



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## **Ανάπτυξη μαγνητικού συστήματος συγκομιδής ενέργειας από ταλαντώσεις σε πλοία**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άγγελος Κατσούλας Χρήστος

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## **Ανάπτυξη μαγνητικού συστήματος συγκομιδής ενέργειας από ταλαντώσεις σε πλοία**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άγγελος Κατσούλας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30<sup>η</sup> Μαρτίου 2022

.....  
Ε. Χριστοφόρου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ι. Γκόνος

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Π. Τσαραμπάρης

Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2022

Άγγελος Κατσούλας

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

Copyright © Άγγελος Κατσούλας, 2022

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 τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πρόοδος που έχει συμβεί τα τελευταία χρόνια στα ηλεκτρονικά κυκλώματα όπως η μείωση των διαστάσεων των στοιχείων των κυκλωμάτων, μας έχει δώσει την δυνατότητα κατασκευής πολλών ειδών κυκλωμάτων όπως ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος, μικροελεγκτές, αισθητήρες, κ.ο.κ. πολύ μικρών διαστάσεων και πολύ μεγάλης υπολογιστικής ισχύος καθώς επίσης και πολύ μικρής κατανάλωσης. Έτσι η συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον αποτελεί μια πολύ ελκυστική λύση για την τροφοδοσία αυτών των χαμηλής κατανάλωσης συστημάτων, προκειμένου να αποφευχθούν οι διάφοροι συσσωρευτές ενέργειας όπως οι μπαταρίες που με την πάροδο του χρόνου κάποια στιγμή θα απαιτήσουν αλλαγή. Συνεπώς η χρήση αυτών των μετατροπών επιτρέπει την τοποθέτηση αυτών των κυκλωμάτων και αισθητήρων σε δυσπρόσιτα σημεία. Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάζεται ένα σύστημα συγκομιδής ενέργειας από τους κραδασμούς στα πλοία. Συγκεκριμένα γίνεται μελέτη σε διάφορες γεωμετρίες ηλεκτρομαγνητικών γεννητριών και εν τέλει κατασκευάζεται μια γεννήτρια με εύρος συχνοτήτων λειτουργίας από 2 έως 20 Hz, η οποία ενδείκνυται για τη συγκομιδή ενέργειας στα πλοία.

Στα επόμενα κεφάλαια, αρχικά περιγράφουμε τις πιο βασικές μορφές συγκομιδής ενέργειας από το περιβάλλον, στην συνέχεια ακολουθεί η θεωρητική ανάλυση του ηλεκτρομαγνητικού μετατροπέα αναλύοντας τόσο το μηχανικό όσο και το κυκλωματικό του ισοδύναμο, εστιάζοντας επίσης και στα κυκλώματα που πρέπει να χρησιμοποιηθούν ώστε η παραγόμενη ενέργεια να διαχειριστεί καταλλήλως. Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μελέτη διάφορων γεωμετριών αυτού του μετατροπέα και η κατασκευή μιας τελικής γεννήτριας για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

**Λέξεις-κλειδιά:** Συγκομιδή ενέργειας, Κραδασμοί, Αδρανειακές γεννήτριες, Ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια, Συστήματα διαχείρισης ισχύος.

## ABSTRACT

The progress that has been made in recent years in electronic circuits such as the reduction of the dimensions of the circuit components, has enabled us to manufacture many types of circuits such as digital signal processors, microcontrollers, sensors, etc. having very small dimensions and very high computing power as well as very low consumption. As a result, harvesting energy from the environment is a very attractive solution to power these low power systems, in order to avoid various energy accumulators such as batteries that over time will require a replacement. Therefore the use of these inverters allows the placement of these circuits and sensors in inaccessible places. In the present dissertation, a system for harvesting energy from vibrations in ships was designed. Specifically, we study the various geometries of electromagnetic generators and finally, we build a generator, which is suitable for harvesting energy on board operating in the frequency range of 2 to 20 Hz. In the following chapters we first describe the most basic forms of energy harvesting from the environment, then follows the theoretical analysis of the electromagnetic converter by analyzing both its mechanical and circuit equivalent. We also focus on the circuits that must be used to properly manage the energy produced. Finally in the last chapter the various geometries of this converter are studied, as well as the construction of a final generator for the specific environment.

**Keywords:** *Energy harvest, Vibrations, Inertia generators, Electromagnetic generator, Power management systems*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και την βοήθειά του σε ζητήματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Επίσης τον διδάκτορα Σπύρο Αγγελόπουλο, για τις πολύτιμες συμβουλές, την καθοδήγηση και την όλη συνεισφορά του κατά την ενασχόλησή μου με την διπλωματική.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τους Καθηγητές Ι. Γκόνο και Π. Τσαραμπάρη για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και τις συμβουλές τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξή της όλα αυτά τα χρόνια.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	ix
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ</b> .....	1
Εισαγωγή .....	1
1.1 Μετατροπείς συγκομιδής θερμοηλεκτρικής ενέργειας.....	3
1.2 Μετατροπείς συγκομιδής RF ακτινοβολίας .....	4
1.3 Ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία .....	4
1.4 Συγκομιδή ενέργειας μέσω της κίνησης ή των κραδασμών .....	5
1.5 Πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες .....	6
1.6 Ηλεκτροστατικές γεννήτριες .....	8
1.7 Ηλεκτρομαγνητικές μικρογεννήτριες.....	10
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ, ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΑΙ ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ</b> .....	13
Εισαγωγή .....	13
2.1 Περιστροφικές γεννήτριες .....	13
2.2 Γεννήτριες όπου η κίνηση της αδρανειακής μάζας γίνεται εντός πηνίου .....	15
2.3 Κραδασμοί στα πλοία και τύποι .....	17
2.4 Ανάλυση μηχανικού ισοδυναμίου .....	18
2.5 Φυσικά όρια του σχεδιασμού .....	21
2.6 Το μοντέλο της αδρανειακής μάζας στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών γεννητριών .....	22
2.7 Κυκλωματικό ισοδύναμο ηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας .....	23
2.8 Κυκλωματικό ισοδύναμο ηλεκτρομαγνητικής μικρογεννήτριας με φορτίο.....	25
2.9 Κανόνες σχεδιασμού .....	26
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ</b> .....	27
3.1 Κυκλώματα διαχείρισης ενέργειας.....	27
3.2 Μετατροπείς αναβάθμισης τάσης από DC σε DC.....	27
3.3 Μετατροπείς υποβάθμισης τάσης από DC σε DC.....	28
3.4 Μετατροπείς υποβάθμισης - αναβάθμισης τάσης από DC σε DC.....	29
3.5 Μετατροπέας εναλλασσόμενου σε συνεχές .....	30
3.6 Μέσα αποθήκευσης της ενέργειας.....	32
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ</b> .....	35
4.1 Διάταξη πειράματος .....	35
4.2 Περιγραφή κατασκευής μικρογεννητριών.....	38
4.3 Γεννήτριες με μαγνήτες 10 mm .....	39
4.4 Γεννήτριες 8 mm .....	41
4.5 Συστοιχίες μικρογεννητριών .....	42
4.6 Κατασκευή κυκλώματος διαχείρισης ισχύος .....	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΛΟΓΟΣ</b> .....	51
5.1 Συμπεράσματα σύνοψη .....	51

5.2 Μελλοντική εργασία .....	51
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b> .....	53
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	67



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=1.36 \Omega$ $R_o= 0.66 \Omega$ $L =4.5$ cm $N= 360$ 4 στρώσεις 15 μαγνήτες.....	53
Πίνακας 2: Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=1.47 \Omega$ $R_o= 0.73 \Omega$ $L =5$ cm $N= 400$ 4 στρώσεις 15 μαγνήτες.....	53
Πίνακας 3: Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=2.5 \Omega$ $R_o= 1.25 \Omega$ $L =4.5$ cm $N= 540$ 6 στρώσεις 15 μαγνήτες.....	54
Πίνακας 4: Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=1,36 \Omega$ $R_o= 0,66 \Omega$ $L =4.5$ cm $N= 360$ 4 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	55
Πίνακας 5: Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=2.9 \Omega$ $R_o= 1, \Omega$ $L =7$ cm $N= 840$ 6 στρώσεις 25 μαγνήτες.....	55
Πίνακας 6: Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=2.9 \Omega$ $R_o= 1.8 \Omega$ $L =7$ cm $N= 840$ 6 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	56
Πίνακας 7: Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=2.9 \Omega$ $R_o= 1.8 \Omega$ $L =5$ cm $N= 600$ 6 στρώσεις 25 μαγνήτες.....	56
Πίνακας 8: Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=2.5 \Omega$ $R_o= 1.25 \Omega$ $L =6$ cm $N= 480$ 6 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	57
Πίνακας 9: Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=2.5 \Omega$ $R_o= 1.25 \Omega$ $L =6$ cm $N= 480$ 6 στρώσεις 25 μαγνήτες.....	58
Πίνακας 10: Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=3,95 \Omega$ $R_o=2,7 \Omega$ $L =5$ cm $N= 800$ 8 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	58
Πίνακας 11: Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=3,5 \Omega$ $R_o= 1.75 \Omega$ $L =4,5$ cm $N= 720$ 8 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	59
Πίνακας 12: Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=2.97 \Omega$ $R_o= 1.48 \Omega$ $L =4.5$ cm $N= 630$ 7 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	59
Πίνακας 13: Γεννήτρια των 10 mm $R_{\pi}=2.9 \Omega$ $R_o= 1.8 \Omega$ $L =5$ cm $N= 600$ 6 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	60
Πίνακας 14: Γεννήτρια των 8 mm $R_{\pi}=1,3 \Omega$ $R_o= 0,65 \Omega$ $L =4,5$ cm $N= 360$ 4 στρώσεις 15 μαγνήτες.....	61
Πίνακας 15: Γεννήτρια των 8 mm $R_{\pi}=1,3 \Omega$ $R_o= 0,65 \Omega$ $L =4,5$ cm $N= 360$ 4 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	61
Πίνακας 16: Γεννήτρια των 8 mm $R_{\pi}=1,3 \Omega$ $R_o= 0,65 \Omega$ $L =4,5$ cm $N= 360$ 4 στρώσεις 25 μαγνήτες.....	62
Πίνακας 17: Γεννήτρια των 8 mm $R_{\pi}=2,1 \Omega$ $R_o= 1,05 \Omega$ $L =5$ cm $N= 540$ 6 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	62
Πίνακας 18: Γεννήτρια με 2 πηνία των 10 mm σε σειρά $R_{\pi}= 5,8 \Omega$ $R_o= 2,9 \Omega$ $L =5$ cm $N= 600$ 6 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	63
Πίνακας 19: Γεννήτρια με 2 πηνία των 10 mm παράλληλα $R_{\pi}= 2,9 \Omega$ $R_o= 1,45 \Omega$ $L =5$ cm $N= 600$ 6 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	64
Πίνακας 20: Γεννήτρια με 2 πηνία των 8 mm σε σειρά $R_{\pi}= 4,2 \Omega$ $R_o= 2.1 \Omega$ $L =5$ cm $N= 600$ 6 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	64

Πίνακας 21: Γεννήτρια με 2 πηνία των 8 mm σε παράλληλα $R_{\pi}= 2.1 \Omega$ $R_o= 1.05 \Omega$ $L =5$ cm $N= 600$ 6 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	65
Πίνακας 22: Τελική γεννήτρια με 2 πηνία των 10 mm και 1 των 8 mm σε σειρά $R_{\pi}= 6,6 \Omega$ $R_o= 3,3 \Omega$ $L =5$ cm $N= 600$ 6 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	65
Πίνακας 23: Γεννήτρια με 1 πηνίο των 10 mm και 1 των 8 mm σε σειρά $R_{\pi}= 4.4 \Omega$ $R_o= 2.27 \Omega$ $L =5$ cm $N= 600$ 6 στρώσεις 20 μαγνήτες.....	66



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

## Εισαγωγή

Η πρόοδος που έχει συμβεί τα τελευταία χρόνια στα ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπως η μείωση των διαστάσεων των στοιχείων των κυκλωμάτων, μας έχει δώσει την δυνατότητα κατασκευής πολλών ειδών κυκλωμάτων όπως ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος, μικροελεγκτές, αισθητήρες, κοκ, πολύ μικρών διαστάσεων και πολύ μεγάλης υπολογιστικής ισχύος. Αυτή η πρόοδος στην μείωση των διαστάσεων με αποτέλεσμα την αύξηση των στοιχείων στα διάφορα μικροκυκλώματα, πέραν του ότι τα έχει κάνει πολύ πιο ισχυρά υπολογιστικά, όπως και αναφέρθηκε, έχει μειώσει δραματικά τις απαιτήσεις τους σε ισχύ, πράγμα πολύ σημαντικό, καθώς πλέον έχουμε την δυνατότητα να σχεδιάζουμε ασύρματες αισθητήριες διατάξεις πολύ χαμηλής κατανάλωσης οι οποίες μπορούν να τοποθετηθούν σε σημεία όπου η πρόσβαση είναι πολύ δύσκολη έως και αδύνατη. Η τροφοδοσία αυτών των διατάξεων τις περισσότερες φορές γίνεται από κάποιον συσσωρευτή ενέργειας και στο σύνολο των εφαρμογών πρόκειται για μπαταρία ιόντων λιθίου. Ωστόσο, παρόλη την πρόοδο που έχει δείξει η επιστήμη στον τομέα των ηλεκτρονικών, η εξέλιξη της τεχνολογίας των μπαταριών και γενικά των συσσωρευτών ενέργειας δεν έχει προχωρήσει σημαντικά σε σχέση με το παρελθόν, με αποτέλεσμα η πυκνότητα ενέργειας και η πυκνότητα ισχύος των συσσωρευτών αυτή την στιγμή να είναι συγκρίσιμες με αυτές του παρελθόντος. Έτσι βάσει αυτού δημιουργείται το εξής πρόβλημα: Ενώ μπορούμε να κατασκευάσουμε ασύρματες αισθητήριες διατάξεις πολύ χαμηλής κατανάλωσης, η τροφοδοσία θα έχει πεπερασμένη έως σύντομη, τις περισσότερες φορές, διάρκεια. Αυτό είναι πιο σημαντικό όταν οι αισθητήρες αυτοί, ή το αντίστοιχο κύκλωμα χαμηλής κατανάλωσης που επιτελεί κάποια λειτουργία, μπορεί να έχουν τοποθετηθεί σε σημείο όπου η πρόσβαση είναι αδύνατη, ενώ οι μετρήσεις του αισθητήρα ή η λειτουργία του κυκλώματος πρέπει να συνεχίζει αδιαλείπτως.

Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα έρχονται να δώσουν διάφορες μικροσυσκευές συγκομιδής ενέργειας, η βάση λειτουργίας των οποίων είναι η μετατροπή κάποιας μορφής ενέργειας που υπάρχει σε σχετική αφθονία στο περιβάλλον, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόδοση, σε ηλεκτρική.

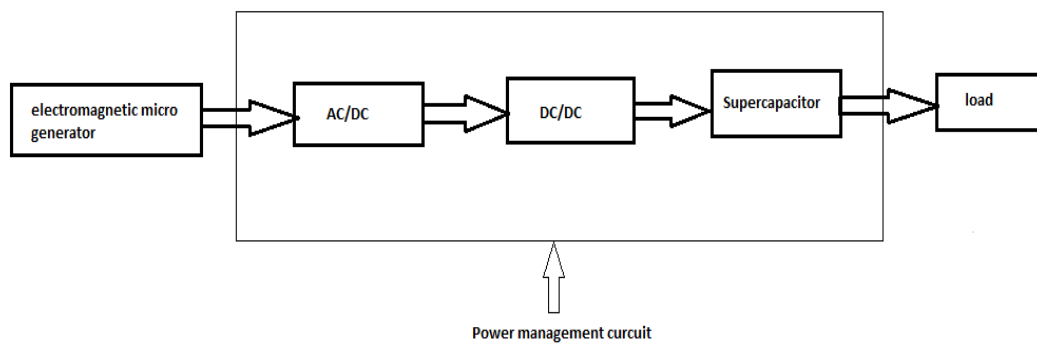
Οι πηγές ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συγκομιδή ενέργειας γενικά είναι:

- Ηλιακή ενέργεια, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών ηλιακών κυττάρων, αλλά εξαρτάται από την διαθεσιμότητα του ηλιακού φωτός στο σημείο όπου τοποθετείται ο αισθητήρας.
- Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια (κύματα RF), η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας ηλεκτρομαγνητικούς μετατροπείς ενέργειας. Ωστόσο υποφέρει σε μεγάλες αποστάσεις λόγω απώλειας σήματος.
- Θερμική ενέργεια, η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική από μετατροπείς θερμικής ενέργειας που παράγουν ρεύμα στο κύκλωμα λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας συγκεκριμένων σημείων του μετατροπέα, ωστόσο χρειάζονται μεγάλες θερμικές διαφορές.
- Μηχανική ενέργεια, που προέρχεται είτε από την κίνηση, είτε από διάφορους κραδασμούς του περιβάλλοντος [1].

Σε αυτή την διπλωματική εργασία, έχουμε ως στόχο τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός μικροσυστήματος το οποίο θα συλλέγει ενέργεια από τους κραδασμούς του πλοίου και θα τη μετατρέπει σε ηλεκτρική, με στόχο την λειτουργία κάποιου ασύρματου αισθητήρα. Πιο συγκεκριμένα, θέλουμε να κατασκευάσουμε μια ηλεκτρομαγνητική μικρογεννήτρια η οποία:

1. Θα έχει μέγιστη απόδοση στους χαμηλού πλάτους κραδασμούς και χαμηλών συχνοτήτων από 2 έως 20 Hz, που είναι αυτοί που υπάρχουν στο πλοίο όπως θα μελετηθεί εκτενέστερα στην συνέχεια.
2. Θα ακολουθείται από σύστημα διαχείρισης ισχύος χαμηλής κατανάλωσης, το οποίο πρέπει να μπορεί να επεξεργαστεί την ενέργεια της μικρογεννήτριας και πιο συγκεκριμένα να μετατρέπει την τάση εξόδου σε συνεχόμενη σταθερού μέτρου με σκοπό την φόρτιση ενός υπερπυκνωτή.

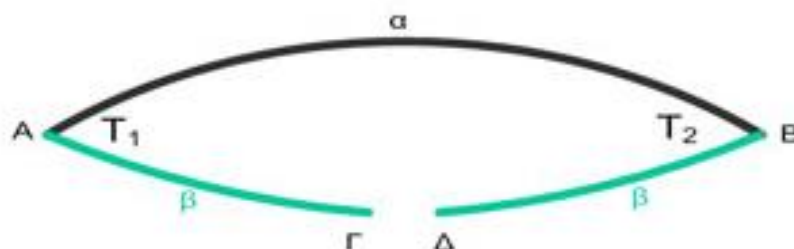
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η αρχιτεκτονική του συστήματος συγκομιδής ενέργειας. Η μικρογεννήτρια συνδέεται με ένα σύστημα μετατροπής και οδήγησης του ρεύματος στον πυκνωτή, το οποίο όταν ανιχνεύει ότι ο πυκνωτής έχει φτάσει στην επιθυμητή φόρτιση, ενεργοποιεί τον ασύρματο αισθητήρα.



Σχήμα 1.1 Αρχιτεκτονική συστήματος συγκομιδής ενέργειας

## 1.1 Μετατροπείς συγκομιδής θερμοηλεκτρικής ενέργειας

Η συγκομιδή θερμικής ενέργειας (θερμότητας), λόγω θερμικών διαφορών στον χώρο, βασίζεται στο φαινόμενο Seebeck. Το φαινόμενο αυτό περιγράφεται ως εξής στην γενική περίπτωση, όπου το απλό ανοικτό κύκλωμα του σχήματος που ακολουθεί, παριστάνει ένα θερμοζεύγος. Οι κλάδοι του α και β, αποτελούνται από διαφορετικά αγώγιμα υλικά. Στην περίπτωση που οι επαφές Α και Β διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες  $T_1$  και  $T_2$  αντίστοιχα, με  $T_1 > T_2$ , στα άκρα Γ και Δ εμφανίζεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη  $e_{αβ}$ . Δηλαδή μετατρέπεται η θερμότητα λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς απευθείας σε ηλεκτρική.



Σχηματικό διάγραμμα απλού θερμοζεύγους.

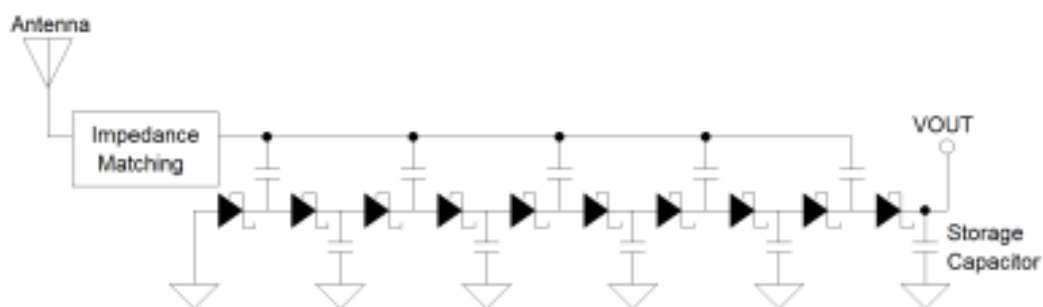
Σχήμα 1.2 Σχηματικό διάγραμμά απλού θερμοζεύγους [2].

Αξίζει να σημειωθεί και η συγκομιδή ενέργειας από πυροηλεκτρισμό. Σε αυτήν την τεχνολογία χρησιμοποιείται η θερμοκρασιακή διαφορά με τον χρόνο, παρά η θερμοκρασιακή διαφορά δύο σημείων του χώρου. Η περιγραφή καθώς και η εκμετάλλευση της ενέργειας γίνεται μέσω του φαινομένου του πυροηλεκτρισμού, το οποίο εμφανίζεται σε διηλεκτρικά υλικά με πολική συμμετρία στα οποία η πόλωση είναι θερμοκρασιακά εξαρτημένη. Κάθε θερμοκρασιακή μεταβολή επηρεάζει την πόλωση του υλικού, κάτι που εμφανίζεται ως διαφορά τάσης. Η συγκομιδή πυροηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές με περιοδικές διακυμάνσεις θερμοκρασίας για να προσθέτει ανά περιόδους ενέργεια [3].

## 1.2 Μετατροπείς συγκομιδής RF ακτινοβολίας

Με την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, καθώς και την αύξηση των κεραιών (Για παράδειγμα, επειδή τα πέμπτης γενιάς τηλεπικοινωνιακά δίκτυα 5G εκπέμπουν σήματα μεγαλύτερων συχνοτήτων ώστε να επιτρέπεται μεγαλύτερη ροή δεδομένων είναι αναγκαίο για τον ίδιο χώρο να χρησιμοποιηθούν περισσότερες κεραιές διότι τα σήματα μεγάλων συχνοτήτων έχουν πιο χαμηλή διείσδυση στα εμπόδια, με αποτέλεσμα το σήμα να αποκόπτεται πιο γρήγορα), των ασυρμάτων φορτιστών και γενικά η όλη εξέλιξη των ασυρμάτων συσκευών έχει κάνει την συγκομιδή ενέργειας από RF ακτινοβολία πολύ ελκυστική [4].

Για την συγκομιδή της RF ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται στην ουσία κεραιές λήψης, στις οποίες το προσπίπτον κύμα δημιουργεί διαφορά δυναμικού στα άκρα τους. Ωστόσο αυτός ο τρόπος συγκομιδής έχει κάποια προβλήματα διότι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο η ισχύς του σήματος που εκπέμπεται από την πηγή, καθώς και το φάσμα του κύματος. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει και ο χώρος μέσα στον οποίο βρίσκεται ο μετατροπέας αυτός, καθώς ανάλογα την γεωμετρία, τα υλικά κατασκευής του χώρου, και τα εμπόδιά του, η ισχύς του κύματος ή καλύτερα οι απώλειες της διάδοσης μπορούν να αυξηθούν πάρα πολύ και συνεπώς, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η ισχύς που φτάνει σε έναν τέτοιο μετατροπέα κυμαίνεται στα  $50\mu W/cm^2$ . Για παράδειγμα, για απόσταση 25 έως 100 μέτρων από μια κεραία κινητής GSM η πυκνότητα ισχύος που εκτιμάται είναι από 0,1 έως  $1 mW/m^2$  για μία μόνο συχνότητα. Για όλες τις συχνότητες αποστολής μιας κεραίας εκτιμάται ότι αυτή η πυκνότητα μπορεί το πολύ να τριπλασιαστεί. Για δίκτυα WLAN οι πυκνότητες αυτές είναι μικρότερες κατά περίπου μια τάξη μεγέθους. Συνεπώς καθώς ο μετατροπέας της RF ακτινοβολίας σε ηλεκτρική είναι μια κεραία, θα έπρεπε οι διαστάσεις της να είναι πολύ μεγάλες για να ικανοποιείται η τροφοδοσία κάποιου αισθητήρα, πράγμα ανεπιθύμητο [4],[5].



