



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΙΕЗОΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του
ΟΝΟΥΦΡΙΟΥ Β. ΜΑΡΚΑΚΗ

Εξεταστική Επιτροπή: Ευτύχης Κουτρούλης, Επίκουρος Καθηγητής (Επιβλέπων)
Κωνσταντίνος Καλαϊτζάκης, Καθηγητής
Γεώργιος Σταυραράκης, Καθηγητής

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Χανιά, Ιούνιος 2014

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Κουτρούλη Ευτύχη για την επίβλεψη της διπλωματικής μου εργασίας και την βοήθεια του ώστε να αποπερατωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία. Τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας αυτής και για το γεγονός ότι ήταν πάντα διαθέσιμος για κάθε πρόβλημα που αντιμετώπιζα με την γνώση και εμπειρία που κατέχει.

Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που μου στάθηκε στο πλευρό μου σε όλα αυτά τα χρόνια χωρίς να μου λείψει τίποτα καθώς και τους συγγενείς και τους φίλους μου για τις όμορφες εμπειρίες που βιώσαμε.

Περίληψη

Τα δίκτυα αισθητήρων παρουσιάζουν τον τελευταίο καιρό μεγάλη άνθηση. Ιδιαίτερη έρευνα έχει γίνει στη μετάδοση και λήψη της πληροφορίας στα δίκτυα αισθητήρων, με στόχο την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος ανά κόμβο. Οι κόμβοι ενός δικτύου συνήθως χρησιμοποιούν μπαταρίες για την αποθήκευση ενέργειας, οι οποίες αν και παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, περιορίζουν την ζωή του αισθητήρα με τους πεπερασμένους κύκλους ζωής που κατέχουν. Λύση σε αυτό το πρόβλημα έρχονται να δώσουν οι πηγές συγκομιδής ενέργειας (Energy Harvesters) όπως ονομάζονται, οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την συσσωρευμένη ενέργεια του περιβάλλοντος όπως την θερμική, την ηλιακή και των δονήσεων. Οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες είναι μία τέτοια πηγή συγκομιδής ενέργειας η οποία μετατρέπει την ενέργεια δονήσεων (ή μηχανική ενέργεια) σε ηλεκτρική.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός συστήματος για την βελτιστοποίηση της παραγωγής ισχύος από τις πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες. Για τον σκοπό αυτό επιλέχτηκε η μέθοδος της Σταθερής Τάσης (CV) και Προσαρμογής Φορτίου (Resistive Matching) ως μέθοδος MPPT. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν μετατροπέα buck-boost, και μια μονάδα ελέγχου. Η μονάδα ελέγχου μεταβάλλει τον κύκλο λειτουργίας του μετατροπέα, μετατοπίζοντας το σημείο λειτουργίας της γεννήτριας ώστε να γίνει βέλτιστο. Επιβλέπει δηλαδή την τάση εισόδου του μετατροπέα να παραμένει σταθερή στην τάση αναφοράς που έχουμε θέσει. Η ενέργεια από την πιεζοηλεκτρική γεννήτρια φορτίζει μια μπαταρία. Για την αξιολόγηση του συνολικού συστήματος πραγματοποιήθηκαν μια σειρά πειραμάτων όπου μετρήθηκε η απόδοση του συστήματος και η οποία αγγίζει το 62%.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή.....	1
1.1 Συγκομιδή Ενέργειας.....	1
1.1.1 Πηγές Συγκομιδής Ενέργειας.....	1
1.2 Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας.....	3
1.3 Οργάνωση Τόμου.....	4

Κεφάλαιο 2

Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.....	6
2.1 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο.....	6
2.2 Το Μοντέλο της Πιεζοηλεκτρικής Γεννήτριας.....	6
2.3 Μετατροπή Μηχανικής σε Ηλεκτρική Ενέργεια.....	9
2.4 Μηχανικό Μοντέλο Δοκού-Πιεζοηλεκτρικού Στοιχείου.....	10
2.5 Ηλεκτρικό Ισοδύναμο Μοντέλο.....	13
2.6 Πιεζοηλεκτρική Γεννήτρια DuraAct P876A.12.....	16
2.7 Προσομοιώσεις Μοντέλων.....	18
2.8 Πειραματική Διάταξη.....	21

Κεφάλαιο 3

Τεχνικές Maximum Point Power Tracking.....	25
3.1 Μέθοδος Σταθερής Τάσης (Constant Voltage).....	25
3.2 Μέθοδος Τάσης Ανοικτοκυκλώματος.....	25
3.3 Μέθοδος διαταραχής και παρατήρησης (Perturb & Observe).....	26
3.4 Μέθοδος αυξανόμενης αγωγιμότητας (Incremental Conductance).....	28
3.5 Προσαρμογή Φορτίου - Resistive Matching.....	29
3.6 Synchronized Switch Harvesting on Inductor (SSHI).....	30
3.7 Σύνοψη – Επιλογή Μεθόδου MPPT.....	31

Κεφάλαιο 4

Μετατροπείς DC-DC.....	33
------------------------	----

4.1 Γενικά στοιχεία μετατροπών DC-DC.....	33
4.1.1 Λειτουργία PWM.....	33
4.1.2 Δημιουργία PWM παλμών.....	34
4.2 Μετατροπέας τύπου Buck.....	35
4.3 Μετατροπέας τύπου Boost.....	36
4.4 Μετατροπέας τύπου Ćuk.....	38
4.5 Μετατροπέας τύπου Buck-Boost.....	39
4.6 Σύνοψη – Επιλογή Μετατροπέα.....	43

Κεφάλαιο 5

Το Σύστημα που αναπτύχθηκε.....	45
5.1 Προτεινόμενο Σύστημα.....	45
5.2 Γέφυρα Ανόρθωσης.....	45
5.3 Κύκλωμα Μετατροπέα Buck-Boost.....	46
5.3.1 Πυκνωτής Εισόδου.....	47
5.3.2 Διακοπτικό Στοιχείο Buck-Boost.....	47
5.3.3 Δίοδος.....	48
5.3.4 Πυκνωτής Εξόδου.....	48
5.4 Κύκλωμα Ελέγχου (Control Unit).....	48
5.4.1 Διαφορικός Ενισχυτής.....	50
5.4.2 Τάση Αναφοράς (Reference Voltage).....	51
5.4.3 Αναστρέφων Αθροιστής.....	51
5.4.4 Εικονική Γείωση (Virtual Ground).....	52
5.4.5 Ελεγκτής PI.....	53
5.4.6 Μονάδα PWM.....	55

Κεφάλαιο 6

Πειραματικά Αποτελέσματα.....	58
6.1 Πειράματα.....	58
6.1.1 Πειράματα για την λειτουργία του μετατροπέα και της γεννήτριας.....	58
6.1.2 Πειράματα με διαφορετικά σημεία λειτουργίας.....	64

6.1.3 Πειράματα με μοναδικό σημείο λειτουργίας.....	69
6.2 Απόδοση Μετατροπέα Buck-Boost.....	73
6.3 Απόδοση Προτεινόμενου Συστήματος.....	74
6.4 Κυματομορφές του συστήματος που αναπτύχθηκε.....	76
6.5 Κατανάλωση ισχύος συστήματος ελέγχου.....	80
Κεφάλαιο 7	
Συμπεράσματα – Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	82
7.1 Ανακεφαλαίωση.....	82
7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	83

Βιβλιογραφία

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Το διάγραμμα του συνολικού συστήματος που αναπτύχθηκε.....	4
Σχήμα 2.1. Τανυστής Τάσης [5].....	7
Σχήμα 2.2 Περιπτώσεις 31 και 33 [6].....	8
Σχήμα 2.3. Η ροή της ενέργειας από το περιβάλλον στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο [6].....	9
Σχήμα 2.4. Μοντέλο Δοκού-Πιεζοηλεκτρικού [6].....	10
Σχήμα 2.5. Ισοδύναμο μοντέλο Πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.....	13
Σχήμα 2.6. Το πιεζοηλεκτρικό μοντέλο με ac-dc γέφυρα και φορτίο.....	14
Σχήμα 2.7. Κυματομορφές κυκλώματος Σχήματος 2.6.....	15
Σχήμα 2.8. Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία.....	16
Σχήμα 2.9. Πιεζοηλεκτρική Γεννήτρια P876.A12.....	16
Σχήμα 2.10. Η παραγωγή ισχύος με βάση την αντίσταση εισόδου για διάφορες συχνότητες. 17	
Σχήμα 2.11. Η παραγωγή ισχύος με βάση την αντίσταση εισόδου για διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης.....	18
Σχήμα 2.12. Καμπύλη $P - R$ για διάφορες τιμές συχνότητας ταλάντωσης.....	19
Σχήμα 2.13. Η καμπύλη $P - R$ για διάφορες τιμές πλάτους ταλάντωσης με $f=2\text{Hz}$	20
Σχήμα 2.14. Μοντέλο Πιεζοηλεκτρικής Γεννήτριας σε περιβάλλον Simulink.....	21
Σχήμα 2.15. Η πειραματική διάταξη.....	22

Σχήμα 2.16. Το stepper motor της κατασκευής.....	22
Σχήμα 2.17. Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο επάνω στην δοκό.....	23
Σχήμα 2.18. Το Arduino (κάτω) και ο driver του stepper moter.....	24
Σχήμα 3.1. Λειτουργία αλγορίθμου Perturbation and Observation.....	27
Σχήμα 3.2. Αλγόριθμος Perturb and Observe [12].....	27
Σχήμα 3.3. Ο αλγόριθμος Incremental Conductance [12].....	29
Σχήμα 3.4. Ισοδύναμο κύκλωμα πηγής – φορτίου.....	30
Σχήμα 3.5. Η τεχνική SSHI [15].....	31
Σχήμα 4.1. Η λειτουργία των μετατροπέων dc-dc (πηγή:www.electro-labs.com).....	33
Σχήμα 4.2. PWM κυματομορφή [16].....	34
Σχήμα 4.3. Παραγωγή PWM παλμών [17].....	35
Σχήμα 4.4. (α) Μετατροπέας τύπου Buck, (β) On-state κύκλωμα, (γ) Off-State κύκλωμα [18].	36
Σχήμα 4.5. (α) Μετατροπέας τύπου Boost,(β) On-state κύκλωμα,(γ) Off-state κύκλωμα [18].	37
Σχήμα 4.6. (α)Μετατροπέας τύπου $\dot{C}uk$, (β) On-state κύκλωμα, (γ) Off-State κύκλωμα, (δ) Ρεύματα και [18].....	39
Σχήμα 4.7.(α) Μετατροπέας τύπου Buck-Boost, (β) On-state κύκλωμα, (γ) Off-State κύκλωμα [18].....	40
Σχήμα 4.8. Κυματομορφές Buck-Boost μετατροπέα σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής(DCM) [19].....	42
Σχήμα 5.1. Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος.....	45
Σχήμα 5.2. Σχηματικό διάγραμμα της γέφυρας ανόρθωσης.....	46
Σχήμα 5.3. Σχηματικό διάγραμμα του buck-boost μετατροπέα.....	47
Σχήμα 5.4. Σχηματικό διάγραμμα Κυκλώματος Ελέγχου.....	49
Σχήμα 5.5. Το κύκλωμα του διαφορικού ενισχυτή.....	50
Σχήμα 5.6. Το κύκλωμα του αναστρέφων αθροιστή.....	52
Σχήμα 5.7. Το κύκλωμα δημιουργίας της εικονικής γείωσης.....	53
Σχήμα 5.8. Το γενικό διάγραμμα του συνολικού συστήματος ελέγχου που υλοποιήθηκε.....	53
Σχήμα 5.9. Το κύκλωμα του ελεγκτή PI.....	55
Σχήμα 5.10. Το κύκλωμα της μονάδας PWM.....	55
Σχήμα 6.1. Πειραματικές καμπύλες ισχύος εισόδου για πλάτος ταλάντωσης 2mm.....	59

Σχήμα 6.2. Πειραματικές καμπύλες ισχύος εξόδου για πλάτος ταλάντωσης 2mm.....	60
Σχήμα 6.3. Πειραματικές καμπύλες ισχύος εισόδου για πλάτος ταλάντωσης 3mm.....	61
Σχήμα 6.4. Πειραματικές καμπύλες ισχύος εξόδου για πλάτος ταλάντωσης 3mm.....	62
Σχήμα 6.5. Πειραματικές καμπύλες ισχύος εισόδου για πλάτος ταλάντωσης 4mm.....	63
Σχήμα 6.6. Πειραματικές καμπύλες ισχύος εξόδου για πλάτος ταλάντωσης 4mm.....	64
Σχήμα 6.7. Πειραματικά αποτελέσματα για πλάτος ταλάντωσης 2mm και τάση σημείου λειτουργίας ίση με 19V.....	66
Σχήμα 6.8. Πειραματικά αποτελέσματα για πλάτος ταλάντωσης 3mm και τάση σημείου λειτουργίας ίση με 23V.....	67
Σχήμα 6.9. Πειραματικά αποτελέσματα για πλάτος ταλάντωσης 4mm και τάση σημείου λειτουργίας ίση με 24V.....	68
Σχήμα 6.10. Πειραματικά αποτελέσματα για πλάτος ταλάντωσης 2mm και τάση λειτουργίας ίση με 22V.....	70
Σχήμα 6.11. Πειραματικά αποτελέσματα για πλάτος ταλάντωσης 3mm και τάση λειτουργίας ίση με 22V.....	71
Σχήμα 6.12. Πειραματικά αποτελέσματα για πλάτος ταλάντωσης 4mm και τάση λειτουργίας με 22V.....	72
Σχήμα 6.13. Ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα Buck-Boost.....	74
Σχήμα 6.14. Η απόδοση του συνολικού συστήματος με σημείο λειτουργίας ίσο με 19V και πλάτος ταλάντωσης(A) ίσο με 2mm.....	75
Σχήμα 6.15. Η απόδοση του συνολικού συστήματος με πολλά σημεία λειτουργίας.....	76
Σχήμα 6.16. Η απόδοση του συνολικού συστήματος με ένα σημείο λειτουργίας.....	76
Σχήμα 6.17. Η κυματομορφή της τάσης του πηνίου.....	77
Σχήμα 6.18. Η κυματομορφή της τάσης του πηνίου(σε μεγέθυνση).....	77
Σχήμα 6.19. Στιγμιότυπο τριγωνικής κυματομορφής του διαμορφωτή PWM.....	78
Σχήμα 6.20. Η κυματομορφή του PWM σήματος ελέγχου.....	78
Σχήμα 6.21. Η κυματομορφή του PWM σήματος ελέγχου(σε μεγέθυνση).....	79
Σχήμα 6.22. Η κυματομορφή του σήματος εξόδου του ελεγκτή PI.....	79
Σχήμα 6.23. Η κυματομορφή της τάσης εισόδου.....	80

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Συγκομιδή Ενέργειας

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα του 21^{ου} αιώνα είναι η παραγωγή, διανομή και αποθήκευση ενέργειας. Ιδιαίτερα στην ηλεκτρική ενέργεια το ζήτημα αυτό εκτείνεται σε όλα τα επίπεδα από αυτό της μικρότερης, ελάχιστης παραγωγής έως και αυτό της μεγάλης, παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο όρος συγκομιδή ενέργειας (energy harvesting) ή αλλιώς συγκομιδή ισχύος απευθύνεται στην μικρή παραγωγή ενέργειας η οποία είναι (συνήθως) της τάξεως των αρκετών δεκάδων nW έως και αρκετών εκατοντάδων mW. Κατά την συγκομιδή αυτή, η τοπικά διαθέσιμη ενέργεια από το περιβάλλον, μετατρέπεται σε ηλεκτρική διαμέσου διαφορετικών πηγών. Μια διαφορετική όψη για την συγκομιδή ισχύος είναι αυτή της αξιοποίησης της ανεκμετάλλευτης περιρρέουσας ενέργειας με σκοπό τόσο την αυτονόμηση ηλεκτρονικών διατάξεων όσο και την εύρεση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Αυτές οι πηγές ενέργειας μπορεί να είναι η ηλιακή, η φωτεινή, η θερμική, η πιεζοηλεκτρική, η ηλεκτρομαγνητική, η αιολική ή ακόμα και η κινητική. Οι εν λόγω πηγές έχουν την ικανότητα να παρέχουν μικρά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία δεν είναι επαρκή για να τροφοδοτήσουν τις ανάγκες ενός σπιτιού, είναι όμως κατάλληλα ώστε να παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια ενός απομακρυσμένου αισθητήρα, ο οποίος ενδέχεται να μην περιέχει σταθερή παροχή ισχύος ή ακόμη και μιας μπαταρίας.

1.1.1 Πηγές Συγκομιδής Ενέργειας

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται μερικές πηγές ηλεκτρικές ενέργειας κατάλληλες για συγκομιδή [1]:

Πίνακας 1.1. Πίνακας Σύγκρισης Πηγών Συγκομιδής Ενέργειας (Για τα αποτελέσματα έχουν γίνει οι εξής υποθέσεις: Φωτοβολταϊκό Στοιχείο: η απόδοσή του είναι 15%, Θερμική: η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ανθρώπινου δέρματος και του αέρα του περιβάλλοντος είναι 5K, Δονήσεων: ο άνθρωπος περπατάει [1].

Πηγή Energy Harvesting	Προέλευση ενέργειας	Παραγόμενη ισχύς($\frac{\mu W}{cm^2}$)
Ηλιακή (Φ/Β)	Εξωτερικός Χώρος	15000
	Εσωτερικός Χώρος	10
Θερμική	Ανθρώπινη	20
	Μηχανική	5000

Δονήσεων	Ανθρώπινη Μηχανική	4 200
Χωρητικότητας	Μηχανική	11.9
Ραδιοκυμάτων	Ραδιοκύματα	0.1
Βιο-Κυψέλες	Περιβάλλον	--

Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας της πηγής συγκομιδής ενέργειας, διάφορες μορφές ενέργειας μετατρέπονται σε ηλεκτρική. Για παράδειγμα η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο σημεία στον χώρο σύμφωνα με το φαινόμενο Seebeck, προκαλεί ένα χαμηλής τάσης ηλεκτρικό δυναμικό, υψηλού ρεύματος το οποίο με τον κατάλληλο dc-dc μετατροπέα μπορεί να οδηγηθεί για κατανάλωση. Στην ίδια κατηγορία συγκαταλέγεται και ένα άλλο φαινόμενο, αυτό του πυροηλεκτρισμού το οποίο εμφανίζεται σε υλικά, διηλεκτρικά, με πολική συμμετρία. Σε αυτό το φαινόμενο, υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογη με τη θερμοκρασιακή διαφορά με τον χρόνο. Κάθε διαφορά θερμοκρασίας επηρεάζει την πόλωση του υλικού με αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού μεταξύ της σύστασης του υλικού [2].

Με την ενέργεια των δονήσεων μπορεί να επιτευχθεί ηλεκτρική ενέργεια συνηθέστερα διαμέσου δύο τρόπων. Ο πρώτος τρόπος βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο μεταβάλλοντας την ηλεκτρική πόλωση του υλικού, μέσω μηχανικών παραμορφώσεων, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Σημαντικός παράγοντας είναι το πλάτος και η συχνότητα των δονήσεων, καθώς και οι παράμετροι του υλικού το οποίο χρησιμοποιείται.

Ο δεύτερος τρόπος είναι βασισμένος στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και τον νόμο Faraday. Με αυτή τη μέθοδο, ενέργεια από τις δονήσεις προκαλεί σχετική κίνηση ενός μαγνητικού σώματος σε σχέση με τις σπείρες ενός πηνίου η οποία κατα συνέπεια προκαλεί παραγωγή εναλλασσόμενου ηλεκτρικού δυναμικού στα άκρα του πηνίου λόγω της μεταβολής της μαγνητικής ροής σε αυτό.

Μια διαδεδομένη μέθοδος για την συγκομιδή ενέργειας είναι η φωτοβολταϊκή κυψέλη η οποία βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο δηλαδή στην παραγωγή ηλεκτρικού δυναμικού από την πρόσκρουση φωτονίων σε μία ένωση ημιαγωγών p-n. Τα φωτοβολταϊκά κελιά που υπάρχουν στην αγορά έχουν χαμηλές αποδόσεις που αγγίζουν τα 17-18% ενώ σε εργαστήρια έχουν φτάσει και το 43,5%.

Στην περίπτωση της συγκομιδής ενέργειας από ραδιοκύματα, η συγκομιδή πραγματοποιείται από ραδιοκύματα που υπάρχουν ήδη στο περιβάλλον για άλλους σκοπούς, όπως WiFi, Bluetooth, GSM. Σε αυτές τις περιπτώσεις η πυκνότητα ισχύος για κάθε cm^2 είναι πάρα πολύ μικρή η οποία μειώνεται με την απόσταση καθιστώντας αναποτελεσματική αυτή την χρήση της ενέργειας. Βέβαια στην περίπτωση των AM κυμάτων, υπάρχει από παράδειγμα ευρέως διαδεδομένο η κατασκευή ενός ραδιοφώνου το οποίο εκμεταλλεύεται την ενέργεια των ραδιοκυμάτων και δεν χρειάζεται μπαταρία.

Οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες είναι πηγές συγκομιδής ενέργειας οι οποίες προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα. Η ενέργεια την οποία εκμεταλλεύονται οι γεννήτριες αυτές είναι ενέργεια από την μηχανική παραμόρφωση του υλικού, δηλαδή την αλλαγή στα φυσικά χαρακτηριστικά του στοιχείου. Η ενέργεια αυτή συναντάται στο περιβάλλον σε αφθονία με διάφορους τρόπους, όπως άμεσες μηχανικές παραμορφώσεις, με δονήσεις από διάφορες πηγές, με κινήσεις του ανέμου κ.α.

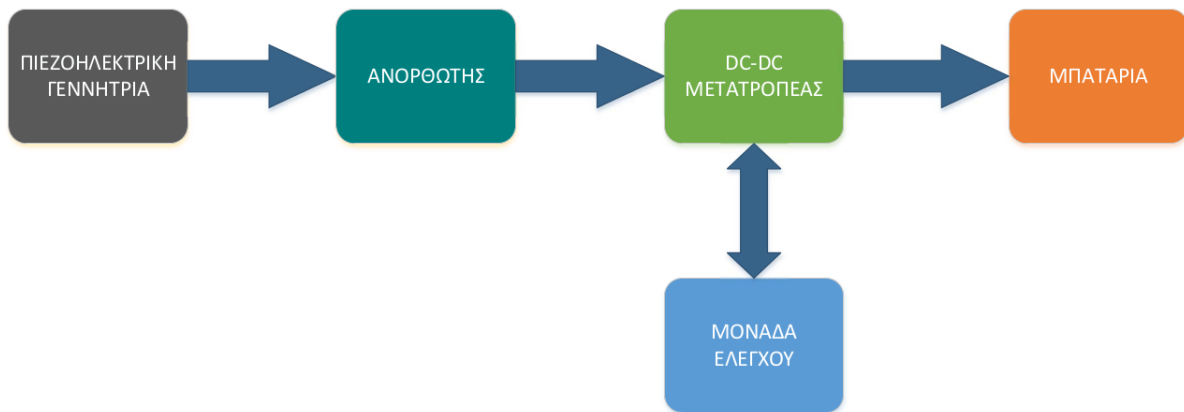
Συνοψίζοντας τα πλεονεκτήματα της χρήσης πιεζοηλεκτρικών γεννητριών είναι αρκετά:

- ◆ Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο εκμεταλλεύεται την ενέργεια που είναι διαθέσιμη στο περιβάλλον και δεν έχει ανάγκη από κάποιο είδος καυσίμου.
- ◆ Υψηλή διάρκεια ζωής της γεννήτριας.
- ◆ Δεν απαιτείται συντήρηση, αφού το στοιχείο είναι ενιαίο, χωρίς άλλα μηχανικά μέρη.
- ◆ Το στοιχείο είναι συμπαγές, μικρών διαστάσεων με χαμηλό βάρος.

Για τους παραπάνω λόγους, η χρήση ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου στην περίπτωση ενός απομακρυσμένου αισθητήρα φαίνεται ιδανική, όπου βέβαια παρέχεται μηχανική ενέργεια η οποία μπορεί να μεταδοθεί στη πιεζοηλεκτρική γεννήτρια.

1.2 Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας

Η μετατροπή όμως της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική δεν γίνεται πάντα με τον πιο αποδοτικό τρόπο με αποτέλεσμα την ανάγκη ενός συστήματος το οποίο θα φροντίζει έτσι ώστε η παραγωγή ενέργειας από την γεννήτρια να είναι η μέγιστη δυνατή. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία του συστήματος αυτού. Το σύστημα αποτελείται από μία γέφυρα ανόρθωσης, ένα κύκλωμα προσαρμογής φορτίου το οποίο οδηγεί την παραγόμενη ισχύ σε μία μπαταρία καθώς και ένα κύκλωμα ελέγχου του συνολικού συστήματος. Το προτεινόμενο σύστημα φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 1.1. Το διάγραμμα του συνολικού συστήματος που αναπτύχθηκε.

Το κύκλωμα ελέγχου υλοποιεί τον επιθυμητό αλγόριθμο μέγιστης παραγωγής ενέργειας (Maximum Power Point Tracker) ο οποίος ευρίσκει το σημείο βέλτιστης λειτουργίας της γεννήτριας.

1.3 Οργάνωση Τόμου

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αυτής σχεδιάζεται και υλοποιείται ένα αυτόνομο σύστημα για την μεταφορά της μέγιστης ισχύος από την πιεζοηλεκτρική γεννήτρια προς την μπαταρία. Στα επόμενα κεφάλαια περιγράφεται όλη τη διαδικασία για την κατασκευή του συστήματος αυτού από την μελέτη της θεωρίας των πιεζοηλεκτρικών γεννητριών, τη θεωρία των μετατροπέων συνεχούς ρεύματος μέχρι την βήμα προς βήμα σχεδίαση του ηλεκτρονικού συστήματος που επιτελεί τον σκοπό αυτό. Τα κεφάλαια της διπλωματικής περιληπτικά είναι τα εξής:

- **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.**
 - Το κεφάλαιο αυτό εισάγει τον αναγνώστη στην συγκομιδή ισχύος και ποια είναι τα κίνητρα για την μελέτη της πιεζοηλεκτρικής ενέργειας.
- **Κεφάλαιο 2: Πιεζοηλεκτρικό Φαινόμενο.**
 - Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η λειτουργία του φαινομένου, η συμπεριφορά της γεννήτριας καθώς και η πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε.
- **Κεφάλαιο 3: Τεχνικές Maximum Power Point Tracking.**
 - Το κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο στις τεχνικές MPPT. Για κάθε μέθοδο αναλύεται η βασική ιδέα, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της και καταλήγει στην επιλογή της μεθόδου που είναι αποδοτικότερη για την πιεζοηλεκτρική γεννήτρια.

- **Κεφάλαιο 4: DC-DC Μετατροπείς.**
 - Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει περιληπτικά τους πιο γνωστούς μετατροπείς συνεχούς ρεύματος που είναι κατάλληλοι για την παρούσα διπλωματική. Έπειτα ορίζονται οι προδιαγραφές και ο τύπος του μετατροπέα που θα υλοποιηθεί.
- **Κεφάλαιο 5: Προτεινόμενο Σύστημα.**
 - Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την βήμα προς βήμα σχεδίαση του προτεινόμενου συστήματος για την επίλυση του προβλήματος MPPT σε πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες.
- **Κεφάλαιο 6: Πειραματικά Αποτελέσματα.**
 - Το κεφάλαιο αυτό εμπεριέχει τις πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο ορθής λειτουργίας του συνολικού συστήματος. Τα πειραματικά αποτελέσματα από τις παραπάνω διαδικασίες αποτυπώνονται με την βοήθεια διαγραμμάτων.
- **Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα – Μελλοντικές Επεκτάσεις**
 - Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μία ανασκόπηση των κεφαλαίων και εξαγωγή συμπερασμάτων από αυτά. Τέλος γίνεται μία αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του έκτου κεφαλαίου και διάφορες προτάσεις για μελλοντική δουλειά.

Κεφάλαιο 2

Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε περιγραφή του τρόπου εκμετάλλευσης της ενέργειας του περιβάλλοντος με την χρήση των πιεζοηλεκτρικών γεννητριών. Σε αυτό το κεφάλαιο επεξηγείται η θεωρία του φαινομένου, καθώς και η συμπεριφορά των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

2.1 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μία ιδιότητα του υλικού όπου όταν εφαρμόζεται μηχανική δύναμη, τότε δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο διαμέσου του υλικού (ευθύ φαινόμενο). Αυτό ισχύει και αντίστροφα, δηλαδή ένα εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο διαμέσου του υλικού, προκαλεί μηχανική παραμόρφωση στο υλικό αυτό. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει στα μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά φερροηλεκτρικά κεραμικά υλικά.

Ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια ενός υλικού είναι κατανεμημένα στον χώρο, με τέτοιο τρόπο ώστε τα αντίθετα φορτία που χρησιμοποιούνται ακυρώνουν το ένα το άλλο. Έτσι, στο υλικό υπάρχει μία ηλεκτρική ισορροπία αφού δεν υπάρχει περίσσεια ηλεκτρικού φορτίου. Όταν όμως εφαρμόζεται μία μηχανική δύναμη, δηλαδή μία φυσική παραμόρφωση στο υλικό τότε η ηλεκτρική ισορροπία παύει να ισχύει και εμφανίζεται μία πιθανότητα για τον διαχωρισμό φορτίου από την επιφάνεια, ανάλογη με τις ιδιότητες του υλικού. Αυτές μπορεί να είναι η διηλεκτρική χωρητικότητα και η κρυσταλλική δομή του υλικού, ή με άλλα λόγια, πως τα μόρια του είναι ευθυγραμμισμένα με τον κεντρικό άξονα του κρυστάλλου. Στα μονοκρυσταλλικά υλικά, μία ασυμμετρία στην δομή του κρυσταλλικού πλέγματος είναι μια αιτία για να προκύψει το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν εφαρμόζεται ένα ηλεκτρικό δυναμικό στο πιεζοηλεκτρικό υλικό, με φορά όπως τον κρυσταλλικό πολικό προσανατολισμό του, τότε αυτό προκαλεί μια επιμήκυνση ή συστολή ανάλογα με την φορά του ηλεκτρικού πεδίου [3].

Το ευθύ φαινόμενο, δηλαδή η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην συγκομιδή ισχύος από ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό. Συνήθως τέτοια υλικά είναι τα PZT (Lead Zirconate Titanate), PVDF (Polyvinylidene Fluoride), PMN-PT (Lead Magnesium Niobate – Lead Titanate) και BaTiO₃ (Barium Titanate).

2.2 Το Μοντέλο της Πιεζοηλεκτρικής Γεννήτριας

Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει το ευθύ και αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελείται από δύο εξισώσεις, όπως αναφέρεται και στο IEEE Standard [4].

Από τις τέσσερις μαθηματικές μορφές που περιγράφουν το μοντέλο, η ποιο γνωστή είναι αυτή της φόρτισης της τάσης του υλικού:

$$S_p = s_{pq}^E \sigma_q + d_{kp}^T E_k \quad (2.1)$$

$$D_i = d_{iq} \sigma_q + \varepsilon_{ik}^\sigma E_k \quad (2.2)$$

$$i, k = 1, 2, 3; p, q = 1, 2, \dots, 6$$

Με παραμέτρους:

S_p τανυστής τάσης (strain tensor),

s_{pq}^E τανυστής ενδόσεως (compliance tensor),

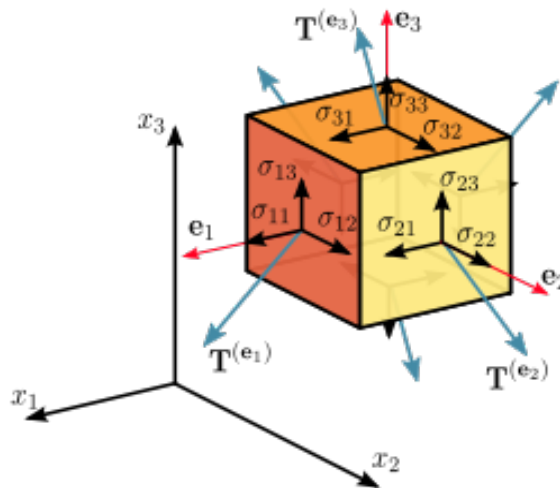
σ_q διάνυσμα της μηχανικής παραμόρφωσης (mechanical stress vector),

d_{kp} πίνακας με τις πιεζοηλεκτρικές σταθερές φόρτισης (piezoelectric charge),

E_k διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου (electric field vector),

D_i συντελεστής ηλεκτρικού εκτοπίσματος (electric displacement vector),

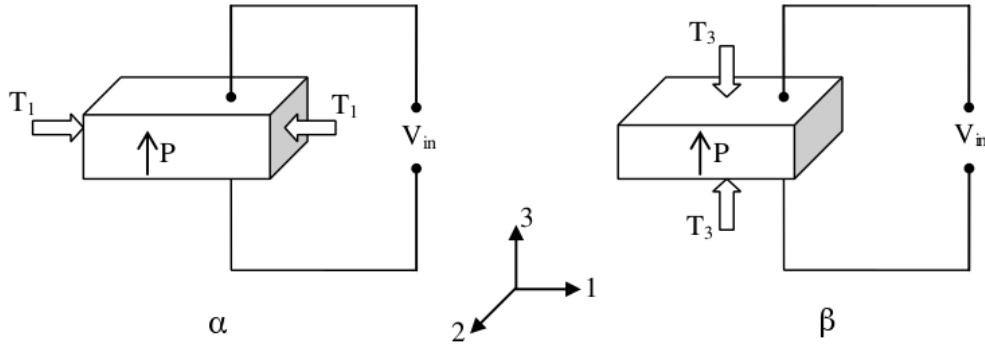
ε_{ik}^σ πίνακας με τις διηλεκτρικές μεταβλητές (permittivity) μετρούμενος σε σταθερή ένταση.



Σχήμα 2.1. Διάνυσμα τάσης [5].

2.2.1 Τρόποι Λειτουργίας Πιεζοηλεκτρικών Πηγών

Οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες όταν χρησιμοποιούνται για την συγκομιδή ισχύος, ταξινομούνται σε τυπικά δύο περιπτώσεις ανάλογα τον προσανατολισμό του μηχανικού φορτίου και τον προσανατολισμό της πόλωσης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.



Σχήμα 2.2 Περιπτώσεις 31 και 33 [6].

Η πρώτη περίπτωση όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2 (α) είναι όταν η πόλωση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι κατά τον άξονα 3 και η μηχανική πίεση εφαρμόζεται με φορά κατά τον άξονα 1. Οι εξισώσεις για αυτή τη περίπτωση περιγράφουν το μοντέλο ως εξής:

$$S_1 = s_{11}^E \sigma_1 + d_{31}^T E_3 \quad (2.3)$$

$$D_3 = d_{31} \sigma_1 + \epsilon_{33}^\sigma E_3 \quad (2.4)$$

Στην δεύτερη περίπτωση, Σχήμα 2.2 (β), η πόλωση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι κατά τον άξονα 3 και η μηχανική πίεση παρουσιάζεται στον ίδιο άξονα. Έτσι οι εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο μεταφράζονται ως εξής:

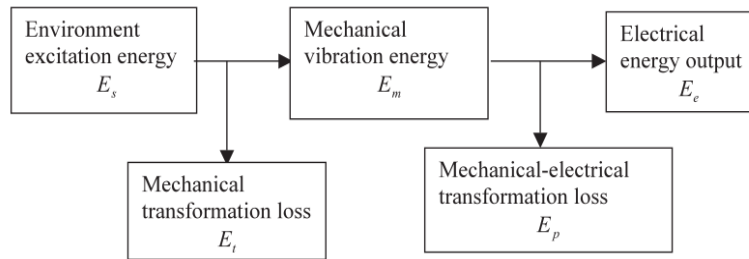
$$S_1 = s_{11}^E \sigma_1 + d_{33}^T E_3 \quad (2.5)$$

$$D_3 = d_{33} \sigma_1 + \epsilon_{33}^\sigma E_3 \quad (2.6)$$

Από τις εξισώσεις (2.4),(2.6) προκύπτει ότι η φόρτιση εκτοπίσματος που προκαλείται είναι ανάλογη των συντελεστών, d_{31} , d_{33} για την περίπτωση 31 και 33 αντίστοιχα. Από τις προδιαγραφές των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων παρατηρούμε ότι ο συντελεστής d_{33} είναι αρκετά μεγαλύτερος από τον συντελεστή d_{31} οπότε η περίπτωση 33 είναι πιο αποδοτική. Αυτό βέβαια δεν αποτελεί κανόνα αφού στην περίπτωση 33 δεν οδηγεί πάντα σε καλύτερες επιδόσεις λόγω μηχανικών αιτιών [7] ή όπως στην περίπτωση 31 η μηχανική τάση που απαιτείται για να προκύψει το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο επιτυγχάνεται με μικρότερη εφαρμόσιμη πίεση και λόγω ηλεκτρικών αιτιών [8].

