

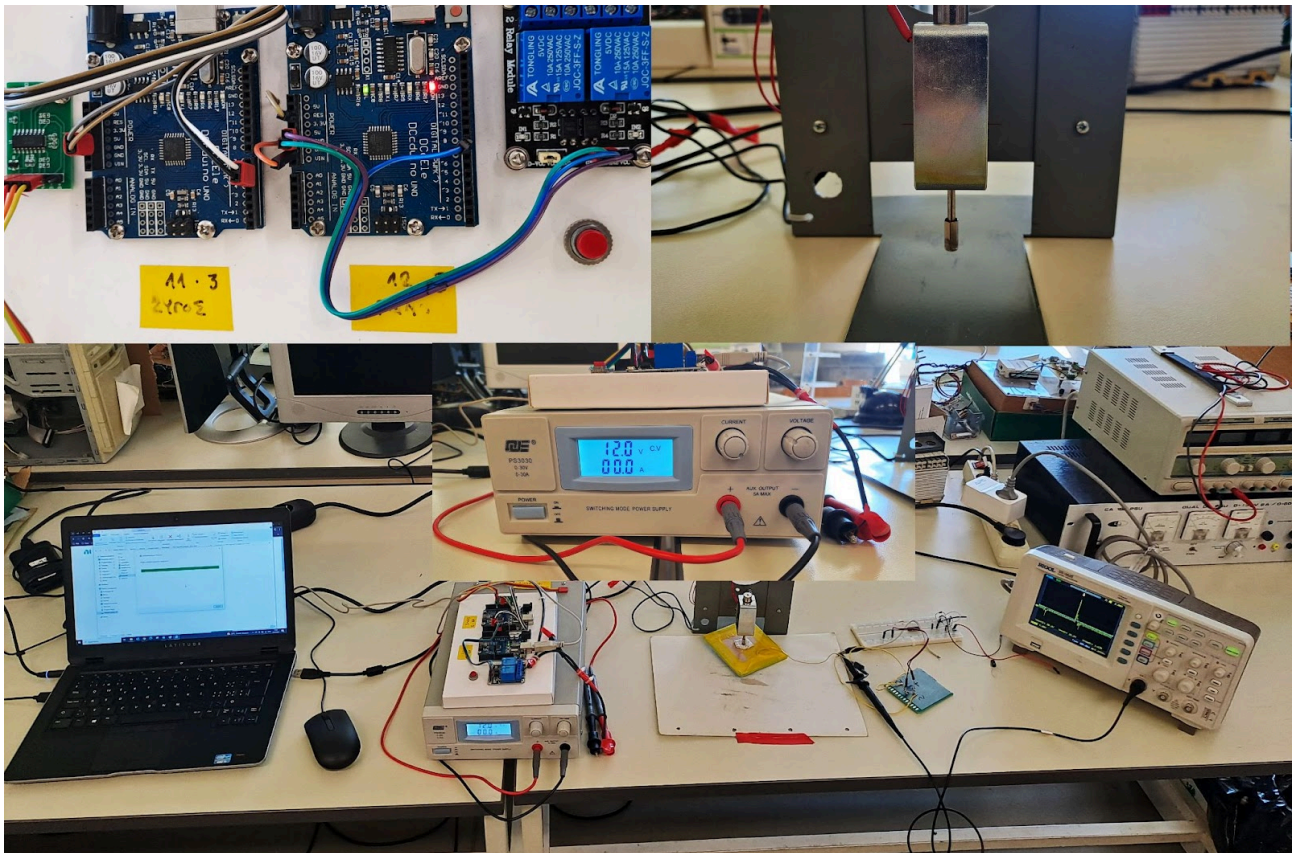


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων



Φοιτητής: Στούρας Παναγιώτης
ΑΜ: 47919

Επιβλέπων Καθηγητής
Σ.Βασιλειάδης
Καθηγητής

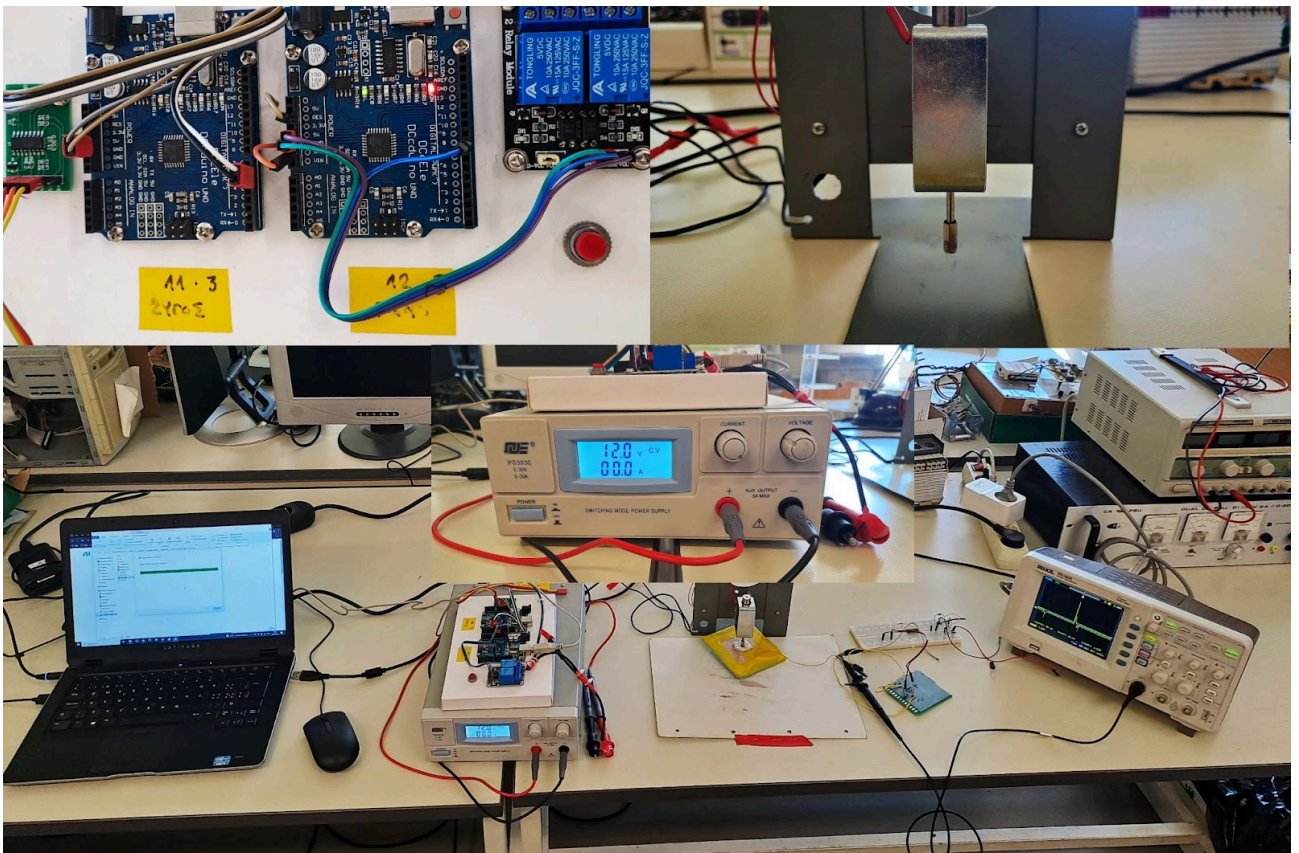
Αθήνα - Αιγάλεω, Σεπτέμβριος 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Development of textile measurement systems and data exportation and analysis