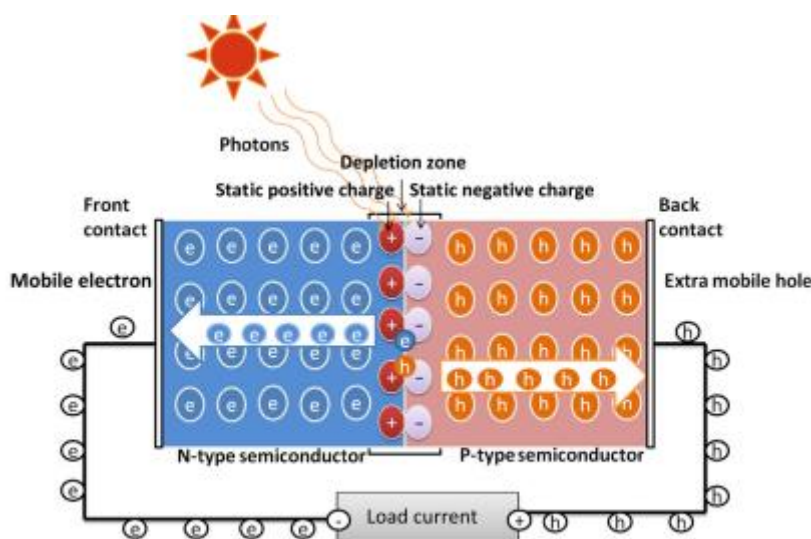
Σχήμα 1.3 Μετατροπέας RF σε ηλεκτρική ενέργεια [5].

## 1.3 Ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία

Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκομιδή ενέργειας μέσω της ακτινοβολίας

του ηλίου, αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους συγκομιδής ενέργειας. Η συγκομιδή ηλιακής ενέργειας γίνεται μέσω ηλιακών κελιών. Το κάθε κελί αποτελείται από μια ανάστροφα πολωμένη δίοδο  $pn^+$ , στην οποία το φως προσπίπτει από την μεριά  $n^+$ . Τα φωτόνια που προσπίπτουν απορροφώνται στην περιοχή αραιώσεως, παράγοντας ένα ζεύγος οπής ηλεκτρονίου. Το προϋπάρχον ηλεκτρικό πεδίο της ενώσεως διαχωρίζει το κάθε ζεύγος, ωθώντας το ηλεκτρόνιο στην περιοχή  $n^+$  και την οπή στην περιοχή  $p$ . Έτσι δημιουργείται ρεύμα λόγω της κίνησης φορτίων [6].

Υπάρχουν δυο σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι θα καθορίσουν τον τύπο και το υλικό κατασκευής, καθώς και τη μέγιστη ισχύ. Ο πρώτος είναι το φάσμα της ακτινοβολίας που μας ενδιαφέρει για την συγκομιδή και ο δεύτερος είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση, τόσο μεγαλύτερη είναι και η παραγόμενη ισχύς. Για παράδειγμα, υπολογίζεται ότι η πυκνότητα της φωτεινής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνεια του εδάφους κατά την διάρκεια ενός ηλιόλουστου μεσημεριού, είναι της τάξης των  $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ . Ενώ σε ένα γραφείο τυπικού φωτισμού είναι της τάξης των  $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι η μέθοδος αυτή δεν ενδείκνυται για περιβάλλοντα χαμηλής φωτεινότητας [6],[7].



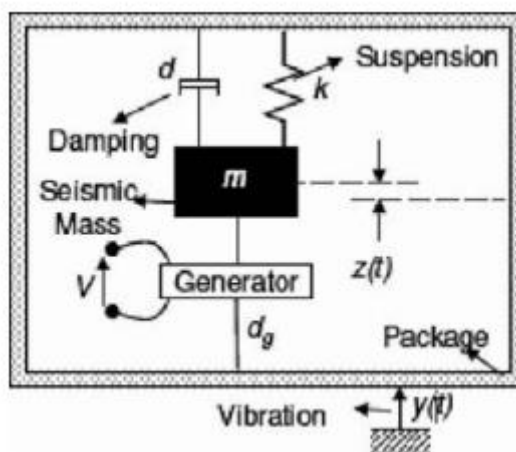
Σχήμα 1.4 Μετατροπείας ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική [6].

## 1.4 Συγκομιδή ενέργειας μέσω της κίνησης ή των κραδασμών

Η συγκομιδή κινητικής ενέργειας μέσω της κίνησης είτε των κραδασμών, οφείλεται σε μετατροπείς οι οποίοι μετατρέπουν την κινητική ενέργεια μιας αδρανειακής μάζας μέσω κάποιου μηχανοηλεκτρικού μετατροπέα, σε ηλεκτρική. Γενικά οι μετατροπείς αυτοί μπορούν να μοντελοποιηθούν, ώστε να μελετηθούν ως μια αδρανειακή μάζα η οποία είναι συζευγμένη με ένα ελατήριο και ταλαντώνεται με τη συχνότητα των κραδασμών και πλάτος ανάλογο των δυνάμεων που της ασκούνται μέσα σε ένα πλαίσιο, ασκώντας της επίσης κάποια απόσβεση. Όπως φαίνεται και στην εικόνα στη



συνέχεια, οι σημαντικότεροι παράγοντες για την μοντελοποίηση είναι η μάζα, διότι όσο μεγαλύτερη είναι τόσο περισσότερη κινητική ενέργεια δεσμεύει, και ο αποσβεστήρας, που στην ιδανική περίπτωση εκφράζει την ηλεκτρική απόσβεση  $d_e$ , αλλά γενικά συμπεριλαμβάνει και την μηχανική  $d$ , που εκφράζει τις απώλειες λόγω τριβών που αναπτύσσονται κατά την ταλάντωση. Ένα αντίστοιχο τέτοιο μοντέλο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [8],[9].



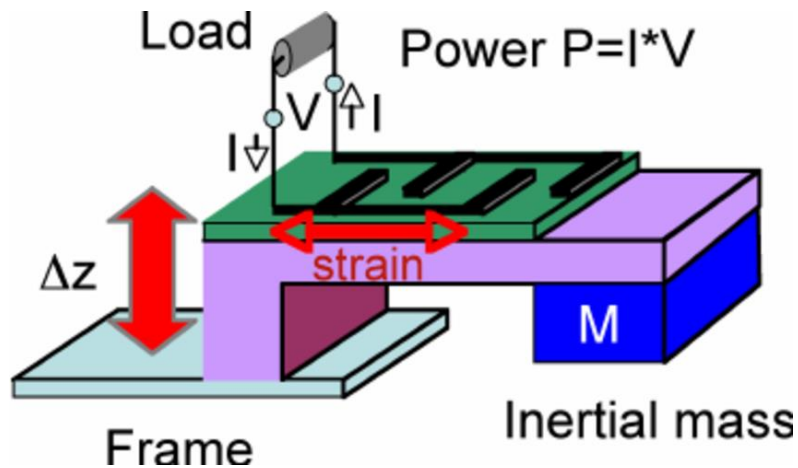
Σχήμα 1.5 Αδρανειακός μετατροπέας [9].

Γενικά υπάρχουν τρεις μηχανισμοί μετατροπής της κινητικής ενέργειας από κραδασμούς σε ηλεκτρική και αυτοί είναι, οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες, οι ηλεκτροστατικές και οι ηλεκτρομαγνητικές, που μελετώνται κυρίως σε αυτή την διπλωματική.

## 1.5 Πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες

Πιεζοηλεκτρισμός είναι η ιδιότητα κάποιων υλικών, κυρίως κρυσταλλικών αλλά και κάποιων κεραμικών, όταν δέχονται κάποια δύναμη ή όταν ταλαντώνονται και γενικά όταν βρίσκονται υπό την επίδραση κάποιας μηχανικής τάσης, να εμφανίζουν στα άκρα τους διαφορά δυναμικού. Ο πιεζοηλεκτρισμός οφείλεται στον αυθόρμητο διαχωρισμό του φορτίου με ορισμένες κρυσταλλικές δομές υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Αυτό το φαινόμενο, που αναφέρεται ως αυθόρμητη πόλωση, προκαλείται από μια μετατόπιση των νεφών ηλεκτρονίων σε σχέση με τα ατομικά τους κέντρα, δηλαδή μια μετατόπιση των θετικών ιόντων σε σχέση με τα αρνητικά ιόντα, μέσα στα κρυσταλλικά τους κύτταρα. Μια τέτοια κατάσταση παράγει ένα ηλεκτρικό δίπολο.

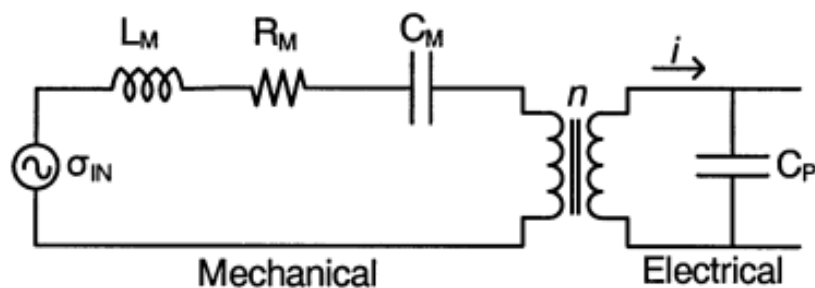
Η τάση αυτή εξαρτάται από την ένταση και την κατεύθυνση της δύναμης που ασκείται στο πιεζοηλεκτρικό, καθώς και από τις πιεζοηλεκτρικές του ιδιότητες και τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά.



Σχήμα 1.6 Πιεζοηλεκτρική μικρογεννήτρια [10].

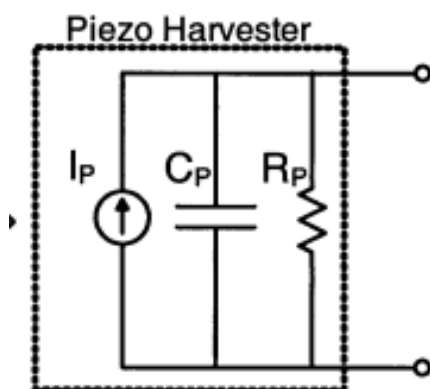
Γενικά στα πιεζοηλεκτρικά έχουμε μεγάλη αντίσταση εξόδου και το εύρος της τάσης είναι της τάξης κάποιων mV. Ωστόσο ένα βασικό αρνητικό τους είναι ότι ο μηχανισμός μετατροπής της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική χαρακτηρίζεται από σταθερά απόσβεσης περίπου ίδιας τάξης με την σταθερά ηλεκτρομηχανικής μετατροπής πράγμα που, όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο, μειώνει την απόδοση. Επίσης ένα ακόμα αρνητικό, ίσως το σημαντικότερο, είναι ότι αποδίδουν μέγιστα στην συχνότητα συντονισμού όπως και είναι φυσικό, όμως αυτό απαγορεύει να τίθενται σε λειτουργία σε συχνότητες μακριά από τον συντονισμό ή σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων σε σχέση με τον συντονισμό [11],[12].

Το κυκλωματικό ισοδύναμο ενός πιεζοηλεκτρικού όταν χρησιμοποιείται σαν γεννήτρια συγκομιδής ενέργειας μπορεί να αναπαρασταθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7 στη συνέχεια. Στο πρώτο τμήμα, το  $L_M$  αντιπροσωπεύει τη μάζα αδράνειας, το  $C_M$  τη μηχανική ακαμψία και το  $R_M$  λαμβάνει υπόψη τις μηχανικές απώλειες, το πρώτο τμήμα του παρακάτω κυκλώματος στην ουσία είναι το κυκλωματικό ισοδύναμο του μηχανικού μέρους του πιεζοηλεκτρικού και συνδέεται στη συνέχεια μέσω μετασχηματιστή ο οποίος εκφράζει τον ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα και δείχνει το μέρος της ενέργειας που μετατράπηκε σε ηλεκτρική ενέργεια και το  $C_P$  την συνολική χωρητικότητα των στοιχείων του πιεζοηλεκτρικού.



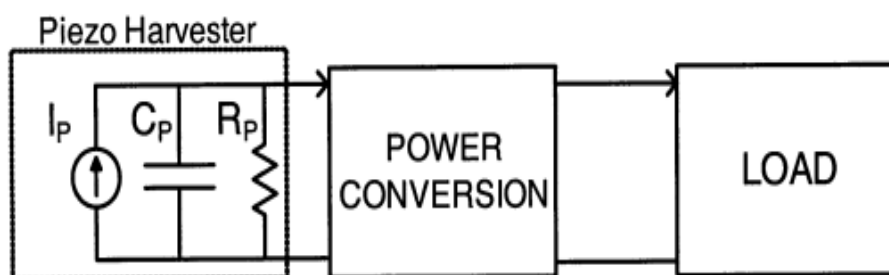
Σχήμα 1.7 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πιεζοηλεκτρικού [13]

Όταν το πιεζοηλεκτρικό διεγείρεται με την συχνότητα συντονισμού του από κραδασμούς ημιτονικής διέγερσης (γενικά στο εργαστήριο όλες οι πειραματικές διαδικασίες γίνονται με γεννήτριες κραδασμών που έχουν ημιτονική διέγερση είτε αφορά ηλεκτροστατικά, είτε πιεζοηλεκτρικούς, είτε ηλεκτρομαγνητικούς μετατροπείς), τότε το ισοδύναμο κύκλωμα είναι μια πηγή ρεύματος παράλληλα με τον πυκνωτή  $C_p$  και μια αντίσταση  $R_p$ .



Σχήμα 1.8 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πιεζοηλεκτρικού στον συντονισμό [13]

Επιπλέον οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες χαρακτηρίζονται από παραγωγή ισχύος από κάποια  $\mu W$  έως κάποια  $mW$ , ανάλογα και την εφαρμογή. Ωστόσο το πιο σημαντικό πρόβλημα και γενικά πρόβλημα των μικροσυσκευών συγκομιδής ενέργειας από κραδασμούς και μετατροπής της σε ηλεκτρική είναι το γεγονός ότι η τάση στα άκρα της συσκευής αυτής θα είναι εξαιρετικά μικρή με ενεργό τιμή που κυμαίνεται στην τάξη κάποιων δεκάδων  $mV$ . Συνεπώς απαιτούνται αρκετά πολύπλοκα κυκλώματα για την διαχείριση της τάσεως και συνεπώς και της ισχύος [13].



Σχήμα 1.9 Πιεζοηλεκτρική μικρογεννήτρια με κύκλωμα διαχείρισης ισχύος [13]

## 1.6 Ηλεκτροστατικές γεννήτριες

Οι ηλεκτροστατικές γεννήτριες έχουν στην καρδιά του συστήματος μετατροπής ενέργειας έναν πυκνωτή μεταβλητής χωρητικότητας. Η λογική για την μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική βασίζεται στο γεγονός ότι μέσω των κραδασμών που μεταφέρονται η παραμόρφωση που υφίσταται κάθε στιγμή η ηλεκτροστατική

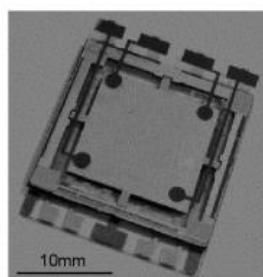
γεννήτρια αλλάζει την χωρητικότητα του πυκνωτή και συνεπώς την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του κατά την διάρκεια των κραδασμών. Υπάρχουν δύο μέθοδοι ηλεκτροστατικής μετατροπής. Αυτές είναι τα συστήματα μεταγωγής και τα συνεχόμενα συστήματα.

Τα συστήματα μεταγωγής λειτουργούν ως εξής: Εάν ο μεταβλητός πυκνωτής είναι προ-φορτισμένος στη μέγιστη χωρητικότητα, τότε αποσυνδέεται από οποιοδήποτε κύκλωμα πριν αλλάξει χωρητικότητα και λόγω της αλλαγής γεωμετρίας εξαιτίας των κραδασμών, αυτή η πρόσθετη ενέργεια αποθηκεύεται στο ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια για την τροφοδοσία ενός κυκλώματος. Εάν ο πυκνωτής είναι αφόρτιστος, τότε ο πυκνωτής πρέπει να είναι συνδεδεμένος σε σταθερή τάση (μπορεί να προέρχεται από κάποια μπαταρία που προϋπάρχει και η οποία φορτίζεται μέσω της ίδιας γεννήτριας). Η μείωση της χωρητικότητας του πυκνωτή που προκαλείται από τους κραδασμούς θα έχει ως αποτέλεσμα την μετακίνηση φορτίου στην μπαταρία και συνεπώς την φόρτιση της και την μετέπειτα χρήση της στο κύκλωμα. Στα συνεχόμενα συστήματα η μόνη διαφορά είναι ότι ο πυκνωτής δεν αποκόπτεται από το κύκλωμα ούτε κατά την εκφόρτωση του ούτε κατά την φόρτιση.

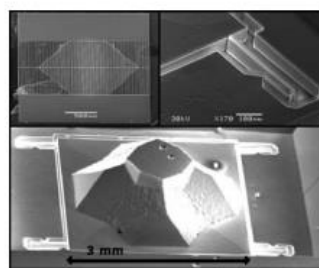
Το βασικό αρνητικό αυτής της διάταξης είναι το γεγονός ότι είναι αναγκαία οπωσδήποτε η χρήση μπαταρίας για την αρχική εκκίνηση του συστήματος [14].

Υπάρχουν τέσσερις βασικές αρχιτεκτονικές ηλεκτροστατικών γεννητριών όπως φαίνονται και στην εικόνα

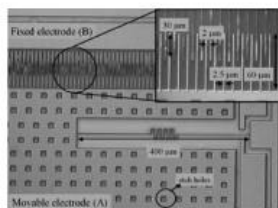
- Παράλληλη πλάκα – κλείσιμο κενού
- Παράλληλη πλάκα – μεταβλητή επικάλυψη
- Κίνηση χτένας
- Περιστρεφόμενο ρολό [14]



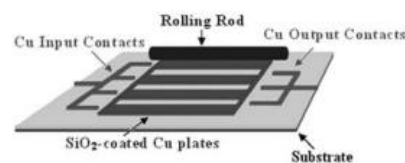
a)



b)



c)



d)

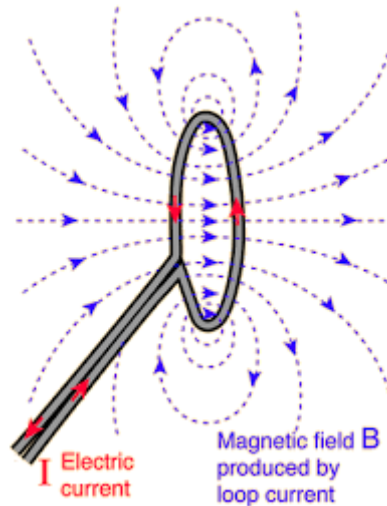
Σχήμα 1.10 Μοντέλα ηλεκτροστατικών μικρογεννητριών [14].

## 1.7 Ηλεκτρομαγνητικές μικρογεννήτριες

Στις ηλεκτρομαγνητικές μικρογεννήτριες, η περιγραφή του φαινομένου μέσω του οποίου δημιουργείται η διαφορά δυναμικού, δηλαδή η τάση στα άκρα του πηνίου, εξηγείται μέσω του νόμου του Faraday

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{-\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\oint_{\partial \Sigma} \mathbf{E} d\mathbf{l} = \frac{-d}{dt} \int_{\Sigma} \mathbf{B} d\mathbf{\Sigma} \quad (1.2)$$



Σχήμα 1.11 Βρόχος που διαρρέεται από μαγνητική ροή [15].

Παραπάνω βλέπουμε τις εξισώσεις Maxwell και Faraday σε διαφορική και ολοκληρωτική μορφή όπου  $\mathbf{B}$  είναι η μαγνητική επαγωγή,  $\mathbf{E}$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και  $\Sigma$  η επιφάνεια που περικλείει η κλειστή καμπύλη,  $C$ . Οι εξισώσεις περιγράφουν το τρόπο με τον οποίο ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει ηλεκτρικό πεδίο. Σε περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο παραμένει σταθερό, το ηλεκτρικό πεδίο δε περιστρέφεται. Όμως, σε περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται τοπικά, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο περιστρεφόμενο γύρω από τη μεταβολή όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.11. Σε ολοκληρωτική μορφή, εφόσον υπάρξει μεταβολή του συνολικού μαγνητικού πεδίου που διέρχεται από μια επιφάνεια, εξ αιτίας της μεταβολής αυτής δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο στο σύνορο της επιφάνειας [16]. Στην περίπτωση που το πεδίο μεταβάλλεται εντός ενός πηνίου τότε βάσει αυτών των εξισώσεων η ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή που δημιουργείται στο πηνίο είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής

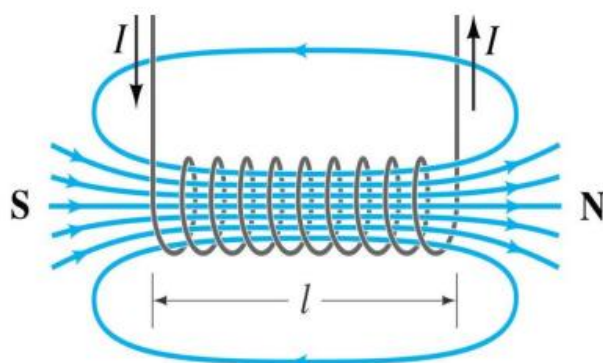
και ανάλογη με τον αριθμό  $N$  των σπειρών του πηνίου όπως ακριβώς φαίνεται στην εξίσωση (1.3)

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.3)$$

όπου  $\phi$  είναι η μαγνητική ροή.

Οι ηλεκτρομαγνητικές μικρογεννήτριες είναι ένας τύπος γεννήτριας αδράνειας (inertia generator). Δηλαδή χρησιμοποιούν μια κινούμενη μάζα στην οποία μεταφέρεται ενέργεια από τους κραδασμούς και αυτή αρχίζει να ταλαντώνεται εντός των ορίων κίνησης της, με την συχνότητα των κραδασμών και μέσω κάποιου ηλεκτρομηχανικού μετατροπέα μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Γεννήτριες αδράνειας μπορούν να θεωρηθούν και οι πιεζοηλεκτρικές και οι ηλεκτροστατικές μηχανές συγκομιδής ενέργειας [17].

Για τις γεννήτριες αυτές, ως αδρανειακή μάζα, τις περισσότερες φορές, χρησιμοποιούνται μαγνήτες νεοδυμίου, διότι είναι την παρούσα στιγμή οι πιο ισχυροί μαγνήτες που υπάρχουν και όπως θα δούμε και στην ανάλυση στα επόμενα κεφάλαια, όσο πιο ισχυρό το μαγνητικό πεδίο τόσο πιο μεγάλη και η απόδοση της γεννήτριας. Ο μαγνήτης ή συστοιχία μαγνητών κινούνται σε σχέση με ένα πηνίο ή συστοιχία και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, λόγω του νόμου του Faraday να δημιουργείται εναλλασσόμενη τάση στα άκρα του πηνίου [16].



Σχήμα 1.12 Νόμος του Faraday [16]

Αξίζει να σημειωθεί ότι ως αδρανειακή μάζα δηλαδή κινούμενο μέρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το πηνίο. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν τέτοιου τύπου κατασκευές ωστόσο είναι πολύ πολύπλοκες.

Ανάλογα με την εφαρμογή και το περιβάλλον λειτουργίας μιας τέτοιας μικρογεννήτριας έχουν προταθεί διάφορες κατασκευές οι οποίες μπορούν να παρέχουν ισχύ από κάποια  $\mu W$  έως κάποιες εκατοντάδες  $mW$ . Γενικά είναι πολύ αποδοτικότερες από κάθε άλλη αδρανειακή γεννήτρια, διότι σε αυτές ο παράγοντας απόσβεσης που σχετίζεται με τις μηχανικές απώλειες μπορεί να μειωθεί και να τείνει στο μηδέν.

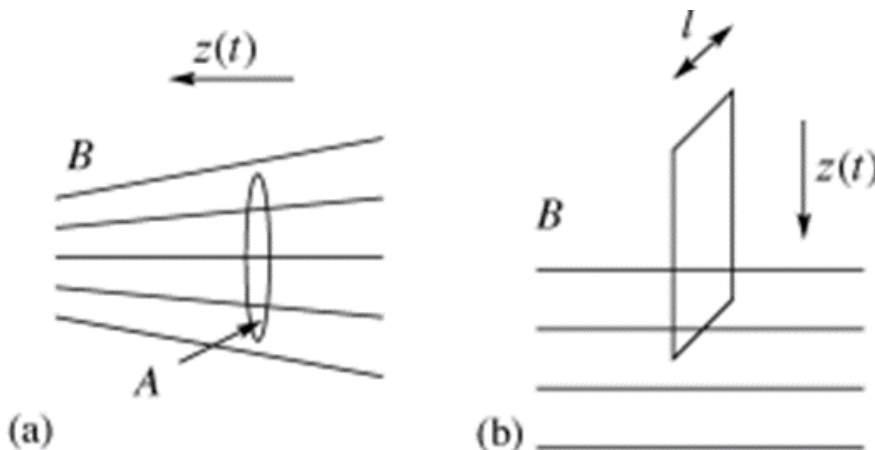
Κατά την κατασκευή μιας τέτοιας μικρογεννήτριας οι κατασκευαστές καλούνται να επιλέξουν μεταξύ δυο αρχιτεκτονικών, αυτή στην οποία ο μαγνήτης κινείται εντός των σπειρών του πηνίου και αυτή στην οποία ο μαγνήτης κινείται παράλληλα με το επίπεδο που ορίζουν. Επίσης οι τάσεις που παράγει αυτή η γεννήτρια και γενικά όλες οι μικροσυσκευές συγκομιδής ενέργειας είναι στις περισσότερες εφαρμογές της τάξης κάποιων δεκάδων mV. Αυτό σημαίνει ότι για την μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή δεν είναι καλή επιλογή ο πλήρης ανορθωτής, τουλάχιστον με τις συμβατές διόδους, διότι εμφανίζουν διάκενα της τάξης από 0,6 έως 0,8 V και συνεπώς μπορεί να λειτουργούν σαν παράγοντας περιορισμού του ρεύματος και ελαχιστοποίησης της απόδοσης. Επομένως πρέπει να κατασκευαστούν νέα κυκλώματα διαχείρισης της ισχύος. Κάποια τέτοια κυκλώματα αναφέρονται στο τελευταίο κεφάλαιο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ, ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΑΙ ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΑ ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ

### Εισαγωγή

Υπάρχουν δύο βασικές αρχιτεκτονικές στην κατασκευή ηλεκτρομαγνητικών γεννητριών. Οι μικρογεννήτριες, στις οποίες το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται, όπως στην εικόνα 2.1α, όπου οι μαγνήτες κινούνται εντός του πηνίου και οι γεννήτριες, όπου το μαγνητικό πεδίο εντός του πηνίου μεταβάλλεται όπως στην εικόνα 2.1β, όπου οι μαγνήτες κινούνται εκτός των περιελίξεων του πηνίου και μάλιστα σε κατεύθυνση κάθετη σε αυτή του άξονα του κέντρου του [18],[19].

