

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ

Μηχανολόγων Μηχανικών

Μεταπτυχιακή Εργασία

Συγκομιδή ηλεκτρικής ενέργειας σε πλοία μέσω δονήσεων

Αλέξανδρος Δ. Κωνσταντινίδης

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Αθήνα, 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ

Μηχανολόγων Μηχανικών

Μεταπτυχιακή Εργασία

Συγκομιδή ηλεκτρικής ενέργειας σε πλοία μέσω δονήσεων

Αλέξανδρος Δ. Κωνσταντινίδης

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....

Ευάγγελος Χριστοφόρου Καθηγητής ΗΜΜΥ Παναγιώτης

Αργύρης Σολδάτος,

Τσαραμπάρης, Επ. Καθηγητής ΗΜΜΥ

ΕΔΙΠ ΗΜΜΥ

Αθήνα, 2020

Περίληψη

Η συγκομιδή ενέργειας από το περιβάλλον αποτελεί μία ελκυστική εναλλακτική λύση για την τροφοδοσία συστημάτων με μικρές απαιτήσεις ισχύος τα οποία πρέπει να λειτουργούν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η σχεδίαση ενός συστήματος συγκομιδής ενέργειας που να αξιοποιεί δονήσεις που συναντώνται σε πλοία. Στόχος του συστήματος είναι να μπορεί να αντλεί το μέγιστο δυνατό ποσό ισχύος σε ένα συχνοτικό εύρος δονήσεων που μπορούν να γίνουν εκμεταλλεύσιμες σε πλοία. Συγκεκριμένα, αναλύεται η περίπτωση ηλεκτρομαγνητικής ενεργειακής συγκομιδής και γίνεται συγκριτική μελέτη διαφορετικών τοπολογιών. Η εκμετάλλευση ενέργειας μέσω δονήσεων μπορεί να προσφέρει λύσεις εξοικονόμησης ενέργειας σε ζητήματα ενεργειακής τροφοδοσίας πλοίων.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν περιγράφεται η προσπάθεια σχεδίασης ενός τέτοιου συστήματος και κατασκευής ενός ηλεκτρομαγνητικού μετατροπέα. Αρχικά περιγράφονται οι διαφορετικές πηγές που μπορούν να αξιοποιηθούν και οι βασικές ιδιότητές τους, ενώ πραγματοποιήθηκε και μία σύντομη αναφορά στις επιλογές. Στη συνέχεια ακολουθεί η θεωρητική ανάλυση της περίπτωσης του ηλεκτρομαγνητικού μετατροπέα, ο οποίος είναι μια γραμμική μικρογεννήτρια. Αναλύεται το κύκλωμα διαχειρίσης ισχύος, η σύνδεση του συστήματος και οι επιλογές αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας. Στα τελευταία κεφάλαια, γίνεται κατασκευή μικρογεννητριών με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διαφορετικές τοπολογίες και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της κάθε περίπτωσης.

Abstract

Energy harvesting from renewable sources may function as an emerging alternative solution regarding low energy consumption systems, that need to function in a long term basis. In the present thesis, an energy harvesting system utilizing ship vibrations is designed. These systems' purpose is to produce the maximum possible power, within a frequency range that ship vibrations are usually found. In particular, different electromagnetic energy harvesting system topologies are analyzed and compared. The aforementioned technology can offer solutions in ship energy consumption matters.

In the following chapters, the design of such a system is described, followed by the construction of its electromagnetic transducer. In the first part, different exploitable energy sources are referred as well as their specific features. Afterwards, a theoretical analysis regarding the electromagnetic transducer is presented. This particular is a linear electromagnetic micro-generator. Furthermore, different power management circuit options are analyzed, which function as an interface between the transducer and the storage system. In the latter part, electromagnetic microgenerators with different geometrical characteristics are constructed, tested and compared with each other.

Πρόλογος

Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την ανάθεση του θέματος και τη βοήθεια του σε ζητήματα που προέκυψαν επ' αυτής.

Επίσης, τον διδακτορικό φοιτητή του εργαστηρίου ηλεκτρονικών αισθητήρων, Σπύρο Αγγελόπουλο, για τις πολύτιμες συβουλές, την καθοδήγηση, τη συνεισφορά και τη στήριξη του κατά το διάστημα της ενασχόλησης μου με την παρούσα εργασία.

Την οικογένειά μου, για την ευρύτερη στήριξή της όποτε χρειάστηκε.

Τέλος, τους συμφοιτητές με τους οποίους συνεργάστηκα στα πλαίσια αυτού του μεταπτυχιακού προγράμματος, τόσο για την αλληλοϋποστήριξη, όσο και για την δυνατότητα πολύπλευρης συζήτησης και προσέγγισης των διαφόρων (ακαδημαϊκών και μη) ζητημάτων που εμφανίστηκα κατά τη διάρκεια αυτού.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Π	ερί	ληψι	יייין		6	
A	ost	ract .			7	
Π	ებე	\ογο	ς		8	
1		ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° - ΕΙΣΑΓΩΓΗ				
	1.	1	Ενερ	ργειακή Συγκομιδή	. 11	
	1.	1.2 Πηγ		γές ενέργειας		
		1.2.2	1	Θερμική ενέργεια	. 12	
		1.2.2	2	Ηλιακή ενέργεια	. 19	
		1.2.3	3	Κινητική ενέργεια	.21	
		1.2.4	4	Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία/ραδιοκύματα	. 28	
		1.2.5	5	Καύσιμα που βρίσκονται στο περιβάλλον	. 29	
	1.	3	Στόχ	οι εφαρμογής	. 30	
	1.4	4	Περί	ίγραμμα διπλωματικής	.31	
2		КΕФ	ΑΛΑΙ	Ο 2° - Η ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	. 32	
	2.	1	Δονι	ήσεις Πλοίου	. 32	
	2.	2	Περι	ιγραφή του μηχανικού συστήματος	. 33	
	2.	3	Αρχι	τεκτονικές ηλεκτρομαγνητικών συλλεκτών ενέργειας	. 34	
		2.3.2	1	Οριακές συνθήκες και διαδικασία βελτιστοποίησης	. 36	
	2.4	4	Mov	τέλο ηλεκτρομηχανικής μετατροπής	. 37	
		2.4.2	1	Σύστημα μάζας-ελατηρίου και μηχανικής απόσβεσης	. 37	
		2.4.2	2	Ηλεκτρική απόσβεση	. 39	
3		КΕФ	ΑΛΑΙ	Ο 3° - ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	. 40	
	3.	1	Μέγ	ιστη Ισχύς μετατροπής	. 40	
		3.1.2	1	Ανάλυση της Ισχύος εισόδου βασιζόμενη στον συντελεστή απόσβεσης	. 40	
		3.1.2	2	Η Συσχέτιση της Ισχύος με τη σταθερά ελατηρίου και την αντίσταση	. 44	
	3.1.		3	Συσχέτιση μεταξύ Τάσης και Ισχύος εισόδου	. 47	
		3.1.4	1	Ανάλυση της Μέγιστης Ισχύος Εξόδου	. 49	
		3.1.5	5	Σύνοψη	. 51	
4		КΕФ	ΑΛΑΙ	Ο 4 ⁰ - Κύκλωμα διαχείρισης Ισχύος	. 52	
	4.	1	Γέφι	υρα πλήρους ανόρθωσης	. 52	
	4.	2	Μετ	ατροπέας DC-DC	. 54	
		4.2.2	1	Μετατροπείς DC-DC με πυκνωτές, αντλίες φορτίου	. 55	
		4.2.2	2	Μετατροπείς DC-DC με πηνίο	. 56	

	4.2.	3	Μετατροπείς αναβάθμισης τάσης (boost converters)	58
	4.2.	4	Μετατροπείς υποβάθμισης τάσης (buck converters)	61
	4.2.	5	Μετατροπείς αναβάθμισης-υποβάθμισης τάσης (buck-boost converters)	63
	4.3	Στοι	χεία αποθήκευσης ενέργειας	66
	4.3.	1	Μπαταρίες	66
	4.3.	2	Υπερπυκνωτές	67
5	КЕ⊄	ΑΛΑ	ΙΟ 5° - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	70
	5.1	Περ	ιγραφή του πειράματος	70
	5.2	Όργ	ανα μετρήσεων	72
	5.2.	1	Γεννήτρια παλμών	72
	5.2.	2	Ενισχυτής Ισχύος	73
	5.2.	3	Συσκευή παραγωγής κραδασμών	74
6	КЕ⊄	ΑΛΑ	ΙΟ 6° – Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	78
7	КЕ⊄	ΑΛΑ	ΙΟ 7° – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	82
	7.1	Μετ	ρήσεις για μικρογεννήτριες μαγνητών διαμέτρου 6 χιλιοστών	82
	7.2	Μετ	ρήσεις για μικρο-γεννήτριες με μαγνήτες διαμέτρου 10 χιλιοστών	92
	7.3	Μετ	ρήσεις για μικρο-γεννήτριες σε τοπολογία με σταθερούς μαγνήτες	99
	7.4	Δοκ	ιμή φόρτισης πυκνωτή	102
8	Συμ	περά	σματα	106
9	BIB		ΆΦΙΑ	108

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1º - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ενεργειακή Συγκομιδή

Τα τελευταία χρόνια υπήρξαν σημαντικές εξελίξεις στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών συσκευών χαμηλής ενέργειας, όπως ψηφιακοί επεξεργαστές σήματος (Digital Signal Processors) και ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που χρησιμοποιούν ισχύ της τάξης δεκάδων έως εκατοντάδων μW. Ο συμβατικός τρόπος για την τροφοδοσία τέτοιων συσκευών είναι οι μπαταρίες. Παρόλα αυτά, η αντικατάσταση των μπαταριών, ακόμα και αυτών που έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, σε απομακρυσμένες τοποθεσίες είναι μια απαιτητική διαδικασία που μπορεί να είναι και απαγορευτική σε οικονομικό επίπεδο. Ως εκ τούτου, διεξάγονται έρευνες για τη δυνατότητα της ενεργειακής συγκομιδής από μετατροπή της ενέργειας του περιβάλλοντος σε ηλεκτρική ενέργεια με την οποία λειτουργούν τέτοιες συσκευές [1].

Ο γενικός στόχος είναι να σχεδιαστεί μια συσκευή ενεργειακής συγκομιδής που να μπορεί να τροφοδοτεί όσο γίνεται μεγαλύτερο φορτίο σε πλοία.

Στο περιβάλλον του πλοίου, η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας δεν είναι πάντοτε εφικτή, ενώ και οι διαφοροποιήσεις τις θερμοκρασίας σχετικά μικρές. Όμως, η μηχανική ενέργεια από δονήσεις είναι επαρκής ως μια πηγή ενέργειας μεσαίας κλίμακας. Η εξαγωγή ενέργειας από δονήσεις βασίζεται στη σχετική κίνηση μιας μάζας με έδραση ελατηρίων ως προς το πλαίσιο στήριξης [2]. Παράγεται μηχανική επιτάχυνση από δονήσεις οι οποίες προκαλούν την ταλάντωση της μάζας. Στη διάρκεια αυτής της κίνησης, δυνάμεις τριβής και απόσβεσης δρουν αντίθετα στην κίνηση της μάζας με αποτέλεσμα να ελαττώνουν τις ταλαντώσεις. Οι δυνάμεις απόσβεσης απορροφούν την κινητική ενέργεια της μάζας και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω τριών μηχανισμών: ηλεκτρομαγνητικών, ηλεκτροστατικών και πιεζοηλεκτρικών.

1.2 Πηγές ενέργειας

Ως ενέργεια του περιβάλλοντος ορίζεται αυτή που παράγεται στο σύστημα του περιβάλλοντος και δεν αποθηκεύεται. Όταν συγκρίνεται με την ενέργεια που αποθηκεύεται σε συσσωρευτές ή σε κάτι αντίστοιχο, το περιβάλλον αντιπροσωπεύει μια σχετικά αστείρευτη πηγή ενέργειας. Η πιο συνήθεις περιβαλλοντικές πηγές ενέργειας είναι οι εξής:

- Θερμική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Μηχανική ενέργεια

Στην επόμενη ενότητα αναλύονται οι διαφορετικές πηγές ενέργειας οι οποίες μπορούν να συνεισφέρουν στην μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια που είναι και το ζητούμενο του αντικειμένου προς διερεύνηση [3].

1.2.1 Θερμική ενέργεια

<u>Διαφορές θερμοκρασίας στο χώρο</u>

Η πηγή ενέργειας στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι διαφορές θερμοκρασίας στο χώρο. Τέτοιες διαφορές μπορεί να βρεθούν εύκολα ειδικά αν υπάρχει κάποιο αντικείμενο που διατηρείται σε θερμοκρασία διαφορετική από αυτή του περιβάλλοντός του. Τέτοιες περιπτώσεις είναι το ανθρώπινο σώμα, κάποια μηχανή, το έδαφος σε σχέση με την ατμόσφαιρα κλπ.

Υπάρχουν 3 θερμοηλεκτρικά φαινόμενα: Seebeck, Peltier και Thomson, τα οποία σχετίζονται μεταξύ τους μέσω των εξισώσεων του Kelvin. Από αυτά, για την ενεργειακή συγκομιδή (energy harvesting) αξιοποιούμε το φαινόμενο Seebeck ενώ σε εφαρμογές με μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας μπορεί να χρειαστεί να λάβουμε υπόψιν και την επίδραση του φαινομένου Thomson.

Φαινόμενο Seebeck:

Το φαινόμενο Seebeck εξηγεί πρακτικά και τη λειτουργία των θερμοζευγών. Ένα στοιχειώδες θερμοζεύγος αποτελείται συνήθως από 2 διαφορετικά υλικά τα οποία ενώνονται σε δύο σημεία όπου επικρατούν διαφορετικές θερμοκρασίες. Οι φορείς στην θερμή περιοχή έχουν συγκριτικά μεγαλύτερη κινητικότητα από τους φορείς της ψυχρής. Αυτή η διαφορά έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή συγκέντρωση περισσότερων φορέων στην πιο ψυχρή περιοχή του κάθε υλικού.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα στοιχειώδους θερμοζεύγους [3]

Αυτή η ανομοιομορφία στην κατανομή των φορέων δημιουργεί μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα άκρα του την οποία μπορούμε να αξιοποιήσουμε. Το πρόσημο αυτής της διαφοράς δυναμικού εξαρτάται από το πρόσημο των φορέων πλειονότητας στο υλικό και αυτό εξηγεί γιατί θέλουμε να έχουμε διαφορετικά υλικά στο θερμοζεύγος (έτσι ώστε να μην αλληλοεξουδετερώνονται οι διαφορές δυναμικού των δύο υλικών). Η τελική διαφορά δυναμικού προκύπτει από τη σχέση:

$$V = a_{ab} \Delta T \tag{1.1}$$

Όπου

 $\Delta T = T_H - T_C$ η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στη θερμή και την ψυχρή ένωση

Και

 $a_{ab} = a_a - a_b$ ο σχετικός συντελεστής Seebeck (relative Seebeck coefficient) των υλικών a και b. Στη βιβλιογραφία μερικές φορές συμβολίζεται και ως S_{xy} αντί για α_{xy} .

Οι συντελεστές αα και αb είναι οι απόλυτοι συντελεστές Seebeck των υλικών και εξαρτώνται μη γραμμικά από τη θερμοκρασία. Ωστόσο για σχετικά μικρά ΔΤ μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο όρος α_{αb} είναι περίπου σταθερός.



Σχήμα 1.2: Μηχανισμός φαινομένου Seebeck

Για τη μετατροπή χρησιμοποιούνται θερμοηλεκτρικές γεννήτριες (TEGs, ThermoElectric Generators). Μία ΘΗΓ είναι ουσιαστικά μία συστοιχία από θερμοζεύγη τα οποία συνδέονται ηλεκτρικά εν σειρά και θερμικά εν παραλλήλω. Οι συνδυασμοί των υλικών που χρησιμοποιούνται αλλάζουν με βάση τις θερμοκρασίες στις οποίες πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η ΘΗΓ έτσι ώστε να έχουν καλή αγωγιμότητα και ταυτόχρονα να έχουν αν είναι δυνατόν μόνο φορείς πλειονότητας. Ο λόγος για τη σύνδεση σε σειρά είναι το ότι οι σχετικοί συντελεστές Seebeck είναι υπερβολικά μικροί (μερικές δεκάδες ως και εκατοντάδες μV/K) [4]. Ένα σημαντικό μη-ηλεκτρικό μέγεθος που τις χαρακτηρίζει είναι η θερμική αγωγιμότητα η οποία θέλουμε να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρή γιατί σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να είναι δύσκολη η διατήρηση υψηλού ΔΤ που είναι απαραίτητο για να έχουμε μεγάλη V_{TEG}.



Σχήμα 1.3: Δομή τυπικής θερμοηλεκτρογεννήτριας



Σχήμα 1.4: Ηλεκτρικό ισοδύναμο ΘΗΓ

Η πηγή τάσης σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος έχει τιμή:

$$V = S \cdot \Delta T \tag{1.2}$$

Mε

$$S = n \cdot \int_{T_C}^{T_H} (a_a - a_b) dT \tag{1.3}$$

Όπου η ο αριθμός των εν σειρά συνδεδεμένων θερμοζευγών που την αποτελούν.

Οι τυπικές τιμές τάσης ανοιχτού κυκλώματος που μπορούμε να πάρουμε από μία ΘΗΓ είναι περίπου της τάξης των 50mV για ΔT=2K και RTEG<10Ω, αν και έχουν αναφερθεί περιπτώσεις όπου έχουν επιτευχθεί και τάσεις άνω του 1V για ίδιες θερμοκρασίες σε λογικό μέγεθος αλλά με μεγάλη εσωτερική αντίσταση (RTEG=250kΩ) που περιορίζει την αξιοποιήσιμη ισχύ. Οι τιμές ισχύος που μπορούμε να πάρουμε από διατάξεις μικρού μεγέθους μπορούν να φτάσουν μέχρι και μερικά mW για ΔT=10K [5, 6].

Λόγω της πολύ χαμηλής τάσης εξόδου των ΘΗΓ, είναι κατά κανόνα απαραίτητη η χρήση κάποιου είδους step-up-converter για να ανεβάζει την τάση σε επίπεδο όπου να είναι αξιοποιήσιμη.

<u>Μεταβολές θερμοκρασίας στο χρόνο</u>

Παραδείγματα τέτοιων μεταβολών είναι η θερμοκρασία του εξωτερικού ενός χειμερινού ενδύματος που φοριέται από κάποιον και η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια της μέρας.

Για την εκμετάλλευση των μεταβολών θερμοκρασίας ως προς το χρόνο αξιοποιούμε το φαινόμενο του πυροηλεκτρισμού. Ένα πυροηλεκτρικό υλικό χαρακτηρίζεται από μία φυσική πόλωση απουσία ηλεκτρικού πεδίου. Λόγω της κρυσταλλογραφικής δομής αυτών των υλικών η πόλωσή τους είναι ισχυρά εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία. Με την αύξηση της θερμοκρασίας η πόλωση αυτή διαταράσσεται καθώς τα δίπολα εκτοπίζονται από τις θέσεις ισορροπίας τους. Στην περίπτωση μείωσης της θερμοκρασίας η πόλωση του υλικού γίνεται εντονότερη. Την πόλωση του υλικού και τη σχέση της με τη μεταβολή της θερμοκρασίας μπορούμε να την αξιοποιήσουμε για την παραγωγή ενέργειας.

Ο μετατροπέας σε αυτήν την περίπτωση είναι ένα πυροηλεκτρικό υλικό με δύο ηλεκτρόδια συνδεδεμένα πάνω του. Το υλικό είναι συνδεδεμένο με ηλεκτρόδια με τέτοιο τρόπο ώστε η διεύθυνση της πόλωσης του υλικού να είναι παράλληλη με τον άξονα που συνδέει τα κέντρα των δύο ηλεκτροδίων. Όταν το υλικό είναι πολωμένο τότε έλκει προς την επιφάνειά του τα αντίθετα φορτία του ηλεκτροδίου που βρίσκεται απέναντί του. Με τη θέρμανση/ψύξη του υλικού η πόλωση γίνεται ασθενέστερη/ισχυρότερη και έτσι ελευθερώνονται/εγκλωβίζονται περισσότερα φορτία στη διαχωριστική επιφάνεια ηλεκτροδίου και υλικού με αποτέλεσμα τη δημιουργία αντίστοιχου ρεύματος στο κύκλωμα που συνδέεται με τα δύο ηλεκτρόδια. Σε ορισμένες περιπτώσεις το πυροηλεκτρικό υλικό μπορεί να είναι και φερροηλεκτρικό. Αυτό το χαρακτηριστικό του επιτρέπει να αντιστρέφει την πολικότητά του με την εφαρμογή κατάλληλου εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Στην περίπτωση μάλιστα αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από τη θερμοκρασία Curie (T_{Curie}) το υλικό γίνεται παραηλεκτρικό με αποτέλεσμα να μην έχει φυσική πολικότητα αλλά να αποκτά εκείνη που του επιβάλλει το ηλεκτρικό πεδίο που εφαρμόζεται πάνω του εκείνη τη στιγμή ενώ κατά τη μετάβαση από

φερροηλεκτρικό σε παραηλεκτρικό το υλικό απελευθερώνει σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να αξιοποιηθεί και για την αύξηση της παραγόμενης ισχύος αν στο εύρος των θερμοκρασιών που φτάνει το υλικό περιέχεται και η T_{Curie} [7].