Student: Stouras Panagiotis
Registration Number: 47919

Supervisor:
Savvas Vassiliadis
Professor

Athens- Egaleo, September 2024

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Βασιλειάδης Σάββας, Καθηγητής (Επιβλέπων)	Μαρία Ραγκούση, Καθηγήτρια	Σωτηρία Γαλατά, Επ. Καθηγήτρια

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ Στούρας Παναγιώτης, Σεπτέμβριος, 2024

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Στούρας Παναγιώτης του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 48347919 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνει υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια η οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Ο Δηλών

Στούρας Παναγιώτης



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου κο. Βασιλειάδη Σάββα και την κα. Γαλατά Σωτηρία για την εμπιστοσύνη τους στο να αναλάβω το θέμα αυτό. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον δίδυμό μου αδερφό τον Νίκο και τον Άρη Ρεπούλια για την βοήθειά τους και την υποστήριξη τους σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη μου την οικογένεια και τους φίλους μου που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια στην προσπάθεια μου να εξελιχθώ στη ζωή μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην αξιοποίηση της ενέργειας των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών (TENGs) που ενσωματώνονται σε υφάσματα, ενώ το θεωρητικό υπόβαθρο εξετάζεται βάσει υφιστάμενων ερευνών. Τα έξυπνα υφάσματα με TENGs αποτελούν μια καινοτόμο τεχνολογία που επιτρέπει τη συλλογή μηχανικής ενέργειας από τις κινήσεις του ανθρώπινου σώματος, με δυνατότητες εφαρμογής σε φορητές συσκευές, αισθητήρες και συστήματα Internet of Things (IoT).

Η εργασία αυτή βασίζεται σε θεωρητικές αναλύσεις και ερευνητικά δεδομένα για την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση των TENGs, δίνοντας έμφαση στη διαχείριση και αξιοποίηση της ενέργειας που παράγεται. Η πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για την αξιολόγηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων ήδη ελεγμένων υφασμάτων, με στόχο να επιβεβαιωθούν και να μετρηθούν οι ηλεκτρικές τους επιδόσεις υπό διάφορες συνθήκες.

Η πειραματική αυτή διαδικασία συνδυάζει τις θεωρητικές γνώσεις με πρακτικές μετρήσεις, επιτρέποντας την ακριβέστερη αξιολόγηση των υφασμάτων. Το έργο αυτό συμβάλλει στην κατανόηση της θεωρητικής βάσης και της πρακτικής αξιολόγησης των έξυπνων υφασμάτων, παρέχοντας νέα δεδομένα για την ενσωμάτωση των TENGs σε εμπορικές εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας.

Λέξεις – κλειδιά

Τριβοηλεκτρικές Γεννήτριες (TEGs), Τριβοηλεκτρικές Νανογεννήτριες (TENGs), Έξυπνα Υφάσματα, Ενεργειακή Συγκομιδή, Νανοτεχνολογία, Φορητές Συσκευές, Internet of Things (IoT), Ηλεκτρικές Ιδιότητες Υφασμάτων, Εξαγωγή Ενέργειας, Πειραματική Διάταξη, Ανθεκτικότητα Υλικών.

Εισαγωγή	9
Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας	9
Δομή Διπλωματικής Εργασίας	9
1: Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο	10
1.1: Τριβοηλεκτρικό Φαινόμενο	10
1.2: Τριβοηλεκτρικές Νανογεννήτριες (TENGs)	11
1.3: Εφαρμογές Τριβοηλεκτρικών Νανογεννητριών	12
Συγκομιδή Ενέργειας από Κινήσεις του Ανθρώπινου Σώματος	12
Βιοϊατρικές Εφαρμογές	12
Περιβαλλοντικές Εφαρμογές	12
Εφαρμογές στη Νανοηλεκτρονική και Ανίχνευση	13
Έξυπνα Κλωστοϋφαντουργικά Προϊόντα	13
Πολυλειτουργικότητα και Προσαρμοστικότητα	13
1.4: Σύνδεση μεταξύ Τριβοηλεκτρικών Γεννητριών Βασισμένων σε Κλωστοϋφαντουργικά Προϊόντα και Παραμέτρων που Επηρεάζουν την Ηλεκτρική τους Απόδοση	13
2: Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά των TENGs	15
2.1: Τάση και Ρεύμα	15
2.2: Ισχύς και Απόδοση	15
2.3: Χωρητικότητα και Αποθήκευση Ενέργειας	15
2.4: Αντίσταση Εξόδου και Προσαρμογή Φορτίου	15
3: Άνεση υφασμάτων και ενδυμάτων	16
3.1: Αισθητηριακή και απτική άνεση	16
3.2: Άνεση εφαρμογής	17
3.3: Άνεση θερμότητας-υγρασίας	18
3.4: Αισθητική εμφάνιση	18
4: Πρόοδος των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών με βάση τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα	20
4.1: Πλενόμενες Τριβοηλεκτρικές Νανογεννήτριες	20
4.2: Πολυλειτουργικές Ιδιότητες των Τριβοηλεκτρικών Νανογεννητριών	20
4.3 Έξυπνα φορετά συστήματα και στρατηγικές μαζικής παραγωγής	21
4.3.1 Αύξηση της απόδοσης	21
4.3.2 Διαχείριση Ισχύος	21
4.3.3 Ενσωμάτωση των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών με βάση τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα σε έξυπνα φορετά συστήματα.	22
4.3.4 Μαζική παραγωγή	22
5: Εφαρμογές των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών με βάση τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα	23
5.1 Τριβοηλεκτρικές Νανογεννήτριες για Συγκομιδή Μηχανικής Ενέργειας	23
5.2 Αυτοτροφοδοτούμενα Αισθητήρια Συστήματα	23
5.3 Εφαρμογές στις Τεχνολογίες IoT και Έξυπνα Περιβάλλοντα	23
5.4 Προκλήσεις και Μελλοντικές Κατευθύνσεις	24
6: Η Πειραματική διάταξη	25