2.3 Μετατροπή Μηχανικής σε Ηλεκτρική Ενέργεια

Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο τροφοδοτείται με μηχανική ενέργεια, με τη μορφή εξωτερικής δύναμης εφαρμοζόμενης προς την κατεύθυνση 1 ή 3, και παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια όμως αυτή δεν είναι ίση με την μηχανική ενέργεια που καταναλώθηκε [6]. Οπότε η μετατροπή αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί ιδανική αφού υπάρχουν απώλειες.



Σχήμα 2.3. Η ροή της ενέργειας από το περιβάλλον στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο [6].

Αρχικά η ενέργεια από το περιβάλλον, μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια δόνησης, όπου υπάρχουν μερικές απώλειες που σχετίζονται με την μέθοδο-εγκατάσταση της μετάδοσης της μηχανικής ενέργειας μέχρι το στοιχείο. Έπειτα η μηχανική ενέργεια που εφαρμόζεται στο στοιχείο μετατρέπεται με κάποιες απώλειες σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλεκτρική ενέργεια που καταλήγει στο τέλος της μετατροπής αυτής είναι $E_e = E_m - E_p$ όπου E_p η ενέργεια που χάνεται κατά την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας μέσω του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου. Η μηχανική ενέργεια που είναι ωφέλιμη για την μετατροπή της σε ηλεκτρική από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο είναι $E_m = E_s - E_t$. Έτσι ορίζονται δύο βαθμοί απόδοσης:

- Συντελεστής απόδοσης μετατροπής μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια στην πιεζοηλεκτρική γεννήτρια,

$$n_{me} = \frac{E_e}{E_m} \quad (2.7)$$

- Συντελεστής που εκφράζει την απόδοση της μεταφοράς της κινητικής ενέργειας από το περιβάλλον στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο.

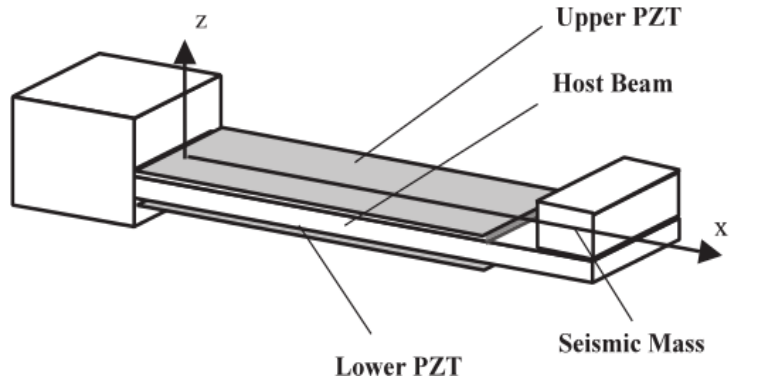
$$n_m = \frac{E_m}{E_s} \quad (2.8)$$

Οι δύο αυτοί βαθμοί απόδοσης επηρεάζουν το ποσοστό της χρήσιμης ενέργειας που αντλείται από το περιβάλλον και μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Είναι λοιπόν σημαντικό να λαμβάνουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη τιμή. Αυτό σημαίνει ότι για τον συντελεστή

n_m μια βέλτιστη σχεδίαση του μηχανικού μέρους μεταφοράς ενέργειας και για τον συντελεστή n_{me} υψηλότερο συντελεστή σύζευξης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (coupling factor) και χαμηλότερο συντελεστή Q του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου [6].

2.4 Μηχανικό Μοντέλο Δοκού-Πιεζοηλεκτρικού Στοιχείου

Η μετατροπή ενέργειας από μηχανική σε ηλεκτρική εξαρτάται όχι μόνο από τον βαθμό απόδοσης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου αλλά και από τον βαθμό απόδοσης της φυσικής σύζευξης μεταξύ της γεννήτριας των μηχανικών παραμορφώσεων και του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου όπως είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο. Ένας τρόπος για την αποδοτική εφαρμογή της μηχανικής πίεσης κατά την κατεύθυνση 31 είναι ένα σύστημα δοκού-πιεζοηλεκτρικού. Το σύστημα αυτό αποτελεί μια κατασκευή με στοιχεία μία δοκό συγκολλημένη με ένα πιεζοηλεκτρικό στρώμα. Με αυτό τον τρόπο κάθε παραμόρφωση που υπόκειται η δοκός, μεταφέρεται και στο πιεζοηλεκτρικό στρώμα [9].



Σχήμα 2.4. Μοντέλο Δοκού-Πιεζοηλεκτρικού [6].

Για να μοντελοποιήσουμε το σύστημα της δοκού-πιεζοηλεκτρικού χρησιμοποιούμε την ελαστική θεωρία. Αρχικά θεωρούμε το πάχος του συστήματος ομοιόμορφο. Έπειτα για την μετατόπιση κατά την x -κατεύθυνση για ένα σημείο της δοκού, έχουμε:

$$u_x = u_0(x, t) - z \frac{\partial \omega(x, t)}{\partial x} \quad (2.9)$$

όπου u_0 : αξονική μετατόπιση, η οποία αγνοείται σε αυτή τη περίπτωση
 ω : εγκάρσια μετατόπιση της δοκού
 z : απόσταση από το ουδέτερο επίπεδο

Η τάση κατά την x -κατεύθυνση εκφράζεται ως:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \quad (2.10)$$

Αν υποθέσουμε ότι ένα λεπτό στρώμα πιεζοηλεκτρικού προστεθεί στην επιφάνεια της δοκού, δεν μεταβάλλεται το παραμορφωμένο σχήμα της δοκού, αλλά αυξάνει την

ισοδύναμη ακαμψία του συστήματος στο λύγισμα της δοκού. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι το πλάτος της ταλάντωσης με το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο θα είναι μικρότερο από το πλάτος χωρίς το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Αναλύοντας το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο έχουμε ότι η φόρτιση του κατά την x -κατεύθυνση στο σύστημα δοκού-πιεζοηλεκτρικού θεωρείται μηδέν, δηλαδή $D_x=0$. Η πίεση (stress) κατά την z -κατεύθυνση θεωρείται μηδέν μέσα στο πιεζοηλεκτρικό στρώμα, δηλαδή $\sigma_{z|z<\Delta}=0$. Η θεώρηση αυτή είναι επιτρεπτή μόνο όταν το πάχος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι πολύ λεπτό σε σύγκριση με το πάχος της δοκού. Η ηλεκτρική μετατόπιση στην z -κατεύθυνση μέσα στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο εκφράζεται ως συνάρτηση της τάσης (strain) στην x -κατεύθυνση και το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται μέσα στο πιεζοηλεκτρικό στρώμα [6]:

$$D_z = e_{31}\varepsilon_x + \varepsilon_{33}E_z \quad (2.11)$$

όπου e_{31} : πιεζοηλεκτρική σταθερά στην κατεύθυνση 31

ε_{33} : διηλεκτρική σταθερά

E_z : ηλεκτρικό φορτίο στην z -κατεύθυνση στο πιεζοηλεκτρικό στρώμα

Το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου μπορεί να εκφραστεί ως το ολοκλήρωμα της ηλεκτρικής μετατόπισης σε όλη την επιφάνεια:

$$Q = \int_A D_z dA = b \int_{l_0}^{l_1} (e_{31}\varepsilon_x + \varepsilon_{33}E_z) dx \quad (2.12)$$

όπου E_z : το ηλεκτρικό φορτίο μέσα στο πιεζοηλεκτρικό στρώμα

b : το πλάτος της δοκού (θεωρείται σταθερό σε όλη τη δοκό)

Το δυναμικό στην επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού στρώματος μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφο επειδή σε όλη την επιφάνεια του απλώνεται το ηλεκτρόδιο. Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην πάνω επιφάνεια και την κάτω επιφάνεια συμβολίζεται με v και μπορεί να εκφραστεί ως εξής [6]:

$$E_z = -\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{v}{\Delta} \quad (2.13)$$

όπου Δ : το πάχος του πιεζοηλεκτρικού στρώματος.

Το πάχος αυτό μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφο σε όλη την επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού στρώματος.

Αντικαθιστώντας την (2.13) στην (2.12) έχουμε ότι:

$$\begin{aligned} Q &= -b \int_{l_0}^{l_1} e_{31} \frac{h}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} dx + b \int_{l_0}^{l_1} \varepsilon_{33} E_z dz \\ &= \frac{b h e_{31}}{2} [\varphi(l_0) - \varphi(l_1)] - b L \varepsilon_{33} \frac{v}{\Delta} \end{aligned} \quad (2.14)$$

όπου $\varphi(x, t) = \frac{\partial \omega(x, t)}{\partial x}$: είναι η ευελιξία της δοκού,
 $\varphi(l_0)$, $\varphi(l_1)$: είναι οι αντίστοιχες τιμές στην αρχή και στο τέλος του
 πιεζοηλεκτρικού στρώματος
 h : το πάχος της δοκού
 L : το μήκος του πιεζοηλεκτρικού στρώματος στην επιφάνεια της δοκού.

Εδώ χρειάζεται να αναφερθεί ότι οι ποσότητες του φορτίου, του ρεύματος και της τάσης είναι όλες συναρτήσεις του χρόνου. Η συχνότητα των παραπάνω συναρτήσεων εξαρτάται από την συχνότητα των μηχανικών ταλαντώσεων. Εξαιτίας του δυναμικού που αναπτύσσεται, λόγω της φόρτισης στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, ρέει ένα ρεύμα μέσω του εξωτερικού φορτίου του οποίου το πλάτος αλλάζει με την συχνότητα:

$$I = \omega Q \quad (2.15)$$

Η σχέση μεταξύ της τάσης και του ρεύματος για ένα ηλεκτρικό κύκλωμα καθαρά ωμικό είναι:

$$I = \frac{v}{R} \quad (2.16)$$

και η τάση έχει την ίδια φάση με το ρεύμα. Αν συνδυάσουμε τις εξισώσεις (2.14), (2.15), (2.16), το πλάτος του ρεύματος μπορεί να εκφραστεί ως:

$$I_m = \frac{\omega b h e_{31} [\varphi(l_0) - \varphi(l_1)]}{2(1 + b L \varepsilon_{33} \frac{\omega R}{\Delta})} R \quad (2.17)$$

Αν το εξωτερικό κύκλωμα που συνδέεται είναι καθαρά ωμικό τότε η εξαγόμενη ισχύς μπορεί να εκφραστεί ως:

$$P = I v = I^2 R \quad (2.18)$$

Στην σταθερή κατάσταση (steady-state) ισορροπίας του συστήματος με σταθερή ταλάντωση η μέση ισχύς εκφράζεται ως εξής:

$$\bar{P} = \frac{v_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega^2 b^2 h^2 e_{31}^2 [\varphi(l_0) - \varphi(l_1)]^2}{8(1 + b L \varepsilon_{33} \frac{\omega R}{\Delta})^2} R \quad (2.19)$$

Για μία δοκό υποστήριξης σε ένα συγκεκριμένο σύστημα δονήσεων, οι καταστάσεις δόνησης μπορούν αναλυθούν χρησιμοποιώντας την διαχώριση των μεταβλητών από την ελαστική θεωρία[10] :

$$\omega(x, t) = W(x) e^{j\omega t} \quad (2.20)$$

όπου $W(x)$ είναι η συνάρτηση σχήματος στην δοκό υποστήριξης.

$$W(x)|_{x=L_b} = A \quad (2.21)$$

όπου A το πλάτος των δονήσεων, δηλαδή το πλάτος της ταλάντωσης μετρούμενο στο άκρο της δοκού. Από την διαχώριση μεταβλητών μπορούμε να λάβουμε και μια περιγραφή για την ελαστικότητα της κάμψης:

$$\varphi(l_0) - \varphi(l_1) = (W'(l_0) - W'(l_1)) e^{j\omega t} = \bar{A} e^{j\omega t} \quad (2.22)$$

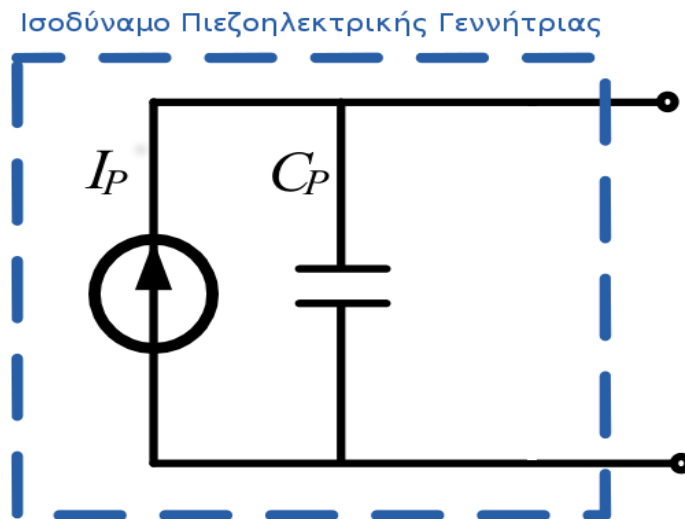
Οπότε αντικαθιστώντας την (2.22), στην (2.19) έχουμε:

$$\bar{P} = vI = \frac{\omega^2 b^2 h^2 e_{31}^2 \bar{A}^2}{4(1 + b L \epsilon_{33} \frac{\omega R}{\Delta})^2} R \quad (2.23)$$

η οποία είναι και η τελική μορφή της μέσης ισχύος με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας και τις συνθήκες ταλάντωσης καθώς και την αντίσταση του εξωτερικού φορτίου.

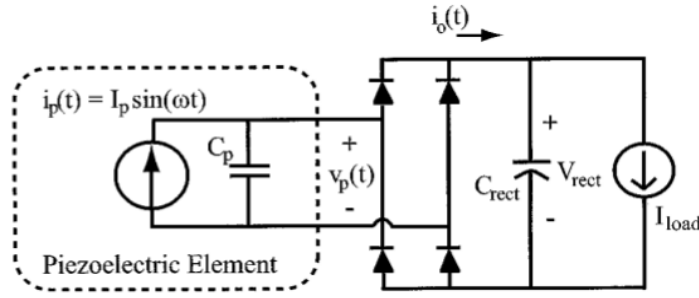
2.5 Ηλεκτρικό Ισοδύναμο Μοντέλο

Παραπάνω αναλύθηκε το μοντέλο δοκού-πιεζοηλεκτρικού και διατυπώθηκε ο τύπος για την μέση ισχύ. Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας για χρήση του στην προσομοίωση του κυκλώματος. Το ισοδύναμο κύκλωμα μοντελοποιείται, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, από μία πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος (I_P) παράλληλα με την εσωτερική χωρητικότητα (C_P) του στοιχείου.



Σχήμα 2.5. Ισοδύναμο μοντέλο Πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.

Η πηγή ρεύματος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου θεωρείται ημιτονοειδούς μορφής, και περιγράφεται από την εξίσωση: $i_p = I_p \sin(\omega t)$ όπου $\omega = 2\pi f$ με f τη συχνότητα ταλάντωσης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και I_p το πλάτος του ρεύματος που εξαρτάται άμεσα από το μηχανικό πλάτος της ταλάντωσης του στοιχείου και θεωρείται σχετικά σταθερό ανεξάρτητα του φορτίου που συνδέεται στα άκρα του [9].



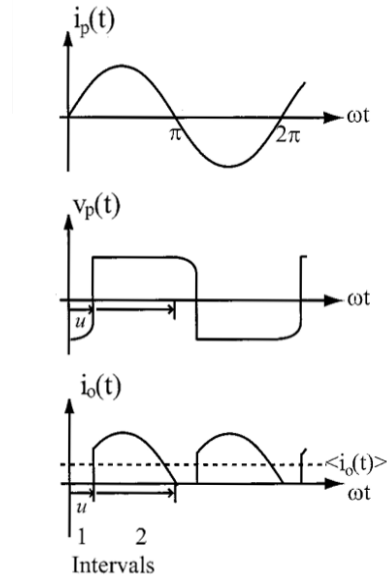
Σχήμα 2.6. Το πιεζοηλεκτρικό μοντέλο με ac-dc γέφυρα και φορτίο.

Η τάση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι εναλλασσόμενη, οπότε χρειάζεται μία γέφυρα για να μετατρέψει την τάση σε συνεχή και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την φόρτιση της μπαταρίας. Το κύκλωμα που απαιτείται για την μετατροπή αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο συνδέεται με έναν ανορθωτή και έπειτα με έναν πυκνωτή φιλτραρίσματος C_{rect} παράλληλα με το φορτίο. Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζονται οι κυματομορφές του προηγούμενου κυκλώματος όπου φαίνεται η τάση εξόδου του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, με μέγιστη τάση την V_{rect} καθώς και το ρεύμα εξόδου που διαρρέει το φορτίο. Οι κυματομορφές διαιρούνται σε δύο χρονικές περιόδους. Στην πρώτη περίπτωση (u_1) το ρεύμα της πηγής (I_p) φορτίζει την εσωτερική χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Στην δεύτερη περίοδο (u_2) το ρεύμα ρέει από το πιεζοηλεκτρικό προς τον πυκνωτή C_{rect} .

Το ρεύμα $i_o(t)$ περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{C_{rect}}{C_{rect} + C_p} I_p \approx I_p \quad (2.24)$$

$$i_o(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \omega t \leq u \\ \frac{C_{rect}}{C_{rect} + C_p} I_p |\sin(\omega t)|, & u \leq \omega t \leq \pi \end{cases} \quad (2.25)$$



Σχήμα 2.7. Κυματομορφές κυκλώματος Σχήματος 2.6

Αν υποθέσουμε ότι $C_{rect} \gg C_p$ τότε η πλειονότητα του ρεύματος οδηγείται στο φορτίο, δηλαδή:

$$\frac{C_{rect}}{C_{rect} + C_p} I_p \approx I_p \quad (2.26)$$

Έτσι η dc συνιστώσα του ρεύματος, αναλύεται από την:

$$\langle i_o(t) \rangle = \frac{2 I_p}{\pi} - \frac{2 V_{rect} \omega C_p}{\pi} \quad (2.27)$$

Οπότε συνθέτουμε την εξίσωση της παραγόμενης ενέργειας, με βάση την V_{rect} :

$$\langle P(t) \rangle = \frac{2 V_{rect}}{\pi} (I_p - V_{rect} \omega C_p) \quad (2.28)$$

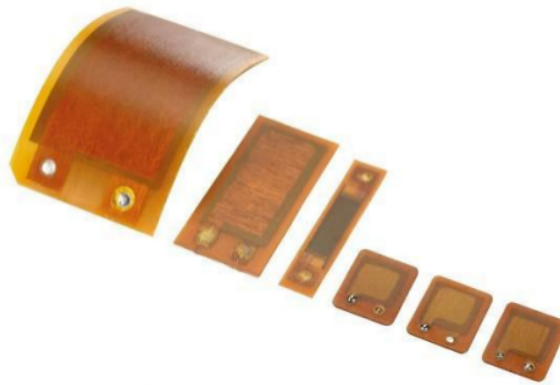
Άρα για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας μας ενδιαφέρει να βρούμε τις τιμές των I_p και C_p της γεννήτριας του εργαστηρίου. Από το τεχνικό φυλλάδιο του κατασκευαστή αποτυπώνονται οι καμπύλες παραγωγής ισχύος της γεννήτριας για σταθερές συνθήκες ταλάντωσης και κυκλωματική διάταξη ίδια με αυτή του Σχήματος 2.6. Η εξίσωση που περιγράφει την σχέση της τάσης εισόδου και την αντίσταση φορτίου με τις τιμές I_p και C_p είναι η εξής:

$$V_o = I_p \frac{R}{\sqrt{(1 + (\omega C_p R)^2)}} \quad (2.29)$$

Από τις καμπύλες που παρέχονται στο τεχνικό φυλλάδιο και με τη βοήθεια της εξίσωσης (2.29) οι τιμές που εξάγαμε για το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο του εργαστηρίου είναι $I_p^{rms} = 51.266 \mu A$ και $C_p = 82.894 nF$.

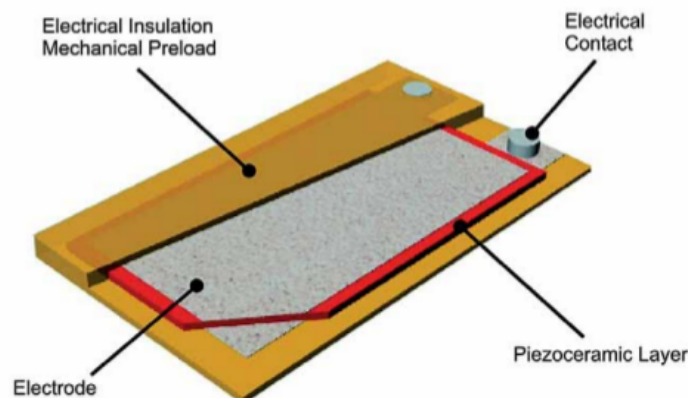
2.6 Πιεζοηλεκτρική Γεννήτρια DuraAct P876A.12

Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο που υπάρχει στον χώρο του εργαστηρίου και χρησιμοποιήθηκε στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι το DuraAct P-876.A12 το οποίο κατασκευάζεται από την εταιρία Physik Instrumente. Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο αυτό εκτός από γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος είναι ταυτόχρονα και αισθητήρας (sensor) και ενεργοποιητής (actuator).



Σχήμα 2.8. Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία

Αποτελείται από ένα κεραμικό πιεζοηλεκτρικό στρώμα επικαλυπτόμενο με ηλεκτρόδια στις δύο πλευρές του, άνω και κάτω. Η σύσταση του φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Περιβάλλεται από ένα στρώμα πολυμερούς υλικού το οποίο το προστατεύει, απομονώνει και ταυτόχρονα προσδίδει μια μικρή μηχανική τάση στο στοιχείο. Στην επάνω πλευρά του υπάρχουν και οι ηλεκτρικές επαφές του με τις οποίες συνδέουμε το στοιχείο με το εξωτερικό κύκλωμα. Το κεραμικό πιεζοηλεκτρικό στρώμα είναι το PIC255 το οποίο ανήκει στην κατηγορία των μαλακών πιεζοηλεκτρικών υλικών.



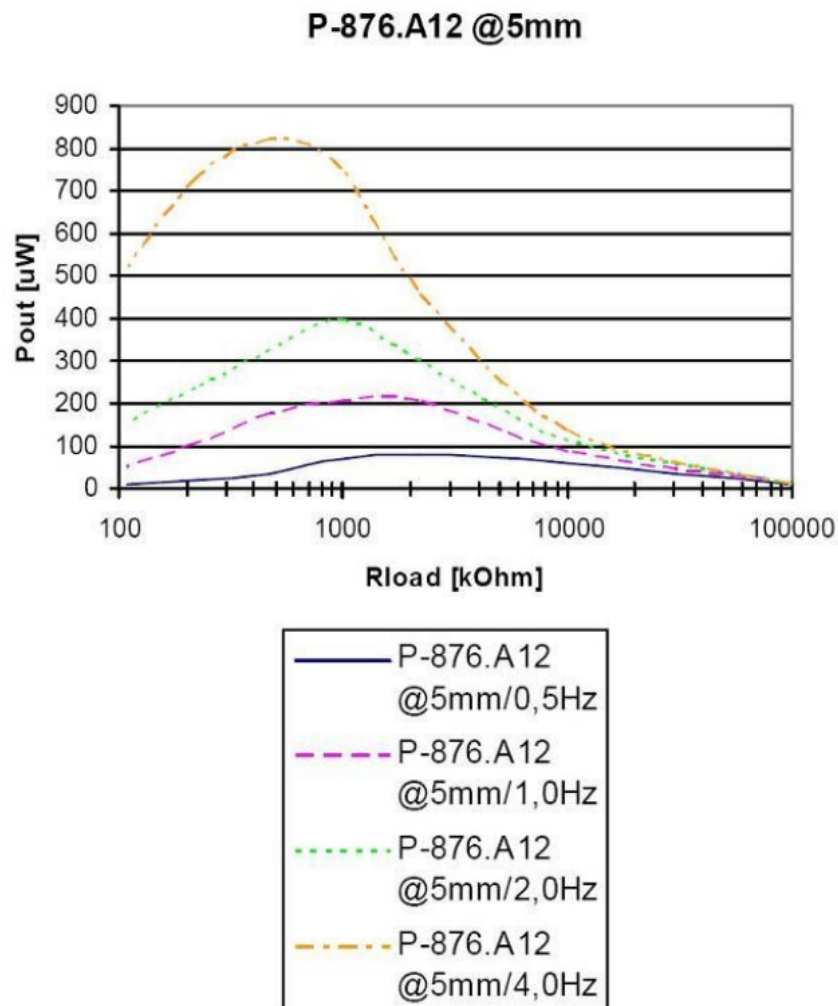
Σχήμα 2.9. Πιεζοηλεκτρική Γεννήτρια P876.A12

Τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας P-876.A12 συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά πιεζοηλεκτρικού στοιχείου P876-A12.

Model	Operating Voltage(V)	Min. lateral contraction ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Rel. lateral contraction ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{V}$)	Blocking Force (N)	Dimensions (mm)	Min. Bending radius(mm)	Piezo ceramic height(μm)	Electrical Capacitance (nF) $\pm 20\%$
P876.A12	-100 to 400	650	1.3	265	61x35x0.5	20	200	90

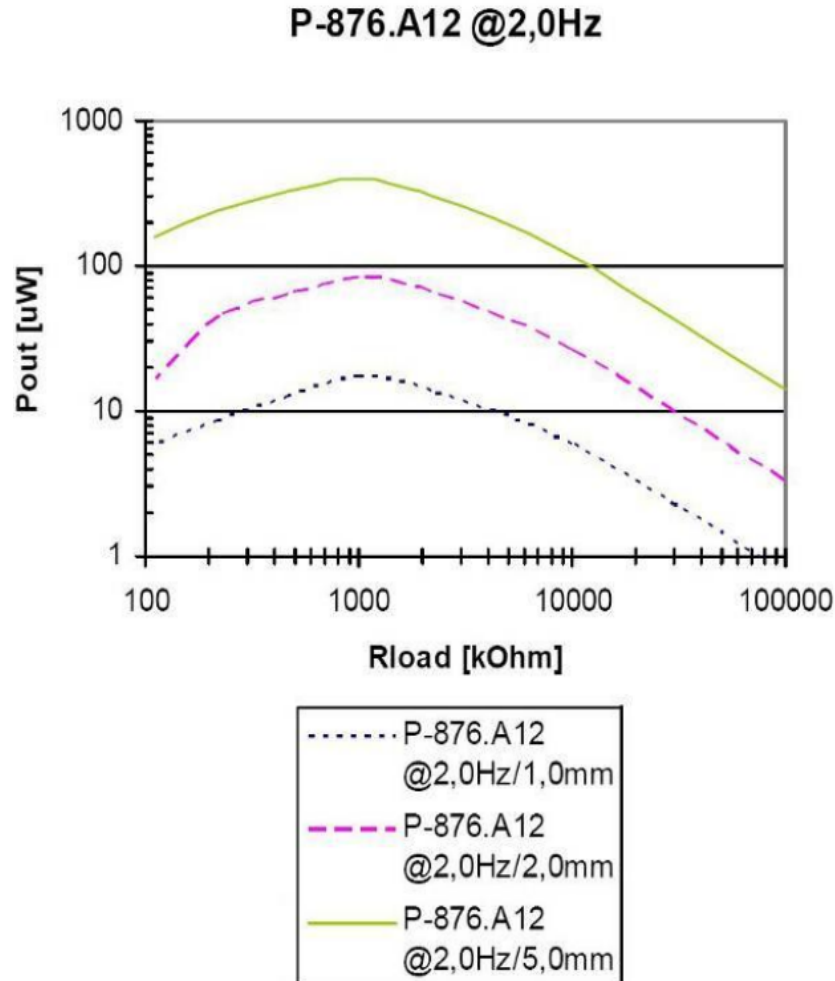
Η κατασκευάστρια εταιρία εκτός από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του στοιχείου P876.A12 εκθέτει και διάφορες καμπύλες παραγωγής ισχύος, εξαγόμενες από πειράματα με σταθερές συνθήκες ταλάντωσης για διάφορες τιμές αντιστάσεων ως συνδεδεμένο φορτίο (Σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10. Η παραγωγή ισχύος με βάση την αντίσταση εισόδου για διάφορες συχνότητες.

Αρχικά παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα ταλάντωσης, τόσο αυξάνεται γραμμικά και η παραγωγή ισχύος. Έπειτα παρατηρούμε τα σημεία όπου μεγιστοποιείται η ισχύς όπου η αντίσταση εισόδου έχει τιμές από 650kΩ έως 1.5MΩ. Στο επόμενο

σχήμα παρουσιάζονται οι καμπύλες ισχύος για διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης. Η παραγωγή ενέργειας αυξάνεται όσο μεγαλώνει το πλάτος της μηχανικής παραμόρφωσης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Σε αυτή την περίπτωση η αντίσταση εισόδου του στοιχείου παραμένει σταθερή στις συνθήκες μέγιστης παραγωγής ισχύος.



Σχήμα 2.11. Η παραγωγή ισχύος με βάση την αντίσταση εισόδου για διαφορετικά πλάτη ταλάντωσης.

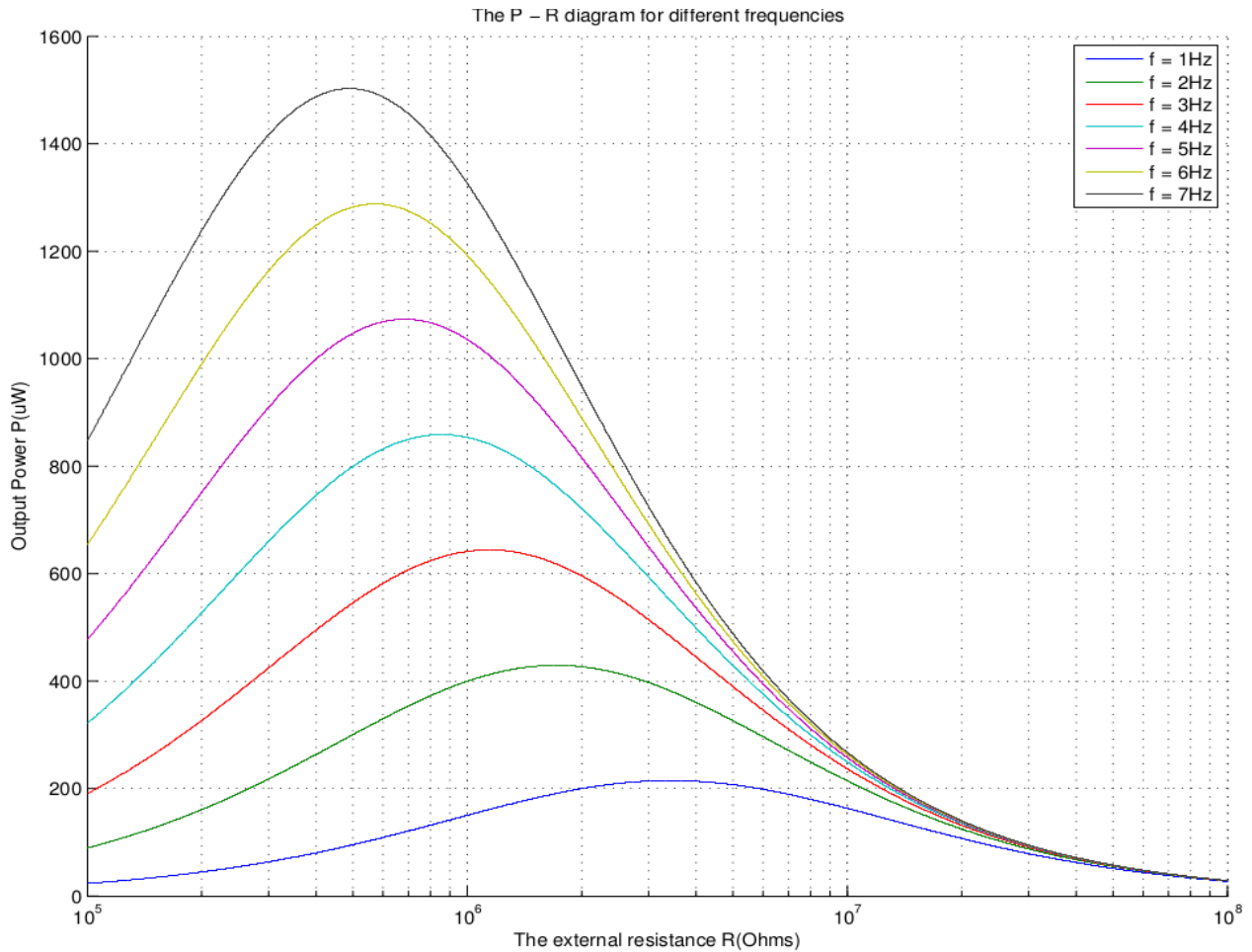
2.7 Προσομοιώσεις Μοντέλων

Με σκοπό την τεκμηρίωση των μοντέλων, τόσο αυτό της δοκού-πιεζοηλεκτρικού όσο και του ισοδύναμου ηλεκτρικού και για να γίνει η συμπεριφορά της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας πιο κατανοητή, υλοποιήθηκαν μερικές προσομοιώσεις με την βοήθεια του Simulink της Matlab και τα scripts της Matlab. Σημαντική βοήθεια για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μοντέλων υπήρξε το τεχνικό εγχειρίδιο του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.

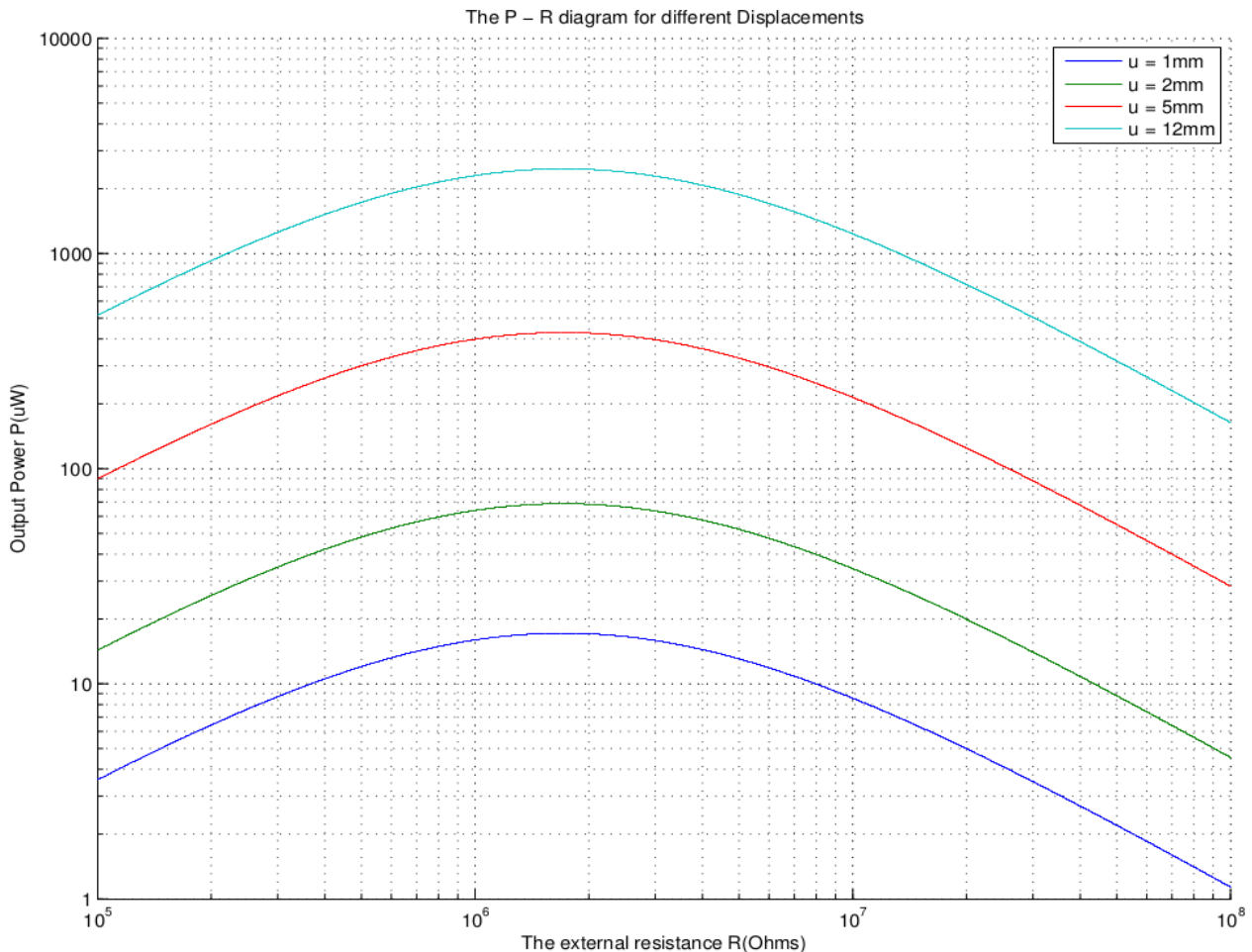
Για το μοντέλο του συστήματος δοκού-πιεζοηλεκτρικού υλοποιήθηκε script αρχείο το οποίο με βάση την σχέση (2.23) που έχει περιγραφεί στην ενότητα 2.4, προσομοιώνει την συμπεριφορά της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας με βάση τα γεωμετρικά

χαρακτηριστικά και τις παραμέτρους του στοιχείου όπως αναφέρονται στα τεχνικά εγχειρίδια του καθώς και τις συνθήκες ταλάντωσης που θέσαμε.