Σχήμα 1.5: Μηχανισμός πυροηλεκτρικού φαινομένου

Το πιο συνηθισμένο ισοδύναμο για ένα πυροηλεκτρικό στοιχείο είναι μία πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τη μεταβολή της θερμοκρασίας παράλληλα με έναν πυκνωτή και μία αντίσταση.



Σχήμα 1.6: Ισοδύναμο πυροηλεκτρικού φαινομένου

Για μικρές μεταβολές θερμοκρασίας η έξοδός του μπορεί να προσεγγιστεί με ένα ρεύμα με τιμή [7]:

$$I_p = Ap_c \frac{dT}{dt} \tag{1.4}$$

Όπου Α η επιφάνεια του υλικού σε επαφή με τα ηλεκτρόδια και p_c ο πυροηλεκτρικός συντελεστής (τάξης 1μC/cm² K).

Σε γενικές γραμμές δεν έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την αξιοποίηση του πυροηλεκτρικού φαινομένου για παραγωγή ισχύος. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι είναι πιο εύκολο να βρεθούν διαφορές της θερμοκρασίας στο χώρο που αξιοποιούνται μέσω του θερμοηλεκτρικού φαινομένου παρά περιοδικές χρονικές μεταβολές της θερμοκρασίας με ικανοποιητική συχνότητα.

Energy Densities for 300 to 310 K Cyclic Temperature Variations and Number of Cycles Per Hour for Producing 30 µW/CM3.

Material	Energy density (J/cm ³)	Cycles per hour for producing $30 \ \mu W/cm^3$
111 PMN-0,25PT Single crystal	0.149	0.725
PMN-0.25PT Ceramic	0.0118	9.12
PbCaTiO ₃ Thin film	0.00855	12.6
PVDF	0.00540	20.0

Σχήμα 1.7: Απαιτούμενη συχνότητα μεταβολών θερμοκρασίας για επίτευξη πυκνότητας ισχύος αντίστοιχης με μίας ΘΗΓ. Παρατίθεται για διάφορα υλικά η πυκνότητα ενέργειας ανά κύκλο και η απαιτούμενη συχνότητα για κυκλικές μεταβολές θερμοκρασίας μεταξύ 300-310K για παραγωγή 30μW/cm³ (τυπικό μέγεθος για παραγωγή ισχύος με ΔT=10K μέσω θερμοηλεκτρικού φαινομένου) [8].

Στη βιβλιογραφία συχνά γίνεται αναφορά σε "κύκλους" οι οποίοι θυμίζουν τους θερμοδυναμικούς κύκλους αλλά αντί για πίεση και όγκο έχουν μεγέθη σχετικά με το εφαρμοζόμενο εξωτερικό πεδίο και τη διηλεκτρική μετατόπιση.



Σχήμα 1.8: Δείγμα θερμοδυναμικού κύκλου διαδικασίας παραγωγής ενέργειας μέσω πυροηλεκτρικού φαινομένου (κύκλος Olsen).

Δυστυχώς υπάρχουν πολύ λίγες κυκλωματικές λύσεις για τη χρήση του πυροηλεκτρικού φαινομένου για energy harvesting. Ένας σημαντικός περιορισμός είναι η απαίτηση για εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου της τάξης μερικών kV/mm για την καταπολέμηση μη γραμμικοτήτων που παρουσιάζουν πολλά πυροηλεκτρικά υλικά [8]. Το γεγονός επίσης ότι το πάχος των περισσότερων πυροηλεκτρικών φιλμ είναι της τάξης των 100μm σημαίνει ότι το κύκλωμα θα πρέπει να μπορεί να εφαρμόζει υψηλές τιμές τάσης στα άκρα του πυροηλεκτρικού στοιχείου (50V ως 1kV οι οποίες είναι απαγορευτικές για τις συνηθισμένες τεχνολογίες ολοκλήρωσης). Επιπλέον το ρεύμα που δίνεται για λογικό ρυθμό μεταβολής θερμοκρασίας είναι συνήθως μικρό (της τάξης των λίγων nA). Γι' αυτούς τους λόγους και οι υλοποιήσεις που έχουν προταθεί είναι κατά κύριο λόγο πολύ μεγάλου μεγέθους [8, 7]. Οι σχετικά πρόσφατες εξελίξεις όμως στον τομέα των πυροηλεκτρικών νανογεννητριών (PyroElectric NanoGenerators, PENG) δημιουργεί ελπίδες για την παραγωγή ικανοποιητικής ποσότητας ισχύος χωρίς να απαιτείται η διαχείριση τόσο υψηλών τάσεων.

1.2.2 Ηλιακή ενέργεια

Το φως, είτε φυσικό είτε τεχνητό, είναι διαθέσιμο σχεδόν παντού εκτός και από περιπτώσεις όπου το σύστημα περιβάλλεται από αδιαφανές υλικό (πχ. εντός του ελαστικού ενός αυτοκινήτου). Ωστόσο η διαθεσιμότητά του μεταβάλλεται σημαντικά με το χρόνο (εναλλαγή μέρας-νύχτας και εποχή) και τις καιρικές συνθήκες.

Σύμφωνα με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (μας ενδιαφέρει κυρίως σε ημιαγωγούς), όταν ένα φωτόνιο απορροφηθεί από έναν ημιαγωγό τότε εφόσον μεταφέρει αρκετή ενέργεια μπορεί να επιτρέψει σε ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης σθένους (valence band) του υλικού να υπερπηδήσει το ενεργειακό διάκενο (energy bandgap) και να βρεθεί στη ζώνη αγωγιμότητας (conduction band) δημιουργώντας ταυτόχρονα μία οπή στη ζώνη σθένους. Η οπή και το ηλεκτρόνιο μπορούν να μετακινηθούν εντός του υλικού μέχρι το ηλεκτρόνιο να αποδιεγερθεί αποβάλλοντας ένα φωνόνιο ή ένα φωτόνιο χαμηλότερης ενέργειας και να επανασυνδεθεί με μία οπή επιστρέφοντας στη ζώνη σθένους. Σε μία επαφή pn η διαφορά δυναμικού στην περιοχή αραίωσης μπορεί να αξιοποιηθεί για να απομακρύνει τα αγώγιμα ηλεκτρόνια από τις οπές επιτρέποντάς μας να τα οδηγήσουμε σε ηλεκτρόδια και να τα αξιοποιήσουμε.

Ο μετατροπέας που χρησιμοποιούμε είναι το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Η βασική δομή ενός τυπικού φωτοβολταϊκού στοιχείου περιέχει μία επαφή pn δύο ηλεκτροδίων που συνήθως βρίσκονται σε επαφή με ημιαγωγό υψηλής νόθευσης και γυαλί ή κάποιο άλλο προστατευτικό διαφανές υλικό στην πλευρά όπου προσπίπτει το φως. Η πιο ώριμη τεχνολογία είναι αυτή των thin film cells αλλά έχουν παρουσιαστεί και πιο πολύπλοκες και αποδοτικότερες διατάξεις όπως οι διατάξεις πολλών επαφών (multijunction solar cells), τρισδιάστατων επαφών (3D junction s.c.) κ.λπ., ενώ υπάρχει και ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την κατασκευή οργανικών φωτοηλεκτρικών κελιών τα οποία μπορούν να αποτελέσουν μία εφαρμόσιμη και χαμηλού κόστους λύση.

Το βασικό ισοδύναμο ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελείται από μία πηγή ρεύματος παράλληλα με μία δίοδο. Επιπλέον στοιχεία που μπαίνουν στο ισοδύναμο είναι μία παράλληλη αντίσταση και μία ακόμα αντίσταση σε σειρά λίγο πριν από την έξοδο του στοιχείου, ενώ υπάρχουν και ισοδύναμα με 2 παράλληλες διόδους (για το διαχωρισμό της επίδρασης των επανασυνδέσεων στην περιοχή αραίωσης από αυτήν στις ουδέτερες περιοχές του ημιαγωγού). Το ρεύμα που δίνει η πηγή εξαρτάται από το πόσο φως δέχεται το στοιχείο και ένα μέρος του διαρρέει τη δίοδο και την παράλληλη αντίσταση ενώ το υπόλοιπο φεύγει προς την έξοδο. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος συνήθως φτάνει μέχρι και τα 0.8 V και η μέγιστη ισχύς που μπορούμε να πάρουμε εξαρτάται από τις συνθήκες φωτισμού.



Σχήμα 1.9: Ηλεκτρικό ισοδύναμο φωτοβολταϊκού στοιχείου με μία δίοδο

Το γεγονός ότι η τάση εξόδου είναι σχετικά χαμηλή συνεπάγεται την απαίτηση της ύπαρξης ενός step-up-converter στο κύκλωμα που θα αναλαμβάνει την αξιοποίηση της ενέργειας του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Επιπλέον η ύπαρξη της διόδου στο κύκλωμα και κυρίως η έντονη εξάρτηση του ρεύματος από τις συνθήκες φωτισμού δημιουργεί προβλήματα σχετικά στην επιλογή του σημείου λειτουργίας για μέγιστη μεταφορά ισχύος καθώς αυτό μπορεί να αλλάζει σημαντικά σε μικρό χρονικό διάστημα. Γι' αυτό και τα περισσότερα συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας περιέχουν υποσυστήματα που τους επιτρέπουν να ακολουθούν το σημείο λειτουργίας για βέλτιστη μεταφορά ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT).

1.2.3 Κινητική ενέργεια

Κινήσεις όπως οι κινήσεις που κάνει ένας άνθρωπος, ένα δένδρο υπό την επίδραση του ανέμου, μία γέφυρα που τη διασχίζουν αυτοκίνητα, ακόμα και οι δονήσεις στην επιφάνεια μίας μηχανής, όλες αυτές οι κινήσεις μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας. Κατά κανόνα μας ενδιαφέρουν κινήσεις οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν έμμεσα είτε παραμόρφωση είτε σχετική κίνηση ανάμεσα σε στοιχεία του μετατροπέα που χρησιμοποιούμε και κυρίως οι επιταχυνόμενες κινήσεις. Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στην εκμετάλλευση των δονήσεων καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις δεν είναι χρήσιμες για τη λειτουργία του συστήματος το οποίο τις παράγει και συνεπώς η συλλογή ενέργειας από αυτές τις κινήσεις δεν θα επηρεάζει αρνητικά τη λειτουργία του. Για την εκμετάλλευσή τους χρησιμοποιούνται συχνά διατάξεις όπως αυτή της εικόνας που ονομάζονται αδρανειακές γεννήτριες (inertial generators). Οι περισσότεροι μετατροπείς για τέτοιο μοντέλο. Το κυρίως σώμα της εφαρμόζεται πάνω στη δονούμενη επιφάνεια και ακολουθεί την κίνησή της, η μάζα m συνδέεται με το κυρίως σώμα της γεννήτριας μέσω ενός "ελατηρίου" και ενός "αποσβεστήρα". Η αδράνειά της και ο τρόπος σύνδεσής της έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε μεταβολές της απόστασης z (t) οποτεδήποτε, το κυρίως σώμα της γεννήτριας επιταχύνεται, και αυτές τις μεταβολές τις αξιοποιούμε για την παραγωγή ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα τέτοιο σύστημα έχει τη δική του συχνότητα μηχανικού συντονισμού και συνεπώς η επιλογή του μετατροπέας πρέπει να γίνεται πάντα και με βάση το συχνοτικό προφίλ των δονήσεων του περιβάλλοντος στο οποίο θα τοποθετηθεί το σύστημα. Επιπλέον πρέπει να επισημανθεί ότι οι παράμετροι που καθορίζουν τη συχνότητα συντονισμού δεν είναι ανεξάρτητες από το ηλεκτρικό σημείο λειτουργίας του μετατροπέα και αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί σε ορισμένες περιπτώσεις για τη δημιουργία μετατροπέων που μπορούν να αξιοποιηθούν για μεγάλο εύρος μηχανικών με την εφαρμογή κατάλληλων τάσεων στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο [9].



Σχήμα 1.10: Αδρανειακή γεννήτρια

<u>Ηλεκτροστατική μετατροπή</u>

Για την ηλεκτροστατική μετατροπή συνήθως χρησιμοποιείται κάποιο στοιχείο με ιδιότητες μεταβλητού πυκνωτή. Οι κίνηση χρησιμοποιείται για την αλλαγή της χωρητικότητάς του η οποία πρακτικά συνεπάγεται τη μετατροπή μέρους της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Αυτή η μετατροπή ανάλογα με το αν το κύκλωμα δουλεύει σε charge ή voltage constrained mode εμφανίζεται τη στιγμή της κίνησης είτε ως αύξηση της τάσης στα άκρα του πυκνωτή (και συνεπώς της ενέργειάς του) είτε ως ρεύμα που εξέρχεται εκείνη τη στιγμή από τον πυκνωτή. Το στοιχείο που χρησιμοποιείται για την ηλεκτροστατική μετατροπή κινητικής ενέργειας είναι όπως προαναφέραμε ένα στοιχείο με ιδιότητες μεταβλητού πυκνωτή ελεγχόμενου μέσω κίνησης. Εκτός από τους γνωστούς μεταβλητούς πυκνωτές ιδιαίτερο ενδιαφέρον φαίνεται να έχουν οι MEMS μεταβλητοί πυκνωτές οι οποίοι έχουν ιδιαίτερα μικρές διαστάσεις (συγκρίσιμες με τις διαστάσεις ενός κόκκου άμμου πολλές φορές) και αρκετά υψηλότερες συχνότητες μηχανικού συντονισμού (μερικά kHz) ενώ μπορούν να κατασκευαστούν σε καλή ποιότητα σε σχέση με τους άλλους MEMS μετατροπείς κινητικής ενέργειας. Σε αντίθεση με τα άλλα δύο είδη μετατροπέων απαιτεί και την ύπαρξη κάποιας πηγής τάσης συνδεδεμένη με αυτόν.

Οι μετατροπείς αυτοί είναι μεταβλητοί πυκνωτές. Όταν δουλεύουν σε voltage constrained λειτουργία οι μετατροπείς συμπεριφέρονται σαν πηγές ρεύματος ελεγχόμενες από τις δονήσεις ενώ η τάση στα άκρα τους διατηρείται σταθερή και απαιτούν μία επιπλέον πηγή τάσης στο κύκλωμα. Στις charge constrained υλοποιήσεις κατά κανόνα μπορούν να εμφανιστούν μεγάλες τιμές τάσης στα άκρα των πυκνωτών (>100 V) και οι μετατροπείς αξιοποιούνται ως συστατικά στοιχεία σε charge pumps. Συχνά χρησιμοποιείται και ένας πυκνωτής συνδεδεμένος παράλληλα.



Σχήμα 1.11: Κύκλωμα για Voltage constrained λειτουργία[10]



Σχήμα 1.12: Ενδεικτικό κύκλωμα εκμετάλλευσης ηλεκτροστατικών μετατροπέων σε charge constrained λειτουργία [11].

Σε κάθε περίπτωση για την εκκίνηση της διαδικασίας μετατροπής απαιτείται ένας προφορτισμένος πυκνωτής ή μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία. Αυτό καθιστά μη πρακτική την εφαρμογή σε πλοία από τη στιγμή που η πηγή θα αποφορτιστεί κατά τη διάρκεια στην οποία το πλοίο θα βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής σε λιμάνι ή σε κατάσταση επισκευής.

<u>Πιεζοηλεκτρική μετατροπή</u>

Σε αυτήν την κατηγορία η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική από μια δύναμη που ασκείται σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό. Όταν σε ένα τέτοιο υλικό ασκείται μηχανική πίεση, δημιουργείται διαχωρισμός φορτίου κατά μήκος του. Ένα τέτοιο στοιχειώδες δίπολο παράγει διαφορά δυναμικού[12]. Η μηχανική τάση που εφαρμόζεται προκαλεί παραμόρφωση, η οποία αλλάζει τις διευθύνσεις αυτών των διπόλων με αποτέλεσμα την εμφάνιση ηλεκτρικής τάσης στα άκρα του. Ως φαινόμενο, μπορεί να λειτουργήσει και αντίστροφα, δηλαδή, με τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού πάνω σε ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό μπορούμε να πετύχουμε την παραμόρφωσή του.

Πολλά πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι ανισότροπα και συνεπώς δεν αντιδρούν με την ίδια ένταση σε μηχανική τάση κάθε διεύθυνσης. Γι' αυτό και οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν την πιεζοηλεκτρική συμπεριφορά τους δίνονται συνήθως στη μορφή πινάκων με συντελεστές της μορφής dxy όπου x η διεύθυνση πόλωσης του υλικού και y η διεύθυνση της εφαρμοζόμενης μηχανικής τάσης. Αν και οι συντελεστές για συμπίεση/έκταση κατά μήκος της διεύθυνσης πόλωσης είναι κατ' απόλυτη τιμή μεγαλύτεροι από τους υπόλοιπους οι περισσότεροι πιεζοηλεκτρικοί μετατροπείς αξιοποιούν τις εγκάρσιες τάσεις καθώς είναι ευκολότερη η κατασκευή διατάξεων που μετατρέπουν τις δονήσεις του περιβάλλοντος χώρου σε τέτοιου είδους μηχανικές τάσεις επί του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.



Σχήμα 1.13: Πιεζοηλεκτρικός μετατροπέας με δομή πακτωμένης δοκού (cantilever beam) [13].

Ο μετατροπέας γενικά χαρακτηρίζεται από μεγάλη αντίσταση εξόδου. Το πλάτος του σήματος εξόδου εξαρτάται από το πλάτος των μηχανικών τάσεων που υφίσταται ο μετατροπέας και των χαρακτηριστικών του υλικού (από μερικές εκατοντάδες mV μέχρι και μερικά V για τις περισσότερες εφαρμογές energy harvesting). Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρικά μοντέλα. Το πιο απλό μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι αυτό της πηγής τάσης εν σειρά με μία σύνθετη αντίσταση ωστόσο υπάρχει και ακριβέστερο μοντέλο το οποίο αποτελείται από μία πηγή ρεύματος παράλληλα με μία χωρητικότητα και μία αντίσταση. Το δεύτερο μοντέλο είναι το ίδιο σαν τοπολογία με το μοντέλο των πυροηλεκτρικών μετατροπέων πράγμα καθόλου περίεργο μιας και όλα τα πυροηλεκτρικά υλικά είναι ταυτόχρονα και πιεζοηλεκτρικά (το αντίθετο δεν ισχύει).



Σχήμα 1.14: Ισοδύναμο ηλεκτρομηχανικό κύκλωμα για πιεζοηλεκτρικό στοιχείο κοντά στο συντονισμό [13].

Τα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με πιεζοηλεκτρικούς harvesters έχουν πάντα ως βασικό στοιχείο τους ένα κύκλωμα ανόρθωσης από AC σε DC. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι λύσεις που λαμβάνουν υπόψιν την κατάσταση φόρτισης της χωρητικότητας CP την οποία είτε μηδενίζουν είτε αντιστρέφουν με στόχο την εξαγωγή περισσότερης ισχύος από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο [13], καθώς και οι λύσεις που επιδρούν στον πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα με εφαρμογή κατάλληλης τάσης για να οδηγήσουν τη συχνότητα μηχανικού συντονισμού του πιο κοντά στις συχνότητες δονήσεων του περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.15: Ανορθωτής για πιεζοηλεκτρικό στοιχείο που λαμβάνει υπόψη την κατάσταση φόρτισης της παράλληλης χωρητικότητας CP για βελτίωση της απόδοσης [13].

Το μειονέκτημα της πιεζοηλεκτρικής μετατροπής για τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ότι δεν μπορεί να παράγει μέγιστη ισχύ αν η συχνότητα των δονήσεων αλλάζει. Αντιθέτως, πρέπει να δονείται στη συχνότητα συντονισμού. Η συχνότητα συντονισμού εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως το σχήμα της συνολικής μάζας ή το πλάτος της ράβδου. Αυτές οι παράμετροι δεν μπορούν να αλλάξουν αφού το σύστημα ταλαντώσεων έχει κατασκευαστεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ότι μια γεννήτρια βασιζόμενη στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο θα αποδίδει τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας μόνο στη φυσική της συχνότητα συντονισμού.

<u>Ηλεκτρομαγνητική μετατροπή</u>

Η μεταβολή ως προς το χρόνο της εμπλεκόμενης σε ένα κύκλωμα μαγνητικής ροής προκαλεί την εμφάνιση ανάλογης ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Συνήθως η μάζα της αδρανειακής γεννήτριας είναι κάποιος μαγνήτης που περιβάλλεται από ένα ακίνητο (σε σχέση με το κυρίως σώμα του μετατροπέα) πηνίο. Το πλάτος της προκύπτει από τη σχέση:

$$V = -N\frac{d\varphi}{dt} \tag{1.5}$$

Όπου N το πλήθος σπειρών του πηνίου και φ η εμπλεκόμενη από μία σπείρα ροή με την τιμή της να εξαρτάται από τη σχετική θέση και διεύθυνση του μαγνήτη και του πηνίου. Οι τυπικές τιμές τάσης εξόδου ενός τέτοιου μετατροπέα που χρησιμοποιείται στο energy harvesting είναι της τάξης μερικών 100αδων mV. Το ρεύμα που παράγεται όταν έχουμε και κάποιο συνδεδεμένο φορτίο δημιουργεί πεδίο που αντιτίθεται στο πεδίο που δημιούργησε την ηλεκτρεγερτική δύναμη και αυτό επιδρά στη μηχανική συμπεριφορά του μετατροπέα αυξάνοντας το συντελεστή απόσβεσής του. Αυτοί οι μετατροπείς είναι δυσκολότερο να κατασκευαστούν σε μικρά μεγέθη διατηρώντας καλή απόδοση καθώς τα ολοκληρωμένα πηνία παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή ποιότητας.

Θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιο κύκλωμα για ανόρθωση του AC σε DC. Επειδή το πλάτος της τάσης εισόδου είναι μικρό συνήθως αποφεύγονται οι λύσεις με διόδους λόγω του μεγάλου δυναμικού ορθής πόλωσης.



Σχήμα 1.16: Διάταξη ανόρθωσης με ανορθωτή γέφυρας με MOSFET και ενεργή δίοδο [25].

Αναλογιζόμενοι τα μειονεκτήματα των ηλεκτροστατικών και ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων, η καλύτερη επιλογή για ενεργειακή συγκομιδή μέσω δονήσεων πλοίου φαίνεται να είναι οι ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται η σχετική κίνηση μεταξύ του πηνίου και του μαγνητικού πεδίου ώστε να επαχθεί ηλεκτρική τάση στο πηνίο. Σε αντίθεση με την ηλεκτροστατική μετατροπή, δε χρειάζεται εξωτερική πηγή ηλεκτρικού δυναμικού για να εκκινηθεί η διαδικασία. Επιπλέον, το σύστημα μπορεί να σχεδιαστεί χωρίς μηχανική επαφή μεταξύ των μερών του, το οποίο αυξάνει την αξιοπιστία και μειώνει τις μηχανικές αποσβέσεις [14]. Θεωρητικά, αυτός ο τύπος μετατροπέα μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να έχει πολύ μικρή μηχανική απόσβεση. Η πρόκληση είναι να δημιουργηθούν ηλεκτρομαγνητικοί μετατροπείς που να αποδίδουν μεγαλύτερες τιμές ισχύος, οπότε και μεγαλύτερου όγκου για συχνότητες δονήσεων κάτω των 20 Hz, όπως αυτές που συναντώνται σε περιβάλλον πλοίου.

1.2.4 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία/ραδιοκύματα

Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές από τηλεόραση, ραδιοσταθμούς, σταθμούς κινητής τηλεφωνίας και άλλων τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών. Με την κάλυψη όλο και μεγαλύτερων περιοχών από το σήμα τους οι πομποί αυτών των σταθμών μπορούν να θεωρηθούν αρκετά ελκυστικοί ως πηγή ενέργειας. Το μεγαλύτερο πρόβλημά τους είναι ότι η διαθέσιμη ισχύς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η γεωμετρία του περιβάλλοντος χώρου (πολλά ψηλά κτήρια ή εντός ενός κτηρίου), οι καιρικές συνθήκες και η απόσταση από τον πομπό ενώ για την πλειοψηφία τον προαναφερθέντων εκπομπών απαιτείται η χρήση σχετικά μεγάλης κεραίας για την αξιοποίηση ικανοποιητικής ποσότητας ισχύος. Παράλληλα υπάρχουν και οι near field εφαρμογές όπως η πλειοψηφία των passive RFIDs τα οποία όμως απαιτούν την ύπαρξη ενός ξεχωριστού πομπού στη συσκευή-αναγνώστη ο οποίος πρέπει να βρίσκεται σε απόσταση μερικών εκατοστών για να τους μεταφέρουν επαρκή ισχύ.

Ως φαινόμενο εκμετάλλευσης ενέργειας περιγράφεται η λήψη από κεραίες της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Η ενεργειακή μετατροπή γίνεται μέσω της κεραίας. Δυστυχώς για τις περισσότερες τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές μεγάλης εμβέλειας οι οποίες θα ήταν και οι πιο χρήσιμες απαιτούνται μεγάλες κεραίες (έκτασης άνω των 500cm²) [15]. Στην έξοδό του ο συγκεκριμένος μετατροπέας δίνει εναλλασσόμενο σήμα, το πλάτος του οποίου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.



Σχήμα 1.17: Κύκλωμα πολλαπλασιαστή τάσης με διόδους Schottky [16].

Την κεραία ακολουθεί συνήθως ένα κύκλωμα προσαρμογής και κατόπιν ένα κύκλωμα ανόρθωσης το οποίο είτε έχει τη μορφή κάποιας γέφυρας πλήρους κύματος είτε ενός πολλαπλασιαστή τάσης με διόδους και πυκνωτές. Στη δεύτερη περίπτωση προτιμάται η χρήση διόδων Schottky προς αποφυγήν των απωλειών και

των περιορισμών που θέτει το μη μηδενικό δυναμικό ορθής πόλωσης των κανονικών διόδων.

1.2.5 Καύσιμα που βρίσκονται στο περιβάλλον

Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για να μιμηθούμε τη φύση στην παραγωγή ενέργειας. Υπάρχει πλειάδα βιοχημικών εργασιών που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν αλλά μία από τις πιο ενδιαφέρουσες περιπτώσεις είναι αυτή της παραγωγής ενέργειας από γλυκόζη η οποία μπορεί να κάνει δυνατή την κατασκευή ηλεκτρονικών που εμφυτεύονται σε ζωντανούς οργανισμούς και παράγουν ενέργεια αξιοποιώντας τις ουσίες που βρίσκουν στην κυκλοφορία τους. Ήδη έχουν παρουσιαστεί στην αγορά τέτοια συστήματα που εφαρμόζονται πάνω σε δένδρα και είναι ικανά να τροφοδοτήσουν μικρούς ασύρματους κόμβους ενώ υπάρχουν και σε ερευνητικό επίπεδο συσκευές που τροφοδοτούνται από τον ιδρώτα και άλλες που τροφοδοτούνται από "φυσικές μπαταρίες" εντός του οργανισμού [17].



Σχήμα 1.18: (α) Τρόπος εφαρμογής συστήματος συγκομιδής ενέργειας από δέντρα και (β) αρχή λειτουργίας μετατροπέα για συγκομιδή ενέργειας από ιδρώτα.

Ως φαινόμενο περιλαμβάνει πλειάδα ηλεκτροχημικών διεργασιών, όπου συνήθως ως μετατροπέας λειτουργεί κάποιο είδος κυψέλης καυσίμου αλλά έχουν αναφερθεί και περιπτώσεις στις οποίες αποτελεί τμήμα έμβιου οργανισμού [17]. Η τάση

εξόδου είναι συνεχής και λόγω των χαμηλών τιμών που έχει συνήθως χρησιμοποιείται μετατροπέας αναβάθμισης τάσης (boost converter).

1.3 Στόχοι εφαρμογής

Ο στόχοι σε μια τέτοια εφαρμογή είναι να σχεδιαστεί ένας ενεργειακός συλλέκτης που να αποδίδει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από την κίνηση του πλοίου. Θα πρέπει να εξυπηρετεί τους παρακάτω σκοπούς:

- Να παράγει συνεχώς τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ σε διαφορετικές χαμηλές συχνότητες δονήσεων (κάτω των 20Hz) υπό οποιεσδήποτε συνθήκες
- Να συμπεριλαμβάνει κύκλωμα διαχείρισης της ισχύος που να επιτρέπει την συνολική φόρτιση πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας που να υποστηρίζει το εκάστοτε φορτίο

Ένας τέτοιος συλλέκτης ενέργειας αποτελείται από δυο μέρη:

- μια γραμμική γεννήτρια που χρησιμοποιεί μια ηλεκτρομαγνητική διάταξη που μετατρέπει την ενέργεια των δονήσεων σε ηλεκτρική ενέργεια
- ένα κύκλωμα διαχείρισης ισχύος ώστε να φορτίζει έναν πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η αρχιτεκτονική του συστήματος συγκομιδής ενέργειας. Στη γεννήτρια, οι μαγνήτες κινούνται ως προς το πηνίο είτε με ελατήρια είτε χωρίς. Η τάση επάγεται στα πηνία σύμφωνα με το νόμο του Faraday. Για να υπάρχει συνεχές ρεύμα που να φορτίζει τον πυκνωτή, η επαγόμενη εναλλασσόμενη τάση τροφοδοτεί έναν ανορθωτή που τη μετατρέπει σε συνεχή και ένα φίλτρο που τη σταθεροποιεί. Ένας μετατροπέας dc/dc τοποθετείται ανάμεσα στο φίλτρο και στον πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας ώστε να επιτευχθεί μέγιστη μεταφορά ενέργειας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί έναν ελεγκτή με στόχο να βρίσκει και να διατηρεί τη μέγιστη ροή ισχύος στον πυκνωτή.



Power management circuit

Σχήμα 1.19: Αρχιτεκτονική του συστήματος ενεργειακής συγκομιδής

1.4 Περίγραμμα διπλωματικής

- <u>Κεφάλαιο 2</u>: περιγράφει την κατασκευή και τις βασικές αρχές της γραμμικής γεννήτριας.
- Κεφάλαιο 3: απεικονίζει όλες τις παραμέτρους του συστήματος που επηρεάζουν την ισχύ εξόδου συμπεριλαμβάνοντας την αντίσταση του φορτίου, την επαγόμενη τάση και τη συσχέτιση τους με την ισχύ. Οι σχεδιαστικές αρχές του συστήματος βασίζονται στη σχέση των παραπάνω μεγεθών με την ισχύ.
- <u>Κεφάλαιο 4</u>: σχεδιάζεται ένα κύκλωμα διαχείρισης ισχύος που θα φορτίζει τον υπερπυκνωτή όπως και τη ρύθμιση της ροής ισχύος προς αυτό.
- <u>Κεφάλαια 5-7</u>: Κατασκευάζονται και συγκρίνονται αποδόσεις μικρογεννητριών σε εργαστηριακό επίπεδο

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2º - Η ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση αυτού του είδους μετατροπέα. Στο πρώτο κομμάτι, γίνεται σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών των δονήσεων του πλοίου. Στη συνέχεια περιγράφεται η μηχανική κατασκευή και οι αρχές λειτουργίας της γραμμικής γεννήτριας (ηλεκτρομαγνητικού μετατροπέα). Στο τέλος, αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο και η συνάρτηση μεταφοράς της γραμμικής γεννήτριας με αντίσταση φορτίου.

2.1 Δονήσεις Πλοίου

Οι δονήσεις του πλοίου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε κινητικότητα χαμηλής συχνότητας που προκύπτει από τις συνθήκες της θάλασσας που περιβάλλουν το σκάφος όπως οι ταλαντώσεις και οι κινήσεις που προκαλούν τα κύματα, σε κινήσεις πλοίου όπως οι κλίσεις του, και δονήσεις υψηλότερων συχνοτήτων που δημιουργούνται από τις μηχανές, από τις προπέλες, και από τον μηχανικό εξοπλισμό του πλοίου.



Σχήμα 2.1: Το φάσμα των κυμάτων σε μια θάλασσα υπό διαφορετικούς καιρικές συνθήκες

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι το εύρος των συχνοτήτων των κυμάτων είναι από 0.1 έως 0.7 Hz. Το εύρος των συχνοτήτων των δονήσεων των πλοίων που προκαλείται από παρεμβολές στη ροή του νερού και από ανισορροπία και κακή ευθυγράμμιση του συστήματος της προπέλας είναι 1 – 11 Hz. Οι ντιζελογεννήτριες είναι μια άλλη βασική πηγή δονήσεων πέρα από τις προπέλες. Οι συχνότητες των δονήσεών τους εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής τους: για μεσαία επίπεδα ταχυτήτων (300-1200 σ.α.λ.), οι συχνότητες δονήσεων είναι από 5 έως 20 Hz. Γενικά, χρησιμοποιούνται μηχανές μεσαίων ταχυτήτων και σε επιβατικά και σε φορτηγά πλοία με αποτέλεσμα να θεωρούμε ότι οι συχνότητες δονήσεων ενός πλοίου είναι στο εύρος 2-20 Ηz και το πλάτος της μετατόπισης να είναι 5 mm.

2.2 Περιγραφή του μηχανικού συστήματος

Αρχικά μοντελοποιούμε τις δονήσεις σε ένα πλοίο με ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC) και με μη ομόκεντρο βάρος. Ο κινητήρας τοποθετείται κατακόρυφα με ένα κυλινδρικό μη ομόκεντρο βάρος ως προς τον άξονα. Όταν τροφοδοτείται από συνεχή τάση, ο άξονας περιστρέφει το μη ομόκεντρο βάρος, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν δονήσεις στον κινητήρα. Αυτές με τη σειρά τους μεταφέρονται στη δοκιμαστική σανίδα, η οποία κάτω από κάθε γωνία της έχει τέσσερα ρουλεμάν (χωρίς τριβή). Στη συνέχεια, η σανίδα ξεκινά να ταλαντώνεται ως προς τον οριζόντιο άξονα με τα ρουλεμάν να περιστρέφονται. Η συχνότητα των δονήσεων εξαρτάται από την τροφοδοσία συνεχούς τάσης και το γεωμετρικό κέντρο του κυλινδρικού βάρους σε σχέση με τον άξονα. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση, τόσο μεγαλύτερη η συχνότητα των δονήσεων της σανίδας. Ο μηχανισμός που μετατρέπει τις μηχανικές δονήσεις σε ηλεκτρισμό, που ονομάζεται γραμμική γεννήτρια, τοποθετείται στο κέντρο της σανίδας. Ο μηχανισμός απαιτεί περίπου 0.16x0.11x0.05 m³ σε όγκο.

Αποτελείται από δύο πυρήνες σιδήρου, μία στην κορυφή και μία στη βάση, με τα χάλκινα σύρματα να τυλίγονται γύρω από τους αύλακες που «κόβουν» εσωτερικά τον πυρήνα σιδήρου. Οι δύο πυρήνες σιδήρου, οι οποίοι παρέχουν ένα μονοπάτι και οδηγούν τη μαγνητική ροή με τις ελάχιστες απώλειες, βιδώνονται σε κάθε πλευρά του πλαισίου. Η χρήση των δύο πυρήνων είναι για να αντισταθμίσει τις δυνάμεις που προκαλούνται από την κακή ευθυγράμμιση και κάνουν τις πλευρές εύκολο να κινηθούν. Τα διάκενα μεταξύ των μαγνητών και των πυρήνων σιδήρου είναι μόνο μερικά χιλιοστά. Οι σταθερές πλευρές είναι κολλημένες στο πλαίσιο. Δυο ελατήρια είναι βιδωμένα στο πλαίσιο.



Σχήμα 2.2: Μηχανικό διάγραμμα της γεννήτριας

2.3 Αρχιτεκτονικές ηλεκτρομαγνητικών συλλεκτών ενέργειας

Η εκμετάλλευση της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετατρέψει ενέργεια μέσω διαφορετικών τοπολογιών. Στις εφαρμογές συγκομιδής ενέργειας μέσω δονήσεων είναι απαραίτητη η ύπαρξη μηχανικής ενέργειας (η κίνηση μιας αδρανειακής μάζας). Ακολουθώντας το νόμο επαγωγής του Faraday η μετατροπή αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί παράγοντας μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή στην κλειστή περιοχή του καλωδίου. Στους μετατροπείς δονήσεων αυτό κυρίως υλοποιείται σε διαφορετικά είδη. Για αυτό το λόγο πολλές διαφορετικές αρχιτεκτονικές έχουν εφαρμοστεί για διαφορετικές ερευνητικές δραστηριότητες τα τελευταία χρόνια. Οι τοπολογίες αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: με μαγνήτες σε σειρά με το πηνίο και με μαγνήτες κατά μήκος του πηνίου.



Σχήμα 2.3: Διαφορετικές τοπολογίες μικρο-γεννητριών

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση, αρχικά, τίθενται οι οριακές συνθήκες για μετατροπείς δονήσεων που ισχύουν για τις διαφορετικές τοπολογίες. Στη συνέχεια, κάθε αρχιτεκτονική βελτιστοποιείται για όγκο 1 cm³. Για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται ημι-αναλυτικοί υπολογισμοί στατικών μαγνητικών πεδίων. Οι τοπολογίες προς διερεύνηση αποτελούνται από μόνιμους μαγνήτες (κυλινδρικούς ή ορθογώνιους) και ένα κυλινδρικό πηνίο. Το υλικό του

πηνίου θεωρείται ότι δεν έχει καμία επιρροή στη διανομή του στατικού μαγνητικού πεδίου. Οι ιδανικές διαστάσεις για κάθε αρχιτεκτονική ορίζονται μεταβάλλοντας τις γεωμετρικές παραμέτρους του πηνίου και των μαγνητών για τον ίδιο όγκο κατασκευής. Ως τελευταίο βήμα η βελτιστοποιημένη παραγωγή ηλεκτρικής τάσης και ισχύος συγκρίνονται μεταξύ τους. Έτσι, ξεκαθαρίζεται ποια τοπολογία ταιριάζει καλύτερα σε κάθε εφαρμογή.

2.3.1 Οριακές συνθήκες και διαδικασία βελτιστοποίησης

Ο πρώτος σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης τάσης και ισχύος των διαφορετικών τοπολογιών. Στη διαδικασία της βελτιστοποίησης καθορίζονται γεωμετρικές παράμετροι όπως η εσωτερική διάμετρος του πηνίου και το ύψος του πηνίου. Το διάκενο μεταξύ του πηνίου και των μαγνητών θεωρείται σταθερό. Τα τυλίγματα και η εσωτερική αντίσταση των τυλιγμάτων μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$N_{long} = \frac{2h_{coil}}{D_{co}\sqrt{\frac{\pi}{k_{co}}}},$$
(2.1)

$$N_{lat} = \frac{\frac{2(D - D_i)}{2}}{D_{co}\sqrt{\frac{\pi}{k_{co}}}},$$
(2.2)

$$R_{in} = \frac{N_{long} N_{lot} 2\pi (D - D_i) R'}{4}$$
(2.3)

Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τους μαγνήτες υπολογίζεται με τη χρήση βαθμωτών πιθανών μοντέλων [2,3]. Η συνολική μαγνητική ροή που περνάει από το πηνίο στο σημείο ισορροπίας του μαγνήτη υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\varphi = \sum_{N_{long}} \sum_{N_{lat}} \int_{A_{i,j}} \vec{B} d\vec{A_{i,j}}, \qquad (2.4)$$

$$K = \left(\frac{d\varphi}{dx}\right)_{equi} \tag{2.5}$$

Όπου το $A_{i,j}$ υποδεικνύει την περιοχή που περικλείεται από το αντίστοιχο τύλιγμα.
2.4 Μοντέλο ηλεκτρομηχανικής μετατροπής

Στη γραμμική γεννήτρια, τα πηνία λειτουργούν ως στάτης και οι κινούμενοι μαγνήτες ως δρομέας. Η αρχή λειτουργίας είναι η εξής: όσο δονείται η δοκιμαστική σανίδα, η μηχανική δύναμη τροφοδοτεί το σύστημα ελατηρίου-μάζας. Η μάζα (ο χώρος με τους μαγνήτες) κινείται σε σχέση με τη δοκιμαστική σανίδα και έτσι αποθηκεύεται ενέργεια στο μηχανικό σύστημα. Η έξοδος του μηχανικού συστήματος είναι η σχετική κίνηση της μάζας. Αυτή η σχετική κίνηση προκαλεί μια μαγνητική ροή και αντίστροφα επάγει μια τάση ανάλογη της παραγώγου της θέσης της μάζας. Τα ρεύματα που επάγονται στα πηνία παράγουν μια ηλεκτρομηχανική δύναμη, η οποία ανατροφοδοτεί και αποσβένει την κίνηση της μάζας. Έτσι, η τοπολογία του παραπάνω σχήματος μπορεί να απλοποιηθεί στο σχηματικό διάγραμμα που φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 2.4: Σχηματικό διάγραμμα της γεννήτριας

2.4.1 Σύστημα μάζας-ελατηρίου και μηχανικής απόσβεσης

Από τη στιγμή που η δόνηση της δοκιμαστικής σανίδας χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει τις δονήσεις του πλοίου, μπορεί να θεωρηθεί ότι η μάζα της πηγής δονήσεων είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μάζα της γεννήτριας και ότι η πηγή δονήσεων είναι μια αέναη και απεριόριστη πηγή ενέργειας.[10 apo SH.VIBR.] Για να απλοποιηθεί μαθηματικά η πηγή δονήσεων, προτείνεται ότι οι δονήσεις του πλοίου δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$Y(s) = Y_1 \sin(\omega t) \tag{2.6}$$

Όπου

 γ_0

 $= \pi \lambda \dot{\alpha} \tau \sigma \tau$ μετατόπισης της κύριας συχνότητας των δονήσεων του πλοίου(m)

$$\omega = 2\pi f$$
, γωνιακή συχνότητα των δονήσεων του πλοίου $\left(\frac{rad}{s}\right)$
 $f = συχνότητα δονήσεων πλοίου (Hz)$

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση της μάζας ως προς τη δοκιμαστική σανίδα μπορεί να εξαχθεί από τη δυναμική εξίσωση για τη μάζα:

$$-c_m z(t) - k z(t) = m (y(t) + z(t))$$
(2.7)

Ή

$$mz(t) + c_m z(t) + kz(t) = -my(t)$$
 (2.8)

Όπου

$$z = σ \chi ε τικ ή μετατόπιση της μάζας (m) $k = σ τ α θ ε ρ ά ελατηρίου $\left(rac{N}{m}
ight)$$$$

 c_m

= συντελεστής μηχανικής απόσβεσης λόγω της τριβής και της δύναμης ευθυγράμμισης

$$m = \mu \dot{\alpha} \zeta \alpha \ (kg)$$

Η εξίσωση (2.2) μπορεί να γραφεί στο πεδίο της συχνότητας ως εξής:

$$Z(s)(ms^{2} + c_{m}s + k) = -ms^{2}Y(s)$$
(2.9)

Ως συνάρτηση μεταφοράς από το Y (s) προς το Z (s) γράφεται:

$$\frac{Z(s)}{Y(s)} = \frac{-ms^2}{ms^2 + c_m s + k}$$
(2.10)

Αντικαθιστώντας στις σχέσεις το συντελεστή μηχανικής απόσβεσης ως $\zeta_m = c_m/2m\omega_n$, και τη φυσική γωνιακή συχνότητα $\omega_n = \sqrt{k/m}$, η εξίσωση (2.4) μπορεί να γράφει ως:

$$\frac{Z(s)}{Y(s)} = \frac{-s^2}{s^2 + 2\zeta_m \omega_m s + \omega_n^2}$$
(2.11)

2.4.2 Ηλεκτρική απόσβεση

Όσο ο μηχανισμός κινείται, το μαγνητικό πεδίο αλλάζει θέση και συνεπώς, η μαγνητική ροή των χάλκινων τυλιγμάτων αλλάζει όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Phi = \int BdS = Bl[x - (w - x)] = Bl(2x - w)$$
(2.12)

Όπου:

Αυτό με τη σειρά του επάγει μια τάση στο πηνίο όπως προκύπτει από το νόμο του Faraday:

$$v_{in} = \frac{Nd\Phi}{dt} = 2NBlz \tag{2.13}$$

Όπου

 $N = \alpha \rho i \theta \mu$ ός τυλιγμάτων ενός πηνίου

Αν στην γραμμική γεννήτρια προστεθεί ένα ωμικό φορτίο, το ηλεκτρικό σύστημα θα είναι ένα L-R κύκλωμα 1^{ης} τάξης, με την αυτεπαγωγή του πηνίου σε σειρά με την ωμική του αντίσταση και την ωμική αντίσταση του φορτίου.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° - ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ένα μοντέλο πρόβλεψης του ρεύματος εξόδου γραμμικής γεννήτριας αναπτύχθηκε παραπάνω. Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθεί το παραπάνω μοντέλο ώστε να εξερευνηθεί ο σχεδιασμός του συσσωρευτή για μεγιστοποίηση της ισχύος. Αναλύονται η σχέση μεταξύ της σταθεράς ελατηρίου, της αντίστασης φορτίου και της ισχύος εξόδου όπως και μεταξύ της επαγόμενης τάσης και της ισχύος της.