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

6.1 Προκλήσεις στην Συλλογή Μετρήσεων από Τριβοηλεκτρικές Γεννήτριες.	27
6.2 Τα Ηλεκτρόδια και τα Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν	27
6.3 Λειτουργία της Συσκευής και Μετρήσεις	28
6.3.1: Μετρήσεις σε ανοιχτό κύκλωμα	29
6.3.1.1: Proof of concept δοκιμές με λευκό Τεφλόν πάχους 1mm ως προς εξέταση υλικό	29
12VDC 1Hz	29
12VDC 3Hz	30
24VDC 1Hz	31
24VDC 3Hz	31
6.3.1.2 Μετρήσεις σε ανοιχτό κύκλωμα με κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα	33
Μετρήσεις με πλεκτό δοκίμιο από βαμβάκι ως προς εξέταση υλικό	33
Μετρήσεις με πλεκτό δοκίμιο από μαλλί ως προς εξέταση υλικό	34
Μετρήσεις με υφαντο από αραμιδικές ίνες με επίστρωση φιλμ τεφλόν	35
6.3.2. Μετρήσεις σε κλειστό κύκλωμα	36
Μετρήσεις με Τεφλόν πάχους 1mm ως προς εξέταση υλικό ως προς εξέταση υλικό	37
Μετρήσεις με πλεκτό δοκίμιο από βαμβάκι ως προς εξέταση υλικό	39
Μετρήσεις με πλεκτό δοκίμιο από μαλλί ως προς εξέταση υλικό	41
Μετρήσεις με υφαντο από αραμιδικες ινες με επιστρωση φιλμ τεφλόν	43
7: Συμπεράσματα	45
Παραπομπές	46
Ακρωνύμια	47

Εισαγωγή

Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας

Η διπλωματική εργασία εστιάζει στην μελέτη του τριβοηλεκτρικού φαινομένου. Μελετά πρώτα σε θεωρητικό επίπεδο τις ιδιότητες των τριβοηλεκτρικών γεννητριών (TENGs) και εξηγεί τις βασικές εφαρμογές τους. Γίνεται ειδική μνεία στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους και στην συνέχεια εμβαθύνει στην κατασκευή και χρήση των γεννητριών αυτών, από κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη που δημιουργήθηκε για τον σκοπό της διπλωματικής εργασίας. Ο σκοπός αυτός είναι να μετρηθούν οι ηλεκτρικές ιδιότητες της γεννήτριας αυτής με διαφορετικά κλωστοϋφαντουργικά υλικά, πρώτα σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος και στην συνέχεια σε κλειστό κύκλωμα για την φόρτιση διαφόρων συνδυασμών πυκνωτών αποθήκευσης ενέργειας. Γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων και παρατηρήσεις για μελλοντικές προοπτικές.

Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο, οι τριβοηλεκτρικές νανογεννήτριες (TENGs) και οι βασικές αρχές λειτουργίας τους. Γίνεται αναλυτική περιγραφή της φυσικής του φαινομένου και των ιδιοτήτων των υλικών που χρησιμοποιούνται στις TENGs, καθώς και μια σύντομη αναφορά στις εφαρμογές τους σε διάφορους τομείς, όπως η ενέργεια και η νανοηλεκτρονική.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών, όπως η τάση, το ρεύμα, η ισχύς και η αποδοτικότητα. Αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν αυτά τα χαρακτηριστικά και προτείνονται τρόποι βελτίωσης της απόδοσης των TENGs μέσω κατάλληλων υλικών και σχεδιαστικών επιλογών.

Στο τρίτο κεφάλαιο, εξετάζεται η άνεση των υφασμάτων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή έξυπνων ρούχων με ενσωματωμένες TENGs. Επικεντρωνόμαστε στις μεθόδους αξιολόγησης της άνεσης, που περιλαμβάνουν τόσο υποκειμενικές όσο και αντικειμενικές μετρήσεις, καθώς και στις ιδιότητες των υφασμάτων που επηρεάζουν την απτική και αισθητηριακή άνεση των χρηστών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύεται η πρόοδος που έχει σημειωθεί στην κατασκευή πλενόμενων και πολυλειτουργικών τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών. Παρουσιάζονται οι νέες τεχνολογίες κατασκευής και οι τρόποι βελτίωσης της αντοχής των υλικών σε καθημερινή χρήση, καθώς και η δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε μαζική παραγωγή έξυπνων φορετών συστημάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, εξετάζονται οι εφαρμογές των TENGs στις τεχνολογίες IoT και τα έξυπνα περιβάλλοντα. Αναλύεται η ενσωμάτωσή τους σε συστήματα αυτοτροφοδοτούμενων αισθητήρων και παρουσιάζονται οι προκλήσεις και οι μελλοντικές κατευθύνσεις για τη βελτίωση της τεχνολογίας και την εμπορική της χρήση.