Οι καμπύλες παραγωγής ισχύος που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 2.12. Καμπύλη P – R για διάφορες τιμές συχνότητας ταλάντωσης



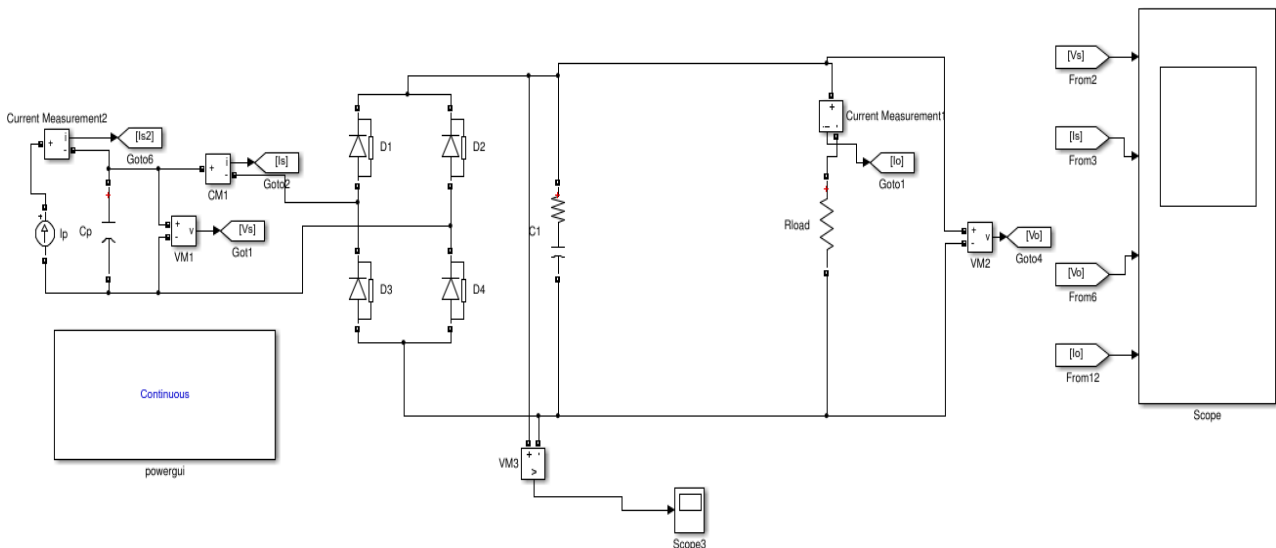
Σχήμα 2.13. Η καμπύλη $P - R$ για διάφορες τιμές πλάτους ταλάντωσης με $f=2\text{Hz}$.

Οι παραπάνω καμπύλες βασίζονται στο μοντέλο της δοκού-πιεζοηλεκτρικού. Το μοντέλο αυτό ακολουθεί πιστά τα πειραματικά δεδομένα που εμφανίζονται στο τεχνικό εγχειρίδιο της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε το μοντέλο έγκυρο και να εξάγουμε συμπεράσματα από αυτό.

Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζονται οι καμπύλες ισχύος ως προς την αντίσταση στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου για διάφορες συχνότητες ταλάντωσης. Παρατηρούμε ότι έχουμε μία ολίσθηση προς τα αριστερά στην τιμή της αντίστασης που εμφανίζεται η μέγιστη παραγωγή ενέργειας όσο η συχνότητα αυξάνεται. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν υπολογίσουμε με τον τύπο της ισχύος $P = VI$, την τάση στα σημεία μέγιστης παραγωγής ενέργειας, η τάση παραμένει σταθερή με μικρές αποκλίσεις, γύρω στα **20V**. Αυτή η παρατήρηση είναι πολύ σημαντική για την επιλογή της μεθόδου MPPT. Στο δεύτερο διάγραμμα αποτυπώθηκαν οι αντίστοιχες καμπύλες ισχύος για διάφορες τιμές πλάτους μηχανικής παραμόρφωσης με σταθερή συχνότητα ταλάντωσης $f = 2\text{Hz}$. Παρατηρούμε ότι η αντίσταση εισόδου παραμένει σταθερή στην μέγιστη παραγωγή ισχύος και η παραγωγή ισχύος αυξάνεται σε μικρότερο βαθμό από ότι παρατηρούμε με την αύξηση της συχνότητας ταλάντωσης. Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι η τάση εξόδου του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου P876-A12 κυμαίνεται από τα 4V έως τα 50V με σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος τα 20V. Δηλαδή αρκετά υψηλή τάση. Το ρεύμα όμως που δύναται να παρέχει η πιεζοηλεκτρική

γεννήτρια είναι της τάξεως των 20-30μΑ. Έτσι παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραγωγή ισχύος για το συγκεκριμένο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο έχει εύρος τιμών από 100μW έως 1mW. Οι τιμές αυτές παίζουν σημαντικό ρόλο στην σχεδίαση του συστήματος.

Στο δεύτερο σκέλος των προσομοιώσεων κατασκευάστηκε μοντέλο στο Simulink (Σχήμα 2.14) με το ισοδύναμο ηλεκτρικό μοντέλο της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της πηγής. Το μοντέλο παρέχει δυναμική αλλαγή του φορτίου της πηγής και ακολουθεί την διάταξη του Σχήματος 2.6.



Σχήμα 2.14. Μοντέλο Πιεζοηλεκτρικής Γεννήτριας σε περιβάλλον Simulink.

Το παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την εξέταση της συμπεριφοράς της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας ως προς τα ηλεκτρικά της χαρακτηριστικά και το εξωτερικό φορτίο. Το περιβάλλον του Simulink μας έδωσε τη δυνατότητα για την προσαρμογή διαφορετικών φορτίων στη γεννήτρια, μέτρηση ρευμάτων και τάσεων που αναπτύσσονται σε κάθε στοιχείο και λήψη κυματομορφών. Σε δεύτερο επίπεδο, μέσω του εργαλείου αυτού, προσομοιώθηκε και ο ολόκληρος ο μετατροπέας buck-boost για την μέτρηση της καταπόνησης (μέγιστων ρευμάτων) του κάθε στοιχείου καθώς και μελέτη της παραγόμενης ισχύς της γεννήτριας.

2.8 Πειραματική Διάταξη

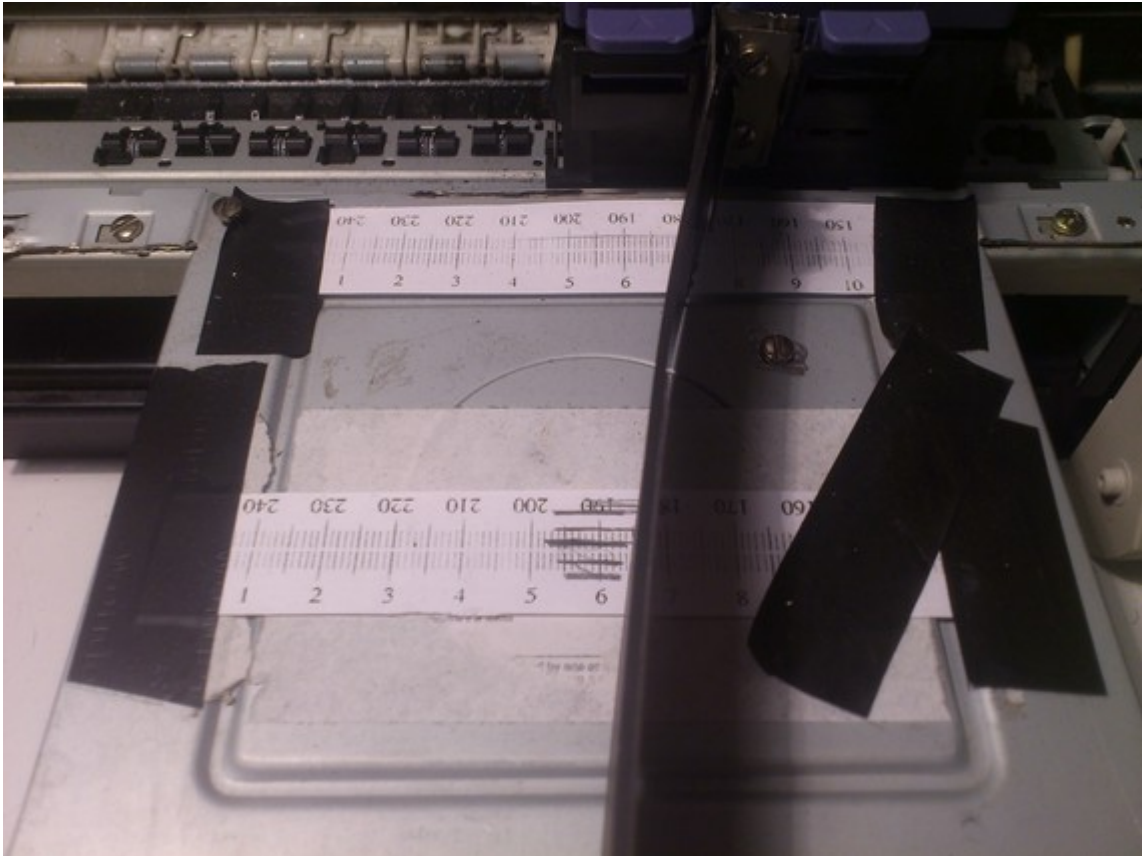
Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκε μία διάταξη ικανή να ταλαντώνει το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο P876-A12 με ρυθμιζόμενες συνθήκες ταλάντωσης. Για την κατασκευή αυτή χρησιμοποιήθηκε ένας παλαιός εκτυπωτής Epson ο οποίος υπέστη μερικές τροποποιήσεις.



Σχήμα 2.15. Η πειραματική διάταξη.



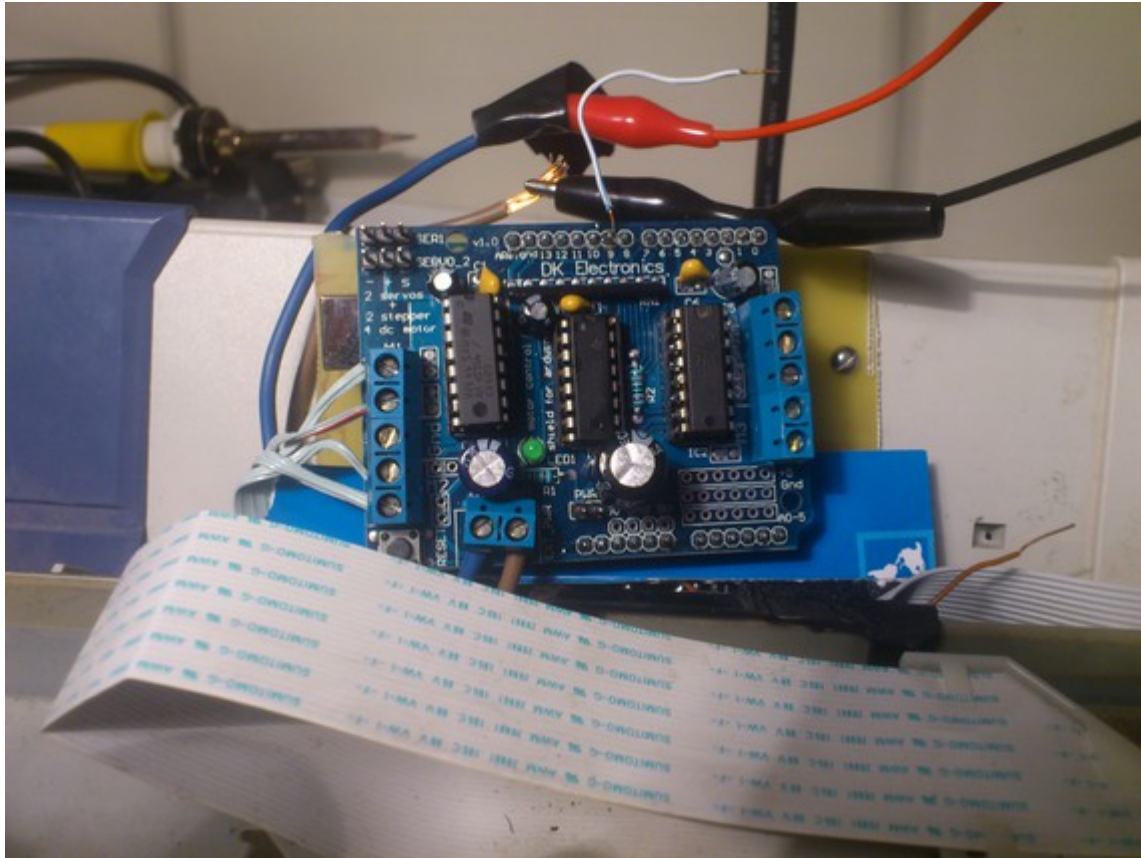
Σχήμα 2.16. Το stepper motor της κατασκευής.



Σχήμα 2.17. Το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο επάνω στην δοκό.

Από τον εκτυπωτή αφαιρέθηκαν τα πλαστικά καπάκια καθώς και διάφορα μεταλλικά μέρη που εμπόδιζαν την κίνηση της γεννήτριας. Παράλληλα αποσυνδέθηκαν οι επαφές του μοτέρ από την κεντρική πλακέτα και έγινε αναγνώριση των στοιχείων του. Έπειτα πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλες προσθήκες πλαισίων για την στήριξη της δοκού (αποτελούμενη από ανθρακόνημα), η οποία φιλοξενεί την πιεζοηλεκτρική γεννήτρια. Προσαρμόστηκε και μία κλίμακα μέτρησης της μετατόπισης από την θέση ισορροπίας της μηχανικής ταλάντωσης.

Για την ενεργοποίηση του μοτέρ, το οποίο ανήκει στην κατηγορία των βηματικών μοτέρ, χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα ανάπτυξης Arduino καθώς και το κατάλληλο shield (επέκταση) το οποίο περιλαμβάνει τα ολοκληρωμένα τσιπ οδηγών (drivers) για την οδήγηση του μοτέρ και προσαρμόζεται σε αυτό. Υλοποιήθηκε ένα αρχείο script για την κίνηση του μοτέρ μέσω του Arduino το οποίο αλληλεπιδρά με τον χρήστη μέσω τερματικού και μπορεί να μεταβάλλει τις συνθήκες ταλάντωσης χωρίς διακοπή (on-line). Πραγματοποιήθηκαν αρκετά πειράματα με διάφορες συνθήκες, είτε στην συχνότητα είτε στο πλάτος ταλάντωσης, για τον έλεγχο καλής λειτουργίας και μέγιστης λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα 2.18. Το Arduino(κάτω) και ο driver του stepper moter.

Κεφάλαιο 3

Τεχνικές Maximum Point Power Tracking

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η απομάστευση της μέγιστης παραγωγής ισχύος από πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες μέσω της σχεδίασης και κατασκευής ενός συστήματος που θα επιτυγχάνει το σκοπό αυτό. Το σύστημα αυτό ακολουθεί μία διαδικασία η οποία ονομάζεται εντοπισμός σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος (Maximum Point Power Tracking). Για την εύρεση του σημείου αυτού, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους και παρουσιάζουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα η καθεμία.

3.1 Μέθοδος Σταθερής Τάσης (Constant Voltage)

Η μέθοδος Σταθερής Τάσης (CV), είναι μία τεχνική MPPT η οποία στοχεύει στην λειτουργία της πηγής (π.χ. πιεζοηλεκτρικό στοιχείο) σε μια συγκεκριμένη τιμή τάσης εξόδου του, η οποία καλείται και τάση V_{ref} . Η τιμή της τάσης αυτής (V_{ref}) εγγυάται ότι το στοιχείο από το οποίο αντλείται η ισχύς λειτουργεί στο σημείο MPP και βασίζεται στο γεγονός ότι η τάση V_{ref} βρίσκεται πολύ κοντά στην ονομαστική τάση λειτουργίας του στοιχείου. Οπότε ο μόνος στόχος του συστήματος είναι να διατηρήσει την τάση εξόδου σταθερή κοντά στην τάση αναφοράς V_{ref} . Αυτό μπορεί να γίνει εξ'αρχής από τον σχεδιασμό του μετατροπέα, με ρύθμιση σταθερού κύκλου λειτουργίας (D) ή με την χρήση ενός PI ελεγκτή με ανατροφοδότηση της τάσης εισόδου. Βέβαια η χρήση ενός PI ελεγκτή έχει το σημαντικό πλεονέκτημα ότι είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου και έτσι δεν επηρεάζεται από εξωτερικές μεταβολές.

Η μέθοδος Σταθερής Τάσης (CV) είναι προφανές ότι δεν αποτελεί τεχνική εντοπισμού σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος αφού δεν πραγματοποιεί κινήσεις εντοπισμού, αλλά οδηγεί την τάση εξόδου της πηγής σε μια προκαθορισμένη τιμή η οποία είναι ακριβώς ή πολύ κοντά στο σημείο MPP. Οπότε το κυριότερο μειονέκτημα της είναι ότι μεταβάλλοντας τις συνθήκες λειτουργίας της πηγής, το σύστημα δεν μπορεί να ανταποκριθεί στο νέο σημείο MPP αποκλίνοντας από αυτό. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε πηγές χαμηλής ισχύος όπου η ισχύς του ελεγκτή είναι συγκρίσιμη με αυτή της παραγωγής από την πηγή.

3.2 Μέθοδος Τάσης Ανοικτοκυκλώματος

Η μέθοδος αυτή είναι όμοια με τη μέθοδο Σταθερής Τάσης (CV). Βασίζεται στην ιδέα ότι η τάση του σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος είναι ένα ποσοστό της τάσης ανοικτοκύκλωσης της πηγής (V_{oc}) [11].

Ισχύει δηλαδή:

$$V_{MPP} = k V_{oc} \quad (3.1)$$

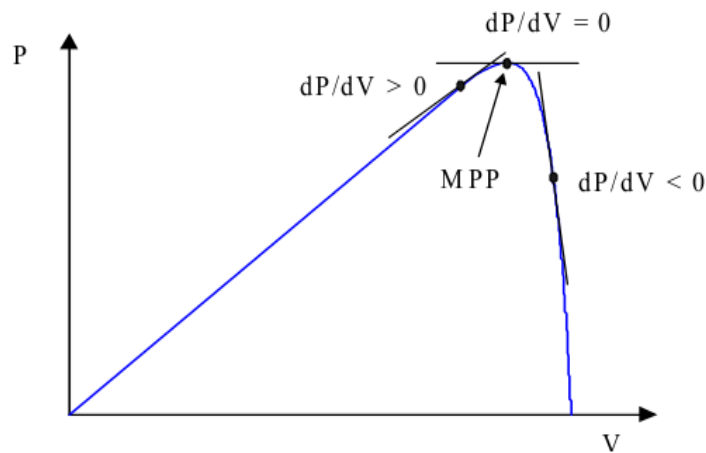
όπου k σταθερός παράγοντας συσχέτισης της τάσης ανοικτοκύκλωσης και του σημείου MPP.

$$k = \frac{V_{oc}}{V_{MPP}} \quad (3.2)$$

Ο παράγοντας k μπορεί να καθοριστεί είτε θεωρητικά, από το μοντέλο της πηγής, είτε μέσω πειραματικών μετρήσεων. Στις φωτοβολταϊκές κυψέλες (Φ/B) ο παράγοντας αυτός είναι περίπου 70-80%. Η λειτουργία της μεθόδου αυτής απαιτεί την αποσύνδεση του φορτίου από την πηγή, μέτρηση της τάσης ανοικτοκύκλωσης, υπολογισμό της τάσης αναφοράς ως V_{MPP} και μεταβολή του κύκλου λειτουργίας για να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση στην έξοδο της πηγής. Σε αυτή τη μέθοδο μπορεί να χρησιμοποιηθεί PI ελεγκτής για την προσαρμογή της τάσης αυτής. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι για την μέτρηση της τάσης ανοικτοκύκλωσης της πηγής χρειάζεται να αποσυνδέεται περιοδικά το φορτίο από την πηγή, διακόπτοντας έτσι τη ροή ενέργειας προς το φορτίο και μειώνοντας την απόδοση του συστήματος. Έτσι σημαντικό ρόλο παίζει η συχνότητα δειγματοληψίας της τάσης ανοικτοκύκλωσης ώστε να μειωθεί όσο γίνεται η απώλεια ισχύος. Στα σταθερά συστήματα η συχνότητα αυτή μπορεί να είναι πιο μικρή, ενώ σε ασταθή συστήματα, είναι απαραίτητη η ανάγκη μεγαλύτερης συχνότητας ανοικτοκύκλωσης. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί σε πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες, για την παραγωγή ενέργειας σε δίκτυα αισθητήρων.

3.3 Μέθοδος διαταραχής και παρατήρησης (Perturb & Observe)

Η τεχνική της διαταραχής και παρατήρησης είναι από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές για MPPT. Ο αλγόριθμος της τεχνικής αυτής βασίζεται στην παρακολούθηση μετρήσεων και λήψη αποφάσεων βάση αυτών. Παρατηρώντας την καμπύλη Ισχύος – Τάσης της γεννήτριας όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αφού η μέγιστη παραγωγή ισχύος βρίσκεται στην κορυφή της καμπάνας που σχηματίζεται, εκεί πρέπει λειτουργεί και η γεννήτρια.



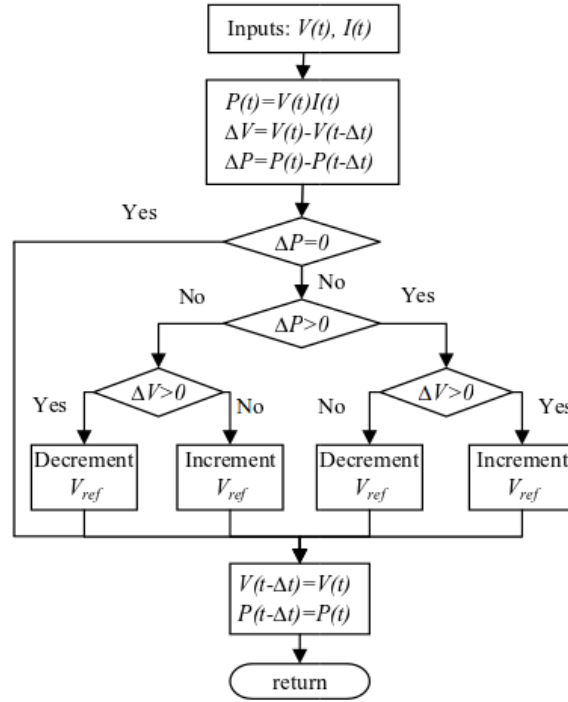
Σχήμα 3.1. Λειτουργία αλγορίθμου Perturbation and Observation

Παρατηρούμε επίσης ότι η κλίση της εφαπτόμενης ευθείας με το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος είναι μηδέν. Κινώμενοι δεξιότερα από το σημείο αυτό η κλίση παίρνει αρνητικές τιμές, ενώ από την αντίθετη πλευρά παίρνει θετικές τιμές. Η τεχνική αυτή βασίζεται στον έλεγχο της συνθήκης:

$$\frac{dP}{dV}=0 \quad (3.3)$$

η οποία και ικανοποιείται στην κορυφή της καμπάνας P-V.

Στο Σχήμα 3.2, αποτυπώνονται τα βήματα του αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος δειγματοληπτεί την ισχύ και την τάση εξόδου της πηγής και υπολογίζει την μεταβολή της ισχύος έπειτα από μία μικρή μεταβολή της τάσης. Αν μεταβολή της ισχύος είναι θετική, δηλαδή η ισχύς αυξήθηκε, τότε συνεχίζει να μεταβάλλει την τάση κατά την ίδια φορά. Σε αντίθετη περίπτωση, ακολουθεί μεταβολή στην τάση αντίθετης κατεύθυνσης.



Σχήμα 3.2. Αλγόριθμος Perturb and Observe [12].

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι λειτουργεί για διαφορετικού είδους πηγές, χωρίς να χρειάζεται προηγούμενη γνώση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας καθώς και ότι η τεχνική αυτή είναι δυναμική, δηλαδή το σημείο MPP υπολογίζεται εκ νέου κάθε χρονική στιγμή. Υπάρχουν όμως και μερικά μειονεκτήματα χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Perturb and Observe. Συχνά ο αλγόριθμος αφού εντοπίσει και μετατοπίσει το σημείο λειτουργίας της γεννήτριας στο σημείο MPP, αρχίζει και ταλαντώνει γύρω από το σημείο αυτό, προκαλώντας απώλεια ισχύος αφού όταν φτάσει σε αυτό, προκαλεί μια μεταβολή στην τάση είτε θετική είτε αρνητική και έπειτα θα ξαναγυρίσει σε αυτό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται επ'αόριστον. Ιδιαίτερα αν το βήμα της μεταβολής είναι μεγάλο, το πρόβλημα εντείνεται γιατί ταλαντώνει σε μεγάλη απόσταση από το σημείο MPP. Το δεύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει η τεχνική αυτή είναι η εύρεση ενός τοπικού μέγιστου σημείου παραγωγής ισχύος ενώ μπορεί να υπάρχει ένα ακόμα σημείο μεγαλύτερης παραγωγής.

3.4 Μέθοδος αυξανόμενης αγωγιμότητας (Incremental Conductance)

Η μέθοδος της αυξανόμενης αγωγιμότητας είναι άλλος ένας hill-climbing αλγόριθμος ο οποίος έχει κοινή βάση με τον Perturb and Observe, αλλά λίγο διαφορετική μαθηματική προσέγγιση. Όπως προηγουμένως, στο Σχήμα 3.1, παρατηρούμε ότι η κλίση της ευθείας είναι μηδέν στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος. Αναλύοντας την εξίσωση στο μέγιστο της καμπύλης P - V [13]:

$$\begin{aligned}
\frac{dP}{dV} &= 0 \\
\Leftrightarrow \frac{d(V \cdot I)}{dV} &= 0 \\
\Leftrightarrow I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} &= 0 \\
\Leftrightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} &= -\frac{I}{V}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Οπότε οι περιπτώσεις λειτουργίας της γεννήτριας διαχωρίζονται ως εξής:

- Άρα το σημείο λειτουργίας είναι αριστερά από το σημείο MPP και πρέπει να μετακινηθεί δεξιά.

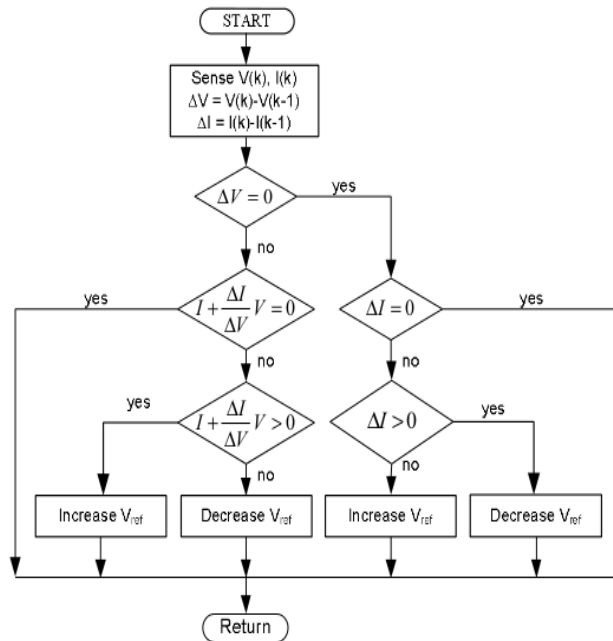
$$\frac{dP}{dV} > 0 \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$$

- Άρα το σημείο λειτουργίας είναι δεξιότερα από το σημείο MPP και πρέπει να μετακινηθεί αριστερά.

$$\frac{dP}{dV} < 0 \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$$

- Άρα το σημείο λειτουργίας είναι το σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$$



Σχήμα 3.3. Ο αλγόριθμος Incremental Conductance [12].

Ο αλγόριθμος της μεθόδου αυξανόμενης χωρητικότητας φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Αρχικά δειγματοληπτεί την τάση και το ρεύμα και έπειτα υπολογίζει την μεταβολή τους ως προς τον χρόνο. Έπειτα ελέγχει αν ισχύει η συνθήκη (3.4) και αν ισχύει, τερματίζει. Σε αντίθετη περίπτωση ελέγχει αν το σημείο λειτουργίας βρίσκεται δεξιότερα ή πιο αριστερά από το σημείο MPP και προσπαθεί να το μετατοπίσει με τη σωστή φορά πάντα προς την κατεύθυνση του MPP.

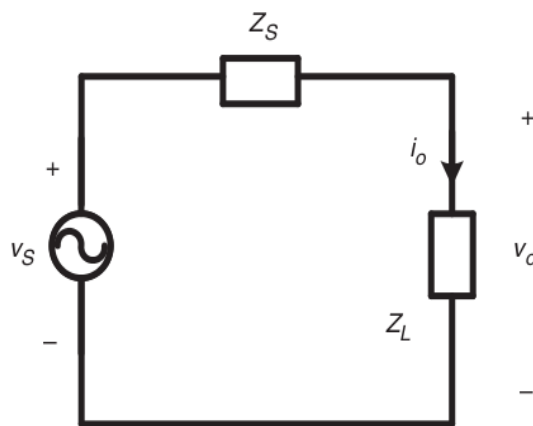
Το πλεονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι ότι από την στιγμή που συγκλίνει στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος, σταματάει και δεν ταλαντώνεται γύρω από αυτό και έχοντας γνώση της παραγωγής του ρεύματος προς την τάση δεν χάνεται ο προσανατολισμός του σε περίπτωση απότομης αλλαγής συνθηκών.

3.5 Προσαρμογή Φορτίου - Resistive Matching

Η τεχνική αυτή διαφέρει από τις υπόλοιπες μεθόδους MPPT αφού δεν εντοπίζει το σημείο λειτουργίας της πηγής με βάση την παραγόμενη ενέργεια της πηγής, αλλά προσπαθεί να ικανοποιήσει την συνθήκη του θεωρήματος μέγιστης μεταφοράς ισχύος. Η μέγιστη μεταφορά ισχύος λαμβάνει χώρα σε μια γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης όταν η σύνθετη αντίσταση του φορτίου είναι συζυγής με τη μιγαδική σύνθετη αντίσταση της πηγής (Jackson 1959). Δηλαδή αν η πηγή έχει σύνθετη αντίσταση

$Z_s = R_s + j X_s$ και το φορτίο $Z_L = R_L + j X_L$ τότε στην περίπτωση όπου $Z_L^{opt} = R_s - j X_s$ η μεταφορά ενέργειας από την πηγή στο φορτίο είναι μέγιστη και ίση με:

$$P_o^{max} = \frac{R_s^2 + X_s^2}{4 R_s} I_s^2 = \frac{V_s^2}{4 R_s} \quad (3.5)$$



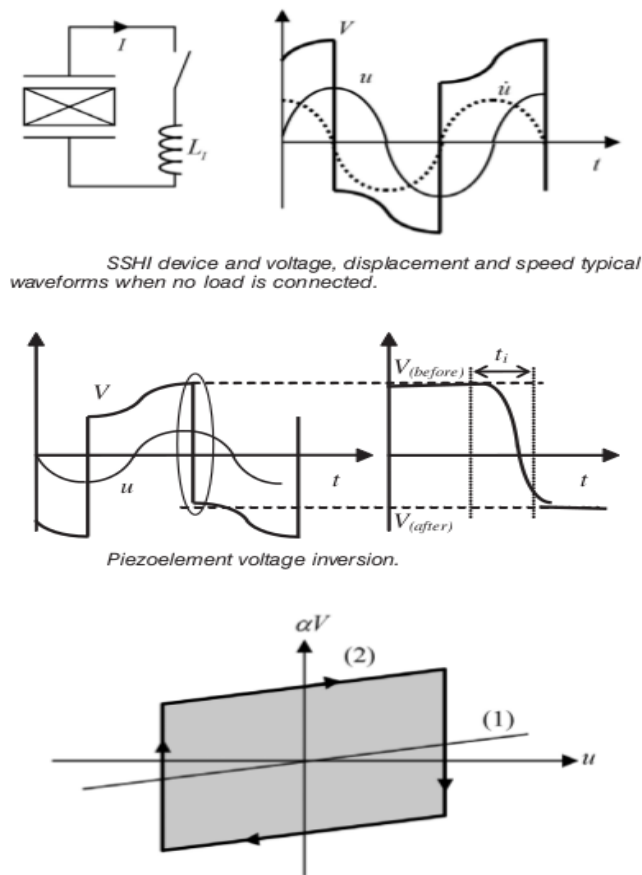
Σχήμα 3.4. Ισοδύναμο κύκλωμα πηγής – φορτίου

Οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες χαρακτηρίζονται ως πηγές με χωρητικό χαρακτήρα και για την ισοστάθμιση της σύνθετης αντίστασης, απαιτούν μεγάλη τιμή πηνίου κάτι το οποίο καθιστά την προσαρμογή φορτίου, αδύνατη. Η συμπεριφορά όμως του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου αλλάζει όταν οι συνθήκες ταλάντωσης του πιεζοηλεκτρικού

στοιχείου πλησιάζουν το σημείο συντονισμού του [14]. Όσο το στοιχείο πλησιάζει το σημείο συντονισμού, η εσωτερική αντίσταση μεταβάλλεται, ελαττώνοντας τον μιγαδικό παράγοντα και αυξάνοντας τον πραγματικό. Στο σημείο συντονισμού ο μιγαδικός παράγοντας γίνεται μηδέν και η σύνθετη αντίσταση της πηγής καθίσταται ωμική αντίσταση. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι σε συνθήκες συντονισμού του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, η προσαρμογή φορτίου έχει την δυνατότητα να αντλήσει την μέγιστη ισχύ από αυτό συνδέοντας στα άκρα της γεννήτριας το κατάλληλο ωμικό φορτίο. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στις πιεζοηλεκτρικές, στις θερμοηλεκτρικές και στις φωτοβολταϊκές γεννήτριες.

3.6 Synchronized Switch Harvesting on Inductor (SSHI)

Μια τεχνική η οποία χρησιμοποιείται στις πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες είναι αυτή της Synchronized Switch Harvesting on Inductor (SSHI) [15]. Στην τεχνική αυτή συνδέεται παράλληλα με την πιεζοηλεκτρική γεννήτρια ένα πηνίο και ένας διακόπτης σε σειρά. Ο διακόπτης είναι ανοικτός εκτός όταν η μηχανική ταλάντωση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου φτάσει σε ένα ακρότατο όπου εκεί κλείνει. Η εσωτερική χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και το εξωτερικό πηνίο δημιουργούν ένα ταλαντευόμενο κύκλωμα το οποίο εκχαιεύει την ενέργεια του πυκνωτή. Ο διακόπτης παραμένει κλειστός μέχρι να γίνει αναστροφή της τάσης της γεννήτριας. Η τιμή του πηνίου επηρεάζει τον χρόνο που γίνεται η αναστροφή αυτή της τάσης.



Σχήμα 3.5. Η τεχνική SSHI [15].

Η τεχνική αυτή αυξάνει το πλάτος της τάσης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και εξαναγκάζει την τάση να γίνει συμφασική με την ταχύτητα της ταλάντωσης, εξάγοντας έτσι περισσότερη ενέργεια από την γεννήτρια. Η τεχνική αυτή έχει αρκετές παραλλαγές τόσο στην τοπολογία, αν το πηνίο συνδέεται παράλληλα ή σε σειρά με την γεννήτρια, όσο και με τον τρόπο τον οποίο το κύκλωμα ενεργοποιείται σε σχέση με τις συνθήκες ταλάντωσης. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι απαιτεί αρκετά μεγάλο πηνίο, προϋποθέτει υψηλό συντελεστή ποιότητας (quality factor) του και για την πυροδότηση του διακόπτη, απαιτείται ένα σήμα ελέγχου το οποίο αισθάνεται τη μέγιστη θέση ταλάντωσης και απαιτεί εξωτερικό αισθητήρα.