3.1 Μέγιστη Ισχύς μετατροπής

Δυο τρόποι για την αναπαράσταση της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας αναλύονται παρακάτω. Η πρώτη περίπτωση απευθύνεται για όλους τους τύπους φορτίου ενώ η δεύτερη μόνο για ωμικά φορτία.

3.1.1 Ανάλυση της Ισχύος εισόδου βασιζόμενη στον συντελεστή απόσβεσης

Ένας τρόπος για να υπολογιστεί η ισχύς που καταναλώνεται από την ηλεκτρική δύναμη απόσβεσης φαίνεται στο παρακάτω σύστημα δεύτερης τάξης:

$$m\ddot{z}(t) + (c_{in} + c_e)\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t)$$
(3.1)

Όπως είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία, η εξίσωση μόνιμης κατάστασης είναι:

$$z(t) = Z_1 \beta \sin(wt - \varphi)$$
(3.2)

Όπου

$$Z_1 = \frac{mw^2 Y_1}{k}, \beta = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \omega_c^2\right)^2 + \left(2\omega_c\zeta\right)^2}}, \varphi = \frac{\tan^{-1} 2\omega_c\zeta}{1 - \omega_c^2}$$
$$\zeta = \zeta_m + \zeta_e = \frac{c_e + c_m}{2m\omega_n}$$

Η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε κύκλο είναι:

$$W = \int_{0}^{2\pi/w} (c_m + c_e) zz dt = \frac{\pi (c_m + c_e) \omega Y_0^2 \omega_c^4}{(1 - \omega_c^2)^2 + (2\zeta \omega_c)^2}$$
(3.3)

Όπου

$$\omega_c = \frac{\omega}{\omega_n}$$

Η μέση ισχύς είναι:

$$P_{av} = \frac{W}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{m\zeta Y_0^2 \omega^3 \omega_c^3}{[(1 - \omega_c^2)^2 + (2\zeta\omega_c)^2]}$$
(3.4)

Μέρος της παραπάνω ισχύος μεταφέρεται στο ηλεκτρικό σύστημα ως ισχύς εισόδου:

$$P_{in} = \frac{m\zeta_e Y_0^2 \omega^3 \omega_c^3}{\left[(1 - \omega_c^2)^2 + (2\zeta\omega_c)^2\right]}$$
(3.5)

Στο σχήμα 3.1, φαίνεται η μέση ισχύς ως προς τη συχνότητα για διαφορετικούς συντελεστές απόσβεσης όταν η φυσική συχνότητα $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$, είναι ίση με 10 Hz. Για χαμηλές τιμές συντελεστών απόσβεσης, υπάρχει μια μέγιστη τιμή της ισχύος εισόδου γύρω στις τιμές της φυσικής συχνότητας. Επομένως, όταν οι συχνότητες δονήσεων είναι συγκεντρωμένες γύρω από τη φυσική συχνότητα, ένας χαμηλός συντελεστής απόσβεσης μπορεί να αυξήσει εκτενώς την ενέργεια που δημιουργείται σε αυτό το σημείο. Όταν η βασική συχνότητα δόνησης ποικίλλει στο χρόνο και η φυσική συχνότητα είναι σταθερή, η μέγιστη τιμή που προκαλείται λόγω του χαμηλού συντελεστή απόσβεσης θα είναι σε στενά πλαίσια και ένα μεγάλο ποσοστό της ενέργειας δονήσεων σε άλλες συχνότητες θα απορριφθεί. Σε αυτήν την περίπτωση, ένας υψηλότερος συντελεστής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη διεύρυνση της εκμετάλλευσης της ενέργειας.



Σχήμα 3.1: Το φάσμα των συχνοτήτων της συνολικής μέσης ισχύος απωλειών

Το ιδανικό k για μεγιστοποίηση της ισχύος εισόδου σε στατικό σημείο $\frac{dP_{in}}{dk} = 0$ όταν το ζ είναι σταθερό:

$$k_{opt} = \frac{m\omega^2}{2\zeta^2 - 1 + \sqrt{(2\zeta^2 - 1)^2 + 3}}$$
(3.6)

Η ιδανική τιμή για το ζ_e για μεγιστοποίηση της ισχύος εισόδου σε στατικό σημείο $\frac{dP_{in}}{dk} = 0$ όταν το k είναι σταθερό φαίνεται παρακάτω:

$$\zeta_{eopt} = \sqrt{\frac{(1 - \omega_c^2)^2}{4\omega_c^2} + \zeta_m^2}$$
(3.7)

Αν το φάσμα των δονήσεων είναι γνωστό εκ των προτέρων, η συσκευή μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να αντιστοιχεί στην κύρια συχνότητα δονήσεων. Το ζ_e είναι μια συνάρτηση του R επομένως μπορεί να ρυθμιστεί επιλέγοντας κατάλληλα την αντίσταση του φορτίου. Έτσι, η ηλεκτρική ισχύς μεγιστοποιείται όταν ο σχεδιασμός των μηχανικών στοιχειών γίνεται ώστε το ζ_m να είναι όσο μικρότερο είναι δυνατό και να προσαρμόζει την αντίσταση ώστε να ισχύει $\zeta_e = \zeta_m$. Σε αυτήν την περίπτωση, η ισχύς εισόδου είναι μισή της συνολικής ισχύος που μετατρέπεται. Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1, υπάρχουν σημαντικές απώλειες αν υπάρχει ακόμα και μικρή διαφορά μεταξύ φυσικής συχνότητας και συχνότητας δονήσεων. Ενώ ένα σύστημα με ζυψηλότερης τιμής μπορεί να δώσει μεγαλύτερη ισχύ εξόδου, εν τέλει η ισχύς εξόδου πέφτει γρήγορα όσο οι δονήσεις απομακρύνονται από τη φυσική συχνότητα. Αυτό τονίζει την καθοριστική σημασία του σχεδιασμού μιας συσκευής ώστε να ταιριάζει στην κύρια συχνότητα δονήσεων. Σε κάποια περιβάλλοντα όπως σε πλοίο, όπου η κύρια συχνότητα δονήσεων αλλάζει μαζί με τις συνθήκες, είναι απαραίτητο να ρυθμιστεί η φυσική συχνότητα της συσκευής συγκομιδής.

Ένας τρόπος να αλλάξει η φυσική συχνότητα είναι να αλλάξει η σταθερά ελατηρίου. Για ελικοειδές ελατήριο με το φορτίο να είναι κατά μήκος του άξονα του ελατηρίου, η σταθερά του ελατηρίου δίνεται από:

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3n} \tag{3.8}$$

Όπου

d = διάμετρος καλωδίου D = μέση διάμετρος πηνίου

n = ενεργός αριθμός πηνίων G = βήμα ελαστικότητας

Με άλλες παραμέτρους να παραμένουν σταθερές, η σταθερά του ελατηρίου είναι αντίστροφα ανάλογη του αριθμού των πηνίων. Σε ελατήρια με προοδευτική λειτουργία, κάθε πηνίο τοποθετείται διαφορετικά και η σταθερά ελατηρίου τους αλλάζει. Στην ελεύθερη κατάσταση, είναι εύκολο να συμπιεστεί το ελατήριο για τα πρώτα εκατοστά. Όσο ασκούνται περισσότερες δυνάμεις τα τυλίγματα σε ένα πηνίο έρχονται πιο κοντά. Μετά από συγκεκριμένο σημείο, τα τυλίγματα στο υψηλότερο ¼ του πηνίου ξεκινάνε να ακουμπάνε το ένα στο άλλο και τελικά γίνονται ανενεργά, το οποίο κάνει το πηνίο πιο άκαμπτο. Εφαρμόζοντας πιο πολλές δυνάμεις στο ελατήριο μπορεί να κάνει τον αριθμό των ενεργών τυλιγμάτων στο πηνίο να μειώνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η σταθερά του ελατηρίου. Η ελαστικότητά του καθιστά πιο εύκολο να ρυθμίσεις τη φυσική συχνότητα των ηλεκτρομαγνητικών μετατροπέων παρά των ηλεκτροστατικών ή πιεζοηλεκτρικών. Κάπως έτσι, οι ηλεκτρομαγνητικοί μετατροπείς επιλέγονται διότι έχουν καλύτερη απόδοση από τα άλλα είδη μετατροπέων.



Σχήμα 3.2: Αποτύπωση του «προοδευτικού ελατηρίου»

Βασιζόμενοι στη σχέση 3.3, οι βασικές αρχές σχεδιασμού του συλλέκτη ενέργειας συνοψίζονται παρακάτω:

- Η ισχύς είναι γραμμικά ανάλογη με τη μάζα. Επομένως, ο συλλέκτης θα πρέπει να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή μάζα που είναι δυνατόν εντός των περιορισμών χώρου.
- Ο συντελεστής μηχανικής απόσβεσης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος.
- Ο συντελεστής ηλεκτρικής απόσβεσης όταν είναι ίσος με τον αντίστοιχο μηχανικής, η ηλεκτρική ισχύς εισόδου βελτιστοποιείται.
- Για δοσμένο πλάτος μετατόπισης, η ηλεκτρική ισχύς είναι ανάλογη με το τριπλάσιο της κύριας συχνότητας δονήσεων. Έτσι, η συσκευή θα πρέπει να τοποθετείται σε ένα σημείο υψηλής συχνότητας.
- Τέλος, η φυσική συχνότητα του συλλέκτη θα πρέπει να είναι κοντά στην κύρια συχνότητα δονήσεων.

3.1.2 Η Συσχέτιση της Ισχύος με τη σταθερά ελατηρίου και την αντίσταση

Ένας άλλος τρόπος να υπολογίσουμε την ισχύ εισόδου είναι να προσθέσουμε την ισχύ που καταναλώνεται στην αντίσταση του πηνίου και στην αντίσταση του φορτίου μαζί. Αμελώντας την επαγωγική αντίσταση, το σχήμα του απλοποιημένου κυκλώματος φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 3.3 : Απλοποιημένο ισοδύναμο μη λαμβάνοντας υπόψη την επαγωγική αντίσταση του πηνίου

Η μέση ισχύς εισόδου θα είναι:

$$P_{in} = \frac{I_0^2 R}{2}$$
(3.9)

Όπου

 I_0 είναι το πλάτος του I(s).Η τιμή του δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_0 = \frac{2mBNIY_0\omega^3}{\sqrt{R^2(k - m\omega^2)^2 + (c_mR + 4B^2N^2l^2)^2\omega^2}}$$
(3.10)

Συνδυάζοντας τις παραπάνω δύο σχέσεις προκύπτει:

$$P_{in} = \frac{2m^2 B^2 N^2 l^2 Y_0^2 \omega^6 R}{R^2 (k - m\omega^2)^2 + (c_m R + 4B^2 N^2 l^2)^2 \omega^2}$$
(3.11)

Η οποία έχει την ίδια μορφή με την εξίσωση (3.5) με την έκφραση $\frac{2N^2B^2l^2}{m\omega_n\zeta_e}$ να αντικαθιστά το R.

Η σχέση (3.11) είναι μια εξίσωση με δύο μεταβλητές: τα k και R. Η ιδανική τιμή του R ώστε να μεγιστοποιείται το P_{in} αποτυπώνεται στην παρακάτω σχέση:

$$R_{opt} = \frac{4B^2 N^2 l^2 \omega}{\sqrt{c_m^2 \omega^2 + (k - m\omega^2)^2}}$$
(3.12)

Η ιδανική τιμή για το k επιτυγχάνεται διαφορίζοντας την σχέση της ισχύος με τον παρακάτω τρόπο:

$$\frac{\partial P_{in}}{\partial k} = 0 \tag{3.13}$$

Η οποία μπορεί να απλοποιηθεί σε τέτοια μορφή:

$$k^{3} + k^{2}m\omega^{2}(3\zeta_{m}^{2} - 2) + km^{2}\omega^{4}(1 - 2\zeta_{m}^{2}) - m^{3}\omega^{6}\zeta_{m}^{2} = 0$$
(3.14)

Όπου $k < m\omega^2 (1 - 2\zeta_m^2)$

Η παραπάνω εξίσωση δεν μπορεί να λυθεί εύκολα με τα μέσα της άλγεβρας. Στο MATLAB με επιλεγμένες τιμές για τα m, ζ_m, r, B, N, l παίρνουμε ιδανικές τιμές για τα k, R_l, ζ_e για διαφορετικές συχνότητες δονήσεων όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Από αυτόν τον πίνακα φαίνεται ότι για μια δοσμένη τιμή του ζ_m , ισχύς μεγιστοποιείται όταν το ζ_e είναι κοντά στο ζ_m .

f	k _{opi}	$R_{l_{opt}}$	ζ_{copt}	P _{in_max}	f	k _{opi}	$R_{I_{aps}}$	P _{in_max}	Geope
(Hz)	(N/m)	(Ω)		(W)	(Hz)	(N/m)	(Ω)	(W)	
3	100	49.6	0.16	0.0617	12	1900	14.6	4.353	0.114
4	200	45.1	0.124	0.159	13	2200	13.2	5.544	0.116
5	300	33.4	0.134	0.304	14	2600	12.3	6.94	0.113
6	500	31.4	0.11	0.542	15	3000	11.3	8.536	0.113
7	700	26.2	0.11	0.846	16	3400	10.5	10.359	0.113
8	900	22.9	0.11	1.276	17	3800	9.7	12.417	0.114
9	1100	20.3	0.111	1.84	18	4300	9.1	14.749	0.113
10	1300	17.7	0.116	2.523	19	4800	8.5	17.347	0.113
11	1600	16.1	0.114	3.366	20	5300	8	20.231	0.113

Πίνακας 3.1: Ιδανικές τιμές k, $R_{\rm I}$ και ζ $_{\rm e}$ για διαφορετικές συχνότητες

Παρατηρήσεις:

 Το k_{opt} είναι ίσο με το μισό της λύσης της εξίσωσης (3.14) από τη στιγμή που υπάρχουν δύο ελατήρια στη γραμμική γεννήτρια.

Η παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται με συνθήκες μετατόπισης πλάτους $Y_1 = 5 mm$. Στην πραγματικότητα, η μετατόπιση του πλάτους γενικά μειώνεται αναλογικά με τη συχνότητα. Επιπλέον, το πλάτος της επιτάχυνσης πιο συχνά χρησιμοποιείται στο φάσμα της συχνότητας από ότι στο πλάτος μετατόπισης. Θεωρώντας ότι η φυσική συχνότητα της γραμμικής γεννήτριας ταιριάζει με την κύρια συχνότητα δονήσεων και ότι οι συντελεστές ηλεκτρικής και μηχανικής απόσβεσης είναι ίσοι, τα ελάχιστα πλάτη επιταχύνσεων σε κάθε συχνότητα ώστε να παράγουν τη βέλτιστη ισχύ μπορούν υπολογιστούν από την εξίσωση (3.5). Μπορούμε να δούμε από τον επόμενο πίνακα, ότι όσο το f αυξάνεται, ένα μεγαλύτερο πλάτος επιτάχυνσης χρειάζεται ώστε να παραχθεί ίση ποσότητα ισχύος. Επιπρόσθετα, η μηχανική απόσβεση είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή ισχύος και θα πρέπει να γίνει όσο το δυνατόν πιο μικρή για να επιτευχθεί καλύτερη λειτουργία [18].

f	$\zeta_m = 0.11$	$\zeta_{m} = 0.015$	f	$\zeta_m = 0.11$	ζ _m = 0.015
3	3.75	1.38	12	7.49	2.77
4	4.33	1.6	13	7.8	2.88
5	4.84	1.79	14	8.09	2.99
6	5.3	1.96	15	8.38	3.09
7	5.72	2.11	16	8.65	3.2
8	6.11	2.26	17	8.92	3.29
9	6.49	2.4	18	9.18	3.39
10	6.84	2.53	19	9.43	3.48
11	7.17	2.65	20	9.67	3.57

Πίνακας 3.2 : Ελάχιστες τιμές πλάτους επιτάχυνσης σε κάθε συχνότητα ώστε να παραχθεί η επιθυμητή τιμή ισχύος

3.1.3 Συσχέτιση μεταξύ Τάσης και Ισχύος εισόδου

Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.3, το πλάτος της επαγόμενης τάσης είναι:

$$V_i = I_0 R \tag{3.15}$$

Αντικαθιστώντας την σχέση (3.10) στη σχέση (3.15) παίρνουμε

$$V_{in} = (2mBNlY_0\omega^3) / \sqrt{(k - m\omega^2)^2 + \left(c_m + \frac{4B^2N^2l^2}{R}\right)^2 \omega^2}$$
(3.16)

Η ωμική αντίστασ
ηRμπορεί να αναπαρασταθεί ως προς το V_{in} ως εξής:

$$R = (2B^2 N^2 l^2 \omega) / \sqrt{\frac{4Y_0 m^2 \omega^6 B^2 N^2 l^2}{V_{in}} - (k - m\omega^2)^2 - c_m \omega}$$
(3.17)

Όπου

$$V_{in} < \frac{2Y_1 m \omega^3 BNl}{|m\omega^2 - k|}$$

Στη συνέχεια, το P_{in} μπορεί να αναπαρασταθεί ως προς V_{in} :

$$P_{in} = \frac{V_{in}^2}{2R} = \frac{V_0 \sqrt{4Y_0^2 m^2 \omega^6 B^2 N^2 l^2 - V_0^2 (k - m\omega^2)^2 - V_0^2 c_m \omega}}{8B^2 N^2 l^2 \omega}$$
(3.18)

Η σχέση μεταξύ του P_{in} και του V_{in} βασίζεται στη σχέση (3.18) για f = 10Hz, k = 1300N/m και απεικονίζεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.4: Ισχύς εισόδου ως προς Τάση εισόδου για f=10Hz, k=1300N/m, R=3:1:46 Ω

Η παραπάνω καμπύλη έχει ένα ξεκάθαρο μέγιστο σημείο. Μπορούμε να πάρουμε την αντίστοιχη τιμή του V_{in} διαφορίζοντας την σχέση (3.18) έτσι ώστε:

$$\frac{\partial P_{in}}{\partial V_{in}} = 0 \tag{3.19}$$

Το οποίο έχει ως αποτέλεσμα:

$$V_{in_{opt}} = \frac{\sqrt{2E}}{G} \sqrt{1 - \frac{c_m \omega}{\sqrt{G^2 + c_m^2 \omega^2}}} = \frac{\sqrt{2mY_0 \omega^3 BNl}}{|m\omega^2 - k|} \sqrt{1 - \frac{c_m \omega}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c_m^2 \omega^2}}}$$
(3.20)

Όπου

$$V_{in_{opt}} < \frac{2E}{G} = \frac{2Y_1 m\omega^3 BNl}{|m\omega^2 - k|}, E = Y_1 m\omega^3 BNl, G = |k - m\omega^2|$$

Η μέγιστη ισχύς εισόδου είναι:

$$P_{in_{max}} = \frac{Y_0^2 m^2 \omega^5}{4G^2} \left(\sqrt{G^2 + c_m^2 \omega^2} - c_m \omega \right)$$
(3.21)

Χρησιμοποιώντας θεωρητικές τιμές για το k από το σχήμα 3.4, μπορούμε να επιτύχουμε μέγιστη τιμή ισχύος εισόδου και αντίστοιχη ιδανική τάση εισόδου για διάφορες συχνότητες εισόδου.