Στις δυο αυτές αρχιτεκτονικές τον ρόλο της αδρανειακής μάζας συνήθως παίζει ο μαγνήτης. Υπάρχουν και αρχιτεκτονικές στις οποίες τον ρόλο της αδρανειακής μάζας αναλαμβάνει το πηνίο αλλά είναι σχετικά περίπλοκες διότι έχουμε σημεία της καλωδίωσης που κινούνται. Αυτές οι αρχιτεκτονικές συνήθως χρησιμοποιούνται όταν η ηλεκτρομαγνητική μετατροπή συνδυάζεται και με κάποια άλλη, όπως αυτή της σύνδεσής της με κάποια πιεζοηλεκτρική γεννήτρια.



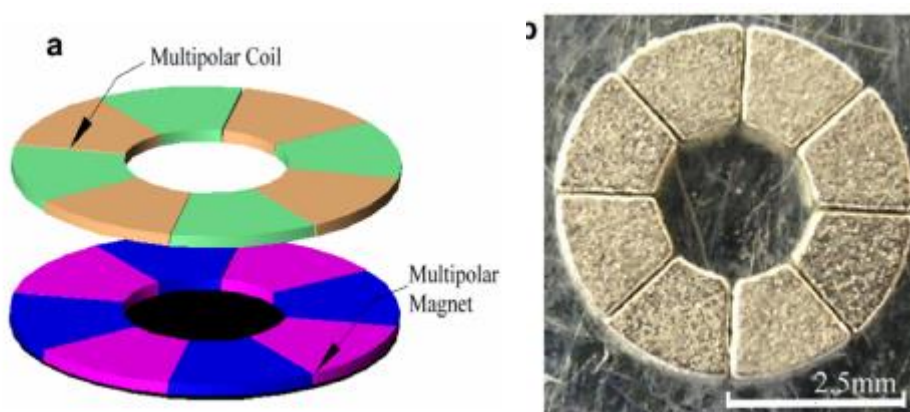
Σχήμα 2.1 Οι δυο βασικές αρχιτεκτονικές κατασκευής [20].

### 2.1 Περιστροφικές γεννήτριες

Στις περιστροφικές ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες ο μηχανισμός λειτουργίας τους, δηλαδή το πώς κινείται η αδρανειακή μάζα είναι παρόμοιος με αυτόν ενός εκκρεμούς. Επίσης αποτελούν μια πολύ ελκυστική λύση για συγκομιδή ενέργειας σε εφαρμογές που χαρακτηρίζονται από κραδασμούς μεγάλων πλατών, αλλά μικρών συχνοτήτων όπως η κίνηση του ενός χεριού κατά την διάρκεια τρεξίματος ή ταλαντώσεις που οφείλονται στους κυματισμούς της θάλασσας [21].

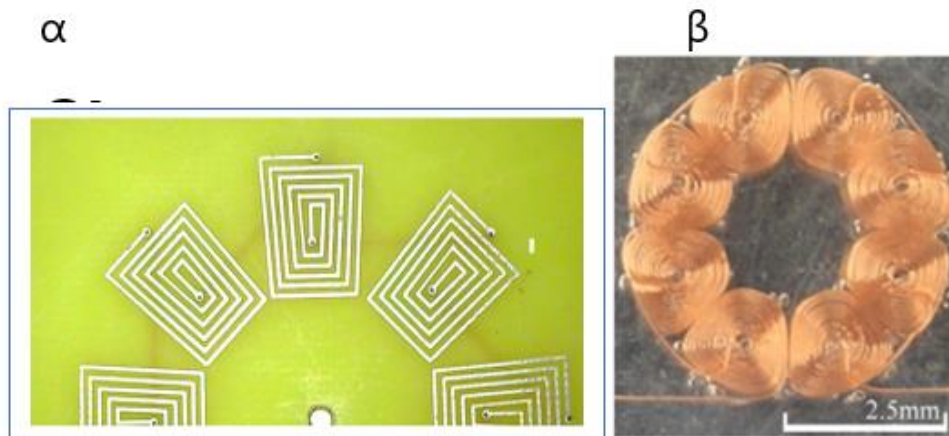


Η αρχιτεκτονική αυτής της γεννήτριας αποτελείται από ένα κινητό κομμάτι, τον δρομέα, ο οποίος στις περισσότερες αρχιτεκτονικές που έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία είναι μια συστοιχία μαγνητών με κάθε μαγνήτη να έχει πάντα τον συμμετρικό του ως προς το κέντρο του δρομέα. Στην ίδια λογική τοποθετούνται και τα πηνία του στάτη, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους ανάλογα με το πως έχουν τοποθετηθεί οι μαγνήτες. Για αυτόν το λόγο καθώς οι μαγνήτες τοποθετούνται συμμετρικά και συνεπώς οι ροπές που αναπτύσσονται, ακυρώνει η μία την άλλη σε μεγάλο βαθμό. Σε πολλές αρχιτεκτονικές στο γεωμετρικό επίπεδο πάνω από τους μαγνήτες τοποθετούνται μη συμμετρικά βάρη (πράγμα που αυξάνει την αδρανειακή μάζα) ώστε να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό. Οι γεννήτριες αυτές καθώς στο σύνολο τους προορίζονται για ταλαντώσεις μεγάλου πλάτους και μικρών συχνοτήτων αποτελούνται από πολλούς μαγνήτες όπως φαίνεται στο σχήμα στη συνέχεια [18],[22].



Σχήμα 2.2 Περιστρεφόμενες ηλεκτρομαγνητικές μικρογεννήτριες [21].

Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατασκευή του πηνίου στις περισσότερες εφαρμογές γίνεται πάνω σε PCB πλακέτα. Αυτή η μέθοδος έχει ως βασικό πλεονέκτημα το πηνίο να είναι όσο πιο επίπεδο γίνεται και να εφαρμόζονται πιο περίπλοκες αρχιτεκτονικές πηνίων, με άμεσο αποτέλεσμα μεγαλύτερη απόδοση ισχύος. Επίσης η κατασκευή πηνίων είναι σχετικά εύκολη και φτηνή με αυτή την διαδικασία σε σχέση με άλλες αρχιτεκτονικές του στάτη σε αυτού του τύπου τις ηλεκτρομαγνητικές μικρογεννήτριες. Ωστόσο αυτή η αρχιτεκτονική έχει ως βασικό μειονέκτημα η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του πηνίου να είναι πολύ χαμηλή και δύσκολα διαχειρίσιμη [22]. Προκειμένου να επιτυγχάνεται μεγαλύτερου μέτρου τάση, αντί για PCB και να γίνεται χάραξη του πηνίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστοιχίες πηνίων όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.3β στη συνέχεια. Ωστόσο όπως γίνεται αντιληπτό είναι πιο δύσκολη κατασκευή καθώς και πιο ακριβή. Με βασικό μειονέκτημα να μειώνεται η απόδοση καθώς το πηνίο μεγαλώνει σε μήκος με τρόπο που οι περιελίξεις του να απομακρύνονται από τους μαγνήτες, με αποτέλεσμα να μη διαχέονται όλες από την ίδια ροή και συνεπώς για την ίδια εφαρμογή να έχουμε χαμηλότερη ισχύ αλλά μεγαλύτερη τάση, η οποία διαχειρίζεται πιο εύκολα [23].

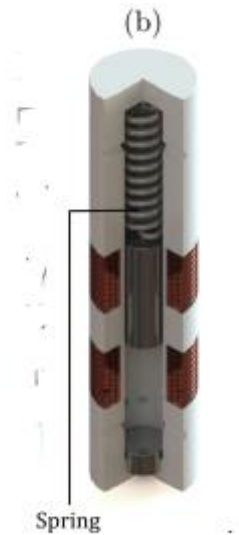
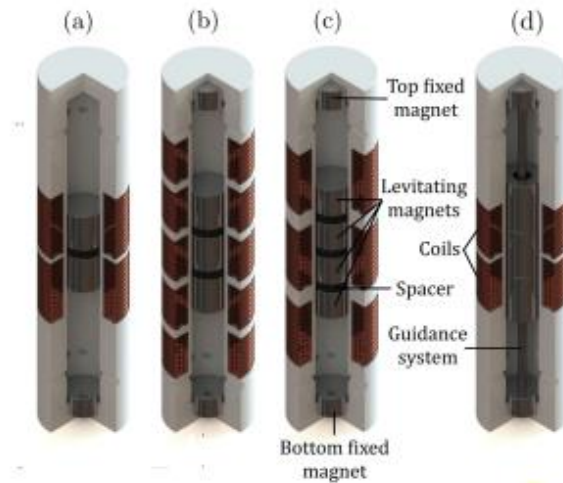


Σχήμα 2.3 Πηνία περιστρεφόμενων ηλεκτρομαγνητικών μικρογεννητριών [24].

## 2.2 Γεννήτριες όπου η κίνηση της αδρανειακής μάζας γίνεται εντός πηνίου

Σε αυτόν τον τύπο αρχιτεκτονικής η πυκνότητα μαγνητικής ροής που περνάει κάθε στιγμή μέσα από τις περιελίξεις είναι μεγαλύτερη, καθώς στην προηγούμενη αρχιτεκτονική όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1β μπορούν να υπάρξουν στιγμές στις οποίες διέρχεται ελάχιστη ροή.

Οι γεννήτριες αυτές προτιμώνται γενικά για ταλαντώσεις μικρού πλάτους και είναι πολύ αποδοτικές σε διάφορες συχνότητες. Η βασική αρχιτεκτονική εδώ είναι ότι μέσα σε ένα πολύ λεπτού πάχους και μονωτή κυλινδρικό σωλήνα, υπάρχει ένας μόνιμος μαγνήτης ή όπως και τις περισσότερες φορές πολλοί μαγνήτες μαζί ώστε να εκμεταλλευόμαστε τις ασυνέχειες στα σημεία επαφής των μαγνητών. Γύρω από τον σωλήνα υπάρχει ένα πηνίο ή κάποια συστοιχία πηνίων που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους ανάλογα την διεύθυνση και την φορά των μαγνητών εντός του σωλήνα. Με τους κραδασμούς ο μαγνήτης αρχίζει να ταλαντώνεται εντός του πηνίου και όπως έχουμε εξηγήσει λόγω της μεταβολής του μαγνητικού πεδίου δημιουργείται τάση στα άκρα του πηνίου. Είναι αναγκαίο σε όλες αυτές τις αρχιτεκτονικές, προκειμένου να μην σταματά απότομα στις άκρες του κυλίνδρου ο μαγνήτης, να υπάρχει μηχανισμός επιβράδυνσης της κίνησής του. Αυτό γίνεται είτε μέσω ελατηρίων είτε μέσω άλλων μαγνητών που είναι ομόρροπα τοποθετημένοι με τον μαγνήτη έτσι ώστε να τον απωθούν. Η λύση που προτιμάται, τις περισσότερες φορές, είναι αυτή με τους μαγνήτες, διότι πλέον οι μόνες μηχανικές αποσβέσεις είναι αυτές της τριβής του μαγνήτη με το τοίχωμα και συνεπώς η απόδοση της γεννήτριας είναι μεγαλύτερη [25],[26]. Κάποιες τέτοιου τύπου γεννήτριες φαίνονται στο σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Διάφορες αρχιτεκτονικές ηλεκτρομαγνητικών μικρογεννητριών με μαγνήτη εντός των περιελίξεων [25].

Επιπλέον, καθώς εδώ έχουμε περισσότερη άνεση σε θέματα χώρου για το πηνίο μπορούμε να έχουμε περισσότερες περιελίξεις και συνεπώς να έχουμε μέτρο τάσης το οποίο είναι ποιο εύκολα διαχειρίσιμο. Επίσης παίζει καθοριστικό ρόλο και η διατομή του σύρματος σε αυτή την αρχιτεκτονική, διότι όσο πιο λεπτό στον ίδιο χώρο με ένα μεγαλύτερης διατομής, μπορούμε να πετύχουμε περισσότερες περιελίξεις και μάλιστα σε λιγότερα στρώματα και άρα μεγαλύτερες τάσεις. Ωστόσο αυξάνεται πολύ η αντίσταση της γεννήτριας και συνεπώς πέφτει η απόδοσή της. Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας διάφορων μικρογεννητριών τέτοιου τύπου με τα χαρακτηριστικά τους, τις τάσεις που έφτασαν και την απόδοσή τους [25],[26].

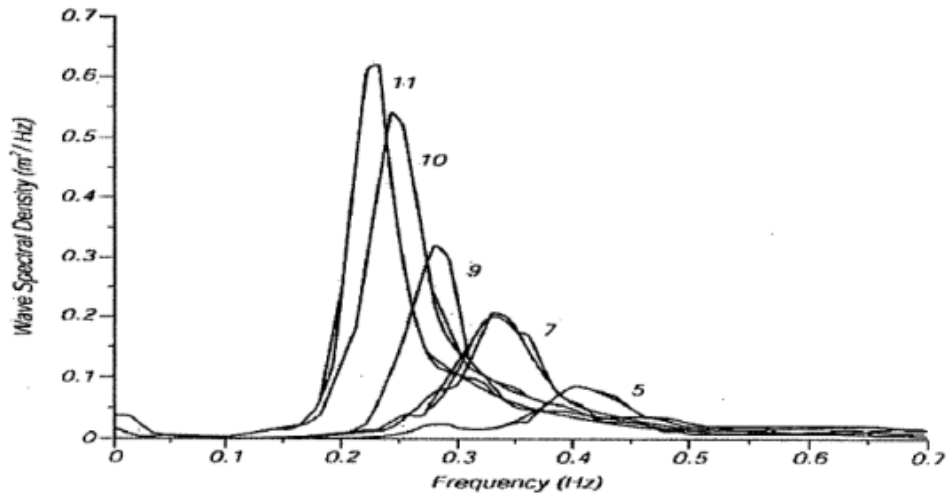
$l_0$ [mm]	$r_0$ [mm]	$s_d + s_w$ [mm]	$V$ [cm <sup>3</sup> ]	$l_c$ [mm]	$r_c$ [mm]	$N$ [turns]	$\phi_c$ [ $\mu$ m]	$R_i$ [ $\Omega$ ]	$L$ [H]
65.4	ND	27.3	$\approx 40$	ND	18.9	476	360	ND	0.01
70.4	ND	32.3	ND	ND	18.9	240	600	2.4	0.0029
ND	ND	ND	ND	1000	ND	ND	ND	ND	ND
44/46	3.5	26-30	ND	5	4	1500	ND	ND	ND
46	3.5	28	$\approx 7.4$	5	4	1500	100	96.5	ND
48	3.5	32	$\approx 7.4$	5	4	1500	100	96.1	ND
35	NA <sup>†</sup>	$\approx 20.7$	7.7	4	NA <sup>†</sup>	1000	635	450	ND
35	NA <sup>†</sup>	$\approx 20.7$	7.7	4	NA <sup>†</sup>	1000	635	450	ND
46-66	3.5	36-56	4.4-6.3	10-30	5.5	ND	200	10-20	ND
58	3.1	50	$\approx 12$	20	4.1	15000	68	3630	1
ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2300 <sup>f</sup>	1.5
ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1200	1.5
$\approx 55$	ND	$\approx 34/35$	12.7	6	8.5	1000	40	800	ND
$\approx 56$	7.5	$\approx 38$	$\approx 13$	ND	ND	500	110	60	ND
$\approx 80$	5.5	$\approx 35$	9	5	6	1000	ND	115	ND
254	28.6	101.6	$\approx 235$	101.6	31.2	10186	143	6191	ND
$\approx 144/204$	10.3	$\approx 112-184$	$\approx 71/100$	60	12.5	480	500	5	ND
$\approx 20$	2.2	$\approx 13$	$\approx 0.5$	ND	2.5	1100	50	236	ND
111.8-121	5.5	93.8-95	15.1-15.7	6-13	6.5	280-607	127	14-31	ND
ND	ND	72.6	ND	ND	ND	ND	ND	188	ND
ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
ND	3.3	ND	3.8	24	ND	9600	63	ND	ND
78.5	ND	49.5	$\approx 16$	26	5	10000	ND	ND	ND
28	ND	16	ND	ND	15 <sup>g</sup>	2 $\times$ 600	ND	ND	ND
100.8	6.6	72.2	$\approx 220$	13.7	8.7	450	80	$\approx 93$	ND
$\approx 110$	8	$\approx 65$	$\approx 74$	ND	10.3	1850	240	ND	ND
50	4.3	32	9	5 $\times$ 5	4.9	5 $\times$ 2800	57	5 $\times$ 950	ND
ND	5.3	ND	6.2	9.6	5.5	5600	44	2800	ND

Σχήμα 2.5 Πίνακας διάφορων γεωμετριών ηλεκτρομαγνητικών μικρογεννητριών [25].

Αυτή η αρχιτεκτονική επίσης είναι πολύ χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν κραδασμοί πολλών συχνοτήτων και συγκεκριμένα μια συστοιχία κάποιων τέτοιων ηλεκτρομαγνητικών γεννητριών με διαφορετικά χαρακτηριστικά όπως την διατομή του κυλίνδρου και συνεπώς την διατομή των μαγνητών καθώς επίσης και διαφορετικές διατομές του σύρματος περιέλιξης και του αριθμού των σπειρών. Έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετική συχνότητα συντονισμού κάθε γεννήτριας και άρα, λόγω της αρχής της επαλληλίας στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, έχουμε μια παρόμοια απόδοση σε πολλές συχνότητες. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που επιλέχθηκαν αυτού του είδους οι μικρογεννήτριες στη παρούσα διπλωματική.

## 2.3 Κραδασμοί στα πλοία και τύποι

Οι δονήσεις στα πλοία είναι δύο τύπων. Στην πρώτη κατηγορία συναντάμε αυτές που χαρακτηρίζονται ως χαμηλής κινητικότητας και αίτια δημιουργίας τους είναι ο κυματισμός της θάλασσας, οι οποίες είναι κινήσεις όπως οι διάφορες κλίσεις που παίρνει το πλοίο και χαρακτηρίζονται από πολύ μικρές συχνότητες από 0,1 Hz έως 0,7 Hz όπως φαίνεται και στο σχήμα στη συνέχεια και πολύ μεγάλου πλάτους ταλάντωσης. Στη δεύτερη κατηγορία δονήσεων στα πλοία είναι αυτές που χαρακτηρίζονται ως υψηλότερης κινητικότητας. Είναι δονήσεις υψηλότερων συχνοτήτων αλλά μικρού πλάτους ταλάντωσης.

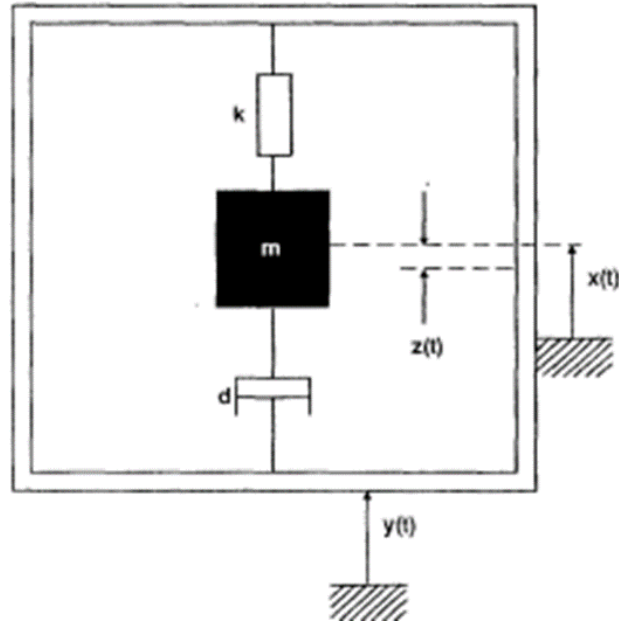


Σχήμα 2.6 Σχεδιάγραμμα του μεγέθους των κραδασμών που οφείλονται στους κυματισμούς [20].

Οι ντιζελοκινητήρες είναι η πιο βασική πηγή δονήσεων. Η συχνότητα των δονήσεων εξαιτίας των ντιζελοκινητήρων εξαρτάται από την ταχύτητα της περιστροφής τους για μεσαία επίπεδα ταχυτήτων από 300 έως 1200 RPM, οι συχνότητες είναι της τάξης από 5 έως 20 Hz. Επίσης άλλη μια πηγή δονήσεων είναι οι διάφορες παρεμβολές που προκαλεί η ροή του νερού λόγω ανισορροπίας της προπέλας και κυμαίνονται από 1 έως 11 Hz [20]. Λόγω του ότι τα περισσότερα πλοία έχουν μηχανές μεσαίων συχνοτήτων και ότι είναι πιθανό να υπάρξουν παρεμβολές στην ροή του νερού λόγω ανισορροπίας και κακής ευθυγράμμισης της προπέλας, στην παρούσα διπλωματική η γεννήτρια που θα κατασκευαστεί θα έχει ως στόχο να είναι αποδοτική στις συχνότητες από 1 έως 20 Hz.

## 2.4 Ανάλυση μηχανικού ισοδυνάμου

Γενικά οι ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες ανήκουν στην κατηγορία των αδρανειακών γεννητριών όπως οι ηλεκτροστατικές και τα πιεζοηλεκτρικά, καθώς εκμεταλλεύονται με μηχανικό τρόπο τις ταλαντώσεις του περιβάλλοντος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά να αναφέρουμε ότι η μάζα της πηγής κραδασμών είναι πολύ μεγαλύτερη της συνολικής μάζας της γεννήτριας και για αυτό θα παρουσιάζεται ως μια άπειρη πηγή ενέργειας. Γι' αυτόν το λόγο η κίνηση της πηγής δεν επηρεάζεται από την ενέργεια που εξάγεται από την γεννήτρια. Έτσι παρακάτω παρουσιάζεται το μηχανικό ισοδύναμο μίας τέτοιας γεννήτριας στην γενική περίπτωση. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.7, αποτελείται από ένα πλαίσιο μέσα στο οποίο μια μάζα  $m$  είναι συζευγμένη με ένα ελατήριο σταθεράς  $k$  [17].



Σχήμα 2.7 Μηχανικό ισοδύναμο ηλεκτρομαγνητικής μικρογεννήτριας [17]

Όταν η γεννήτρια βρεθεί σε περιβάλλον όπου υπάρχουν κραδασμοί και πιο συγκεκριμένα σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από έντονες περιοδικές κινήσεις συγκεκριμένου πλάτους και συχνότητας. Τότε η μάζα μέσα στο πλαίσιο ταλαντώνεται και η κινητική ενέργεια που έχει μέσω ηλεκτρομηχανικών μετατροπέων μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική μέσω ηλεκτρομαγνητικής μετατροπής μετατρέπουμε την ενέργεια σε ηλεκτρική.

Ο μετατροπέας αυτός διακρίνεται από συντελεστή απόσβεσης  $d$  και στην ουσία είναι ο συνολικός συντελεστής απόσβεσης και αποτελείται από τον συντελεστή απόσβεσης  $d_e$  ο οποίος εκφράζει την αντίσταση που βρίσκει η μάζα λόγω της ηλεκτρεγερτικής δύναμης στην κίνηση της, με αποτέλεσμα την μετατροπή της ενέργειας από κινητική σε ηλεκτρική, και από τον  $d_m$  ο οποίος εκφράζει της μηχανικές ατέλειες που υπάρχουν στην γεννήτρια και λόγω αυτών κατά την κίνηση της μάζας εμφανίζονται διάφορες τριβές όπως αυτές ανάμεσα στα τοιχώματα αλλά και λόγω της αντίστασης του αέρα με αποτέλεσμα μέρος της κινητικής ενέργειας που έχει δεσμευθεί λόγω της κίνησης να επιστρέφει στο περιβάλλον με την μορφή θερμότητας και συνεπώς να μειώνεται η απόδοση της γεννήτριας. Όπως θα φανεί και στις εξισώσεις που ακολουθούν όσο μεγαλύτερη είναι η αδρανειακή μάζα τόσο μεγαλύτερη και η απόδοση της γεννήτριας.