3.7 Σύνοψη – Επιλογή Μεθόδου MPPT

Στο κεφάλαιο αυτό αποτυπώθηκαν οι διάφορες μέθοδοι για την απομάστευση της μέγιστης παραγωγής ισχύος όπως παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες σήμερα. Η ποικιλότητα των πιεζοηλεκτρικών γεννητριών, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά εξόδου των, επιτρέπουν την εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων σε διαφορετικές γεννήτριες. Επίσης σημαντικός παράγοντας για την επιλογή μιας μεθόδου είναι και το σύστημα εκμετάλλευσης της ενέργειας από τις δονήσεις, δηλαδή το συνολικό σύστημα μετάδοσης των ταλαντώσεων στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Η τεχνική Synchronized Switch Harvesting on Inductor επιτυγχάνει υψηλές αποδόσεις, αλλά απαιτεί εξωτερικό αισθητήρα και μεγάλη τιμή πηνίου και έτσι αποκλείστηκε από τις πιθανές μεθόδους. Επειδή τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία ανήκουν στην κατηγορία των πηγών συγκομιδής ενέργειας με αρκετά χαμηλά επίπεδα παραγωγής ενέργειας της τάξεως των μW – mW οι τεχνικές MPPT που μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιβάλλεται να είναι υλοποιήσιμες με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Στην παρούσα διπλωματική υλοποιήθηκε η μέθοδος MPPT Σταθερής Τάσης αφού από την θεωρία των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων παρατηρήσαμε ότι η τάση στην οποία το στοιχείο αποδίδει την μέγιστη παραγωγή ισχύος δεν αλλάζει σημαντικά όταν αυξάνεται η συχνότητα ταλάντωσης. Υπάρχει μεταβολή της τάσης αυτής όσο αυξάνεται το πλάτος της ταλάντωσης αλλά η μεταβολή αυτή είναι μικρή. Επιπρόσθετα το κόστος ενέργειας για την υλοποίηση ενός αλγόριθμου Perturb and Observe ή Incremental Conductance αυξάνει σημαντικά σε σχέση με την απλή υλοποίηση της μεθόδου Σταθερής Τάσης. Τέλος, χρησιμοποιούμε την μέθοδο προσαρμογής φορτίου για την μέγιστη απολαβή της ισχύος από την γεννήτρια προσαρμόζοντας το κατάλληλο φορτίο για διαφορετικές συνθήκες ταλάντωσης μέσω ενός μετατροπέα συνεχούς τάσης όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 4

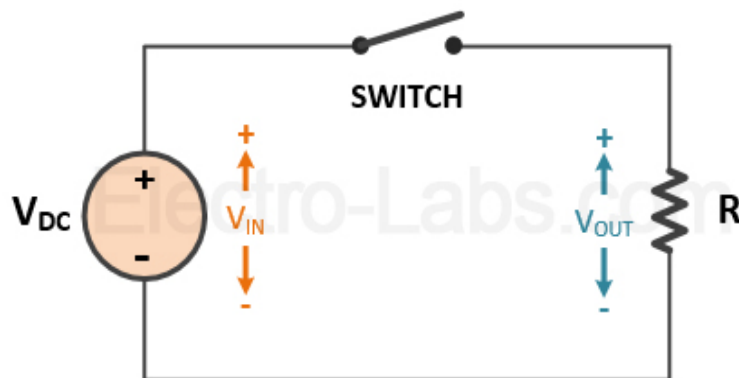
Μετατροπείς DC-DC

Υπάρχουν αρκετοί τύποι μετατροπέων DC-DC οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συγκομιδή της μέγιστης ενέργειας από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Στην διπλωματική αυτή μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι μετατροπέων, ο Buck, ο Boost, ο Ćuk και ο Buck-Boost. Ο τελευταίος υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας αφού παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων όπως περιγράφεται παρακάτω.

4.1 Γενικά στοιχεία μετατροπέων DC-DC

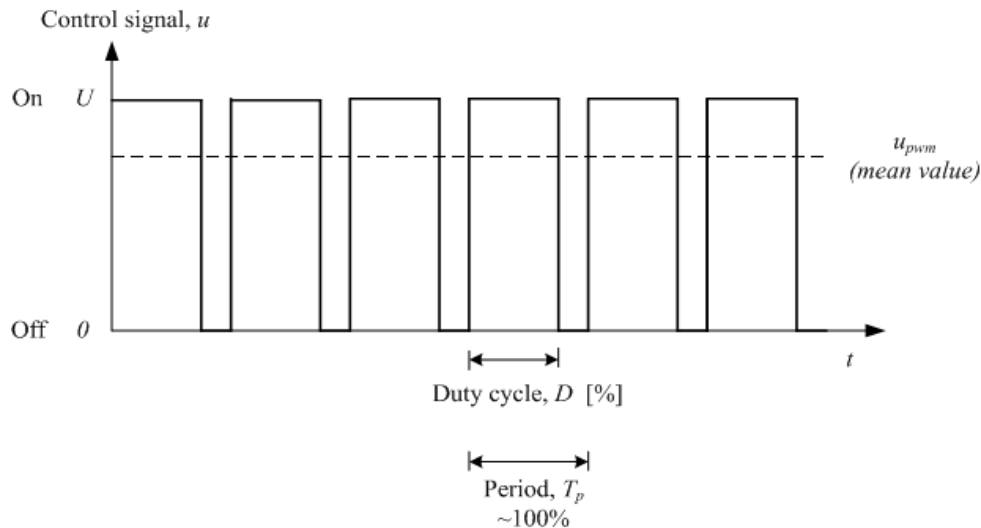
4.1.1 Λειτουργία PWM

Στους μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (DC-DC) είναι επιθυμητός ο μετασχηματισμός της τάσης εξόδου σε είτε υψηλότερη είτε χαμηλότερη στάθμη από αυτή της εισόδου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ελέγχοντας ένα διακόπτη ο οποίος τροφοδοτεί το φορτίο με παλμούς ρεύματος μεταβλητού πλάτους όπως στη διάταξη του Σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1. Η λειτουργία των μετατροπέων dc-dc (πηγή:www.electro-labs.com).

Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM) και χρησιμοποιείται εκτός από την κωδικοποίηση της πληροφορίας, για τον έλεγχο της ροής της ενέργειας προς ένα φορτίο.



Σχήμα 4.2. PWM κυματομορφή [16]

Η μέθοδος της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών, βασίζεται στην περιοδική διακοπτική λειτουργία ενός ημιαγωγικού στοιχείου το οποίο άγει για ένα ποσοστό του χρόνου $t_{on} = D T_p$, όπου το D καλείται κύκλος λειτουργίας (Duty Cycle) και T_p η περίοδος λειτουργίας. Ο κύκλος λειτουργίας ορίζεται ως εξής:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (4.1)$$

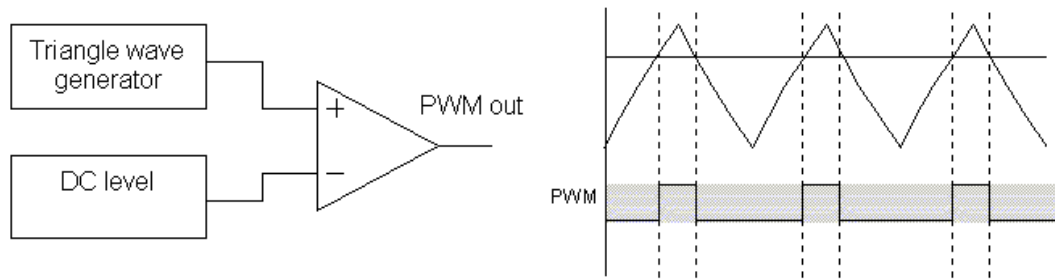
και παίρνει τιμές από 0% έως 100%.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2, κατά την διάρκεια του χρόνου t_{on} , η τάση εξόδου V_{out} είναι ίση με την τάση εισόδου V_{in} και κατά την διάρκεια χρόνου t_{off} η τάση εξόδου γίνεται μηδέν αφού δεν άγει ο διακόπτης. Κατά συνέπεια, ελέγχοντας τους χρόνους t_{on} και t_{off} μπορεί να γίνει έλεγχος της τάσης εξόδου V_{out} , η οποία φυσικά εξαρτάται και από το πλάτος της τάσης εισόδου.

Ο κύκλος λειτουργίας (Duty Cycle) ορίζει το ποσοστό του χρόνου όπου ο διακόπτης άγει σε μία περίοδο και μεταβάλλοντας αυτόν, μεταβάλλεται και η τάση εξόδου. Υπάρχει δηλαδή μία σχέση μεταξύ της τάσης εισόδου, του κύκλου λειτουργίας και της τάσης εξόδου.

4.1.2 Δημιουργία PWM παλμών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι απαραίτητη η δημιουργία παλμών για την οδήγηση του διακοπτικού στοιχείου του μετατροπέα, καθώς και η μεταβολή του πλάτους των παλμών αυτών για τον έλεγχο της τάσης εξόδου. Ένας απλός τρόπος για την δημιουργία της παλμοσειράς αυτής είναι η σύγκριση ενός τριγωνικού σήματος με ένα σήμα σταθερής τάσης.



Σχήμα 4.3. Παραγωγή PWM παλμών [17].

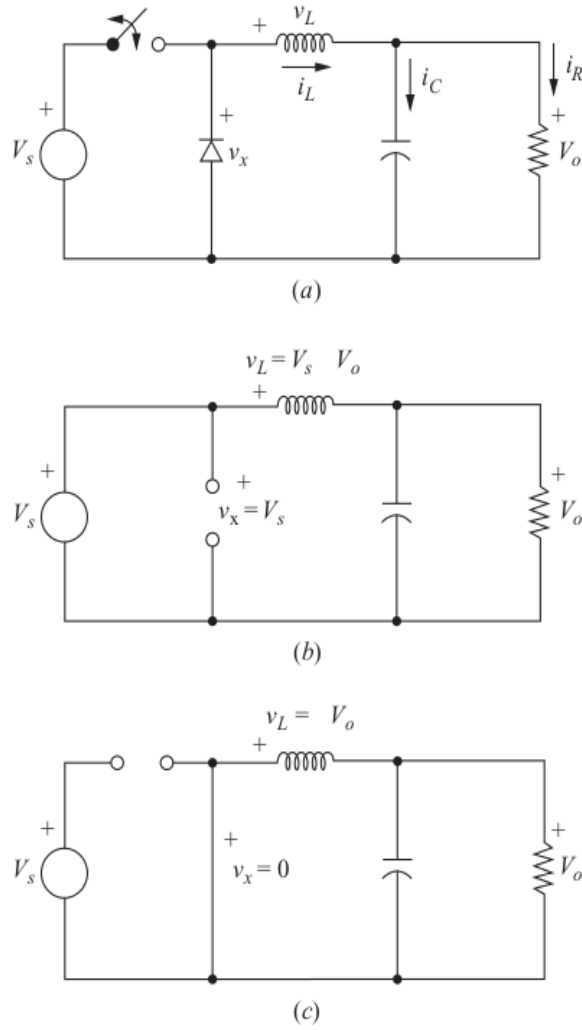
Στο Σχήμα 4.3 φαίνονται οι είσοδοι του συγκριτή, όπου στην μη-αναστρέφουσα είσοδο τροφοδοτείται με ένα τριγωνικό σήμα, και στην αναστρέφουσα είσοδο του συγκριτή εισάγεται μια σταθερή τάση. Ο συγκριτής, συγκρίνει τις δύο εισόδους του και όταν $V_{trig} > V_{dc}$ τότε η έξοδος του είναι σε υψηλή στάθμη, αλλιώς η έξοδος του είναι σε χαμηλή στάθμη. Έτσι στην πρώτη περίπτωση ενεργοποιείται ο διακόπτης και στην δεύτερη κλείνει ο διακόπτης. Με την μέθοδο αυτή μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος του πλάτους των παραγόμενων παλμών, δηλαδή έλεγχος της τάσης εξόδου.

Η συχνότητα του PWM σήματος είναι ίδια με την συχνότητα του συγκρινόμενου τριγώνου στην είσοδο του συγκριτή. Συχνά η παραγωγή PWM σημάτων γίνεται με την βοήθεια ενός μικροεπεξεργαστή αλλά σε αυτή την διπλωματική γίνεται με διακριτά αναλογικά κυκλώματα.

4.2 Μετατροπέας τύπου Buck

Ο μετατροπέας τύπου **Buck** είναι ένας μετατροπέας ισχύος ο οποίος υποβιβάζει την τάση της εισόδου του σε ένα άλλο επίπεδο τάσης. Χρησιμοποιείται κυρίως σε τροφοδοτικά ισχύος και στον έλεγχο dc κινητήρων. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4(α), ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από ένα διακοπτικό στοιχείο (S), μια δίοδο (D) και ένα πηνίο στην έξοδο καθώς και από πυκνωτές φιλτραρίσματος τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του.

Η λειτουργία του αναλύεται σε δύο χρονικές περιόδους, ανάλογα με την κατάσταση του διακοπτικού στοιχείου S, όταν αυτό είναι κλειστό, δηλαδή άγει, για ένα χρονικό διάστημα t_{on} (Σχήμα 4.4β) τότε το ρεύμα i_L φορτίζει το πηνίο L και πολώνεται ανάστροφα η δίοδος (D). Στην περίοδο αυτή εμφανίζεται μία τάση $V_L = V_s - V_o$ στα άκρα του πηνίου. Στην δεύτερη περίοδο, ο διακόπτης είναι ανοικτός και το αποθηκευμένο ρεύμα στο πηνίο, αρχίζει να ρέει προς το φορτίο πολώνοντας ορθά την δίοδο.



Σχήμα 4.4.(α) Μετατροπέας τύπου Buck, (β) On-state κύκλωμα, (γ) Off-State κύκλωμα [18].

Στην περίπτωση όπου η αγωγή του ρεύματος είναι συνεχής (continuous conduction mode), δηλαδή το ρεύμα ρέει συνεχώς μέσω του πηνίου L σε όλη την περίοδο λειτουργίας ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου του μετατροπέα είναι:

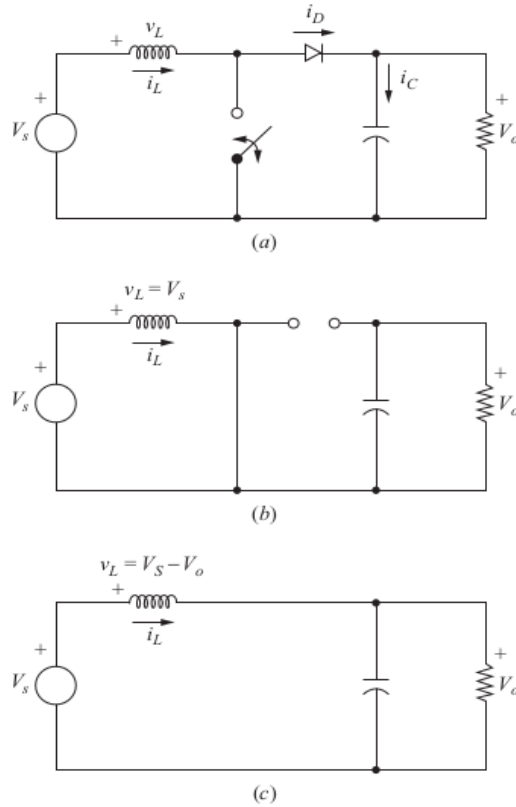
$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (4.2)$$

όπου D ο κύκλος λειτουργίας όπως ορίστηκε στην προηγούμενη ενότητα.

4.3 Μετατροπέας τύπου Boost

Ένα άλλο είδος μετατροπέα συνεχούς τάσης είναι αυτό του τύπου Boost. Αυτός ο τύπος μετατροπέα είναι ικανός να μεταβάλλει την τάση εισόδου σε μια τάση υψηλότερης στάθμης στην έξοδο του. Η συνάρτηση μεταφοράς του μετατροπέα σε συνάρτηση με τον κύκλο λειτουργίας είναι:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{(1-D)} \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.5. (α) Μετατροπέας τύπου Boost, (β) On-state κύκλωμα, (γ) Off-state κύκλωμα [18].

Αποτελείται, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.5(α), από ένα διακοπτικό στοιχείο, μια δίοδο, ένα πηνίο στην είσοδο και έναν πυκνωτή φιλτραρίσματος στην έξοδο. Η λειτουργία του χωρίζεται σε δύο φάσεις ανάλογα την κατάσταση του διακόπτη.

Στην πρώτη φάση όπου ο διακόπτης S άγει (Σχήμα 4.5β), η πηγή τροφοδοτεί το πηνίο με ρεύμα και αυτό αρχίζει να αυξάνεται. Παράλληλα η δίοδος πολώνεται ανάστροφα και αποκόπτεται η ροή ρεύματος στην βαθμίδα εξόδου. Εφαρμόζοντας τους νόμους του Kirchhoff έχουμε:

$$v_L = V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (4.4)$$

ή αλλιώς:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (4.5)$$

Στην δεύτερη φάση (Σχήμα 4.5γ) η αποθηκευμένη ενέργεια στο πηνίο απελευθερώνεται προς το φορτίο καθώς και, η πηγή συνδεδεμένη σε σειρά με το πηνίο τροφοδοτεί και αυτή το φορτίο, με αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης εξόδου. Οι εξισώσεις που ισχύουν σε αυτή την περίοδο είναι:

$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (4.6)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (4.7)$$

4.4 Μετατροπέας τύπου Ćuk

Ο μετατροπέας τύπου Ćuk είναι παρόμοιος με τον Buck-Boost μετατροπέα που περιγράφεται σε επόμενη ενότητα. Ο μετατροπέας αυτός είναι αναστρέφων και η τάση εξόδου του είναι είτε μεγαλύτερη είτε μικρότερη από αυτή της εισόδου. Η συνάρτηση μεταφοράς του μετατροπέα σε συνάρτηση με τον κύκλο λειτουργίας είναι:

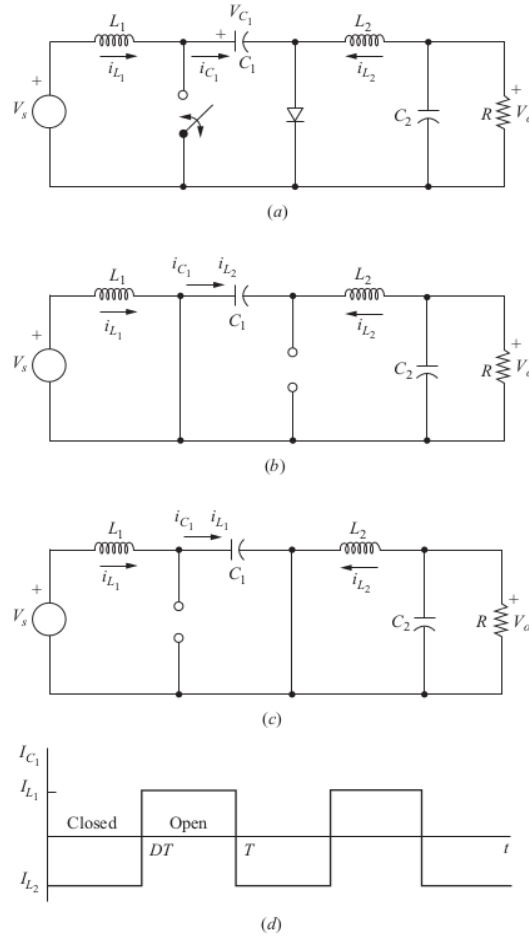
$$\frac{V_o}{V_s} = -\frac{D}{1-D} \quad (4.8)$$

Στο παρακάτω σχήμα αποτυπώνονται η τοπολογία του μετατροπέα τύπου Ćuk καθώς και οι καταστάσεις λειτουργίας του. Το κύριο μέσο αποθήκευσης αυτού του μετατροπέα είναι ο πυκνωτής C_1 , ο οποίος αποθηκεύει και μεταφέρει ενέργεια από την είσοδο στην έξοδο. Στην κατάσταση αγωγής (Σχήμα 4.6 β) ρέει ρεύμα από τα πηνία L_1 και

L_2 από το διακόπτη και αποφορτίζεται ο πυκνωτής, μεταφέροντας ενέργεια στο L_2 . Ταυτόχρονα η πηγή στην είσοδο φορτίζει το πηνίο L_1 . Εφαρμόζοντας τους νόμους του Kirchhoff στην κατάσταση αγωγής προκύπτει ότι:

$$V_s = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \quad (4.9)$$

$$(V_s + V_o) - V_o = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} \quad (4.10)$$



Σχήμα 4.6. (α) Μετατροπέας τύπου Ćuk, (β) On-state κύκλωμα, (γ) Off-State κύκλωμα, (δ) Ρεύματα I_{L1} και I_{L2} [18].

Ενώ κατά τη διάρκεια της φάσης αποκοπής, τα ρεύματα που είναι αποθηκευμένα στα πηνία L_1 και L_2 πολώνουν ορθά την διόδο (D) και τροφοδοτούν το φορτίο. Παράλληλα ο πυκνωτής C_1 φορτίζεται με ενέργεια από την είσοδο. Οι εξισώσεις που ισχύουν σε αυτή τη περίπτωση:

$$(V_s + V_o) - V_s = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} \quad (4.11)$$

$$V_o = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} \quad (4.12)$$

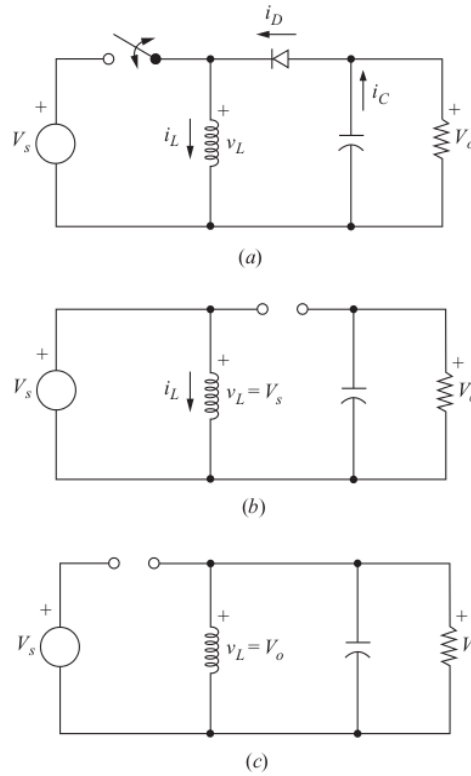
4.5 Μετατροπέας τύπου Buck-Boost

Ο μετατροπέας τύπου Buck-Boost βασίζεται στις αρχές λειτουργίας του Buck και του Boost μετατροπέα όπως τα είδαμε παραπάνω. Η τάση εξόδου, όπως αναφέρεται και στο όνομά του μπορεί να είναι είτε μεγαλύτερη είναι μικρότερη από αυτή της εισόδου. Η

συνάρτηση μεταφοράς, στην περίπτωση συνεχούς αγωγής, της τάσης εξόδου, σε συνάρτηση με την τάση εισόδου και τον κύκλο λειτουργίας είναι:

$$\frac{V_o}{V_s} = -\frac{D}{1-D} \quad (4.13)$$

Το αρνητικό πρόσημο πρακτικά σημαίνει ότι ο μετατροπέας αυτός είναι αναστρέφων, δηλαδή η τάση εισόδου έχει αντίθετο πρόσημο με την τάση εξόδου.



Σχήμα 4.7.(α) Μετατροπέας τύπου Buck-Boost, (β) On-state κύκλωμα, (γ) Off-State κύκλωμα [18].

Τα ισοδύναμα κυκλώματα για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας του Buck-Boost μετατροπέα εμφανίζονται στο Σχήμα 4.7. Οι δύο αυτές καταστάσεις λειτουργίας χωρίζονται ανάλογα την κατάσταση του ελεγχόμενου ημιαγωγικού διακόπτη. Στην χρονική διάρκεια, όπου ο διακόπτης άγει (Σχήμα 4.7β) το ρεύμα στο πηνίο L αρχίζει να αυξάνεται. Η τάση εξόδου τροφοδοτείται από τον πυκνωτή, με αποτέλεσμα αυτός να εκφορτίζεται. Στην δεύτερη φάση, Σχήμα 4.7γ, η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στα τυλίγματα του πηνίου απελευθερώνεται και τροφοδοτεί την έξοδο, φορτίζοντας παράλληλα και τον πυκνωτή. Εφαρμόζοντας τους νόμους του Kirchhoff για κάθε μία φάση προκύπτει ότι:

- Κατάσταση αγωγής:

$$V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (4.14)$$

Οπότε το ρεύμα στο πηνίο έχει ρυθμό φόρτισης:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s}{L} \quad (4.15)$$

Στο τέλος της περιόδου αυτής η αύξηση του i_L είναι:

$$\Delta I_L^{On} = \int_0^{DT_s} dI_L = \int_0^{DT_s} \frac{V_s}{L} dt = \frac{V_s D T_s}{L} \quad (4.16)$$

όπου T_s η περίοδος του PWM σήματος και D ο κύκλος λειτουργίας.

- **Κατάσταση αποκοπής:**

Στην δεύτερη φάση ο διακόπτης δεν άγει και έτσι το ρεύμα που είναι αποθηκευμένο στο πηνίο άγει προς στο φορτίο. Αν θεωρήσουμε μηδενική πτώση τάση στην δίοδο, και αρκετά μεγάλη τη χωρητικότητα του πυκνωτή εξόδου ώστε η τάση στα άκρα του να μένει σταθερή, το ρεύμα στο πηνίο διαμορφώνεται ως εξής:

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{V_o}{L} \quad (4.17)$$

Οπότε στο τέλος της περιόδου αποκοπής το ρεύμα i_L είναι:

$$\Delta I_L^{Off} = \int_0^{(1-D)T_s} dI_L = \int_0^{(1-D)T_s} -\frac{V_o}{L} dt = -\frac{V_o(1-D)T_s}{L} \quad (4.18)$$

Αν θεωρήσουμε ότι ο μετατροπέας λειτουργεί σε κατάσταση ισορροπίας, το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται στα διακριτά στοιχεία του, πρέπει να είναι σταθερό σε όλη τη διάρκεια μιας περιόδου T_s . Αυτό σημαίνει ότι:

$$\Delta I_L^{Off} + \Delta I_L^{On} = 0 \quad (4.19)$$

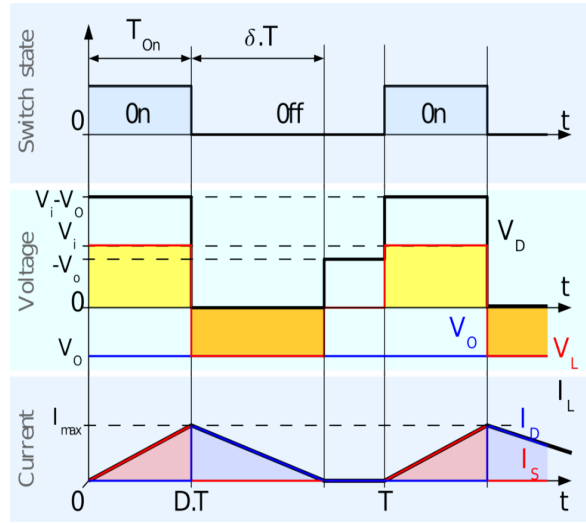
Αντικαθιστώντας τις δύο ποσότητες ΔI_L^{Off} , ΔI_L^{On} έχουμε:

$$\Delta I_L^{Off} + \Delta I_L^{On} = -\frac{V_o D T_s}{L} + \frac{V_o(1-D)T_s}{L} \quad (4.20)$$

4.5.1 Κατάσταση Ασυνεχούς Αγωγής (DCM) – Buck-Boost

Σε ορισμένες περιπτώσεις η ενέργεια που χρειάζεται να μεταφερθεί από την πηγή στο φορτίο είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να λειτουργεί σε διαφορετικές συνθήκες. Χαρακτηριστικό της λειτουργίας Discontinuous Conduction

Mode (DCM) είναι ότι το ρεύμα στο πηνίο μηδενίζεται για κάποιο χρονικό διάστημα στη διάρκεια μιας περιόδου.



Σχήμα 4.8. Κυματομορφές Buck-Boost μετατροπέα σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής(DCM) [19].

Οι εξισώσεις που ισχύουν για την λειτουργία ασυνεχούς αγωγής στον μετατροπέα buck-boost είναι οι εξής:

Κατά την διάρκεια $t = D T_s$ το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει το πηνίο είναι:

$$I_L^{max} = \frac{V_s D T_s}{L} \quad (4.21)$$

Ενώ κατά την φάση της αποκοπής το ρεύμα I_L μηδενίζεται μετά από δT :

$$I_L^{max} + \frac{V_o \delta T}{L} = 0 \quad (4.22)$$

Από τις δύο προηγούμενες εξισώσεις προκύπτει ότι:

$$\delta = \frac{-V_s D}{V_o} \quad (4.23)$$

Το ρεύμα που διαρρέει το φορτίο είναι ίσο με το μέσο ρεύμα της διόδου (I_D), το οποίο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.8, είναι ίσο με το ρεύμα του πηνίου κατά τη διάρκεια της αποκοπής.

$$I_o = I_D = \frac{I_L^{max}}{2} \delta \quad (4.24)$$

Αντικαθιστώντας το I_L^{max} στην παραπάνω εξίσωση έχουμε:

$$I_o = -\frac{V_s D T_s}{2L} \frac{V_s D}{V_o} = -\frac{V_s^2 D^2 T_s}{2L I_o} \quad (4.25)$$

Εκτός από τον μετατροπέα Buck-Boost, όλοι οι παραπάνω τύποι μετατροπέων μπορούν να λειτουργήσουν σε κατάσταση ασυνεχούς αγωγής. Η αξιοσημείωτη ιδιότητα της ασυνεχούς αγωγής είναι ότι σε μερικούς μετατροπείς όπως στον Buck-Boost, το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα δεν επηρεάζεται από το ρεύμα και την τάση στην έξοδο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η είσοδος του δεν εξαρτάται από το φορτίο που είναι συνδεδεμένο στην έξοδο του. Δηλαδή η συμπεριφορά ενός τέτοιου μετατροπέα μοιάζει με την συμπεριφορά μιας αντίστασης [20]. Συνεχίζοντας την παραπάνω ανάλυση, υπολογίζεται η ισοδύναμη αντίσταση εισόδου του μετατροπέα ως εξής:

$$R_{in}^{buck-boost} = \frac{V_s}{\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} i_L dt} = \frac{V_s}{\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} \frac{V_s}{L} t dt} = \frac{2L}{D^2 T_s} = \frac{2L f_s}{D^2} \quad (4.26)$$

Στον παρακάτω πίνακα παραθέτουμε και τις ισοδύναμες αντιστάσεις εισόδου και για τους άλλους μετατροπείς DC-DC [21]:

Πίνακας 4.1. Ισοδύναμες αντιστάσεις μετατροπέων.

Μετατροπέας	R _{in}
Buck	$\frac{2L}{DT_s}$
Boost	$\frac{2L}{D^2(1-D)T_s}$
Buck-Boost	$\frac{2L}{D^2 T_s}$
Ćuk	$\frac{2L}{D^2 T_s}$

4.6 Σύνοψη – Επιλογή Μετατροπέα

Παραπάνω είδαμε περιληπτικά τα κυριότερα χαρακτηριστικά από τους πιο γνωστούς τύπους μετατροπέων συνεχούς ρεύματος (DC-DC). Η επιλογή του κατάλληλου μετατροπέα γίνεται με βάση τις προδιαγραφές της πηγής, η οποία είναι το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και τις προδιαγραφές του συστήματος που σχεδιάστηκε. Οι προδιαγραφές του συστήματος αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.2. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συστήματος που σχεδιάζεται.

Παράμετρος	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή
Τάση Εξόδου Πιεζοηλεκτρικού	4V	50V
Ρεύμα Εξόδου Πιεζοηλεκτρικού	10 μ A	100 μ A
Ισχύς Εξόδου Πιεζοηλεκτρικού	10 μ W	2mW
Αντίσταση-MPP Πιεζοηλεκτρικού	600k Ω	2M Ω
Φορτίο – 2 AA Μπαταρίες	2.1V	2.8V

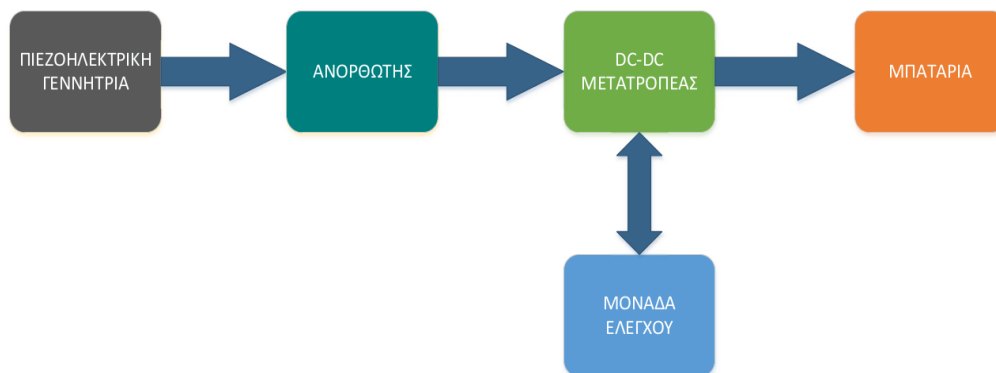
Οι προδιαγραφές του συστήματος, ορίζουν ότι για την επίτευξη μέγιστης παραγωγής ισχύος από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο πρέπει να χρησιμοποιήσουμε έναν μετατροπέα ο οποίος είναι σε θέση: α) να υποβιβάζει την τάση, αφού η τάση εξόδου του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι μεγαλύτερη από αυτή της μπαταρίας που είναι συνδεδεμένη στα άκρα του, και β) να έχει την ικανότητα να προσαρμόσει την ισοδύναμη αντίσταση εισόδου του με αυτή της πηγής. Τα δύο αυτά κριτήρια πληρούνται από τους εξής μετατροπείς: Buck, Buck-Boost, $\dot{C}uk$. Συγκρίνοντας όμως τις αντιστάσεις εισόδου, παρατηρούμε ότι η αντίσταση που παρουσιάζει ο Buck-Boost μετατροπέας είναι εξαρτημένη από το τετράγωνο του κύκλου λειτουργίας, ελαττώνοντας έτσι την τιμή του απαιτούμενου πηνίου για να επιτύχει την ίδια τιμή. Την ίδια αντίσταση παρουσιάζει και ο μετατροπέας τύπου $\dot{C}uk$ αλλά χρειάζεται τα διπλάσια παθητικά στοιχεία από αυτά του Buck-Boost. Αποτέλεσμα αυτού είναι να καταλήξουμε στον Buck-Boost μετατροπέα, ως οικονομικότερο και απλούστερο μετατροπέα ικανό να επιτύχει μέγιστη παραγωγή ισχύος από την πιεζοηλεκτρική γεννήτρια που χρησιμοποιείται σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

Κεφάλαιο 5

Το Σύστημα που αναπτύχθηκε

5.1 Προτεινόμενο Σύστημα

Όπως αναφέρθηκε στο 3ο και 4ο κεφάλαιο, για να επιτύχουμε την παραγωγή της μέγιστης δυνατής ενέργειας από ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε έναν μετατροπέα dc-dc και συγκεκριμένα τον μετατροπέα τύπου Buck-Boost ο οποίος θα λειτουργεί σε DCM λειτουργία. Ο μετατροπέας αυτός μεταβάλλει το φορτίο στην είσοδο του, αναλόγως της τιμής του κύκλου λειτουργίας του. Με αυτό τον τρόπο, θα γίνει προσαρμογή φορτίου ανάμεσα στην πιεζοηλεκτρική γεννήτρια και στην μπαταρία. Ο κύκλος λειτουργίας ελέγχεται μέσω της τεχνικής Σταθερής Τάσης (CV). Το λειτουργικό διάγραμμα του σχεδιαζόμενου συστήματος φαίνεται στο σχήμα 5.1:

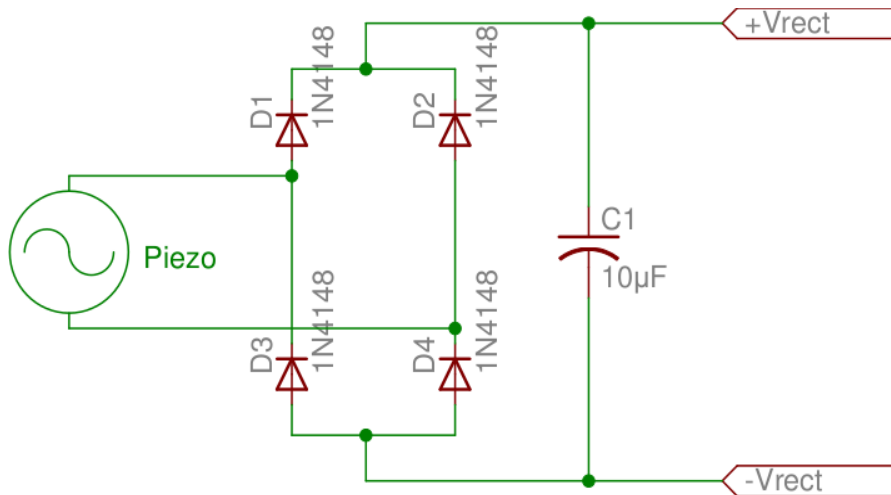


Σχήμα 5.1. Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος.

Η πιεζοηλεκτρική γεννήτρια συνδέεται με τον μετατροπέα Buck-Boost που αναπτύχθηκε και έπειτα ο μετατροπέας συνδέεται με την μπαταρία. Ο μετατροπέας ελέγχεται από ένα κύκλωμα ελέγχου (Control Unit) για να μεγιστοποιήσει την ενεργειακή απολαβή από την πιεζοηλεκτρική γεννήτρια.