Η σχέση μεταξύ P_{in} και V_{in} αποδεικνύει ότι μπορεί να επιτευχθεί μέγιστη ισχύς εισόδου διατηρώντας την επαγόμενη τάση στην ιδανική της τιμή. Αυτή η ιδέα μπορεί να υλοποιηθεί σε ένα κύκλωμα χωρητικού φορτίου ρυθμίζοντας τον κύκλο λειτουργίας ενός μετατροπέα DC-DC.

3.1.4 Ανάλυση της Μέγιστης Ισχύος Εξόδου

Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.5, η μέση ισχύς εξόδου σε ωμικό φορτίο είναι:

$$P_{out} = P_{in} - \frac{P_{in}r}{R} = P_{in} \left(1 - \frac{r}{R}\right)$$
(3.22)

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (3.17) και (3.18) στην (3.22), παίρνουμε:

$$P_{out} = \frac{V_{in}^2 \left(\sqrt{\frac{4E^2}{V_{in}^2} - G^2} - c\omega \right)}{8B^2 N^2 l^2 \omega} \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{4E^2}{V_{in}^2} - G^2} - c\omega}{4B^2 N^2 l^2 \omega} r \right)$$
(3.23)

Η συσχέτιση μεταξύ του P_{out} και του V_{in} βασιζόμενη στην εξίσωση (3.23) με σταθερά k αναπαρίσταται στο σχήμα 3.7



Σχήμα 3.5: P_{out} , P_{in} ως προς V_{in} όταν f=10Hz, k=1300N/m, $R_i \in [1, 44]$ Ω

Στο σχήμα 3.7, η τιμή του V_{in} που αντιστοιχεί στη μέγιστη P_{out} είναι μεγαλύτερη από αυτήν που αντιστοιχεί στη μέγιστη P_{in} . Ο λόγος είναι ότι παρόλο που το P_{in} ξεκινά να μειώνεται αφού φτάσει το μέγιστο, ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας $1 - \frac{r}{R}$ συνεχίζει να αυξάνεται όσο αυξάνεται το R_i . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το P_{out} να συνεχίσει να αυξάνεται μέχρι το V_{in} να φτάσει μια συγκεκριμένη τιμή η οποία κάνει το αποτέλεσμα της αύξησης του πολλαπλασιαστικού παράγοντα να εξισορροπείται με το αποτέλεσμα της μείωσης της P_{in} . Αυτή η τιμή θα είναι στο σημείο ισορροπίας $\frac{\partial P_{out}}{\partial V_{in}} = 0$.

Όπως μπορούμε να δούμε από τη σχέση: $\zeta_e = \frac{2N^2B^2l^2}{m\omega_nR}$, αυξάνοντας το R_l μειώνεται το ζ_e . Στη συνέχεια, η τιμή του ζ_e που αντιστοιχεί στη μέγιστη P_{out} θα είναι μικτρότερη από αυτήν που αντιστοιχεί στην μέγιστη P_{in} . Επιπλέον, όπως φαίνεται από τη σχέση 3.6 μικρότερη τιμή του ζ_e απαιτεί μεγαλύτερη τιμή του k_{opt} . Στη συνέχεια, αφού το σύστημα φτάνει το σημείο μέγιστης ισχύος εισόδου, τα k και R_l χρειάζονται αύξηση ώστε να επιτευχθεί σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου.

Από τη στιγμή που είναι αρκετά δύσκολο να εξάγουμε σχέση που θα δίνει την ιδανική V_{in} για μέγιστη P_{out} από την εξίσωση 3.23, ο συντομότερος τρόπος για να έχουμε μέγιστη P_{out} είναι αρχικά να βρούμε το ιδανικό k και R_l στο σχήμα 3.4 για συγκεκριμένη συχνότητα δονήσεων. Στη συνέχεια, αυξάνουμε το k μέχρι να φτάσουμε ένα τοπικό μέγιστο. Τέλος, κρατώντας σταθερό το ιδανικό k ξεκινάμε να αυξάνουμε το R_l μέχρι η P_{out} να φτάσει ένα άλλο μέγιστο σημείο. Αυτό το σημείο μέγιστης ισχύος καταλήγει να αποδεικνύεται το ολικό μέγιστο που αναζητούμε.

3.1.5 Σύνοψη

Παραπάνω περιγράφεται η βελτιστοποίηση των παραμέτρων με στόχο τη μέγιστη ισχύ. Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου μπορεί να εκτιμηθεί στο περίπου με δοσμένα μόνο το πλάτος και τη συχνότητα των δονήσεων. Η βασικές αρχές του σχεδιασμού των συλλεκτών έχουν στηριχθεί στην εξίσωση που συνδέει τα παραπάνω μεγέθη. Μετά την κατασκευή του συλλέκτη, για ωμικό φορτίο οι μόνες παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν είναι το k και το R_f.

Η συσχέτιση μεταξύ της επαγόμενης τάσης εισόδου και της ισχύος εισόδου βασίζεται στις βελτιστοποιημένες σχέσεις των k και R_f . Έχει επιβεβαιωθεί ότι η καμπύλη $P_{in} - V_{in}$ είναι κυρτή και η ιδανική τιμή της V_{in} δεν επηρεάζεται από την αντίσταση του φορτίου. Μπορεί να επηρεαστεί από άλλες παραμέτρους του κυκλώματος ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη ισχύς. Παρόλου που οι βελτιστοποιημένες εκφράσεις των k, R_f και V_{in} έχουν σχηματιστεί ως προς το P_{in} , οι σχέσεις ταιριάζουν και για την ισχύ εξόδου. Επίσης, οι διαφορές μεταξύ των δυο σετ βελτιστοποιημένων τιμών είναι μικρές. Μπορούμε να αυξήσουμε περισσότερο τις συγκεκριμένες τιμές ώστε να πετύχουμε τη μέγιστη ισχύ εξόδου αφότου έχουμε πετύχει τη μέγιστη τιμή της ισχύος εισόδου.

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4⁰ - Κύκλωμα διαχείρισης Ισχύος

Η παραπάνω ανάλυση γίνεται για περιπτώσεις απλού ωμικού φορτίου. Παρόλα αυτά, ένα χωρητικό φορτίο είναι πολύ πιο κοντά σε ένα πραγματικό ηλεκτρικό φορτίο σε σχέση με ένα ωμικό. Λόγω της σχέσης Ισχύος – Τάσης εισόδου, η επαγόμενη τάση θα πρέπει να ανορθώνεται και να ρυθμίζεται από ηλεκτρονικά ισχύος σε μια ιδανική τιμή ώστε να φορτίζει με τον καλύτερο τρόπο ένα υπερπυκνωτή. Για τη μετατροπή εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές χρησιμοποιείται γέφυρα πλήρους ανόρθωσης με χωρητικό φίλτρο. Έτσι, τοποθετείται ένας μετατροπέας DC-DC ελεγχόμενος από PWM μεταξύ της ανορθωμένης εξόδου και του υπερπυκνωτή ώστε να εξασφαλίσει τη διατήρηση της ιδανικής τάσης μέσω του ελέγχου του κύκλου της.

4.1 Γέφυρα πλήρους ανόρθωσης

Μια γέφυρα πλήρους ανόρθωσης είναι ένα κύκλωμα που μετατρέπει εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή παλμική τάση χρησιμοποιώντας τις μισές περιόδους της εφαρμοζόμενης εναλλασσόμενης τάσης. Χρησιμοποιεί τέσσερις διόδους από τις οποίες οι δύο άγουν κατά τη διάρκεια του μισού κύκλου ενώ οι άλλες δύο στον υπόλοιπο μισό. Έτσι, το ρεύμα που περνάει σε κάθε μισό κύκλο μένει στην ίδια φορά. Μετά την ανόρθωση, το φορτίο έχει μεγάλη διακύμανση τάσης σε σχέση με τη μέση. Ένας πυκνωτής που χρησιμοποιείται για αντιστάθμιση παράλληλα με το φορτίο χρειάζεται ώστε να εξισορροπήσει τις διαφοροποιήσεις των παλμών.

Το κύκλωμα της γέφυρας πλήρους ανόρθωσης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.1



Σχήμα 4.1: Κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης με χωρητικό φίλτρο



Σχήμα 4.2: Φιλτραρισμένη τάση στην έξοδο του κυκλώματος πλήρους ανόρθωσης

Στη χρονική περίοδο μεταξύ T_0 και T_1 οι δίοδοι D_1 και D_2 είναι ορθά πολωμένες επειδή η τάση που δίνεται από την πηγή είναι υψηλότερης τιμής από αυτήν του πυκνωτή. Ο πυκνωτής φορτίζεται και η τάση του φορτίου αυξάνεται. Στη χρονική περίοδο $T_1 - T_2$, οι δίοδοι D_1 , D_3 είναι ανάστροφα πολωμένες επειδή η τάση πηγής αρχίζει να μειώνεται αφού έφτασε τη μέγιστη τιμή της με αποτέλεσμα να είναι μικρότερη από αυτήν του πυκνωτή. Ο πυκνωτή. Ο πυκνωτή. Η τάση του φορτίου κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης είναι [19]:

$$V_{out}(t) = V_{max} e^{-\frac{t - T_1}{R_l C}}$$
(4.1)

Όπου

$$R_{l} = \alpha ν \tau ίσταση φορτίου (Ω)$$
$$C = \chi ωρητικότητα (F)$$
$$V_{max} = πλάτος τάσης πηγής$$

Η τάση peak to peak είναι

$$V_{pp} = V_{out}(T_1) - V_{out}(T_2) = V_{max} \left(1 - e^{-\frac{T_2 - T_1}{R_l C}} \right) \cong \frac{V_{max}(T_2 - T_1)}{R_l C}$$
(4.2)

 $(R_l C \gg T_2 - T_1)$

Όσο ισχύει $T_2 - T_1 \sim \frac{T}{2}$, όπου T είναι η περίοδος της τάσης της πηγής, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως :

$$V_{pp} = \frac{V_{max}}{2fR_lC} \tag{4.3}$$

Υποθέτοντας ότι η συχνότητα της τάσης πηγής είναι 6 Hz και η πτώση στο 5% της μέγιστης τιμής, μπορούμε να πάρουμε έτοιμες τιμές για τις άλλες παραμέτρους στην παραπάνω εξίσωση.

Για $V_{max} = 6.3V$, $R_l = 35\Omega$, η υπολογιζόμενη χωρητικότητα είναι 0.05 F.

4.2 Μετατροπέας DC-DC

Ένας μετατροπέας DC-DC είναι ένας «ρυθμιστής» που δέχεται μια είσοδο συνεχούς τάσης και παράγει μια συνεχή τάση εξόδου ίδιας ή ανάστροφης πολικότητας. Η τάση εξόδου είναι σε διαφορετική τιμή από αυτήν της εισόδου. Η βασική αρχή λειτουργίας αυτού του ρυθμιστή είναι μια διακοπτική λειτουργία που έχει στόχο να πετυχαίνει μικρότερη ή μεγαλύτερη μέση τάση στην έξοδο.

Στα συστήματα στα οποία αναφερόμαστε η παρουσία μετατροπέων dc-dc είναι καθοριστική διότι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της εξόδου συνήθως διαφέρουν σημαντικά από τις προδιαγραφές χαρακτηριστικών εισόδου για τα περισσότερα ηλεκτρονικά συστήματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καθίσταται απαραίτητη η χρήσης μιας διάταξης που θα προσφέρει σταθερή και επαρκή τάση στην έξοδο του για την τροφοδοσία του αποθηκευτικού μέσου.

Υπάρχουν 2 βασικές κατηγορίες μετατροπέων. Οι γραμμικοί μετατροπείς οι οποίοι είναι χρήσιμοι μόνο για υποβιβασμό τάσης και σχετικά μεγάλη κατανάλωση και οι μετατροπείς διακοπτικής λειτουργίας οι οποίοι πρακτικά αποτελούν το μονόδρομο για τις εφαρμογές που πραγματεύεται η παρούσα εργασία.

Οι διακοπτικοί μετατροπείς DC-DC με τη σειρά τους χωρίζονται σε 2 κατηγορίες με βάση το στοιχείο που χρησιμοποιούν για την προσωρινή αποθήκευση ενέργειας. Υπάρχουν η κατηγορία που χρησιμοποιεί πυκνωτές (Switched Capacitor Charge Pumps) και η κατηγορία που χρησιμοποιεί πηνία (Inductor based DC-DC converters).

Οι διακυμάνσεις της τάσης εξόδου που προκαλούνται από τη διακοπτική λειτουργία φιλτράρονται από ένα στοιχείο *LC*. Ο συγκεκριμένος τύπος μετατροπέα είναι προτιμότερος επειδή δεν έχει τόσες απώλειες. Ένας μετατροπέας DC-DC έχει τρεις λειτουργίες: υποβάθμισης, αναβάθμισης και διπλή. Στην πρώτη περίπτωση μειώνει

την τάση εισόδου, στη δεύτερη την αυξάνει ενώ και οι δύο διατηρούν την ίδια πολικότητα. Στην τρίτη περίπτωση λειτουργίας είτε αυξάνεται είτε μειώνεται το πλάτος της τάσης εισόδου και αντιστρέφεται η πολικότητα [20].

4.2.1 Μετατροπείς DC-DC με πυκνωτές, αντλίες φορτίου

Στα κυκλώματα αυτά η ενέργεια μεταφέρεται από την είσοδο από έναν πυκνωτή σε άλλους μέχρι να φτάσει στον πυκνωτή που βρίσκεται στην έξοδο του κυκλώματος. Η μεταφορά αυτή πραγματοποιείται μέσω διακοπτών που αλλάζουν την τοπολογία του κυκλώματος συνδέοντας άλλους πυκνωτές παράλληλα και άλλους σε σειρά και με αυτόν τον τρόπο το κύκλωμα μπορεί είτε να αυξάνει την τάση που παίρνει στην είσοδο (step up conversion) είτε να τη μειώνει (step down conversion).

Αρχικά ο διακόπτης 1 κλείνει και φορτίζει τον πυκνωτή CT (charge bucket) στην τάση εισόδου ενώ στη δεύτερη φάση ο 1 ανοίγει και κλείνει ο 2 με αποτέλεσμα ο CL και ο CT να ισορροπούν στην τάση. Η σχέση που ακολουθεί προκύπτει από την αρχή διατήρησης του φορτίου.

$$V = \frac{C_T V_T + C_L V_L}{C_T + C_L}$$



Σχήμα 4.3: Ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικού μετατροπέα DC-DC

Τοποθετώντας επιπλέον διακόπτες σε διαφορετικές θέσεις και επιπλέον πυκνωτές μπορούμε να πετύχουμε πολλές εναλλακτικές συνδεσμολογίες με τις οποίες μπορούμε ακόμα και να επιτύχουμε τάσεις εξόδου μεγαλύτερες του Vin.



Σχήμα 4.4: Ισοδύναμο αντλίας φορτίου με δυνατότητα step -up conversion

Η παραπάνω διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως step up converter. Οι διακόπτες υλοποιούνται ως transistors και ελέγχονται ψηφιακά. Στην περίπτωση που έχουμε την κατάσταση SW1 = SW4 = ON & SW2 = SW3 = OFF και την αντιστρέφουμε τότε ο C1 φορτίζεται αρχικά σε τάση Vin και στη συνέχεια συνδέεται σε σειρά με την πηγή και παράλληλα με τον C2 με αποτέλεσμα τη φόρτιση του C2 σε κάποια τάση μεγαλύτερη της Vin (step up conversion).

4.2.2 Μετατροπείς DC-DC με πηνίο

Στους μετατροπείς αυτούς η είσοδος συνδέεται με ένα κύκλωμα που περιέχει κάποιο πηνίο και η ενέργεια από την πηγή αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο του. Σε ένα ιδανικό κύκλωμα χωρίς παρασιτικές αντιστάσεις το ρεύμα του πηνίου αυξάνεται γραμμικά και σε κάποια στιγμή οι διακόπτες του μετατροπέα αλλάζουν τη συνδεσμολογία και εκφορτίζουν το πηνίο προς την έξοδο του κυκλώματος. Οι χρόνοι αύξησης και μείωσης του ρεύματος πηνίου αποτελούν σημαντικές παραμέτρους της λειτουργίας του κυκλώματος αυτού και ο έλεγχός τους επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο του κέρδους του μετατροπέα. Ανάλογα με τις συνδεσμολογίες που μπορούν να δημιουργηθούν το κύκλωμα μπορεί είτε να ανεβάζει την τάση που παίρνει στην είσοδο (step up conversion) είτε να τη μειώνει (step down conversion).



Σχήμα 4.5: Παράδειγμα buck converter (step down). Η λειτουργία του θα μπορούσε να παρομοιαστεί με αυτήν ενός κυκλώματος με φίλτρο LC και είσοδο PWM.

Έχουν γίνει συγκριτικές μελέτες των δύο κατηγοριών μετατροπέων [21] και στη συνέχεια θα παρατεθούν οι παρατηρήσεις που έγιναν καθώς και μία σύνοψη των θετικών και των αρνητικών του κάθε τύπου μετατροπέα.



Σχήμα 4.6: Ενδεικτικό διάγραμμα απόδοσης boost converter σε σχέση με την τάση ανοιχτού κυκλώματος συνδεδεμένης ΘΗΓ. Το πηνίο των 215 nH είναι ολοκληρωμένο [21].

Πλεονεκτήματα χωρητικών DC-DC μετατροπέων

- Μπορούν να υλοποιηθούν πλήρως ως ολοκληρωμένο κύκλωμα εφόσον αυτό είναι επιθυμητό και συνεπώς να έχουν μικρές διαστάσεις και υπό προϋποθέσεις μικρό κόστος.
- Δεν παρουσιάζουν έντονα προβλήματα με ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- Έχουν σχετικά καλή απόδοση για τις περισσότερες εφαρμογές (φτάνουν εύκολα μέχρι και το 90%).
- Απότομη αύξηση ρεύματος τη στιγμή της παράλληλης σύνδεσης δύο πυκνωτών που η τάση στα άκρα τους διαφέρει σημαντικά.

- Για μεγάλους λόγους μετατροπής χρησιμοποιούνται μετατροπείς πολλών σταδίων. Τα πολλά στάδια μεταφράζονται σε επιπλέον διακόπτες και απώλειες.
- Το πόσο λεπτομερής θα είναι η ρύθμιση του κέρδους εξαρτάται από τον τρόπο κατασκευής, το πλήθος και τα μεγέθη των πυκνωτών. Επιπλέον ανάλυση σημαίνει και πιο πολύπλοκο κύκλωμα.
- Χαμηλό μέσο ρεύμα και ισχύς εξόδου. Αύξηση με επιλογή μεγαλύτερης συχνότητας λειτουργίας που συνεπάγεται και μεγαλύτερες απώλειες.

<u>Πλεονεκτήματα DC-DC μετατροπέων με πηνίο</u>

- Μπορούν να υλοποιηθούν πλήρως ως ολοκληρωμένο κύκλωμα αλλά ο χαμηλός συντελεστής ποιότητας των ολοκληρωμένων πηνίων τους καθιστά κακή επιλογή.
- Οι εκδόσεις με μη ολοκληρωμένα πηνία μπορούν να επιτύχουν μεγάλες αποδόσεις (ως και πάνω από 95%).
- Το ρεύμα αυξάνεται κατά προσέγγιση γραμμικά κατά τη σύνδεση της πηγής με το κύκλωμα.
- Σταθερή σχεδόν απόδοση για όλους τους λόγους $V_{out}/V_{in.}$
- Η ρύθμιση του κέρδους γίνεται με την κατάλληλη επιλογή των χρόνων που αντιστοιχούν σε αύξηση και μηδενισμό του ρεύματος πηνίου. Συνεπώς μπορεί να γίνει με αρκετή ακρίβεια και χωρίς σημαντική αύξηση της πολυπλοκότητας
- Μεγαλύτερο μέσο ρεύμα και ισχύς εξόδου.

Το γεγονός λοιπόν ότι απαιτούμε υψηλή απόδοση για μεγάλο εύρος τάσεων εισόδου σημαίνει ότι η καλύτερη λύση είναι η χρήση DC-DC μετατροπέα με μη ολοκληρωμένο πηνίο.

4.2.3 Μετατροπείς αναβάθμισης τάσης (boost converters)

Για τις περιπτώσεις όπου απαιτείται λόγος μετατροπής μεγαλύτερος του 1 μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν boost converter.



