάση ή την σταθερή τάση DC σε μία υψηλότερη στάθμη DC. Αποτελείται από έναν πολλαπλασιαστή τάσης με μορφή δικτυώματος (ladder network) και είναι κατασκευασμένος από πυκνωτές και διόδους για τη δημιουργία υψηλότερης τάσης. Σε αντίθεση με τους μετασχηματιστές, αυτή η μέθοδος εξαλείφει την απαίτηση για μετασχηματιστή με βαρύ πυρήνα καθώς και την ανάγκη για πολλούς μονωτήρες. Χρησιμοποιώντας μόνο πυκνωτές και διόδους, οι πολλαπλασιαστές τάσης μπορούν να ανυψώσουν τις χαμηλές τάσεις σε εξαιρετικά υψηλές τιμές, ενώ την ίδια στιγμή είναι με μεγάλη διαφορά ελαφρύτεροι και πολύ πιο φθηνοί από τους μετασχηματιστές. Η έξοδος κάθε σταδίου μπορεί να αξιοποιηθεί όπως αξιοποιείται και σε έναν μετασχηματιστή πολλών σταδίων. Ένας πολλαπλασιαστής CW 2 σταδίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.13.



Εικόνα 3.13 Πολλαπλασιαστής τάσης δύο σταδίων Cockcroft-Walton

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία του κυκλώματος γίνεται περιγραφή των διαφόρων σταδίων του. Υποθέτουμε ότι το κύκλωμα τροφοδοτείται από μία εναλλασσόμενη τάση V_i με μια μέγιστη τιμή V_p . Από τη στιγμή που η τάση εισόδου είναι ενεργοποιημένη:

- Όταν η τάση εισόδου V_i φτάσει την αρνητική κορυφή της $-V_p$, ρεύμα ρέει μέσω της διόδου D_1 για να φορτίσει τον πυκνωτή C_1 σε μία τάση V_p .
- Όταν η τάση εισόδου αντιστρέψει την πολικότητα της και φτάσει τη μέγιστη κορυφή της $+V_p$, προστίθεται στην ήδη υπάρχουσα τάση του πυκνωτή μία τάση για να φτάσει στο επίπεδο $2V_p$. Από τη στιγμή που η D_1 είναι αντίστροφα πολωμένη, ρεύμα ρέει από τον πυκνωτή C_1 μέσω της D_2 για να φορτιστεί ο πυκνωτής C_2 με τάση $2V_p$.
- Όταν η V_i αντιστρέψει πάλι την πολικότητα της, ρεύμα από τον C_2 ρέει μέσω της διόδου D_3 φορτίζοντας τον πυκνωτή C_3 επίσης με τάση $2V_p$.
- Όταν η V_i αντιστρέψει πάλι την πολικότητα της, ρεύμα από τον πυκνωτή C_3 ρέει μέσω της διόδου D_4 φορτίζοντας τον πυκνωτή C_4 επίσης με μία τάση $2V_p$.

Συμπερασματικά, με κάθε αλλαγή πολικότητας της τάσης εισόδου, ρεύμα ρέει από το «σωρό» των πυκνωτών μέσω των διόδων μέχρι να φορτιστούν όλοι. Όλοι οι πυκνωτές φορτίζονται με μία τάση $2V_p$, εκτός από τον πυκνωτή C_1 ο οποίος είναι φορτισμένος με τάση V_p . Το κλειδί για τον πολλαπλασιασμό της τάσης είναι ότι ενώ οι πυκνωτές φορτίζονται εν παραλλήλω, συνδέονται με το φορτίο σε σειρά. Από τη στιγμή που οι πυκνωτές C_2 και C_4 είναι συνδεδεμένοι σε σειρά μεταξύ της εξόδου και τη γείωσης, η συνολική τάση εξόδου (υπό συνθήκες χωρίς φορτίο) ισούται με $4V_p$.

Αυτό το κύκλωμα μπορεί να επεκταθεί σε οποιονδήποτε αριθμό σταδίων. Η τάση εξόδου είναι το διπλάσιο της τάσης εισόδου (τάση κορυφής) πολλαπλασιασμένο με τον αριθμό των σταδίων N :

$$V_o = 2NV_p = NV_{pp}$$

ή ισοδύναμα η τάση εισόδου από κορυφή σε κορυφή, (V_{pp}) πολλαπλασιασμένη επί των αριθμών των σταδίων N . Ο αριθμός των σταδίων είναι ίσος με τον αριθμό των πυκνωτών σε σειρά μεταξύ της εξόδου και της γείωσης.

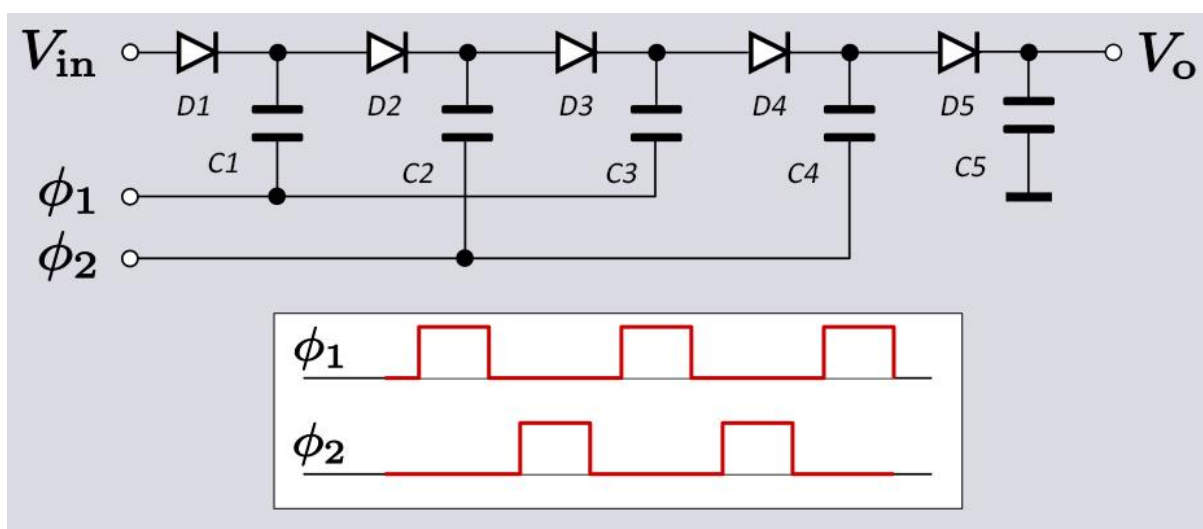
Ένας άλλος τρόπος για να εξετάσουμε το κύκλωμα είναι να υποθέσουμε ότι λειτουργεί ως μία αντλία φορτίου (charge pump), αντλώντας ηλεκτρικό φορτίο σε μία κατεύθυνση μέχρι τη στοίβα των πυκνωτών. Το κύκλωμα Cockcroft-Walton μαζί με άλλα παρόμοια κυκλώματα καλούνται συνήθως Charge Pumps. Όσον αφορά τα σημαντικά φορτία, το φορτίο των πυκνωτών εξαντλείται μερικώς και η τάση εξόδου μειώνεται σύμφωνα με το ρεύμα της εξόδου διαιρούμενο με τη χωρητικότητα.

Στην πραγματικότητα, το κύκλωμα CW έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Καθώς ο αριθμός των σταδίων αυξάνεται, οι τάσεις των ανώτερων σταδίων αρχίζουν και μειώνονται, κυρίως λόγω της ηλεκτρικής σύνθετης αντίστασης των πυκνωτών στα κατώτερα στάδια. Όταν το κύκλωμα τροφοδοτεί ένα φορτίο (άρα ρέει ρεύμα στην έξοδο του), η κυμάτωση της τάσης εξόδου αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των σταδίων του πολλαπλασιαστή. Για αυτό το λόγο, τα κυκλώματα CW με μεγάλο αριθμό σταδίων χρησιμοποιούνται μόνο όπου απαιτείται σχετικά χαμηλό ρεύμα εξόδου. Οι επιπτώσεις αυτές μπορούν εν μέρει να μετριαστούν από την αύξηση της χωρητικότητας στα χαμηλότερα στάδια, αυξάνοντας τη συχνότητα της ισχύος στην είσοδο και χρησιμοποιώντας μία πηγή εναλλασσομένου ρεύματος με τετραγωνική ή τριγωνική κυματομορφή.

3.3.2. Dickson Charge Pump

Το κύκλωμα Dickson charge pump ή αλλιώς πολλαπλασιαστής τάσης Dickson είναι μία παραλλαγή του κυκλώματος Cockcroft-Walton. Σε αντίθεση με αυτό το κύκλωμα, ο πολλαπλασιαστής τάσης Dickson δέχεται DC τάση σαν είσοδο και γι αυτό θεωρείται ως ένας μετατροπέας DC-DC. Όπως αναλύεται και στις επόμενες σελίδες, μια άλλη παραλλαγή του

Dickson χρησιμοποιείται για RF Harvesting ενώ στο εργαστήριο, στηριζόμενοι σε αυτά τα κυκλώματα, κατασκευάστηκε ο τετραπλασιαστής τάσης που αποτελείται μόνο από διόδους και πυκνωτές και μπορεί να κάνει συλλογή ενέργειας από το σήμα των πιεζογεννητριών και των τριβογεννητριών. Σε αντίθεση με το CW το οποίο προορίζεται κυρίως για εφαρμογές υψηλών τάσεων, ο πολλαπλασιαστής Dickson χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές χαμηλής τάσης. Στην περίπτωση που ένα κύκλωμα Dickson δεχθεί DC τάση εισόδου, απαιτείται επιπλέον τροφοδοσία από δύο ρολόγια παλμών με πλάτος ανάλογο της DC τάσης. Αυτοί οι παλμοί πρέπει να βρίσκονται σε αντίθεση φάσης⁴⁸⁴⁹. Ένα κύκλωμα Dickson παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.14.



Εικόνα 3.14 Απλή διάταξη Dickson Charge Pump 4 σταδίων

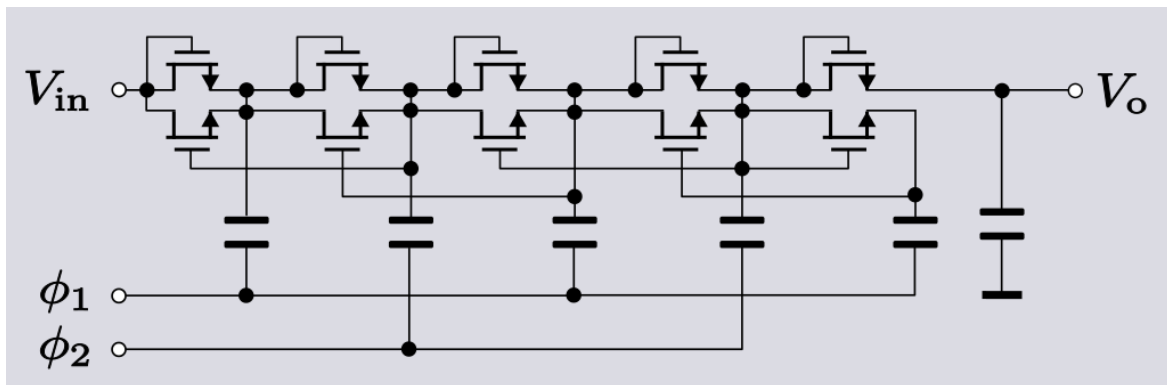
Όταν το ρολόι ϕ_1 είναι στο χαμηλό επίπεδο, η διόδος D_1 θα φορτίσει τον πυκνωτή C_1 μέχρι την τάση V_{in} . Όταν το ϕ_1 βρεθεί στο υψηλό επίπεδο, τότε η «πάνω» πλάκα του πυκνωτή C_1 θα φτάσει την τάση $2V_{in}$. Η διόδος D_1 τότε βρίσκεται σε αποκοπή, η διόδος D_2 ξεκινάει να άγει και ο πυκνωτής C_2 ξεκινάει να φορτίζεται με τάση $2V_{in}$. Στον επόμενο κύκλο ρολογιού, το ϕ_1 πηγαίνει στο χαμηλό επίπεδο και φορτίζει την «πάνω» πλάκα του πυκνωτή C_2 σε τάση $3V_{in}$. Η διόδος D_2 βρίσκεται σε αποκοπή και η D_3 ξεκινάει να άγει, φορτίζοντας τον πυκνωτή C_3 σε τάση $3V_{in}$ και ούτω καθεξής (λειτουργία αντλίας φορτίου-charge pump). Το τελευταίο στάδιο διόδου και πυκνωτή όπως φαίνεται και στο σχήμα, είναι συνδεδεμένα στη γείωση και όχι στους παλμούς του ρολογιού. Αυτό συμβαίνει επειδή λειτουργεί σαν ανιχνευτής κορυφής (peak detector) και παρέχει μόνο εξομάλυνση τάσης⁴⁸.

Υπάρχουν πάρα πολλοί παράγοντες που μειώνουν την τάση εξόδου από την ιδανική θεωρητική τιμή nV_{in} . Ένας από αυτούς είναι η τάση κατωφλίου V_T των διακοπών της συσκευής που παράγει τον τετραγωνικό παλμό. Η έξοδος μειώνεται τουλάχιστον κατά nV_T εξαιτίας της πτώσης τάσης κατά μήκος των διακοπών. Οι δίοδοι Schottky χρησιμοποιούνται συνήθως σε πολλαπλασιαστές Dickson επειδή έχουν πολύ μικρή πτώση τάσης. Ένα άλλο μειονέκτημα του κυκλώματος είναι ότι υπάρχουν παρασιτικές χωρητικότητες με τη γείωση σε κάθε κόμβο. Αυτές οι παρασιτικές χωρητικότητες λειτουργούν ως διαιρέτες τάσης μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την τάση εξόδου ακόμα περισσότερο⁴⁹. Μέχρι ενός σημείου, η υψηλότερη συχνότητα του ρολογιού είναι ευεργετική για το κύκλωμα. Η κυμάτωση είναι μειωμένη και η υψηλή συχνότητα κάνει τις υπόλοιπες κυματώσεις εύκολες στο φιλτράρισμα. Επίσης το μέγεθος των απαιτούμενων πυκνωτών μειώνεται επειδή λιγότερο φορτίο χρειάζεται να αποθηκευτεί σε κάθε κύκλο. Ωστόσο, οι απώλειες που υπάρχουν λόγω κάποιων μη υπολογίσιμων χωρητικοτήτων αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας του ρολογιού. Γι αυτό, ένα πρακτικό όριο είναι περίπου μερικές εκατοντάδες kilohertz⁵⁰.

Οι πολλαπλασιαστές Dickson βρίσκονται πολύ συχνά σε ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs) όπου χρησιμοποιούνται για την αύξηση της χαμηλής τάσης της μπαταρίας στην απαραίτητη τάση που απαιτείται από το ολοκληρωμένο κύκλωμα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι ο σχεδιαστής του ολοκληρωμένου καθώς και ο κατασκευαστής είναι σε θέση να χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία και την ίδια βασική συσκευή σε όλο το IC. Γι αυτό το λόγο, τα τρανζίστορ που αποτελούν το ολοκληρωμένο, είναι τεχνολογίας MOSFET. Κατά συνέπεια, οι δίοδοι στον πολλαπλασιαστή Dickson αντικαθίστανται συχνά με MOSFETS τα οποία είναι συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπεριφέρονται ως δίοδοι.

Το MOSFET που συμπεριφέρεται ως δίοδος, δε λειτουργεί ικανοποιητικά στις χαμηλές τάσεις, εξαιτίας της μεγάλης πτώσης τάσης ανάμεσα στην υποδοχή και την πηγή του MOSFET. Συχνά, ένα πιο πολύπλοκο κύκλωμα χρησιμοποιείται για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα. Μία λύση είναι να συνδεθεί παράλληλα με το MOSFET-δίοδος ένα άλλο MOSFET που βρίσκεται στη γραμμική περιοχή λειτουργίας του (Εικόνα 3.15). Αυτό το δεύτερο MOSFET έχει χαμηλότερη πτώση τάσης ανάμεσα στην υποδοχή και την πηγή σε σχέση με το άλλο όταν βρισκόταν μόνο του. Η πύλη του MOSFET που βρίσκεται στη γραμμική περιοχή

λειτουργίας, συνδέεται με την έξοδο του επόμενου σταδίου, έτσι ώστε να είναι απενεργοποιημένο, ενώ το επόμενο στάδιο φορτίζεται από τον πυκνωτή του προηγούμενου σταδίου του. Δηλαδή το δεύτερο τρανζίστορ είναι απενεργοποιημένο ακριβώς την ίδια χρονική στιγμή που είναι και το τρανζίστορ-δίοδος⁴⁸.



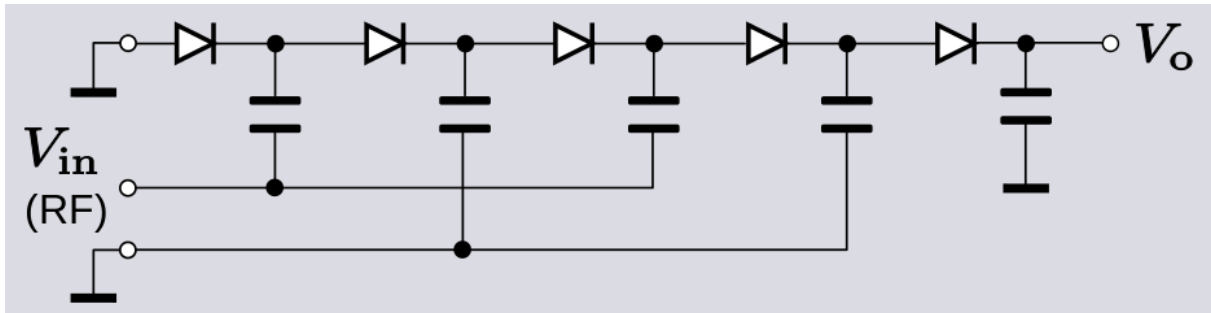
Εικόνα 3.15 Dickson Charge Pump με MOSFET στη γραμμική λειτουργία σε παράλληλη σύνδεση με το MOSFET-DIODE

Ένας ιδανικός πολλαπλασιαστής τάσης Dickson 4 σταδίων (άρα $5V_{in}$) με υλοποίηση MOSFET και είσοδο 1,5V, κανονικά θα έπρεπε να έχει έξοδο 7,5V. Ωστόσο ένα απλό κύκλωμα Dickson μπορεί να έχει έξοδο μόνο 2V. Προσθέτοντας παράλληλα MOSFET που βρίσκονται στη γραμμική περιοχή, η τάση εξόδου βελτιώνεται στα 4V. Πιο πολύπλοκα κυκλώματα μπορούν να πετύχουν μία έξοδο η οποία θα είναι πιο κοντά στην ιδανική περίπτωση⁴⁹.