Στο έκτο κεφάλαιο, περιγράφεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των παραμέτρων των TENGs. Γίνεται αναλυτική παρουσίαση των υλικών και των μεθόδων μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές σε διάφορα περιβάλλοντα και συνθήκες.

Στο έβδομο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την έρευνα, καθώς και οι μελλοντικές προοπτικές για την ανάπτυξη πιο αποδοτικών και ανθεκτικών τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών με βάση τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα.

1: Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο

Μια συνοπτική περιγραφή του τριβοηλεκτρικού φαινομένου και των τριβοηλεκτρικών γεννητριών.

1.1: Τριβοηλεκτρικό Φαινόμενο

Το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο αναφέρεται στην παραγωγή ηλεκτρικού φορτίου κατά την τριβή ή την επαφή και απομάκρυνση δύο διαφορετικών υλικών. Η ικανότητα των υλικών να έλκουν ή να αποβάλλουν ηλεκτρόνια είναι γνωστή ως ηλεκτραρνητικότητα. Κατά την επαφή δύο υλικών με διαφορετική ηλεκτραρνητικότητα, ηλεκτρόνια μεταφέρονται από το ένα υλικό στο άλλο, δημιουργώντας ένα θετικό φορτίο στη μία επιφάνεια και ένα αρνητικό στην άλλη.

Η βάση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου βρίσκεται στην ηλεκτροστατική επαγωγή. Όταν δύο υλικά έρχονται σε επαφή, τα ηλεκτρόνια ρέουν από το υλικό με μικρότερη ηλεκτραρνητικότητα προς το υλικό με μεγαλύτερη. Κατά τον διαχωρισμό των υλικών, το ένα υλικό παραμένει θετικά φορτισμένο και το άλλο αρνητικά φορτισμένο, δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Αυτή η διαφορά δυναμικού μπορεί να οδηγήσει σε ροή ρεύματος όταν τα δύο υλικά συνδεθούν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος.

Παρά το γεγονός ότι το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο είναι γνωστό από την αρχαιότητα, η συστηματική μελέτη του ξεκίνησε κυρίως κατά τον 18ο αιώνα με τον Benjamin Franklin, ο οποίος μελέτησε το φαινόμενο της ηλεκτροστατικής και την παραγωγή φορτίου μέσω της τριβής. Κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, το ενδιαφέρον για το φαινόμενο αυτό περιορίστηκε, όμως επανήλθε στο προσκήνιο με την έλευση της νανοτεχνολογίας, όπου οι ερευνητές ανακάλυψαν νέες δυνατότητες για τη χρήση του τριβοηλεκτρικού φαινομένου στη συγκομιδή ενέργειας [1].

Ένα από τα πλέον ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά του τριβοηλεκτρικού φαινομένου είναι ότι μπορεί να συμβεί σε ένα ευρύ φάσμα υλικών, όπως:

- Πολυμερή υλικά όπως το PTFE και το PDMS, που συχνά χρησιμοποιούνται στις τριβοηλεκτρικές νανογεννήτριες λόγω της υψηλής ηλεκτραρνητικότητάς τους [2].
- Οργανικά και ανόργανα υλικά που περιλαμβάνουν το γυαλί και το μαλλί, τα οποία έχουν ισχυρή θετική φόρτιση όταν έρχονται σε επαφή με αρνητικά φορτισμένα υλικά [3].

Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα του τριβοηλεκτρικού φαινομένου είναι η δυνατότητα να παράγει ενέργεια μέσω της μηχανικής κίνησης, κάτι που έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη τριβοηλεκτρικών γεννητριών (TEGs). Αυτές οι γεννήτριες χρησιμοποιούν την τριβή ή την επαφή και τον διαχωρισμό επιφανειών για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική [4]. Η δυνατότητα αυτής της μετατροπής παρέχει μια πολλά υποσχόμενη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας για φορητές συσκευές, αισθητήρες και άλλες εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης [5].

Επιπλέον, οι τριβοηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες, όπως η υγρασία, η οποία μπορεί να μειώσει την απόδοση λόγω της απορρόφησης νερού από τις επιφάνειες [6]. Ειδικές τεχνικές, όπως η επίστρωση με υδρόφοβα υλικά, έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, βελτιώνοντας την απόδοση των συστημάτων [7].

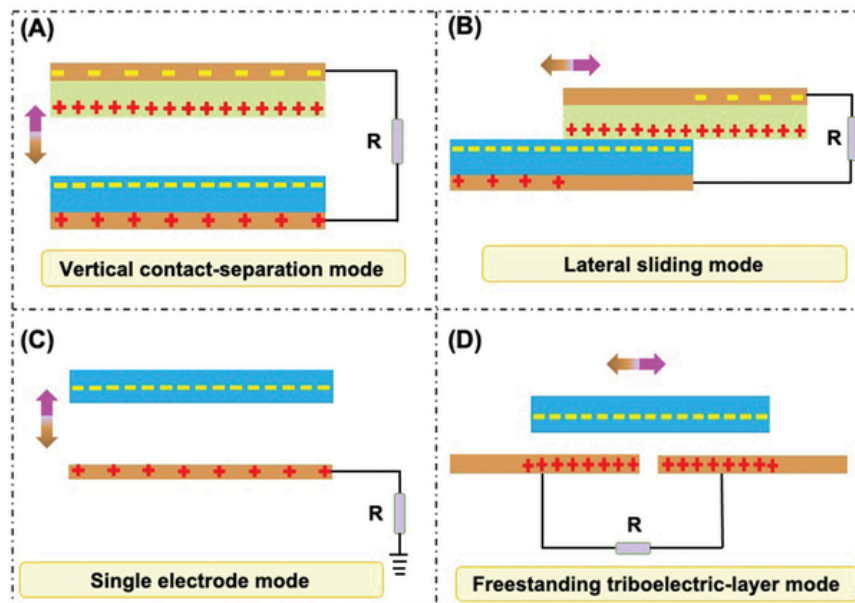
Συνολικά, το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελεί ένα βασικό φυσικό φαινόμενο με τεράστια δυναμική για την ανάπτυξη συστημάτων παραγωγής ενέργειας, ιδίως με την ενσωμάτωση του σε σύγχρονα νανοϋλικά και μικροδομές που αυξάνουν την επιφάνεια επαφής και βελτιστοποιούν την παραγωγή ενέργειας [8].