Σχήμα 4.7: Τυπικό κύκλωμα μετατροπέα αναβάθμισης τάσης (boost converter)

Σύνοψη τρόπου λειτουργίας του μετατροπέα:

- Ο διακόπτης κλείνει και το ρεύμα πηνίου i_L αυξάνεται. Η αύξηση είναι γραμμική εφόσον αγνοήσουμε τις παρασιτικές αντιστάσεις.
- 2. Όταν η τιμή του ρεύματος φτάσει την επιθυμητή (επιθυμητό ποσό ενέργειας αποθηκευμένο στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου) ο διακόπτης ανοίγει. Το πηνίο αντιδρά στην απότομη διακοπή του ρεύματος δημιουργώντας τάση στα άκρα του βάσει της σχέσης $V_L = L \frac{di_L}{dt}$ με αποτέλεσμα τη δημιουργία αρνητικής τάσης στα άκρα του. Στην προκειμένη περίπτωση θα ισχύει $V_L = V_{in} V_{out}$. Το αποτέλεσμα είναι η τάση στο σημείο ανάμεσα στη δίοδο και το πηνίο ($V_S V_L$) να αυξάνεται μέχρι να ξεπεράσει την τιμή $V_O + V_D$ (V_D : πτώση τάσης ορθά πολωμένης διόδου) και να αρχίσει να ρέει το ρεύμα δια της διόδου προς το φορτίο.
- 3. Το ρεύμα του πηνίου μειώνεται καθώς αυτό δίνει την ενέργεια που έχει αποθηκευμένη στο μαγνητικό πεδίο του και μετά από λίγο χρόνο ο διακόπτης αλλάζει και πάλι κατάσταση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 1.

Η κατάσταση του πηνίου τη στιγμή της αλλαγής της κατάστασης του διακόπτη καθορίζει το αν ο μετατροπέας βρίσκεται σε λειτουργία συνεχούς ή ασυνεχούς αγωγής (Continuous Conduction Mode και Discontinuous Conduction Mode). Στην πρώτη περίπτωση το πηνίο διαρρέεται ακόμα από ρεύμα τη στιγμή που ο διακόπτης ξανακλείνει. Στη δεύτερη περίπτωση το πηνίο έχει εκφορτιστεί πλήρως τη στιγμή της αλλαγής κατάστασης του διακόπτη.

Προσεγγίσεις για την ανάλυση λειτουργίας του μετατροπέα:

- 1. Ο πυκνωτής εξόδου είναι αρκετά μεγάλος ώστε να μπορούμε να αγνοήσουμε τη μεταβολή της τάσης του ανά κύκλο.
- 2. Μία περίοδος $T_S = (D_1 + D_2 + D_3)T_S$, όπου D_1 το ποσοστό της περιόδου όπου το πηνίο φορτίζεται, D_2 το ποσοστό της περιόδου για το οποίο το

πηνίο εκφορτίζεται, D_3 το ποσοστό της περιόδου για το οποίο το πηνίο δε διαρρέεται από ρεύμα.

Από τη σχέση που συνδέει την τάση πηνίου με το ρυθμό μεταβολής του ρεύματός του προκύπτει ότι:

$$V_L \Delta T = L \Delta I_L \tag{4.4}$$

Στην κατάσταση ισορροπίας με σταθερό φορτίο το ΔI_L^+ (φόρτιση πηνίου για χρόνο $D_1 T_s$) θα πρέπει να είναι ίσο κατ' απόλυτη τιμή και αντίθετο με το ΔI_L^- (μείωση ρεύματος πηνίου για χρόνο $D_2 T_s$). Συνεπώς θα ισχύει:

$$V_L^+ D_1 = -V_L^- D_2 \tag{4.5}$$

Στην περίπτωση του Boost Converter και λαμβάνοντας υπόψη τις προσεγγίσεις που κάναμε νωρίτερα θα έχουμε $V_L^+ = V_S$ και $V_L^- = V_S - V_O - V_D$ και τελικά ο λόγος μετατροπής προκύπτει:

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{D_1 + D_2}{D_2} - \frac{V_D}{V_S}$$
(4.6)

Για ιδανική δίοδο θα έχουμε:

 $Για CCM (D_1+D_2=1)$

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{1 - D_1} \tag{4.7}$$

Για DCM (D₃>0) το πρόβλημα περιπλέκεται καθώς το $\frac{V_O}{V_S} = \frac{D_1 + D_2}{D_2}$ σε αυτήν την περίπτωση έχει άπειρες λύσεις από τις οποίες όμως δεν ισχύουν όλες σε κατάσταση ισορροπίας. Για να βρούμε τη μοναδική λύση πρέπει να αξιοποιήσουμε και την πληροφορία για το μέσο ρεύμα.

Το μέσο ρεύμα εξόδου προς τον πυκνωτή και το φορτίο υπολογίζεται ως εμβαδό τριγώνου (ύψος το μέγιστο ρεύμα πλάτος η χρονική διάρκεια φόρτισης):

$$I_{O} = \frac{\left(\frac{D_{1}T_{S}V_{L}^{+}}{2L}\right)D_{2}T_{S}}{T_{S}}$$
(4.8)

$$I_{O} = \frac{D_{1} D_{2} V_{S} T_{S}}{2L}$$
(4.9)

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση για το λόγο μετατροπής προκύπτει:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4D_1^2}{K}\right)}}{2}$$
(4.10)

Με
$$K = \frac{2L}{R_{LOAD}T_S}$$
 όταν $I_O = V_O/R_{LOAD}$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο λόγος μετατροπής του μετατροπέα σε DCM εξαρτάται και από το φορτίο, κάτι που δε συμβαίνει με τους μετατροπείς που λειτουργούν σε CCM. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να έχουμε κάποιου είδους ανάδραση στα συστήματα DCM χωρίς σταθερό φορτίο μέσω τις οποίας να αλλάζει η τιμή του D1. Αυτό που πρέπει ωστόσο να προσέχουμε με τους μετατροπείς CCM είναι να μην οδηγηθούν σε κατάσταση DCM. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν $\Delta I_L > I_{Lpc}$.

Ο περιορισμός που εγγυάται τη λειτουργία CCM είναι:

$$L_{CCM} > \frac{D_1 (1 - D_1)^2 R_{LOAD} T_S}{2}$$
(4.11)

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι ένας μετατροπέας που δουλεύει σε CCM έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε μέγεθος πηνίου ωστόσο είναι πολύ πιο απλός ο έλεγχος του κέρδους και στέλνει συνεχώς ισχύ προς το φορτίο. Αυτά τα χαρακτηριστικά τον κάνουν γενικά αποδοτικότερο από τους μετατροπείς που δουλεύουν σε DCM. Ωστόσο η χρήση μετατροπέων που λειτουργούν σε CCM δεν επιτρέπει τη χρήση ενός κοινόχρηστου πηνίου από μετατροπείς που αξιοποιούν ενέργεια από πολλαπλές πηγές γεγονός και συνεπώς η λειτουργία DCM για το σύστημά μας είναι μονόδρομος.

4.2.4 Μετατροπείς υποβάθμισης τάσης (buck converters)

Για τις περιπτώσεις όπου απαιτείται λόγος μετατροπής μικρότερος του 1 μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν buck converter.



Σχήμα 4.8 (α): Ο τυπικός μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (buck converter).



Σχήμα 4.4 (β): Κύκλωμα ενός buck converter μετά από ανόρθωση πλήρους γέφυρας.

Σύνοψη τρόπου λειτουργίας του μετατροπέα:

- Ο διακόπτης κλείνει και το ρεύμα πηνίου i_L (το οποίο οδηγείται και στο φορτίο) αυξάνεται. Η αύξηση είναι γραμμική εφόσον αγνοήσουμε τις παρασιτικές αντιστάσεις.
- 2. Όταν η τιμή του ρεύματος φτάσει την επιθυμητή (επιθυμητό ποσό ενέργειας αποθηκευμένο στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου) ο διακόπτης ανοίγει. Το πηνίο αντιδρά στην απότομη διακοπή του ρεύματος δημιουργώντας τάση στα άκρα του βάσει της σχέσης $V_L = L \frac{di_L}{dt}$ με αποτέλεσμα τη δημιουργία αρνητικής τάσης στα άκρα του. Το αποτέλεσμα είναι η τάση στο σημείο ανάμεσα στη δίοδο και το πηνίο (VO-VL) να μειώνεται μέχρι να πέσει κάτω από την τιμή -V_D και να αρχίσει να ρέει το ρεύμα δια της διόδου από τη γη προς το φορτίο.
- 3. Το ρεύμα του πηνίου μειώνεται καθώς αυτό δίνει την ενέργεια που έχει αποθηκευμένη στο μαγνητικό πεδίο του και μετά από λίγο χρόνο ο διακόπτης αλλάζει και πάλι κατάσταση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 1.

Οι εξισώσεις για τον Buck Converter βγαίνουν με την ίδια λογική με την οποία βγήκαν και οι εξισώσεις για τον Boost. Οι σχέσεις που προκύπτουν είναι οι παρακάτω:

Για ιδανική δίοδο θα έχουμε:

Για CCM (D1+D2 = 1)

$$\frac{V_O}{V_S} = D_1 \tag{4.12}$$

Για DCM (D₃>0)

$$\frac{V_O}{V_S} = 2/\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4K}{D_1^2}}\right)$$
(4.13)

Με $K = \frac{2L}{R_{LOAD}T_S}$ όταν $I_O = \frac{V_O}{R_{LOAD}}$ Και η ελάχιστη αυτεπαγωγή για λειτουργία σε CCM:

$$L_{CCM} > \frac{(1 - D_1)R_{LOAD}T_S}{2}$$
(4.14)

4.2.5 Μετατροπείς αναβάθμισης-υποβάθμισης τάσης (buck-boost converters)

Για τις περιπτώσεις που θέλουμε να μπορούμε να κάνουμε και step-up και stepdown μετατροπή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν buck-boost converter.



Σχήμα 4.9: Ο τυπικός μετατροπέας αναβάθμισης-υποβάθμισης τάσης (buck-boost converter).

Σύνοψη τρόπου λειτουργίας του μετατροπέα:

- Ο διακόπτης κλείνει και το ρεύμα πηνίου i_L αυξάνεται. Η αύξηση είναι γραμμική εφόσον αγνοήσουμε τις παρασιτικές αντιστάσεις.
- 2. Όταν η τιμή του ρεύματος φτάσει την επιθυμητή (επιθυμητό ποσό ενέργειας αποθηκευμένο στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου) ο διακόπτης ανοίγει. Το πηνίο αντιδρά στην απότομη διακοπή του ρεύματος δημιουργώντας τάση στα άκρα του βάσει της σχέσης $v_L = L \frac{di_L}{dt}$ με αποτέλεσμα τη δημιουργία αρνητικής τάσης στα άκρα του. Το αποτέλεσμα είναι η τάση στο σημείο

ανάμεσα στη δίοδο και το πηνίο (V_0 - V_L) να μειώνεται μέχρι να πέσει κάτω από την τιμή V_0 - V_D και να αρχίσει να ρέει το ρεύμα δια της διόδου με φορά όμως η οποία να δημιουργεί αρνητική V_0 .

3. Το ρεύμα του πηνίου μειώνεται καθώς αυτό δίνει την ενέργεια που έχει αποθηκευμένη στο μαγνητικό πεδίο του και μετά από λίγο χρόνο ο διακόπτης αλλάζει και πάλι κατάσταση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 1.

Το γεγονός ότι η παραπάνω συνδεσμολογία παράγει στην έξοδο τάση αντίθετου προσήμου μειώνει τη χρησιμότητα της. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος υπάρχουν εναλλακτικές τοπολογίες όπως ο μετατροπέας SEPIC ο οποίος όμως απαιτεί τη χρήση δύο πηνίων και επιπλέον πυκνωτή. Αυτές οι επιπλέον απαιτήσεις σε ογκώδη στοιχεία καθιστούν και αυτή τη λύση όχι και τόσο ελκυστική. Η καλύτερη λύση είναι αυτή του σύγχρονου buck-boost converter.



Σχήμα 4.10: Single Ended Primary Inductor Converter (SEPIC).



Σχήμα 4.11: Σύγχρονος Buck-Boost μετατροπέας 4 διακοπτών

Σύνοψη τρόπου λειτουργίας του μετατροπέα:

 Αρχικά κλειστοί είναι οι διακόπτες S₁ και S₄ και το ρεύμα πηνίου i_L αυξάνεται. Η αύξηση είναι γραμμική εφόσον αγνοήσουμε τις παρασιτικές αντιστάσεις.

- 2. Όταν η τιμή του ρεύματος φτάσει την επιθυμητή (επιθυμητό ποσό ενέργειας αποθηκευμένο στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου) οι S₁ και S₄ ανοίγουν και οι S₃ και S₂ κλείνουν. Στιγμιαία η τάση στον κόμβο ανάμεσα στο πηνίο και τον S₂ είναι χαμηλότερη από την τάση εξόδου. Η διαφορά δυναμικού στα άκρα του διακόπτη θα προκαλούσε ροή του ρεύματος προς την αντίθετη κατεύθυνση. Το πηνίο ωστόσο αντιδρά σε αυτή τη "σύγκρουση" δημιουργώντας τάση στα άκρα του βάσει της σχέσης $v_L = L \frac{di_L}{dt}$ με αποτέλεσμα τη δημιουργία αρνητικής τάσης στα άκρα του. Το αποτέλεσμα είναι η τάση στο σημείο ανάμεσα στον S₂ και το πηνίο αυξηθεί μέχρι το σημείο (λίγο πάνω από το V₀) που να μπορεί ρέει το ρεύμα πηνίου προς το φορτίο μέσω του διακόπτη.
- 3. Το ρεύμα του πηνίου μειώνεται καθώς αυτό δίνει την ενέργεια που έχει αποθηκευμένη στο μαγνητικό πεδίο του και μετά από λίγο χρόνο οι διακόπτες αλλάζουν και πάλι κατάσταση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 1.

Ο λόγος μεταβολής προκύπτει:

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{D_1}{D_2}$$
 (4.15)

 $Για CCM (D_1+D_2=1)$

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{D_1}{1 - D_1} \tag{4.16}$$

Για DCM (D₃>0)

Και από τη σχέση για το ρεύμα:

$$I_O = \frac{V_O}{R} = \frac{D_1 D_2 V_S T_S}{2L}$$
(4.17)

Προκύπτει ο περιορισμός:

$$D_2 = \frac{KM}{D_1} \tag{4.18}$$

Και άρα για DCM έχουμε:

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{D_1}{\sqrt{K}} \tag{4.19}$$

4.3 Στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας

Ένα από τα λιγότερο εξεταζόμενα κομμάτια ενός συστήματος energy harvesting είναι δυστυχώς το στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες που προτείνονται στη βιβλιογραφία: οι μπαταρίες και οι υπερπυκνωτές με την κάθε λύση να έχει τα θετικά και τα αρνητικά της.

4.3.1 Μπαταρίες

Η παλαιότερη και ίσως πιο χρησιμοποιούμενη λύση είναι αυτή της μπαταρίας και για τις εφαρμογές energy harvesting πιο χρήσιμες είναι οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Η λειτουργία τους βασίζεται σε χημικές μεταβολές στο εσωτερικό της μπαταρίας με παράλληλη ροή φορτίων μέσω του κυκλώματος που συνδέεται με τα ηλεκτρόδιά της. Στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες μπορούμε να αντιστρέψουμε αυτή τη διαδικασία δίνοντας στη μπαταρία ηλεκτρική ενέργεια (φόρτιση) την οποία μπορεί αργότερα να προσφέρει πίσω. Η σύνδεση του τρόπου λειτουργίας τους με ένα χημικό φαινόμενο επιφέρει μία σειρά από περιορισμούς στον τρόπο χρήσης τους. Ο σημαντικότερος ίσως περιορισμός τους αφορά το μέγιστο ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης. Η υπέρβασή του προκαλεί σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας της μπαταρίας και μειώνει τη διάρκεια ζωής της ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί ακόμα και να την καταστρέψει. Δυστυχώς για επαναφορτιζόμενες μπαταρίες σχήματος κουμπιού το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα σπάνια ξεπερνάει τα 10 mA. Για περιπτώσεις όπου τα ρεύματα φόρτισης είναι μεγάλα απαιτούνται επιπλέον μέτρα για την παρακολούθηση της κατάστασης της μπαταρίας. Συγκεκριμένα παρακολουθούνται οι τιμές της τάσης και της θερμοκρασίας της και το κύκλωμα φόρτισης λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα των μετρήσεων [22]. Επίσης για να υπολογίσουμε σωστά το ελάχιστο μέγεθος ενός τέτοιου πυκνωτή χρειαζόμαστε την πληροφορία της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας η οποία σπάνια δίνεται από τους κατασκευαστές και συνεπώς απαιτείται η διεξαγωγή μετρήσεων για την εύρεση της τιμής αυτής.



Σχήμα 4.12 : Ενδεικτικά διαγράμματα για τη συμπεριφορά του ρεύματος διαρροής ως προς την τάση, τη θερμοκρασία και το χρόνο μετά τη φόρτισή τους

4.3.2 Υπερπυκνωτές

Ο όρος υπερπυκνωτής αφορά έναν κανονικό πυκνωτή με την εξαίρεση ότι προσφέρει πολύ υψηλή χωρητικότητα σε μικρό χώρο. Σε αντίθεση με τους συνηθισμένους πυκνωτές των οποίων η χωρητικότητα είναι της τάξης των μF, η αντίστοιχη ενός υπερπυκνωτή είναι της τάξης των F.

Οι υπερπυκνωτές αναγνωρίζονται ως μια εξαιρετική σύμβαση μεταξύ των συμβατικών πυκνωτών και των μπαταριών. Γενικότερα, οι υπερπυκνωτές έχουν έως και 80 φορές περισσότερη πυκνότητα ενέργειας σε σχέση με τους συνηθισμένους πυκνωτές και έως και 10 φορές περισσότερη πυκνότητα ισχύος σε σχέση με τις μπαταρίες. Ένας υπερπυκνωτής μπορεί να φορτιστεί και να εκφορτιστεί μέσα σε δευτερόλεπτα με τεράστια ποσότητα ρεύματος μέχρι να φτάσει το ανώτατο όριο τάσης και να σταματήσει να δέχεται ρεύμα. Από την άλλη, οι μπαταρίες χρειάζονται χρόνο να φορτιστούν και να αποφορτιστούν καθώς η διαδικασία εμπλέκει χημικές αντιδράσεις με μη άμεσο χρόνο ανταπόκρισης. Επιπλέον, στους υπερπυκνωτές δε συναντώνται πολλά από τα μειονεκτήματα που συναντώνται στις μπαταρίες.

- Μπορούν να φορτιστούν και να αποφορτιστούν σχεδόν απεριόριστες φορές
- Έχουν πολύ μεγάλο χρόνο ζωής (με συνηθισμένη χρήση, ένας υπερπυκνωτής πέφτει στο 80% της συνολικής ενέργειάς του μετά από 10 χρόνια)

- Έχουν χαμηλότερη αντίσταση το οποίο ενισχύει τη δυνατότητα διαχείρισης
 του φορτίου όταν είναι συνδεδεμένοι παράλληλα με μπαταρίες
- Εκλύουν πολύ λίγες περιβαλλοντικά επιβλαβείς ουσίες
- Δεν εκλύουν θερμότητα κατά την αποφόρτισή τους

Σε εφαρμογές συστημάτων energy harvesting σε πλοία συνήθως επιλέγονται οι υπερπυκνωτές για δύο βασικούς λόγους:

- Ένας υπερπυκνωτής μπορεί να φορτιστεί με οποιαδήποτε μέθοδο. Μπορεί να φορτιστεί αργά από παλμούς ρεύματος που στέλνει ο harvester τη στιγμή που οι μπαταρίες γενικά προτιμάται να φορτίζονται γρήγορα και με σχετικά μεγάλα ρεύματα. Συγκεκριμένα, οι μπαταρίες λιθίου αποδίδουν καλύτερα όταν φορτιστούν με σταθερό ρεύμα. Αυτός ο τρόπος φόρτισης δεν είναι δυνατός μέσω μιας μικρής γεννήτριας που εκμεταλλεύεται δονήσεις εκτός και αν υλοποιηθεί κάποιο αρκετά περίπλοκο κύκλωμα φόρτισης μπαταρίας. Αλλά ακόμα και έτσι, κάτι τέτοιο θα αύξανε πολύ τις απώλειες τους συστήματος καθιστώντας το ασύμφορο.
- 2. Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες έχουν σχετικά μικρό χρόνο ζωής. Η ζωή μιας επαναφορτιζόμενης μπαταρίας που λειτουργεί σε κανονικές συνθήκες είναι γενικά μεταξύ 500 και 800 κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να χρειαστούν αντικατάσταση μετά από 1 ή 2 χρόνια. Από την άλλη πλευρά, οι υπερπυκνωτές έχουν πολύ μεγάλο χρόνο ζωής όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι υπερπυκνωτές αντιμετωπίζουν κάποιους περιορισμούς στη χρήση τους που θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη:

- Δε μπορούν να χρησιμοποιήσουν μεγάλο φάσμα της ενέργειας. Η τάση ενός υπερπυκνωτή είναι γραμμική και πέφτει από την πλήρη τάση σε μηδενική [23]. Λόγω αυτής της γραμμικής αποφόρτισης, μπορεί να μεταφερθεί η ποσότητα της φόρτισης όταν είναι περισσότερη η πλήρης τάση από την τάση που απαιτεί η εκάστοτε εφαρμογή.
- Ο κάθε υπερπυκνωτής έχει χαμηλή τάση οπότε απαιτείται σύνδεση σε σειρά πολλών για να επιτευχθούν υψηλότερες τιμές τάσης. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη εξισορρόπησης της τάσης μεταξύ των διαφορετικών υπερπυκνωτών ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα υπερφόρτισης κάποιου.
- Η αυτο-φόρτιση και αυτο-αποφόρτιση είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των μπαταριών. Θεωρείται ότι σε έναν υπερπυκνωτή μπορεί να παρατηρηθεί σε διάρκεια 30 ή 40 ημερών αποφόρτιση έως και 50% ενώ σε μια μπαταρία στον ίδιο χρόνο μπορεί να είναι κοντά στο 10%.