3.3.3. Τροποποίηση για RF Harvesting

Στα ολοκληρωμένα κυκλώματα CMOS, οι παλμοί χρονισμού είναι εύκολα διαθέσιμοι ή δημιουργούνται εύκολα. Αυτό όμως δεν είναι εφικτό στα σήματα RF. Το πρωτότυπο κύκλωμα του πολλαπλασιαστή Dickson μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να πληρεί τις προϋποθέσεις για RF Harvesting (Εικόνα 3.16). Αυτό γίνεται γειώνοντας μία από τις δύο εισόδους και ενός από τα δύο ρολόγια. Το RF σήμα μπαίνει σαν είσοδος στο ρολόι, το οποίο στη συνέχεια γίνεται είσοδος του κυκλώματος. Το RF σήμα είναι ταυτόχρονα και ρολόι αλλά και πηγή σήματος. Ωστόσο, δεδομένου ότι το ρολόι περνάει μόνο μέσα από κάθε κόμβο του κυκλώματος, το κύκλωμα επιτυγχάνει πολλαπλασιασμό σε κάθε δεύτερο συνδυασμό

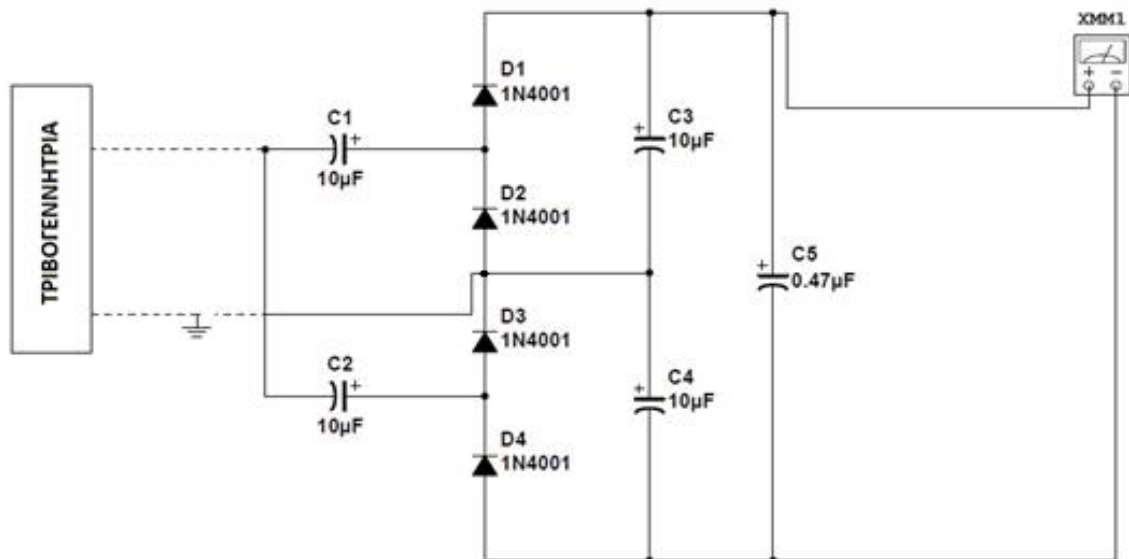
διόδου-πυκνωτή. Οι άλλοι συνδυασμοί διόδου-πυκνωτή, λειτουργούν απλά ως peak detectors και βοηθούν στην εξομάλυνση της κυμάτωσης.



Εικόνα 3.16: Τροποποιημένο κύκλωμα Dickson charge pump

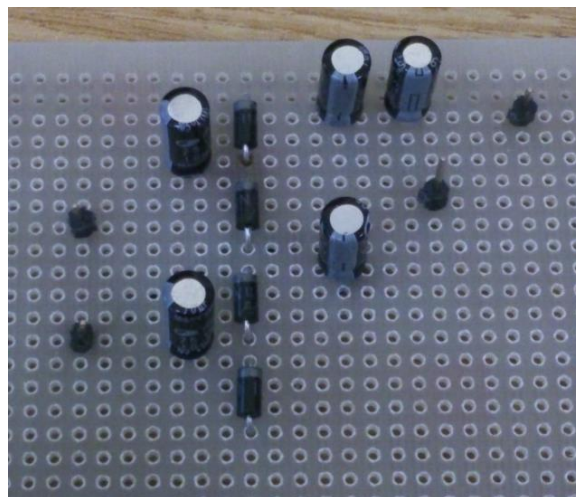
3.3.4. Κατασκευή κυκλώματος στο εργαστήριο

Λόγω του ότι τα σήματα που λαμβάνονται από τις γεννήτριες είναι σχετικά μικρά, αποφασίστηκε να κατασκευαστεί ένας τετραπλασιαστής τάσης (Quadrupler) λόγω των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Έτσι κατασκευάστηκε μια τροποποιημένη εκδοχή του κυκλώματος Dickson ώστε να μπορεί να λαμβάνει τα εναλλασσόμενα σήματα που δίνουν οι γεννήτριες, να τα ανορθώνει και να τα αποθηκεύει σε πυκνωτή. Το συγκεκριμένο κύκλωμα επιλέχθηκε για τρεις λόγους. Πρώτον, ενώ το κύκλωμα Cockroft-Walton χρησιμοποιείται σε εφαρμογές υψηλής τάσης, το κύκλωμα Dickson χρησιμοποιείται εφαρμογές χαμηλής τάσης όπως είναι τα πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο. Δεύτερον, τροποποιήθηκε το κύκλωμα ώστε να μην χρειάζεται ρολόι για τη λειτουργία του. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται σημαντικά η πολυπλοκότητα του κυκλώματος. Τέλος, δημιουργήθηκε ο τετραπλασιαστής τάσης διότι η τάση των τριβογεννητριών ήταν πολύ χαμηλή (300-400mV). Για να μπορέσει να αξιοποιηθεί, έπρεπε η τάση να πολλαπλασιαστεί και να φτάσει σε επίπεδο λειτουργίας ενός LED. Μια εναλλακτική υλοποίηση είναι η εξής: Χρήση του κυκλώματος ανόρθωσης πλήρους κύματος για την αποθήκευση της ενέργειας στον πυκνωτή και μετά χρήση ενός DC-DC μετατροπέα για την ανύψωση της τάσης. Ωστόσο επιλέχθηκε η κατασκευή του τετραπλασιαστή για τη δοκιμή μιας εναλλακτικής υλοποίησης. Στην εικόνα 3.17 φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο και στην Εικόνα 3.18, το κύκλωμα πάνω στην πλακέτα.



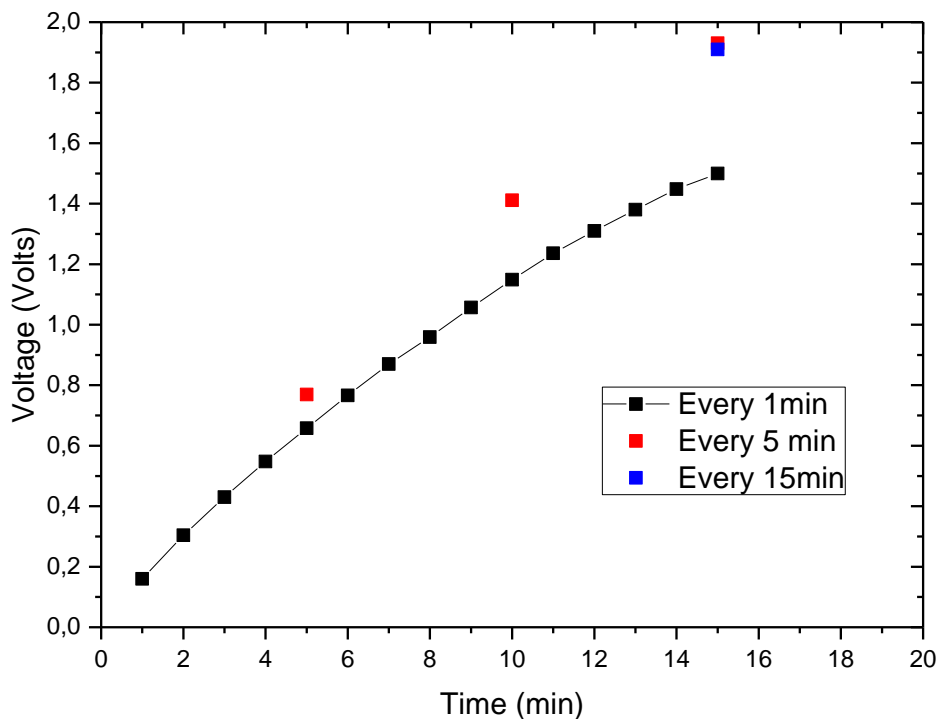
Εικόνα 3.17 Σχηματική αναπαράσταση Quadripler που κατασκευάστηκε για τα πειράματα

Οι δίοδοι που επιλέχθηκαν είναι οι 1N4001, οι πυκνωτές C1-C4 είναι ηλεκτρολυτικοί με χωρητικότητα 10µF ενώ ο πυκνωτής εξόδου είναι και αυτός ηλεκτρολυτικός και έχει χωρητικότητα 0,47µF. Οι συνθήκες του πειράματος είναι ακριβώς οι ίδιες με τις συνθήκες και των άλλων δύο πειραμάτων των κυκλωμάτων.



Εικόνα 3.18 Φωτογραφία κυκλώματος Quadripler κατασκευασμένο πάνω σε διάτρητη πλακέτα

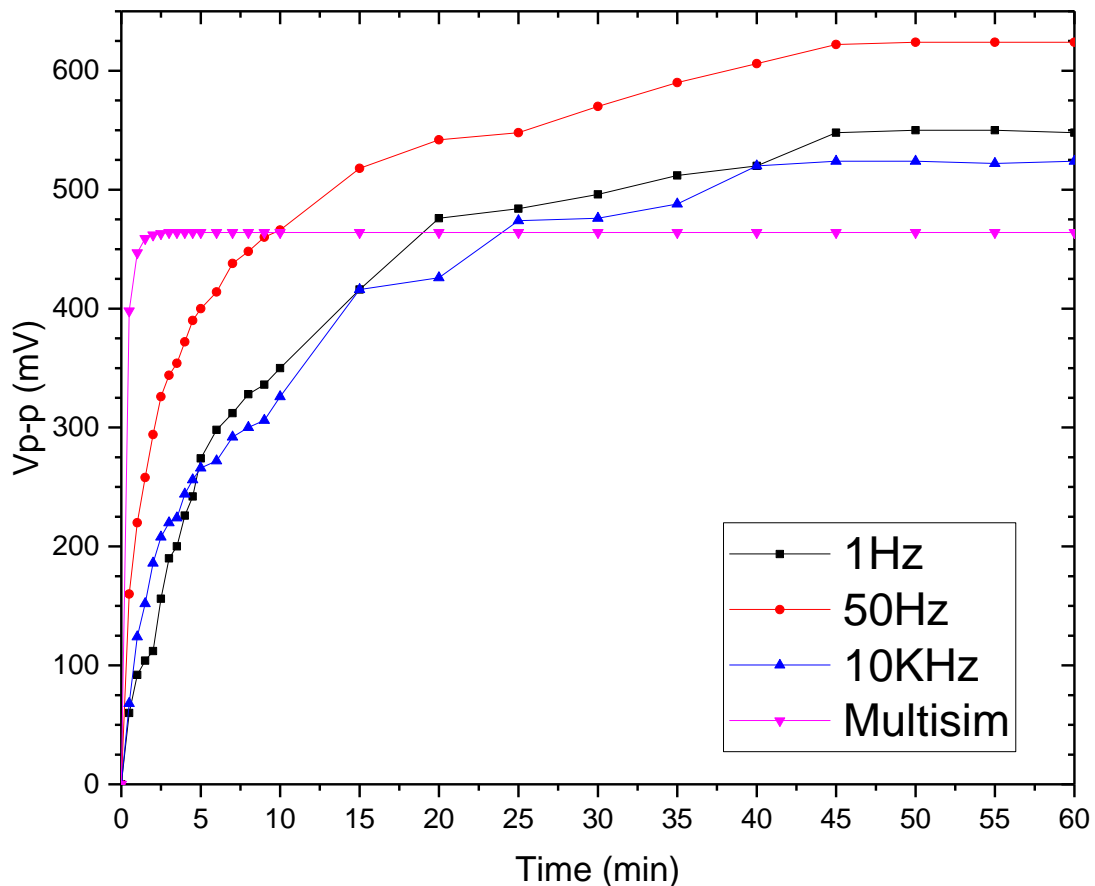
Πριν ξεκινήσουν οι συστηματικές μετρήσεις του κυκλώματος, κρίθηκε αναγκαίο να υπολογιστεί η χρονική διάρκεια λήψης των μετρήσεων, καθώς κάθε φορά που συνδέονται οι ακροδέκτες του ηλεκτρόμετρου στα άκρα του πυκνωτή, αυτός χάνει μέρος του φορτίου του. Στην Εικόνα 3.19 παρατηρείται ότι όταν οι μετρήσεις λαμβάνονταν ανά ένα λεπτό είχαμε σημαντική αποφόρτιση ενώ όταν οι μετρήσεις λαμβάνονταν ανά 5 ή ανά 15 λεπτά, χανόταν λιγότερη ενέργεια.



Εικόνα 3.19 Σύγκριση μέτρησης φόρτισης ανά διαφορετικά διαστήματα χρόνου

Σε αυτό το κύκλωμα, εκτός από τις μετρήσεις σε διάφορες συχνότητες (από 1Hz έως 10KHz) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε μία σταθερή συχνότητα (50Hz) και διάφορα πλάτη τάσης. Οι τάσεις που επιλέχθηκαν ήταν 500mVp-p, 1Vp-p και 2Vp-p ημιτονικής μορφής από τη γεννήτρια σήματος.

Η γραφική παράσταση με τις αλλαγές της συχνότητας φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 3.20):

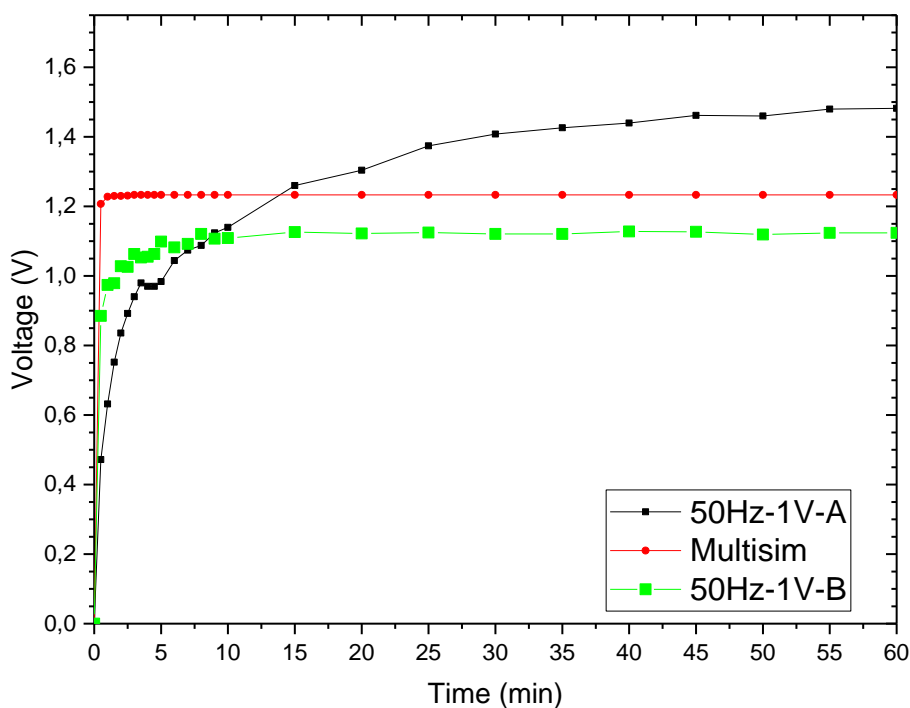


Εικόνα 3.20 Καμπύλες φόρτισης Quadrupler για διαφορετικές συχνότητες πλάτους 500mVpp και θεωρητική καμπύλη από πρόγραμμα προσομοίωσης

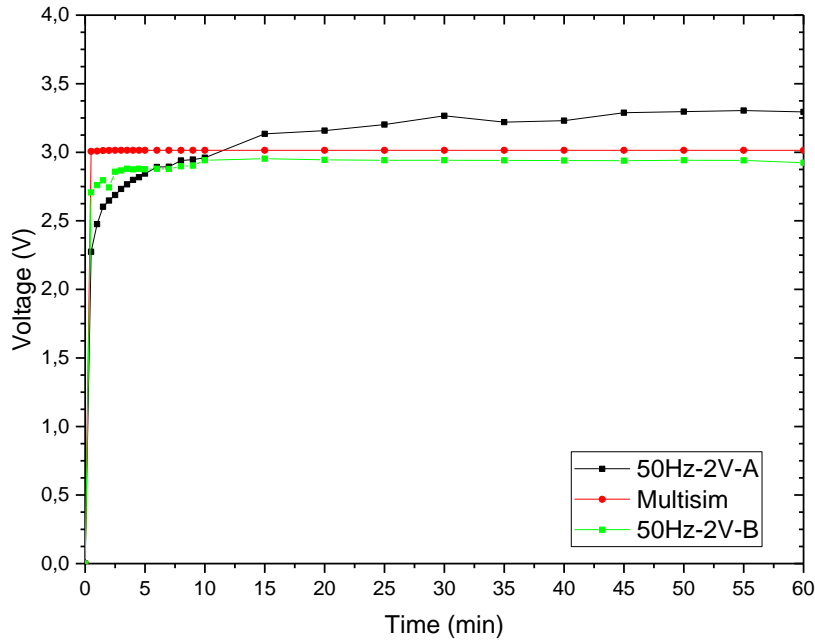
Σε αυτή τη γραφική φαίνεται ότι η μεγαλύτερη τάση φόρτισης του πυκνωτή πραγματοποιείται στα 50Hz (624mV). Στο 1Hz η τάση είναι μικρότερη (548mV) διότι λόγω της μικρής συχνότητας, μεταφέρεται λιγότερη ενέργεια ενώ στα 10KHz η μικρότερη τάση (524mV) οφείλεται στο γεγονός ότι η συχνότητα βρίσκεται εκτός του πεδίου ιδανικής λειτουργίας των διόδων. Η τάση από το Multisim είναι περίπου 200mV λιγότερη σε σχέση με τη μέγιστη τάση φόρτισης του πυκνωτή. Αυτό συμβαίνει λόγω της μη ιδανικότητας των υλικών και των μετρήσεων στα κυκλώματα που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο.

Αφού ερευνηθήκε η λειτουργία των κυκλωμάτων για διαφορετικές συχνότητες, μελετήθηκε και η λειτουργία τους για διαφορετικές τάσεις εισόδου. Επειδή όλα τα κυκλώματα αποτελούνται από τα ίδια εξαρτήματα, κρίθηκε σκόπιμο η μελέτη να γίνει μόνο στο κύκλωμα του Quadrupler καθώς θεωρήθηκε ότι και όλα τα υπόλοιπα κυκλώματα θα εμφανίζουν αντίστοιχη λειτουργία. Οι τάσεις που επιλέχθηκαν είναι 500mVp-p, 1Vp-p και

2V_{p-p} ενώ η συχνότητα της γεννήτριας σήματος ρυθμίστηκε στα 50Hz. Και στις δύο τάσεις προστέθηκε ένα διαφορετικό είδος μέτρησης. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η συχνότητα με την οποία λαμβάνονται οι μετρήσεις καθώς και ο τρόπος μέτρησης, επηρεάζουν το αποτέλεσμα διότι οι συσκευές μέτρησης δεν είναι ιδανικές και απορροφούν ενέργεια. Για το λόγο αυτό, στις γραφικές που σημειώνονται με Β δίπλα έγινε το εξής: κατά τη διάρκεια της φόρτισης, σε αντίθεση με τον κλασσικό τρόπο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε (δηλαδή το ηλεκτρόμετρο συνδεόταν στο κύκλωμα μόνο τη στιγμή της μέτρησης), το ηλεκτρόμετρο έμεινε μόνιμα συνδεδεμένο πάνω στο κύκλωμα ενώ η συχνότητα μετρήσεων έμεινε η ίδια με τα προηγούμενα πειράματα. Ο δεύτερος τρόπος μέτρησης έγινε με σκοπό να μελετηθεί η αλλαγή της γραφικής του πυκνωτή στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί άλλος τρόπος μέτρησης. Στις δύο πρώτες Εικόνες (3.21-3.22) φαίνονται οι τάσεις 1V_{p-p} και 2V_{p-p} μαζί με τις αντίστοιχες γραφικές του Multisim ενώ στην εικόνα 3.23 γίνεται σύγκριση των τριών τρόπων μέτρησης (δηλαδή της γραφικής από το Multisim, της γραφικής με τον κλασσικό τρόπο μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και της γραφικής με τον δεύτερο τρόπο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε).