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση της αδρανειακής μάζας μέσα στο πλαίσιο σε σχέση με το σημείο έναρξης των κραδασμών περιγράφεται από την εξίσωση (2.1)

$$m\ddot{z}(t) + d\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (2.1)$$

Όπου  $y(t)$  είναι το πλάτος των κραδασμών και  $z(t)$  είναι το πλάτος ταλάντωσης της αδρανειακής μάζας εντός του πλαισίου. Η δύναμη,  $F$ , που ασκείται στη μάζα  $m$  εκφράζεται από την εξίσωση (2.2)

$$F = -m\ddot{y}(t) \quad (2.2)$$

Και οφείλεται στην δύναμη του ελατηρίου και λόγω των αποσβέσεων  $d$ . Η συνολική ισχύς,  $P$ , της αδρανειακής μάζας δίνεται από την εξίσωση (2.3)

$$P(t) = -m\dot{y}(t)[\dot{y}(t) + \dot{z}(t)] \quad (2.3)$$

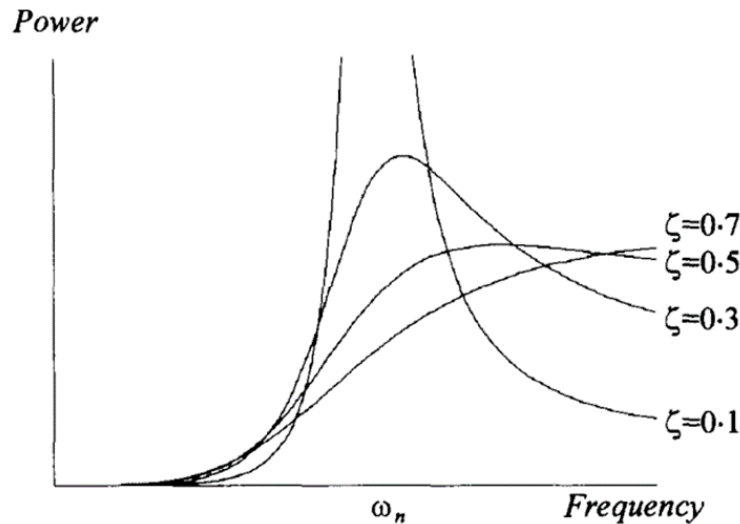
Σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε ότι για χάριν απλότητας αλλά κυρίως καθώς στο εργαστήριο οι μετρήσεις γίνονται με βάση κραδασμούς που περιγράφονται από απλές τριγωνομετρικές εξισώσεις. Θεωρούμε ότι οι κραδασμοί είναι απλά συνημίτονα του τύπου  $y(t)=Y_0\cos(\omega t)$  και λόγω του παράγοντα απόσβεσης  $de$  της γεννήτριας η ισχύς που μετατρέπεται σε ηλεκτρική,  $Pe$ , προκύπτει μέσω της (2.2) και περιγράφεται από την εξίσωση (2.4). Επίσης θεωρούμε ότι οι μηχανικές απώλειες λόγω τριβών και πιο συγκεκριμένα ότι η μηχανική απόσβεση  $dm$  είναι πολύ μικρότερη της ηλεκτρικής  $de$ .

$$Pe = \frac{mdeY_0^2\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3\omega^3}{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2de\frac{\omega}{\omega_n}\right]^2} \quad (2.4)$$

Όπου  $de$  είναι ο παράγοντας ηλεκτρικής απόσβεσης της γεννήτριας,  $\omega_n$  η συχνότητα συντονισμού,  $Y_0$  το μέγιστο πλάτος των κραδασμών και  $\omega$  η συχνότητα των κραδασμών.

Στο σχήμα 2.8 φαίνεται ένα γράφημα κάποιων προσομοιώσεων σχετικά με την παραγόμενη ισχύ από γεννήτριες διάφορων συντελεστών  $de$  και βλέπουμε ότι όταν οι κραδασμοί έχουν την ίδια συχνότητα με την συχνότητα συντονισμού, τότε η γεννήτρια έχει την μέγιστη απόδοση. Επίσης φαίνεται ότι ο  $de$  είναι ένας βασικός παράγοντας της απόδοσης μια γεννήτριας καθώς όπως φαίνεται από την εικόνα, για εφαρμογές όπου η συχνότητα των κραδασμών έχει μικρό εύρος γύρω από μία κεντρική συχνότητα ένας χαμηλός  $de$  θα έδινε καλύτερη απόδοση. Αντίθετα εάν η βασική συχνότητα ποικίλει με την πάροδο του χρόνου όπως και στην περίπτωση που μελετάμε. Είναι απαραίτητο ένας πιο υψηλός συντελεστής απόσβεσης  $de$  για την διερεύνηση του εύρους ζώνης της γεννήτριας.





Σχήμα 2.8 γράφημα ισχύος ανάλογα τον συντελεστή ηλεκτρικής απόσβεσης [17]

Το πιο σημαντικό γεγονός που προκύπτει από την ανάλυση είναι ότι η ποσότητα της παραγόμενης ισχύος είναι ανάλογη με τον κύβο της συχνότητας της δόνησης. Πράγμα που αποτελεί καταλυτικό παράγοντα στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη μικρογεννητριών καθώς μας δείχνει ότι τον βασικότερο ρόλο τον παίζει η συχνότητα και όχι το πλάτος της ταλάντωσης. Συνεπώς είναι πιθανό να παράγεται πολύ περισσότερη ισχύ σε εφαρμογές που υπάρχουν μεγάλες συχνότητες σε αντίθεση με εφαρμογές όπου οι συχνότητες είναι χαμηλές [17].

## 2.5 Φυσικά όρια του σχεδιασμού

Όταν η γεννήτρια λειτουργεί στην συχνότητα συντονισμού η παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης (2.5)

$$Pe = \frac{m\gamma\omega^2\omega n^3}{4de} \quad (2.5)$$

Αν ο  $de$  είναι μηδέν τότε η παραγόμενη ισχύς απειρίζεται. Ωστόσο αυτό είναι αδύνατον λόγω φυσικών περιορισμών, συνεπώς ο  $de$  είναι μεγαλύτερος του μηδέν και άρα η παραγόμενη ισχύς είναι πάντα πεπερασμένη. Έτσι για την κατασκευή μιας γεννήτριας με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόδοση πρέπει να έχουμε ορίσει τα όρια του  $de$  για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Η μείωση της τιμής του συντελεστή ηλεκτρικής απόσβεσης  $de$  έχει ως αποτέλεσμα επίσης την αύξηση του πλάτους της ταλάντωσης της αδρανειακής μάζας εντός του πλαισίου. Όμως η κίνηση αυτή έχει κάποια όρια λόγω της γεωμετρίας και των διαστάσεων της γεννήτριας. Γι' αυτό ο συντελεστής πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε η κίνηση να γίνεται εντός των ορίων της γεννήτριας και στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών να αποφεύγονται συγκρούσεις της αδρανειακής μάζας με τα τοιχώματα και άρα φθορές στην γεννήτρια.



Αυτό μας δείχνει ότι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραχθεί από μια συγκεκριμένη γεννήτρια έχει να κάνει και με το μέγιστο επιτρεπτό πλάτος ταλάντωσης της μάζας εντός του πλαισίου  $Z_{max}$ , και υπολογίζεται από την εξίσωση (2.6)

$$P_{max} = m d e \omega n^3 Z_{max}^2 \quad (2.6)$$

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω ο συντελεστής απόσβεσης μπορεί να μην αποτελείται μόνο από τον συντελεστή ηλεκτρικής απόσβεσης  $de$  αλλά μπορεί να υπάρχει και η ανεπιθύμητη απόσβεση  $dm$  που οφείλεται σε διάφορες μηχανικές αστοχίες όπως η τριβή των κινούμενων μηχανισμών. Αν ο συντελεστής  $de$  είναι ίδιας τάξης μεγέθους με τον συντελεστή απόσβεσης  $dm$  τότε η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς κατά τον συντονισμό υπολογίζεται από την εξίσωση (2.7), αν είναι μιας τάξης μεγαλύτερος τότε υπολογίζεται από τις προηγούμενες εξισώσεις [27].

$$P_e = \frac{d e m \gamma_0^2 \omega n^3}{4[d e + d m]} \quad (2.7)$$

## 2.6 Το μοντέλο της αδρανειακής μάζας στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών γεννητριών

Στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών γεννητριών όπου υπάρχει ένας μόνιμος μαγνήτης ο οποίος κινείται σε σχέση με ένα πηνίο. Οι παράγοντες που ελέγχουν τον συντελεστή ηλεκτρικής απόσβεσης της ηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας αναλύονται στις επόμενες εξισώσεις (2.8) και (2.9), οι οποίες ορίζουν τη δύναμη, την τάση και το ρεύμα που διατρέχει το πηνίο λόγω της κίνησης του μαγνητικού πεδίου μέσα του ή καλύτερα λόγω του μεταβλητού μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται λόγω της κίνησης του μόνιμου μαγνήτη είναι:

$$F = K e I \quad (2.8)$$

$$e = K e \dot{z} \quad (2.9)$$

Όπου  $F$  είναι η δύναμη που ασκείται κάθε στιγμή στην μάζα  $m$ ,  $I$ , το ρεύμα που διατρέχει το πηνίο,  $Ke$ , είναι ένας παράγοντας μεταγωγής που εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου του μόνιμου μαγνήτη και από την γεωμετρία της συσκευής,  $e$ , η τάση στα άκρα του πηνίου και  $\dot{z}$ , είναι η σχετική ταχύτητα του μαγνήτη σε σχέση με το πηνίο.

Αν το πηνίο είναι συνδεδεμένο με κάποιο φορτίο αντίστασης  $R$  τότε η δύναμη μεταξύ του πηνίου και του μαγνήτη περιγράφεται από την (2.10)

$$F = \frac{K e^2}{R} \dot{z} \quad (2.10)$$

Συνεπώς ο συντελεστής απόσβεσης  $de$  μιας ηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας βάσει των προαναφερόμενων εξισώσεων υπολογίζεται ως:

$$d e = \frac{K e^2}{2 \omega n m R} \quad (2.11)$$

Και η τάση στα άκρα του πηνίου υπολογίζεται:

$$e = \frac{KeY\omega n}{2[de+dm]} \quad (2.12)$$

Από την εξίσωση αυτή παρατηρούμε ότι εάν αυξηθεί το  $Ke$  αυξάνεται και η τάση στα άκρα του πηνίου. Έτσι δίνεται η δυνατότητα στον κατασκευαστή να έχει την ευελιξία να επιλέξει εάν γεννήτρια είναι κυρίως πηγή ρεύματος ή τάσης [17]. Επίσης όπως είδαμε καθώς το  $Ke$  εξαρτάται από την ένταση του μαγνητικού πεδίου του μόνιμου μαγνήτη και λόγω της εξίσωσης (2.12) επιλέγουμε μαγνήτες νεοδυμίου ώστε η τάση στα άκρα να είναι όσο το δυνατόν πιο μεγάλη γίνεται γιατί καθώς όπως θα αναλυθεί και στο επόμενο κεφάλαιο αποτελεί πρόκληση η διαχείριση της ισχύος.

## 2.7 Κυκλωματικό ισοδύναμο ηλεκτρομαγνητικής γεννήτριας

Όπως ήδη γνωρίζουμε η εξίσωση που περιγράφει την κίνηση της αδρανειακής μάζας της γεννήτριας είναι η (2.1) όπου το πρώτο μέρος αναφέρεται στην κίνηση της αδρανειακής μάζας και το δεύτερο μέρος στην δύναμη που εφίσταται. Ένα ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μπορεί να βρεθεί για το σύστημα λαμβάνοντας υπόψιν τον μετασχηματισμό Laplace της εξίσωσης (2.1) που είναι ο εξής:

$$-ms^2Y(s) = sZ(s)[ms + d + \frac{k}{s}] \quad (2.13)$$

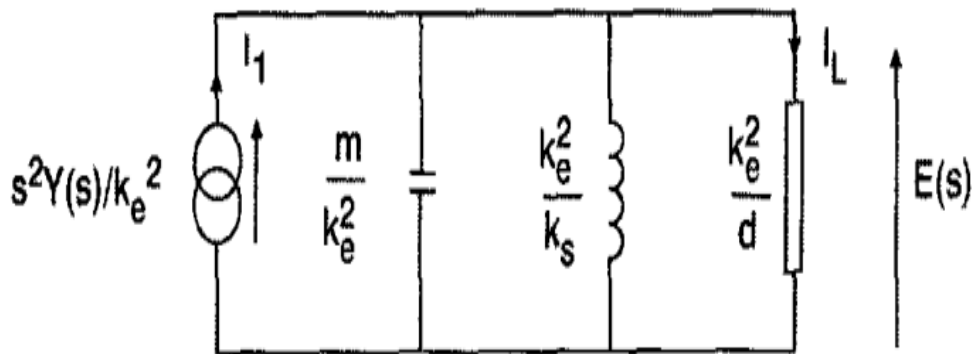
Η παραπάνω εξίσωση είναι στην ουσία το μηχανικό ανάλογο ενός ηλεκτρικού κυκλώματος Νόρτον όπως φαίνεται από την σύγκριση με την εξίσωση που το περιγράφει και είναι η εξής:

$$-I(s) = E(s) \left[ sC + \frac{1}{R} + \frac{1}{sL} \right] \quad (2.14)$$

Όπου  $I(s)$  είναι το ρεύμα που το διατρέχει,  $E(s)$  η επαγόμενη τάση, που όπως είδαμε προηγουμένως σχετίζεται με την συνολική δύναμη που ασκείται στη μάζα και την ταχύτητα της μάζας, αντίστοιχα μέσω της ηλεκτρομαγνητικής σταθεράς  $Ke$ , η ισοδύναμη χωρητικότητα, αντίσταση και αυτεπαγωγή ( $C, R$ , και  $L$ ) σχετίζονται με τις παραμέτρους μέσω των εξής εξισώσεων:

$$\begin{aligned} I(s) &= \frac{m}{Ke} s^2 Y(s) \\ E(s) &= KesZ(s) \\ C &= \frac{m^2}{Ke} \\ R &= \frac{Ke^2}{d} \\ L &= \frac{Ke^2}{K} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Βάσει αυτών των εξισώσεων το κυκλωματικό ισοδύναμο για μια ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια γενικά είναι αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.9



Σχήμα 2.9 ηλεκτρικό ισοδύναμο ηλεκτρομαγνητικής μικρογεννήτριας [27].

Η ισχύς που μετατρέπεται, λοιπόν, λόγω του αποσβέστηρα είναι:

$$Pe = \frac{E(s)^2}{R} = \frac{dm^2 Y(s)^2 \omega^6}{[ms^2 + dS + K]^2} \quad (2.16)$$

Και λόγω του ότι θεωρούμε κραδασμούς που περιγράφονται από μια συνάρτηση συνημίτονου  $y(t) = Y \cos(\omega t)$ , η προηγούμενη εξίσωση γίνεται:

$$Pe = \frac{dm^2 Y \omega^2 \omega^6}{[k - m\omega^2]^2 + [\omega d]^2} \quad (2.17)$$

Επίσης όπως προαναφέρθηκε, πολύ σημαντικό ρόλο στα συστήματα συγκομιδής ενέργειας συνεπώς και στα ηλεκτρομαγνητικά, παίζει η συχνότητα συντονισμού, που ορίζεται ως:

$$\omega n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.18)$$

Ο συντελεστής ηλεκτρικής απόσβεσης  $de$  υπολογίζεται ως:

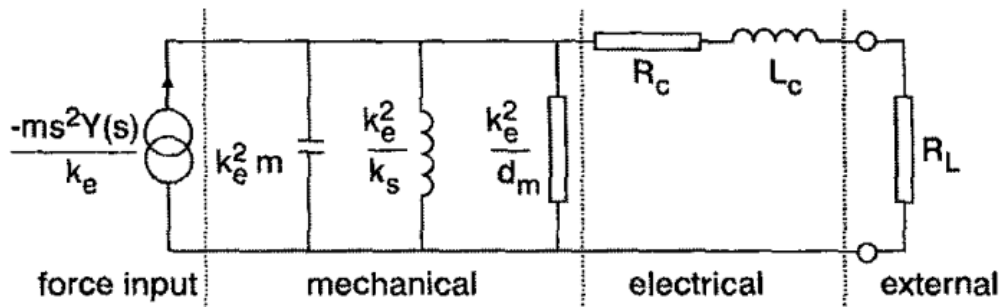
$$de = \frac{d}{2\sqrt{mk}} = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.19)$$

Και συνεπώς βάσει των εξισώσεων από (2.17) έως (2.19) προκύπτει ο τύπος υπολογισμού ισχύος (2.4) ξανά και η ανάλυση είναι η ίδια με πριν.

Όταν συνδεθεί φορτίο στην γεννήτρια ή κάποιο κύκλωμα διαχείρισης ισχύος όπως και στο σύνολο των εφαρμογών, πρέπει να έχει σύνθετη αντίσταση τέτοια ώστε η παραγωγή ισχύος να είναι μέγιστη. Για μέγιστη ισχύ επίσης, όπως έχει προαναφερθεί, μπορεί να γίνει μείωση της σταθεράς απόσβεσης, ωστόσο αυτό οδηγεί και σε μεγαλύτερη κίνηση της μάζας, η οποία μπορεί να είναι περιορισμένη λόγω κατασκευαστικών περιορισμών [27].

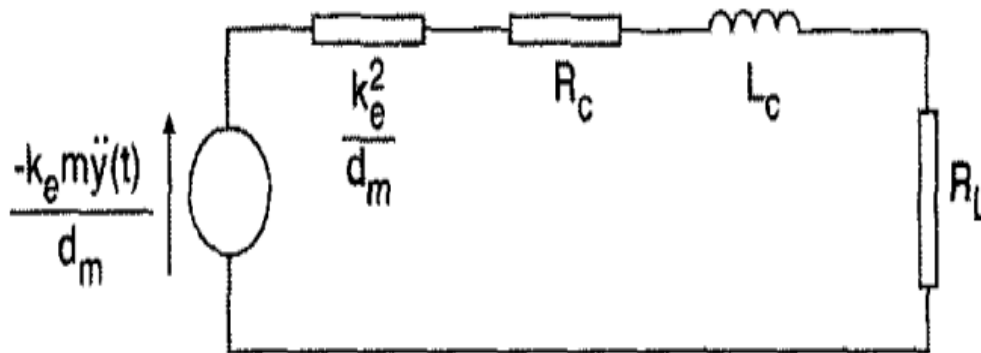
## 2.8 Κυκλωματικό ισοδύναμο ηλεκτρομαγνητικής μικρογεννήτριας με φορτίο

Το κυκλωματικό ισοδύναμο μιας γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη στην γενική περίπτωση με ένα φορτίο  $R_L$  είναι αυτό που φαίνεται στην εικόνα όπου τα  $R_c$  και  $L_c$  είναι η αντίσταση και αυτεπαγωγή του πηνίου αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το  $dm$  στο κυκλωματικό ισοδύναμο που παρουσιάζεται εκφράζει την μηχανική απόσβεση που είναι ανεπιθύμητη και την ηλεκτρική.



Σχήμα 2.10 ηλεκτρικό ισοδύναμο ηλεκτρομαγνητικής το οποίο λαμβάνει υπόψιν την μηχανική απόσβεση συνδεδεμένο σε φορτίο  $R_L$  [27].

Στην περίπτωση που η γεννήτρια λειτουργεί στον συντονισμό ο παράλληλος κλάδος του κυκλώματος γίνεται άπειρης αντίστασης και το κυκλωματικό ισοδύναμο είναι αυτό που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [27].



Σχήμα 2.11 ηλεκτρικό ισοδύναμο ηλεκτρομαγνητικής μικρογεννήτριας στο συντονισμό με φορτίο  $R_L$  [27].

Η ισχύς λοιπόν που δαπανάται στο φορτίο δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$PL(\omega n) = \frac{k_e^2 m^2 Y_0^2 \omega n^4 R_c}{d_m^2 \left[ \left( R_c + R_L + \frac{k_e^2}{d_m} \right) + (\omega n L_c)^2 \right]} \quad (2.20)$$

Η ισχύς της γεννήτριας, όπως βλέπουμε και από την εξίσωση, μπορεί να μεγιστοποιηθεί αν  $R_L \gg R_c$  δηλαδή αν η αντίσταση του πηνίου είναι πολύ μικρότερη της αντίστασης του φορτίου. Επίσης για μέγιστη μεταφορά ισχύος η ηλεκτρική

σύνθετη αντίσταση του φορτίου πρέπει να είναι ίση με την ισοδύναμη αντίσταση της μηχανικής απόσβεσης, δηλαδή:

$$K_e = \sqrt{R_L dm} \quad (2.21)$$

Έτσι σε αυτή την περίπτωση η ισχύς που οδηγείται στο φορτίο είναι μέγιστη και υπολογίζεται ως:

$$PL(\omega n) = \frac{m^2 \gamma o^2 \omega n^2}{4dm} = \frac{m \gamma o^2 \omega n^3}{8de} \quad (2.22)$$

## 2.9 Κανόνες σχεδιασμού

Βάσει όλων αυτών που προαναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο προκύπτουν κάποιοι κανόνες σχεδιασμού που πρέπει να ακολουθούνται όσο το δυνατόν περισσότερο γίνεται ώστε σε κάθε εφαρμογή να επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοση μεταφοράς ισχύος:

1. Πρέπει η αδρανειακή μάζα να είναι όσο τον δυνατόν μεγαλύτερη.
2. Η σταθερά ελατηρίου  $K$  (αναφέρεται ως σταθερά ελατηρίου διότι και στην περίπτωση όπου αντί για ελατήριο χρησιμοποιούνται μαγνήτες ομόρροπα με τον μαγνήτη για τον έλεγχο της κίνησής του, ο μηχανισμός περιγραφής είναι ακριβώς ο ίδιος με ένα ελατήριο) να επιλέγεται ώστε η συχνότητα συντονισμού να συμπίπτει με την συχνότητα των κραδασμών.
3. Το γραμμικό εύρος του ελατηρίου καθώς και η μέγιστη κίνηση της μάζας πρέπει να επαρκούν ώστε στον συντονισμό η μάζα να μπορεί να έχει την μέγιστη μετατόπιση χωρίς προβλήματα, όπως σύγκρουση με τα τοιχώματα της γεννήτριας ή κοπή του ελατηρίου.
4. Η αντίσταση του σύρματος του πηνίου να είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μικρότερη σε σχέση με αυτή του φορτίου.
5. Η μηχανική απόσβεση να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη γίνεται.
6. Πρέπει η ηλεκτρομαγνητική σταθερά  $K_e$  να είναι τέτοια ώστε η αντίσταση  $R_L$  να είναι όσο το δυνατόν ίση με την αντίσταση πηγής.

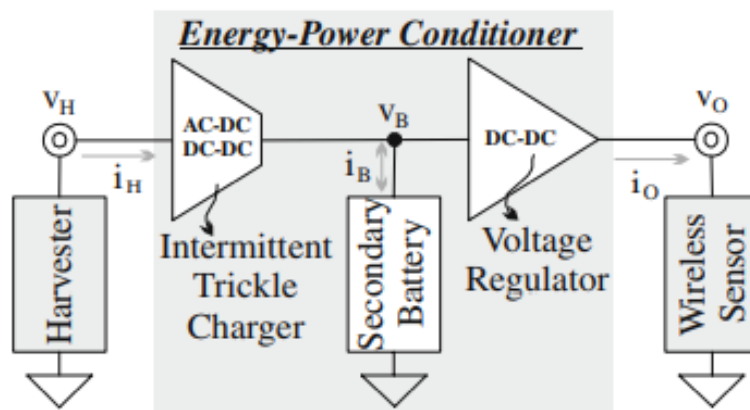
Όπως γίνεται αντιληπτό, πρακτικά είναι δύσκολο να ικανοποιούνται όλες αυτές οι απαιτήσεις. Για παράδειγμα είναι δύσκολο να έχουμε μεγάλο  $k_e$  διατηρώντας το  $R_c$  χαμηλό, διότι η ηλεκτρομαγνητική σταθερά  $k_e$  αυξάνεται όσο αυξάνονται οι σπείρες του πηνίου αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται και η  $R_c$  δηλαδή αυξάνεται και η αντίσταση του πηνίου. Απαιτήση που γίνεται ακόμα πιο δύσκολη όταν ο χώρος για την κατασκευή του πηνίου είναι περιορισμένος [27].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

### 3.1 Κυκλώματα διαχείρισης ενέργειας

Η τάση στα άκρα του πηνίου της γεννήτριας θα είναι εναλλασσόμενη όπως είναι φυσικό. Ωστόσο όπως ήδη γνωρίζουμε από την βιβλιογραφία ανάλογα με την εφαρμογή η παραγόμενη ισχύς από την γεννήτρια κυμαίνεται από κάποια  $\mu\text{W}$  έως εκατοντάδες  $\text{mW}$ , ενώ η τάση είναι κάποιων  $\text{mV}$ . Αυτό κυρίως το γεγονός είναι και η αιτία που καθιστά τον πλήρη ανορθωτή ή την ημιανόρθωση μη αποδοτικές λύσεις διότι σε πολλές εφαρμογές η τάση δεν ξεπερνά το διάκενο των διόδων με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται οποιαδήποτε διαχείριση της ισχύος, ενώ σε εφαρμογές που ξεπερνάει το διάκενο είτε της ημιανόρθωσης είτε του πλήρη ανορθωτή η απόδοση μειώνεται σημαντικά.