1.2: Τριβοηλεκτρικές Νανογεννήτριες (TENGs)

Οι τριβοηλεκτρικές νανογεννήτριες (TENGs) αποτελούν μία καινοτόμο τεχνολογία που εκμεταλλεύεται το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Οι TENGs χρησιμοποιούν την επαφή και τον διαχωρισμό δύο υλικών με διαφορετική ηλεκτραρνητικότητα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού φορτίου. Αυτή η τεχνολογία έχει τραβήξει την προσοχή λόγω της δυνατότητας συλλογής ενέργειας από απλές κινήσεις, όπως το περπάτημα, το άνοιγμα μιας πόρτας ή ακόμα και τις δονήσεις του αέρα και του νερού [5].

Οι TENGs μπορούν να λειτουργούν σε τέσσερις βασικές διαμορφώσεις, κάθε μία από τις οποίες προσαρμόζεται σε διαφορετικές πηγές μηχανικής ενέργειας:

1. **Κάθετη επαφή και διαχωρισμός (contact-separation mode):** Η πιο απλή διαμόρφωση, όπου τα υλικά έρχονται σε επαφή κάθετα και διαχωρίζονται, παράγοντας ηλεκτρικό φορτίο. Αυτό το μοντέλο είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό για τη συγκομιδή ενέργειας από περιοδικές κινήσεις, όπως τα βήματα [7].
2. **Ολίσθηση επιφανειών (sliding mode):** Τα υλικά κινούνται παράλληλα το ένα ως προς το άλλο, δημιουργώντας συνεχή τριβή. Το μοντέλο αυτό είναι ιδανικό για εφαρμογές όπου υπάρχει οριζόντια κίνηση, όπως η συλλογή ενέργειας από δονήσεις σε επιφάνειες [8].
3. **Μονού ηλεκτροδίου (single-electrode mode):** Σε αυτήν τη διαμόρφωση, μόνο ένα από τα δύο υλικά συνδέεται με ηλεκτρόδιο, επιτρέποντας την απλή και ευέλικτη κατασκευή. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για φορητές συσκευές, όπως αισθητήρες υγείας ή περιβαλλοντικοί αισθητήρες [6].
4. **Ελεύθερη λειτουργία (freestanding mode):** Το ένα υλικό κινείται ελεύθερα, πάνω σε δύο ξεχωριστές επιφάνειες ενός άλλου υλικού. Η ελεύθερη λειτουργία είναι ιδανική για συστήματα που βασίζονται σε φυσικές κινήσεις, όπως η κίνηση του αέρα ή του νερού [7].



Εικόνα 1.1: Οι τρόποι λειτουργίας των TENGs

Οι TENGs έχουν ήδη εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Για παράδειγμα, στα έξυπνα υφάσματα, οι TENGs ενσωματώνονται σε ρούχα για τη συλλογή ενέργειας από τις κινήσεις του ανθρώπινου σώματος, παρέχοντας αυτοτροφοδοτούμενες λύσεις για φορητές συσκευές, όπως αισθητήρες ή GPS. Έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε βιοϊατρικά συστήματα, όπου αισθητήρες

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

παρακολουθούν ζωτικές λειτουργίες όπως ο καρδιακός ρυθμός και η αρτηριακή πίεση, χωρίς να χρειάζονται εξωτερική πηγή ενέργειας [1].

Μία άλλη σημαντική εφαρμογή των TENGs είναι στην περιβαλλοντική παρακολούθηση και τα έξυπνα δίκτυα. Οι TENGs μπορούν να εγκατασταθούν σε υποδομές όπως γέφυρες, δρόμοι ή ακόμα και σε αστικές περιοχές για τη συλλογή ενέργειας από τις δονήσεις που προκαλούν τα διερχόμενα οχήματα. Αυτή η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία αισθητήρων που παρακολουθούν την ποιότητα του αέρα, τις δονήσεις των υποδομών ή τη θερμοκρασία, καθιστώντας τις πόλεις πιο "έξυπνες" και πιο ενεργειακά αυτόνομες [4].

Ένα από τα πλεονεκτήματα των TENGs είναι η δυνατότητά τους να κατασκευαστούν από φθηνά και ευέλικτα υλικά, όπως τα πολυμερή. Υλικά όπως το PDMS και το PTFE χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της υψηλής τους απόδοσης και της αντοχής τους στις τριβές. Επιπλέον, η ενσωμάτωση νανοσωματιδίων ή η τροποποίηση της επιφάνειας των υλικών μπορεί να αυξήσει την απόδοση, βελτιώνοντας τη μεταφορά φορτίου και την παραγόμενη ενέργεια [9].

Παρόλα αυτά, υπάρχουν ακόμα προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, όπως η βελτίωση της μακροχρόνιας σταθερότητας και η ανθεκτικότητα των υλικών στις συνθήκες περιβάλλοντος. Με την περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη νέων υλικών και τεχνικών κατασκευής, οι TENGs αναμένεται να παίξουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον, τόσο για την παραγωγή ενέργειας όσο και για την αυτοτροφοδοτούμενη λειτουργία έξυπνων συσκευών και αισθητήρων [3].

1.3: Εφαρμογές Τριβηλεκτρικών Νανογεννητριών

Οι τριβηλεκτρικές νανογεννήτριες (TENGs) έχουν μεγάλη δυναμική σε πολλές εφαρμογές λόγω της ικανότητάς τους να μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική με απλά και ευέλικτα υλικά. Γίνονται συνεχώς έρευνες σε τομείς, όπως φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, βιοϊατρικά συστήματα παρακολούθησης, περιβαλλοντική παρακολούθηση και την αυτοκινητοβιομηχανία.