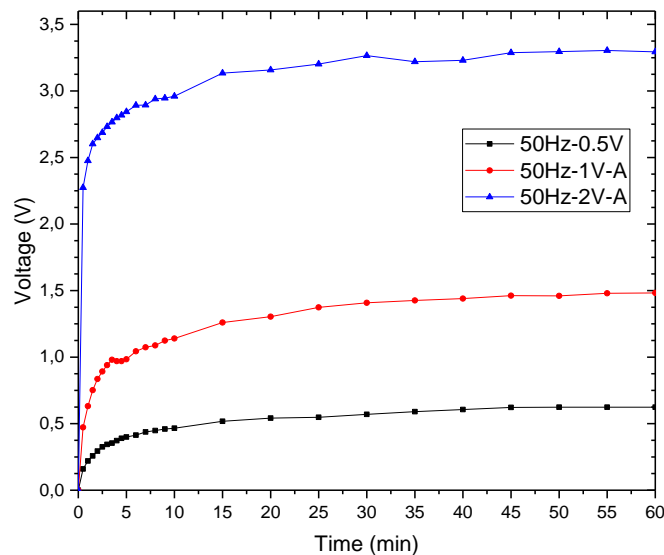


Εικόνα 3.21 Γραφική Quadrupler 50Hz,1V_{p-p} μαζί με τη γραφική από το Multisim



Εικόνα 3.22 Κυματομορφή Quadrupler 50Hz,2Vp-p μαζί με την κυματομορφή από το Multisim

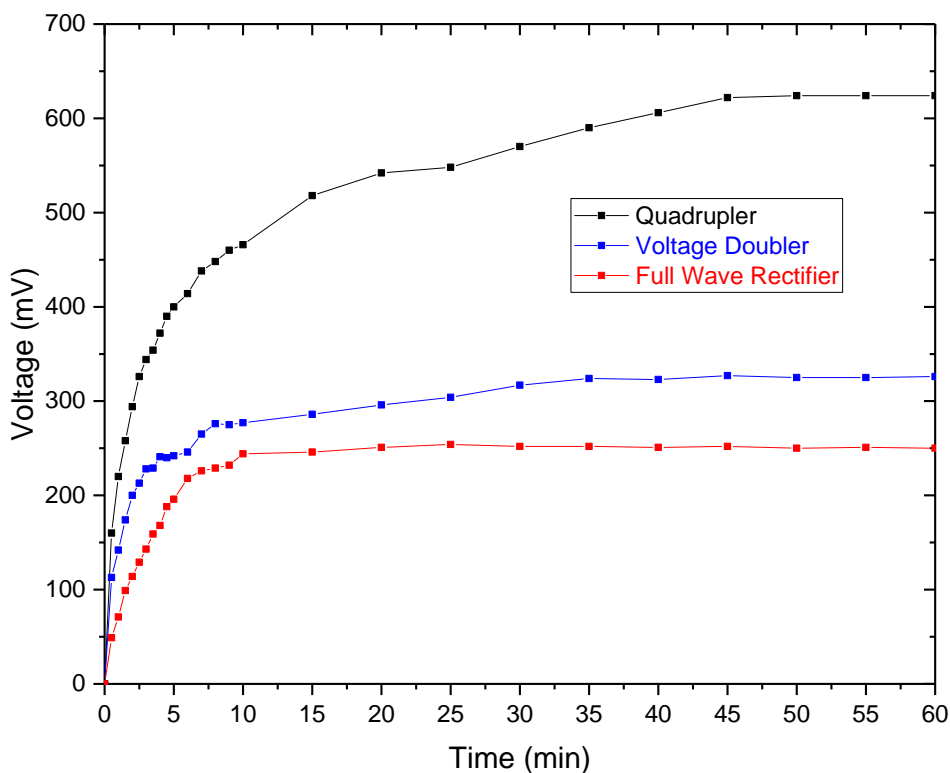
Από τις Εικόνες 3.20-3.22 γίνεται αντιληπτό ότι η τάση του Multisim είναι μικρότερη από τις αντίστοιχες πειραματικές. Επίσης, παρατηρείται ότι με το δεύτερο τρόπο μέτρησης, η μορφή της γραφικής μοιάζει πιο πολύ με τη γραφική του Multisim παρά με εκείνη του τρόπου A (εννοείται η κλίση της γραφικής) ενώ όπως είναι λογικό, λόγω των απωλειών, η τάση είναι μικρότερη.



Εικόνα 3.23 Κυματομορφές τετραπλασιαστή τάσης για τρεις διαφορετικές τάσεις με σταθερή συχνότητα 50Hz

Στην Εικόνα 3.23 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι γραφικές των τάσεων του τετραπλασιαστή τάσης για τις τρεις διαφορετικές τάσεις (0,5V, 1V, 2V) και για σταθερή συχνότητα 50Hz.

Τέλος γίνεται η σύγκριση των τριών κυκλωμάτων (Εικόνα 3.24). Παρατηρούμε ότι, το κύκλωμα του τετραπλασιαστή, έχει την ικανότητα να συγκεντρώσει σημαντικά περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τα άλλα δύο κυκλώματα. Το κύκλωμα του διπλασιαστή τάσης και το απλό κύκλωμα εμφανίζουν περίπου την ίδια τάση και όχι τον αναμενόμενο διπλασιασμό τάσης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι επειδή και οι τρεις γραφικές έχουν σταθεροποιηθεί (άρα έχουν φτάσει σε κορεσμό), θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερης χωρητικότητας πυκνωτές για να αποθηκευτεί περισσότερη ενέργεια. Συνοψίζοντας, και τα τρία κυκλώματα έχουν κατασκευαστεί με παθητικά στοιχεία δηλαδή διόδους και πυκνωτές. Οι προσομοιώσεις στο Multisim και τα πειράματα με τη γεννήτρια σήματος έγιναν με είσοδο ημιτονικής μορφής διαφόρων τάσεων και συχνοτήτων. Αυτά τα κυκλώματα σε σχέση με τα ενεργά, είναι πιο απλά στην κατασκευή τους, αλλά παρουσιάζουν μειωμένη απόδοση.



Εικόνα 3.24 Σύγκριση τριών κυκλωμάτων

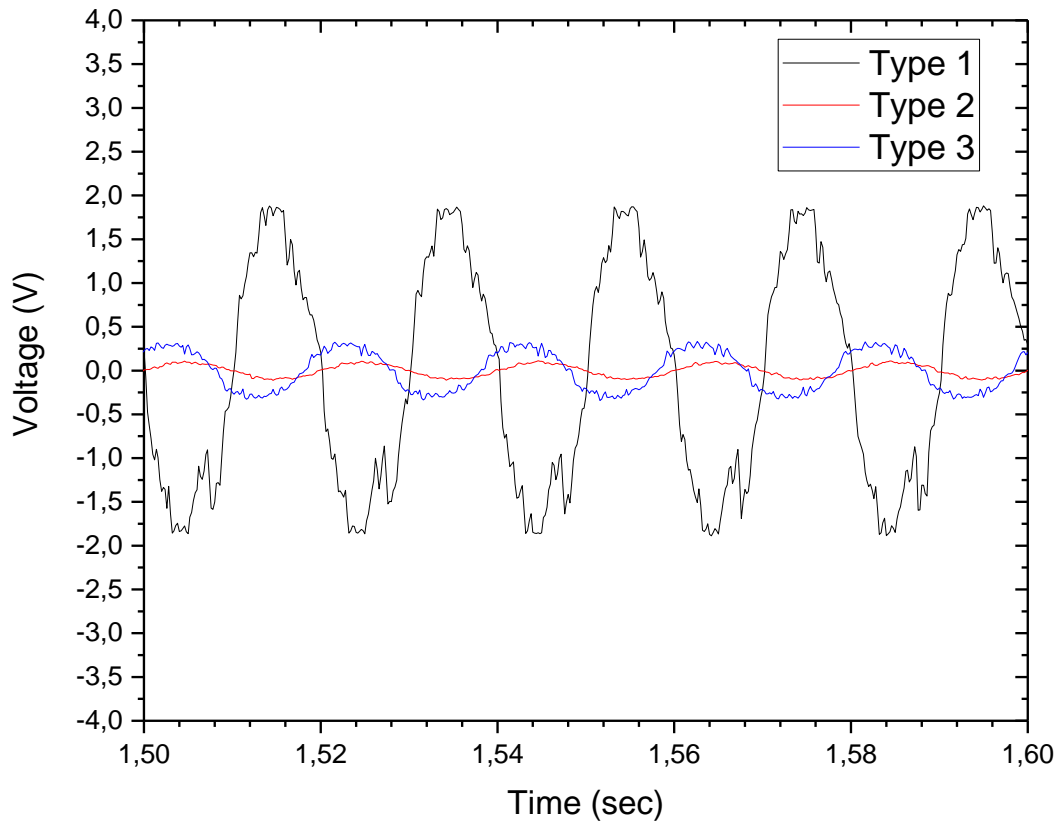
3.4. Θόρυβος από το περιβάλλον του εργαστηρίου

Στα πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο παρατηρήθηκε ότι όταν το κύκλωμα συλλογής ενέργειας συνδεόταν με καλώδια στην τριβογεννήτρια, ο πυκνωτής του κυκλώματος φορτιζόταν κανονικά ακόμα και στη περίπτωση που η τριβογεννήτρια ή η πιεζογεννήτρια δεν δεχόταν εξωτερική μηχανική διέγερση. Με την βοήθεια του παλμογράφου μετρήθηκε ένα σήμα ημιτονικής μορφής, συχνότητας 50Hz και πλάτους 200mVpp στην άκρη των καλωδίων. Από το γεγονός αυτό προκύπτει το συμπέρασμα ότι υπήρχε ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος στο χώρο, ο οποίος προέρχονταν από την λειτουργία των ηλεκτρικών διατάξεων αλλά και από τις γραμμές μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος. Τα καλώδια που ήταν συνδεδεμένα πάνω στο κύκλωμα λειτουργούσαν σαν κεραία και σύμφωνα με τη θεωρία που αναφέρθηκε στο παράρτημα Γ, ένας αγωγός μέσα σε μαγνητικό πεδίο, διαπερνάται από ρεύμα.



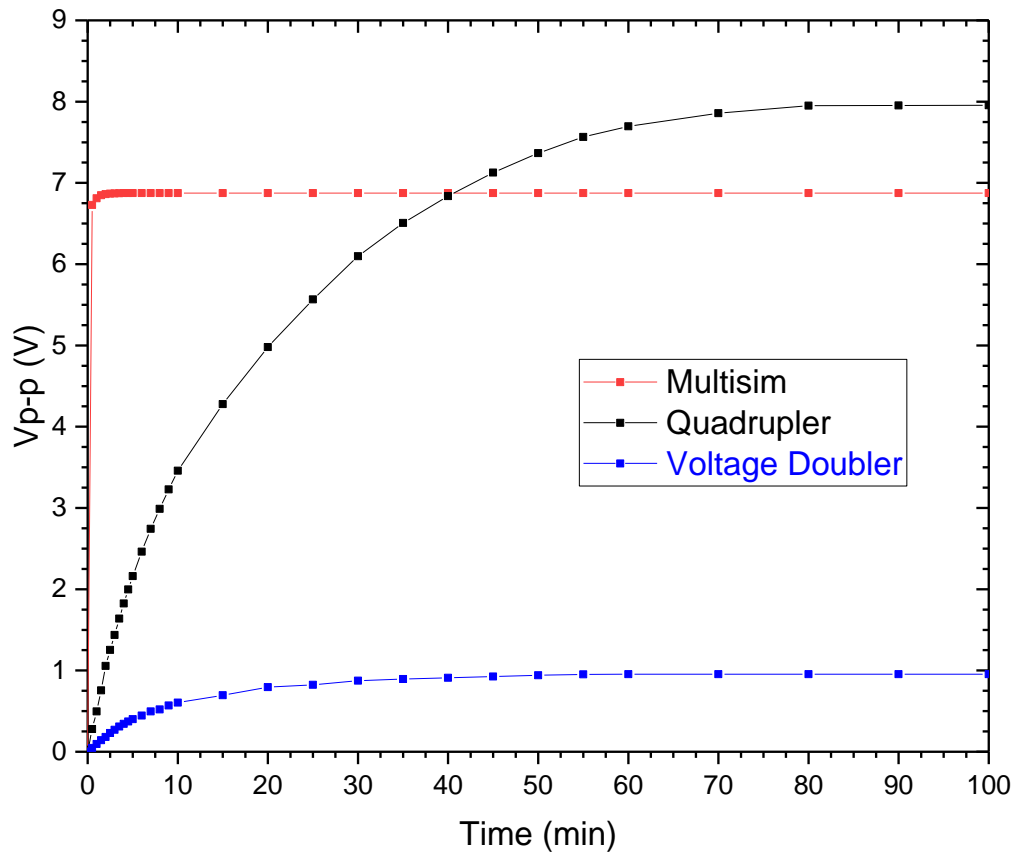
Εικόνα 3.25 Πάγκος εργαστηρίου με τη γραμμή μεταφοράς και το διακόπτη

Αρχικά, για να επιβεβαιώσουμε ότι όντως ο θόρυβος προερχόταν από τις γραμμές μεταφοράς που βρίσκονταν στο πάγκο των μετρήσεων, κλείσαμε τον διακόπτη παροχής που φαίνεται και στην Εικόνα 3.25. Μετά το κλείσιμο του διακόπτη, ο θόρυβος μειώθηκε σημαντικά. Το μικρό ποσό του θορύβου που έμεινε, οφειλόταν στις γραμμές μεταφοράς του εργαστηρίου, στις συσκευές του εργαστηρίου, στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία των κινητών, καθώς στα ασύρματα δίκτυα Wi-fi. Στην Εικόνα 3.26, παρουσιάζεται το σήμα του παλμογράφου και συνεπώς, την επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για τοποθέτηση των καλωδίων του κυκλώματος σε διάφορες θέσεις του εργαστηρίου και για διάφορα σενάρια λειτουργίας των συσκευών του περιβάλλοντα χώρου. Από ότι φαίνεται και από το σήμα του παλμογράφου, ενώ ο θόρυβος που υπάρχει κανονικά είναι 50-200mVpp (Περίπτωση 2-Εικόνα 3.26), μόλις ενεργοποιούνται κάποιες συσκευές που βρίσκονται στον πάγκο (Περιπτώσεις 1,3-Εικόνα 3.26) (π.χ. μια γεννήτρια σήματος ή ένα κινητό που φορτίζει), το σήμα αυξάνεται κατακόρυφα και φτάνει τα 3,6Vpp.



Εικόνα 3.26 Σήμα παλμογράφου σε διάφορα σενάρια θορύβου α) Περίπτωση 1: με συσκευή που φορτίζει δίπλα στα καλώδια του κυκλώματος β) Περίπτωση 2: χωρίς ενεργοποιημένες συσκευές και καλώδια τροφοδοσίας, γ) Περίπτωση 3: με ενεργοποιημένες συσκευές και καλώδια τροφοδοσίας

Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της ενέργειας των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων στο χώρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, συνδέθηκε ο τετραπλασιαστής τάσης με τα καλώδια να είναι συνδεδεμένα στην είσοδο του και αφέθηκε στον πάγκο για 100 λεπτά με ανοιχτές τις συσκευές τριγύρω του. Η φόρτιση του πυκνωτή φαίνεται στην Εικόνα 3.27 μαζί με τη θεωρητική γραφική του Multisim και την αντίστοιχη φόρτιση που έγινε με το διπλασιαστή τάσης.



Εικόνα 3.27 Ενδεικτικές φορτίσεις πυκνωτών λόγω του θορύβου από το εργαστήριο

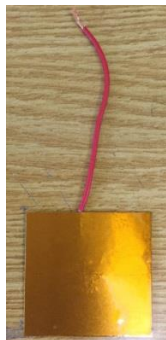
Όπως προκύπτει και από τις γραφικές, η ενέργεια που αποθηκεύεται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι σημαντική. Για το κύκλωμα του τετραπλασιαστή, ο πυκνωτής φορτίστηκε μέχρι τα 8 Volt, ενώ το κύκλωμα του διπλασιαστή φορτίστηκε περίπου μέχρι το 1 Volt.

4. Χαρακτηρισμός συλλεκτών μηχανικής ενέργειας

Στο κεφάλαιο αυτό αξιολογήθηκαν τα κυκλώματα που κατασκευαστήκαν με τη χρήση γεννητριών συλλογής ενέργειας και ειδικότερα μίας εμπορικής πιεζογεννήτριας και τριών εργαστηριακών τριβοηλεκτρικών μικρογεννητριών. Σε όλες τις περιπτώσεις διερευνήθηκε η απόδοση των κυκλωμάτων σαν συνάρτηση του σήματος εξόδου των γεννητριών συλλογής μηχανικής ενέργειας. Τέλος, κατασκευάστηκαν κυκλώματα επίδειξης προκειμένου να αναδειχτεί η δυνατότητα της συνδυασμένης διάταξης (ηλεκτρονικό κύκλωμα και μικρογεννήτρια) να τροφοδοτήσει απλές ηλεκτρονικές διατάξεις (πχ LEDs) αλλά και πιο σύνθετα ηλεκτρονικά κυκλώματα αισθητήρων.