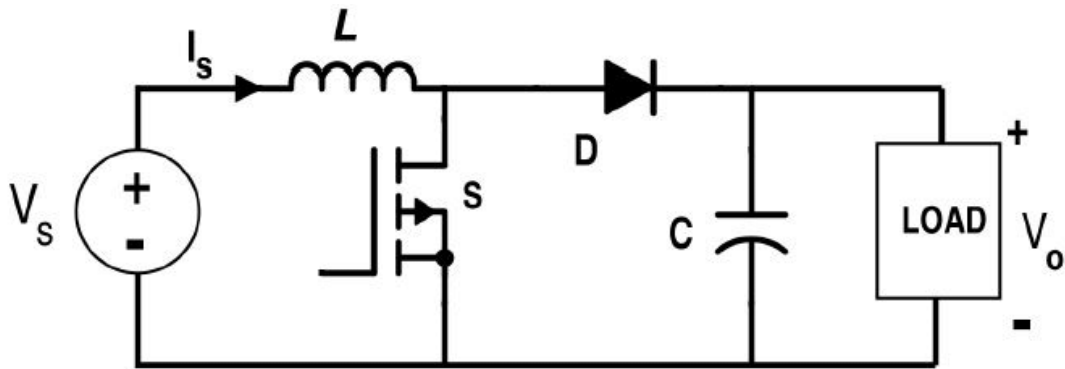
Συνεπώς πρέπει να αναζητήσουμε κυκλώματα τα οποία σε πρώτη φάση θα μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή (ένα τέτοιο κύκλωμα αναλύεται στο τέλος αυτό του κεφαλαίου), και έπειτα την συνεχή τάση θα την οδηγούν στο επίπεδο του αναγκαίου μέτρου που απαιτεί η εφαρμογή με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόδοση. Στο σχήμα 3.1 φαίνεται ένα διάγραμμα του κυκλώματος διαχείρισης ισχύος [28].



Σχήμα 3.1 κυκλωματικό διάγραμμα διαχείρισης ισχύος [28].

### 3.2 Μετατροπείς αναβάθμισης τάσης από DC σε DC

Οι μετατροπείς αυτοί (boost converters) χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα όπου θέλουμε να αυξήσουμε την τιμή της συνεχούς τάσης. Η γενική αρχιτεκτονική ενός τέτοιου κυκλώματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



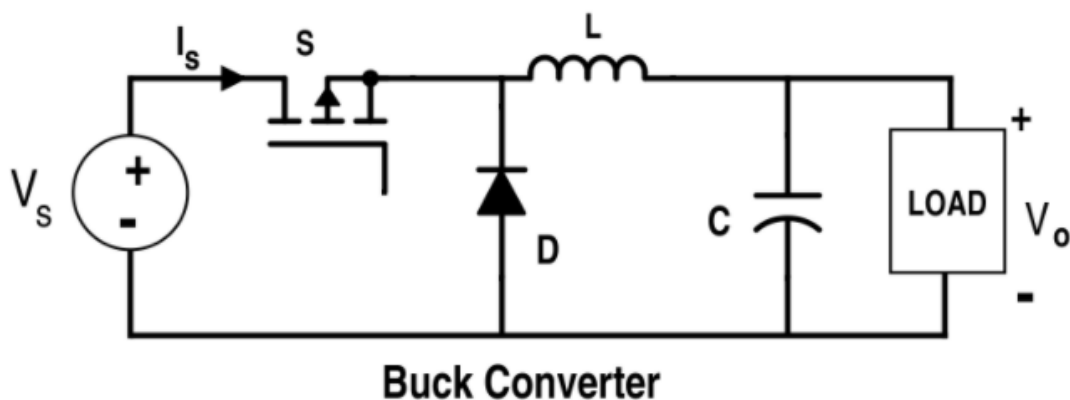
Σχήμα 3.2 μετατροπέας αναβάθμισης τάσης [29]

Το κύκλωμα αυτό λειτουργεί ως εξής:

1. Όταν το τρανζίστορ άγει, το ρεύμα του πηνίου  $I_s$  αυξάνεται. Επίσης η διόδος πολώνεται ανάστροφα και απομονώνεται η βαθμίδα με τον πυκνωτή και το φορτίο.
2. Όταν το ρεύμα φτάνει την επιθυμητή τιμή το τρανζίστορ σταματά να άγει και η διόδος πολώνεται ορθά φορτίζοντας τον πυκνωτή.
3. Το ρεύμα του πηνίου μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και όταν η τάση είναι μικρότερη του διάκενου τις διόδου σταματά να παρέχει ενέργεια στο κύκλωμα. Τότε το τρανζίστορ άγει ξανά και η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τον πυκνωτή πλέον να παρέχει ενέργεια στο κύκλωμα μέχρι να σταματήσει να άγει το τρανζίστορ και να παρέχει ξανά ενέργεια το πηνίο [29], [30].

### 3.3 Μετατροπείς υποβάθμισης τάσης από DC σε DC

Οι μετατροπείς αυτοί (buck converters ) χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα όπου θέλουμε να μειωθεί το μέτρο της τάσης. Η γενική τους αρχιτεκτονική είναι η εξής:



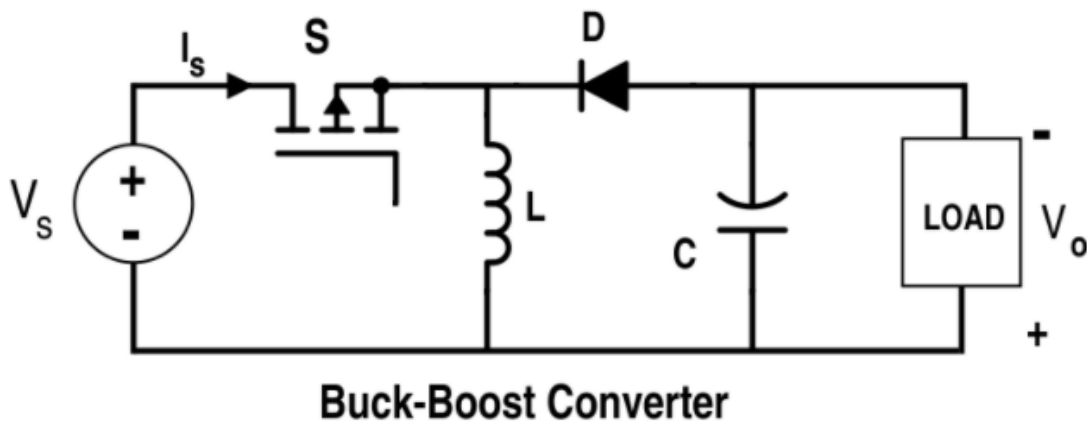
Σχήμα 3.3 μετατροπέας υποβάθμισης τάσης [29]

Το κύκλωμα αυτό λειτουργεί ως εξής:

1. Όταν το τρανζίστορ άγει, η ενέργεια μεταφέρεται απ' ευθείας από την είσοδο στην έξοδο και συγχρόνως ένα τμήμα της αποθηκεύεται στο πηνίο εξομάλυνσης. Η διόδος πολώνεται ανάστροφα και δεν άγει.
2. Όταν το τρανζίστορ δεν άγει, η επαγωγή τείνει να διατηρήσει το ρεύμα στην ίδια κατεύθυνση (ενεργώντας ως πηγή ρεύματος). Επομένως, η διαφορά δυναμικού στα άκρα της επαγωγής αυτής αναστρέφεται και η διόδος άγει.
3. Μετά από λίγο χρόνο η ενέργεια πηνίου μηδενίζεται, η διόδος παύει να άγει, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να σταματήσει το τρανζίστορ να άγει, με τον πυκνωτή να παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια στο κύκλωμα [29].

### 3.4 Μετατροπείς υποβάθμισης - αναβάθμισης τάσης από DC σε DC

Αυτοί οι μετατροπείς (buck-boost converters) χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου η συνεχής τάση εισόδου είναι μεταβλητή ή καλύτερα η τάση εισόδου μπορεί για διαφορετικές χρονικές περιόδους να έχει διαφορετική τιμή, αλλά η τάση εξόδου να θέλουμε να είναι πάντα κάποιας σταθερής τιμής. Η γενική αρχιτεκτονική του αντίστοιχου κυκλώματος παρουσιάζεται στο σχήμα στην συνέχεια:



Σχήμα 3.4 Μετατροπέας υποβάθμισης - αναβάθμισης τάσης[29]

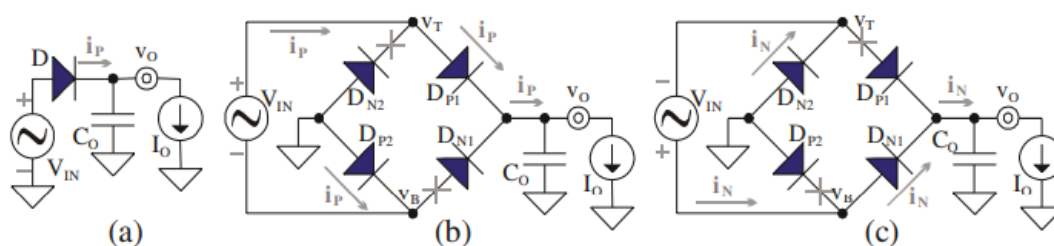
Η λειτουργία αυτής της διάταξης περιγράφεται ως εξής:

1. Όταν το τρανζίστορ άγει, ενέργεια από την είσοδο αποθηκεύεται στο πηνίο εξομάλυνσης L. Η διόδος πολώνεται ανάστροφα και δεν άγει, απομονώνοντας τη βαθμίδα εξόδου (τροφοδοσία φορτίου από πυκνωτή).
2. Όταν το τρανζίστορ δεν άγει, το πηνίο L δρα ως πηγή ρεύματος και η ενέργειά του μεταφέρεται στην έξοδο. Δεν παρέχεται ενέργεια από την είσοδο. Η διαφορά δυναμικού στα άκρα της επαγωγής L αναστρέφεται και η διόδος τίθεται σε αγωγή.
3. Η ενέργεια του πηνίου μηδενίζεται, η διόδος δεν άγει και η κατάσταση αυτή επαναλαμβάνεται τροφοδοτώντας ο πυκνωτής το κύκλωμα για όσο χρόνο χρειάζεται [29].



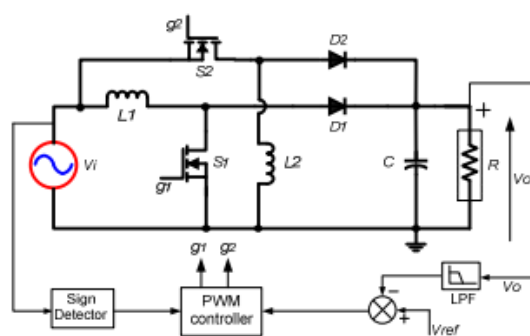
### 3.5 Μετατροπέας εναλλασσόμενου σε συνεχές

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως ο πλήρης ανορθωτής καθώς και η ημιανόρθωση δεν είναι καλή λύση για την ανόρθωση της τάσης, διότι οι δίοδοι παρουσιάζουν διάκενο της τάξης από 0,6 έως 0,8 V. Ωστόσο πρέπει να επισημανθεί ότι οι δίοδοι μπορούν να αντικατασταθούν με δίοδους Schottky οι οποίες έχουν πιο χαμηλό διάκενο το οποίο ξεκινά από τιμές της τάξης των 0,15 V. Επίσης λόγω της προόδου των ηλεκτρονικών οι κατασκευαστές προτιμούν να αντικαθιστούν τις δίοδους της ανόρθωσης με σύγχρονα MOSFET τα οποία έχουν τάσεις της τάξης από 0,05 έως 0,15 V. Το βασικό μειονέκτημα των MOSFET είναι ότι απαιτούν συγχρονισμό σημάτων για να άγουν την κατάλληλη στιγμή πράγμα που κάνει το κύκλωμα ακόμα πιο περίπλοκο [28].



Σχήμα 3.5 ανορθωτές εναλλασσόμενου ρεύματος με δίοδους [28].

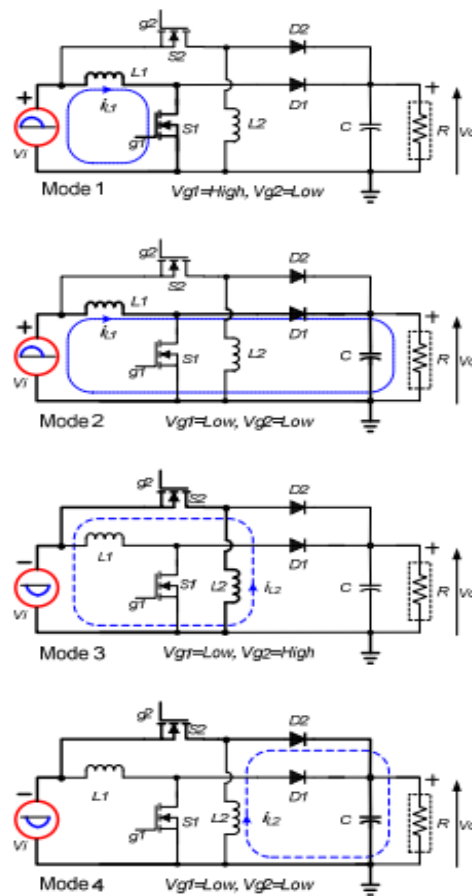
Επιπλέον η συνεχής τάση μετά τον μετατροπέα θα είναι μια τάση η οποία θα πρέπει να διαχειρίζεται εύκολα. Έτσι αντιλαμβανόμαστε ότι το κύκλωμα διαχείρισης ισχύος θα είναι στην ουσία ένας μετατροπέας ο οποίος μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση εισόδου σε συνεχή μεγαλύτερης τιμής. Ένας τέτοιος μετατροπέας παρουσιάζεται στην συνέχεια και αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του. Το κυκλωματικό του ισοδύναμο είναι αυτό του σχήματος 3.6.



Σχήμα 3.6 Άμεσος μετατροπέας εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχή [31].

Πρόκειται για έναν άμεσο μετατροπέα εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές, που αποτελείται από έναν μετατροπέα υποβάθμισης και έναν αναβάθμισης, οι οποίοι μελετήθηκαν προηγουμένως. Ο μετατροπέας αποτελείται από έναν πυκνωτή για τον έλεγχο του συνεχούς ρεύματος. Σε αυτόν τον μετατροπέα ο θετικός και ο αρνητικός κύκλος διαχειρίζεται από τον μετατροπέα αναβάθμισης και υποβάθμισης αντίστοιχα.

Ο πυκνωτής στο συγκεκριμένο μετατροπέα φορτίζεται τόσο κατά την διάρκεια του θετικού μισού κύκλου όσο και κατά την διάρκεια του αρνητικού μισού κύκλου. Κατά την λειτουργία του συμβαίνουν τα εξής όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 Τα στάδια λειτουργίας του άμεσου μετατροπέα εναλλασσόμενου σε συνεχές [31].

Στο παραπάνω σχήμα όπως προαναφέρθηκε ο πυκνωτής φορτίζεται από τον μετατροπέα αναβάθμισης που περιλαμβάνει το πηνίο  $L1$ , το MOSFET που λειτουργεί σαν διακόπτης  $S1$  και την δίοδο  $D1$  και φορτίζεται και από τον μετατροπέα υποβάθμισης που περιλαμβάνει το πηνίο  $L2$  το MOSFET  $S2$  και την δίοδο  $D2$  κατά τους θετικούς και αρνητικούς ημικύκλιους αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι οι δίοδοι καλό είναι να είναι Schottky, λόγω του χαμηλότερου διάκενου. Η επιλογή MOSFET απορρίπτεται στην συγκεκριμένη εφαρμογή λόγω της ήδη μεγάλης πολυπλοκότητας. Οι δίοδοι χρησιμοποιούνται για να αποτρέψουν την αντίστροφη τάση που δημιουργείται προς την γεννήτρια. Ο μετατροπέας αυτός χαρακτηρίζεται από τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας κατά την διάρκεια ενός κύκλου όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7.

Στην πρώτη κατάσταση λειτουργίας η τάση της πύλης,  $Vg1$ , είναι υψηλή και ως εκ τούτου, ο διακόπτης του μετατροπέα αναβάθμισης,  $S1$ , είναι ενεργοποιημένος. Συνεπώς το ρεύμα του πηνίου,  $L1$ , αρχίζει να αυξάνεται από το μηδέν. Κατά τη διάρκεια αυτής της λειτουργίας, η τάση της πύλης,  $Vg2$ , είναι χαμηλή, επομένως ο  $S2$  είναι κλειστός και οι δίοδοι,  $D1$  και  $D2$  επίσης δεν άγουν. Η δεύτερη κατάσταση

λειτουργίας ξεκινά στο τέλος της Λειτουργίας 1 όταν το  $V_{g1}$  γίνεται χαμηλό και το S1 απενεργοποιείται. Κατά τη διάρκεια αυτής της λειτουργίας, το L1 πολώνει ορθά το D1 και η αποθηκευμένη του ενέργεια φορτίζει τον πυκνωτή εξόδου, C. Επίσης το S2 παραμένει κλειστό και το D2 δεν άγει σε αυτή την λειτουργία αντίστοιχα. Στην τρίτη κατάσταση λειτουργίας το ρεύμα στο πηνίο L2 ενσωματώνεται στην αρνητική κατεύθυνση. Στη τέταρτη και τελευταία λειτουργία, το MOSFET S2 είναι απενεργοποιημένο και το πηνίο L2 πολώνει ορθά τη δίοδο D2, με αποτέλεσμα η ενέργεια που αποθήκευσε το L2 να φορτίζει τον πυκνωτή εξόδου, C [31].

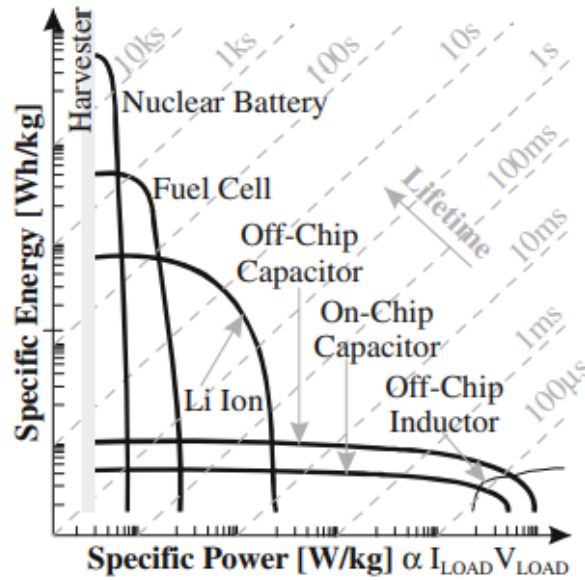
### 3.6 Μέσα αποθήκευσης της ενέργειας

Όπως ήδη έχει αναφερθεί μέσω αυτών των ηλεκτρομαγνητικών μετατροπών η παραγόμενη ισχύς είναι της τάξης από κάποιες δεκάδες  $\mu W$  έως κάποιες εκατοντάδες  $mW$  ανάλογα την εφαρμογή, την κατασκευή και το περιβάλλον όπου βρίσκεται η γεννήτρια. Μέσω των παραπάνω διατάξεων επιτυγχάνουμε την αύξηση της τάσης σε τιμή όπου μπορεί να την διαχειριστεί ένα φορτίο. Ωστόσο τα ίδια τα κυκλώματα διαχείρισης της ισχύος έχουν και αυτά κάποια κατανάλωση με αποτέλεσμα στην έξοδο τους να έχουμε λίγο μικρότερη ισχύ. Για αυτόν το λόγο πρέπει να φτιάχνονται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόδοση γίνεται.

Η συγκομιδή ενέργειας μέσω μικρογεννητριών έχει ως βασικό στόχο την τροφοδότηση αισθητήρων ή μικροκυκλωμάτων όπου είναι δύσκολη ή αδύνατη η σύνδεσή τους με καλωδίωση. Όμως πολλοί αισθητήρες έχουν μεγάλη κατανάλωση. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι ο αισθητήρας να κάνει περιοδικά μετρήσεις και να τίθεται, όταν δεν είναι σε πλήρη λειτουργία, σε κατάσταση βαθιάς χαμηλής κατανάλωσης, η οποία σύμφωνα με την βιβλιογραφία μπορεί να είναι της τάξης κάποιων εκατοντάδων  $nW$ . Επειδή οι γεννήτριες αυτές μπορεί στην πλήρη λειτουργία του αισθητήρα να μην μπορούν να τον τροφοδοτούν, γενικά προτείνεται ως λύση μετά το κύκλωμα διαχείρισης ισχύος, να υπάρχει κάποιος συσσωρευτής ενέργειας που θα φορτίζει όσο ο αισθητήρας είναι σε κατάσταση βαθιάς χαμηλής κατανάλωσης και θα του παρέχει την υπόλοιπη ενέργεια που χρειάζεται κατά την πλήρη λειτουργία του.

Στην ιδανική περίπτωση θα θέλαμε ο συσσωρευτής ενέργειας να παρουσιάζει ταυτόχρονα μεγάλη πυκνότητα ενέργειας αλλά και μεγάλη πυκνότητα ισχύος. Κάτι τέτοιο είναι πρακτικά αδύνατο, διότι συνήθως οι συσσωρευτές είτε είναι μεγάλης πυκνότητας ενέργειας και χαμηλής ισχύος, είτε το αντίστροφο, όπως φαίνεται και στο γράφημα στην συνέχεια σχετικά με κάποια είδη συσσωρευτών. Οι πυρηνικές μπαταρίες και οι κυψέλες καυσίμου χαρακτηρίζονται από υψηλές πυκνότητες ενέργειας ή παρομοίως υψηλές ειδικές ενέργειες (Joule per kilogram), αλλά μικρής πυκνότητας ισχύος και κατά συνέπεια αποδίδουν μεγάλης διάρκειας ζωής αλλά μόνο όταν είναι χαμηλά φορτισμένες. Στον αντίποδα οι πυκνωτές είναι χαμηλής πυκνότητας ενέργειας αλλά μεγάλης πυκνότητας ισχύος, κάτι που σημαίνει ότι μπορούν να δώσουν απεριόριστο ρεύμα και ισχύ αλλά στιγμιαία. Επίσης οι

μπαταρίες ιόντων λιθίου εμφανίζουν μέτρια πυκνότητα ενέργειας και μέτρια πυκνότητα ισχύος κάτι που σημαίνει ότι μπορούν να παρέχουν μέτρια επίπεδα ισχύος και ενέργειας. Έτσι ανάλογα την εφαρμογή, και αν χρειάζεται, καλούμαστε να χρησιμοποιήσουμε κάποιον από όλους αυτούς τους συσσωρευτές ενέργειας [28].



Σχήμα 3.8 Γράφημα πυκνότητας ενέργειας και πυκνότητας ισχύος διάφορων μέσων αποθήκευσης της ενέργειας [28].



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

### 4.1 Διάταξη πειράματος

Η διάταξη του πειράματος αποτελείται από μια γεννήτρια παραγωγής ημιτονοειδών κραδασμών, μια γεννήτρια ημιτονοειδούς σήματος και έναν ενισχυτή σήματος που ενισχύει το σήμα της γεννήτριας ημιτονοειδούς σήματος και διεγείρει την γεννήτρια παραγωγής κραδασμών. Στην γεννήτρια παραγωγής κραδασμών θα τοποθετούνται όλες οι ηλεκτρομαγνητικές μικρογεννήτριες, προκειμένου να μετρηθεί η ενεργός τάση που παράγουν σε φορτίο συνδεδεμένο παράλληλα με αυτές και αντίστασης όμοιας με του πηνίου. Επίσης θα μετρηθεί και η μέγιστη τάση μέσω ενός παλμογράφου για την μελέτη της κυματομορφής. Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζουμε την γεννήτρια παραγωγής κραδασμών, την γεννήτρια παραγωγής ημιτονοειδούς σήματος, τον ενισχυτή σήματος, καθώς και το εργαστηριακό πολύμετρο ακρίβειας 5 ψηφίων που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ενεργού τάσεως ώστε να προσδιοριστεί η ισχύς αντίστοιχα.



Εικόνα 4.1 Γεννήτρια παραγωγής κραδασμών

Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η γεννήτρια παραγωγής κραδασμών πάνω στην οποία τοποθετούνται οι διατάξεις προκειμένου να αρχίσουν να ταλαντώνονται.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, προκειμένου να αρχίσει να παράγει κραδασμούς η παραπάνω γεννήτρια έπρεπε να χρησιμοποιηθεί μια γεννήτρια παραγωγής ημιτονοειδούς σήματος, η οποία επίσης θα έπρεπε να μας δίνει την δυνατότητα να βλέπουμε τη συχνότητα του παλμού κάθε στιγμή έτσι ώστε να γνωρίζουμε για τις μετρήσεις μας την συχνότητα των κραδασμών, καθώς επίσης και να μας επιτρέπει να ορίσουμε το βήμα αλλαγής της συχνότητας ώστε να έχουμε την ικανότητα να πειραματιστούμε στις συχνότητες που μας ενδιαφέρουν. Για αυτούς τους λόγους χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια που φαίνεται στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 Γεννήτρια παραγωγής ημιτονοειδούς σήματος

Καθώς το σήμα που παράγει η παραπάνω γεννήτρια είναι στην ουσία ένα σήμα μικρής έντασης, δεν μπορεί να διεγερθεί η γεννήτρια κραδασμών και για αυτό χρησιμοποιείται ένας ενισχυτής τέτοιος ώστε να ενισχύσει το σήμα κατάλληλα ώστε να αρχίσει να ταλαντώνεται η γεννήτρια. Σκοπός επίσης της χρήσης του ενισχυτή αυτού, ήταν να μπορεί να ελέγχεται και το πλάτος της ταλάντωσης της γεννήτριας ώστε να προσομοιώνονται όσο το δυνατόν καλύτερα οι κραδασμοί που θα μελετηθούν. Ένας τέτοιος ενισχυτής φαίνεται στην εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3 ενισχυτής σήματος

Τέλος χρησιμοποιήθηκε ένα πολύμετρο ακριβείας ώστε να μετρηθεί η ενεργός τάση που παράγεται και να προσδιοριστεί η παραγόμενη ισχύς.