5.2 Γέφυρα Ανόρθωσης

Από την φύση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, η παραγωγή τάσης από τη γεννήτρια είναι εναλλασσόμενη και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για την αποθήκευση και μετέπειτα χρήση της στο φορτίο. Για την μετατροπή της τάσης από εναλλασσόμενη σε συνεχή υλοποιήθηκε μια πλήρης γέφυρα αποτελούμενη από τέσσερις διόδους και έναν πυκνωτή φιλτραρίσματος. Παρακάτω φαίνεται και το αντίστοιχο σχηματικό διάγραμμα:



Σχήμα 5.2. Σχηματικό διάγραμμα της γέφυρας ανόρθωσης.

Στην ενότητα 4.7 παρατίθενται οι προδιαγραφές της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας. Η επιλογή των διόδων έγινε με βάση τις παραπάνω προδιαγραφές. Η κατάλληλη διάδοδος για την περίπτωση της δική μας γεννήτριας είναι η 1N4148. Η χαμηλή τιμή του ρεύματος επιστροφής της διόδου την καθιστά ιδανική επιλογή για το σύστημα αυτό. Τέλος χρειάζεται ένας πυκνωτής φιλτραρίσματος για να εξομαλύνει την κυμάτωση της τάσης εισόδου. Ένας πυκνωτής της τάξεως των $10\mu\text{F}$ είναι κατάλληλος για την περίπτωση αυτή.

5.3 Κύκλωμα Μετατροπέα Buck-Boost

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκε αναλυτικά η λειτουργία του μετατροπέα τύπου Buck-Boost αναλυτικά. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει σχεδιασμός των διακριτών στοιχείων του. Στο Κεφάλαιο 2 στην ενότητα 6, αναφέρεται από το τεχνικό φυλλάδιο της γεννήτριας του εργαστηρίου ότι η αντίσταση στην οποία προκύπτει η μέγιστη παραγωγή ισχύος είναι ίση με περίπου $1\text{M}\Omega$. Το κύκλωμα λοιπόν του μετατροπέα σχεδιάζεται με βάση αυτή την απαίτηση. Στο κεφάλαιο 4.6 αναφέρεται ότι η λειτουργία του buck-boost μετατροπέα σε ασυνεχή αγωγή, προσδίδει στον μετατροπέα ιδιότητες αντίστασης, η οποία εξαρτάται από την σχέση:

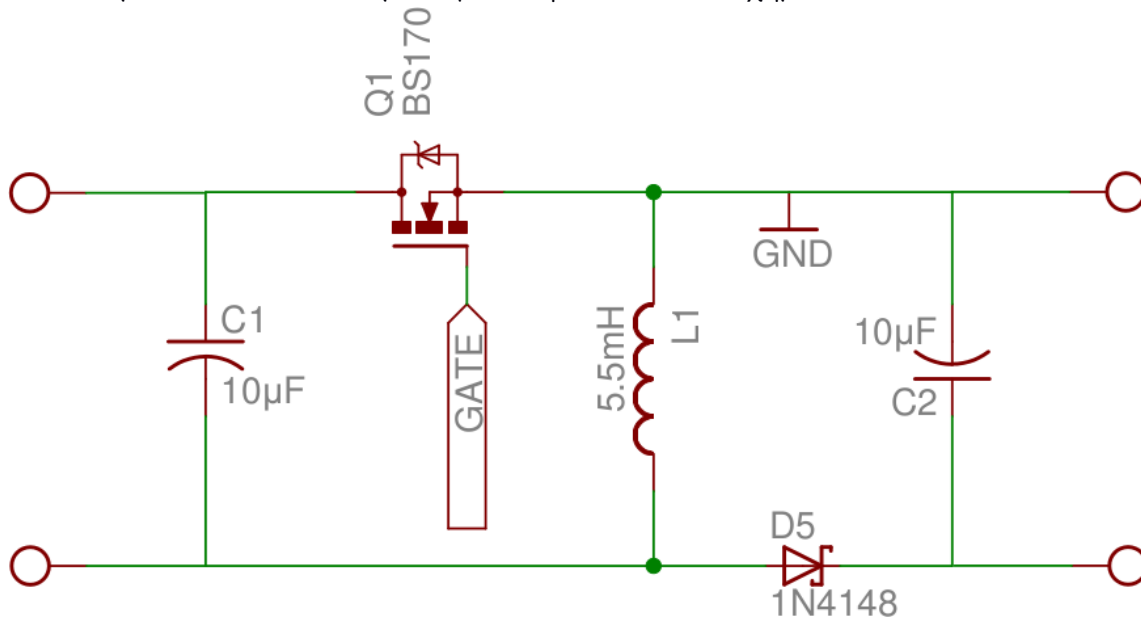
$$R_{in}^{buck-boost} = \frac{2Lf_s}{D^2} \quad (5.1)$$

Σε αυτό το σημείο γίνεται μια ισοστάθμιση των παραγόντων της παραπάνω σχέσης ανάλογη των απαιτήσεων της διπλωματικής εργασίας και της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας. Προφανώς η αύξηση της τιμής του πηνίου επιφέρει μεγαλύτερες απώλειες στο συνολικό σύστημα, άρα η τιμή του πρέπει να κυμαίνεται σε όσο το δυνατόν χαμηλότερη τιμή αυτεπαγωγής. Μια τιμή της τάξεως των μερικών mH είναι κατάλληλη. Στο εργαστήριο υπήρχε διαθέσιμο πηνίο με τιμή 5.5mH το οποίο επιλέχτηκε για την υλοποίηση του μετατροπέα. Επειδή η συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα είναι

ανάλογη της αντίστασης εισόδου του, η αύξηση της πρώτης συνεπάγεται και αύξηση της δεύτερης. Η συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα εξαρτάται από την συχνότητα του τριγωνικού παλμού όπως θα δούμε παρακάτω και εξαρτάται από δύο ολοκληρωμένα κυκλώματα. Η συχνότητα αυτή ορίστηκε στο 1kHz για λόγους μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας.

Από τις παραπάνω διαπιστώσεις, για να επιτύχουμε αντίσταση εισόδου στο $1\text{M}\Omega$ η τιμή του κύκλου λειτουργίας είναι $D = 0.33\%$.

Το κύκλωμα του buck-boost μετατροπέα φαίνεται στο Σχήμα 5.3:



Σχήμα 5.3. Σχηματικό διάγραμμα του buck-boost μετατροπέα.

Αποτελείται από τα εξής διακριτά στοιχεία:

5.3.1 Πυκνωτής Εισόδου

Ο πυκνωτής αυτός βρίσκεται στην είσοδο του μετατροπέα και ο ρόλος του είναι να φιλτράρει την τάση εισόδου. Η τιμή του ορίστηκε στα $10\mu\text{F}$ αφού η έξοδος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι χαμηλής παραγωγής ισχύος και επιθυμείται μικρή σταθερά του χρόνου φόρτισης. Σημειώθηκε κυμάτωση μικρότερη του 1%.

5.3.2 Διακοπτικό Στοιχείο Buck-Boost

Ο διακόπτης που χρησιμοποιείται στο μετατροπέα είναι τύπου n-channel Mosfet και πρέπει να πληροί τις εξής προδιαγραφές:

- Ρεύμα εισόδου (max): 100mA
- Τάση εισόδου (max): 50V
- Συχνότητα λειτουργίας: 1kHz
- R_{on} (max): 1Ω

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις το Mosfet που χρησιμοποιήθηκε είναι το BS170 Fairchild [22]. Η θέση του διακόπτη, δηλαδή αν θα είναι στην high ή στην low πλευρά του φορτίου έγινε με βάση την ευκολία που προσφέρει η συγκεκριμένη τοπολογία αφού στην low πλευρά τα σήματα οδήγησης χρειάζεται να δημιουργηθούν ως προς την γείωση της πηγής και δεν απαιτείται ειδικός οδηγός.

5.3.3 Δίοδος

Η διόδος που χρησιμοποιήθηκε για τον μετατροπέα buck-boost είναι η 1N4148. Η διόδος αυτή έχει πολύ μικρό ρεύμα επιστροφής $I_{\text{reverse}} = 25\text{nA}$ το οποίο αποτέλεσε και σημαντικό παράγοντα για την επιλογή της [23].

5.3.4 Πυκνωτής Εξόδου

Ακόμα ένας πυκνωτής υπάρχει στην έξοδο του μετατροπέα για την εξομάλυνση της τάσης εξόδου του μετατροπέα. Η τιμή του εξαρτάται από το φορτίο, το οποίο στην περίπτωση αυτή είναι μπαταρία με συνέπεια να μην απαιτεί μεγάλη χωρητικότητα για το φιλτράρισμα. Έτσι η τιμή του ορίστηκε στα $10\mu\text{F}$ και σημειώθηκε κυμάτωση τάσης μικρότερη του 1%.

5.4 Κύκλωμα Ελέγχου (Control Unit)

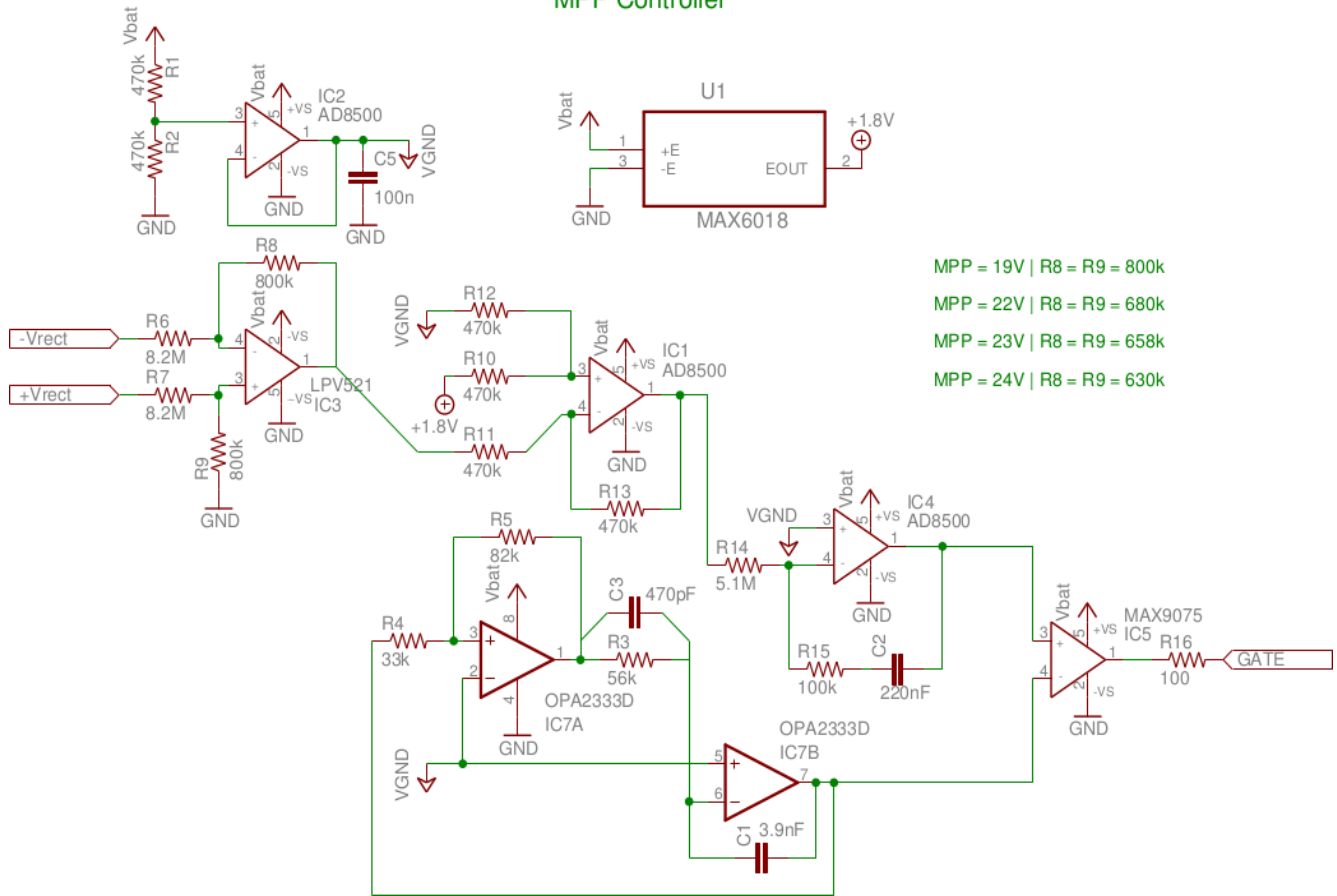
Το κύκλωμα ελέγχου είναι υπεύθυνο για την λειτουργία του αλγορίθμου MPPT, ο οποίος είναι ο αλγόριθμος Σταθερής Τάσης. Δηλαδή αρκεί να διατηρείται η τάση στην είσοδο του μετατροπέα σταθερή ανεξάρτητα από το πως μεταβάλλονται οι συνθήκες ταλάντωσης.

Το κύκλωμα ελέγχου αποτελείται από τα εξής διακριτά μέρη:

- Διαρέτης τάσης
- Διαφορικός ενισχυτής
- Ακόλουθος τάσης
- Αναστρέφων ανθροιστής
- Ολοκληρωτής
- Συγκριτής Schmitt Trigger
- Συγκριτής
- Τάση αναφοράς
- Ελεγκτής PI

Το σχηματικό διάγραμμα που υλοποιεί το MPPT παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4.

MPPT Controller



Σχήμα 5.4. Σχηματικό διάγραμμα Κυκλώματος Ελέγχου.

Η βασική ιδέα λειτουργίας αυτού του κυκλώματος είναι ο έλεγχος της τάσης στην γέφυρα του ανορθωτή σε μια ορισμένη τιμή. Για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος αρκεί να μεταβάλλουμε τον κύκλο λειτουργίας του μετατροπέα Buck-Boost έτσι ώστε να τροποποιηθεί η τάση στο επίπεδο που επιθυμούμε.

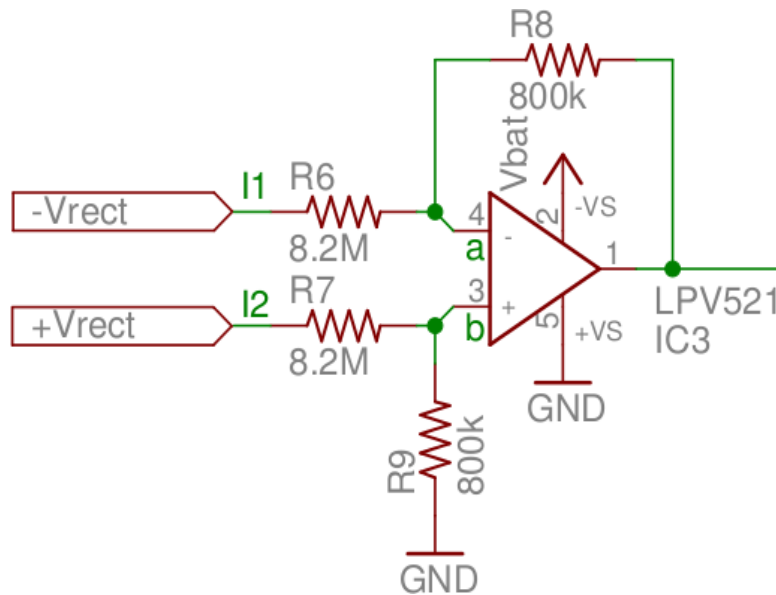
Το σύστημα δηλαδή δειγματοληπτεί την τάση της γέφυρας χρησιμοποιώντας έναν διαφορικό ενισχυτή. Αυτή η τάση συγκρίνεται με μια άλλη τάση, την V_{ref} σε έναν αναστρέφων ανθροιστή, το αποτέλεσμα της οποίας μας δίνει το σφάλμα της τάσης εισόδου από την τάση την οποία έχουμε ορίσει και επιθυμούμε. Το σήμα του σφάλματος αυτού εισάγεται σε έναν ελεγκτή PI ο οποίος είναι υπεύθυνος να πραγματοποιήσει τις μεταβολές στον κύκλο λειτουργίας έτσι ώστε το σφάλμα να μηδενιστεί. Η έξοδος του λοιπόν είναι μια τάση ανάλογη του κύκλου λειτουργίας.

Τέλος, τρία διαφορετικά στοιχεία, ένας ολοκληρωτής, ένας συγκριτής Schmitt Trigger και ένας συγκριτής δημιουργούν παλμούς PWM για την οδήγηση του διακόπτη (n-Mosfet) στον μετατροπέα. Οι παραπάνω λειτουργίες, όπως ολοκλήρωση ενός σήματος, διαφορική μέτρηση της τάσης, PI ελεγκτής πραγματοποιούνται με την βοήθεια τελεστικών ενισχυτών (op-amps).

5.4.1 Διαφορικός Ενισχυτής

Ο διαφορικός ενισχυτής είναι υπεύθυνος για την δειγματοληψία της τάσης στην γέφυρα του ανορθωτή, η οποία παράλληλα αποτελεί και τάση εισόδου του μετατροπέα. Επειδή όμως αυτή η τάση είναι σε διαφορετικό βρόχο από αυτόν της μπαταρίας, δηλαδή της τροφοδοσίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, δεν μπορεί να γίνει απευθείας μέτρηση της τάσης εισόδου αλλά χρειάζεται η διαφορική μέτρηση της τάσης αυτής, δηλαδή η μέτρηση της τάσης σε δύο σκέλη. Ένα σκέλος, μετράει την τάση από την θετική τάση εισόδου ως προς την γείωση. Το άλλο σκέλος είναι η μέτρηση της τάσης από την αρνητική πλευρά της εισόδου ως προς την γείωση. Με αυτόν τον τρόπο μετράμε την τάση $V_{rect}^+ - V_{GND}$ και την εισάγουμε στην αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή και την τάση $V_{rect}^- - V_{GND}$ στην μη αναστρέφουσα είσοδο του ενισχυτή, δηλαδή έχουμε την τάση $V_{rect}^+ - V_{GND} - [V_{rect}^- - V_{GND}] = V_{rect}^+ - V_{rect}^-$.

Για την εξαγωγή της συνάρτησης εξόδου του διαφορικού ενισχυτή, αναλύθηκε κάθε είσοδος ξεχωριστά[24].



Σχήμα 5.5. Το κύκλωμα του διαφορικού ενισχυτή.

Θεωρούμε ότι $R8 = R9$ και $R6 = R7$. Ισχύει ότι:

$$I_1 = \frac{V_1 - V_a}{R_1} \quad (5.2)$$

$$I_2 = \frac{V_2 - V_b}{R_2} \quad (5.3)$$

Περιπτώσεις:

$$\alpha) \text{ εάν } +V_{rect} = 0 \text{ τότε } V_{out} = -V_b \left(\frac{R_8}{R_6} \right) \quad (5.4)$$

$$\beta) \text{ εάν } -V_{rect} = 0 \text{ τότε } V_{out} = 0 \quad (5.5)$$

$$\text{Από την θεωρία των τελεστικών ενισχυτών ισχύει: } V_a = V_b, \quad V_{out} = V_a + V_b \quad (5.6)$$

$$\text{Άρα } V_{out} = -V_{rect} \left(\frac{R_8}{R_6} \right) \quad (5.7)$$

Ο διαφορικός ενισχυτής τάσης χρησιμοποιείται για την μέτρηση της τάσης στον ανορθωτή. Οι αντιστάσεις R6 και R8 ρυθμίζουν το κέρδος το οποίο λαμβάνει μετά την δειγματοληψία. Η τιμή στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή πρέπει να σέβεται τα όρια τροφοδοσίας του, οπότε και το κέρδος ρυθμίζεται ανάλογα. Οι αντιστάσεις R6, R7 έλαβαν τιμή αρκετά μεγάλη για να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια ισχύος σε αυτές και παρέμειναν σταθερές σε όλες τις περιπτώσεις.

5.4.2 Τάση Αναφοράς (Reference Voltage)

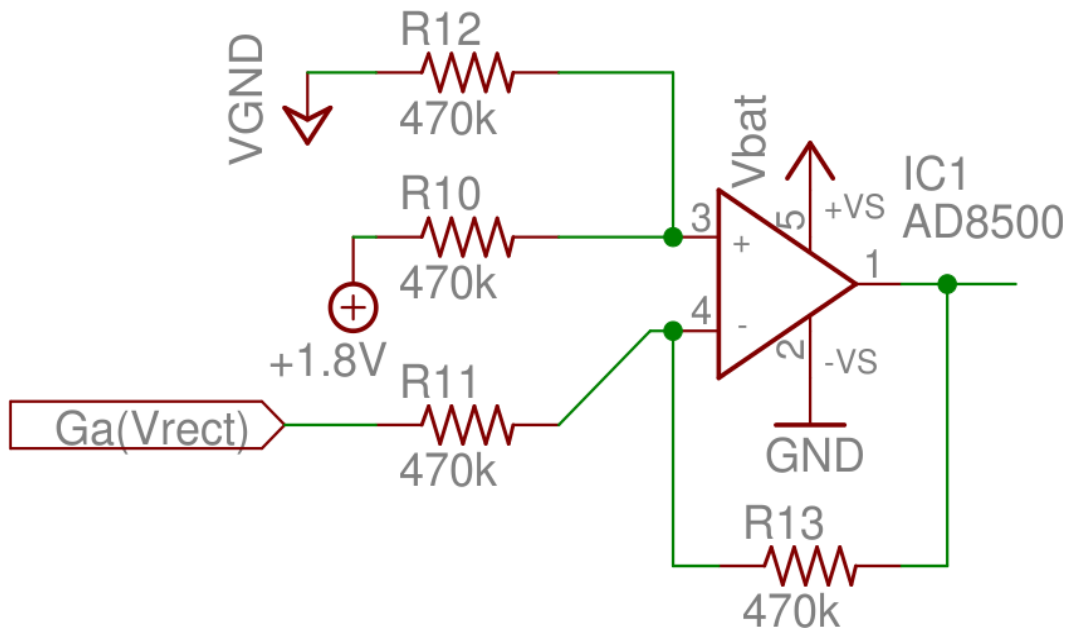
Η τάση στην έξοδο του ανορθωτή είναι ίση με την rms τιμή της τάσης εξόδου της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας. Ο αλγόριθμος της μεθόδου Σταθερής Τάσης συγκρίνει την τάση αυτή με την τάση αναφοράς MPP και αν υπάρχει απόκλιση, τότε ακολουθεί την κατάλληλη διαδικασία για να την ελαχιστοποιήσει και στην μόνιμη κατάσταση να την μηδενίσει. Για τον σκοπό αυτό στο κύκλωμα του συστήματος μας περιέχεται και μια μονάδα η οποία παράγει τάση σταθερή και ανεξάρτητη της τροφοδοσίας. Η μονάδα αυτή είναι μια τάση αναφοράς η οποία επιλέχτηκε να είναι ίση με $V_{ref} = 1.8V$. Το ολοκληρωμένο που παράγει την τάση αυτή είναι το MAX6018 της εταιρίας Maxim[25].

5.4.3 Αναστρέφων Αθροιστής

Μετά την λήψη της τιμής της τάσης και την σωστή ρύθμιση του κέρδους της τάσης V_{rect} γίνεται η αφαίρεση της ανορθωμένης τάσης και της τάσης αναφοράς (reference voltage) για την εξαγωγή της τιμής του σφάλματος. Το σφάλμα δίνεται από την εξίσωση:

$$e = V_{rect} - V_{ref} \quad (5.8)$$

Για τον υπολογισμό της εξίσωσης αυτής, χρησιμοποιήθηκε ένας αναστρέφων αθροιστής (Σχήμα 5.6) [26].



Σχήμα 5.6. Το κύκλωμα του αναστρέφων αθροιστή.

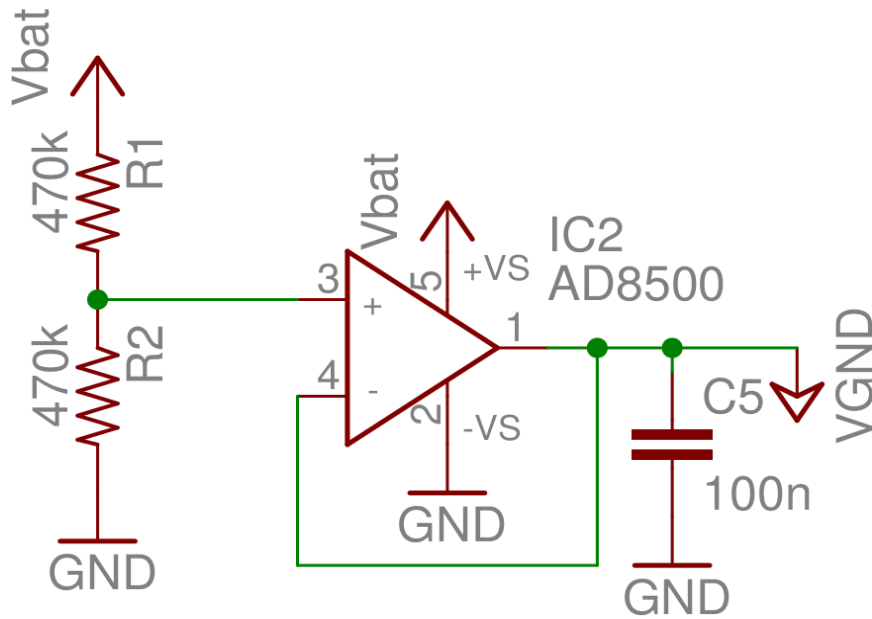
Το κύκλωμα του αναστρέφοντος αθροιστή που χρησιμοποιήθηκε έχει δύο τάσεις στην μη-αναστρέφουσα είσοδο και μία είσοδο από την αναστρέφουσα είσοδο. Η συνάρτηση μεταφοράς του αθροιστή αυτού είναι:

$$V_{out} = G_a(V_{rect})\left(\frac{-R_f}{R_1}\right) + V_{ref}\left(\frac{R_5}{R_5+R_4}\right)\left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right) + V_{VGND}\left(\frac{R_4}{R_5+R_4}\right)\left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right) \quad (5.9)$$

Παρατηρούμε έναν παραπάνω όρο (υπογραμμισμένος) ο οποίος αποτελεί στάθμη αναφοράς για την εικονική γείωση (virtual ground). Το κέρδος που θέσαμε στην τάση αναφοράς είναι μονάδα, διότι θέλουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος τάσεων.

5.4.4 Εικονική Γείωση (Virtual Ground)

Η τροφοδοσία του κυκλώματος χρησιμοποιεί δύο μπαταρίες AA 1.2V σε σειρά, σχηματίζοντας μια τάση κυκλώματος 2.4V. Όλα τα ολοκληρωμένα που χρησιμοποιούνται στο σύστημα αυτό τροφοδοτούνται από αυτή την τάση. Οι τελεστικοί ενισχυτές όταν έχουν μονή τροφοδοσία (single supply) έχουν εύρος τιμών εξόδου ανάμεσα στα όρια τροφοδοσίας, δηλαδή δεν μπορούν να αποδώσουν αρνητικές τιμές τάσης. Επειδή όμως υπάρχει ανάγκη για αρνητικές τιμές τάσεων, όπως για παράδειγμα όταν το σφάλμα είναι αρνητικό, εκτός από την γραμμή τροφοδοσίας, δημιουργούμε μία άλλη γραμμή, η οποία καλείται εικονική γείωση (virtual ground). Η τάση της εικονικής γείωσης τοποθετείται ανάμεσα στα όρια τροφοδοσίας, στην στάθμη της τάσης που διευκολύνει την λειτουργία του κυκλώματος. Μία συνήθη τακτική είναι να θέτουμε την τάση αυτή στην μισή της τάσης τροφοδοσίας. Το ίδιο υλοποιήσαμε και στο δικό μας σύστημα. Με αυτό τον τρόπο, μετατοπίζουμε το μηδέν στα υποσυστήματά μας στην εικονική γείωση και μπορούμε να παράγουμε (εικονικές) αρνητικές τιμές τάσεων.

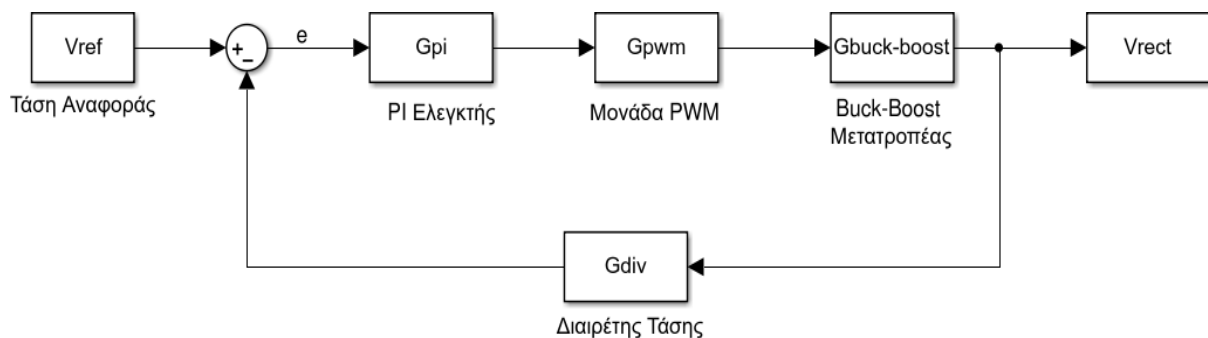


Σχήμα 5.7. Το κύκλωμα δημιουργίας της εικονικής γείωσης.

Για την υλοποίηση της εικονικής γείωσης, χρειάζεται ένας διαιρέτης τάσης με δύο ίσες αντιστάσεις, αφού θέλουμε την μισή ακριβώς τάση τροφοδοσίας, ακολουθούμενη από έναν τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία ακόλουθου τάσης. Τέλος ένας πυκνωτής της τάξεως των 100nF φιλτράρει οποιονδήποτε θόρυβο στην γραμμή αυτή. Για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ισχύος, χρησιμοποιήθηκαν μεγάλες τιμές αντιστάσεων.

5.4.5 Ελεγκτής PI

Για την εξασφάλιση της ευστάθειας του συστήματος μας, υλοποιήθηκε ένας ελεγκτής PI. Ο ελεγκτής αυτός δέχεται ως είσοδο το σφάλμα της τάσης και ρυθμίζει κατάλληλα στην έξοδο του τον κύκλο λειτουργίας του μετατροπέα. Το συνολικό σύστημα ελέγχου αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 5.8. Το γενικό διάγραμμα του συνολικού συστήματος ελέγχου που υλοποιήθηκε.

Αναλύοντας το κάθε μπλοκ ξεχωριστά έχουμε τις εξής συναρτήσεις μεταφοράς:

- **PI ελεγκτής:**

$$G_{PI} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (5.10)$$

όπου ο K_p είναι ο αναλογικός (proportional) παράγοντας και K_i ο παράγοντας ολοκλήρωσης (integral).

- **PWM:**

$$G_{pwm} = \frac{1}{V_{TH} - V_{TL}} \quad (5.11)$$

όπου V_{TH} και V_{TL} είναι η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή τάσης, αντίστοιχα στην τριγωνική κυματομορφή για την παραγωγή του παλμού PWM.

- **Μετατροπέας buck-boost (σε κατάσταση ασυνεχής αγωγής)[21]:**

$$G_{buck-boost}^{DCM} = \frac{G_{vd}(s)}{G_{vg}(s)} = \frac{\frac{4V_{rect}}{T_s D} - 2V_{rect}s}{\frac{4}{T_s} - Ds} \quad (5.12)$$

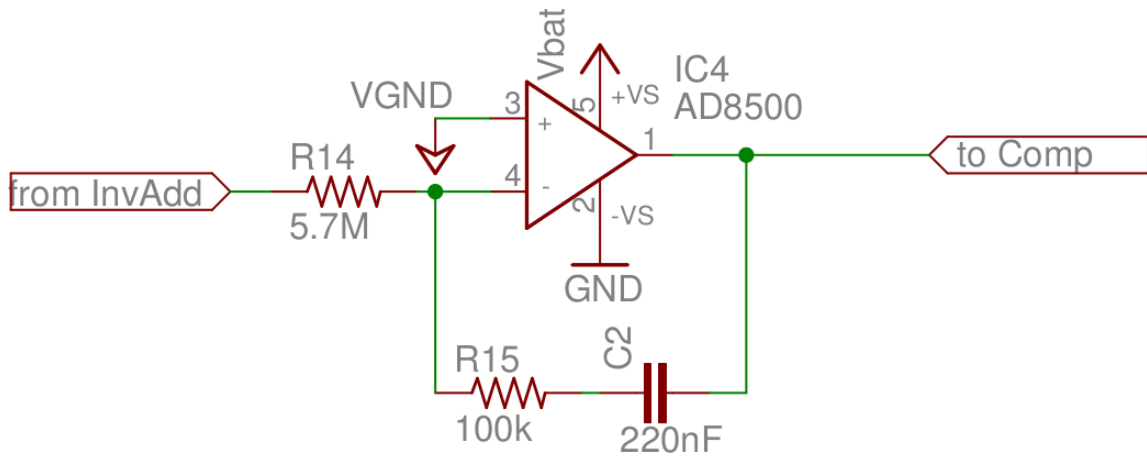
- **Διαιρέτης τάσης:**

$$G_{DIV} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{R_6}{R_6 + R_8} \quad (5.13)$$

Έπειτα όλες οι συναρτήσεις μεταφοράς μεταφέρθηκαν σε αρχείο script της Matlab, όπου συγκροτήθηκε το συνολικό σύστημα. Το σύστημα προσομοιώθηκε με σκοπό την εξαγωγή των συντελεστών K_p , K_i όπου το σύστημα είναι ευσταθές. Οι τιμές που απέδωσε το script αρχείο είναι:

- $K_i = 0.721$
- $K_p = 0.015623$

Οι παράγοντες αυτοί χρειάστηκαν τροποποίηση που πραγματοποιήθηκε πειραματικά για την επίτευξη του σημείου MPP σε μικρότερο χρόνο και με μικρότερη υπερύψωση(overshoot). Το κύκλωμα που υλοποιεί τον ελεγκτή PI είναι το παρακάτω:



Σχήμα 5.9. Το κύκλωμα του ελεγκτή PI.

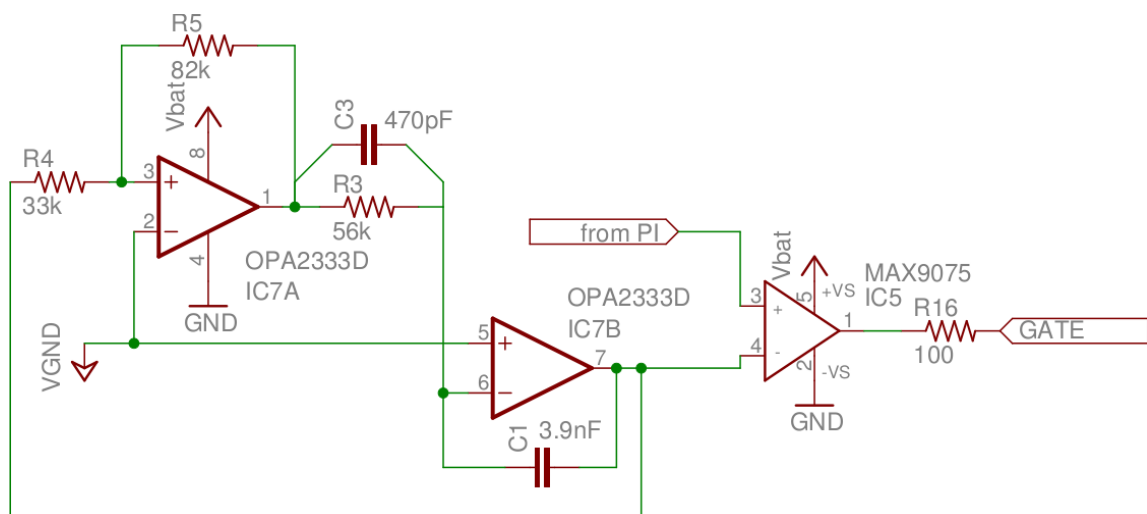
Η ρύθμιση των παραμέτρων K_p , K_i γίνεται μέσω των παθητικών στοιχείων του κυκλώματος. Δηλαδή:

- $K_i = \frac{1}{C_2 R_{14}}$ (5.14)

- $K_p = \frac{R_{15}}{R_{14}}$ (5.15)

5.4.6 Μονάδα PWM

Η μονάδα PWM παράγει παλμούς μεταβλητού εύρους οι οποίοι οδηγούν το Mosfet του μετατροπέα. Το εύρος των παλμών καθορίζει τον κύκλο λειτουργίας με αποτέλεσμα να μεταβάλλει και την τάση στην έξοδο του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Το πλάτος αυτό ρυθμίζεται από τον ελεγκτή PI που περιγράψαμε σε προηγούμενη παράγραφο.