4.1. Αποτελέσματα πειραμάτων με τη χρήση τριβογεννητριών

Για το χαρακτηρισμό χρησιμοποιήθηκαν τρεις τριβογεννήτριες. Οι τριβογεννήτριες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τύπου πλευρικής συρόμενης λειτουργίας (βλ. Ενότητα 1.4.2) και αποτελούνται από τους εξής συνδυασμούς υλικών: α)Καρτον/SiO₂, β)Καρτον/Al₂O₃ και γ)Καρτον/HfO₂. Τα τρία οξείδια είχαν εναποτεθεί σε υποστρώματα πυριτίου. Στην Εικόνα 4.1 φαίνεται το ένα από τα δύο υλικά μιας από τις τριβογεννήτριες που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 4.1 Επιφάνεια Καρτον κολλημένη σε φύλλο αλουμινίου

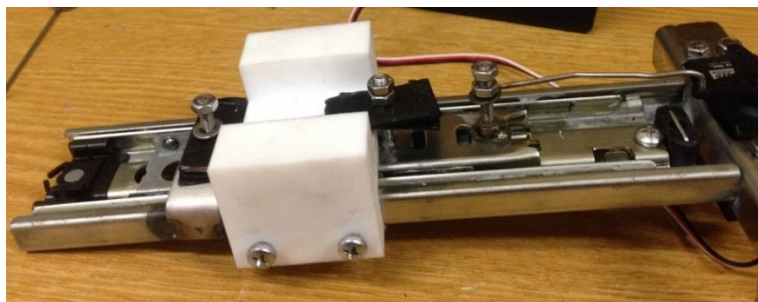
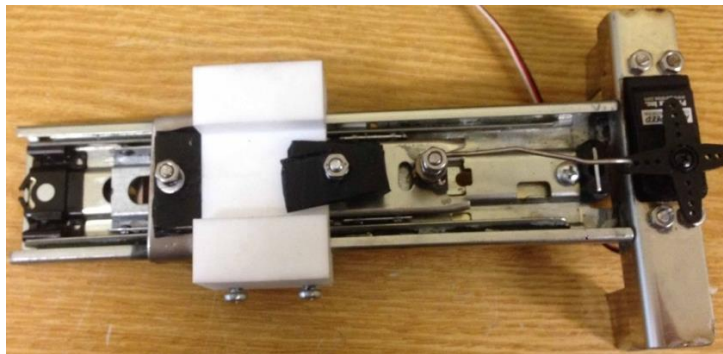
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για το χαρακτηρισμό των κυκλωμάτων περιλαμβάνει

- Την ιδιοκατασκευή για την τριβή των δύο επιφανειών (Εικόνα 4.2)
- τον παλμογράφο του εργαστηρίου

- Τα κυκλώματα που μελετήθηκαν στο κεφάλαιο 3 δηλαδή α) το απλό κύκλωμα ανόρθωσης, β) ο διπλασιαστής τάσης και γ) ο τετραπλασιαστής τάσης.
- το ηλεκτρόμετρο (Keithley) του εργαστηρίου

Στη συσκευή (ιδιοκατασκευή) χαρακτηρισμού των τριβογεννητριών προστέθηκε Teflon για την ελεγχόμενη τριβή των υλικών. Στη βάση αυτή, και πάνω από τις επιφάνειες που τρίβονταν, τοποθετούνταν βάρη από σίδηρο ώστε να επιτυγχάνεται διαφορετική πίεση στα υλικά σε κάθε δοκιμή. Στο κάτω μέρος της βάσης τοποθετήθηκε το πρώτο υλικό (τα τρία οξειδία) το οποίο παρέμενε ακίνητο και από πάνω του το δεύτερο (Karton) υλικό με τα βάρη από πάνω του ώστε τα δύο υλικά να βρίσκονται σε επαφή.

Η ταλαντούμενη κίνηση του δεύτερου υλικού επάνω στο άλλο επιτυγχάνεται με την κυκλική κίνηση ενός άξονα, η πίσω πλευρά του οποίου στρέφεται μέσω ενός μοτέρ. Σε κάθε ένα από τα δύο άκρα της γεννήτριας, συνδέθηκε ο παλμογράφος, στον οποίο γινόταν καταγραφή του σήματος. Αφού καταγραφόταν το σήμα στον παλμογράφο και αποθηκεύονταν τα δεδομένα για χρήση τους ως σήμα εισόδου στο πρόγραμμα προσομοίωσης (Multisim), τα άκρα της τριβογεννήτριας συνδέονταν με καλώδια στα άκρα του κυκλώματος.



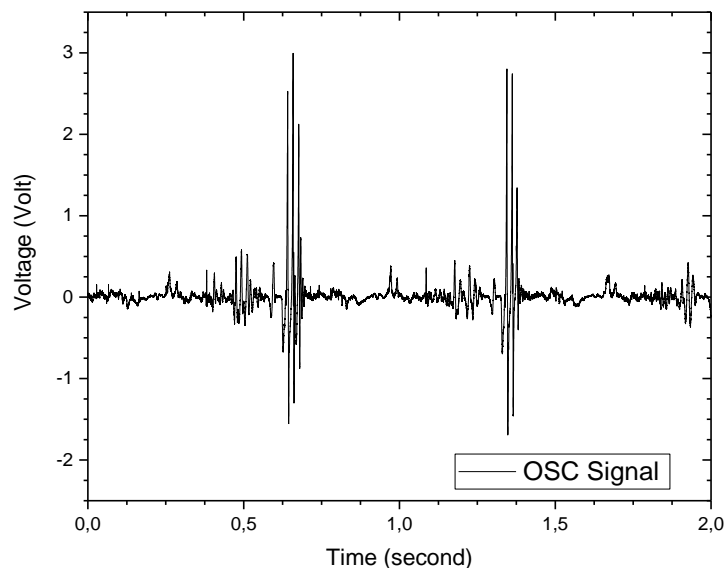
Εικόνα 4.2 Συσκευή τριβής των επιφανειών

Για τη σύγκριση των κυκλωμάτων χρησιμοποιήθηκε η τριβογεννήτρια Karton/SiO₂. Κάθε κύκλωμα φορτιζόταν για 180 λεπτά (3 ώρες) με τη μέτρηση της φόρτισης να είναι μεταβλητή, δηλαδή τα πρώτα πέντε λεπτά η μέτρηση γινόταν κάθε 30 δευτερόλεπτα, στο

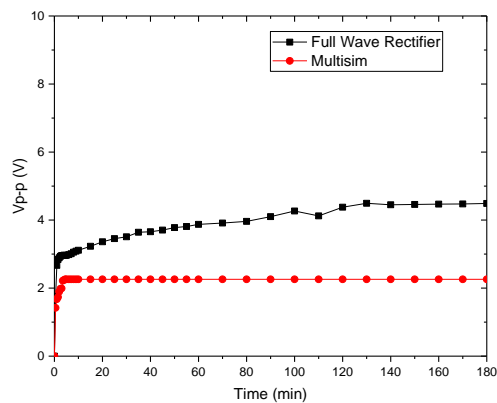
διάστημα 5-10 λεπτά κάθε ένα λεπτό, 10-60 λεπτά κάθε πέντε λεπτά και από 60 λεπτά μέχρι το τέλος, κάθε 10 λεπτά.

Στην Εικόνα 4.3 φαίνεται το σήμα του παλμογράφου (ο οποίος μετράει την τάση σε συνάρτηση με το χρόνο στα άκρα της τριβογεννήτριας). Η μέγιστη τάση από κορυφή σε κορυφή (V_{p-p}) είναι 3,11V και η περίοδος του είναι 0,7099 sec.

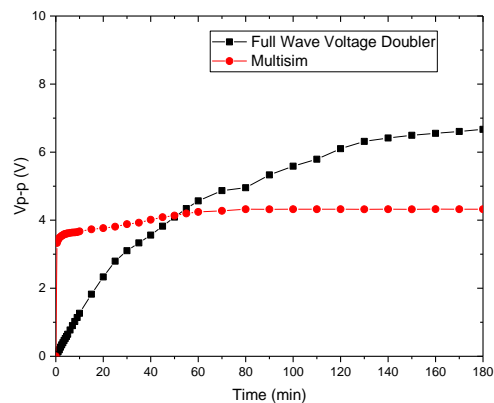
Στην Εικόνα 4.4(α-γ) παρουσιάζονται ξεχωριστά οι γραφικές των τριών κυκλωμάτων ο οποίες περιλαμβάνουν την πειραματική φόρτιση του πυκνωτή καθώς και τη φόρτιση του όπως αυτή υπολογίστηκε από το πρόγραμμα προσομοίωσης. Όσον αφορά το Multisim, σαν είσοδος δόθηκαν τα δεδομένα από τον παλμογράφο. Στο τελευταίο γράφημα (Εικόνα 4.5) φαίνεται η σύγκριση των 3 κυκλωμάτων (Full Wave Rectifier, Voltage Doubler, Quadrupler).



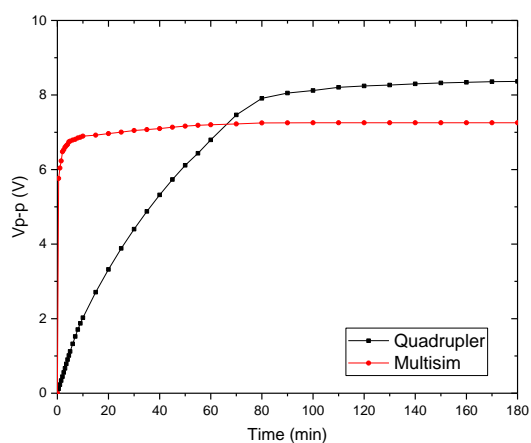
Εικόνα 4.3 Σήμα τριβογεννήτριας από παλμογράφο



(α)



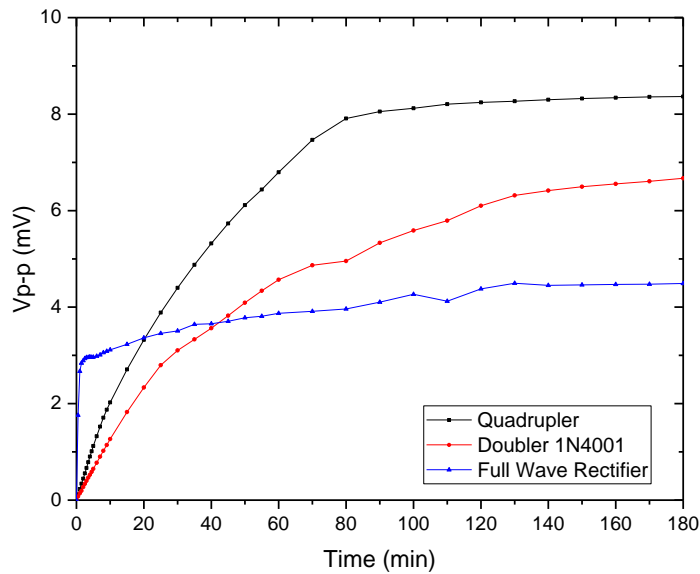
(β)



(γ)

Εικόνα 4.4 Σύγκριση της πειραματικής φόρτισης του πυκνωτή και της φόρτισης μέσω του προγράμματος προσομοίωσης α) απλού κυκλώματος ανόρθωσης, β) κύκλωμα διπλασιαστή τάσης, γ) κύκλωμα τετραπλασιαστή τάσης

Παρατηρείται ότι η τάση μέσω του Multisim είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με την τάση του πειράματος (~50% για το απλό κύκλωμα ανόρθωσης, ~33% για τον διπλασιαστή τάσης και 12.5% για τον τετραπλασιαστή τάσης). Αυτό συμβαίνει επειδή μέσω της κυματομορφής του παλμογράφου (που δόθηκε ως είσοδος στο πρόγραμμα προσομοίωσης) δεν μπορεί να υπολογιστεί το ρεύμα που προσφέρει η τριβογεννήτρια στο κύκλωμα. Από τη σύγκριση των τριών κυκλωμάτων (Εικόνα 4.5) προκύπτει ότι, ο πυκνωτής του τετραπλασιαστή τάσης για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας της τριβογεννήτριας φορτίζεται περισσότερο σε σχέση με τον διπλασιαστή τάσης και το απλό κύκλωμα ανόρθωσης που έχει την χαμηλότερη φόρτιση και φτάνει μόλις στο 50% του τετραπλασιαστή.



Εικόνα 4.5 Συγκριτική φόρτιση των 3 κυκλωμάτων που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο και φορτίστηκαν με την ίδια τριβογεννήτρια

Στον πίνακα 4-1 συνοψίζονται οι μέγιστες τάσεις των φορτίσεων (πειραματικών και του προγράμματος προσομοίωσης) των τριών κυκλωμάτων

Πίνακας 4-1 Μέγιστες τάσεις των φορτίσεων (πειραματικών και του προγράμματος προσομοίωσης) των τριών κυκλωμάτων

Κυκλώματα	Αποτελέσματα Πειραματικά αποτελέσματα	Αποτελέσματα από το Multisim
Απλό κύκλωμα ανόρθωσης	4,49V	2,26V
Διπλασιαστής τάσης	6,67V	4,32V
Τετραπλασιαστής τάσης	8,37V	7,26V

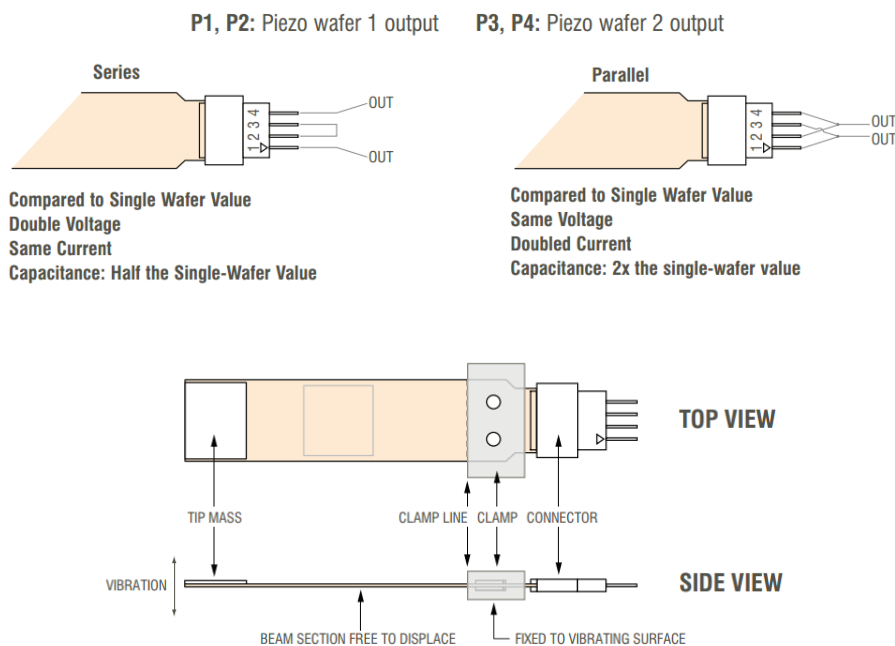
4.2. Αποτελέσματα πειραμάτων με τη χρήση πιεζογεννητριών

Για το χαρακτηρισμό των κυκλωμάτων μέσω της χρήσης των πιεζογεννητριών, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω πιεζογεννήτρια του εμπορίου (Εικόνα 4.6):



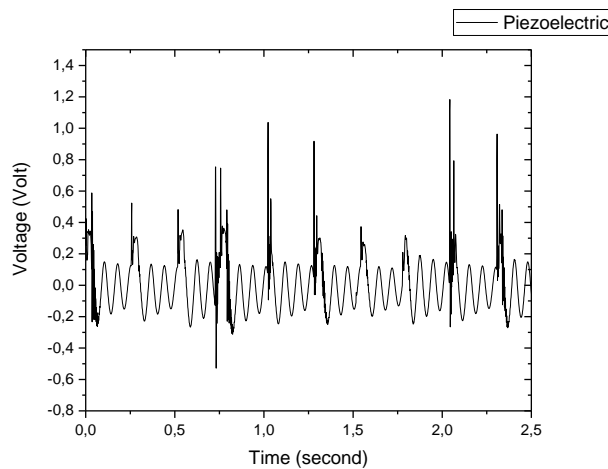
Εικόνα 4.6 Πιεζογεννήτρια εμπορίου V21B

Η πιεζογεννήτρια αυτή δοκιμάστηκε σε τυχαίες συνθήκες μηχανικές διέγερσης ώστε να προσομοιάζει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της γεννήτριας, με σκοπό να μελετηθεί η απόδοση της σε κανονικές συνθήκες. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.7, η πιεζογεννήτρια έχει δύο τρόπους σύνδεσης. Ο πρώτος δίνει διπλάσια τάση και ένα ρεύμα I ενώ ο δεύτερος τρόπος δίνει διπλάσιο ρεύμα και τάση V . Το φύλλο δεδομένων της γεννήτριας δεν περιλαμβάνει το μέγεθος της ισχύος της, παρά μόνο την τάση και το ρεύμα σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας π.χ. σε διαφορετικές συχνότητες διέγερσης. Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε ο δεύτερος τρόπος σύνδεσης και η διέγερση έγινε με το χέρι, δηλαδή με τυχαία εξωτερική διέγερση που είναι πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες λειτουργία μιας πιεζογεννήτριας



Εικόνα 4.7 Σχηματική απεικόνιση πιεζογεννήτριας

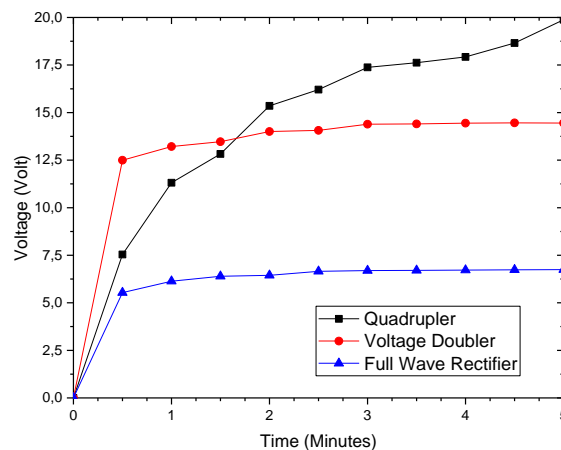
Το σήμα του παλμογράφου φαίνεται στην Εικόνα 4.8:



Εικόνα 4.8 Σήμα πιεζογεννήτριας στον παλμογράφο όταν αυτή διεγείρεται με το χέρι

Από την Εικόνα 4.8, προκύπτει ότι, οι κορυφές της κυματομορφής είναι οι στιγμές της διέγερσης της γεννήτριας (διέγερση με το χέρι), ενώ τα ενδιάμεσα σημεία της κυματομορφής ημιτονικού σήματος είναι αποτέλεσμα της ταλάντωσης στην ιδιοσυχνότητα της.

Στην Εικόνα 4.9 γίνεται η σύγκριση των 3 κυκλωμάτων μετά τη δοκιμή που αναφέρθηκε παραπάνω.



Εικόνα 4.9 Συγκριτική φόρτιση των 3 κυκλωμάτων που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο και φορτίστηκαν με την ίδια πιεζογεννήτρια

Όπως φαίνεται και από τις Εικόνες 4.5 και 4.9, η ισχύς των εμπορικών πιεζογεννητριών , είναι πολύ μεγαλύτερη της ισχύος των εργαστηριακών τριβογεννητριών όπως είναι (που τώρα αναπτύσσονται) αναμενόμενο. Χρησιμοποιώντας τον τύπο

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4.1)$$

ο πυκνωτής του τετραπλασιαστή τάσης με είσοδο μια τριβογεννήτρια στα πρώτα 5 λεπτά λειτουργίας έχει συγκεντρώσει ενέργεια ίση με 0.2948μJ ενώ ο πυκνωτής του τετραπλασιαστή τάσης με είσοδο την πιεζογεννήτρια στα πρώτα 5 λεπτά λειτουργίας έχει συγκεντρώσει 92.88μJ, δηλαδή 310 φορές περίπου περισσότερη ενέργεια.

Στον πίνακα 4-2 γίνεται σύγκριση της ενέργειας που αποθηκεύτηκε από τα τρία κυκλώματα από τις τριβογεννήτριες και τις πιεζογεννήτριες

Πίνακας 4-2 Σύγκριση της αποθηκευμένης ενέργειας των κυκλωμάτων σε χρόνο 5 λεπτών λόγω των τριβογεννητριών και των πιεζογεννητριών

Κυκλώματα \ Ενέργεια	Ενέργεια που αποθηκεύτηκε λόγω της τριβογεννήτριας	Ενέργεια που αποθηκεύτηκε λόγω της πιεζογεννήτριας
Απλό κύκλωμα ανόρθωσης	2,06μJ	10,70μJ
Διπλασιαστής τάσης	0,10μJ	49,06μJ
Τετραπλασιαστής τάσης	0,30μJ	92,88μJ

Συμπεραίνουμε ότι τα κυκλώματα λόγω των πιεζογεννητριών έχουν τη δυνατότητα να συγκεντρώσουν περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τη λειτουργία των τριβογεννητριών στα 5 πρώτα λεπτά λειτουργίας τους.