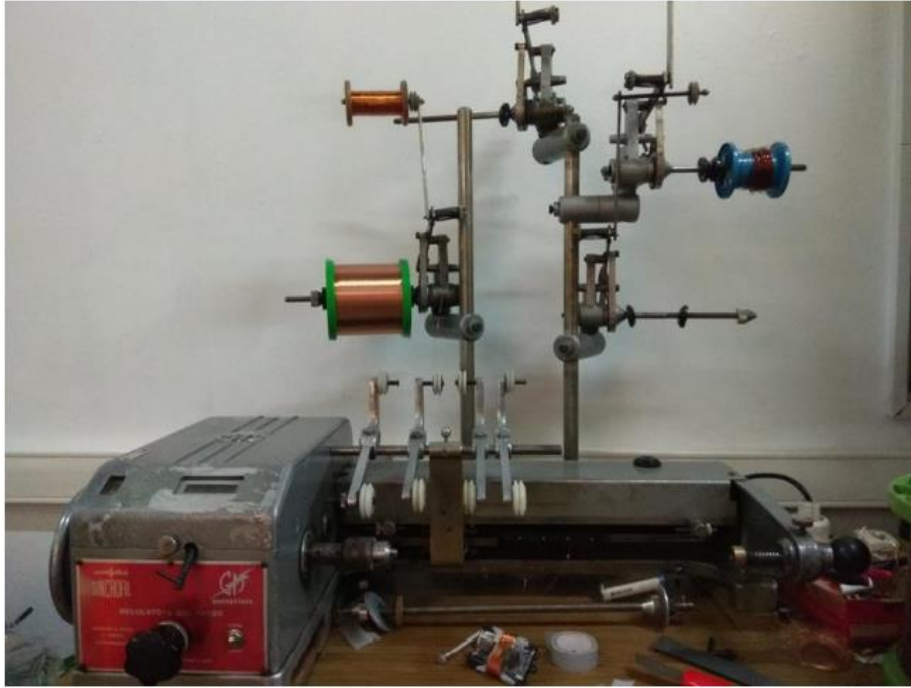
Εικόνα 4.4 Εργαστηριακό πολύμετρο ακριβείας



## 4.2 Περιγραφή κατασκευής μικρογεννητριών

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή της μικρογεννήτριας είναι η εξής:

1. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την επιλογή πλαστικού κυλινδρικού υποστρώματος διαμέτρου κατά 0,5 mm μεγαλύτερης από αυτή των μαγνητών, ώστε να μειωθούν οι τριβές με τα τοιχώματα και ο μαγνήτης να κινείται εύκολα εντός του υποστρώματος.
2. Για το δεύτερο στάδιο επιλέχθηκαν κυλινδρικοί μαγνήτες νεοδυμίου (NdFeB) με μήκος 2 mm ο καθένας, οι οποίοι είναι αυτοί που θα κινούνται εντός του πηνίου κατά την ταλάντωση και θα προκαλούν την παραγωγή τάσης στα άκρα του λόγω της μαγνητικής επαγωγής. Η επιλογή μαγνητών νεοδυμίου δεν είναι τυχαία. Αυτό έγινε διότι είναι οι πιο ισχυροί μόνιμοι μαγνήτες που υπάρχουν αυτή την στιγμή στο εμπόριο αλλά και για τον λόγο ότι είναι μεγαλύτερης πυκνότητας σε σχέση με άλλους μαγνήτες ίδιου μεγέθους. Αυτό σημαίνει ότι θα έχουμε για τον συγκεκριμένο όγκο της γεωμετρίας που θα χρησιμοποιούμε μέγιστη μάζα αδράνειας και συνεπώς μέγιστη κινητική ενέργεια. Όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό κομμάτι στην ουσία είναι αυτή που μετατρέπεται σε ηλεκτρική, άρα με αυτόν τον τρόπο θα επιτυγχάνεται και μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
3. Στο τρίτο στάδιο, προκειμένου να αποφευχθούν οι συγκρούσεις των μαγνητών με τα άκρα της γεννήτριας, προσθέσαμε μαγνήτες νεοδυμίου σε σχήμα δακτυλίου ώστε η κίνηση των μαγνητών να γίνεται πάντα εντός του πηνίου. Οι μαγνήτες τοποθετήθηκαν σε κατάλληλη απόσταση από την αρχή του πηνίου ώστε να μπορούν να ρυθμιστούν οι αντίρροπες δυνάμεις που θα αναπτύσσονται μεταξύ αυτών και του μαγνήτη εντός του πηνίου που κινείται και να μην επηρεάζουν και επιβραδύνουν την κίνησή του, αλλά να λειτουργούν ως παράγοντας διατήρησης της ταλάντωσης και να εμποδίζουν την κρούση του με τα τοιχώματα ώστε να μειωθούν οι μηχανικές φθορές. Επίσης επιλέχθηκαν μαγνήτες σχήματος δακτυλίου, ώστε η αντίσταση του αέρα στην κίνηση του μαγνήτη να είναι αμελητέα. Σε αυτό το στάδιο θα μπορούσαν να επιλεγθούν και μαγνήτες σχήματος δακτυλίου άλλου υλικού με πιο ασθενές μαγνητικό πεδίο, με άμεσο αποτέλεσμα η απόσταση τοποθέτησής τους από το πηνίο να είναι πιο μικρή και ιδανικά το μέγεθος της γεννήτριας να είναι αρκετά μικρότερο. Ωστόσο αυτό δεν έγινε διότι εκείνη την χρονική περίοδο δεν υπήρχαν στο εμπόριο μαγνήτες με διάμετρο όση του υποστρώματος.
4. Στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο τυλίγεται ένα πηνίο γύρω από το υπόστρωμα μέσα στο οποίο κινείται πάντα ο μαγνήτης και το μέγιστο πλάτος τις κίνησής του δεν ξεφεύγει από τα όρια του πηνίου. Για την δημιουργία των περιελίξεων χρησιμοποιήθηκε η περιελίκτη πηνίων που υπήρχε στο εργαστήριο και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.5.



Εικόνα 4.5 Περιελίτρια πηνίων

Προκειμένου να οδηγηθούμε στα τελικά συμπεράσματα ώστε να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί η μικρογεννήτρια η οποία θα λειτουργούσε στις συχνότητες από 0 έως 20 Hz, κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν γεννήτριες με διαφορετικά μήκη πηνίου, στρώσεων, αριθμού περιελίξεων καθώς και διαφορετικών μαγνητών.

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν μαγνήτες νεοδυμίου διαμέτρου 8 mm και 10 mm. Επίσης πειραματιστήκαμε και με το πώς ο αριθμός των μαγνητών εντός του πηνίου παίζει ρόλο στην παραγόμενη τάση.

Έτσι λοιπόν στις επόμενες ενότητες θα δούμε διαφορετικούς τύπους γεννητριών και για ποιον λόγο οδηγηθήκαμε στην τελική επιλογή. Έπειτα δοκιμάστηκαν διάφορες συστοιχίες έτσι ώστε να κατασκευαστεί μια τελική γεννήτρια η οποία θα είναι ικανή να τροφοδοτήσει έναν ασύρματο αισθητήρα.

Γι' αυτόν το σκοπό στην τελευταία ενότητα αναπτύχθηκε ένα απλό κύκλωμα έτσι ώστε να αποθηκεύεται η παραγόμενη ενέργεια σε υπερπυκνωτή και στην συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ώστε να λειτουργήσει μια διάταξη με έναν αισθητήρα Hall.

### 4.3 Γεννήτριες με μαγνήτες 10 mm

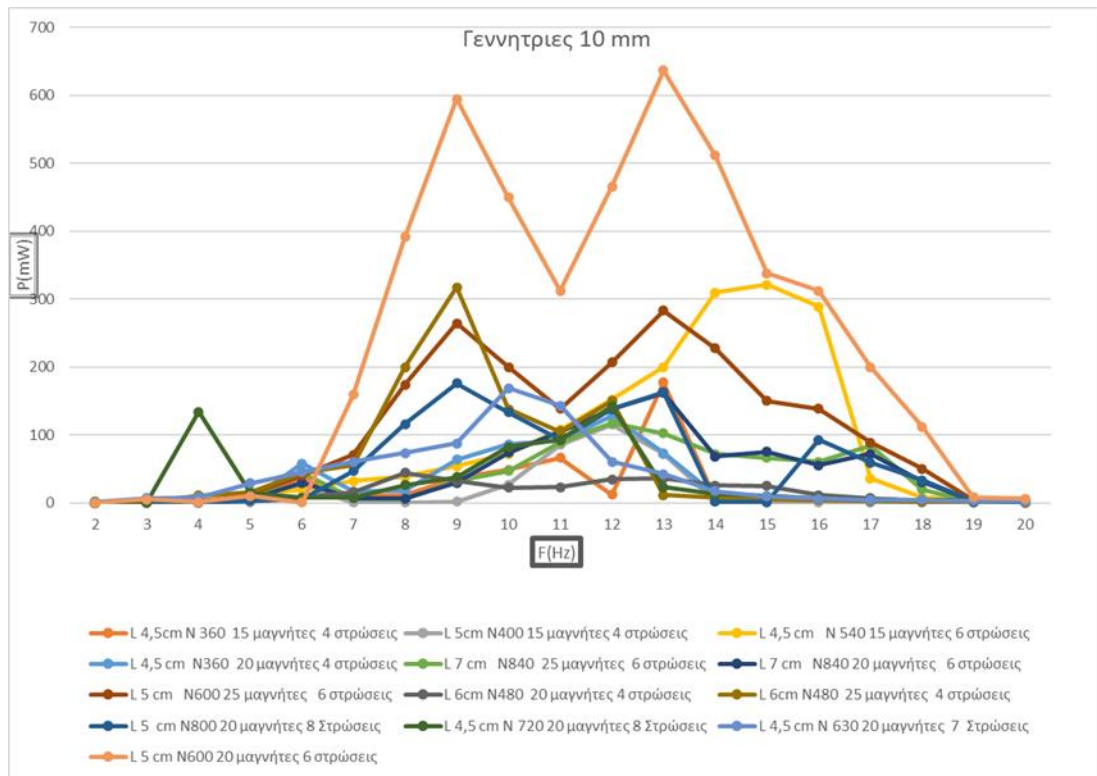
Στην συνέχεια παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων από γεννήτριες που περιλαμβάνουν μαγνήτες των 10 mm εντός του πηνίου. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται το διάγραμμα 4.1 ( προκύπτει από τις μετρήσεις οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες που υπάρχουν στο τέλος της εργασίας στο παράρτημα ) το οποίο μας δίνει μια πιο άμεση εικόνα για το ποια γεννήτρια είναι καταλληλότερη.

Οι μετρήσεις αυτές αφορούν γεννήτριες που ξεκινούν με πηνίο μήκους από 45 mm έως 70 mm, με αριθμό στρώσεων περιελίξεων από 4 έως 8, αριθμό περιελίξεων από 360 έως 840 και τέλος με αριθμό μαγνητών μέσα στο πηνίο είτε 15, είτε 20, είτε 25. Στην εικόνα 4.6 παρουσιάζεται μια τέτοια μικρογεννήτρια που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο.



Εικόνα 4.6: Ηλεκτρομαγνητική μικρογεννήτρια με μαγνήτες 10 mm.

Σκοπός εδώ ήταν ο πειραματισμός με διάφορες μικροαλλαγές στην γεωμετρία, έτσι ώστε να μπορούμε να συμπεράνουμε ποια είναι πιο κατάλληλη για την εφαρμογή, καθώς επίσης και για να αποδειχθεί ότι η γεωμετρία της κατασκευής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην συχνότητα συντονισμού του συστήματος όπως αναφέρθηκε και στην θεωρία. Επιπλέον κατά την αρχή διεξαγωγής των μετρήσεων οι γεννήτριες δοκιμάστηκαν και σε μεγάλα πλάτη ταλάντωσης. Ωστόσο υπήρξαν προβλήματα με την γεννήτρια παραγωγής κραδασμών διότι αυξήθηκε η θερμοκρασία της σε μη φυσιολογικά πλαίσια και συνεπώς οι μετρήσεις αυτές δεν έγιναν σε όλες τις γεννήτριες. Επιπλέον καθώς ο σχεδιασμός αφορά την κατασκευή γεννήτριας σε πλοίο όπου το πλάτος των ταλαντώσεων είναι μικρό, όλες οι μετρήσεις έγιναν για μέγιστο πλάτος ταλάντωσης 5 mm. Τα  $L$  και  $N$  είναι το μήκος πηνίου και ο αριθμός των περιελίξεων, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.1: Γράφημα ισχύος συνάρτηση της συχνότητας κάθε μικρογεννήτριας 10 mm.

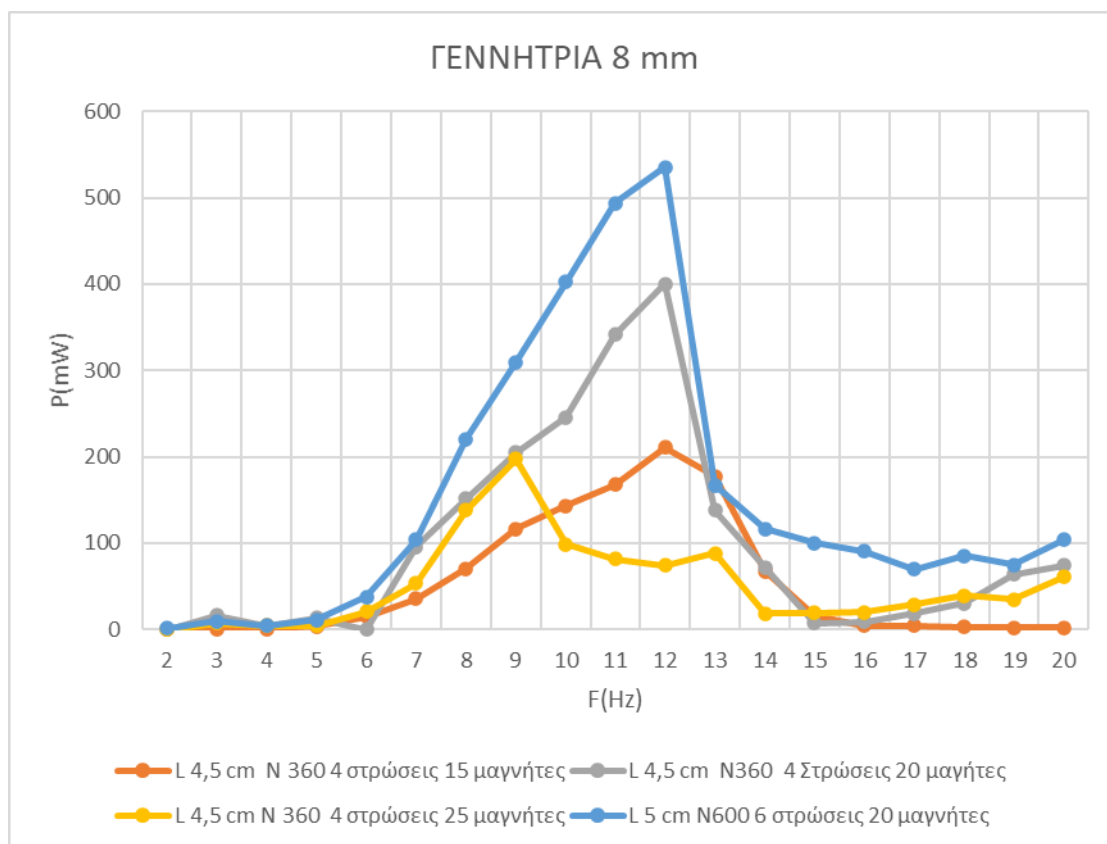
Παρατηρούμε λοιπόν ,από διάγραμμα ότι η πιο κατάλληλη γεννήτρια είναι αυτή με μήκος πηνίου 50 mm και 600 περιελίξεις με σύνολο μαγνητών εντός του πηνίου 20. Θα περίμενε κανείς ότι η αντίστοιχη γεωμετρία με 25 μαγνήτες θα ήταν πιο κατάλληλη, ωστόσο όπως αναφέρθηκε και στη θεωρία παίζει πολύ μεγάλο ρόλο η γεωμετρία της γεννήτριας και η μάζα των μαγνητών. Πιθανώς σε άλλες συχνότητες πιο υψηλές να είναι πιο κατάλληλη για τον συντονισμό. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι οι διατάξεις με περισσότερες περιελίξεις δεν είναι κατάλληλες για την εφαρμογή. Αυτό είναι φυσικό για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι ότι παρόλο που αυξάνεται η τάση αυξάνεται και η αντίσταση με αποτέλεσμα να μην υπάρχει σημαντική βελτίωση. Επίσης έχουν περισσότερα στρώματα περιελίξεων και έτσι χάνεται η ευαισθησία.

#### 4.4 Γεννήτριες 8 mm

Όπως και πριν, τώρα θα μελετηθούν και οι μικρογεννήτριες με μαγνήτη 8 mm. Ωστόσο με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα έχουμε συμπεράνει ότι ένα καλό νούμερο για περιελίξεις είναι το πολύ 600 καθώς και το μήκος του πηνίου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 50 mm. Με όλα αυτά και το γεγονός ότι δεν θα αλλάξει πολύ η γεωμετρία της γεννήτριας αλλά και ούτε η μάζα σε αυτή την ενότητα θα μελετηθούν γεννήτριες με μήκος πηνίου είτε 45 mm, είτε 50 mm.

Από τις μετρήσεις που έγιναν για την συγκεκριμένη γεωμετρία και όπως και πριν βρίσκονται στους πίνακες στο παράρτημα. Προκύπτει το εξής διάγραμμα το οποίο

μας δίνει μια πιο άμεση εικόνα για το ποια είναι καταλληλότερη για αυτή την εφαρμογή.



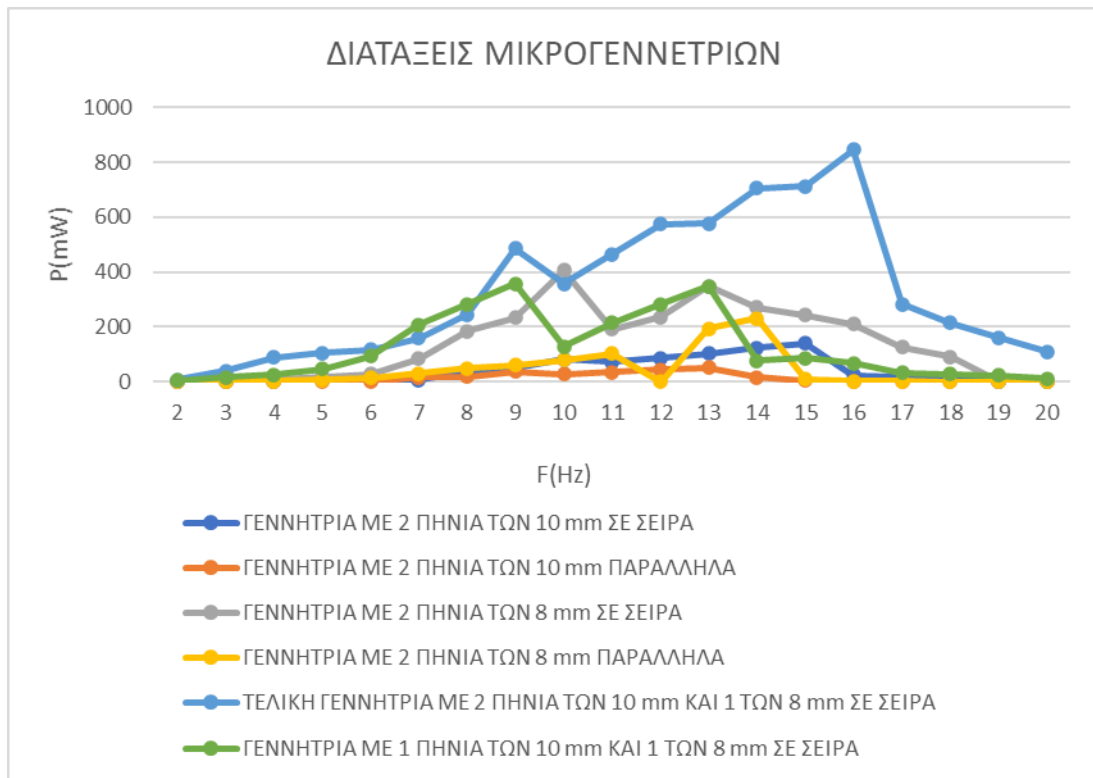
Διάγραμμα 4.2: Γράφημα ισχύος συνάρτηση της συχνότητας κάθε μικρογεννήτριας 8 mm.

Με βάση το διάγραμμα αυτό συμπεραίνουμε ότι από τις γεννήτριες που αποτελούνται από μαγνήτες των 8 mm πιο κατάλληλη είναι αυτή με μήκος πηνίου 50 mm και σύνολο περιελίξεων 600.

#### 4.5 Συστοιχίες μικρογεννητριών

Με βάση τα προηγούμενα οι καταλληλότερες γεννήτριες είναι αυτές που έχουν μήκος πηνίου 50 mm και αποτελούνται από 600 περιελίξεις. Σε αυτή την ενότητα μελετώνται διάφορες συνδεσμολογίες αυτών, με σκοπό να συμπεράνουμε ποια είναι η καταλληλότερη για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Από τις μετρήσεις που έγιναν, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες στο παράρτημα. Προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα από το οποίο συμπεραίνουμε ποια συστοιχία γεννητριών είναι κατάλληλη για την εφαρμογή και συγκεκριμένα για την συγκομιδή ενέργειας από τους κραδασμούς στα πλοία. Με βάση το διάγραμμα είναι αυτή που αποτελείται από δύο γεννήτριες των 10 mm και μια των 8 mm, όλες συνδεδεμένες σε σειρά μεταξύ τους, και παρουσιάζεται στην εικόνα 4.7.



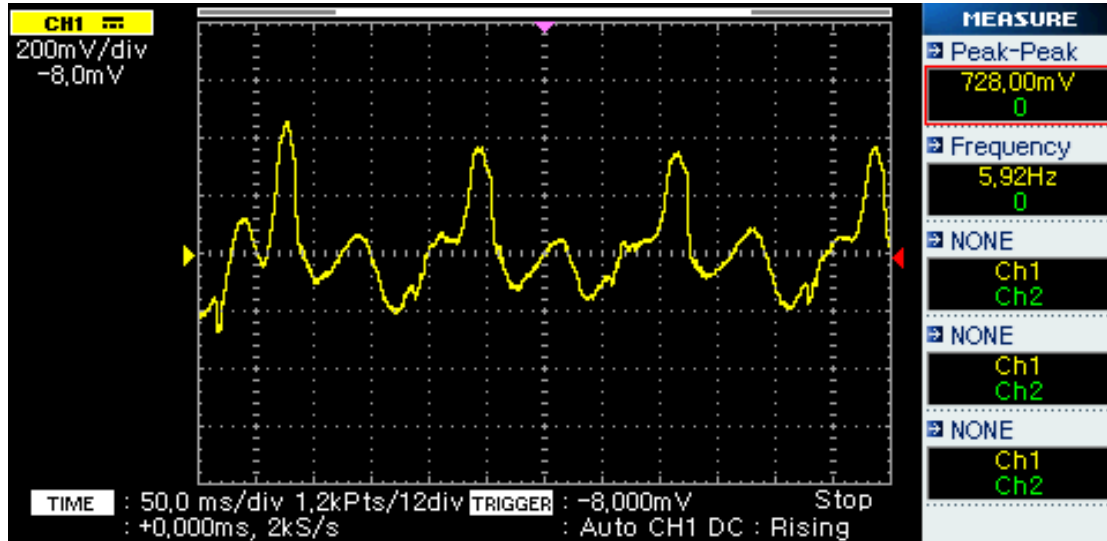
Διάγραμμα 4.3: Γράφημα ισχύος συνάρτηση της συχνότητας κάθε συστοιχίας μικρογεννητριών.