Συγκομιδή Ενέργειας από Κινήσεις του Ανθρώπινου Σώματος

Μία από τις κύριες εφαρμογές των TENGs είναι η συγκομιδή ενέργειας από την κίνηση του ανθρώπινου σώματος. Τα TENGs μπορούν να ενσωματωθούν σε ρούχα και αξεσουάρ, όπως παπούτσια, γάντια ή βραχιόλια, για να συλλέγουν ενέργεια από κινήσεις όπως το περπάτημα και το τρέξιμο. Αυτή η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση φορητών συσκευών χαμηλής κατανάλωσης, όπως έξυπνα ρολόγια και αισθητήρες υγείας [2].

Βιοϊατρικές Εφαρμογές

Οι TENGs μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βιοϊατρικά συστήματα για την παρακολούθηση φυσιολογικών παραμέτρων, προσφέροντας αυτοτροφοδοτούμενες λύσεις για αισθητήρες που παρακολουθούν ζωτικές λειτουργίες, όπως ο καρδιακός ρυθμός και η αρτηριακή πίεση [6]. Αυτή η τεχνολογία παρέχει αξιόπιστες λύσεις χαμηλής κατανάλωσης για βιοϊατρικές συσκευές.

Περιβαλλοντικές Εφαρμογές

Οι TENGs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας από περιβαλλοντικές πηγές, όπως οι δονήσεις που προκαλούνται από την κίνηση του αέρα ή του νερού. Για παράδειγμα,

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

μπορούν να τοποθετηθούν σε υποδομές, όπως γέφυρες και δρόμοι, συλλέγοντας ενέργεια από τις δονήσεις των οχημάτων. Αυτή η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση αισθητήρων που παρακολουθούν περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία ή η ποιότητα του αέρα, συμβάλλοντας στη δημιουργία "έξυπνων πόλεων" [3].

Εφαρμογές στη Νανοηλεκτρονική και Ανίχνευση

Οι TENGs χρησιμοποιούνται επίσης στη νανοηλεκτρονική και την ανίχνευση χημικών και βιολογικών παραγόντων. Η υψηλή ευαισθησία τους σε μηχανικές δονήσεις και αλλαγές στην πίεση καθιστά δυνατή την εφαρμογή τους σε αισθητήρες που ανιχνεύουν χημικές ουσίες ή παρακολουθούν περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η υγρασία και η θερμοκρασία [4].

Έξυπνα Κλωστοϋφαντουργικά Προϊόντα

Η τεχνολογία των TENGs παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες για ενσωμάτωση σε έξυπνα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Τα υφάσματα μπορούν να παράγουν ενέργεια μέσω της τριβηλεκτρικής επίδρασης, και αυτή η ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση ενσωματωμένων ηλεκτρονικών συσκευών, όπως αισθητήρες υγείας και συστήματα GPS [5].

Πολυλειτουργικότητα και Προσαρμοστικότητα

Οι TENGs είναι ευέλικτες και πολυλειτουργικές, καθιστώντας τις ιδανική επιλογή για την επόμενη γενιά ενεργειακών λύσεων. Η προσαρμοστικότητά τους σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες τις καθιστά κατάλληλες για χρήση σε φορητές συσκευές, αισθητήρες και άλλες εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας [7].

1.4: Σύνδεση μεταξύ Τριβηλεκτρικών Γεννητριών Βασισμένων σε Κλωστοϋφαντουργικά Προϊόντα και Παραμέτρων που Επηρεάζουν την Ηλεκτρική τους Απόδοση

Η απόδοση μιας τριβηλεκτρικής γεννήτριας (TEG) εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται τόσο με τα υλικά όσο και με τη δομική τους σχεδίαση. Οι παράμετροι που επηρεάζουν κυρίως την ηλεκτρική απόδοση των TEGs που βασίζονται σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα περιλαμβάνουν τα υλικά που χρησιμοποιούνται και τις φυσικές τους ιδιότητες, τη δομή και τη μορφολογία της επιφάνειας επαφής, τη τραχύτητα, και την περιοχή επαφής, καθώς και περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η υγρασία και η θερμοκρασία.

Επιρροή των Υλικών και της Δομικής Σχεδίασης

Η επιλογή των υλικών έχει μεγάλη σημασία για την απόδοση των TEGs. Σύμφωνα με τη θεωρία των τριβηλεκτρικών σειρών, τα υλικά κατατάσσονται σε μια κλίμακα με βάση την ικανότητά τους να φορτίζουν θετικά ή αρνητικά. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στην ηλεκτροαρνητικότητα μεταξύ των δύο υλικών, τόσο ισχυρότερη είναι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [5]. Για παράδειγμα, η χρήση πολυμερών όπως το φθοριούχο αιθυλένιο-προπυλένιο (FEP) σε συνδυασμό με βαμβάκι, το οποίο έχει ισχυρή ικανότητα απώλειας ηλεκτρονίων, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την απόδοση της γεννήτριας [2].

Εκτός από τα υλικά, η δομική σχεδίαση των επιφανειών επαφής παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο. Διάφορες γεωμετρικές επιφανειών, όπως οι δομές νανοκλίμακας με τρύπες σε σχήμα ανεστραμμένων πυραμίδων, μπορούν να αυξήσουν την ηλεκτρική απόδοση έως και 100% σε σχέση

με επίπεδες επιφάνειες. Επιπλέον, η προσθήκη μικροδομών, όπως τα νανοσύρματα ή οι μικροπυλώνες, μπορεί να ενισχύσει την περιοχή επαφής και να βελτιώσει τη φόρτιση μέσω της αύξησης των σημείων επαφής [3].

Επιφάνεια Επαφής και Τραχύτητα Υλικών

Η επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο υλικών είναι επίσης καθοριστικός παράγοντας. Η αύξηση της περιοχής επαφής οδηγεί σε μεγαλύτερη δυναμική περιοχή για τη μεταφορά φορτίου, με αποτέλεσμα την αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης. Για παράδειγμα, μελέτες έδειξαν ότι η αύξηση της επιφάνειας επαφής σε υφάσματα τριβηλεκτρικών γεννητριών αυξάνει την τάση εξόδου [7]. Παράλληλα, η τραχύτητα των υλικών μπορεί να επηρεάσει την απόδοση της γεννήτριας. Υλικά με υψηλή τραχύτητα αυξάνουν την περιοχή αποτελεσματικής τριβής και, συνεπώς, την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [10].