Σχήμα 5.10. Το κύκλωμα της μονάδας PWM

Για την δημιουργία ενός παλμού PWM με απλό τρόπο, χρειάζονται να συγκρίνουμε δύο σήματα, ένα τριγωνικό και ένα σήμα σταθερής τάσης. Τα δύο αυτά σήματα

εισάγονται σε ένα ολοκληρωμένο, συγκριτή (Comparator) του οποίου η έξοδος είναι ένα σήμα PWM. Ο συγκριτής συγκρίνει την σταθερή τάση που εισέρχεται στην μία είσοδο του και όταν αυτή είναι μεγαλύτερη από την τάση του τριγωνικού παλμού στην άλλη είσοδό του, παράγει στην έξοδο μια υψηλή στάθμη. Σε αντίθετη περίπτωση η έξοδος του παραμένει σε χαμηλή στάθμη.

Η δημιουργία του τριγωνικού παλμού πραγματοποιείται από δύο υποκυκλώματα, έναν ολοκληρωτή και έναν συγκριτή Schmitt Trigger [27][28][29]. Η αρχή στην οποία βασίζεται το κύκλωμα αυτό είναι ότι το ολοκληρώμα ενός τετραγωνικού παλμού, είναι ένα τριγωνικό σήμα. Έτσι ο ολοκληρωτής ολοκληρώνει τους τετραγωνικούς παλμούς που παράγονται από τον συγκριτή Schmitt Trigger. Ο συγκριτής Schmitt Trigger παράγει τους παλμούς αυτούς όταν το σήμα εισόδου του ξεπεράσει τα κατώφλια V_{TH} , (άνω κατώφλι) και V_{TL} , (κάτω κατώφλι). Το σήμα εισόδου του είναι το ίδιο το τριγωνικό. Τα κατώφλια καθορίζονται από τις τιμές των αντιστάσεων R_4 και R_5 και την τάση τροφοδοσίας V_{cc} :

$$V_{TH} = V_{cc} \frac{(R_4 + R_5)}{2R_5} \quad (5.16)$$

$$V_{TL} = V_{cc} \frac{(R_4 - R_5)}{2R_5} \quad (5.17)$$

με $R_5 > R_4$. Η τάση από κορυφή σε κορυφή του τριγώνου είναι:

$$V_{Tri}^{p-p} = \frac{R_4}{R_5} V_{cc} \quad (5.18)$$

Ο χρόνος της περιόδου του τριγωνικού σήματος ορίζεται ως [29]:

$$t^{\pm} = R_3 C_1 \ln \left(\frac{V_{cc} + V_{TH}}{V_{cc} - V_{TH}} \right) \quad (5.19)$$

όπου t^{\pm} ο χρόνος της μισής περιόδου του τριγωνικού σήματος.

$$f_{trig} = \frac{1}{t^+ + t^-} \quad (5.20)$$

Ρυθμίζοντας την ποσότητα $R_3 C_1$, μεταβάλλουμε την συχνότητα του τριγωνικού σήματος. Η συχνότητα αυτή είναι ταυτόχρονα και η συχνότητα του σήματος PWM. Στον μετατροπέα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η συχνότητα λειτουργίας τέθηκε στο 1kHz με τιμές $R_3 = 56k\Omega$ και $C_1 = 3.9nF$. Η επιλογή των τελεστικών ενισχυτών της μονάδας αυτής έγινε με βάση την τιμή του μέγιστου ρυθμού μεταβολής (slew rate) καθώς και του εύρους ζώνης (bandwidth) των τελεστικών ενισχυτών. Με όρο την ελάχιστη κατανάλωση και τα παραπάνω κριτήρια, επιλέχτηκε ο OPA2333 της Texas Instruments. Το ολοκληρωμένο τσιπ που χρησιμοποιείται για την σύγκριση των δύο σημάτων, τριγωνικού και σταθερής τάσης, δεν είναι ένας τελεστικός

ενισχυτής αλλά ένας συγκριτής. Ο συγκριτής παρουσιάζει ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι του τελεστικού ενισχυτή, και αυτό είναι η ταχύτητα του. Ο συγκριτής που χρησιμοποιείται είναι ο MAX9075 της εταιρίας Maxim.

Κατά την σχεδίαση του μετατροπέα προέκυψε το συμπέρασμα ότι αυξάνοντας την συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα, μειώνουμε την τιμή του πηνίου που χρειάζεται για την επίτευξη της ίδιας θεωρητικής τιμής αντίστασης εισόδου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μια μεγάλη συχνότητα PWM σήματος θα μείωνε αρκετά το πηνίο. Δυστυχώς όμως όπως είδαμε και στην ενότητα αυτή, το σήμα PWM που οδηγεί τον διακόπτη, παράγεται από τρία ολοκληρωμένα τσιπ. Παρατηρήσαμε ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας, αυξάνεται και η συνολική κατανάλωση της μονάδας PWM επειδή τα εξαρτήματα που την αποτελούν καταναλώνουν περισσότερη ισχύ. Επειδή η δική μας πιεζοηλεκτρική γεννήτρια είναι χαμηλής παραγωγής ισχύος περιοριστήκαμε στην συχνότητα του 1kHz.

Κεφάλαιο 6

Πειραματικά Αποτελέσματα

6.1 Πειράματα

Μετά την σχεδίαση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5, σειρά έχει ο έλεγχος λειτουργίας και η αξιολόγηση του. Σε αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνονται όλα τα πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν. Τα πειράματα αυτά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

A. Πειράματα στην λειτουργία του μετατροπέα Buck-Boost χωρίς κύκλωμα ελέγχου. Σκοπός αυτής της ομάδας των πειραμάτων είναι ο έλεγχος ορθής λειτουργίας του μετατροπέα, καθώς και η κατανόηση της συμπεριφοράς της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας.

B. Πειράματα με το κύκλωμα ελέγχου, για διαφορετικές συνθήκες ταλάντωσης της γεννήτριας (διαφορετικά πλάτη και συχνότητες ταλάντωσης) όπου ορίστηκαν **διαφορετικά σημεία λειτουργίας** δηλαδή για κάθε τιμή πλάτους ταλάντωσης καθορίστηκε ένα σημείο MPP. Τα σημεία αυτά ορίστηκαν σημεία λειτουργίας του συστήματος ελέγχου.

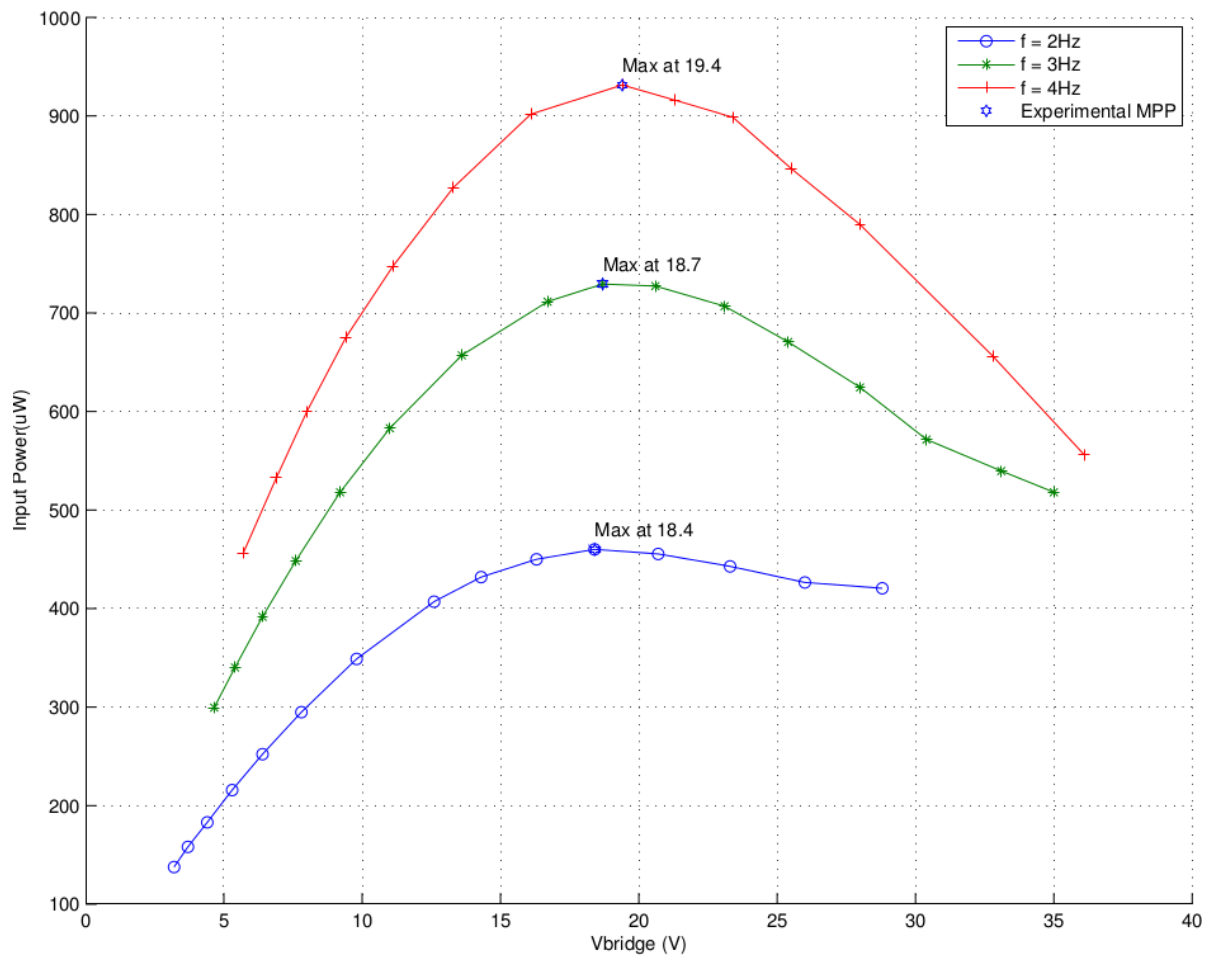
Γ. Πειράματα με το κύκλωμα ελέγχου, για διαφορετικές συνθήκες ταλάντωσης της γεννήτριας (διαφορετικά πλάτη και συχνότητες ταλάντωσης) με ένα **καθολικό και σταθερό σημείο λειτουργίας**. Για όλες τις τιμές πλάτους καθορίστηκε ένα καθολικό σημείο MPP και ρυθμίστηκε το σύστημα ελέγχου σε αυτό.

6.1.1 Πειράματα για την λειτουργία του μετατροπέα και της γεννήτριας.

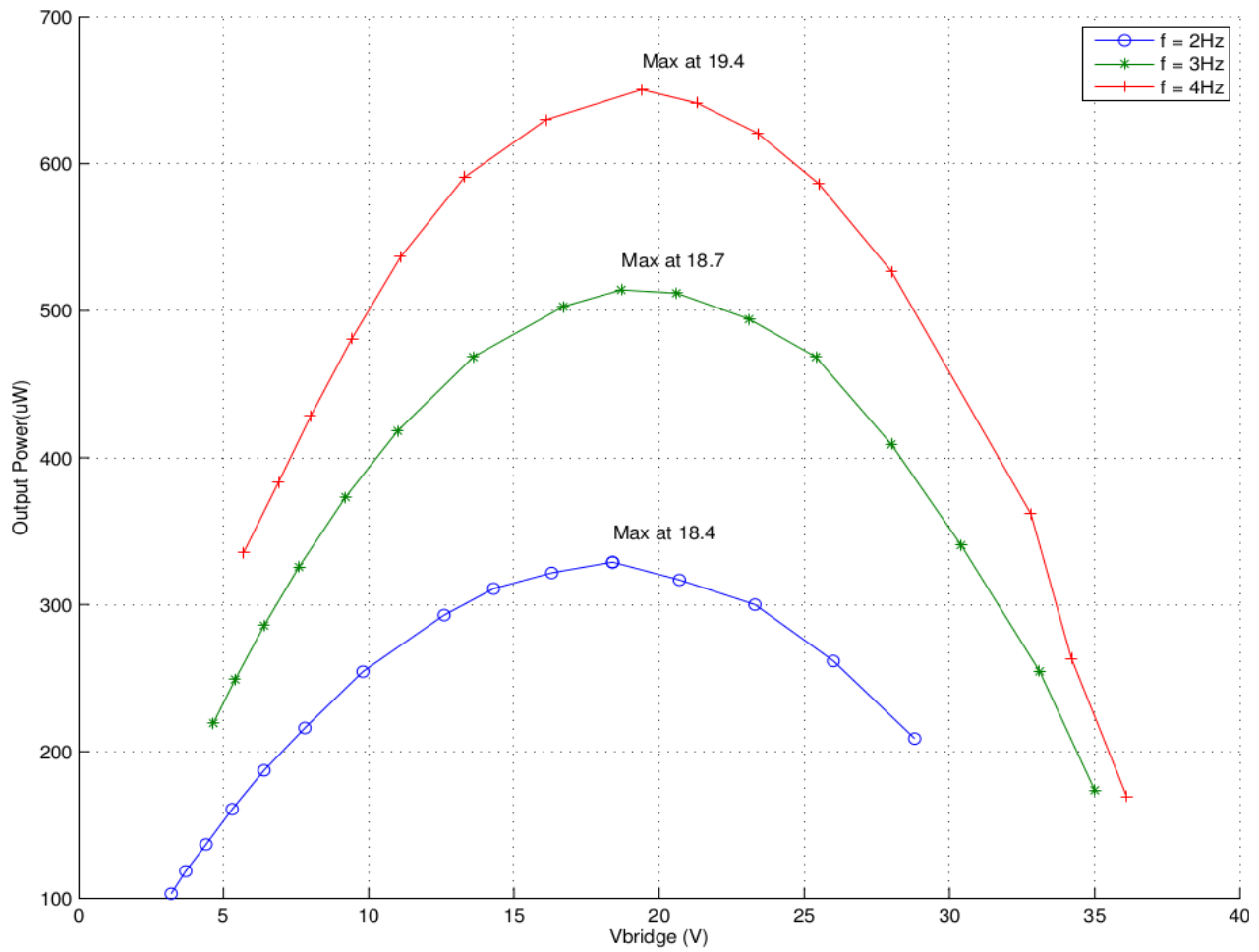
Στην πρώτη ομάδα πειραμάτων συνδέεται ο μετατροπέας Buck-Boost στα άκρα της γεννήτριας και με φορτίο μια μπαταρία. Το σύστημα είναι συνδεδεμένο σε διάταξη ανοικτού βρόχου, δηλαδή χωρίς το κύκλωμα ελέγχου. Η διεξαγωγή των πειραμάτων γίνεται ως εξής:

- Ο κύκλος λειτουργίας μεταβάλλεται χειροκίνητα από εξωτερική γεννήτρια σήματος PWM.
- Για κάθε μεταβολή του κύκλου λειτουργίας, καταγράφονται η παραγόμενη ισχύς και η ισχύς εξόδου του μετατροπέα. Για την ανίχνευση του ακριβούς σημείου MPP, το βήμα της μεταβολής αυτής δεν είναι σταθερό αλλά μεταβαλλόμενο.
- Αλλαγή συνθηκών ταλάντωσης και επανάληψη των παραπάνω βημάτων.

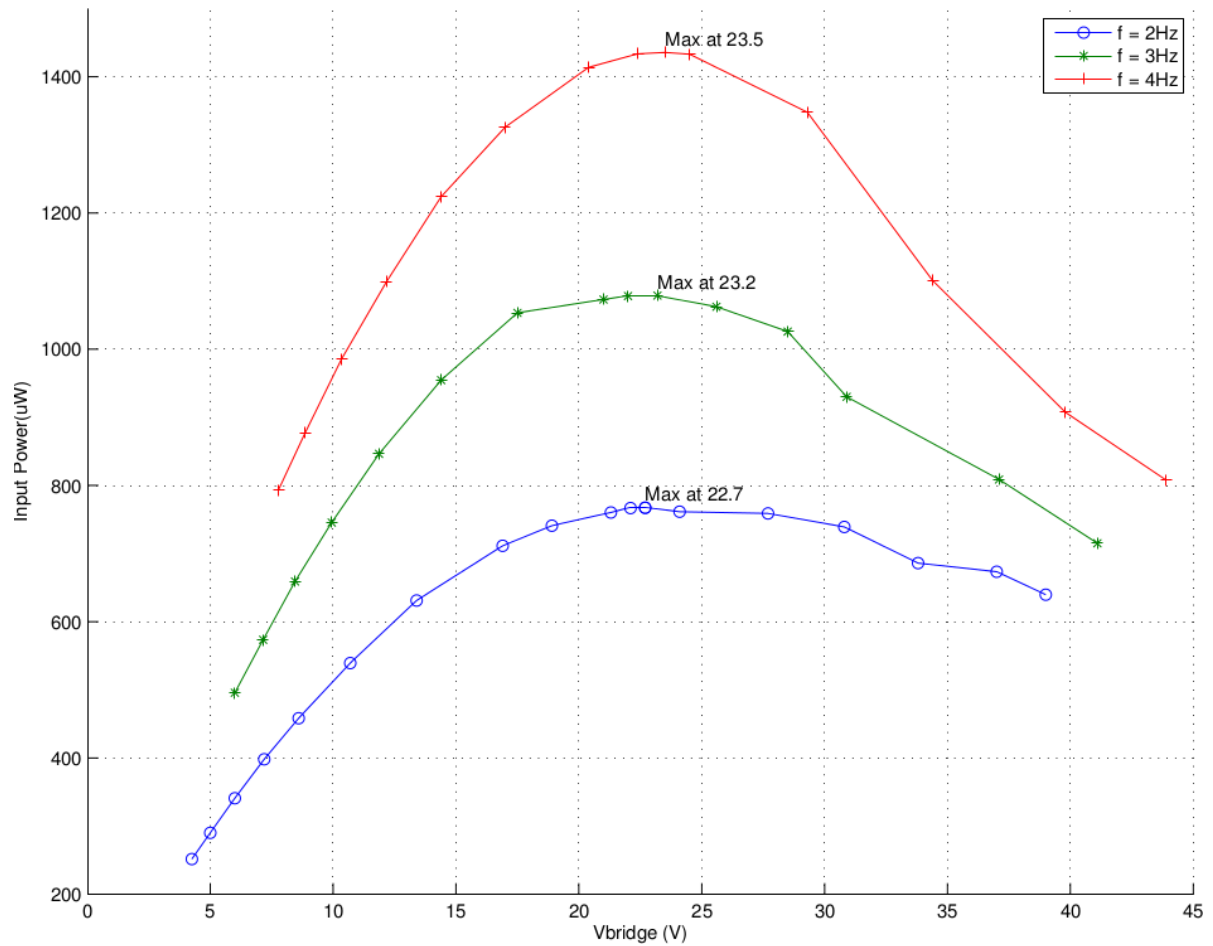
Τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων κατηγοριοποιούνται με το πλάτος της ταλάντωσης και της μετρούμενης ισχύος. Δηλαδή, όσον αφορά το πλάτος έχουμε τις εξής τιμές 2mm, 3mm, 4mm και όσον αφορά την μετρούμενη ισχύ, σε ισχύ εισόδου και ισχύ εξόδου του μετατροπέα. Στα Σχήματα 6.1 – 6.6 παρουσιάζονται οι καμπύλες ισχύος ως προς την τάση στην γέφυρα ανόρθωσης. Τα Σχήματα αυτά διαφοροποιούνται ανάλογα το πλάτος της ταλάντωσης (A) της πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας. Για κάθε διαφορετική τιμή του πλάτους ταλάντωσης, ομαδοποιούνται τα πειράματα για διαφορετικές τιμές συχνότητας ταλάντωσης (f). Τέλος, τα διαγράμματα αποτυπώνονται τόσο για την ισχύ εισόδου του μετατροπέα Buck-Boost και την τάση της γέφυρας ανόρθωσης, όσο και για την ισχύ εξόδου του μετατροπέα Buck-Boost και την τάση της γέφυρας ανόρθωσης.



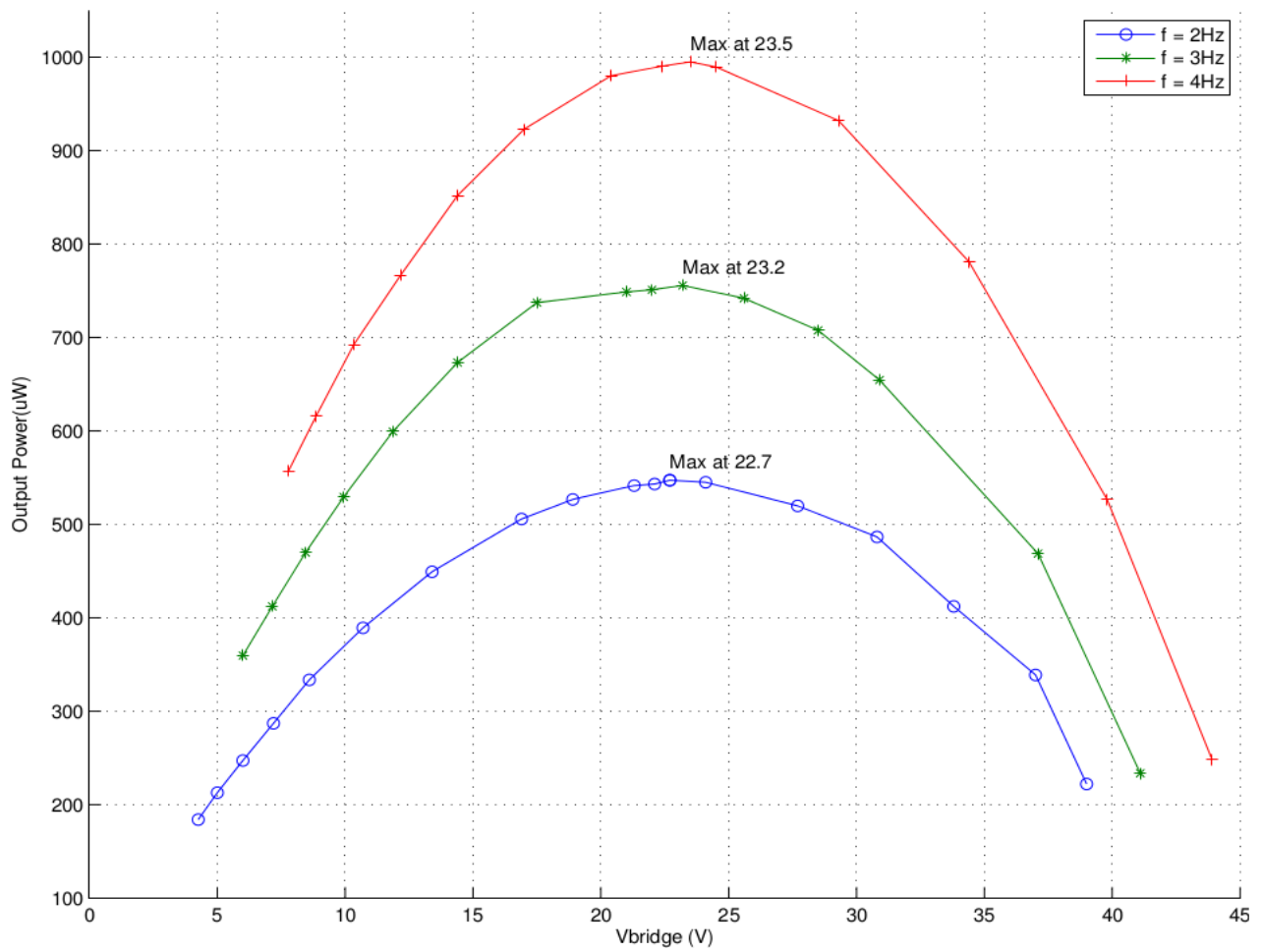
Σχήμα 6.1. Πειραματικές καμπύλες ισχύος εισόδου για πλάτος ταλάντωσης 2mm.



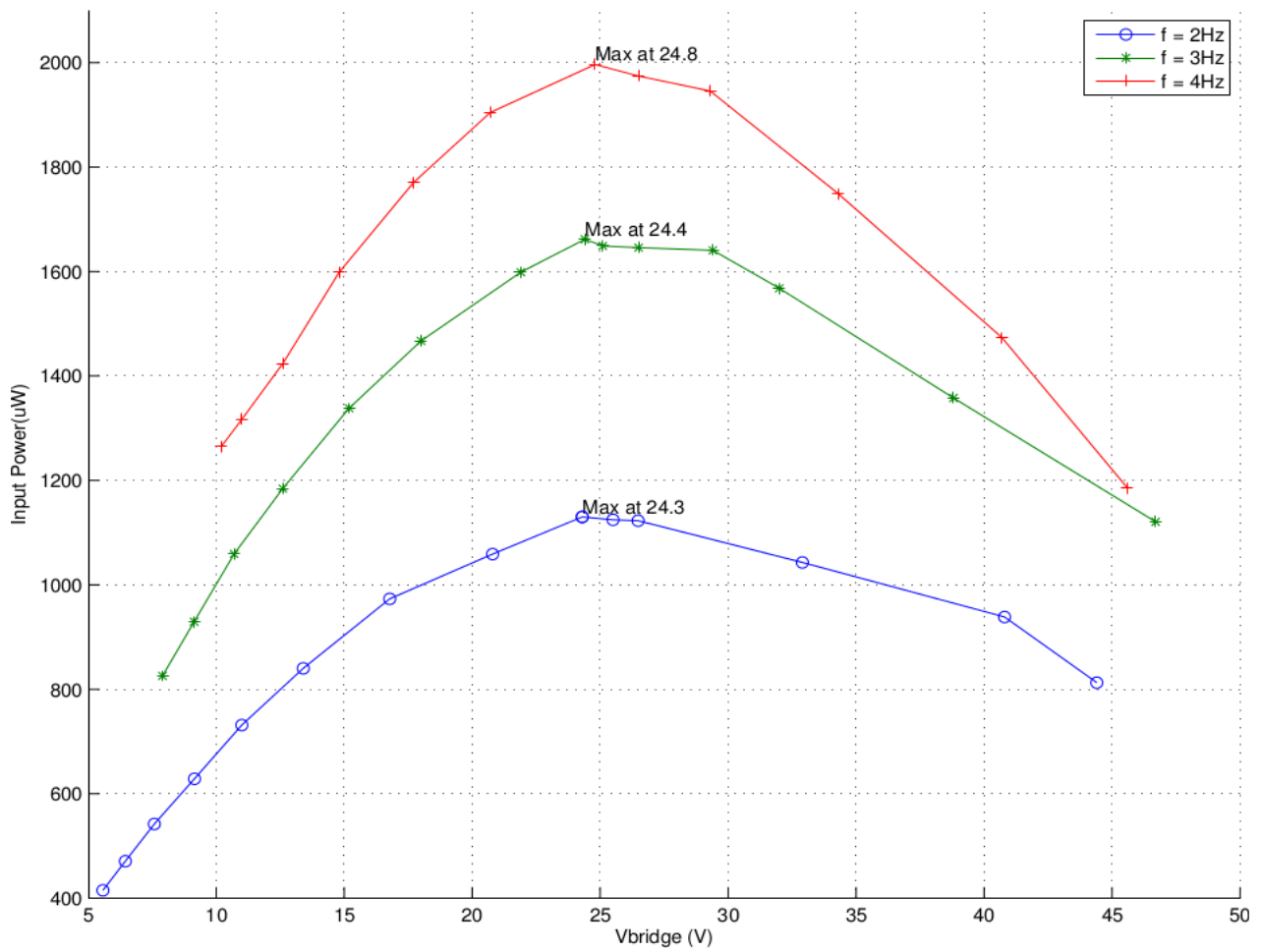
Σχήμα 6.2. Πειραματικές καμπύλες ισχύος εξόδου για πλάτος ταλάντωσης 2mm.



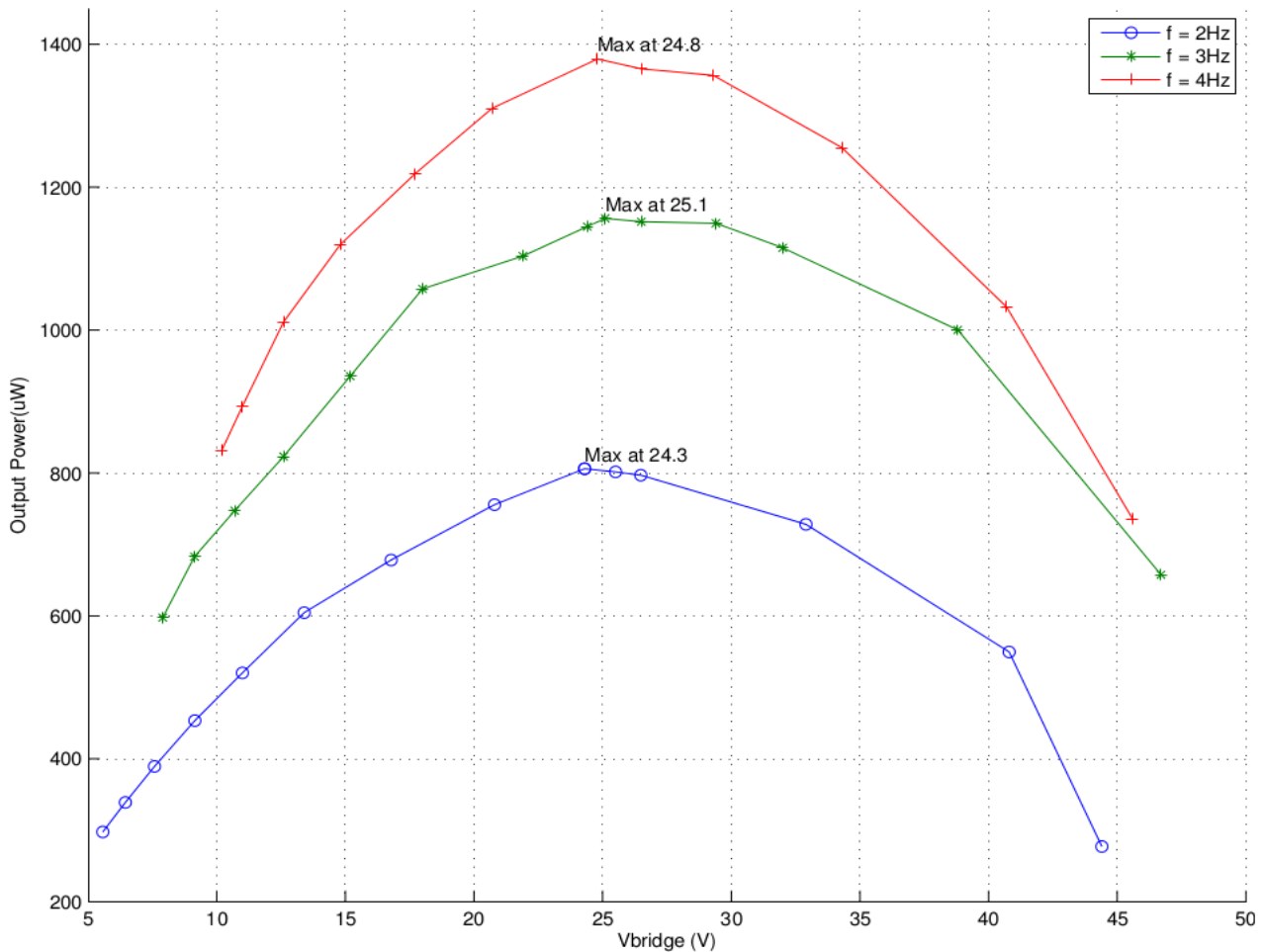
Σχήμα 6.3. Πειραματικές καμπύλες ισχύος εισόδου για πλάτος ταλάντωσης 3mm.



Σχήμα 6.4. Πειραματικές καμπύλες ισχύος εξόδου για πλάτος ταλάντωσης 3mm.



Σχήμα 6.5. Πειραματικές καμπύλες ισχύος εισόδου για πλάτος ταλάντωσης 4mm.



Σχήμα 6.6. Πειραματικές καμπύλες ισχύος εξόδου για πλάτος ταλάντωσης 4mm.

Στα παραπάνω διαγράμματα έχουν σημειωθεί τα σημεία στα οποία η παραγωγή ενέργειας είναι η μέγιστη. Επίσης από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η τάση στα σημεία MPP για το ίδιο πλάτος ταλάντωσης και διαφορετικές συχνότητες παραμένει σταθερή ή σχεδόν σταθερή, συμπέρασμα δηλαδή όμοιο και με αυτό του δεύτερου κεφαλαίου.

6.1.2 Πειράματα με διαφορετικά σημεία λειτουργίας

Στα πρώτα πειράματα που διεξήχθησαν, παρατηρήσαμε ότι τα σημεία MPP έχουν την ίδια τάση για το ίδιο πλάτος μηχανικής ταλάντωσης. Με αυτή την προϋπόθεση στην δεύτερη σειρά πειραμάτων καθορίσαμε την τάση για κάθε περίπτωση πλάτους ταλάντωσης και ρυθμίσαμε το ηλεκτρονικό σύστημα στην τάση αυτή. Έπειτα με το σύστημα να είναι σε συνδεσμολογία κλειστού βρόγχου, δηλαδή ο μετατροπέας να ελέγχεται από την μονάδα ελέγχου, πραγματοποιήθηκαν πειράματα για διάφορες συνθήκες ταλάντωσης.

Πίνακας 6.1. Πειραματικά σημεία μέγιστης παραγωγής ισχύος.

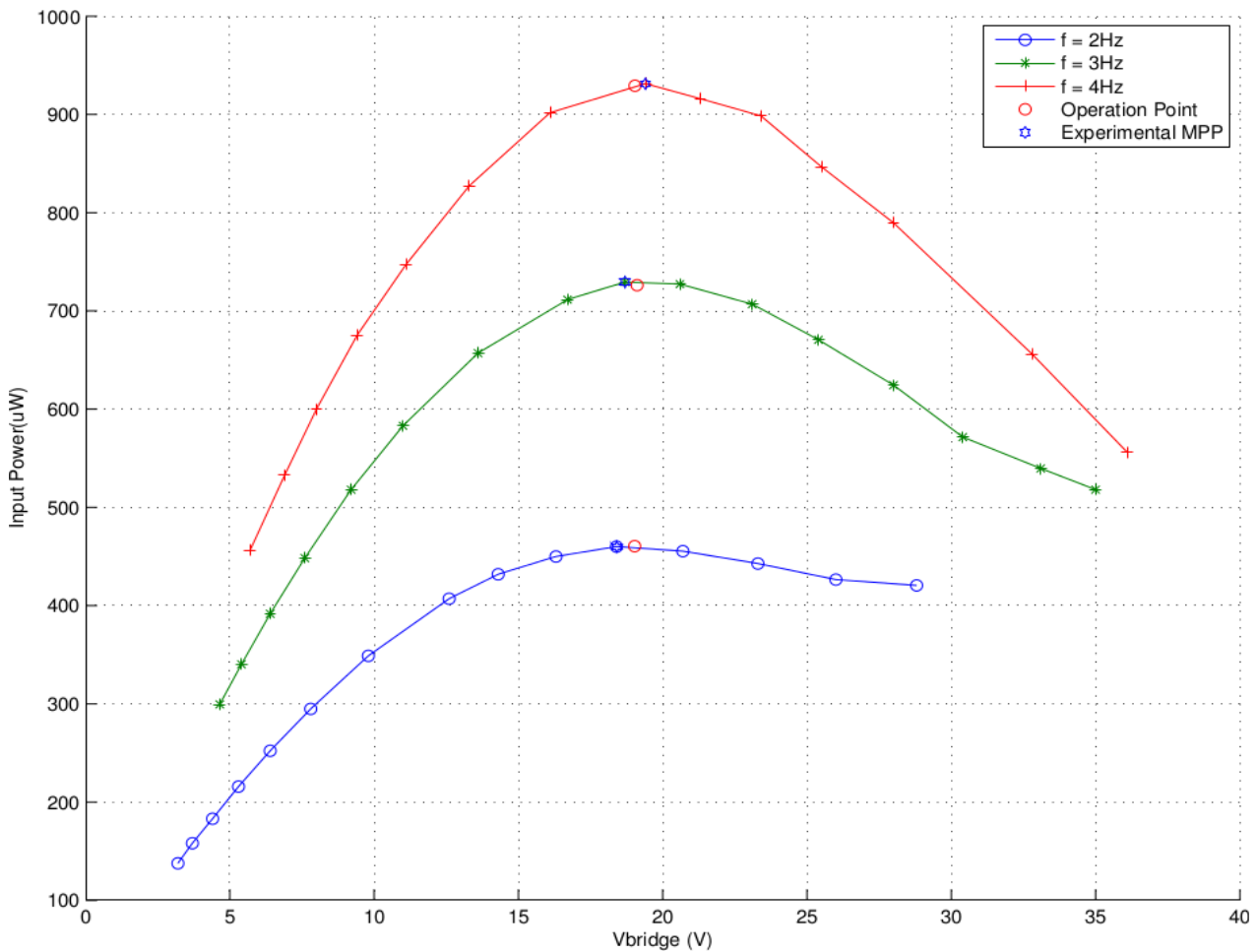
Πλάτος Ταλάντωσης	Συχνότητα Ταλάντωσης	Τάση MPP Εισόδου	Τάση MPP Εξόδου
A = 2mm	F = 2Hz	18.4V	18.4V
A = 2mm	F = 3Hz	18.7V	18.7V
A = 2mm	F = 4Hz	19.4V	19.4V
A = 3mm	F = 2Hz	22.7V	22.7V
A = 3mm	F = 3Hz	23.2V	23.2V
A = 3mm	F = 4Hz	23.5V	23.5V
A = 4mm	F = 2Hz	24.3V	24.3V
A = 4mm	F = 3Hz	24.4V	25.1V
A = 4mm	F = 4Hz	24.8V	24.8V

Στον Πίνακα 6.1 φαίνεται ότι η τάση MPP με βάση την ισχύ εισόδου είναι ίδια με την τάση MPP της ισχύος εξόδου. Έτσι χρησιμοποιώντας τον Πίνακα 6.1, μπορούμε να ορίσουμε τα σημεία MPP με βάση το πλάτος ταλάντωσης όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2.