4.3. Προβλήματα και τρόποι αντιμετώπισης

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εμφανίστηκαν ορισμένα προβλήματα τα οποία αφορούσαν τις απώλειες των οργάνων μέτρησης, την επιλογή των διόδων των κυκλωμάτων

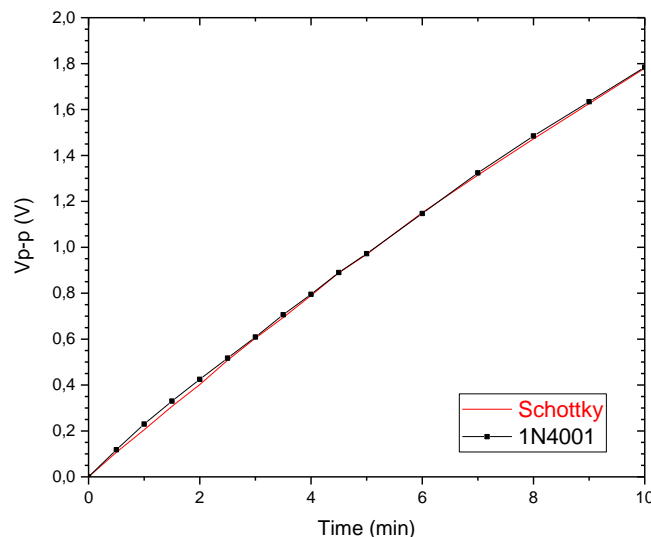
καθώς και τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο του εργαστηρίου. Οι δυσκολίες αυτές και οι τρόποι με τους οποίους ξεπεράστηκαν περιγράφονται σε αυτή την ενότητα.

4.3.1. Ηλεκτρικές απώλειες οργάνων μέτρησης

Πριν ξεκινήσουν τα πειράματα, οι πρώτες μετρήσεις έγιναν με το πολύμετρο του εργαστηρίου. Το βασικό μειονέκτημα που παρατηρήθηκε είναι ότι λόγω της μεγάλης (αλλά όχι άπειρης) αντίστασης του (10ΜΩ), το πολύμετρο αποφόρτιζε τον πυκνωτή των κυκλωμάτων σε σημαντικό βαθμό. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιήθηκε το όργανο μέτρησης Kethley 2400 (ηλεκτρόμετρο) του εργαστηρίου.

4.3.2. Επιλογή τύπου διόδων των κυκλωμάτων

Πριν γίνει η πειραματική ανάλυση των αποτελεσμάτων, η κατασκευή του διπλασιαστή τάσης έγινε με δύο τρόπους. Στη μία εκδοχή του, το κύκλωμα κατασκευάστηκε με απλές διόδους 1N4001 ενώ στη δεύτερη εκδοχή του κατασκευάστηκε με διόδους Schottky ασθενούς σήματος. Οι διόδοι Schottky επιλέχθηκαν λόγω της πολύ μικρής τάσης αγωγής άρα και πτώσης τάσης και της δυνατότητας γρήγορων εναλλαγών (switching action). Και στα δύο κυκλώματα χρησιμοποιήθηκε η ίδια είσοδος με την ίδια τριβογεννήτρια καθώς επίσης και ο ίδιος πυκνωτής χωρητικότητας 0,47μF. Τα αποτελέσματα των φορτίσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.10 Σύγκριση των φορτίσεων ανάμεσα στα κυκλώματα του διπλασιαστή τάσης κατασκευασμένα με απλές διόδους και διόδους Schottky

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.10, η λειτουργία των 2 κυκλωμάτων είναι σχεδόν ταυτόσημη. Από αυτό γίνεται αντιληπτό ότι το σήμα που λαμβάνεται από τη γεννήτρια, ανταποκρίνεται το ίδιο και στους δύο τύπους διόδων. Άρα αποφασίστηκε τα πειράματα να συνεχιστούν με το κύκλωμα των απλών διόδων, αφού οι διόδοι Schottky παρόλο που

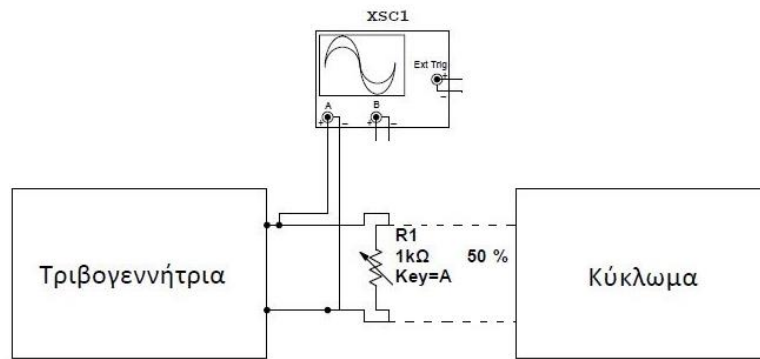
ανταποκρίνονται καλύτερα στις αλλαγές της συχνότητας, δεν προσφέρουν καμία μετρήσιμη βελτίωση στο κύκλωμα.

4.3.3. Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος

Λόγω του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου που υπήρχε στο χώρο και συγκεκριμένα λόγω της παροχής ενέργειας που βρίσκεται πάνω στον πάγκο, παρατηρήθηκε ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος με αποτέλεσμα να φορτίζονται τα κυκλώματα χωρίς την είσοδο από κάποια γεννήτρια. Γι αυτό κρίθηκε σκόπιμο τα πειράματα να γίνουν με κλειστή την παροχή του ρεύματος ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο θόρυβος. Ο θόρυβος και το κατά πόσο επηρεάζει τις μετρήσεις, έχει αναλυθεί στην ενότητα 3.4.

4.4. Μέγιστη απόδοση μικρογεννητριών

Η πιο κοινή μέθοδος για την αναπαράσταση της εξόδου μιας πιεζογεννήτριας ή τριβογεννήτριας, είναι η τάση εξόδου ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) και/ή το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) κλειστού κυκλώματος σε συνάρτηση με το χρόνο. Αυτό παρέχει μια χρήσιμη οπτική αναπαράσταση της εξόδου της διάταξης. Γι αυτό το λόγο, οι περισσότερες νανοδομές συλλογής ενέργειας έχουν συγκριθεί αποκλειστικά σε σχέση με τις ισοδύναμες τιμές της τάσης ανοικτού κυκλώματος⁵¹⁵². Ωστόσο, αυτό είναι μία πρώτη ένδειξη της απόδοσης της διάταξης καθώς για να χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να συνδεθεί με ένα φορτίο. Αν και υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός πολύπλοκων κυκλωμάτων που έχουν αναπτυχθεί για τη βέλτιστη μεταφορά της ενέργειας⁵³, η πιο βασική μέθοδος είναι η μέτρηση της τάσης που παράγεται στα άκρα ενός ωμικού φορτίου όταν αυτό συνδεθεί στα άκρα της εξόδου της γεννήτριας⁵⁴⁵⁵. Αυτό έγινε και στις γεννήτριες του εργαστηρίου. Δηλαδή, τρίβοντας τα δύο υλικά και βάζοντας μια μεταβλητή αντίσταση φορτίου στα άκρα των γεννητριών (η οποία κυμαινόταν από 0 Ω έως 100 MΩ), μετρήθηκε η μέγιστη τάση εξόδου (V_{peak}) στα άκρα της αντίστασης (Εικόνα 4.11).



Εικόνα 4.11 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε

Η στιγμιαία ισχύς που παράγεται από τη γεννήτρια μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση από τη σχέση:

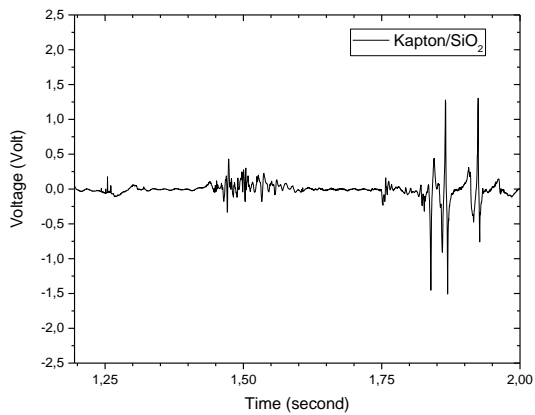
$$P = \frac{V^2}{R},$$

όπου P είναι η ισχύς και V είναι η ενεργός τάση εξόδου μετρημένη κατά μήκος της αντίστασης R . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η έκφραση είναι προσεγγιστική λόγω των επιπτώσεων της επαγωγικής ηλεκτρικής αντίστασης του φορτίου.

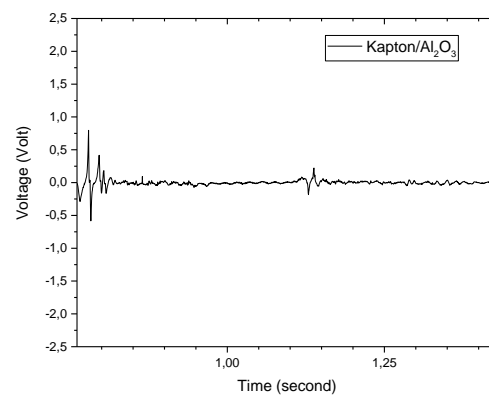
Γενικά, οι τριβοηλεκτρικές αλλά και οι πιεζοηλεκτρικές νανοδομές που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο αποτελούνται από επίπεδες επιφάνειες. Κατά συνέπεια, η ισχύς υπολογίζεται σε σχέση με το εμβαδό των επιφανειών (A) που τρίβονται ή πιέζονται. Ως εκ τούτου είναι χρήσιμο να υπολογιστεί η πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας P/A . Επιπλέον, για αρκετές πιεζογεννήτριες που αποτελούνται από κεραμικά πιεζοηλεκτρικά υλικά, χρησιμοποιείται ο όρος «πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα όγκου» (P_V). Αν και αυτό προκύπτει από τη διαίρεση της ισχύος με τον όγκο της συσκευής⁵⁶⁵⁷⁵⁸, αυτοί οι διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού του όγκου μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες παρεκκλίσεις στις αναφερόμενες πυκνότητες ισχύος. Στην παρούσα εργασία επιλέχτηκε ως μέγεθος σύγκρισης η ισχύς ανά επιφάνεια, διότι δεν είναι εύκολα προσδιορίσιμος ο όγκος των τριβογεννητριών λόγω του διάκενου αέρα που έχουν μεταξύ των δυο επιφανειών .

Οι τριβογεννήτριες που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από τους εξής συνδυασμούς υλικών: α)Karton/SiO₂, β)Karton/Al₂O₃ και γ)Karton/HfO₂. Οι τριβογεννήτριες είχαν υλοποιηθεί στα πλαίσια της διπλωματικής της κας Μ. Γόντικα⁵⁹. Στην Εικόνα 4.12 φαίνεται

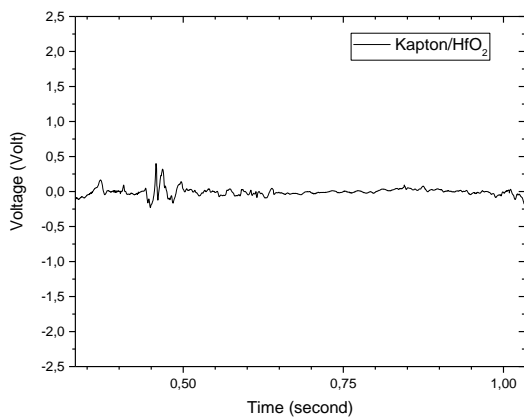
το σήμα του παλμογράφου στα άκρα της αντίστασης των τριών τριβογεννητριών όταν αυτές διεγείρονται με την ιδιοκατασκευή που αναφέρθηκε παραπάνω.



α)



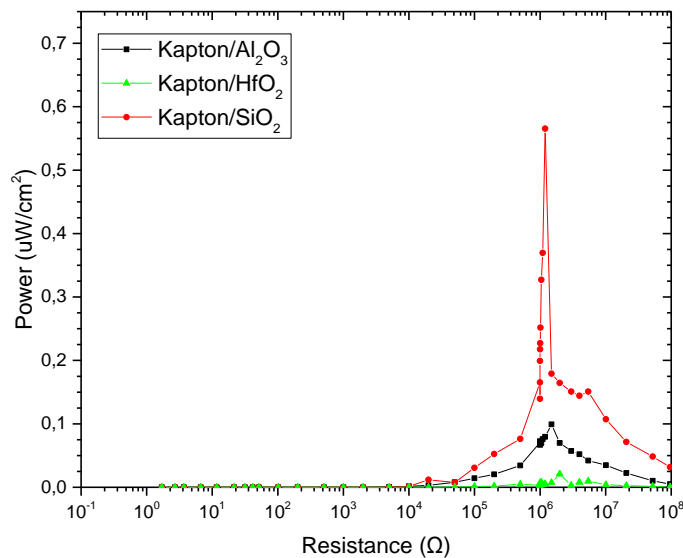
β)



γ)

Εικόνα 4.12 Στιγμιότυπα της μέγιστης τάσης των υλικών από τον παλμογράφο στη διάρκεια μιας περιόδου για α) Kapton/SiO₂ β) Kapton/Al₂O₃ και γ) Kapton/HfO₂

Στην Εικόνα 4.13 φαίνονται οι τιμές της ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με την αντίσταση του φορτίου. Από τα γραφήματα γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι την καλύτερη απόδοση παρουσίασε η τριβογεννήτρια Kapton/SiO₂ και η πυκνότητα ισχύος του είναι περίπου 5,5 φορές μεγαλύτερη από το Kapton/Al₂O₃.



Εικόνα 4.13 Πυκνότητα ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας τριών υλικών σε σχέση με την αντίσταση στα άκρα της τριβογεννήτριας

Χρησιμοποιώντας τις τιμές ισχύος που μετρώνται πάνω στις αντιστάσεις, γίνεται μια πιο ρεαλιστική σύγκριση ανάμεσα στις διαφορετικές γεννήτριες. Ωστόσο, αυτή η κορυφή της ισχύος εξόδου, εξακολουθεί να βασίζεται στη μέγιστη τάση που δημιουργείται σε μία περίοδο. Αυτό δεν αντικατοπτρίζει ούτε τη διάρκεια αλλά ούτε το σχήμα του σήματος. Συνεπώς, είναι δυνατόν να αυξηθεί αυτή η τιμή με την αύξηση π.χ. του ρυθμού τριβής των δύο επιφανειών. Μια καλύτερη μέθοδος για τη σύγκριση της αποδοτικότητας των γεννητριών είναι η μέτρηση της μέσης ισχύος της αντίστασης στη διάρκεια μιας περιόδου. Αυτό προϋποθέτει τη μέτρηση της τάσης σε σχέση με το χρόνο με ένα όργανο όπως ο παλμογράφος.

Αυτή η τάση μετρήθηκε πάνω στην κατάλληλη αντίσταση για την κάθε γεννήτρια, δηλαδή όπως φαίνεται και από την εικόνα 4.13, την αντίσταση για την οποία η γεννήτρια έχει τη μέγιστη στιγμιαία ισχύ. Από αυτά τα δεδομένα, μπορεί να γίνει ένα μεγάλο εύρος υπολογισμών. Ολοκληρώνοντας τη γραφική παράσταση από την αρχή t_1 έως το τέλος t_2 μιας περιόδου, η ηλεκτρική ενέργεια που μεταφέρεται στο φορτίο μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο :

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \frac{V(t)^2}{R} dt$$

Η μέγιστη ενέργεια που συλλέγεται από τις τρεις διαφορετικές μικρογεννήτριες ανά περίοδο λειτουργίας τους καθώς και η μέγιστη ισχύς τους συνοψίζονται στην Πίνακα 4-3.

Πίνακας 4-3 Μέγιστη ενέργεια και ισχύς των τριών τριβογεννητριών που αξιολογήθηκαν

Ενέργεια και ισχύς Τριβογεννήτρια	Μέγιστη Ενέργεια	Μέγιστη Ισχύς
Kapton/SiO ₂	13,54nJ	0,57μW/cm ²
Kapton/Al ₂ O ₃	1,58nJ	0,1μW/cm ²
Kapton/HfO ₂	1,125nJ	0,02μW/cm ²

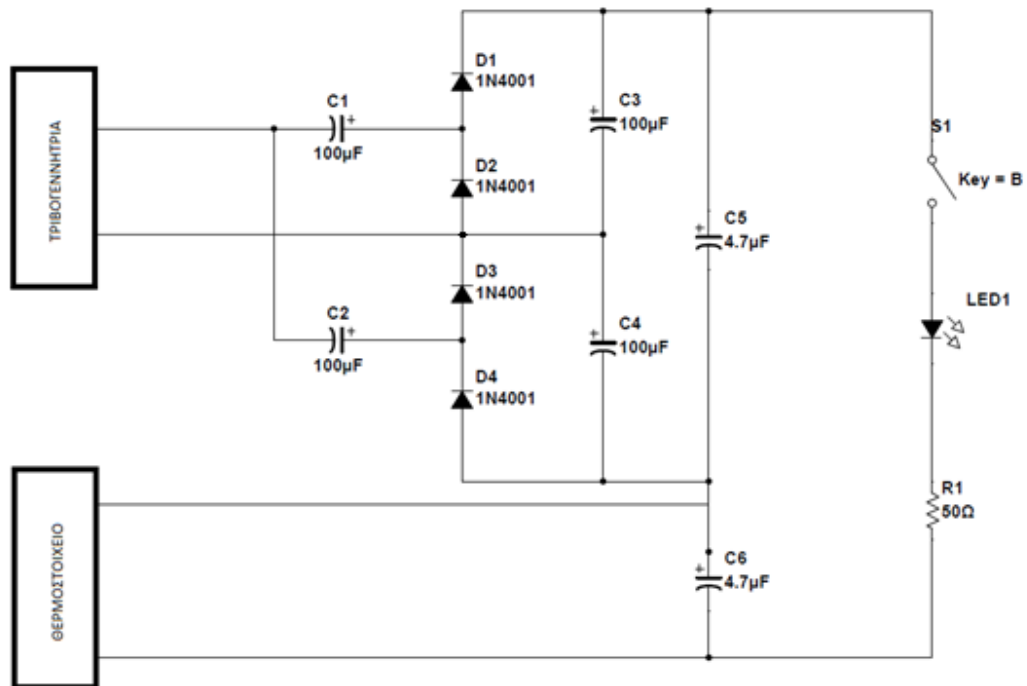
4.5. Συνδυαστικό Κύκλωμα (hybrid) Thermoelectric – Triboelectric

Τα υβριδικά συστήματα συλλογής ενέργειας, στα οποία η ενέργεια συγκεντρώνεται από διάφορες πηγές του περιβάλλοντος είναι ένα πολλά υποσχόμενο σχέδιο το οποίο μπορεί να εφαρμοσθεί ώστε να επιτευχθεί αύξηση της αποδοτικότητας της ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα. Η ικανότητα της συλλογής ενέργειας από διαφορετικές πηγές του περιβάλλοντος δίνει τη δυνατότητα της προσαρμοστικότητας ενός συστήματος συλλογής ενέργειας στις συνεχώς μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, επιτρέποντας στο κύκλωμα να είναι ενεργειακά προσοδοφόρο ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η ενέργεια του περιβάλλοντος δεν είναι πλέον διαθέσιμη από μία ή περισσότερες από τις πηγές της. Στο παρελθόν, έχει ερευνηθεί η ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας από τις δονήσεις του περιβάλλοντος χρησιμοποιώντας άμεσα το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και τη συλλογή της μαγνητικής ενέργειας (εναλλασσόμενα μαγνητικά φορτία) χρησιμοποιώντας μαγνητοστατικά υλικά⁶⁰. Στη βιβλιογραφία, έχει γίνει αναφορά στην ταυτόχρονη συλλογή ενέργειας των δονήσεων με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών μετατροπέων αλλά και θερμικής ενέργειας με τη χρήση τριβογεννητριών⁶¹.