Περιβαλλοντικές Επιρροές: Υγρασία και Θερμοκρασία

Η υγρασία του περιβάλλοντος είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση των TEGs, ειδικά όταν χρησιμοποιούνται υφάσματα ως τριβηλεκτρικά υλικά. Όπως διαπιστώθηκε σε μελέτες, η αύξηση της σχετικής υγρασίας από 20% σε 80% μπορεί να μειώσει την πυκνότητα του τριβηλεκτρικού φορτίου, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει την αγωγιμότητα των υλικών [1]. Η υγρασία μπορεί να αλλάξει τις φυσικές ιδιότητες των υλικών, οδηγώντας σε μείωση της απόδοσης. Η επίδραση αυτή είναι ιδιαίτερα εμφανής σε υδρόφιλα υλικά, όπως το βαμβάκι, που απορροφούν νερό και μειώνουν την απόδοση της γεννήτριας λόγω της αυξημένης διασποράς ηλεκτρονίων [6].

Η επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση των TEGs έχει επίσης διερευνηθεί. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, η κινητικότητα των ηλεκτρονίων αυξάνεται, αλλά σε ακραίες θερμοκρασίες, μπορεί να προκληθεί υπερθέρμανση και να οδηγήσει σε υποβάθμιση των υλικών [8]. Επομένως, η σωστή επιλογή υλικών και δομής είναι κρίσιμη για τη βέλτιστη απόδοση υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Η μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοση των TEGs σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα αναδεικνύει τη σημασία της επιλογής υλικών, της δομικής σχεδίασης, και των περιβαλλοντικών παραγόντων. Μέχρι στιγμής, καμία έρευνα δεν έχει εξετάσει πλήρως τη σύνδεση μεταξύ διαφορετικών δομών υφασμάτων και της απόδοσής τους ως τριβηλεκτρικές γεννήτριες. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη για μια συστηματική ταξινόμηση και σύγκριση των υφασμάτων σε σχέση με τις παραμέτρους αυτές. Αυτό το έργο στοχεύει να παρουσιάσει έναν νέο σχεδιασμό και την ανάπτυξη μιας πρωτότυπης πειραματικής συσκευής που θα συγκρίνει την αποτελεσματικότητα διαφορετικών κλωστοϋφαντουργικών δομών, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η δύναμη επαφής, ο χρόνος επαφής, και η ύφανση [11].

2: Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά των TENGs

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών (TENGs) είναι κρίσιμα για την κατανόηση της λειτουργίας τους και την ενσωμάτωσή τους σε πρακτικές εφαρμογές. Οι TENGs βασίζονται στη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, και η απόδοσή τους εξαρτάται από παράγοντες όπως η τάση, το ρεύμα, η ισχύς, η απόδοση μετατροπής ενέργειας και η αντίσταση εξόδου.

2.1: Τάση και Ρεύμα

Οι TENGs είναι γνωστές για την ικανότητά τους να παράγουν υψηλή τάση. Η παραγόμενη τάση μπορεί να φτάσει εκατοντάδες βολτ (V), ενώ το παραγόμενο ρεύμα είναι συνήθως χαμηλής έντασης, κυμαινόμενο μεταξύ μικροαμπέρ (μΑ) και μιλιαμπέρ (mA) [5]. Η παραγωγή τάσης και ρεύματος εξαρτάται από την επιφάνεια επαφής, τη συχνότητα των κινήσεων και τη δύναμη της επαφής. Οι TENGs παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), γεγονός που απαιτεί τη χρήση ανορθωτών ή μετατροπέων για εφαρμογές που απαιτούν σταθερό συνεχές ρεύμα (DC) [7].

2.2: Ισχύς και Απόδοση

Η παραγόμενη ισχύς από τις TENGs εξαρτάται από τη δομή της γεννήτριας, τη συχνότητα επαφής, την επιφάνεια επαφής των υλικών και την δύναμη επαφής. Οι TENGs μπορούν να παράγουν ισχύ από μικροβάτ (μW) έως μιλιβάτ (mW), ανάλογα με τη χρήση τους [4]. Για την αύξηση της ισχύος εξόδου, απαιτείται η βελτιστοποίηση της περιοχής επαφής, η επιλογή υλικών με υψηλή διαφορά ηλεκτρικότητας και η αύξηση της συχνότητας επαφής και διαχωρισμού [2]. Η απόδοση μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική μπορεί να φτάσει υψηλά επίπεδα, με μερικές TENGs να επιτυγχάνουν απόδοση έως και 50-60% υπό ιδανικές συνθήκες [5].

2.3: Χωρητικότητα και Αποθήκευση Ενέργειας

Η αποθήκευση ενέργειας σε συστήματα TENGs απαιτεί τη χρήση πυκνωτών ή μπαταριών για τη συλλογή και συσσώρευση της παραγόμενης ενέργειας. Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται για τη συλλογή της ενέργειας που παράγεται σε μικρά χρονικά διαστήματα, ενώ η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση σε συσκευές με συνεχή ζήτηση ενέργειας [8].

2.4: Αντίσταση Εξόδου και Προσαρμογή Φορτίου

Η αντίσταση εξόδου των TENGs είναι συνήθως υψηλή, γεγονός που απαιτεί σωστή προσαρμογή φορτίου για τη βελτιστοποίηση της ισχύος εξόδου. Η προσαρμογή του φορτίου με την αντίσταση εξόδου μπορεί να αυξήσει την απόδοση και να μειώσει τις απώλειες ενέργειας [8]. Η σωστή προσαρμογή της αντίστασης εξόδου βελτιστοποιεί τη συλλογή ενέργειας και σταθεροποιεί την παραγόμενη ισχύ.