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

5.1 Περιγραφή του πειράματος

Η διάταξη του πειράματος περιλαμβάνει μια συσκευή παραγωγής κραδασμών, έναν μετατροπέα ενέργειας, μια γεννήτρια ημιτονοειδών παλμών, έναν ενισχυτή σήματος και ένα πολύμετρο. Στη συσκευή παραγωγής κραδασμών τοποθετούνται τα στοιχεία που θα ταλαντώνονται. Στη συγκεκριμένη περίπτωση πρόκειται για μια μικρή γεννήτρια η οποία θα προσαρτηθεί στη συσκευή παραγωγής κραδασμών όπου θα πραγματοποιεί τη μετατροπή της ενέργειας από κινητική σε ηλεκτρική.



Σχήμα 5.1: Συσκευή παραγωγής κραδασμών

Αυτή η γεννήτρια όπως αναφέρθηκε και στο θεωρητικό μέρος αποτελείται από τους μαγνήτες, το πηνίο και ένα κυλινδρικό δοχείο το οποίο θα συγκρατεί την κατασκευή. Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα το δοχείο σε αυτήν την περίπτωση είναι ένα πλαστικό υπόστρωμα κυρίως λόγω του χαμηλού του κόστους. Χρησιμοποιήθηκαν πηνία με τυλίγματα διαφορετικής διαμέτρου για να γίνει σύγκριση των μετρήσεων.



Σχήμα 5.2: Πλαστικό υπόστρωμα με πηνίο διαμέτρου 0,2mm



Σχήμα 5.3: Υπόστρωμα με πηνίο διαμέτρου 1,2 mm



Σχήμα 5.4: Οι μικροί μαγνήτες που χρησιμοποιήθηκαν είναι ύψους 2 χιλιοστών και διαμέτρου 6 χιλιοστών.

Στη διάταξη υπάρχει μια γεννήτρια παλμών και ένας ενισχυτής ισχύος. Από τα δύο τελευταία προκύπτει η τιμή της επιτάχυνσης του πλάτους της μετατόπισης των κραδασμών και συνεπώς και της ταχύτητας.

5.2 Όργανα μετρήσεων

5.2.1 Γεννήτρια παλμών

Η γεννήτρια παλμών είναι μια πηγή ημιτονοειδών σημάτων υψηλής ποιότητας που παρέχει συνεχή έλεγχο της συχνότητας και του πλάτους του σήματος. Έχει δύο οθόνες ενδείξεων. Στην πρώτη εμφανίζεται η συχνότητα του σήματος εξόδου και στην άλλη απεικονίζεται το μέγιστο της επιτάχυνσης μέσω ενός επιταχυνσιομέτρου. Αποτελεί μια ιδανική επιλογή για διαχείριση της απόκρισης δονήσεων ή έλεγχο ηλεκτροδυναμικών συσκευών δονήσεων κάθε μεγέθους.

Η συσκευή SG-135 της Labworks είναι μια γεννήτρια ημιτονοειδών παλμών χαμηλού κόστους, ενός καναλιού, που εύκολα προσαρμόζεται σε διαφορετικές καταστάσεις πειραματικών διατάξεων. Είναι ιδανική για τον έλεγχο συστημάτων παραγωγής κραδασμών, συστημάτων βαθμονόμησης όπως και για αξιολόγηση μηχανικών συστημάτων και άλλων εφαρμογών που απαιτούν παραγωγή
ημιτονοειδών κραδασμών μεταξύ 1 έως 10000 Hz με επίπεδα επιτάχυνσης που έχουν εύρος από 0,1 έως 99,9 G.



Σχήμα 5.5: Γεννήτρια παλμών sg-135 της labworks

Η συγκεκριμένη συσκευή παρέχει επιπλέον μία είσοδο καναλιού επιτάχυνσης ώστε να διευκολύνει την διεξαγωγή μετρήσεων που απαιτούν αξιολόγηση σε συγκεκριμένα επίπεδα επιτάχυνσης. Ο πλήρης έλεγχος του χρήστη ενισχύεται μέσω διαφορετικών πλήκτρων ρύθμισης της συχνότητας και του πλάτους επιτάχυνσης. Η ρύθμιση της συχνότητας είναι σε λογαριθμική κλίμακα από 1 Ηz έως 10 kHz σε ένα συνεχές εύρος με αυτόματη ρύθμιση της γραμμικότητας. Ο έλεγχος του πλάτους εξόδου έχει ανώτατο όριο τα 60 dB. Δύο ανεξάρτητοι μετρητές απεικονίζουν στις οθόνες τη συχνότητα και την επιτάχυνση σε κάθε στιγμή δίνοντας τη δυνατότητα για άμεση αποτίμηση της κατάστασης του πειράματος με μια ματιά. Ο μετρητής της συχνότητας απεικονίζει τη συχνότητα εξόδου με ανάλυση 0,2 Hz έως τα 1000 Hz και 1 Hz στις υψηλότερες τιμές.

Η ενσωματωμένη οθόνη επιτάχυνσης δέχεται είτε σήματα τάσης της βαθμονομημένης επιτάχυνσης είτε απευθείας σήματα ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών και τα προβάλλει σε τιμές έως και 100 g. Και οι δύο οθόνες είναι μεγάλες και ευδιάκριτες ώστε να είναι εύκολα αναγνώσιμες από μεσαίες αποστάσεις.

5.2.2 Ενισχυτής Ισχύος

Ο συγκεκριμένος γραμμικός ενισχυτής ισχύος είναι ένας αεριζόμενος άμεσης ζεύξης ηχητικός ενισχυτής που κυρίως απευθύνεται για χρήση σε μικρά συστήματα κραδασμών. Παρόλο που αυτός ο ενισχυτής έχει σχεδιαστεί για να οδηγεί απευθείας φορτία μικρού φορτίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε εφαρμογή που απαιτεί συνεχή ροή ισχύος υψηλής ποιότητας.



Σχήμα 5.6: pa -138 amplifier

Τέτοιοι ενισχυτές συμπεριλαμβάνουν προστασία από πολύ υψηλά ρεύματα και υψηλές θερμοκρασίες, διασφαλίζοντας μακρόχρονη αξιοπιστία. Επιπλέον έχουν οθόνες στις οποίες προβάλλονται γραφήματα της μέγιστης τάσης και του μέγιστου ρεύματος.

Στο σχεδιασμό τους αυτοί οι ενισχυτές έχουν ως στόχο τη διεκπεραίωση δύο διαδικασιών. Αυτοί οι ενισχυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως ευρυζωνικές πηγές τάσης υψηλής απόσβεσης, είτε ως πηγές ρεύματος μεγάλης αντίστασης. Επίσης, παρέχουν εισόδους συνεχούς και εναλλασσόμενου σήματος. Οι απαιτήσεις τροφοδοσίας τους είναι για 100, 120, 220 ή 240 V και 48 ή 60 Hz.

5.2.3 Συσκευή παραγωγής κραδασμών

Ο συγκεκριμένος ηλεκτρομαγνητικός μετατροπέας είναι μια φορητή συσκευή παραγωγής κραδασμών που είναι ιδανικά προσαρμοσμένη σε όλα τα είδη συστημάτων κραδασμών. Το μικρό του μέγεθος και βάρος το καθιστά εξαιρετική επιλογή για ερευνητικούς σκοπούς και εργαστηριακά πειράματα.



Σχήμα 5.7: Συσκευή παραγωγής κραδασμών

Η διέμετρός του είναι 2,125 ίντσες.

Το σύστημα ανάρτησης προσφέρει υψηλή αξονική προσαρμοστικότητα και πλευρική σταθερότητα. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει τη διεξαγωγή πειραμάτων σε μη στηριζόμενα φορτία με ελάχιστα προβλήματα θορύβου λόγω της ανάρτησης.

https://www.labworks-inc.com/all_products/controllers/sg_135.htm



Σχήμα 5.8: Ο ενισχυτής σήματος και η γεννήτρια παλμών που χρησιμοποιήθηκαν

https://www.labworks-inc.com/all_products/amps/pa_138.htm



Σχήμα 5.9: Συσκευή παραγωγής κραδασμών

https://www.labworks-inc.com/all_products/shakers/general_purpose/et_126.htm

6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° – Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Η διαδικασία της κατασκευής της μικρογεννήτριας χωρίζεται σε τρία στάδια:

- Το πρώτο στάδιο της κατασκευής περιλαμβάνει την επιλογή πλαστικού υποστρώματος με διάμετρο κατά ένα χιλιοστό μεγαλύτερη από αυτή των κυλινδρικών μαγνητών που θα χρησιμοποιηθούν.
- 2. Στο δεύτερο στάδιο τυλίγεται ένα πηνίο γύρω από αυτό το υπόστρωμα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το μήκος του πηνίου καθορίζεται από τη σχετική μετατόπιση του μαγνήτη ως προς το υπόστρωμα και επομένως από το πλάτος της ταλάντωσης που θα δίνει η γεννήτρια παλμών. Αρχικά, τοποθετείται το υπόστρωμα με τη βοήθεια μιας βίδας στη μηχανή τυλίγματος πηνίων που ονομάζεται περιελίκτρια πηνίων. Στη συνέχεια τυλίγεται το πλαστικό υπόστρωμα στο επιθυμητό μήκος που έχει καθοριστεί από την απόσταση την οποία διανύει ο μαγνήτης με βάση το πλάτος και την επιτάχυνση των κραδασμών που δέχεται.

Αυτή η απόσταση στη συγκεκριμένη περίπτωση κρίνεται εμπειρικά και με παρατήρηση της κίνησης της συστοιχίας μαγνητών στην κάθε τοπολογία που θα δοκιμαστεί. Δοκιμάζονται μία, δύο ή και τρεις στρώσεις χαλκού σε διαφορετικές περιπτώσεις για να γίνει ποιοτική σύγκριση της παραγόμενης τάσης και επομένως και της ισχύος. Δοκιμάστηκαν πηνία διαμέτρου 0.05, 0.06, 0.1, 0.2, 0.5. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις τα πηνία κόβονται πολύ εύκολα οπότε είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν και να ολοκληρωθεί το πείραμα.



Σχήμα 6.1: Περιελίκτρια πηνίων

3. Στο τρίτο στάδιο οι μαγνήτες εισάγονται στο υπόστρωμα το οποίο κλείνεται στην πάνω και κάτω πλευρά ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να φύγει εκτός των ορίων του υποστρώματος κάποιος μαγνήτης. Δοκιμάστηκαν και οι τοπολογίες με ελατήρια στις δύο βάσεις του υποστρώματος, παρ' όλα αυτά η απόσβεση της ταλάντωσης που προκαλούσαν ήταν αρκετή ώστε να μειώνεται σημαντικά η κίνηση των μαγνητών. Συνεπώς, η συγκεκριμένη τοπολογία δεν αναπτύχθηκε περαιτέρω.

Στην περίπτωση της τοπολογίας με δύο σταθερούς μαγνήτες στα άκρα του υποστρώματος συμβαίνει το ίδιο αφού πρώτα έχει εξασφαλιστεί ότι οι σταθεροί μαγνήτες θα αντέχουν την ένταση των δονήσεων. Για να παραμείνουν σταθεροί, χρησιμοποιήθηκαν θερμοσυστελλόμενα, τα οποία σφράγισαν τα συγκεκριμένα σημεία του υποστρώματος. Επιπλέον, σε αυτήν την τοπολογία η διάμετρος του υποστρώματος θα πρέπει να είναι ίση με αυτή των μαγνητών ώστε ο κινούμενος μαγνήτης - ή συστοιχία μαγνητών- να μην υπάρχει δυνατότητα να μετακινείται γύρω από τον άξονά του και να αναποδογυρίζει λόγω των δυνάμεων που δέχεται από τους σταθερούς μαγνήτες.

Στις άκρες του πηνίου συνδέεται ένα πολύμετρο, με το οποίο μετράται η παραγόμενη τάση, η αντίσταση του κάθε πηνίου και η παραγόμενη ισχύς.

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται πηνία με διαφορετικές διαμέτρους τυλιγμάτων.







Σχήμα 6.2: Φωτογραφίες με πηνία διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών

Έγιναν μετρήσεις σε διαφορετικές τοπολογίες με διαφορετικά μεγέθη μαγνητών, τυλιγμάτων πηνίων και τα συγκρίναμε. Η βασική τοπολογία που αναλύθηκε είναι αυτή που αποτελείται από ένα σετ μαγνητών που κινείται ελεύθερα εντός των ορίων του υποστρώματος. Μια δεύτερη τοπολογία που κατασκευάστηκε περιλαμβάνει δύο σετ μαγνητών που είναι σταθερά στις άκρες του υποστρώματος και ένα σετ που κινείται ελεύθερα στο ενδιάμεσο κομμάτι δεχόμενο απωθητικές δυνάμεις από τους σταθερούς μαγνήτες.

Στο τέλος δοκιμάστηκε και μια διάταξη όπου η παραπάνω μικρογεννήτρια συνδέθηκε με έναν πυκνωτή με στόχο αυτός να φορτιστεί ως μια προσομοίωση του πώς θα μπορεί να φορτιστεί μια μπαταρία ή ένας υπερπυκνωτής.

Το μεγαλύτερο πηνίο έχει 1,2 mm διάμετρο πηνίου. Το 2° έχει 0,6 mm. Το 3° 0,2 mm.

Οι διαστάσεις των μαγνητών έχουν ως εξής:

- <u>Μικροί μαγνήτες</u>: έχουν 6 χιλιοστά διάμετρο και 2 χιλιοστά ύψος ο καθένας.
 Συνολικά χρησιμοποιούνται επτά τέτοιοι μαγνήτες.
- <u>Μεγάλοι μαγνήτες</u>: έχουν 10 χιλιοστά διάμετρο και 14 χιλιοστά ύψος ο καθένας. Χρησιμοποιούνται δύο τέτοιοι μαγνήτες

7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7° - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

7.1 Μετρήσεις για μικρογεννήτριες μαγνητών διαμέτρου 6 χιλιοστών

Πηνίο 0,2 mm μικρών μαγνητών

Με πηνίο 0,2 mm 8 στρώσεων και μικρούς μαγνήτες έδωσε τάση
 [233 321 415] mV σε [10 12 15] Ηz με αντίσταση 7,695 Ω.



Σχήμα 0.1: Μικρο—γεννήτρια με διάμετρο τυλίγματος 0,2 mm



Σχήμα 0.2: Η παραγόμενη τάση ως προς τη συχνότητα δονήσεων για μικρο-γεννήτρια με μικρούς μαγνήτες και τύλιγμα χαλκού διαμέτρου 0,2 χιλιοστών



Σχήμα 0.3: Η παραγόμενη ισχύς σε σχέση με τη συχνότητα δονήσεων της παραπάνω τοπολογίας

Η παραγωγή της τάσης άρα και της ισχύος είναι ανάλογη της αύξησης της συχνότητας όπως φαίνεται στα παραπάνω παραδείγματα. Στα 15 Hz η διάταξή μας παράγει 22,38 mW.

Πηνίο 0,5 mm μικρών μαγνητών

 Με πηνίο 0,5 πολλών στρώσεων έδωσε [84,5 132,8 177,2] mV σε 1,072 Ω



Σχήμα 0.4: Μικρο-γεννήτρια με διάμετρο τυλίγματος 0,5 χιλιοστά







Σχήμα 0.6: Η παραγόμενη ισχύς ως προς τη συχνότητα

Η προσφερόμενη ισχύς αυξάνεται αναλογικά για 10, 12 και 15 Ηz. Στην τελευταία τιμή συχνότητας κραδασμών η τιμή της παραγόμενης ισχύος έφτασε σχεδόν τα 30 mW.

Πηνίο 0,6 mm μικρών μαγνητών

 Με πηνίο 0,6 mm μίας στρώσης με μικρούς μαγνήτες έδωσε [12,8 20,8 25,4] mV σε [10 12 15] Ηz αντίστοιχα με αντίσταση 0,166 Ω.



Σχήμα 0.7: Μικρο-γεννήτρια με μικρούς μαγνήτες και τύλιγμα διαμέτρου 0,6 χιλιοστών μίας στρώσης

Με πηνίο 0,6 mm τεσσάρων στρώσεων με μικρούς μαγνήτες έδωσε
 [47,1 67,4 92,2] mV σε [10 12 15] Ηz σε αντίσταση 0,387 Ω.



Σχήμα 0.8: Μικρο-γεννήτρια με τέσσερις στρώσεις τυλίγματος χαλκού 0,6 χιλιοστών

Με πηνίο 0,6 mm οχτώ στρώσεων με μικρούς μαγνήτες παρήγαγε
 [78,5 105,4 123,4] mV σε [10 12 15] Ηz σε αντίσταση 0,66 Ω.



Σχήμα 0.9: Μικρο-γεννήτρια με οκτώ στρώσεις τυλίγματος χαλκού 0,6 χιλιοστών



Σχήμα 0.10: Συγκριτικό διάγραμμα της παραγόμενης τάσης για μικρο-γεννήτριες με τύλιγμα διαμέτρου 0,6 χιλιοστών για μία, τέσσερις και οκτώ στρώσεις αντίστοιχα



Σχήμα 0.11: Συγκριτικό διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος για τις παραπάνω μικρο-γεννήτριες με τύλιγμα διαμέτρου 0,6 χιλιαστών

Η αντίσταση αυξάνεται αναλογικά με το μήκος του τυλίγματος χαλκού δηλαδή τον αριθμό των στρώσεων του πηνίου. Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η παραγωγή ισχύος αυξάνεται αναλογικά με τον αριθμό των στρώσεων του πηνίου σε κάθε περίπτωση όπως και με τη συχνότητα των κραδασμών.

Πηνίο 1,2 mm μικρών μαγνητών

Με πηνίο 1,2 mm μίας στρώσης με μικρούς μαγνήτες πήραμε [15 24
 30] mV σε [10 12 15] Ηz αντίστοιχα με αντίσταση 0,068 Ω



Σχήμα 0.12: Μικρο-γεννήτρια με μικρούς μαγνήτες και τύλιγμα διαμέτρου 1,2 χιλιοστών δύο στρώσεων

 Με πηνίο 1,2 mm έξι στρώσεων με μικρούς μαγνήτες πήραμε [20 27 32] mV σε [10 12 15] Ηz αντίστοιχα με αντίσταση 0,12 Ω.



Σχήμα 0.13: Μικρο-γεννήτρια με μικρούς μαγνήτες τυλίγματος 1,2 χιλιοστών έξι στρώσεων



Σχήμα 0.14: Η παραγόμενη τάση των δύο μικρο-γεννητριών τυλίγματος 1,2 χιλιοστών



Σχήμα 0.15: Η παραγόμενη ισχύς των δύο μικρο-γεννητριών 1,2 χιλιοστών

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η παραγωγή τάσης και ισχύος για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στα 10 Hz η παραγωγή είναι σχεδόν ίδια ενώ στις υψηλότερες συχνότητες η διάταξη με τις έξι στρώσεις προσφέρει μεγαλύτερες τιμές.

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται τα αποτελέσματα παραγωγής ισχύος των παραπάνω περιπτώσεων. Οι τιμές της ισχύος επιλέχθηκαν από την μεγαλύτερη

παραγωγή ισχύος για την κάθε περίπτωση διαμέτρου του τυλίγματος. Στην περίπτωση της διαμέτρου 1,2 mm έδωσε μεγαλύτερη ισχύ η κατασκευή με λιγότερες περιελίξεις σε αντίθεση με την περίπτωση των 0,6 mm. Αυτό υποθέτουμε ότι οφείλεται στη διαφορετική κατασκευή του κάθε πηνίου λόγω του ότι γίνεται στο χέρι.

Συχνότητα (Hz)	Ισχύς (mW)				
	διάμετρος τυλίγματος				
	0,2 mm	0,5mm	0,5mm 0,6mm		
10	7 <i>,</i> 055	6,661	9,337	3,309	
12	13,391	16,451	16,832	8,471	
15	22,381	29,291	23,072	13,235	

Πίνακας 1: Συγκριτικός πίνακας ισχύος για τις μετρήσεις με μικρούς μαγνήτες (με τη βέλτιστη παραγωγή ισχύος για την κάθε περίπτωση διαμέτρου τυλίγματος

Αυτό που διαπιστώνεται από τον παραπάνω πίνακα είναι ότι τη μεγαλύτερη τιμή ισχύος στα 12 και 15 Hz τη δίνει η διάταξη με διάμετρο τυλίγματος 0,5 mm. Για συχνότητα λειτουργίας 10 Hz η μεγαλύτερη τιμή επιτυγχάνεται με διάμετρο τυλίγματος 0,6 mm.