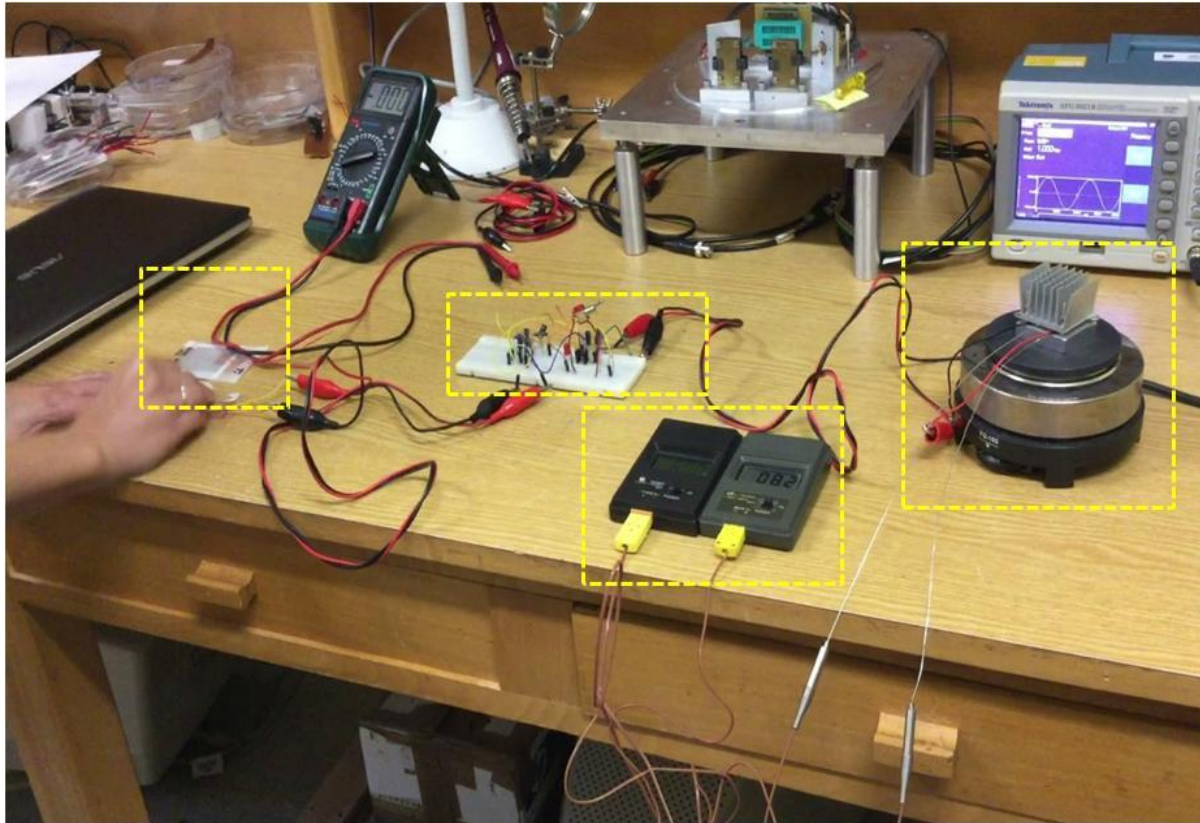
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αξιολογήθηκε ένα υβριδικό σύστημα τριβοηλεκτρικού και θερμοηλεκτρικού στοιχείου. Το κύκλωμα που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο, φαίνεται στην Εικόνα 4.14 και έχει δύο εισόδους: (1) η μία είσοδος έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει εναλλασσόμενα σήματα, όπως είναι τα σήματα των πιεζογεννητριών και των τριβογεννητριών, να τα ανορθώνει και να τα αποθηκεύει σε ένα πυκνωτή ώστε η ενέργεια που συλλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί αργότερα, και (2) η δεύτερη είσοδος έχει τη δυνατότητα να δέχεται σταθερή τάση (σήματα DC) και να αποθηκεύει την ενέργεια κατευθείαν στον πυκνωτή (χωρίς να χρειάζεται ανόρθωση). Η έξοδος του κυκλώματος λαμβάνεται από τα άκρα των δύο πυκνωτών. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα να αποθηκεύεται ενέργεια συγχρόνως από την τριβογεννήτρια και το θερμοστοιχείο.



Εικόνα 4.14 Φωτογραφία συνδυαστικού κυκλώματος συλλογής ενέργειας από δύο πηγές



Εικόνα 4.15 Υβριδικό κύκλωμα συλλογής ενέργειας από δύο πηγές : α) από μία πηγή η οποία παράγει εναλλασσόµενο σήµα όπως είναι µία τριβογεννήτρια ή µια πιεζογεννήτρια και β) από µία πηγή η οποία παράγει σταθερό τάση DC όπως είναι ένα θερμοστοιχείο ή ένα ηλιακό panel. Στο κύκλωμα υπάρχει επίσης και LED µε αντίσταση και διακόπτη για τη λειτουργία του. Το υβριδικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε, παρουσιάζεται σε επόµενο κεφάλαιο



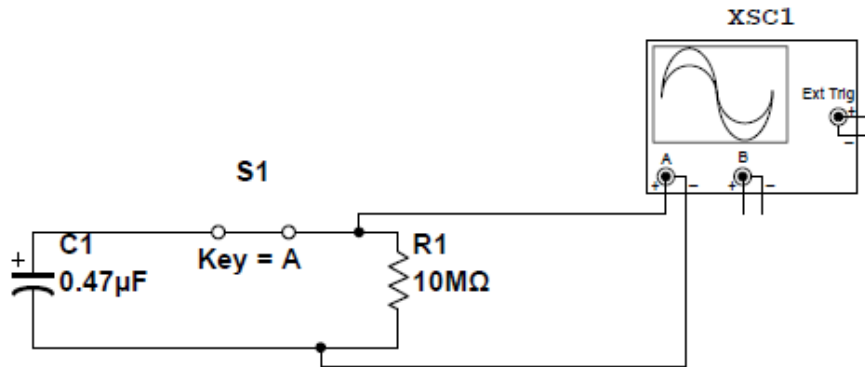
Εικόνα 4.16 Εποπτική φωτογραφία της πειραματικής διάταξης όπου φαίνονται από αριστερά προς τα δεξιά η εύκαμπτη πιεζογεννήτρια, το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας, τα δύο θερμοζεύγη για την καταγραφή της θερμοκρασιακής βαθμίδας στα άκρα της θερμοηλεκτρικής διάταξης, και η encapsulated θερμοηλεκτρική διάταξη με την ψύκτρα επάνω στο θερμαντικό στοιχείο

4.6. Κυκλώματα Επίδειξης

Προκειμένου να μελετηθεί η λειτουργία των κυκλωμάτων που κατασκευάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σε πραγματικές συνθήκες σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν δύο διατάξεις επίδειξης των οποίων η τροφοδοσία γίνονταν μέσω ενός τριβοηλεκτρικού συλλέκτη συλλογής της μηχανικής ενέργειας. Ειδικότερα κατασκευάστηκαν α) Ένα κύκλωμα RC στο οποίο συνδέεται μια αντίσταση παράλληλα σε ένα πυκνωτή, β) διατάξεις LED οι οποίες ανάβουν είτε με τη χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας του πυκνωτή είτε να ανάψουν στιγμιαία εξαιτίας της ενέργειας που δίνει η γεννήτρια χωρίς να παρεμβάλλεται στοιχείο αποθήκευσης και γ) μία διάταξη που μπορούσε να τροφοδοτήσει ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα αίσθησης για ένα μικρό χρονικό διάστημα.

4.6.1. Κύκλωμα RC-Αποφόρτιση πυκνωτή

Στην εργαστηριακή προσομοίωση, το κύκλωμα του τετραπλασιαστή φορτίστηκε με τάση 1,5V (με μία τριβογεννήτρια) και στη συνέχεια συνδέθηκε στην έξοδο του μια αντίσταση 10MΩ (Εικόνα 4.17).

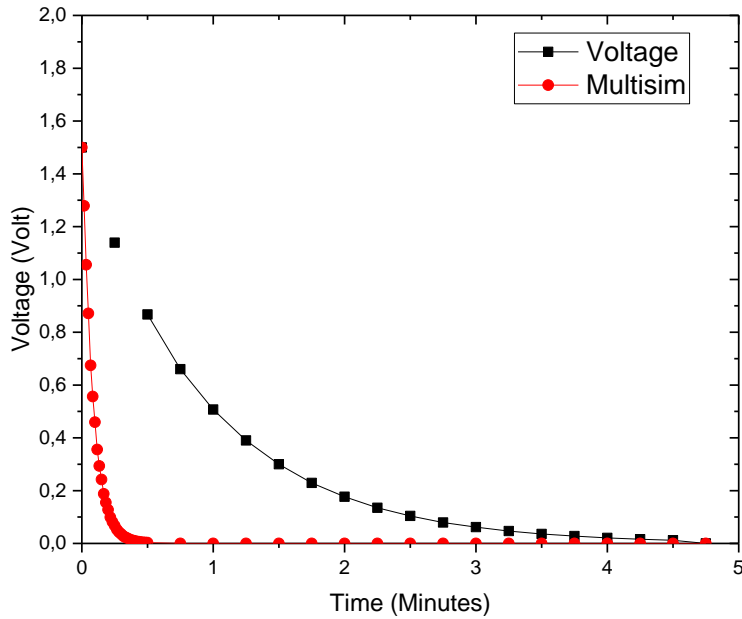


Εικόνα 4.17 Κύκλωμα RC

Στην Εικόνα 4.18 φαίνεται η εργαστηριακή αποφόρτιση του πυκνωτή, καθώς και η γραφική του προγράμματος προσομοίωσης. Τέλος, η χρονική σταθερά του κυκλώματος αποφόρτισης που χρησιμοποιήθηκε είναι:

$$\tau=RC=10M\Omega*0,47\mu F=4,7sec$$

Το πρόγραμμα προσομοίωσης δίνει μια πιο απότομη καμπύλη, αποφορτίζοντας τον πυκνωτή πιο γρήγορα σε σύγκριση με το πείραμα. Αυτό οφείλεται στην ιδανικότητα των στοιχείων της προσομοίωσης σε αντίθεση με τα πραγματικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην πλακέτα και τα οποία δεν είναι ιδανικά. (Για την αποφόρτιση του πυκνωτή βλέπε Παράρτημα Α)



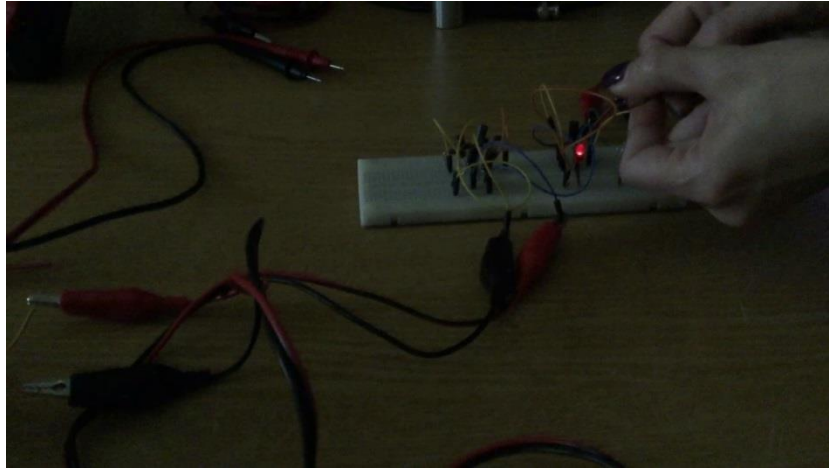
Εικόνα 4.18 Πειραματική αποφόρτιση πυκνωτή

4.6.2. LED

Στα κυκλώματα επίδειξης με LED, τα LED είτε τροφοδοτούνται από τον πυκνωτή στον οποίο είχε αποθηκευτεί ενέργεια, είτε τροφοδοτούνται στιγμιαία από τις γεννήτριες με την παρεμβολή ενός κυκλώματος ανόρθωσης για την ανόρθωση του σήματος χωρίς πρώτα να έχει αποθηκευτεί ενέργεια.

4.6.2.1. LED με αποθήκευση ενέργειας

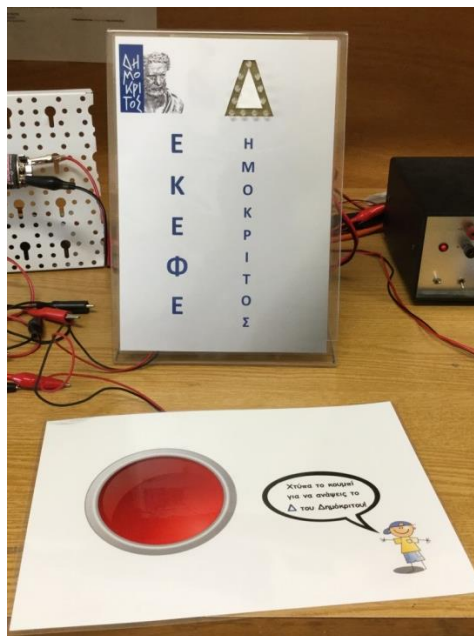
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στο υβριδικό κύκλωμα, έχει ενσωματωθεί και ένα LED μαζί με μία αντίσταση και ένα διακόπτη λειτουργίας. Το LED έχει τάση λειτουργίας περίπου 1,7V και ρεύμα περίπου 20mA. Επίσης είναι απαραίτητη και η χρήση μιας αντίστασης για τον καθορισμό του ρεύματος του κυκλώματος. Από τους υπολογισμούς η τιμή της καθορίστηκε στα 100Ω. Στην Εικόνα 4.19 φαίνεται το LED αναμμένο.



Εικόνα 4.19 Φωτογραφία με αναμμένο LED

4.6.2.2. LED χωρίς αποθήκευση ενέργειας

Χρησιμοποιήθηκαν και άλλες διατάξεις με LED οι οποίες δεν έχουν πυκνωτή αποθήκευσης της ενέργειας αλλά το σήμα ανορθώνεται μέσω ενός ανορθωτή πλήρους κύματος και χρησιμοποιείται άμεσα. Όπως είναι προφανές, τα LED αυτά μπορούν να λειτουργήσουν μόνο κατά τη στιγμή που λειτουργούν οι γεννήτριες και δίνουν σήμα. Στις Εικόνες 4.20-4.21 φαίνονται οι δύο διατάξεις.



Εικόνα 4.20 Διάταξη επίδειξης η οποία κάτω από το κόκκινο κουμπί είχε μια τριβογεννήτρια και με χτύπημα άναβαν τα LED του Δημόκριτου. Χρησιμοποιήθηκε για το Athens Science Festival 2016

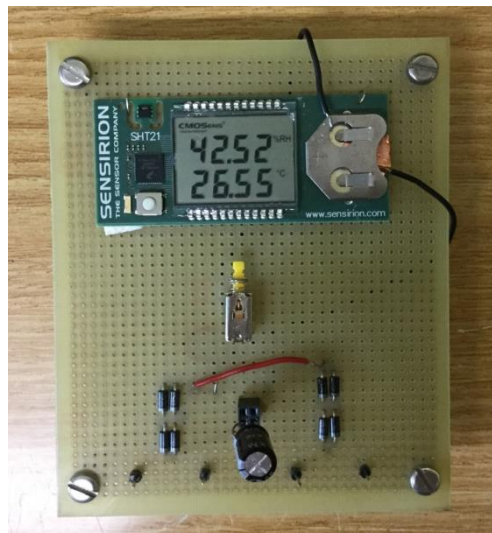


Εικόνα 4.21 Αυτοκινητάκι με φώτα LED

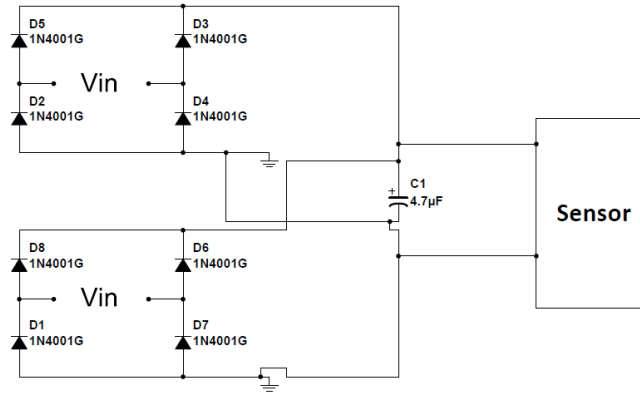
Τα κυκλώματα επίδειξης των Εικόνων 4.20-4.21 δημιουργήθηκαν στα πλαίσια του Athens Science Festival 2016 όπου συμμετείχε και το ερευνητικό κέντρο Δημόκριτος.

4.6.3. Αισθητήρας Θερμοκρασίας και Υγρασίας

Μία από τις πιο βασικές εφαρμογές των energy harvesters είναι η τροφοδοσία ενός αισθητήρα. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας της εταιρίας Sensirion . Επιλέχθηκε αυτός ο αισθητήρας γιατί έχει πολύ μικρές απαιτήσεις σε ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, η τάση που χρειάζεται για να λειτουργήσει ο αισθητήρας κυμαίνεται από 2,1 έως 3,6 Volt ενώ η ενεργειακή του κατανάλωση είναι 3,2μW για μετρήσεις με συχνότητα του 1sec. Στην Εικόνα 4.22 παρουσιάζεται ο εξεταζόμενος αισθητήρας ενώ στην Εικόνα 4.23 η σχηματική του απεικόνιση.



Εικόνα 4.22 Αισθητήρας της εταιρίας Sensirion για μέτρηση της υγρασίας και της θερμοκρασίας στο χώρο



Εικόνα 4.23 Σχηματική απεικόνιση κυκλώματος αισθητήρα

Το κύκλωμα αποτελείται από 2 ανορθωτές πλήρους κύματος, από τον αισθητήρα και από μία βάση δύο θέσεων για τους πυκνωτές. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα της αλλαγής του αποθηκευτικού χώρου ανάλογα με την εισρέουσα ενέργεια και τις απαιτήσεις σε τροφοδοσία. Επίσης, ενώ αποδείχθηκε ότι σε βάθος χρόνου ο Quadripler αποθηκεύει περισσότερη ενέργεια, οι γεννήτριες που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή ενέργειας έδιναν πολύ μεγάλη τάση ανοιχτού κυκλώματος (περίπου 240V), άρα δεν κρίθηκε απαραίτητο να γίνει πολλαπλασιασμός της τάσης.

Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στη σύγχρονη κοινωνία, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο και αποτελούν την τεχνολογική πλατφόρμα της νέας αντίληψης για συλλογή και επεξεργασία της πληροφορίας, του «Διαδικτύου των Αντικειμένων» (Internet of Things). Οι αισθητήρες αυτοί έχουν τη δυνατότητα να τοποθετηθούν στα πιο απομακρυσμένα μέρη και να στείλουν τα δεδομένα που συλλέγουν σε έναν κόμβο επεξεργασίας. Ωστόσο, για να πραγματοποιηθεί αυτό πρέπει να τροφοδοτηθούν από συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες και οι πυκνωτές, οι οποίες όμως έχουν περιορισμένη χωρητικότητα, με αποτέλεσμα να αδυνατούν να εξασφαλίσουν την αδιάλειπτη λειτουργία των αισθητήρων. Γι αυτό το σκοπό, χρησιμοποιούνται μικρογεννήτριες, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν ηλεκτρική ενέργεια από την ενέργεια που είναι διαθέσιμη στο περιβάλλον (ηλιακή, μηχανική, θερμική). Στο πλαίσιο αυτό, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η κατασκευή, ο χαρακτηρισμός και η σύγκριση κυκλωμάτων συλλογής ενέργειας από τις μηχανικές δονήσεις του περιβάλλοντος.

Αρχικά, έγινε η ανάλυση ενός αυτόνομου συστήματος ενέργειας, καθώς και των συστημάτων που το απαρτίζουν. Ένα αυτόνομο σύστημα ενέργειας αποτελείται από α) τον συλλέκτη ενέργειας, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να συλλέγει ενέργεια από τις μηχανικές δονήσεις, από τη θερμότητα ή από την ακτινοβολία του ηλιακού φωτός, β) το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, γ) το κύκλωμα διαχείρισης ενέργειας και δ) το φορτίο το οποίο τροφοδοτεί (π.χ. ασύρματο δίκτυο αισθητήρων). Το σήμα από τις τριβογεννήτριες και τις πιεζογεννήτριες πρέπει να ανορθωθεί πριν αποθηκευτεί σε ένα πυκνωτή, διότι είναι τυχαίο και χρονικά μεταβαλλόμενο. Στα αυτόνομα συστήματα, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να είναι ένας πυκνωτής ή μια μπαταρία. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε ο πυκνωτής, διότι, σε σχέση με μια μπαταρία έχει απλούστερο κύκλωμα φόρτισης, ενώ επιπροσθέτως φορτίζεται ταχύτερα και αντέχει σε περισσότερους κύκλους φόρτισης.

Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση των παθητικών και των ενεργητικών κυκλωμάτων που υλοποιήθηκαν. Εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι, τα παθητικά κυκλώματα έχουν απλούστερη δομή μιας και αποτελούνται από παθητικά στοιχεία όπως είναι οι δίοδοι και οι πυκνωτές. Τα ενεργητικά κυκλώματα είναι πιο περίπλοκα στο σχεδιασμό και στην υλοποίησή τους και

σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτούν και εξωτερικό σήμα ελέγχου, αλλά αποδεικνύεται ότι είναι πιο αποδοτικά ως προς τα παθητικά κυκλώματα.

Στη συνέχεια μελετήθηκαν τρία είδη κυκλωμάτων: α) ο ανορθωτής πλήρους κύματος (Full Wave Rectifier), β) ο διπλασιαστής τάσης (Voltage Doubler) και γ) ο τετραπλασιαστής τάσης (Quadrupler). Ο σχεδιασμός των κυκλωμάτων βασίστηκε στην ανάλυση Fourier των σημάτων των διατάξεων συλλογής ενέργειας (τριβογεννήτριες, πιεζογεννήτριες) Από την ανάλυση Fourier προέκυψε ότι το σήμα αναλύεται κυρίως σε συχνότητες μέχρι τα 70Hz, οπότε αντίστοιχα έγινε ο σχεδιασμός των κυκλωμάτων για την περιοχή συχνοτήτων έως 60 Hz, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων με τη γεννήτρια σήματος επιβεβαίωσαν ότι τα κυκλώματα λειτούργησαν ιδανικά σε συχνότητες μέχρι 50Hz (συχνότητα δοκιμής). Από τα πειραματικά αποτελέσματα προέκυψε ότι ο τετραπλασιαστής τάσης έχει τη δυνατότητα να συλλέγει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας σε σύγκριση με τα άλλα κυκλώματα. Τέλος παρατηρήθηκε ότι ακόμα και ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος του περιβάλλοντος είναι δυνατό να συλλεχθεί από το κύκλωμα και να φορτίσει τον πυκνωτή του τετραπλασιαστή τάσης μέχρι τα 8 Volt.

Παράλληλα, υλοποιήθηκε ένα υβριδικό κύκλωμα το οποίο ήταν σε θέση να συλλέγει σήματα από δύο διαφορετικούς συλλέκτες ενέργειας: μια μικρογεννήτρια συλλογής μηχανικής ενέργειας και μια θερμογεννήτρια, βασισμένη στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο.

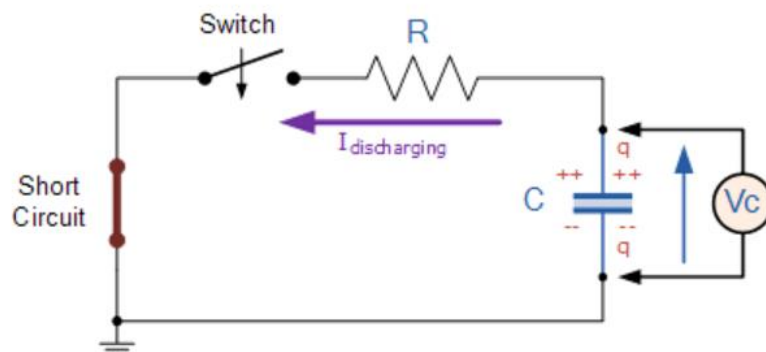
Τέλος, κατασκευάστηκαν διατάξεις επίδειξης, δηλαδή κυκλώματα που έχουν τη δυνατότητα να τροφοδοτήσουν ένα φορτίο (ηλεκτρονικό κύκλωμα, LED) με την αποθηκευμένη ενέργεια των πυκνωτών.

Έχοντας ως στόχο τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας τέτοιων κυκλωμάτων θα μπορούσαν να μελετηθούν:

- τα ενεργά κυκλώματα, που έχουν σαφώς μεγαλύτερη αποδοτικότητα παρόλο που είναι πιο πολύπλοκα
- ένα σύστημα power management για τη σταθεροποίηση της τάσης εξόδου
- μια διαφορετική υλοποίηση του πολλαπλασιασμού της τάσης, για παράδειγμα με χρήση ενός ανορθωτή για την ανόρθωση του σήματος και ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης DC-DC

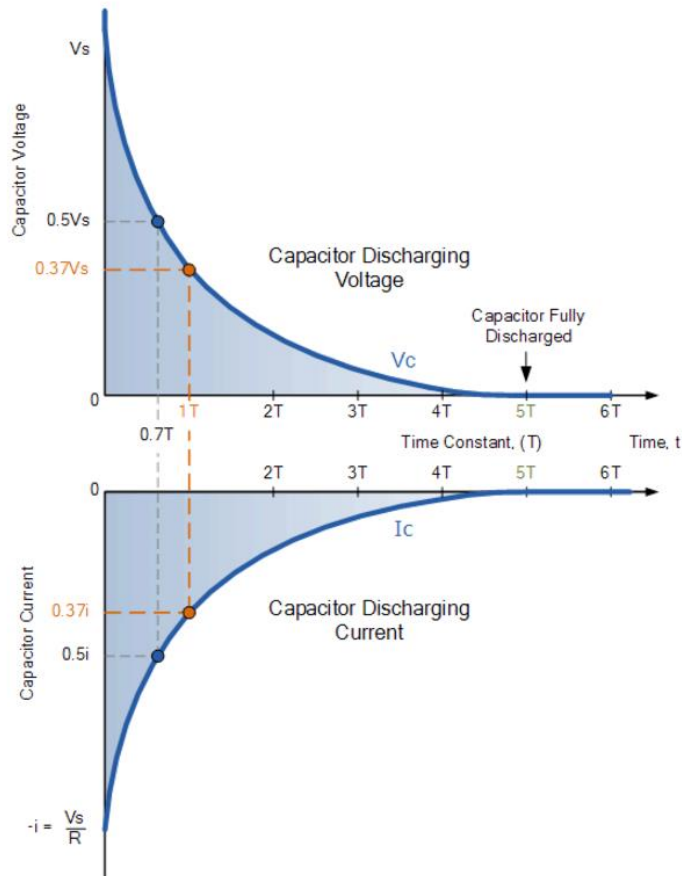
Παράρτημα Α, Αποφόρτιση Πυκνωτή (Κύκλωμα RC)

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό ενός πυκνωτή πέρα από τη φόρτιση του και του ηλεκτρικού φορτίου που φέρει, είναι και η αποφόρτιση/εκφόρτιση του. Η αποφόρτιση του δείχνει πόσο γρήγορα «χάνει» τη φόρτιση του όταν σε αυτόν είναι συνδεδεμένο ένα συγκεκριμένο φορτίο-αντίσταση. Το φορτίο ενός πυκνωτή δίνεται από τον τύπο $Q=CV$. Η αποφόρτιση του δεν είναι ποτέ στιγμιαία αλλά χρειάζεται ένα ορισμένο χρονικό διάστημα για να αποφορτιστεί πλήρως. Το χρονικό διάστημα που χρειάζεται ένας πυκνωτής να αποφορτιστεί (ή να φορτιστεί αντίστοιχα) ονομάζεται αλλιώς και μεταβατική απόκριση και αντιστοιχεί σε 5 χρονικές σταθερές (5τ) ή $5T$. Αυτή η μεταβατική απόκριση, μετριέται σε όρους $\tau=RC$, όπου τ σε δευτερόλεπτα, R σε Ω και C σε Farad. Επίσης, η μία χρονική σταθερά $1T=\tau$ αντιστοιχεί στο 63% της μέγιστης φόρτισης του πυκνωτή. Άρα για ένα πυκνωτή ο οποίος είναι φορτισμένος με μία μέγιστη τάση, η τάση στα άκρα του πυκνωτή μετά από μία χρονική σταθερά $1T$, έχει μειωθεί στο 63% της αρχικής τιμής του, το οποίο αντιστοιχεί στο 37% της τελικής τιμής του. Ένα τέτοιο κύκλωμα, φαίνεται στην Εικόνα 1:



Παράρτημα Εικόνα 1 Κύκλωμα αποφόρτισης RC

Καθώς ο πυκνωτής αποφορτίζεται, χάνει το φορτίο του σε μειούμενο ρυθμό. Κατά την έναρξη του φαινομένου, οι αρχικές συνθήκες του κυκλώματος είναι $t=0$, $i=0$ και $q=Q$. Η τάση στα άκρα των πλακών του πυκνωτή, ισούται με την τάση τροφοδοσίας δηλαδή $V_C=V_S$. Καθώς η τάση στα άκρα του πυκνωτή έχει τη μέγιστη τιμή της, το ρεύμα αποφόρτισης ρέει στο κύκλωμα. Στην Εικόνα 2 φαίνονται οι θεωρητικές γραφικές αποφόρτισης της τάσης και του ρεύματος του πυκνωτή:



Παράρτημα Εικόνα 2 Θεωρητικές καμπύλες αποφόρτισης της τάσης και του ρεύματος του πυκνωτή⁶²

Όταν αποσυνδεθεί η πηγή από το κύκλωμα, ο πυκνωτής αρχίζει να αποφορτίζεται, με τις καμπύλες να είναι πιο απότομες αρχικά (ο ρυθμός εκφόρτισης είναι πιο γρήγορος στην αρχή) και στη συνέχεια οι καμπύλες γίνονται πιο ομαλές καθώς ο πυκνωτής χάνει το φορτίο του με πιο αργό ρυθμό. Καθώς η αποφόρτιση συνεχίζεται, η τάση V_C μειώνεται όπως μειώνεται και το ρεύμα αποφόρτισης. Για ένα κύκλωμα R-C η τάση στα άκρα του πυκνωτή (V_C) ως συνάρτηση του χρόνου, είναι:

$$V_C = V_S \times e^{-t/RC}$$

Όπου V_C είναι η τάση στα άκρα του πυκνωτή

V_S είναι η τάση της πηγής-γεννήτριας

t είναι ο χρόνος από τη στιγμή που γίνεται η αποσύνδεση της πηγής τροφοδοσίας

$RC=\tau$ είναι η χρονική σταθερά του κυκλώματος αποφόρτισης

Παράρτημα Β, Ανάλυση Fourier

Στα μαθηματικά, η ανάλυση Fourier είναι η μελέτη του τρόπου όπου οι γενικές συναρτήσεις μπορούν να αναπαρασταθούν ή να γίνει προσέγγιση από το άθροισμα απλούστερων τριγωνομετρικών συναρτήσεων. Η ανάλυση Fourier (Fourier Analysis) εξελίχτηκε από τη μελέτη των σειρών Fourier και πήρε το όνομα της από τον Joseph Fourier, ο οποίος έδειξε ότι η αναπαράσταση μιας συνάρτησης ως άθροισμα των τριγωνομετρικών συναρτήσεων, απλοποιεί σημαντικά τη μελέτη της μεταφοράς της θερμότητας.

Σήμερα, το θέμα της ανάλυσης Fourier καλύπτει ένα ευρύ φάσμα των μαθηματικών. Στις επιστήμες και τη μηχανική, η διαδικασία της ανάλυσης μιας συνάρτησης σε διάφορες συνιστώσες συχνά αποκαλείται ανάλυση Fourier ενώ η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή η διαδικασία σύνθεσης της συνάρτησης από αυτά τα κομμάτια είναι γνωστή ως σύνθεση Fourier. Για παράδειγμα, ο προσδιορισμός των συχνοτήτων που υπάρχουν σε ένα μουσικό κομμάτι, μπορεί να γίνει με τον μετασχηματισμό Fourier του δείγματος. Τότε κάποιος θα μπορούσε στη συνέχεια να συνθέσει εκ νέου τον ίδιο ήχο συμπεριλαμβάνοντας τις συχνότητες των συστατικών όπως αυτές προέκυψαν από την ανάλυση Fourier. Στα μαθηματικά, ο όρος ανάλυση Fourier αναφέρεται συχνά στη μελέτη και των δύο λειτουργιών. Ο μετασχηματισμός Fourier είναι επίσης χρήσιμος ως μία συμπαγή αναπαράσταση του σήματος. Για παράδειγμα, η συμπίεση JPEG χρησιμοποιεί μια παραλλαγή του μετασχηματισμού Fourier (διακριτός μετασχηματισμός συνημιτόνου) μικρών τετράγωνων κομματιών μιας ψηφιακής εικόνας.

Κατά την επεξεργασία των σημάτων όπως είναι τα ακουστικά, τα ραδιοκύματα, τα κύματα του φωτός, τα σεισμικά κύματα ή ακόμα και οι εικόνες, η ανάλυση Fourier μπορεί να απομονώσει τα «συστατικά» της κυματομορφής και να τα συγκεντρώσει για ευκολότερη ανίχνευση ή ακόμα και αφαίρεση. Μια πολύ μεγάλη οικογένεια τεχνικών επεξεργασίας σήματος αποτελείται από μετασχηματισμό Fourier για την επεξεργασία των δεδομένων⁶³. Κάποια παραδείγματα περιλαμβάνουν:

- Επεξεργασία των ηχογραφήσεων με μια σειρά από ζωνοπερατά φίλτρα
- Επεξεργασία εικόνας για την αφαίρεση των ανισοτροπικών αντικειμένων από τα βίντεο ή τις παρεμβολές των ραδιοσυχνοτήτων από μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανική

- Συσχέτιση παρόμοιων φωτογραφιών για την ευθυγράμμιση τους
- Κρυσταλλογραφία ακτίνων Χ για την ανακατασκευή μιας κρυσταλλικής δομής από το πρότυπο περίθλασης του
- Πολλές μορφές φασματοσκοπίας, συμπεριλαμβανομένης και της υπέρυθρης ακτινοβολίας και της πυρηνικής φασματοσκοπίας μαγνητικού συντονισμού
- Ανάλυση ήχου
- Παθητικά σόναρ για τον προσδιορισμό των στόχων με βάση το θόρυβο των μηχανημάτων

Για τους συλλέκτες ενέργειας τα σήματα που εξετάζονται μεταφέρουν ενέργεια. Αν θεωρήσουμε ότι η $v(t)$ είναι η τάση πάνω σε μία αντίσταση R , δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ένα ρεύμα $i(t)$, η στιγμιαία ισχύς $p(t)$ ανά Ohm καθορίζεται από τον τύπο:

$$p(t) = \frac{v(t)i(t)}{R} = i^2(t)$$

Η συνολική ενέργεια και E και η μέση ισχύς ανά ohm είναι:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} i^2(t) dt \text{ σε joules}$$

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i^2(t) dt \text{ σε watts}$$

Για ένα αυθαίρετο χρονοσυνεχές σήμα $x(t)$ η κανονικοποιημένη ενέργεια του καθορίζεται ως:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt$$

Αντίστοιχα, η κανονικοποιημένη μέση ισχύς P του σήματος $x(t)$ είναι:

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |x(t)|^2 dt$$

Βασιζόμενοι στις παραπάνω εξισώσεις, τα σήματα μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες:

- Το $x(t)$ είναι ενεργειακό σήμα (energy signal) αν και μόνο αν $0 < E < \infty$ και $P=0$.
- Το $x(t)$ είναι σήμα ισχύος αν και μόνο αν $0 < P < \infty$ υπονοώντας έτσι ότι $E=0$
- Τα σήματα τα οποία δεν ικανοποιούν καμία από τις παραπάνω συνθήκες δεν αναφέρονται ούτε ως σήματα ισχύος αλλά ούτε ως ενεργειακά σήματα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα περιοδικό σήμα είναι ένα σήμα ισχύος όταν το ενεργειακό του περιεχόμενο ανά περίοδο είναι πεπερασμένο και άρα η μέση ισχύς του σήματος χρειάζεται να υπολογιστεί μόνο για μία περίοδο.

Παράρτημα Γ, Συλλογή Ηλεκτρομαγνητικού Θορύβου από το περιβάλλον

Γ.1 Ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος από το περιβάλλον

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα τελευταία χρόνια, πολλά εργαστήρια που ασχολούνται με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, εστιάζουν την προσοχή τους σε συστήματα ικανά να συγκεντρώνουν χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια από τις ήδη υπάρχουσες περιβαλλοντικές πηγές⁶⁴⁶⁵. Τα φωτοβολταϊκά μετατρέπουν το ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος σε ηλεκτρική ενέργεια και παρέχουν σχετικά υψηλή απόδοση. Αυτές οι συσκευές είναι συνήθως χαμηλού κόστους και παρέχουν τάση και ρεύμα ικανές ώστε να τροφοδοτήσουν μικρο-κυκλώματα. Η μετατροπή των σημάτων RF του περιβάλλοντος είναι πολύ πιο απαιτητική λόγω του εύρους ζώνης των σημάτων, αλλά και της μικρής ποσότητας ενέργειας που φέρουν. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το σύστημα crystal radio kits⁶⁶ (τύπος ραδιοφώνου) που φτιάχτηκε ώστε να τροφοδοτείται απευθείας από την ενέργεια των κυμάτων AM των ραδιοφωνικών σταθμών. Το ραδιόφωνο αυτό αναπαράγει τον ήχο μέσω ακουστικών υψηλής αντίστασης χωρίς να χρειάζεται μια εξωτερική πηγή ενέργειας. Ένα ακόμα παράδειγμα παρόμοιας τεχνολογίας χρησιμοποιεί τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παράγονται από το ραδιόφωνο ενός κινητού τηλεφώνου για να τροφοδοτήσει LED.

Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει την πιθανότητα της συλλογής ενέργειας από τα μαγνητικά πεδία των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας υψηλών τάσεων⁶⁷. Μερικές από αυτές τις τεχνικές χρησιμοποιούν ένα μετασχηματιστή ρεύματος για να μετατρέψουν τα μαγνητικά πεδία σε χρησιμοποιήσιμο ρεύμα. Μία πρόσφατη εργασία⁶⁸ περιγράφει τη συλλογή ενέργειας από καλώδια ρεύματος που συνδέονται με ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα συστήματα που στηρίζονται στους υπάρχοντες μετασχηματιστές, απαιτούν το ηλεκτροφόρο καλώδιο να περάσει μέσα από αυτούς, αλλά υπάρχουν και μερικά εμπορικά προϊόντα⁶⁹, τα οποία μπορούν να προσκολληθούν σε καλώδιο υψηλής τάσης.

Από το νόμο του Ampere⁷⁰⁷¹, είναι γνωστό ότι το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από μία ομάδα καλωδίων που βρίσκονται πολύ κοντά το ένα στο άλλο, (δεσμίδα καλωδίων),

εξαρτάται από το ρεύμα που ρέει μέσα από αυτά. Τα καλώδια της φάσης και του ουδετέρου επειδή μεταφέρουν το ρεύμα σε αντίθετες κατευθύνσεις, θα έπρεπε να παράγουν μαγνητικά πεδία τα οποία αλληλοεξουδετερώνονται. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει είτε λόγω της απόστασης ανάμεσα στα καλώδια της φάσης και του ουδετέρου είτε λόγω των ανισορροπιών που υπάρχουν στη γείωση (ground loop)⁷². Άλλες μελέτες⁷³ δείχνουν επίσης ότι το ατμοσφαιρικό μαγνητικό πεδίο ποικίλει από 0,01 έως 10 Gauss κοντά σε συσκευές και συνήθως υπερβαίνει τα 100 Gauss σε βιομηχανίες. Αυτό το μαγνητικό πεδίο μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε ηλεκτρική πηγή ενέργειας με έξυπνο σχεδιασμό και προσεκτική τοποθέτηση των αισθητήρων. Ένας τυπικός χώρος γραφείου έχει πυκνό δίκτυο ηλεκτρικών γραμμών και ορισμένα από αυτά τα καλώδια φέρουν ρεύματα της τάξης των 5-10 amperes.

Το μαγνητικό πεδίο σε ένα σημείο P του χώρου που απέχει απόσταση r από έναν αγωγό απείρου μήκους και μεταφέρει εναλλασσόμενο ρεύμα με μέγιστο πλάτος I_0 και συχνότητα ω , είναι:

$$B = \frac{\mu I_0 \sin(\omega t)}{2\pi r}$$

όπου B είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής και μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα που δίνεται από τον τύπο $\mu_r \times \mu_0$ (μ_r είναι η σχετική διαπερατότητα). Το μέγεθος της μαγνητικής ροής που ενεργεί σε ένα πηνίο με N σπείρες, που διαπερνά εγκάρσια διατομή A και είναι κάθετη στην επιφάνεια του μαγνητικού πεδίου, είναι:

$$\varphi = NBA$$

Η επαγόμενη τάση στο πηνίο λόγω του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής που ενεργεί πάνω σε αυτό είναι:

$$V = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{NA\mu I \omega \cos(\omega t)}{2\pi r}$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι η καθαρή τάση που επάγεται σε ένα πηνίο, το οποίο βρίσκεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, αυξάνεται ανάλογα με τη συχνότητα, τον αριθμό των σπειρών, καθώς και την περιοχή στην οποία είναι μέσα.

Γ.2 Περιορισμοί

Σε αντίθεση με άλλα συστήματα συλλογής ενέργειας, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί για την αξιοποίηση της ενέργειας από τα μαγνητικά πεδία των γραμμών εναλλασσόμενου ρεύματος. Πρώτον, η ένταση του μαγνητικού πεδίου που προέρχεται από τις γραμμές ρεύματος μπορεί να αξιοποιηθεί μόνο όταν το σύστημα βρίσκεται κοντά στις γραμμές AC, γεγονός που περιορίζει την ελευθερία της τοποθέτησης του harvester. Ωστόσο, αυτή η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ακόμα και αν τα καλώδια βρίσκονται μέσα σε τοίχο (όπως στην περίπτωση του εργαστηρίου). Αν τα καλώδια τροφοδοσίας είναι τοποθετημένα μέσα σε μεταλλικούς αγωγούς, τότε το μεγαλύτερο μέρος του μαγνητικού πεδίου περιορίζεται στο εσωτερικό τους και οποιαδήποτε δυνατότητα για energy harvesting μειώνεται σημαντικά. Δεύτερος περιορισμός του συστήματος είναι η απαίτηση για ένα εξαιρετικά αποδοτικό κύκλωμα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και ένας super-capacitor με ελάχιστες απώλειες για την αποθήκευση του φορτίου⁷⁴. Συμπερασματικά, ο σχεδιασμός ενός συστήματος harvesting είναι δύσκολος, δεδομένου ότι η ισχύς που προέρχεται από τις πηγές του περιβάλλοντος τείνει να είναι ακανόνιστη, διαλείπουσα και μικρή. Επίσης, επειδή το σήμα είναι εναλλασσόμενο, απαιτείται ένας μετατροπέας AC-DC.

Αναφορές

- ¹ Spie (2013). "Vassili Karanassios: Energy scavenging to power remote sensors". SPIE Newsroom. doi:10.1117/2.3201305.05
- ² Peiris, V. (2013). "Highly integrated wireless sensing for body area network applications". SPIE Newsroom. doi:10.1117/2.1201312.005120
- ³ <https://www.ucc.ie/en/media/research/misl/2009publications/pervasive09.pdf>
- ⁴ Z. Wang, "Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors- Principles, problems and perspectives", *Faraday Discussions*, vol 176, 2014
- ⁵ S. Priya, D. Inman, "Energy Harvesting Technologies", Springer, 2009
- ⁶ D. P. Arnold, "Review of microscale magnetic power generation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 11, pp. 3940–3951, Nov. 2007
- ⁷ P.D.Mitcheson, E. M.Yeatman, G.K. Rao, A. S.Holmes, and T. C.Green, "Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices," *Proc. IEEE*, vol. 96, no. 9, pp. 1457–1486, Sep. 2008
- ⁸ E. Lefeuvre, A. Badel, A. Benayad, L. Lebrun, C. Richard, and D. Guyomar, "A comparison between several approaches of piezoelectric energy harvesting," *J. Phys. IV France*, vol. 128, pp. 177–186, 2005
- ⁹ W. Q. Liu, Z. H. Feng, J. He, and R. B. Liu, "Maximum mechanical energy harvesting strategy for a piezoelement," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, pp. 2130–2136, 2007
- ¹⁰ A. Hande, A. Rajasekaran, and D. Bhatia, "Buck-boost converter based power conditioning circuit for low excitation vibration energy harvesting," presented at the 3rd Annu. Austin Conf. Integrated Circuits and Systems, Austin, TX, 2008, [Online]. Available: [http://www.texasmicropower.com/publications/ArvindhR UTD EH Full- Paper.pdf](http://www.texasmicropower.com/publications/ArvindhR%20UTD%20EH%20Full-Paper.pdf)
- ¹¹ T.T. Le, J.Han, A. von Jouanne, K.Mayaram, and T. S. Fiez, "Piezoelectric micro-power generation interface circuits," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 6, pp. 1411–1420, Jun. 2006.
- ¹² C. Peters, M. Ortmanns, and Y. Manoli, "Low power high performance voltage rectifier for autonomous microsystems," in *Proc. PowerMEMS*, Freiburg, Germany, 2007, pp. 217–220
- ¹³ Y. H. Lam, W. H. Ki, and C. Y. Tsui, "Integrated low-loss CMOS active rectifier for wirelessly powered devices," *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, vol. 53, no. 12, pp. 1378–1382, Dec. 2006.
- ¹⁴ T.T. Le, J.Han, A. von Jouanne, K.Mayaram, and T. S. Fiez, "Piezoelectric micro-power generation interface circuits," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 6, pp. 1411–1420, Jun. 2006
- ¹⁵ J. Colomer-Farrarons, P. Miribel-Catal`a, A. Saiz-Vela, M. Puig-Vidal, and J. Samitier, "Power-conditioning circuitry for a self-powered system based on micro PZT generators in a 0.13- μm low-voltage low-power technology," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 9, pp. 3249–3257, Sep. 2008
- ¹⁶ S. Hashemi, M. Sawan, and Y. Savaria, "A novel low-drop CMOS active rectifier for RF-powered devices: Experimental result," *Microelectron. J.*, vol. 40, pp. 1547–1554, Nov. 2009.
- ¹⁷ C. Peters, F. Henrici, M. Ortmanns, and Y. Manoli, "High-bandwidth floating gate CMOS rectifiers with reduced voltage drop," in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, Seattle, WA, May 2008, pp. 2598–2601

- ¹⁸ J. Hu and H. Min, "A low power and high performance analog front end for passive RFID transponder," in Proc. 4th IEEE Workshop Autom. Identification Adv. Technol., 2005, pp. 199–204
- ¹⁹ B. Rue, D. Levacq, and D. Flandre, "Low-voltage low-power high temperature SOI CMOS rectifiers," in Proc. Int. SOI Conf., Niagara Falls, NY, Oct. 2006, pp. 65–66
- ²⁰ C. Peters, O. Kessling, F. Henrici, M. Ortmanns, and Y. Manoli, "CMOS integrated highly efficient full wave rectifier," in Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst., New Orleans, LA, May 2007, pp. 2415–2418
- ²¹ M. D. Seeman, S. R. Sanders, and J. M. Rabaey, "An ultra-low-power power management IC for energy-scavenged Wireless Sensor Nodes," in Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf., Rhodes, Greece, 2008, pp. 925–931.
- ²² G. Bawa and M. Ghovanloo, "Analysis, design, and implementation of a high-efficiency full-wave rectifier in standard CMOS technology," *Analog. Integr. Circ. Sig. Process.*, vol. 60, no. 1–2, pp. 71–81, Aug. 2009
- ²³ S. Guo and H. Lee, "An efficiency-enhanced integrated CMOS rectifier with comparator-controlled switches for transcutaneous powered implants," in Proc. IEEE Custom Integr. Circuits Conf., San Jose, CA, Sep. 2007, pp. 385–388
- ²⁴ Shu, Y.C. and Lien, I.C. (2006) Analysis of power outputs for piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Materials and Structures*, 15, 1499–1502
- ²⁵ Ottman, G.K., Hofmann, H.F., Bhatt, A.C., and Lesieutre, G.A. (2002) Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17, 669–676
- ²⁶ Guyomar, D., Badel, A., Lefeuvre, E., and Richard, C. (2005) Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing. *IEEE Transactions of Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 52, 584–595
- ²⁷ Ottman, G.K., Hofmann, H.F., and Lesieutre, G.A. (2003) Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18, 696–703
- ²⁸ Guan, M.J. and Liao, W.H. (2007) On the efficiencies of piezoelectric energy harvesting circuits towards storage device voltages. *Smart Materials and Structures*, 16, 498–505
- ²⁹ Kong, N., Ha, D.S., Erturk, A., and Inman, D.J. (2010) Resistive impedance matching circuit for piezoelectric energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21. doi: 10.1177/1045389X09357971
- ³⁰ Lefeuvre, E., Audigier, D., Richard, C., and Guyomar, D. (2007) Buck-boost converter for sensorless power optimization of piezoelectric energy harvester. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22, 2018–2025
- ³¹ S. Roundy, "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion", 2003
- ³² D. A. Bennett, R. H. Selfridge, J. N. Harb, D. T. A. Comer, "A control circuit for a microsensor hybrid power supply", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, Feb. 2004
- ³³ <http://www.truesolarautonomy.com>
- ³⁴ D. Shmilovitz, "On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters," *Electric Power Applications, IEE Proceedings* - ,52, pp. 239-248, 2005

- ³⁵ H. Nagayoshi, T. Kajikawa, T. Sugiyama, "Comparison of maximum power point control methods for thermoelectric power generator", Proceedings of IEEE 21st International Conference on Thermoelectronics, 2002, pp. 450-453
- ³⁶ T. Torfs, V. Leonov, C. Van Hoof, B. Gyselinckx, "Body-Heat Powered Autonomous Pulse Oximeter", 5th IEEE Conference on Sensors, 2006, pp. 427-430
- ³⁷ L. Mateu, FhG, PowerMEMS 2007, Power management for energy harvesting applications (P. Spies, M. Pollak, G. Rohmer) – <http://www.smart-power.fraunhofer.de>
- ³⁸ I. Doms, P. Merken, C. Van Hoof, "Comparison of DC-DC-converter Architectures of Power Management Circuits for Thermoelectric Generators", Proceedings of 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-5
- ³⁹ N.S. Shenck J.A. Paradiso, "Energy Harvesting with Shoe-Mounted Piezoelectrics", IEEE Micro 21, pp. 30-42, 2001
- ⁴⁰ T. Torfs, V. Leonov, C. Van Hoof, B. Gyselinckx, "Body-Heat Powered Autonomous Pulse Oximeter", 5th IEEE Conference on Sensors, 2006, pp. 427-430
- ⁴¹ I. Doms, P. Merken, R. Mertens, C. Van Hoof, "A Capacitive Power-Management Circuit for Micropower Thermoelectric Generators with a 2.1 μ W Controller", Presented at ISSCC 2008
- ⁴² N. J. Guilar, R. Amirtharajah, P. J. Hurst, "A Full-Wave Rectifier for Interfacing with Multi-Phase Piezoelectric Energy Harvesters", 2008 IEEE Int. Solid-State Circ. Conf. (ISSCC) Dig. Tech. Pap., Feb. 2008, pp. 302-303, 615
- ⁴³ T. Umeda, H. Yoshida, S. Sekine, Y. Fujita, T. Suzuki, S. Otaka, "A 950-MHz rectifier circuit for sensor network tags with 10-m distance", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 41, no. 1, pp. 35-41, Jan. 2006
- ⁴⁴ J. Han, A. von Jouanne, T. Le, K. Mayaram, T.S. Fiez, "Novel Power Conditioning Circuits for Piezoelectric Micro Power Generators", 19th annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol. 3, pp. 1541-1546, 2004
- ⁴⁵ H. Nishiyama, "Performance of Energy Harvesting Circuits for Piezoelectric Generator under Weak Vibration", Power Electronics and Motion Control Conference, 2012
- ⁴⁶ J. Qiu, "Comparison between four piezoelectric energy harvesting circuits", Higher education press and springer, 153-159, 2009
- ⁴⁷ <http://www.electronics-tutorials.ws/blog/unregulated-power-supply.html>
- ⁴⁸ Liu, Mingliang (2006), Demystifying Switched Capacitor Circuits, Newnes, ISBN 0-7506-7907-7
- ⁴⁹ Yuan, Fei (2010), CMOS Circuits for Passive Wireless Microsystems, Springer, ISBN 1-4419-7679-5
- ⁵⁰ Peluso, Vincenzo; Steyaert, Michiel; Sansen, Willy (1999), Design of Low-voltage Low-power CMOS Delta- Sigma A/D Converters, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-8417-2
- ⁵¹ Y. Hu, L. Lin, Y. Zhang and Z. L. Wang, Adv. Mater., 2012, 24, 110–114
- ⁵² G. Zhu, A. C. Wang, Y. Liu, Y. Zhou and Z. L. Wang, Nano Lett., 2012, 12, 3086–3090
- ⁵³ J. Dicken, P. D. Mitcheson, I. Stoianov and E. M. Yeatman, IEEE Trans. Power Electron., 2012, 27, 4514–4529
- ⁵⁴ L. M. Swallow, J. K. Luo, E. Siores, I. Patel and D. Dodds, Smart Mater. Struct., 2008, 17, 25017
- ⁵⁵ D. Shen, J.-H. Park, J. Ajitsaria, S.-Y. Choe, H. C. I. I. I. Wikle and D.-J. Kim, J. Micromech. Microeng., 2008, 18, 55017
- ⁵⁶ S. P. Beeby, M. J. Tudor and N. M. White, Meas. Sci. Technol., 2006, 17, R175

- ⁵⁷ P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes and T. C. Green, Proc. IEEE, 2008, 96, 1457–1486
- ⁵⁸ K. A. Cook-Chennault, N. Thambi and A. M. Sastry, Smart Mater. Struct., 2008, 17, 43001
- ⁵⁹ Μ. Γόντικα, «Κατασκευή και χαρακτηρισμός τριβογεννητριών για τη συλλογή της μηχανική ενέργειας του περιβάλλοντος», Διπλωματική εργασία, Τμήμα ΗΜΜΥ ΕΜΠ, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», 2016
- ⁶⁰ Dong S, Zhai J, Li J F, Viehland D and Priya S 2008 Multimodal system for harvesting magnetic and mechanical energy Appl. Phys. Lett. 93 103511
- ⁶¹ Toreyin H, Topal E and K ¨ ulah H 2010 A multi-source micro power generator employing thermal and vibration energy harvesting Procedia Eng. 5 1176–9
- ⁶² http://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_2.html
- ⁶³ Rabiner and Gold, 1975
- ⁶⁴ J. M. Gilbert and F. Balouchi. Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks. International Journal of Automation and Computing, 5, N. 4:334–347, October 2008
- ⁶⁵ Thad Starner and Joseph A. Paradiso. Human generated power for mobile electronics. In Low Power Electronics Design, pages 1–35. CRC Press, 2004.
- ⁶⁶ P.A.Kinzie. Crystal Radio: History, Fundamentals and Design. Xtal Set Society, 1996
- ⁶⁷ Jose? Luis Giordano. Calculation of the effective magnetic field under high-voltage power lines. Eur. J. Phys, 1998
- ⁶⁸ J. Ahola, T. Ahonen, V. S¸rkim¸ki, A. Kosonen, J. Tamminen, R. Tiainen, and T. Lindh. Design Considerations for Current Transformer Based Energy Harvesting for Electronics Attached to Electric Motor. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM, 2008
- ⁶⁹ Cooper Systems. Energy harvesting power supply <http://www.cooperpower.com/library/pdf/b32009057.pdf>
- ⁷⁰ Walker Halliday, Resnick. Fundamentals of Physics, 6th Edition. John Wiley and Sons, 1991.
- ⁷¹ Roger A. Freedman Hugh D. Young. University Physics. Addison Wesley, 2007
- ⁷² Olsen, R. G., Deno, D., Baishiki, R. S. . Magnetic fields from electric power lines theory and comparison to measurements. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988
- ⁷³ D Deno. Sources and structures of magnetic and electric fields in the home. In 23rd Handford Life Science Symposium, 1984
- ⁷⁴ Vikram Gupta, Arvind Kandhalu, Ragunathan (Raj) Rajkumar Energy Harvesting from Electromagnetic Energy Radiating from AC Power Lines 2011