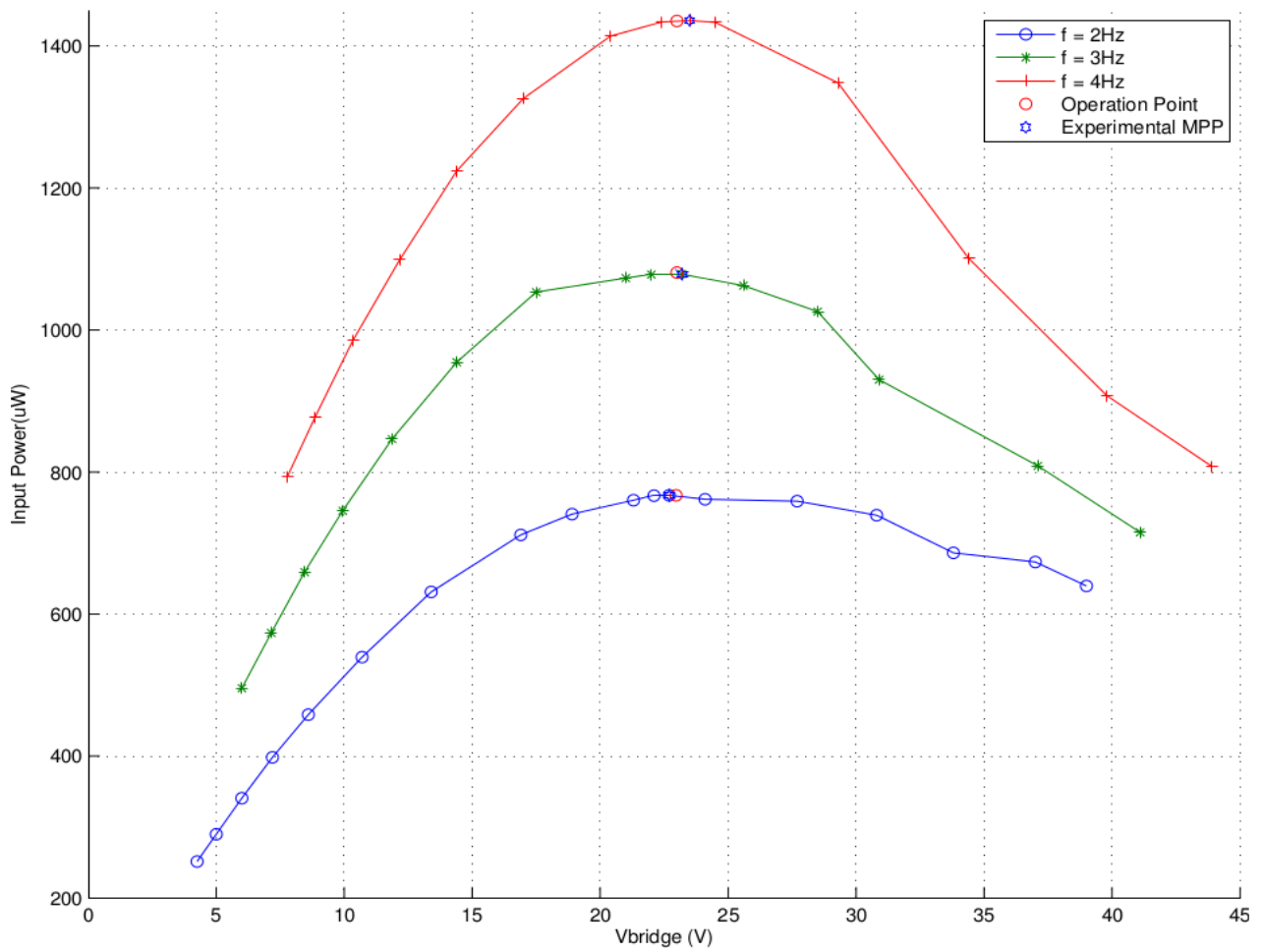
Πίνακας 6.2. Σημεία που ορίστηκε η λειτουργία του συστήματος ελέγχου.

Πλάτος Ταλάντωσης	Σημείο Λειτουργίας
A = 2mm	19V
A = 3mm	23V
A = 4mm	24V

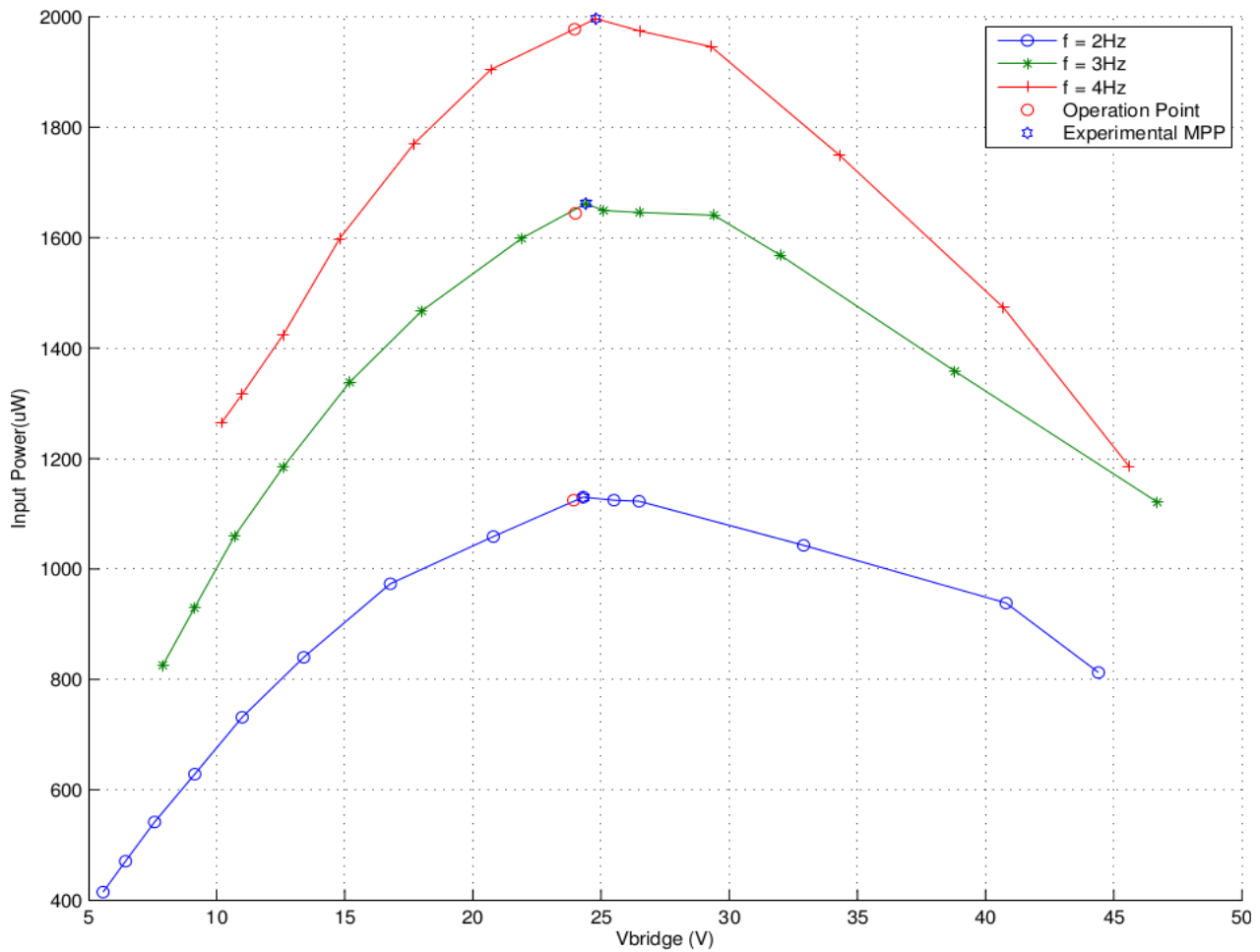
Τα επόμενα πειράματα έγιναν με την ρύθμιση του συστήματος ελέγχου στο κατάλληλο σημείο λειτουργίας, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.2 για κάθε διαφορετική τιμή του πλάτους ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα από τα παραπάνω πειράματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.7 – 6.9. Στα αποτελέσματα αυτά έχουν σημειωθεί το πειραματικό σημείο MPP που εντοπίστηκε στα πειράματα της Ενότητας 6.1.1 καθώς και το πειραματικό σημείο λειτουργίας του συστήματος ελέγχου.



Σχήμα 6.7. Πειραματικά αποτελέσματα για πλάτος ταλάντωσης 2mm και τάση σημείου λειτουργίας ίση με 19V.



Σχήμα 6.8. Πειραματικά αποτελέσματα για πλάτος ταλάντωσης 3mm και τάση σημείου λειτουργίας ίση με 23V.



Σχήμα 6.9. Πειραματικά αποτελέσματα για πλάτος ταλάντωσης 4mm και τάση σημείου λειτουργίας ίση με 24V.

Τα αποτελέσματα της δεύτερης σειράς πειραμάτων εκτίθενται στα Σχήματα 6.7-6.9. Φαίνεται μία μικρή απόκλιση του θεωρητικού σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος και του πειραματικού σημείου στο οποίο λειτουργεί το προτεινόμενο σύστημα.

Πίνακας 6.3. Η διαφορά ισχύος μεταξύ θεωρητικού και πειραματικού MPP.

Πλάτος Ταλάντωσης	Συχνότητα Ταλάντωσης	Πειραματική Μέγιστη Παραγωγή Ισχύος(μW)	Μέγιστη Παραγωγή Ισχύος(μW) που προέκυψε	Διαφορά (%)
A = 2mm	F = 2Hz	460	460	0
A = 2mm	F = 3Hz	729.3	726.2	0.42
A = 2mm	F = 4Hz	931.2	929.2	0.21
A = 3mm	F = 2Hz	761.5	767	-0.72
A = 3mm	F = 3Hz	1078	1081	-0.27
A = 3mm	F = 4Hz	1435	1434	0.07
A = 4mm	F = 2Hz	1130	1124.7	0.47

$A = 4\text{mm}$	$F = 3\text{Hz}$	1661	1644	1.02
$A = 4\text{mm}$	$F = 4\text{Hz}$	1996	1977.5	0.93

Στον Πίνακα 6.3, υπολογίστηκαν οι διαφορές επί τις εκατό, στην παραγόμενη ισχύ από το σημείο όπου ρυθμίστηκε να λειτουργεί το σύστημα ελέγχου και την ισχύ που προέκυψε στο πειραματικό, κατά τη λειτουργία του συστήματος ελέγχου που θέσαμε. Ο υπολογισμός της απόκλισης έγινε με βάση τη σχέση:

$$\text{Διαφορά}(\%) = \frac{P_{MPP}^{\text{επιθυμητό}} - P_{\text{σημείο}}^{\text{πειραματικό}}}{P_{MPP}^{\text{επιθυμητό}}} \quad (6.1)$$

Η διαφορά αυτή είναι στις περισσότερες περιπτώσεις μικρότερη από 1% και αυτό σημαίνει ότι η συμπεριφορά του συστήματος είναι ικανοποιητική για διάφορες συνθήκες ταλάντωσης. Σε δύο περιπτώσεις, η διαφορά είναι ακόμα και αρνητική που σημαίνει ότι το σημείο λειτουργίας που θέσαμε, είναι υψηλότερης παραγωγής ισχύος από τις παρατηρήσεις της προηγούμενης ενότητας. Αυτό συνέβη διότι το βήμα του κύκλου λειτουργίας στην προηγούμενη ενότητα δεν ήταν τόσο μικρό, ώστε να μεταβεί στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας ο μετατροπέας.

6.1.3 Πειράματα με μοναδικό σημείο λειτουργίας

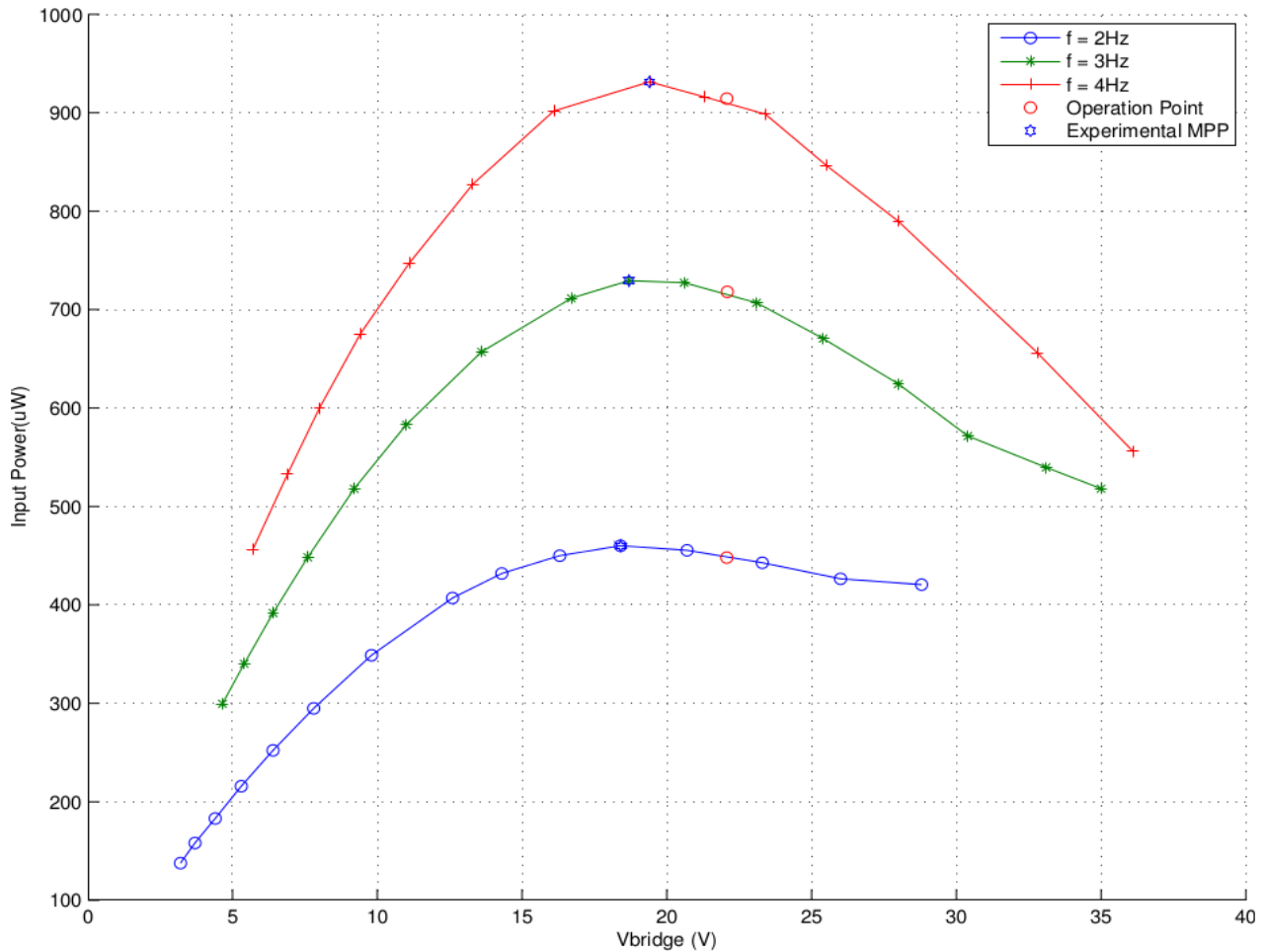
Στην τρίτη σειρά πειραμάτων, η τάση του σημείου λειτουργίας ορίστηκε σταθερή και ανεξάρτητη από τις συνθήκες ταλάντωσης είτε αυτές είναι μεταβολή του πλάτους είτε είναι μεταβολή συχνότητας. Με βάση τα προηγούμενα σημεία λειτουργίας που θέσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, το νέο σημείο που ρυθμίσαμε τη μονάδα ελέγχου είναι η μέση τιμή των προηγούμενων:

Πίνακας 6.4. Πίνακας τιμών τάσης μοναδικού σημείο MPP.

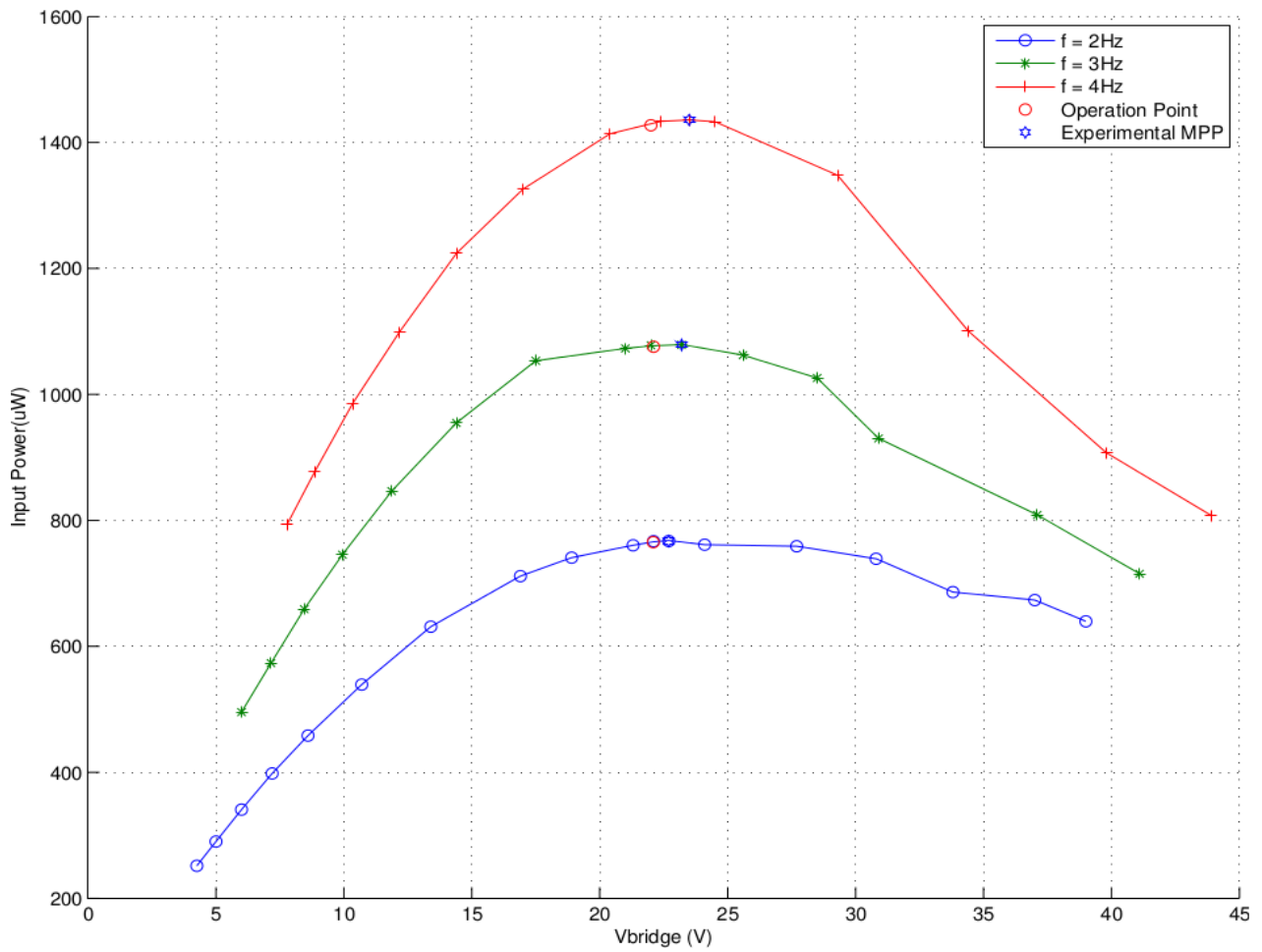
Πλάτος Ταλάντωσης	Πραγματική Τάση MPP	Τάση Ρύθμισης του συστήματος ελέγχου
$A = 2\text{mm}$	19V	22V
$A = 3\text{mm}$	23V	
$A = 4\text{mm}$	24V	

Αφού ορίσαμε το μοναδικό σημείο λειτουργίας σε τάση ίση με 22V, πραγματοποιήθηκαν τα ίδια πειράματα με ποικίλες συνθήκες ταλάντωσης για την αξιολόγηση της ακρίβειας ρύθμισης της θέσης του σημείου MPP καθώς και της τεχνικής Σταθερής Τάσης συνολικά.

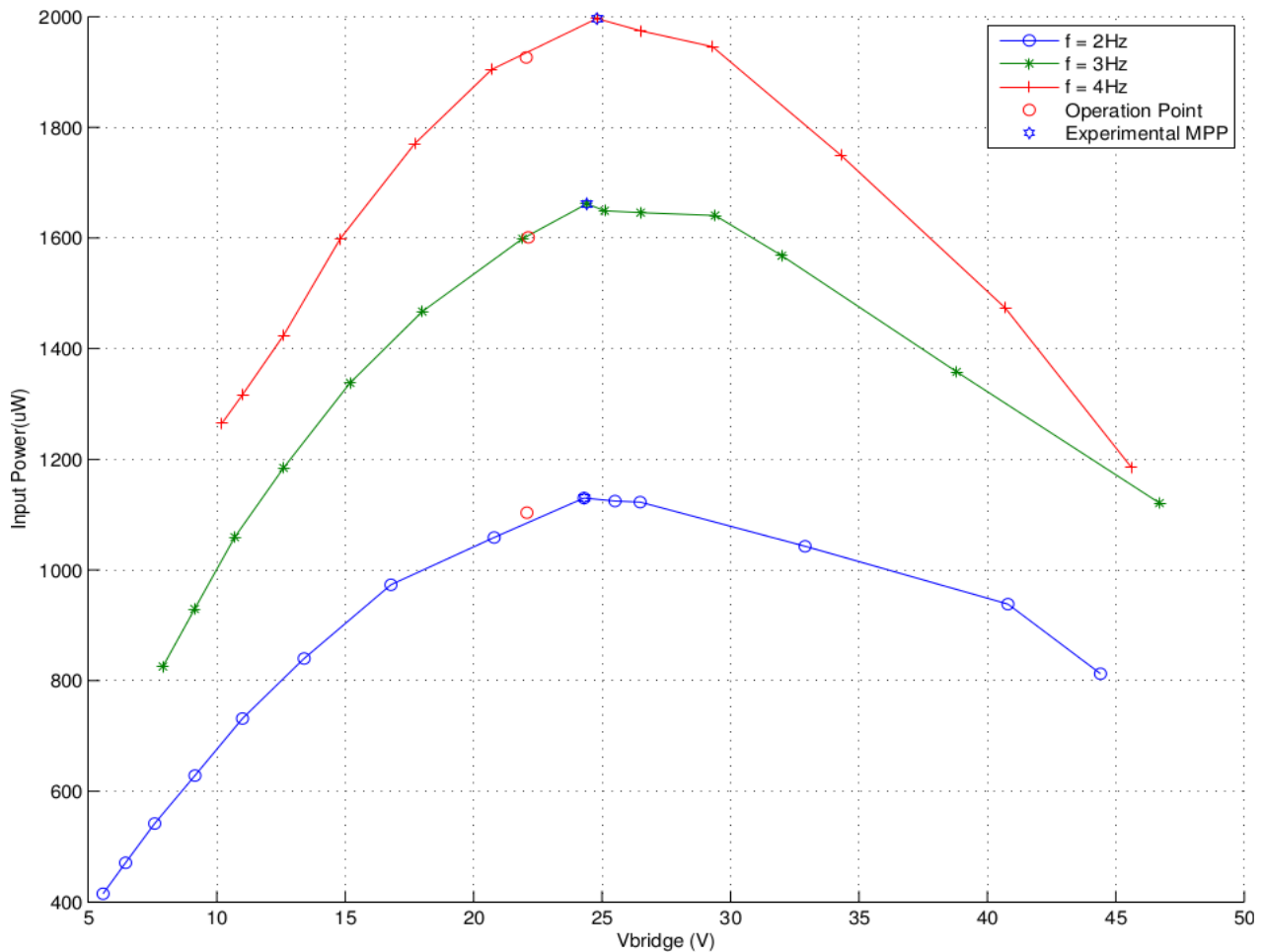
Στα Σχήματα 6.10 – 6.12 φαίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων με μοναδικό σημείο λειτουργίας όπως ορίστηκε παραπάνω. Στα αποτελέσματα αυτά επισημαίνονται τα πειραματικά σημεία MPP όπως ανιχνεύτηκαν στην Ενότητα 6.1.1 καθώς και πειραματικά σημεία λειτουργίας του συστήματος ελέγχου.



Σχήμα 6.10. Πειραματικά αποτελέσματα για πλάτος ταλάντωσης 2mm και τάση λειτουργίας ίση με 22V.



Σχήμα 6.11. Πειραματικά αποτελέσματα για πλάτος ταλάντωσης 3mm και τάση λειτουργίας ίση με 22V.



Σχήμα 6.12. Πειραματικά αποτελέσματα για πλάτος ταλάντωσης 4mm και τάση λειτουργίας με 22V.

Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται τα σημεία λειτουργίας του μετατροπέα για διάφορες συνθήκες ταλάντωσης. Το σημείο λειτουργίας είναι σταθερό και αμετάβλητο καθόλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Φαίνονται οι σημαντικές διαφορές από το πειραματικό μέγιστο και το μέγιστο του προκαθορισμένου σημείου λειτουργίας. Στον Πίνακα 6.5 υπολογίζεται η διαφορά αυτή.

Πίνακας 6.5. Η διαφορά ισχύος μεταξύ πειραματικού MPP και του μοναδικού σημείου λειτουργίας.

Πλάτος Ταλάντωσης	Συχνότητα Ταλάντωσης	Πειραματική Μέγιστη Παραγωγή Ισχύος(μW)	Μέγιστη Παραγωγή Ισχύος (μW) που προέκυψε	Διαφορά (%)
A = 2mm	F = 2Hz	460	448	2.6
A = 2mm	F = 3Hz	729.3	718	1.55
A = 2mm	F = 4Hz	931.2	920.3	1.17
A = 3mm	F = 2Hz	761.5	755	0.85
A = 3mm	F = 3Hz	1078	1060	1.67

$A = 3\text{mm}$	$F = 4\text{Hz}$	1435	1412	1.6
$A = 4\text{mm}$	$F = 2\text{Hz}$	1130	1103	2.4
$A = 4\text{mm}$	$F = 3\text{Hz}$	1661	1590	4.2
$A = 4\text{mm}$	$F = 4\text{Hz}$	1996	1926	3.5

Στον Πίνακα 6.6 υπολογίζεται η διαφορά της τάσης μεταξύ του πειραματικού MPP και του μοναδικού σημείου λειτουργίας.

Πλάτος Ταλάντωσης	Συχνότητα Ταλάντωσης	Τάση Πειραματικού Σημείου MPP	Τάση Σημείου Λειτουργίας	Διαφορά (%)
$A = 2\text{mm}$	$F = 2\text{Hz}$	18.4	22.07	16.63
$A = 2\text{mm}$	$F = 3\text{Hz}$	18.7	22.09	15.34
$A = 2\text{mm}$	$F = 4\text{Hz}$	19.4	22.07	12.1
$A = 3\text{mm}$	$F = 2\text{Hz}$	22.7	22.09	0.1
$A = 3\text{mm}$	$F = 3\text{Hz}$	23.2	22.1	5
$A = 3\text{mm}$	$F = 4\text{Hz}$	23.5	22	6.8
$A = 4\text{mm}$	$F = 2\text{Hz}$	24.3	22.07	10.1
$A = 4\text{mm}$	$F = 3\text{Hz}$	24.4	22.13	10.2
$A = 4\text{mm}$	$F = 4\text{Hz}$	24.8	22.05	12.5

Από τον Πίνακα 6.6 παρατηρούμε ότι η διαφορά στην τάση μεταξύ του πειραματικού σημείου MPP και του σημείου λειτουργίας που ορίσαμε, είναι σημαντική σε ορισμένες περιπτώσεις και αγγίζει το 16%. Παρατηρείται ότι αν και η απόκλιση των τάσεων είναι σημαντική, δεν παρατηρείται σημαντική απόκλιση στην παραγόμενη ισχύ. Η υλοποίηση ενός συστήματος ανίχνευσης και σημείων MPP με διαφορετικές τάσεις θα είχε πρακτική αξία μόνο αν η κατανάλωση ισχύος των επιπλέον κυκλωμάτων θα ήταν μικρότερη από την επιπλέον ισχύ που θα παραγόταν από την πιεζοηλεκτρική γεννήτρια.

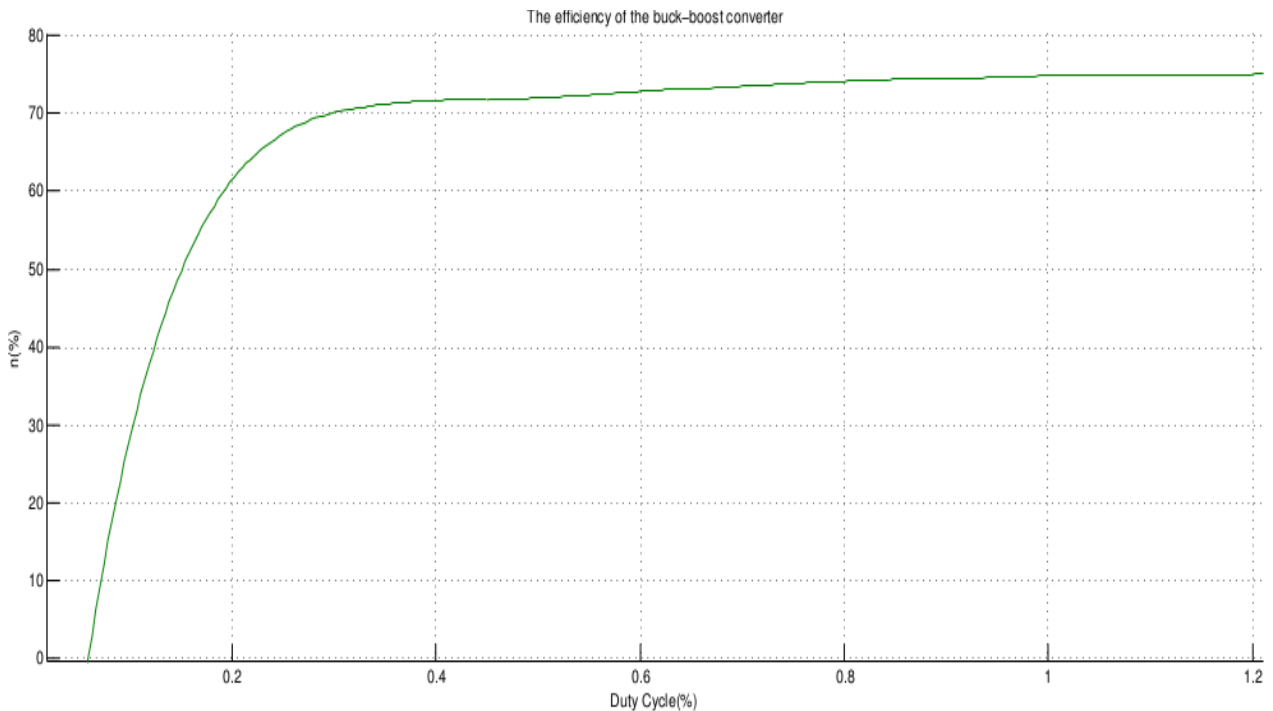
6.2 Απόδοση Μετατροπέα Buck-Boost

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν με σκοπό την αξιολόγηση του σχεδιαζόμενου συστήματος. Από τις μετρήσεις της Ενότητας 6.1.1 μπορούμε να υπολογίσουμε τον βαθμό απόδοσης του μετατροπέα buck-boost που σχεδιάσαμε στο Κεφάλαιο 5.3. Η απόδοση του μετατροπέα ορίζεται ως εξής:

$$n_{\text{buck-boost}}(\%) = \frac{P_{\text{out}}^{\text{buck-boost}}}{P_{\text{in}}^{\text{buck-boost}}} * 100\% \quad (6.2)$$

όπου $P_{in}^{buck-boost}$ η ισχύς εισόδου του μετατροπέα Buck-Boost και $P_{out}^{buck-boost}$ η ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα Buck-Boost.

Το διάγραμμα του βαθμού απόδοσης για τυχαία τιμή πλάτους $A = 2\text{mm}$ παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.13.



Σχήμα 6.13. Ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα Buck-Boost.

Ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα Buck-Boost όπως φαίνεται στο σχήμα εκφράζεται ως ποσοστό του κύκλου λειτουργίας, διότι όπως παρατηρήθηκε, ανεξάρτητα από την ισχύ εισόδου, η καμπύλη της απόδοσης παίρνει την ίδια μορφή για τις τιμές του κύκλου λειτουργίας από 0.1 έως 1.2%. Η μέγιστη απόδοση του μετατροπέα είναι 74%.

6.3 Απόδοση Προτεινόμενου Συστήματος

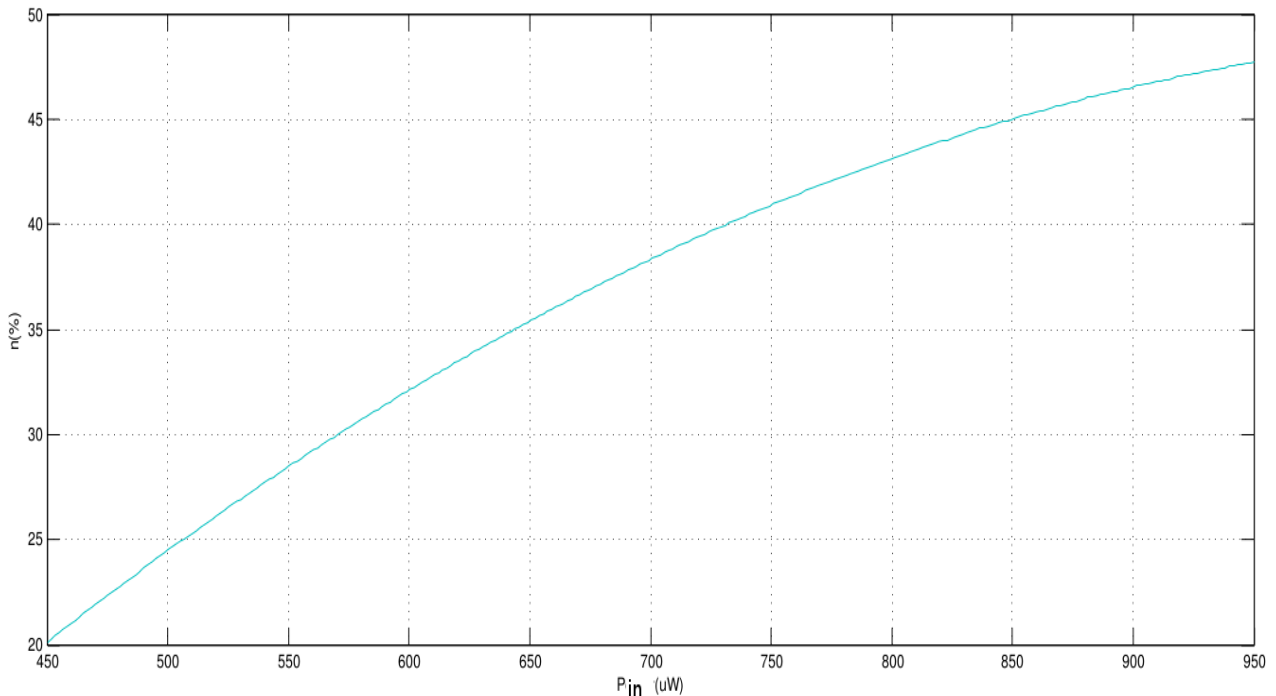
Σε αυτή την ενότητα μελετάμε την απόδοση του προτεινόμενου συστήματος που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αυτής. Ο βαθμός απόδοσης αυτή λαμβάνει υπόψη της την καθαρή ισχύ μετά την γέφυρα ανόρθωσης, (δηλαδή δεν μετράμε τις απώλειες της γέφυρας) και την ισχύ που μεταφέρεται προς το φορτίο του μετατροπέα, δηλαδή την μπαταρία. Η εξίσωση του υπολογιζόμενου συντελεστή είναι:

$$n_{\text{system}}(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100\% \quad (6.3)$$

όπου P_{in} η ισχύς στην είσοδο του συστήματος (μετρούμενη μετά την γέφυρα ανόρθωσης) και P_{out} η ισχύς που αποθηκεύεται στην μπαταρία.