Γενικά, το γεγονός ότι δίνει τη μεγαλύτερη ισχύ η κατασκευή με το πηνίο ενδιάμεσης διαμέτρου μπορεί να οφείλεται είτε στα μη ακριβή χαρακτηριστικά της κατασκευής των παρομοίων μικρογεννητριών – δηλαδή τα χαρακτηριστικά δεν ήταν ακριβώς ίδια σε κάθε περίπτωση λόγω της κατασκευής στο χέρι και όχι σε μηχάνημα – είτε στις διαφορετικές συχνότητες συντονισμού των πηνίων.



Σχήμα 0.16: Συγκριτικό διάγραμμα της παραγόμενης ισχύος ως προς την συχνότητα κραδασμών όλων των μικρο-γεννητριών με μικρούς μαγνήτες διαμέτρου 6 χιλιοστών

7.2 Μετρήσεις για μικρο-γεννήτριες με μαγνήτες διαμέτρου 10 χιλιοστών

Πηνίο 0,2 mm μεγάλων μαγνητών

 Με πηνίο 0,2 mm οχτώ στρώσεων και τους μεγάλους μαγνήτες πήραμε [660 960 600] Μν σε [27 42 28] mA σε [10 12 15] Ηz σε αντίσταση 21,37 Ω

Η παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται ως εξής: $P = \frac{V^2}{R}$

R (Ω)	V (mV)	i (mA)	Р	$P(W)=V^2/R$
			(W)=v*i	
21,37	660	27	0,01782	0,020384
21,37	960	42	0,04032	0,043126
21,37	600	28	0,0168	0,016846

Πίνακας 2: Πίνακας μετρήσεων για μικρο-γεννήτρια μαγνητών διαμέτρου 10 χιλιοστών



Σχήμα 0.17: Μικρο-γεννήτρια μαγνητών διαμέτρου 10 χιλιοστών με τύλιγμα χαλκού 0,2 χιλιοστών



Σχήμα 0.18: Η παραγόμενη τάση της παραπάνω γεννήτριας ως προς τη συχνότητα



Σχήμα 0.19: Η παραγόμενη ισχύς της παραπάνω μικρο-γεννήτριας διαμέτρου 10 χιλιοστών και τύλιγμα διαμέτρου 0,2 χιλιοστών

Η παραγωγή τάσης παρατηρούμε ότι μειώνεται στα 15 Hz. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι λόγω του ότι η συχνότητα συντονισμού της συγκεκριμένης γεννήτριας είναι κάτω από 15 Hz και πάνω από 10 Hz. Αφού ξεπεράσει την τιμή της συχνότητας συντονισμού η παραγωγή τάσης και άρα και ισχύος μειώνεται όπως φαίνεται από τη βιβλιογραφία.[Linear electromagnetic electric generator for harvesting vibration energy at frequencies more than 50Hz]

Πηνίο 0,6 mm μεγάλων μαγνητών

- Με πηνίο 0,6 mm εφτά στρώσεων σε 0,45 Ω πήραμε [93 177 222] mV

Σχήμα 0.20: Μικρο-γεννήτρια μαγνητών 10 χιλιοστών με τύλιγμα 0,6 χιλιοστών εφτά στρώσεων



 Με πηνίο 0,6 mm μιας στρώσης με μεγάλους μαγνήτες 0,29 Ω παρήγαγε [48 55 59] mV σε [10 12 15] Hz

Σχήμα 0.21: Μικρο-γεννήτρια με τύλιγμα 0,6 χιλιαστών μίας στρώσης



Σχήμα 0.22: Η παραγόμενη τάση των δύο παραπάνω μικρο-γεννητριών



Σχήμα 0.23: Η παραγόμενη ισχύς των δύο παραπάνω μικρο-γεννητριών

Όπως αναμενόταν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του πηνίου πολλών στρώσεων όπως και για λειτουργία σε υψηλότερη συχνότητα. Παρατηρείται ότι στην κατασκευή με μία στρώση, η παραγόμενη τάση – αντίστοιχα και η ισχύς – δεν έχει μεγάλη διαφορά για λειτουργία σε υψηλότερη συχνότητα.

Πηνίο 1,2 mm μεγάλων μαγνητών

 Με πηνίο 1,2 mm πέντε στρώσεων, με αντίσταση 0,16 Ω, έδωσε [68 95 102] mV σε [10 12 15] Hz.



Σχήμα 0.24: Πηνίο διαμέτρου 1,2 χιλιοστών πέντε στρώσεων.

- Με πηνίο 1,2 mm μίας στρώσης, 0,095 Ω, έδωσε [55 50 49] mV σε [10 12 15] Hz

Σχήμα 0.25: Πηνίο διαμέτρου 1,2 χιλιοστών μίας στρώσης



Σχήμα 0.26: Η παραγόμενη τάση των δύο μικρο-γεννητριών με τύλιγμα μεγάλης διαμέτρου



Σχήμα 0.27: Η παραγόμενη ισχύς των δύο μικρο-γεννητριών με τύλιγμα μεγάλης διαμέτρου

Για λειτουργία στα 10 Hz, η παραγωγή είναι μικρότερη στην περίπτωση της κατασκευής με μία στρώση τυλίγματος. Για τις συχνότητες των 12 και 15 Hz η παραγωγή είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση των πολλών στρώσεων. Στην περίπτωση της μίας στρώσης η παραγωγή μειώνεται λίγο, το οποίο συμβαίνει λόγω συντονισμού. Η συχνότητα συντονισμού της μικρο-γεννήτριας με τη μία στρώση τυλίγματος είναι ανάμεσα στα 10 και στα 12Hz, για αυτό και διαπιστώνεται μείωση της τιμής για τις δύο μεγαλύτερες τιμές συχνοτήτων.

Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται τα αποτελέσματα παραγωγής ισχύος των παραπάνω περιπτώσεων. Οι τιμές της ισχύος επιλέχθηκαν από την μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος για την κάθε περίπτωση διαμέτρου του τυλίγματος. Για όλες τις περιπτώσεις διαμέτρου τυλίγματος τη μεγαλύτερη τιμή ισχύος έδωσε το τύλιγμα με τις περισσότερες περιελίξεις.



Πίνακας 3: Συγκριτικός πίνακας ισχύος για τις μετρήσεις με μαγνήτες 10 χιλιοστών (με τη βέλτιστη παραγωγή ισχύος για την κάθε περίπτωση διαμέτρου τυλίγματος)

Σχήμα 0.28: Συγκριτικό διάγραμμα παραγόμενων τάσεων για τις περιπτώσεις των μικρο-γεννητριών

Αυτό που διαπιστώνεται από τον παραπάνω πίνακα είναι ότι τη μεγαλύτερη τιμή ισχύος στα 12 και 15 Ηz προκύπτει από τη διάταξη με διάμετρο τυλίγματος 0,6 mm. Για συχνότητα λειτουργίας 10 Ηz η μεγαλύτερη τιμή επιτυγχάνεται με διάμετρο τυλίγματος 1,2 mm. Γενικά, προτιμότερη επιλογή είναι η κατασκευή με διάμετρο τυλίγματος 0,6 mm.

Με μεγαλύτερους μαγνήτες επιτεύχθηκαν υψηλότερες τιμές ισχύος όπως αναμενόταν. Επίσης, αυτό που παρατηρείται και στην περίπτωση των μεγάλων μαγνητών είναι ότι η απόδοση ήταν καλύτερη για πηνίο με χαλκό διαμέτρου 0,6 mm, σε αντίθεση με τα πηνία είτε μικρότερης διαμέτρου (0,2 mm) είτε μεγαλύτερης (1,2 mm). Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι ως κατασκευές έχουν διαφορετικές τιμές συχνοτήτων συντονισμού. Στην περίπτωση του τυλίγματος μικρής διαμέτρου συμπεραίνουμε ότι η συχνότητα συντονισμού του πηνίου θα είναι κοντά στα 12 Hz λόγω του ότι στα 15 Hz η παραγωγή ισχύος είναι μικρότερη. Για τα πηνία με 0,6 mm διάμετρο χαλκού συμπεραίνουμε ότι η συχνότητα συντονισμού είναι σε υψηλότερη τιμή συχνότητας διότι ο ρυθμός αύξησης της παραγωγής ισχύος δε μειώνεται μέχρι τα 15 Hz. Αυτό σημαίνει ότι για εφαρμογές λίγο υψηλότερων τιμών συχνότητας (15 – 20 Hz) είναι καλύτερη επιλογή σε σχέση με τις υπόλοιπες τοπολογίες γεννητριών που δοκιμάστηκαν.

7.3 Μετρήσεις για μικρο-γεννήτριες σε τοπολογία με σταθερούς μαγνήτες

Σε αυτήν την τοπολογία υπάρχουν 2 σταθεροί μαγνήτες κολλημένοι στα άκρα του υποστρώματος και στο ενδιάμεσο ένας μαγνήτης ο οποίος κινείται ενδιάμεσα δεχόμενος τις απωθητικές δυνάμεις των σταθερών μαγνητών. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τοποθετήσαμε σετ των 2 μαγνητών σε κάθε άκρη του υποστρώματος και ένα σετ των 3 μαγνητών που κινείται ελεύθερα στο ενδιάμεσο. Το πηνίο που χρησιμοποιήθηκε ήταν διαμέτρου 0,6 mm και αντίστασης 0,31 Ohm.

Έγιναν δύο δοκιμές με το πηνίο να εκτείνεται σε μεγαλύτερο μήκος και στη δεύτερη να έχει μικρότερο μήκος δηλαδή να είναι πιο συγκεντρωμένο στο κέντρο. Στη δεύτερη δοκιμή πήραμε καλύτερα αποτελέσματα οπότε κρατήσαμε αυτά για τη σύγκριση με την τοπολογία που αναφέρθηκε παραπάνω.

Τα αποτελέσματα που έδωσε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και στη συνέχεια στα διαγράμματα.

Συχνότητα (Hz)	Τάση (mV)	Ισχύς (mW)
10	24	1,858064516
12	30	2,903225806
15	43	5,964516129

Πίνακας 4: Η παραγόμενη τάση και ισχύς ως προς τη συχνότητα



Σχήμα 0.29: Πηνίο μεγαλύτερου μήκους σε τοπολογία με σταθερούς μαγνήτες στα άκρα



Σχήμα 0.30: Συγκεντρωμένο πηνίο σε τοπολογία με σταθερούς μαγνήτες στα άκρα



Σχήμα 0.31: Η παραγόμενη τάση στην περίπτωση της τοπολογίας με σταθερούς μαγνήτες



Σχήμα 0.32: Η παραγόμενη ισχύς στην περίπτωση της τοπολογίας με σταθερούς μαγνήτες

	Συχνότητα (Hz)	Τάση (mV)	lσχύς (mW)		Συχνότητα (Hz)	Τάση (mV)	Ισχύς (mW)
Α' Τοπολογία με 0,387 Ω	10	47,1	5,73	Β' Τοπολογία με 0,31 Ω	10	24	1,86
	12	67,4	11,74		12	30	2,9
	15	92,2	21,97		15	43	5,97

Πίνακας 5: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων τοπολογίας Α' και Β' για διάμετρο πηνίου 0,6 mm

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, στη Β' τοπολογία η παραγωγή ισχύος είναι μικρότερη. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι οι ενδιάμεσοι μαγνήτες που κινούνται ελεύθεροι εμποδίζονται στην κίνηση από τις απωθητικές δυνάμεις που δέχονται από τους σταθερούς. Ενδεχομένως με διαφορετική κατασκευή μεγαλύτερου μήκους και μεγαλύτερου πηνίου να μπορούσαμε να πετύχουμε καλύτερα αποτελέσματα στη συγκεκριμένη περίπτωση.



Σχήμα 0.33: Συγκριτικό διάγραμμα των δύο διαφορετικών τοπολογιών

7.4 Δοκιμή φόρτισης πυκνωτή

Η παραπάνω μικρο-γεννήτρια προορίζεται γενικά για εφαρμογές στις οποίες θα φορτίζει μπαταρίες ή υπερπυκνωτές. Έγιναν κάποιες δοκιμές με μικρούς πυκνωτές για να επιβεβαιώσουμε ότι η συγκεκριμένη διάταξη θα φορτίζει τον πυκνωτή. Ο κάθε πυκνωτής που χρησιμοποιήσαμε συνδέθηκε σε σειρά με μία δίοδο ώστε να αποτρέπεται η εκφόρτισή του και στη συνέχεια με την υπόλοιπη διάταξη όπως φαίνεται στο παρακάτω κύκλωμα.



Σχήμα 0.34: Η συνδεσμολογία για τη δοκιμή φόρτισης

Σε αυτή τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε η Α' τοπολογία με τους μεγάλους μαγνήτες, το πηνίο 0,6mm αντίστασης 0,45 Ω και τη δίοδο 1N5819. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη δίοδος διότι έχει αρκετά χαμηλή πτώση τάσης (118 mV), οπότε επιτρέπει την φόρτιση του πυκνωτή με τις χαμηλές παραγόμενες τάσεις.

Αρχικά, δοκιμάστηκε πυκνωτής χωρητικότητας 100 μF, ο οποίος έφτασε τα 220 mV αλλά έπειτα αποφορτίστηκε σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 0.35: Δοκιμή φόρτισης με πυκνωτή 100 μF

Έτσι, στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ένας πυκνωτής με μεγαλύτερη χωρητικότητα, συγκεκριμένα στα 2200 μF. Ο πυκνωτής έφτασε στα 420 mV και αποφορτίστηκε σε αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με τον αντίστοιχο μικρότερης χωρητικότητας, η οποία ήταν και η αναμενόμενη συμπεριφορά.



Σχήμα 0.36: Δοκιμή φόρτισης με πυκνωτή 2200μF

8 Συμπεράσματα

Με βάση τις μετρήσεις που πήραμε παραπάνω συμπεράναμε τα εξής:

- Η απόδοση είναι της τάξης των mW που έχει συγκριτικά πλεονεκτήματα για remote harvesting σε σχέση με άλλες τεχνολογίες όπως τα πιεζοηλεκτρικά
- Οι τιμές της παραγόμενης ισχύος ήταν σημαντικές για τον όγκο και τις συνθήκες της κατασκευής.
- Οι κατασκευές με μεγαλύτερους μαγνήτες παρήγαγαν υψηλότερες τιμές, κάτι που ήταν αναμενόμενο.
- Η σχέση της διαμέτρου του πηνίου με την παραγόμενη ισχύ δεν ήταν αναλογική διότι το φαινόμενο του συντονισμού έπαιξε σημαντικό ρόλο.
- Σε κάποιες περιπτώσεις δεν υπήρξε αναλογική σχέση ισχύος και συχνότητας λειτουργίας λόγω του φαινομένου του συντονισμού.
- Η δεύτερη τοπολογία με τους δύο σταθερούς μαγνήτες δεν απέδωσε όσο η πρώτη.
- Η δοκιμή φόρτισης του πυκνωτή λειτούργησε όπως αναμενόταν οπότε ο ενεργειακός συλλέκτης είναι σε θέση να φορτίσει μπαταρίες ή υπερπυκνωτές σε μια πραγματική συνθήκη.

Τα μειονεκτήματα που παρατηρήθηκαν αναλύονται παρακάτω:

- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κάθε ενεργειακού συλλέκτη ήταν διαφορετικά λόγω της χειροποίητης κατασκευής τους, που δεν μπορεί να είναι ακριβής. Συνεπώς, και οι συγκρίσεις μεταξύ των περιπτώσεων δεν ήταν ακριβείς.
- Η δυσκολία κατασκευής ήταν πιο έντονη στη δεύτερη τοπολογία με τους σταθερούς μαγνήτες στα άκρα. Με κατασκευή μεγαλύτερης ακρίβειας πιθανότατα να μπορούσαμε να πετύχουμε καλύτερη απόδοση.
- Το ότι δεν γνωρίζαμε την συχνότητα συντονισμού του κάθε ενεργειακού συλλέκτη σε κάποιες περιπτώσεις μας έδωσε μειωμένη ισχύ στα 15 Hz.
- Επιπλέον, επειδή δε γνωρίζαμε τη συχνότητα συντονισμού στην κάθε περίπτωση δε μας επέτρεψε να βγάλουμε ασφαλές συμπέρασμα όσον αφορά το σε ποιες περιπτώσεις βελτιώνει την απόδοση η επιλογή πηνίου διαφορετικής διαμέτρου.

Εναλλακτικές προτάσεις για μελλοντική εργασία

Για να εξελιχθεί και να διευρυνθεί η μελέτη της συγκεκριμένης εργασίας υπάρχουν κάποιες άμεσες αναβαθμίσεις που θα μπορούσαν να δώσουν πιο λεπτομερή εικόνα για τη δυνατότητα αξιοποίησης της συγκεκριμένης τεχνολογίας:

- Η κατασκευή μπορεί να γίνει με τρισδιάστατο εκτυπωτή. Αυτό θα μας δώσει μεγαλύτερη ακρίβεια στην κατασκευή. Έτσι, θα μπορέσουμε να κάνουμε πιο ακριβείς συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών μικρογεννητριών.
- Με κατασκευή μεγαλύτερης ακρίβειας μπορούμε να δοκιμάσουμε κάποιες πιο πολύπλοκες τοπολογίες που είναι σχεδόν αδύνατο να κατασκευαστούν με το χέρι.

Η δυνατότητα του να έχουμε κατασκευή ακριβείας μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε επίσης με ακρίβεια την εκάστοτε συχνότητα συντονισμού. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα - έχοντας και ως δεδομένο ότι κοντά στη συχνότητα συντονισμού μεγιστοποιείται η παραγωγή μας - να μπορούμε να εξειδικεύσουμε την κάθε κατασκευή για κινητήρες που ξέρουμε ακριβώς τη συχνότητα λειτουργίας τους.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Yao Y., Energy harvesting from ship vibrations, Tianjin: University of british Columbia, 2002.

[2] Eric O. Torres, G.A. Rincon-Mora, Harvest ambient energy, EE Times.com, 2005.

[3] Κίζας Θ., Ολοκληρωμένο κύκλωμα συγκομιδής ενέργειας από πολλαπλές πηγές, Θεσσαλονίκη, 2014.

[4] Ramadass Y. K., Energy processing circuits for low-power applications, Cambridge, 2009.

[5] Παπαχρήστου, Α. (n.d.). Συγκομιδή θερμοηλεκτρικής ενέργειας σε αγροτικό περιβάλλον.

[6] Mateu, L., Pollack, M., & Spies, P., Analog Maximum Power Point Circuit Applied to Thermogenerators, Sendai, Japan: PowerMEMS, 2008.

[7] H. Nguyen, "Pyroelectric energy converter using co-polymer P (VDF-TrFE) and Olsen cycle for waste heat energy harvesting", Applied Thermal Engineering, no. 30, pp. 217-2137, 2010.

[8] Gael Sebald, Elie Lefeuvre, and Daniel Guyomar, "Pyroelectric Energy Conversion: Optimization Principles", leee transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 55, no. 3, 2008.

[9] C. Eichhorn, R. Tchagsim, N.Wilhelm, F. Goldschmidtboeing and P. Woias, "A Compact Piezoelectric Energy Harvester With a Large Resonance Frequency Tuning Range", Proceedings of PowerMEMS, 2010.

[10] Erick O. Torres and Gabriel A. Rincon-Mora, "Electrostatic Energy Harvester and Li-Ion Charger Circuit for Micro-Scale Applications", 49th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2006.

[11] Roundy S., Wright P., Rabaey J., A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes", Computer Communications, vol. 26, no.11, pp. 1131–1144, 2003.

[12] Roudy S., Wright P., Pister K., Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters, Procceedings of IMECE, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2002.

[13] Ramadass Y. K., "Energy processing circuits for low-power applications," Ph.D. dissertation, Mass. Inst. Technol., Cambridge, MA, 2009.

[14] Roudy Shad, Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion, University of California at Berkeley, 2003.

[15] R. J. Vyas, B. B. Cook, Y. Kawahara and M. M. Tentzeris "E-WEHP: A batteryless embeddedsensor-platform wirelessly powered from ambient digital-TV signals", IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 61, no. 6, pp. 2491-2505, 2013.
[16] 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.

[17] Mercier P.P., A.C. Lysaght, S. Bandyopadhyay, K.M. Stankovic, A.P. Chandrakasan, Energy extraction from the biologic battery in the inner ear, Nature Biotechnology, 2012.

[18] C. B. Williams, S. Shearwood, M. A. Harradine, P. H. Mellor, T. S. Birch, R. B. Yates, "Development of an electromagnetic micro-generator", IEEE Proc. Circuits, Devices and Syst., vol. 148, no. 6, pp. 337-341, 2001.

[19] C. Eichhorn, R. Tchagsim, N.Wilhelm, F. Goldschmidtboeing, P. Woias, "A Compact Piezoelectric Energy Harvester With a Large Resonance Frequency Tuning Range", Proceedings of PowerMEMS, 2010.

[20] Y. K. Ramadass, "Energy processing circuits for low-power applications", Ph.D. dissertation, Mass. Inst. Technol., Cambridge, 2009.

[21] I. Doms, P. Merken, C. Van Hoof, "Comparison of DC-DC-converter Architectures of Power Management Circuits for Thermoelectric Generators", Proceedings of European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-5, 2007.

[22] H. Lhermet , C. Condemine , M. Plissonnier , R. Salot , P. Audebert, M. Rosset, "Efficient power management circuit: From thermal energy harvesting to above-IC microbattery energy storage", IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 43, no. 1, pp.246 -255, 2008.

[23] Roundy et al. "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes", Computer Communications, no. 26, pp. 1131–1144, 2003.