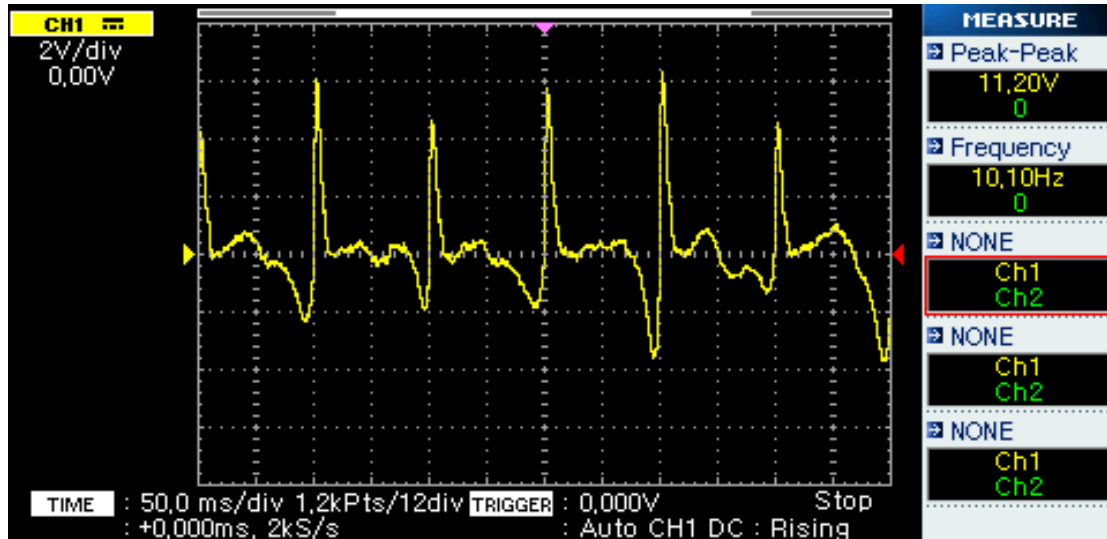
Εικόνα 4.7 Τελική γεννήτρια με 2 πηνία των 10 mm και 1 των 8 mm σε σειρά



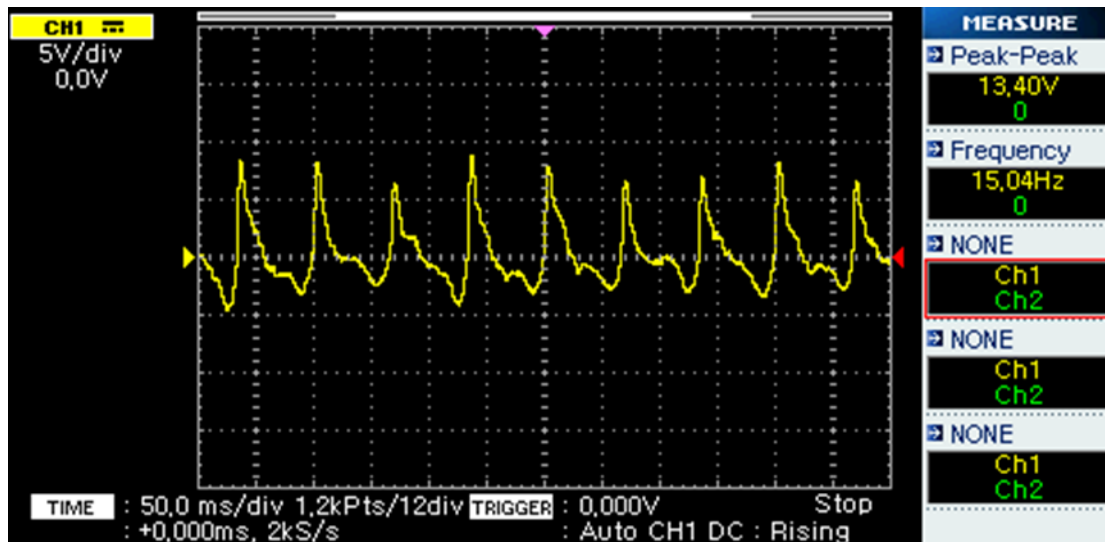
Ο βασικός λόγος επιλογής μιας τέτοια γεννήτριας, είναι η μέγιστη τάση διότι όπως έχει αναφερθεί πρέπει η τάση να είναι τουλάχιστον 50 mV ώστε να μπορεί να γίνει ανόρθωση, έστω χρησιμοποιώντας σύγχρονα MOSFET ως διακόπτες. Συνεπώς ένας παράγοντας που επιλέχθηκε αυτή η γεννήτρια είναι και το γεγονός ότι η μέγιστη τάση της είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις άλλες σε διάφορες συχνότητες. Στην συνέχεια ακολουθούν κάποιες εικόνες για ενδεικτικές συχνότητες ώστε να παρουσιαστεί και η κυματομορφή της τάσης που παράγεται για τις συχνότητες 5, 10, 15 και 20 Hz.



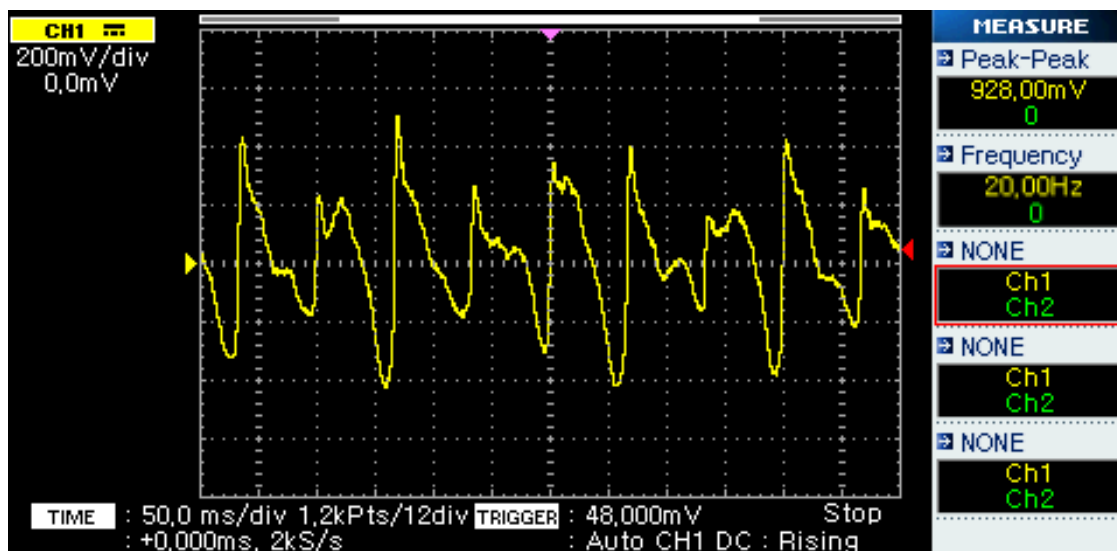
Εικόνα 4.8 Κυματομορφή τάσης στα 5 Hz



Εικόνα 4.9 Κυματομορφή τάσης στα 10 Hz



Εικόνα 4.10 Κυματομορφή τάσης στα 15 Hz



Εικόνα 4.11 Κυματομορφή τάσης στα 20 Hz

## 4.6 Κατασκευή κυκλώματος διαχείρισης ισχύος

Σε αυτό το στάδιο κατασκευάστηκε ένας μετατροπέας ο οποίος συνδέεται στην έξοδο της γεννήτριας και επιτυγχάνει ανόρθωση του ρεύματος και αποθήκευση της ενέργειας στους οπλισμούς ενός ηλεκτρολυτικού υπερπυκνωτή. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής εναλλασσόμενου ρεύματος με σκοπό να αυξήσει την τάση ώστε η επίδραση του διάκενου των διόδων να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Ο μετασχηματιστής αυτός έχει λόγο εισόδου-εξόδου ίσο με 35. Έπειτα προκειμένου να γίνει ανόρθωση χρησιμοποιούνται τέσσερις όμοιες διόδοι Schottky με διάκενο 150 mV για ρεύματα έως 2 A. Αφού έχει γίνει η ανόρθωση του ρεύματος πλέον στο τρίτο στάδιο του μετατροπέα συνδέουμε έναν ηλεκτρολυτικό υπερπυκνωτή χωρητικότητας 0,3 F και μέγιστης τάσης 15 V. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η τάση και επειδή στο εμπόριο εντός της χώρας κυκλοφορούσαν



μόνο υπερπυκνωτές με χωρητικότητα έως 1F και μέγιστη τάση λειτουργίας τα 5,5V, χρησιμοποιήθηκαν τρεις τέτοιοι πυκνωτές συνδεδεμένοι σε σειρά. Τέλος προκειμένου να τροφοδοτηθεί μια πλακέτα ESP32 ως δοκιμή, χρησιμοποιήθηκε ένας σταθεροποιητής τάσης των 5V.

Αφού κατασκευάστηκε αυτό το κύκλωμα προκειμένου να τροφοδοτηθεί το ESP32 χρησιμοποιήθηκε ένας step-up dc-dc μετατροπέας ο οποίος λειτουργούσε με είσοδο από 0,9V έως 5V, προσφέροντας έξοδο 5V.

Το σχεδιάγραμμα του κυκλώματος φαίνεται στην εικόνα 4.12, καθώς επίσης και το τελικό κύκλωμα που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο στην εικόνα 4.13.

Επίσης στις εικόνες 4.14 και 4.15 βλέπουμε την γεννήτρια κατά την λειτουργία της, η οποία φορτίζει τους υπερπυκνωτές και αυτοί στην συνέχεια με την σειρά τους τροφοδοτούν ένα ESP32. Ως περίπτωση εφαρμογής, στο ESP32 συνδέθηκε ένας αισθητήρας Hall με σκοπό τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου κάποιων μαγνητών.

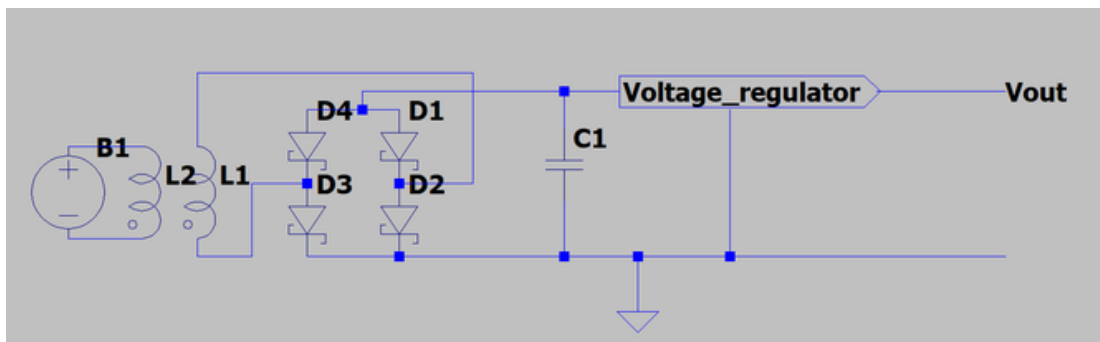
Εφόσον ήταν δυνατή η τροφοδοσία της συγκεκριμένης διάταξης της εικόνας 4.15, θα είναι δυνατή και η τροφοδοσία αισθητήρων χαμηλής κατανάλωσης. Όλο αυτό το κύκλωμα πρέπει να σημειωθεί ότι κατασκευάστηκε για τροφοδοσία ή καλύτερα περιοδική τροφοδοσία κάποιων αισθητήρων. Δηλαδή σκοπός είναι να φορτίζει ο υπερπυκνωτής σε κάποιο χρονικό διάστημα και έπειτα να ενεργοποιείται ένας ασύρματος αισθητήρας για να κάνει τις απαραίτητες μετρήσεις και να τις στέλνει στον δέκτη. Για αυτόν το λόγο μετρήθηκε ο χρόνος που απαιτείται για να φορτιστούν οι πυκνωτές οι οποίοι έφταναν κατά την φόρτιση την τάση των 14 V. Όταν αυτοί είναι εντελώς άδειοι ο χρόνος αυτός ισούται με 20 λεπτά, ενώ κατά την εκφόρτιση μπορούν να τροφοδοτήσουν ένα ESP32 για 2 λεπτά αν έχουμε σταματήσει την λειτουργία της γεννήτριας. Αν η γεννήτρια δουλεύει, ο χρόνος αυτός είναι 3 λεπτά για τις συχνότητες από 2 έως 10 Hz και τις συχνότητες από 16 έως 20 Hz, ενώ για τις συχνότητες από 11 ως 15 Hz, ο χρόνος αυτός ισοδυναμεί με 4.5 λεπτά. Επίσης όταν σταματήσει ο μετατροπέας να δίνει ισχύ στο φορτίο καθώς δεν έχει αποφορτιστεί πλήρως, ο χρόνος για να φορτιστεί ξανά είναι 8 με 10 λεπτά, ανάλογα με τις συχνότητες των κραδασμών αλλά και με την ισχύ που καταναλώθηκε κάθε φορά.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το κύκλωμα αυτό δεν είναι το καταλληλότερο για αποθήκευση της ενέργειας. Ιδανικά θε έπρεπε να χρησιμοποιηθούν σύγχρονα MOSFET με διάκενο 50 mV και αυτά να ενεργοποιούνται από ένα ρολόι ώστε να αποφευχθεί ο μετασχηματιστής, καθώς οι μετασχηματιστές στο εμπόριο λειτουργούν για συχνότητες από 0 έως 60 Hz και κυρίως για καθαρά ημίτονα. Γι' αυτόν το λόγο όπως βλέπουμε και στην κυματομορφή στον παλμογράφο, επειδή δεν έχουμε ημίτονο οι απώλειες κατά την αύξηση της τάσης είναι σημαντικές. Επίσης με αυτόν τον τρόπο μειώνουμε και το διάκενο κατά 100 mV. Έτσι θα εξαλείψαμε τον μετασχηματιστή και το υπόλοιπο κύκλωμα θα ήταν ακριβώς το ίδιο.

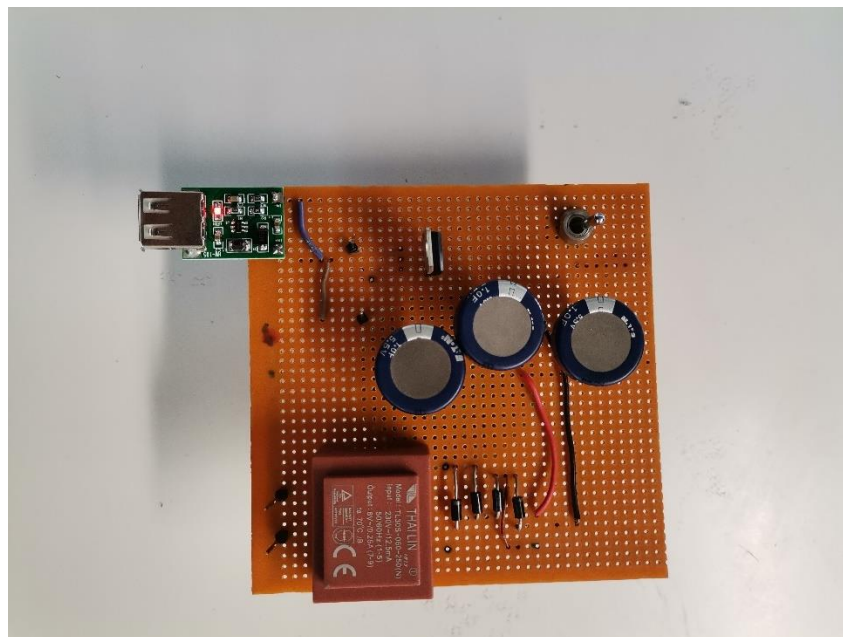
Ωστόσο αυτό κατασκευάστηκε στα πλαίσια των δοκιμών της γεννήτριας ώστε να αποδειχθεί ότι είναι κατάλληλη για εφαρμογή στις συχνότητες αυτές και ότι μπορεί να τροφοδοτήσει μια διάταξη αισθητήρα.

Ο λόγος που επιλέχθηκε ένα ESP32 είναι το γεγονός ότι ως πλακέτα περιλαμβάνει αρκετά «ενεργοβόρα» ηλεκτρονικά μέρη (σταθεροποιητές, μικροελεγκτές, LEDs), με αποτέλεσμα να μπορούμε να προσομοιώσουμε αρκετά καλά την κατανάλωση μιας διάταξης ασύρματου αισθητήρα.

Σε αυτό το στάδιο επίσης μετρήσαμε και την επίδραση του πλάτους των κραδασμών αλλά ωστόσο όπως έδειξε η χρονομέτρηση της φόρτισης και της εκφόρτισης των πυκνωτών με φορτίο, οι χρόνοι ήταν περίπου ίδιοι με διαφορά που κυμαίνονταν σε κάποια δευτερόλεπτα, πράγμα που μας δείχνει το ήδη γνωστό από την θεωρία, ότι κυρίαρχο ρόλο για την συγκομιδή και την συμπεριφορά της γεννήτριας παίζουν οι συχνότητες των κραδασμών του περιβάλλοντος.



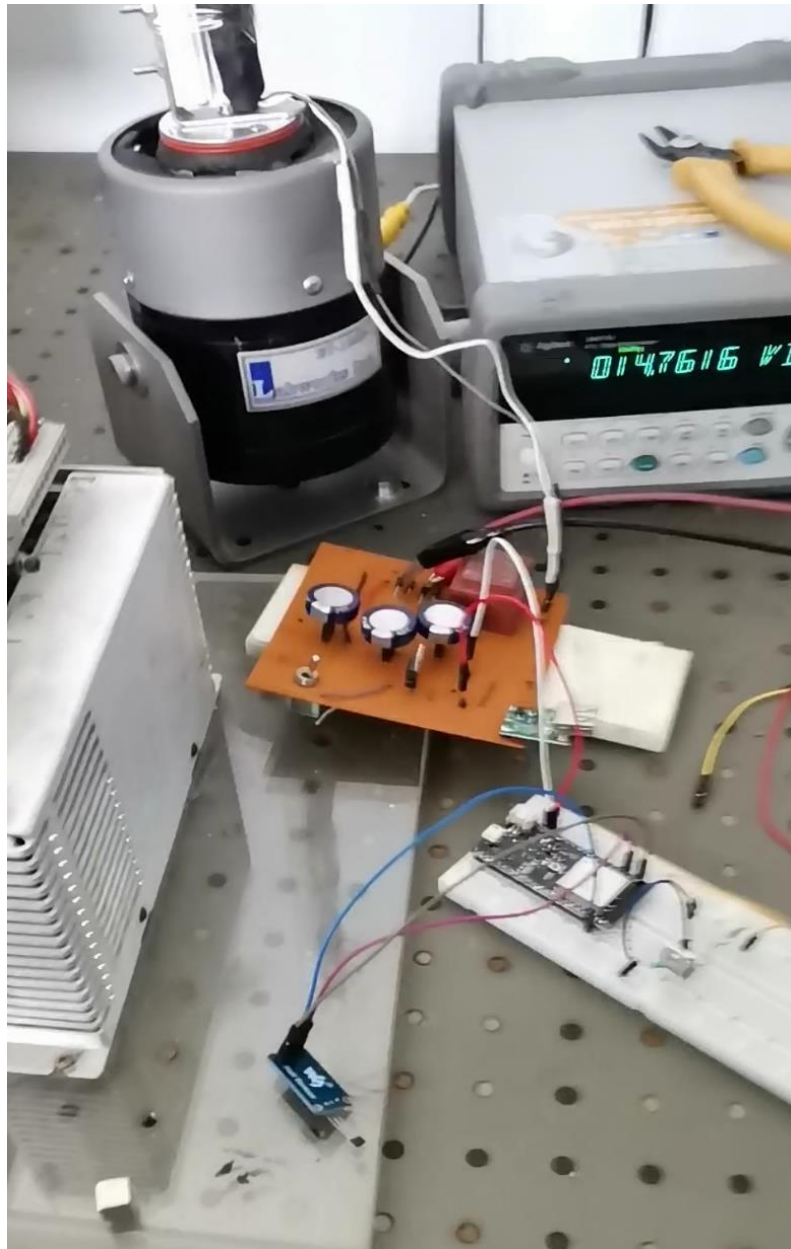
Εικόνα 4.12 Σχεδιάγραμμα κυκλώματος, ανόρθωσης και αποθήκευσης ενέργειας



Εικόνα 4.13 Κύκλωμα ανόρθωσης και αποθήκευσης ενέργειας



Εικόνα 4.14 Γεννήτρια κατά την παραγωγή ισχύος



Εικόνα 4.15 Τροφοδοσία ενός ESP32



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΛΟΓΟΣ

### 5.1 Συμπεράσματα σύνοψη

Στην παρούσα εργασία στόχος ήταν η μελέτη και η κατασκευή μιας ηλεκτρομαγνητικής μικρογεννήτριας, η οποία θα παρήγαγε ενέργεια από τους κραδασμούς που υπάρχουν στα πλοία ώστε να επιτυγχάνεται η τροφοδότηση ασύρματων αισθητήρων σε δυσπρόσιτα σημεία. Αρχικά μελετήθηκαν οι διάφορες αρχιτεκτονικές κατασκευής τέτοιων μικρογεννητριών και τα κυκλωματικά και μηχανικά ισοδύναμα.

Κατά την διάρκεια των εργαστηριακών μετρήσεων συμπεράναμε ότι οι γεννήτριες οι οποίες είναι κατάλληλες για συγκομιδή ενέργειας στο περιβάλλον του πλοίου, είναι αυτές που αποτελούνται από 600 περιελίξεις με μήκος πηνίου στα 50 mm. Αυτές οι γεννήτριες μπορούν να παράγουν ισχύ μεγαλύτερη των 100 mW και συγκεκριμένα αυτές με τους μαγνήτες των 8 mm παρήγαγαν μέγιστη στις χαμηλές συχνότητες ενώ αυτές με τους μαγνήτες των 10 mm στις πιο υψηλές. Το γεγονός αυτό καθώς επίσης και το ότι η τάση που παρήγαγαν δεν ήταν αρκετά υψηλή ώστε να μπορεί να την επεξεργαστεί ένα σύστημα διαχείρισης ισχύος εύκολα ώστε να μπορούν να τροφοδοτούν έναν αισθητήρα για αρκετό χρόνο ή να φορτίζουν έναν υπερπυκνωτή αρκετά γρήγορα, έκρινε αναγκαία την κατασκευή μιας πιο πολύπλοκης διάταξης και μάλιστα μιας διάταξης η οποία αποτελείται από 3 τέτοιες μικρογεννήτριες, δύο με μαγνήτες των 10 mm και μία με μαγνήτες των 8 mm, όλες συνδεδεμένες σε σειρά.

Αυτή η τελευταία τοπολογία λειτούργησε πολύ καλά, καθώς ο μέσος όρος της ισχύος ήταν μεγαλύτερος των 300 mW, ισχύς ικανή να τροφοδοτήσει εύκολα ασύρματο αισθητήρα, ενώ η τάση που παρήγαγε στα άκρα της ήταν της τάξης των 100 mV έως περίπου 1,5 V. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να είναι πιο διαχειρίσιμη, καθώς αποτελεί πρόκληση η κατασκευή κυκλώματος διαχείρισης της παραγόμενης ισχύος.

Τέλος η παραπάνω διάταξη οδηγήθηκε σε ένα απλό κύκλωμα διαχείρισης της ισχύος και τροφοδότησε μια αισθητήρια διάταξη με έναν Hall αισθητήρα, προκειμένου να αποδειχθεί ότι λειτουργεί και μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

### 5.2 Μελλοντική εργασία

Παρ' όλο που το πείραμα της παρούσας διπλωματικής διεξήχθη με επιτυχία, η μικρογεννήτρια αυτή δεν αποτελεί προϊόν έτοιμο για την αγορά διότι χρειάζονται κάποιες βελτιώσεις και μελέτες ακόμα ώστε να επιλυθούν κάποιες ατέλειες. Συγκεκριμένα απαιτείται ακόμη:

- Η χρήση υλικού κατάλληλου ώστε να θωρακίζεται μαγνητικά η διάταξη σε σχέση με το περιβάλλον. Οι γεννήτριες μπορεί να είναι τοποθετημένες σε σημεία μεταλλικά, με αποτέλεσμα οι μαγνήτες να έλκονται και να αυξάνονται

οι τριβές. Αυτή η μόνωση θα έχει και ως αποτέλεσμα να μπορούν οι μικρογεννήτριες να τοποθετηθούν η μία δίπλα στην άλλη κατά την κατασκευή και όχι η μία πάνω στην άλλη όπως στην περίπτωση μας, καθώς οι μαγνήτες δεν θα ασκούν δύναμη ο ένας στον άλλο.

- Μελέτη κατασκευής κυκλώματος διαχείρισης της ισχύος με στόχο την αποφυγή του μετασχηματιστή.
- Συνδυασμός των ηλεκτρομαγνητικών με άλλες αδρανειακές μικρογεννήτριες, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη γκάμα συχνοτήτων λειτουργίας. Για παράδειγμα η ηλεκτρομαγνητική θα μπορούσε να αποτελεί την αδρανειακή μάζα ενός πιεζοηλεκτρικού και να συνδυάζονται αυτές οι δύο τεχνολογίες.
- Μελέτη και κατασκευή μικρογεννήτριας ώστε να εκμεταλλεύονται και οι ταλαντώσεις που οφείλονται στον κυματισμό. Μια πιθανή γεωμετρία είναι αυτή που βασίζεται στην αρχιτεκτονική των περιστρεφόμενων μικρογεννητριών όσον αφορά τις ηλεκτρομαγνητικές.

Συνεπώς μια μικρογεννήτρια η οποία θα κάλυπτε τις περισσότερες από τις παραπάνω προϋποθέσεις θα ήταν έτοιμη για χρήση, διότι τα υλικά του χώρου καθώς και ο τρόπος τοποθέτησης των πηνίων της δεν θα επιδρούσαν στην λειτουργία της. Επίσης θα αποδεικνύονταν ότι αυτού του τύπου οι γεννήτριες μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων από αυτές που συναντώνται σε ένα πλοίο αν εκμεταλλευτούν και τον κυματισμό, κάτι που δε γίνεται με τις τοπολογίες που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Τα  $R_p$ ,  $R_o$ ,  $L$  και  $N$  είναι η αντίσταση του πηνίου, η συνολική αντίσταση με φορτίο ίσης αντίστασης με το πηνίο συνδεδεμένο παράλληλα, το μήκος πηνίου και ο αριθμός των περιελίξεων, αντίστοιχα.