Ο βαθμός απόδοσης του συνολικού συστήματος υπολογίστηκε για την περίπτωση όπου έχουμε θέσει πολλαπλά σημεία λειτουργίας, όπως στην Ενότητα 6.1.2.

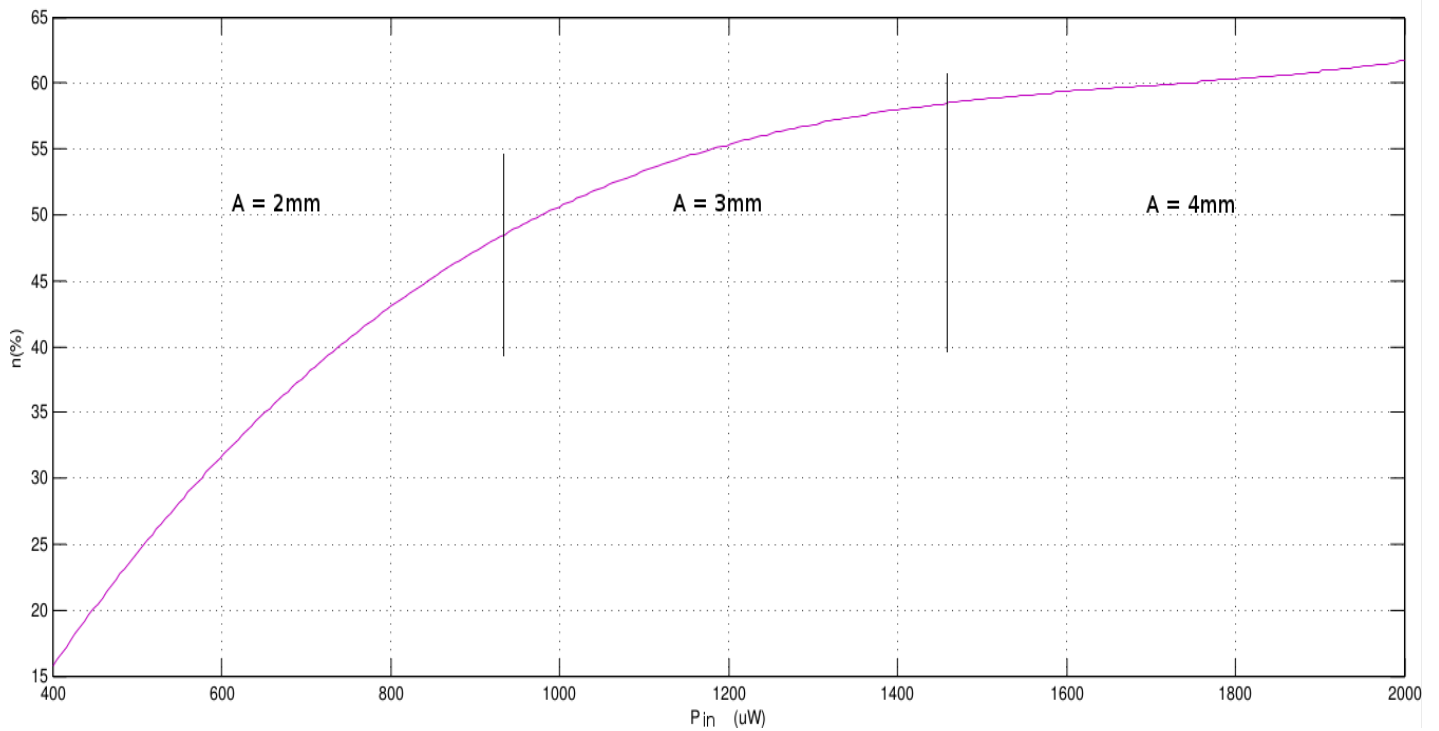
Στο Σχήμα 6.14 φαίνεται ο βαθμός απόδοσης του συνολικού συστήματος μόνο για την τιμή του πλάτους ταλάντωσης 2mm και διαφορετικές συχνότητες ταλάντωσης.



Σχήμα 6.14. Η απόδοση του συνολικού συστήματος με σημείο λειτουργίας ίσο με 19V και πλάτος ταλάντωσης (A) ίσο με 2mm.

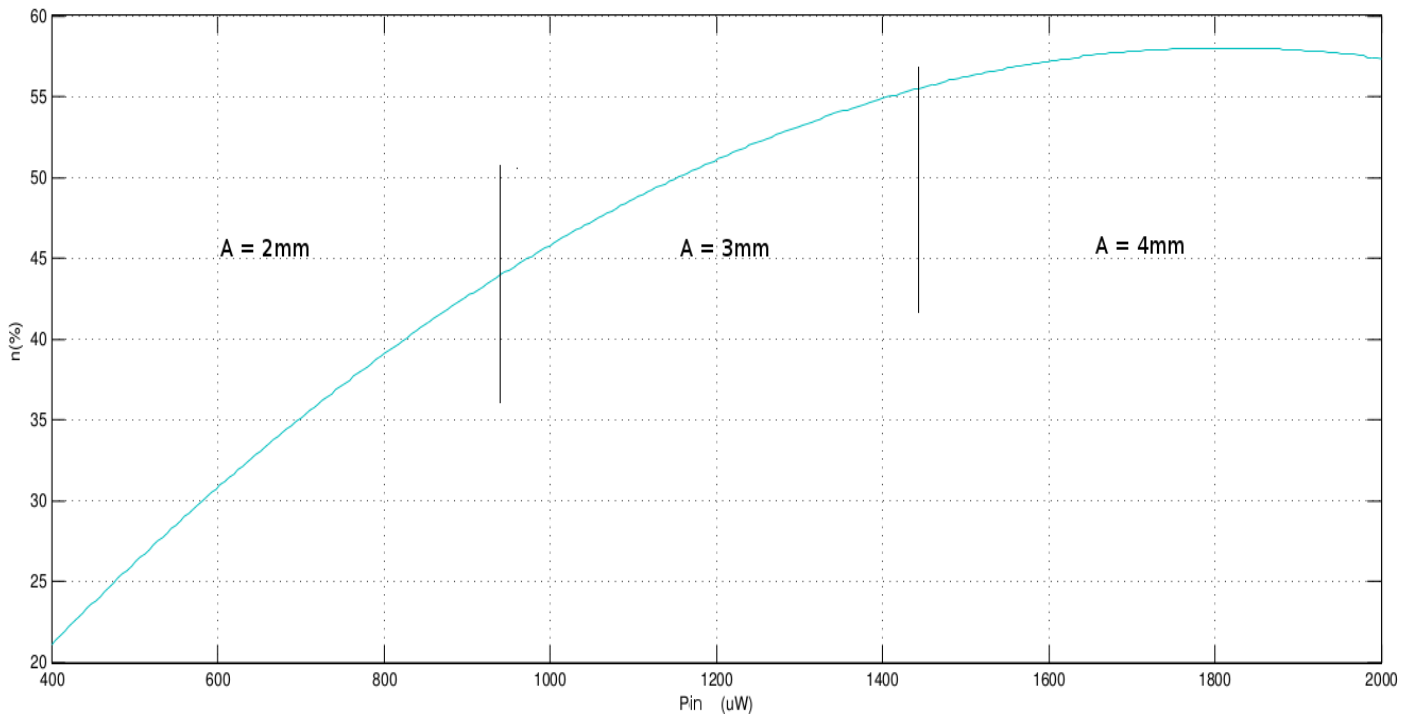
Η απόδοση του συστήματος φτάνει στο 47%. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι σχεδόν η μισή ενέργεια από αυτή που λαμβάνουμε από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο οδηγείται στο αποθηκευτικό μέσο ενέργειας, δηλαδή την μπαταρία.

Στο Σχήμα 6.15 φαίνεται η απόδοση του συνολικού συστήματος για όλες τις συνθήκες ταλάντωσης (διαφορετικά πλάτη και συχνότητες ταλάντωσης) στην περίπτωση όπου το σύστημα μας λειτουργεί με διαφορετικά σημεία λειτουργίας (ένα για κάθε τιμή πλάτους ταλάντωσης).



Σχήμα 6.15. Η απόδοση του συνολικού συστήματος με πολλά σημεία λειτουργίας.

Στο Σχήμα 6.16 υπολογίστηκε ο βαθμός απόδοσης του συνολικού συστήματος στην περίπτωση όπου είχαμε καθορίσει ένα μοναδικό σημείο λειτουργίας όπως στην Ενότητα 6.1.3, για όλες τις συνθήκες ταλάντωσης (διαφορετικά πλάτη και συχνότητες ταλάντωσης).

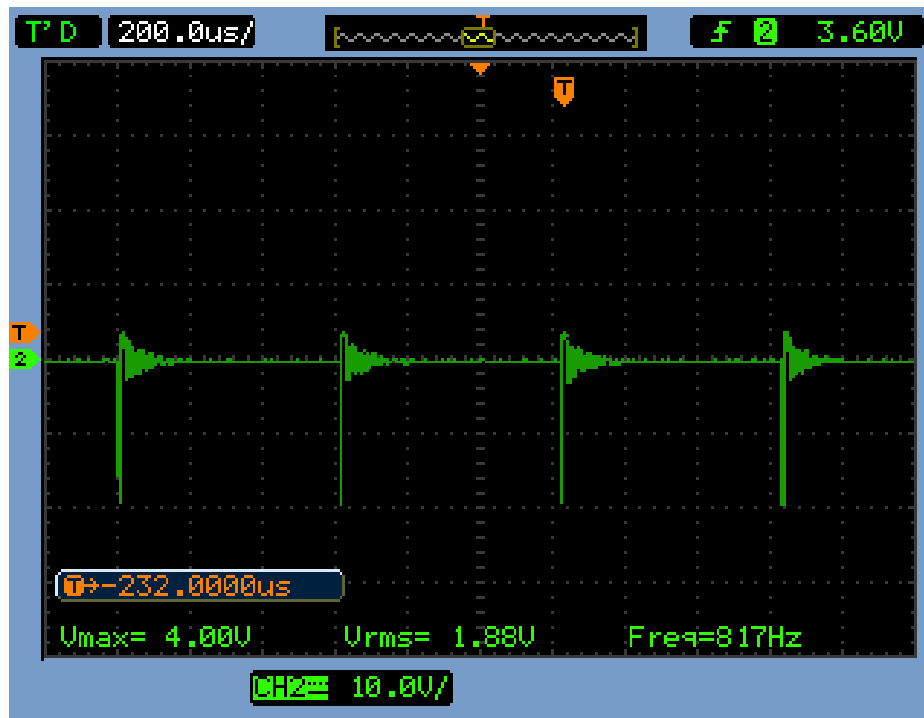


Σχήμα 6.16. Η απόδοση του συνολικού συστήματος με ένα σημείο λειτουργίας.

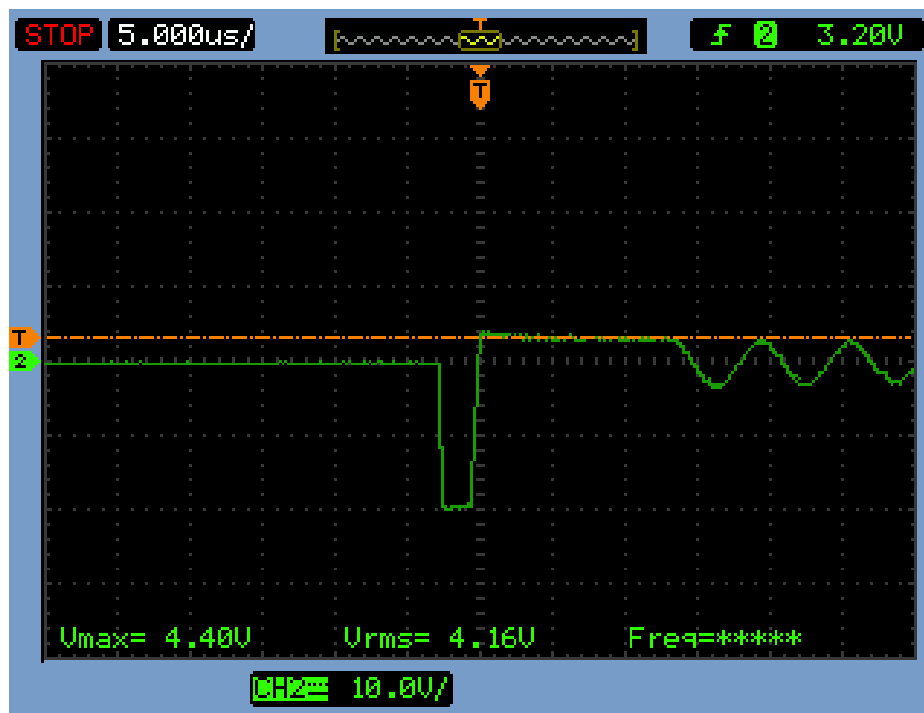
Τέλος η απόδοση του συστήματος με ένα μοναδικό σημείο λειτουργίας, όπως στο Σχήμα 6.16 είναι σε χαμηλότερα επίπεδα από αυτή με πολλαπλά σημεία λειτουργίας (Σχήμα 6.15) και είναι της τάξης του 57%.

6.4 Κυματομορφές του συστήματος που αναπτύχθηκε

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων έγινε λήψη μερικών στιγμιοτύπων των κυματομορφών από τα κυριότερα σημεία του μετατροπέα και του κυκλώματος ελέγχου.



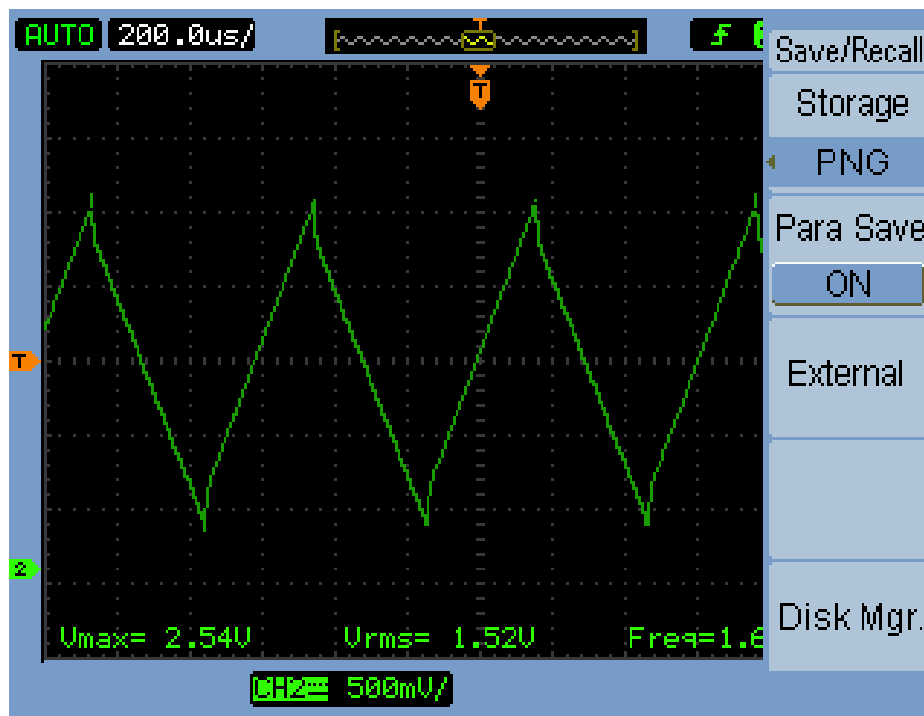
Σχήμα 6.17. Η κυματομορφή της τάσης του πηνίου.



Σχήμα 6.18. Η κυματομορφή της τάσης του πηνίου (σε μεγέθυνση).

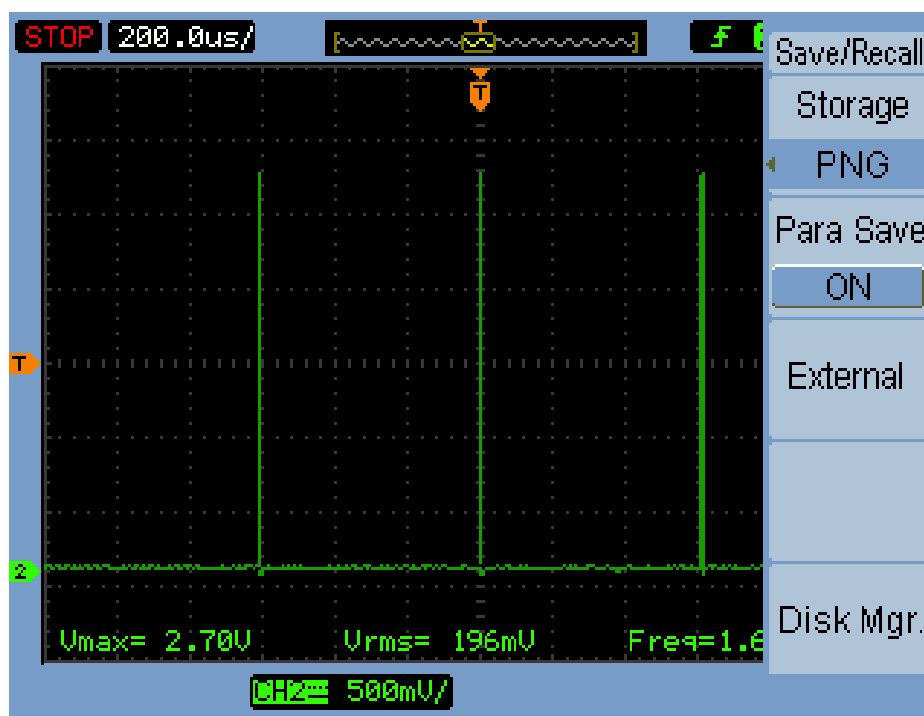
Στα δύο παραπάνω διαγράμματα προβάλλονται οι κυματομορφές της τάσης του πηνίου στον μετατροπέα. Παρατηρούμε τις δύο χρονικές περιόδους, την πρώτη στην οποία το διακοπτικό στοιχείο του μετατροπέα είναι ανοικτό και η τάση του πηνίου είναι ίση με αυτή της πηγής και την δεύτερη στην οποία η τάση του πηνίου είναι ίση με την τάση της

μπαταρίας. Έπειτα ακολουθούν μερικές ταλαντώσεις λόγω της παρασιτικής χωρητικότητας που εμφανίζεται στα άκρα του Mosfet και τέλος η τάση πέφτει στο μηδέν, χαρακτηριστικό της ασυνεχούς αγωγής (discontinuous conduction).

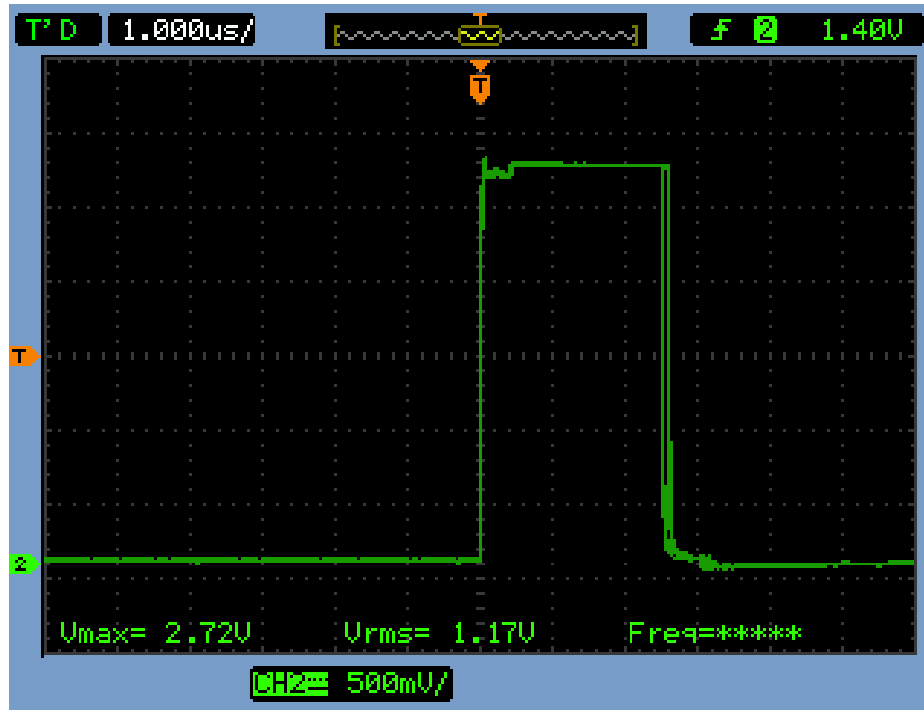


Σχήμα 6.19. Στιγμιότυπο τριγωνικής κυματομορφής του διαμορφωτή PWM.

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται το τριγωνικό σήμα που δημιουργείται από τη μονάδα PWM.

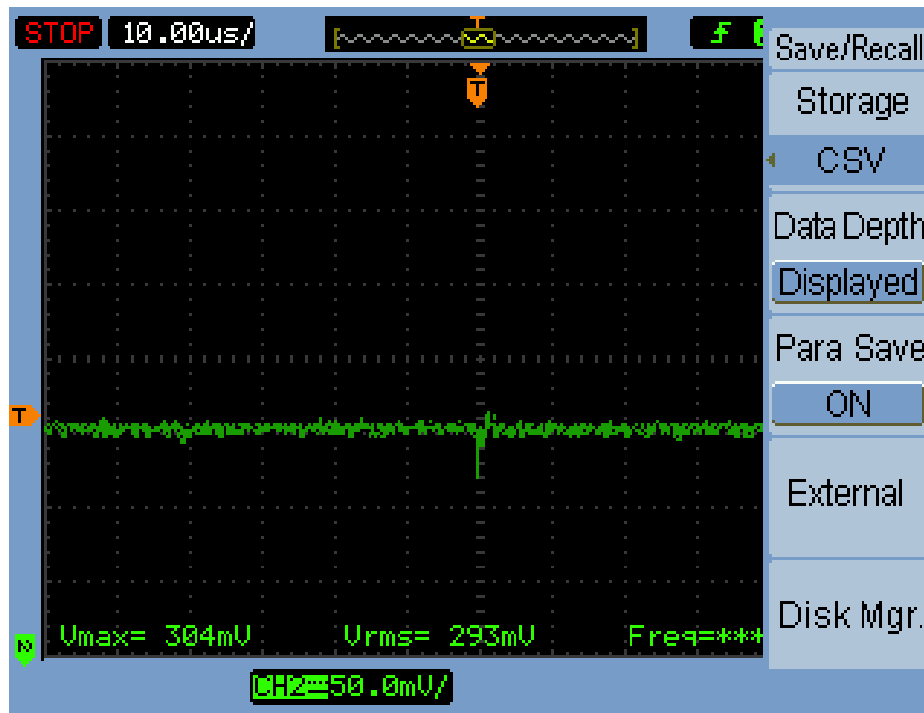


Σχήμα 6.20. Η κυματομορφή του PWM σήματος ελέγχου.



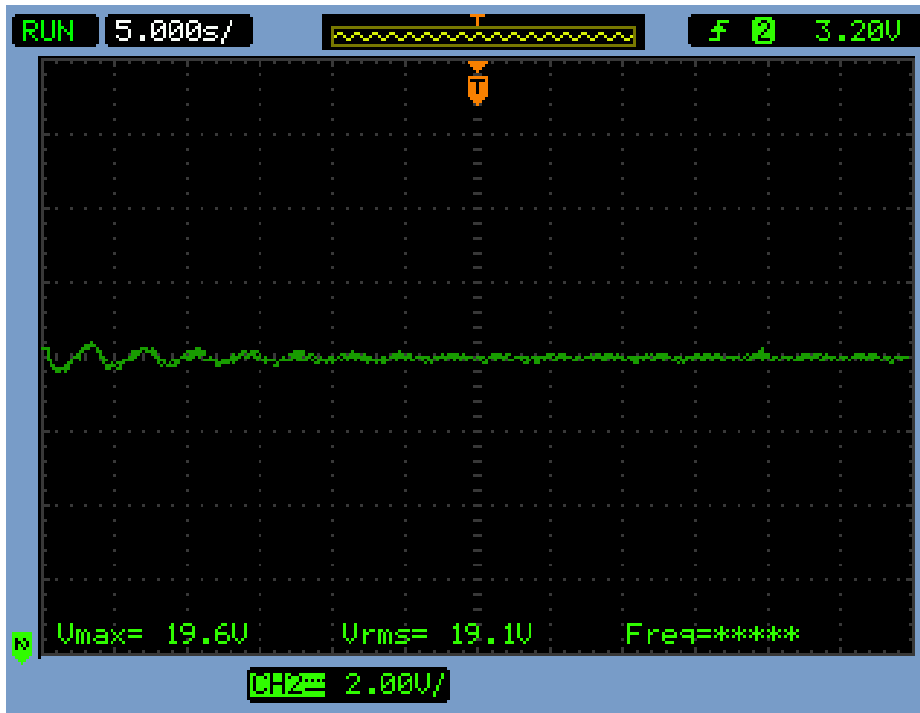
Σχήμα 6.21. Η κυματομορφή του PWM σήματος ελέγχου (σε μεγέθυνση).

Στα Σχήματα 6.20 – 6.21 φαίνονται παραδείγματα των παλμών PWM που οδηγούν την πύλη του Mosfet. Οι παλμοί έχουν ύψος ίσο με την τάση της μπαταρίας. Η χρονική διάρκειά τους αυξομειώνεται ανάλογα το σημείο λειτουργίας που έχουμε θέσει.



Σχήμα 6.22. Η κυματομορφή του σήματος εξόδου του ελεγκτή PI.

Στο Σχήμα 6.22 φαίνεται το σήμα εξόδου του ελεγκτή PI το οποίο οδηγείται στον Συγκριτή για την σύγκρισή του με το τριγωνικό σήμα και την παραγωγή του σήματος PWM.



Σχήμα 6.23. Η κυματομορφή της τάσης εισόδου.

Η κυματομορφή της τάσης εισόδου του μετατροπέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.23. Η κυμάτωση στην αρχή του στιγμιότυπου οφείλεται στην φόρτιση του πυκνωτή εισόδου στην αρχή της λειτουργίας του συστήματος ξεκινώντας από μηδενική τάση. Έπειτα παρατηρούμε μία πολύ μικρή κυμάτωση γύρω από την τάση εισόδου στα 19V (στην περίπτωση όπου έχουμε θέσει το σημείο λειτουργίας της μονάδας ελέγχου στην τάση αυτή).

6.5 Κατανάλωση ισχύος συστήματος ελέγχου

Στο τέλος του κεφαλαίου θα αναφερθούμε στην κατανάλωση του συστήματος ελέγχου και πόσο αυτή επηρεάζει το συνολικό σύστημα. Το σύστημα ελέγχου τροφοδοτείται από την μπαταρία για όλα τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, όπως τελεστικούς ενισχυτές καθώς και αυτά που αποτελούνται από διακριτά στοιχεία, όπως διαιρέτες τάσης. Ακόμα όμως μία κατανάλωση ισχύος έχουμε από την δειγματοληψία της τάσης μέσω του διαφορικού ενισχυτή στην είσοδο του μετατροπέα. Η επιπλέον κατανάλωση αυτή προκύπτει όχι από τον τελεστικό ενισχυτή αλλά από τα παθητικά στοιχεία του. Η κατανάλωση ισχύος για κάθε περίπτωση παρουσιάζεται παρακάτω:

Πίνακας 6.6. Η κατανάλωση ισχύος της μονάδας ελέγχου.

Τάση MPP	Κατανάλωση αντιστάσεων του διαφορικού ενισχυτή	Ισχύς υπόλοιπου συστήματος	Συνολική ισχύς της μονάδας ελέγχου
19V	38μW	188μW	226μW
22V	53μW	188μW	241μW
23V	57μW	188μW	245μW
24V	62μW	188μW	250μW

Από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η κατανάλωση ισχύος του διαφορικού ενισχυτή παρουσιάζει αύξηση όσο αυξάνεται και η τάση MPP. Μια σημαντική παρατήρηση για την ισχύ που καταναλώνει η μονάδα ελέγχου είναι η σταθερότητα της τιμής της, ανεξάρτητα από τις συνθήκες ταλάντωσης και το σημείο MPP. Τέλος παρατηρούμε ότι η συνολική ισχύς της μονάδας ελέγχου δεν υπερβαίνει τα 250μW.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα – Μελλοντικές Επεκτάσεις

7.1 Ανακεφαλαίωση

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται τη βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας από πιεζοηλεκτρικά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά ανήκουν στην κατηγορία των πηγών συγκομιδής ενέργειας, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μικρή παραγωγή ισχύος. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος, αυτόνομου, τροφοδοτούμενο από μια μπαταρία για την μεγιστοποίηση της παραγωγής ισχύος από την πιεζοηλεκτρική γεννήτρια προς την μπαταρία. Το σύστημα αυτό είναι υπεύθυνο για την λειτουργία της γεννήτριας στο σημείο MPP (Maximum Power Point).

Παρουσιάστηκαν και συγκρίθηκαν αρκετές μέθοδοι για την εύρεση του σημείου MPP, κάποιες υλοποιημένες σε πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, και κάποιες υλοποιημένες σε άλλες πηγές ενέργειας. Η μέθοδος που επιλέχτηκε για υλοποίηση στην παρούσα διπλωματική είναι αυτή της Σταθερής Τάσης (CV) κυρίως λόγω του χαμηλού ενεργειακού κόστους που απαιτεί η υλοποίηση του αλγορίθμου αυτού. Ταυτόχρονα, το συνολικό κύκλωμα προσπαθεί να επιτύχει την προσαρμογή του κατάλληλου φορτίου στην πιεζοηλεκτρική γεννήτρια το οποίο θα επιτρέψει την μέγιστη απολαβή ενέργειας σύμφωνα με το θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος.

Το σύστημα που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε και το οποίο υλοποιεί τον αλγόριθμο Σταθερής Τάσης (CV) αποτελείται από έναν μετατροπέα συνεχούς τάσης buck-boost και μια μονάδα ελέγχου. Ο μετατροπέας λειτουργεί σε συχνότητα λειτουργίας 1kHz και ασυνεχή αγωγή και ο κύκλος λειτουργίας του ελέγχεται από την μονάδα ελέγχου ώστε η τάση στην είσοδο του να λάβει την τάση αναφοράς που έχουμε ορίσει.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν ορισμένα πειράματα για την αξιολόγηση του συνολικού συστήματος που κατασκευάστηκε. Τα πειράματα αυτά διαιρέθηκαν σε τρεις κατηγορίες, στην πρώτη όπου ο έλεγχος της τιμής του κύκλου λειτουργίας γίνεται χειροκίνητα, στην δεύτερη όπου ορίστηκαν διαφορετικά σημεία MPP για κάθε πλάτος ταλάντωσης και ο έλεγχος του κύκλου λειτουργίας γίνεται από την μονάδα ελέγχου και τέλος στην τρίτη κατηγορία όπου το σημείο MPP είναι μοναδικό και αμετάβλητο.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν συμπεραίνεται ότι για την περίπτωση όπου ορίστηκαν διαφορετικά σημεία λειτουργίας για κάθε διαφορετικό πλάτος ταλάντωσης, το σύστημα απέδωσε το 62% της ενέργειας του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου στην μπαταρία. Το προτεινόμενο σύστημα απέκλινε το σημείο λειτουργίας του μετατροπέα από την μέγιστη τιμή ισχύος κατά λιγότερο από 1%. Η απόδοση του μετατροπέα Buck-Boost σε αυτή την περίπτωση είναι της τάξης στο 74%. Στην περίπτωση όπου ορίστηκε ένα μόνο

σημείο λειτουργίας για όλες τις διαφορετικές συνθήκες ταλάντωσης, η απόδοση του συστήματος άγγιξε το 57%. Η διαφορά της παραγόμενης ισχύος από την μέγιστη ισχύ για κάθε περίπτωση είναι μικρότερη του 5%.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο αλγόριθμος Σταθερής Τάσης (CV) απέδωσε υψηλά ποσοστά αποδόσεων για την πιεζοηλεκτρική γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε με χαμηλή κατανάλωση ισχύος της μονάδας ελέγχου.

7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Μερικά θέματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης είναι τα εξής:

- Δημιουργία ολοκληρωμένου κυκλώματος (τσιπ) με βάση το προτεινόμενο σύστημα που υλοποιήθηκε με σκοπό την συμπαγή μορφή του και ελαχιστοποίηση των απωλειών.
- Μελέτη διαφορετικής πιεζοηλεκτρικής γεννήτριας με παραγωγή της τάξεως των mW θα μπορούσε να προσφέρει ευκαιρίες για μελέτη διαφορετικών αλγορίθμων όπως για παράδειγμα τον αλγόριθμο Perturbation and Observation.

Βιβλιογραφία

- [1] Murugavel Raju and Mark Grazier, “*Ulp meets energy harvesting: A game-changing combination for design engineer*”, <http://focus.ti.com/lit/wp/slyy018a/slyy018a.pdf>, Texas Instrument (2010).
- [2] M. E. Kiziroglou, E. M. Yeatman, “*Functional Materials for Sustainable Energy Applications: Materials and Techniques for Energy Harvesting*”, Woodhead Publishing Series in Energy No. 35, (2012).
- [3] Johan Henning Pedersen, “*Low Frequency Low Voltage Vibration Energy Harvesting Converter*”, Master Thesis , Technical University of Denmark, (2011).
- [4] ANSI/IEEE Std 176-1987, “*IEEE standard on piezoelectricity*”, (1988).
- [5] Wikipedia, “*Wikipedia, the free encyclopedia*” [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org>, (2013).
- [6] F Lu, H P Lee1 and S P Lim, “*Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical- systems applications*” Smart Mater. Struct. 13 pp. 57–63 (2004) .
- [7] Clark, W. & Ramsay, M. J. “*Smart Material Transducers as Power Sources for MEMS Devices*”, Proceedings of SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, California, USA, Vol. 4332 2001, pp. 429-438, (2001).
- [8] H. A. Sodano, G. Park and D. J. Inman , “*Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting*”, Strain Journal, pp. 49-58, (2004).
- [9] Ottman, G.K., Hofmann, H.F., Bhatt, A.C. and Lesieutre, G.A. “*Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Remote Power Supply*”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, pp. 669-676, (2002).
- [10] Thomson W T “*Theory of Vibration with Applications*”, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall , Chapter 9, (1988).
- [11] D. P. Hohm and M. E. Ropp “*Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms*” Prog. Photovolt: Res. Appl. pp. 47 – 62 (2003).
- [12] I. Laird, H. Lovatt, N. Savvides, D. Lu, V.G. Agelidis, “*Comparative study of maximum power point tracking algorithms for thermoelectric generators*” ,Australasian Universities Power Engineering Conference, pp. 1-6, (2008).
- [13] Trishan Eseram, Patrick L. Chapman, “*Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques*” IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 22, No. 2, pp. 439 - 449 , (June 2007).

- [14] Na Kong, Dong Sam Ha, Alper Erturk And Daniel J. Inman, “*Resistive Impedance Matching Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting*”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 21, No. 13, pp. 1293-1302, (2010).
- [15] A. Badel, G. Sebald D. Guyomar, M. Lallart, E. Lefeuvre, C. Richard, and J. Qiu. “*Piezoelectric vibration control by synchronized switching on adaptive voltage sources: Towards wideband semi-active damping*”. The Journal of Acoustical Society of America, Vol. 119 , Issue. 5, pp. 2815, (2006).
- [16] http://techt teach.no/kybsim/pwm_control/index.php
- [17] <http://homepages.which.net/~paul.hills/Circuits/PwmGenerators/PwmGenerators.html>
- [18] Daniel W. Hart , “*Power Electronics*” , McGrawHill , (2010).
- [19] http://en.wikipedia.org/wiki/Buck%E2%80%93boost_converter
- [20] Elie Lefeuvre, David Audigier, Claude Richard, and Daniel Guyomar “*Buck-Boost Converter for Sensorless Power Optimization of Piezoelectric Energy Harvester*” Vol. 22, pp. 2018-2025 (2007).
- [21] Erickson, W. and Maksimovic, D. “*Fundamentals of Power Electronics*”, 2nd edition, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA. (2001).
- [22] BS170 Datasheet <http://www.fairchildsemi.com/ds/BS/BS170.pdf>
- [23] 1N4148 Diode Datasheet http://www.nxp.com/documents/data_sheet/1N4148_1N4448.pdf
- [24] http://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_5.html
- [25] <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6018-MAX6018B.pdf>
- [26] <http://electronicdesign.com/ideas-design/efficiently-design-op-amp-summer-circuit>
- [27] <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN3201.pdf>
- [28] <http://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/4362>
- [29] <http://www.ti.com/lit/ug/slau508/slau508.pdf>
- [30] David Terrell, “*Op Amps: Design, Application, and Troubleshooting*”, Butterworth-Heinemann Second Edition, pp. 204-208 , (1996).