Πίνακας 1 : Γεννήτρια των 10 mm  $R_p=1.36 \Omega$   $R_o= 0.66 \Omega$   $L =4.5$  cm  $N= 360$  4 στρώσεις 15 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΩΝ 10 mm</b>		
<b><math>R_p</math> 1,36Ω <math>R_o</math> 0,66Ω</b>		
<b>L 4,5cm N 360 15 μαγνήτες 4 στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	1,6	0,003878788
3	10	0,151515152
4	30	1,363636364
5	71	7,637878788
6	159	38,30454545
7	79	9,456060606
8	88	11,73333333
9	155	36,40151515
10	180	49,09090909
11	209	66,18333333
12	90	12,27272727
13	342	177,2181818
14	60	5,454545455
15	37	2,074242424
16	35	1,856060606
17	27	1,104545455
18	23	0,801515152
19	20	0,606060606
20	17	0,437878788

Πίνακας 2: Γεννήτρια των 10 mm  $R_p=1.47 \Omega$   $R_o= 0.73 \Omega$   $L =5$  cm  $N= 400$  4 στρώσεις 15 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΩΝ 10 mm</b>		
<b><math>R_p</math> 1,47Ω <math>R_o</math> 0,73 Ω</b>		
<b>L 5cm N400 15 μαγνήτες 4 στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	4	0,021917808
3	9	0,110958904
4	10	0,136986301
5	27	0,998630137
6	137	25,7109589



7	22	0,663013699
8	20	0,547945205
9	34	1,583561644
10	141	27,23424658
11	250	85,61643836
12	290	115,2054795
13	230	72,46575342
14	42	2,416438356
15	34	1,583561644
16	27	0,998630137
17	25	0,856164384
18	20	0,547945205
19	17	0,395890411
20	12	0,197260274

Πίνακας 3: Γεννήτρια των 10 mm  $R_{\pi}=2.5 \Omega$   $R_o= 1.25 \Omega$   $L =4.5$  cm  $N= 540$  6 στρώσεις 15 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΩΝ 10 mm</b>		
<b><math>R_{\pi} 2,5\Omega</math> <math>R_o 1,25 \Omega</math></b>		
<b><math>L 4,5</math> cm <math>N 540</math> 15 μαγνήτες 6 στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	12	0,1152
3	52	2,1632
4	64	3,2768
5	130	13,52
6	156	19,4688
7	200	32
8	220	38,72
9	260	54,08
10	300	72
11	367	107,7512
12	436	152,0768
13	500	200
14	622	309,5072
15	634	321,5648
16	601	288,9608
17	212	35,9552
18	101	8,1608
19	88	6,1952
20	73	4,2632

Πίνακας 4: Γεννήτρια των 10 mm  $R_p=1,36 \Omega$   $R_o=0,66 \Omega$   $L=4.5$  cm  $N=360$  4 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΩΝ 10 mm</b>		
<b><math>R_p</math> 1,36<math>\Omega</math> <math>R_o</math> 0,66<math>\Omega</math></b>		
<b>L 4,5 cm N360 20 μαγνήτες 4 στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b>V<sub>RMS</sub> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	10	0,151515152
3	14	0,296969697
4	25	0,946969697
5	48	3,490909091
6	196	58,20606061
7	105	16,70454545
8	109	18,00151515
9	205	63,67424242
10	239	86,5469697
11	246	91,69090909
12	290	127,4242424
13	220	73,33333333
14	88	11,73333333
15	71	7,637878788
16	56	4,751515152
17	39	2,304545455
18	32	1,551515152
19	24	0,872727273
20	21	0,668181818

Πίνακας 5: Γεννήτρια των 10 mm  $R_p=2,9 \Omega$   $R_o=1, \Omega$   $L=7$  cm  $N=840$  6 στρώσεις 25 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΩΝ 10 mm</b>		
<b><math>R_p</math> 2,9<math>\Omega</math> <math>R_o</math> 1,8 <math>\Omega</math></b>		
<b>L 7 cm N840 25 μαγνήτες 6 στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b>V<sub>RMS</sub> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	5,4	0,0162
3	42	0,98
4	34	0,642222222
5	96	5,12
6	280	43,55555556
7	112	6,968888889
8	101	5,667222222
9	241	32,26722222
10	290	46,72222222
11	400	88,88888889
12	460	117,5555556
13	430	102,7222222
14	360	72

15	345	66,125
16	330	60,5
17	390	84,5
18	190	20,05555556
19	56	1,742222222
20	50	1,388888889

Πίνακας 6: Γεννήτρια των 10 mm  $R_p=2.9 \Omega$   $R_o= 1.8 \Omega$   $L =7$  cm  $N= 840$  6 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΩΝ 10 mm</b>		
<b><math>R_p 2,9\Omega</math> <math>R_o 1,8 \Omega</math></b>		
<b>L 7 cm N840 20 μαγνήτες 6 στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	7,3	0,029605556
3	42	0,98
4	36	0,72
5	96	5,12
6	230	29,38888889
7	110	6,722222222
8	108	6,48
9	230	29,38888889
10	365	74,01388889
11	435	105,125
12	500	138,8888889
13	540	162
14	350	68,05555556
15	369	75,645
16	315	55,125
17	360	72
18	235	30,68055556
19	70	2,722222222
20	62	2,135555556

Πίνακας 7: Γεννήτρια των 10 mm  $R_p=2.9 \Omega$   $R_o= 1.8 \Omega$   $L =5$  cm  $N= 600$  6 στρώσεις 25 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΩΝ 10 mm</b>		
<b><math>R_p 2,9\Omega</math> <math>R_o 1,8 \Omega</math></b>		
<b>L 5 cm N600 25 μαγνήτες 6 στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	26	0,375555556
3	65	2,347222222
4	35	0,680555556
5	150	12,5
6	270	40,5

7	357	70,805
8	560	174,2222222
9	690	264,5
10	600	200
11	500	138,8888889
12	611	207,4005556
13	714	283,22
14	640	227,5555556
15	520	150,2222222
16	500	138,8888889
17	400	88,8888889
18	300	50
19	80	3,555555556
20	71	2,800555556

Πίνακας 8: Γεννήτρια των 10 mm  $R_{\pi}=2.5 \Omega$   $R_o=1.25 \Omega$   $L=6 \text{ cm}$   $N=480$  6 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 10 mm</b>		
<b><math>R_{\pi} 2,5\Omega</math> <math>R_o 1,25 \Omega</math></b>		
<b>L 6cm N480 20 μαγνήτες 6 στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	14	0,1568
3	67	3,5912
4	57	2,5992
5	101	8,1608
6	98	7,6832
7	141	15,9048
8	235	44,18
9	200	32
10	167	22,3112
11	169	22,8488
12	209	34,9448
13	213	36,2952
14	179	25,6328
15	177	25,0632
16	119	11,3288
17	92	6,7712
18	57	2,5992
19	31	0,7688
20	30	0,72

Πίνακας 9: Γεννήτρια των 10 mm  $R_{\pi}=2.5 \Omega$   $R_o=1.25 \Omega$   $L=6$  cm  $N=480$  6 στρώσεις 25 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 10 mm</b>		
<b><math>R_{\pi} 2,5\Omega</math> <math>R_o 1,25 \Omega</math></b>		
<b>L 6cm N480 25 μαγνήτες 6 στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	46	1,6928
3	51	2,0808
4	118	11,1392
5	141	15,9048
6	235	44,18
7	265	56,18
8	500	200
9	630	317,52
10	415	137,78
11	362	104,8352
12	433	149,9912
13	120	11,52
14	98	7,6832
15	84	5,6448
16	76	4,6208
17	60	2,88
18	45	1,62
19	44	1,5488
20	37	1,0952

Πίνακας 10: Γεννήτρια των 10 mm  $R_{\pi}=3,95 \Omega$   $R_o=2,7 \Omega$   $L=5$  cm  $N=800$  8 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 10 mm</b>		
<b><math>R_{\pi} 3,95\Omega</math> <math>R_o 2,7\Omega</math></b>		
<b>L 5 cm N800 20 μαγνήτες 8 Στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	6	0,013333333
3	65	1,564814815
4	35	0,453703704
5	90	3
6	125	5,787037037
7	357	47,203333333
8	560	116,1481481
9	690	176,3333333
10	600	133,3333333
11	500	92,59259259

12	611	138,267037
13	664	163,2948148
14	64	1,517037037
15	52	1,001481481
16	500	92,59259259
17	400	59,25925926
18	300	33,33333333
19	80	2,37037037
20	71	1,867037037

Πίνακας 11: Γεννήτρια των 10 mm  $R_p=3,5 \Omega$   $R_o=1,75 \Omega$   $L=4,5$  cm  $N=720$  8 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 10 mm</b>		
<b><math>R_p 3,5\Omega</math> <math>R_o 1,75 \Omega</math></b>		
<b>L 4,5 cm N 720 20 μαγνήτες 8 Στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	4,44	0,011264914
3	47	1,262285714
4	484	133,8605714
5	160	14,62857143
6	117	7,822285714
7	118	7,956571429
8	216	26,66057143
9	258	38,03657143
10	380	82,51428571
11	403	92,80514286
12	500	142,8571429
13	200	22,85714286
14	150	12,85714286
15	132	9,956571429
16	111	7,040571429
17	98	5,488
18	87	4,325142857
19	79	3,566285714
20	72	2,962285714

Πίνακας 12: Γεννήτρια των 10 mm  $R_p=2,97 \Omega$   $R_o=1,48 \Omega$   $L=4,5$  cm  $N=630$  7 στρώσεις 20μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 10 mm</b>		
<b><math>R_p 2,97\Omega</math> <math>R_o 1,48 \Omega</math></b>		
<b>L 4,5 cm N 630 20 μαγνήτες 7 Στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	37	0,925
3	101	6,892567568

4	112	8,475675676
5	207	28,95202703
6	260	45,67567568
7	300	60,81081081
8	330	73,58108108
9	360	87,56756757
10	500	168,9189189
11	460	142,972973
12	300	60,81081081
13	250	42,22972973
14	160	17,2972973
15	120	9,72972973
16	99	6,622297297
17	82	4,543243243
18	80	4,324324324
19	71	3,406081081
20	63	2,681756757

Πίνακας 13: Γεννήτρια των 10 mm  $R_{\pi}=2.9 \Omega$   $R_o=1.8 \Omega$   $L=5\text{cm}$   $N=600$  6 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 10 mm</b>		
<b><math>R_{\pi} 2,9\Omega</math> <math>R_o 1,8 \Omega</math></b>		
<b>L 5 cm N600 20 μαγνήτες 6 στρώσεις</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	9	0,045
3	97	5,227222222
4	52	1,502222222
5	135	10,125
6	37	0,760555556
7	535	159,0138889
8	840	392
9	1035	595,125
10	900	450
11	750	312,5
12	916	466,1422222
13	1071	637,245
14	960	512
15	780	338
16	750	312,5
17	600	200
18	450	112,5
19	120	8
20	106	6,242222222

Πίνακας 14: Γεννήτρια των 8 mm  $R_{\pi}=1,3 \Omega$   $R_o=0,65 \Omega$   $L=4,5$  cm  $N=360$  4 στρώσεις 15 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 8 mm</b>		
<b><math>R_{\pi} 1,3\Omega</math> <math>R_o 0,65 \Omega</math></b>		
<b>L 4,5 cm N 360 4 στρώσεις 15 μαγνήτες</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P(mW)</b>
2	1	0,001538462
3	10	0,153846154
4	20	0,615384615
5	49	3,693846154
6	97	14,47538462
7	152	35,54461538
8	214	70,45538462
9	275	116,3461538
10	305	143,1153846
11	330	167,5384615
12	370	210,6153846
13	340	177,8461538
14	210	67,84615385
15	100	15,38461538
16	54	4,486153846
17	53	4,321538462
18	46	3,255384615
19	40	2,461538462
20	38	2,221538462

Πίνακας 15: Γεννήτρια των 8 mm  $R_{\pi}=1,3 \Omega$   $R_o=0,65 \Omega$   $L=4,5$  cm  $N=360$  4 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 8 mm</b>		
<b><math>R_{\pi} 1,3\Omega</math> <math>R_o 0,65 \Omega</math></b>		
<b>L 4,5 cm N360 4 Στρώσεις 20 μαγνήτες</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P(mW)</b>
2	9,6	0,141784615
3	102	16,00615385
4	52	4,16
5	93	13,30615385
6	10	0,153846154
7	250	96,15384615
8	314	151,6861538
9	365	204,9615385
10	400	246,1538462
11	471	341,2938462
12	510	400,1538462



13	300	138,4615385
14	216	71,77846154
15	71	7,755384615
16	76	8,886153846
17	109	18,27846154
18	140	30,15384615
19	204	64,02461538
20	220	74,46153846

Πίνακας 16: Γεννήτρια των 8 mm  $R_{\pi}=1,3 \Omega$   $R_o=0,65 \Omega$   $L=4,5$  cm  $N=360$  4 στρώσεις 25 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 8 mm</b>		
<b><math>R_{\pi} 1,3\Omega</math> <math>R_o 0,65 \Omega</math></b>		
<b><math>L 4,5</math> cm <math>N 360</math> 4 στρώσεις 25 μαγνήτες</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P(mW)</b>
2	10	0,153846154
3	70	7,538461538
4	52	4,16
5	53	4,321538462
6	117	21,06
7	187	53,79846154
8	300	138,4615385
9	358	197,1753846
10	253	98,47538462
11	230	81,38461538
12	220	74,46153846
13	240	88,61538462
14	109	18,27846154
15	112	19,29846154
16	114	19,99384615
17	137	28,87538462
18	160	39,38461538
19	150	34,61538462
20	199	60,92461538

Πίνακας 17: Γεννήτρια των 8 mm  $R_{\pi}=2,1 \Omega$   $R_o=1,05 \Omega$   $L=5$  cm  $N=540$  6 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ 8 mm</b>		
<b><math>R_{\pi} 2,1\Omega</math> <math>R_o 1,05 \Omega</math></b>		
<b><math>L 5</math> cm <math>N600</math> 6 στρώσεις 20 μαγνήτες</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P(mW)</b>
2	39	1,448571429
3	100	9,523809524
4	67	4,275238095

5	107	10,90380952
6	200	38,0952381
7	330	103,7142857
8	481	220,3438095
9	570	309,4285714
10	650	402,3809524
11	720	493,7142857
12	750	535,7142857
13	419	167,2009524
14	350	116,6666667
15	325	100,5952381
16	309	90,93428571
17	270	69,42857143
18	300	85,71428571
19	280	74,66666667
20	330	103,7142857

Πίνακας 18: Γεννήτρια με 2 πηνία των 10 mm σε σειρά  $R_p=5,8 \Omega$   $R_o=2,9 \Omega$   $L=5$  cm  $N=600$  6 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΕ 2 ΠΗΝΙΑ ΤΩΝ 10 mm ΣΕ ΣΕΙΡΑ</b>		
<b><math>R_p</math> 5,8 <math>\Omega</math> <math>R_o</math> 2,9 <math>\Omega</math></b>		
<b>L 5 cm N 600 6 στρώσεις 20 μαγνήτες</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	16	0,088275862
3	37	0,472068966
4	77	2,044482759
5	139	6,662413793
6	114	4,48137931
7	148	7,553103448
8	330	37,55172414
9	382	50,31862069
10	485	81,11206897
11	457	72,01689655
12	500	86,20689655
13	546	102,7986207
14	600	124,137931
15	639	140,8003448
16	256	22,59862069
17	220	16,68965517
18	200	13,79310345
19	60	1,24137931
20	40	0,551724138

Πίνακας 19: Γεννήτρια με 2 πηνία των 10 mm παράλληλα  $R_p= 2,9 \Omega$   $R_o= 1,45 \Omega$   $L =5 \text{ cm}$   $N= 600$  6 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΕ 2 ΠΗΝΙΑ ΤΩΝ 10 mm ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ</b>		
<b><math>R_p 2,9\Omega</math> <math>R_o 1,45 \Omega</math></b>		
<b>L 5 cm N 600 6 στρώσεις 20 μαγνήτες</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	4	0,011034483
3	10	0,068965517
4	9	0,055862069
5	15	0,155172414
6	23	0,364827586
7	150	15,51724138
8	164	18,54896552
9	230	36,48275862
10	200	27,5862069
11	227	35,53724138
12	251	43,44896552
13	271	50,64896552
14	151	15,72482759
15	79	4,304137931
16	30	0,620689655
17	14	0,135172414
18	8	0,044137931
19	3,6	0,008937931
20	4	0,011034483

Πίνακας 20: Γεννήτρια με 2 πηνία των 8 mm σε σειρά  $R_p= 4,2 \Omega$   $R_o= 2,1 \Omega$   $L =5 \text{ cm}$   $N= 600$  6 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΕ 2 ΠΗΝΙΑ ΤΩΝ 8 mm ΣΕ ΣΕΙΡΑ</b>		
<b><math>R_p 4,2\Omega</math> <math>R_o 2,1 \Omega</math></b>		
<b>L 5 cm N 600 6 στρώσεις 20 μαγνήτες</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	47	1,051904762
3	140	9,333333333
4	117	6,518571429
5	198	18,66857143
6	241	27,65761905
7	420	84
8	622	184,2304762
9	700	233,3333333
10	925	407,4404762
11	635	192,0119048
12	704	236,007619

13	855	348,1071429
14	755	271,4404762
15	713	242,0804762
16	664	209,9504762
17	513	125,3185714
18	435	90,10714286
19	80	3,047619048
20	65	2,011904762

Πίνακας 21: Γεννήτρια με 2 πηνία των 8 mm σε παράλληλα  $R_p= 2.1 \Omega$   $R_o= 1.05 \Omega$   $L =5 \text{ cm}$   $N= 600$  6 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΕ 2 ΠΗΝΙΑ ΤΩΝ 8 mm ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ</b>		
<b><math>R_p 2,1\Omega</math> <math>R_o 1,05 \Omega</math></b>		
<b><math>L 5 \text{ cm}</math> <math>N 600</math> 6 στρώσεις 20 μαγνήτες</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	11	0,115238095
3	42	1,68
4	49	2,286666667
5	86	7,043809524
6	120	13,71428571
7	180	30,85714286
8	225	48,21428571
9	250	59,52380952
10	290	80,0952381
11	330	103,7142857
12	30	0,857142857
13	450	192,8571429
14	493	231,4752381
15	97	8,960952381
16	58	3,203809524
17	34	1,100952381
18	27	0,694285714
19	23	0,503809524
20	19	0,343809524

Πίνακας 22: Τελική γεννήτρια με 2 πηνία των 10 mm και 1 των 8 mm σε σειρά  $R_p= 6,6 \Omega$   $R_o= 3,3 \Omega$   $L =5 \text{ cm}$   $N= 600$  6 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΤΕΛΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΕ 2 ΠΗΝΙΑ ΤΩΝ 10 mm ΚΑΙ 1 ΤΩΝ 8 mm ΣΕ ΣΕΙΡΑ</b>		
<b><math>R_p 6,6\Omega</math> <math>R_o 3,3 \Omega</math></b>		
<b><math>L 5 \text{ cm}</math> <math>N 600</math> 6 στρώσεις 20 μαγνήτες</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	156	7,374545455
3	360	39,27272727

4	538	87,71030303
5	591	105,8427273
6	620	116,4848485
7	726	159,72
8	900	245,4545455
9	1266	485,6836364
10	1086	357,3927273
11	1239	465,1881818
12	1377	574,5845455
13	1380	577,0909091
14	1527	706,5845455
15	1533	712,1481818
16	1671	846,1336364
17	964	281,6048485
18	842	214,8375758
19	730	161,4848485
20	601	109,4548485

Πίνακας 23: Γεννήτρια με 1 πηνίο των 10 mm και 1 των 8 mm σε σειρά  $R_p= 4.4 \Omega$   $R_o= 2.27 \Omega$   $L=5$  cm  $N= 600$  6 στρώσεις 20 μαγνήτες

<b>ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΕ 1 ΠΗΝΙΟ ΤΩΝ 10 mm ΚΑΙ 1 ΤΩΝ 8 mm ΣΕ ΣΕΙΡΑ</b>		
<b><math>R_p</math> 4,4<math>\Omega</math> <math>R_o</math> 2,27 <math>\Omega</math></b>		
<b>L 5 cm N 600 6 στρώσεις 20 μαγνήτες</b>		
<b>F(Hz)</b>	<b><math>V_{RMS}</math> (mV)</b>	<b>P (mW)</b>
2	100	4,405286344
3	186	15,24052863
4	244	26,22731278
5	324	46,24493392
6	462	94,02819383
7	688	208,5215859
8	800	281,938326
9	900	356,8281938
10	540	128,4581498
11	700	215,8590308
12	800	281,938326
13	888	347,3762115
14	416	76,23612335
15	440	85,28634361
16	392	67,69339207
17	276	33,55770925
18	254	28,42114537
19	234	24,1215859
20	158	10,99735683

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] F. Yildiz, «*Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques*», Bowling Green State University, April 2009.
- [2] D. M. Rowe, «*CRC handbook of Thermoelectrics*», CRC Press , July,1995
- [3] R.J.M. Vullers a, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof and R. Mertens, «*Micropower energy harvesting*», Solid-State Electronics, April 2009.
- [4] R. J. Vyas, B. B. Cook, Y. Kawahara and M. M. Tentzeris , «*E-WEHP: A batteryless embedded sensor-platform wirelessly powered from ambient digital-TV signals*», IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 61, no. 6, pp. 2491-2505, 2013.
- [5] A. Parks, A. Sample, Yi Zhao and J. Smith, «*A wireless sensing platform utilizing ambient RF energy*», IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications (PAWR), 2013.
- [6] O.K. Simya, P. Radhakrishnan and A. Ashok, «*Engineered Nanomaterials for Energy Applications*», Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications Micro and Nano Technologies, Pages 751-767,2018.
- [7] S. Roundy, D. Steingart, L. Frechette, P. Wright and J. Rabaey, «*Power Sources for Wireless Sensor Networks*», Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004.
- [8] P. D. Mitcheson, T. C. Green, E.M. Yeatman and A. S. Holmes, «*Architectures for Vibration-Driven Micropower Generators*», Journal of microelectromechanical systems, vol. 13, No. 3, June 2004.
- [9] P. D. Mitcheson, T. C. Green, E. M. Yeatman, «*Power processing circuits for electromagnetic, electrostatic and piezoelectric inertial energy scavengers*», Springer, Microsystem Technologies 2007.
- [10] P. Muralt, M. Marzencki, B. Belgacem, F. Calame and S. Basrour, «*Vibration Energy Harvesting with PZT Micro Device*», Article in Procedia Chemistry · September 2009.
- [11] H. Kim, W.Lee, H. V. Rasika Dias, and S. Priya, «*Piezoelectric Microgenerators—Current Status and Challenges*», IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 56, no. 8, August 2009.
- [12] J. L. Scornec, B. Guiffard, R.Seveno and V.L. Cam, «*Frequency tunable, flexible and low cost piezoelectric micro-generator for energy harvesting*», Sensors and Actuators A: Physical, June 2020.
- [13] Y.K. Ramadass, «*Energy Processing Circuits for Low-Power Applications*», Massachusetts Institute of Technology, June 2009.

- [14] P.D. Mitcheson, T. Sterken, C. He, M. Kiziroglou, E. M. Yeatman and d R. Puers, «*Electrostatic Microgenerators*», Institute Of Measurement & Control, May 2008.
- [15] Magnetic Flux through a Circular Loop - Physics Stack Exchange, <https://physics.stackexchange.com/questions/534185/magnetic-flux-through-a-circular-loop>.
- [16] Μ. Κ. Παπαϊωάννου, «*Ανάπτυξη Ηλεκτρονικού Αισθητήρα Επιτήρησης Υγείας Χάλυβα*», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2020.
- [17] C.B. Williams and R.B. Yates, «*Analysis of a micro-electric generator for microsystems*», Sensors and Actuators A 52 (1996) 8-11, April 1996.
- [18] N. Awaja, D. Sood, T. Vinay, «*Design and Analyses of Electromagnetic Microgenerator*», Sensors & Transducers Journal, Vol. 103, Issue 4, April 2009.
- [19] W. C. Chye, Z. Dahari, O. Sidek and M. A. Miskam, «*Electromagnetic Micro Power Generator - A Comprehensive Survey*», IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2010), October 2010.
- [20] Y. Yao, «*Energy harvesting from ship vibrations*», Tianjin: University of British Columbia, 2002.
- [21] M. Niroomand, H. R. Foroughi, «*A rotary electromagnetic microgenerator for energy harvesting from human motions*», Journal of Applied Research and Technology, June 2016
- [22] P.H. Wang, X.H.Dai, D.M. Fang and X.L. Zhao, «*Design, fabrication and performance of a new vibration-based electromagnetic micro power generator*», Microelectronics Journal 38, November 2007.
- [23] C.T. Pan and T.T. Wu, «*Simulation and fabrication of magnetic rotary microgenerator with multipolar Nd/Fe/B magnet*», Microelectronics Reliability 47, June 2007.
- [24] C. T. Pan and T. T. Wu, «*Development of a rotary electromagnetic microgenerator*», Journal of Micromechanics and Microengineering, December 2006.
- [25] P. Carneiro, M. P. Soares dos Santos, A. Rodrigues, J. A.F. Ferreira, J.A.O. Simões, A. T. Marques and A. L. Kholkin, «*Electromagnetic energy harvesting using magnetic levitation architectures: A review*», Elsevier Ltd, December 2019.
- [26] W. Wang, J. Cao, N. Zhang, J. Lin and W. H. Liao, «*Magnetic-spring based energy harvesting from human motions: Design, modeling and experiments*», Energy Conversion and Management, November 2016.
- [27] C.B.Williams, C.Shearwood, M.A.Harradine, P.H. Mellor, T.S.Birch and R.B.Yates, «*Development of an electromagnetic micro-generator*», IEEE Proceedings - Circuits Devices and Systems, January 2002.

[28] S.Priya and D.I.J. Inman, «*Energy Harvesting Technologies*», Springer Science and Business Media, LLC 2009.

[29] «*Analysis of Four DC-DC Converters in Equilibrium*», June 06, 2015, <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/analysis-of-four-dc-dc-converters-in-equilibrium/>.

[30] X. Cao, W.J. Chiang, Y.C.King and Y.K.Lee, «*Electromagnetic Energy Harvesting Circuit With Feedforward and Feedback DC–DC PWM Boost Converter for Vibration Power Generator System*», IEEE Transactions on Power Electronics vol. 22, No. 2, March 2007.

[31] S. Dwari, R. Dayal and L. Parsa, «*A Novel Direct AC/DC Converter for Efficient Low Voltage Energy Harvesting*», IEEE Industrial Electronics, 2008.