3: Άνεση υφασμάτων και ενδυμάτων

Οι φορετές τριβοηλεκτρικές νανογεννήτριες (TENGs) αποτελούν μία καινοτόμο τεχνολογία που ενσωματώνεται όλο και περισσότερο σε υφάσματα και ενδύματα, προσφέροντας λύσεις για τη συγκομιδή ενέργειας από τις κινήσεις του σώματος. Η επιτυχία τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την άνεση που προσφέρουν, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη μακροχρόνια χρήση τους σε καθημερινές εφαρμογές. Η επιλογή υλικών και τεχνολογιών κατασκευής επηρεάζει την αίσθηση του υφάσματος στο δέρμα και την προσαρμοστικότητα του στα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και της κίνησης του χρήστη [2],[7].

Η αξιολόγηση της άνεσης γίνεται με δύο βασικές μεθόδους: υποκειμενική και αντικειμενική. Η υποκειμενική αξιολόγηση αφορά τις προσωπικές προτιμήσεις του χρήστη και το πώς αισθάνεται το ύφασμα στο σώμα του. Η αντικειμενική αξιολόγηση βασίζεται σε μετρήσεις φυσικών χαρακτηριστικών, όπως η πίεση του υφάσματος στο δέρμα, η θερμοκρασία και η υγρασία που συσσωρεύονται κατά τη χρήση [3],[6]. Αυτές οι δύο μέθοδοι αξιολόγησης μπορούν να συνδυάζονται για να διασφαλιστεί ότι οι TENGs προσφέρουν τη μέγιστη άνεση, επιτρέποντας την αδιάλειπτη χρήση τους ακόμα και σε συνθήκες έντονης σωματικής δραστηριότητας. Τα βασικά κριτήρια άνεσης περιλαμβάνουν την αισθητηριακή και απτική άνεση, την άνεση εφαρμογής, τη θερμική άνεση, τη διαπνοή και την αισθητική εμφάνιση των υφασμάτων [5],[7].

3.1: Αισθητηριακή και απτική άνεση

Η αισθητηριακή και απτική άνεση είναι κρίσιμος παράγοντας για τη χρήση των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών (TENGs) σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, ειδικά σε φορετές εφαρμογές όπου οι χρήστες απαιτούν υψηλά επίπεδα άνεσης κατά τη χρήση τους. Οι TENGs πρέπει να ενσωματωθούν σε ρούχα χωρίς να προκαλούν ερεθισμούς ή δυσφορία κατά την επαφή με το δέρμα [2]. Η επιλογή υλικών όπως ο πολυεστέρας, το βαμβάκι και το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE) συμβάλλει στη δημιουργία επιφανειών που είναι φιλικές προς το δέρμα, ενώ παράλληλα διατηρούν τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες [7].

Η απτική άνεση εξαρτάται όχι μόνο από τα υλικά αλλά και από την κατασκευή του υφάσματος. Τα πλεκτά υφάσματα, για παράδειγμα, έχουν την ικανότητα να προσαρμόζονται καλύτερα στις κινήσεις του σώματος σε σχέση με τα υφαντά, καθώς προσφέρουν μεγαλύτερη ελαστικότητα [5]. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική για την εφαρμογή των TENGs σε αθλητικά ρούχα, όπου η άνεση είναι απαραίτητη κατά τη διάρκεια της άσκησης [9]. Επίσης, τα υφάσματα που περιέχουν ελαστικά υλικά, όπως το σπαντέξ, παρέχουν την απαραίτητη ευκαμψία, διασφαλίζοντας ότι το ρούχο δεν θα περιορίζει την κίνηση του χρήστη [6].

Επιπλέον, οι ιδιότητες των υφασμάτων, όπως η διαπερατότητα υγρασίας και η θερμική αγωγιμότητα, επηρεάζουν σημαντικά την αίσθηση άνεσης [4]. Υλικά όπως το βαμβάκι και ο πολυεστέρας είναι γνωστά για την ικανότητά τους να απορροφούν και να απομακρύνουν την υγρασία, ενώ οι υδροφοβικές επιστρώσεις σε υφάσματα μπορούν να βελτιώσουν την άνεση σε περιβάλλοντα με υγρασία [5]. Τα ελαφριά και πορώδη υφάσματα είναι ιδανικά για τη διατήρηση της θερμοκρασίας και την απομάκρυνση της υγρασίας, προσφέροντας θερμική άνεση ακόμα και κατά τη διάρκεια έντονης φυσικής δραστηριότητας [9].

Η αισθητική του υφάσματος παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην εμπειρία του χρήστη. Εκτός από την απτική αίσθηση, η οπτική εμφάνιση και η υφή των υφασμάτων καθορίζουν την τελική αποδοχή του προϊόντος [7]. Τα διαφορετικά μοτίβα και οι υφές που μπορούν να δημιουργηθούν μέσω τεχνικών πλεξίματος ή ύφανσης δίνουν στις TENGs την ευελιξία να ενσωματώνονται σε καθημερινά ρούχα χωρίς να επηρεάζεται η αισθητική τους [8].

Τέλος, η επιλογή των υλικών πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη διάρκεια ζωής και τη διατήρηση των ιδιοτήτων τους. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις TENGs πρέπει να είναι ανθεκτικά σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η υγρασία και η φθορά λόγω χρήσης, διατηρώντας την απόδοσή τους και την άνεση που προσφέρουν καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του προϊόντος [6]. Οι κατάλληλες επιστρώσεις και οι τεχνικές επεξεργασίας μπορούν να ενισχύσουν την αντοχή των υφασμάτων, διασφαλίζοντας μακροχρόνια χρήση και λειτουργικότητα [5].

3.2: Άνεση εφαρμογής

Η άνεση εφαρμογής στα ρούχα που ενσωματώνουν τριβηλεκτρικές νανογεννήτριες (TENGs) είναι κρίσιμη για την επιτυχία τους, καθώς σχετίζεται άμεσα με τη μηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ του υφάσματος και του ανθρώπινου σώματος. Η πίεση που ασκείται στο δέρμα από το ύφασμα, καθώς και η προσαρμοστικότητα του υφάσματος στις κινήσεις του σώματος, επηρεάζουν την άνεση κατά τη χρήση [2], [10]. Οι φορετές συσκευές που ενσωματώνουν TENGs πρέπει να εξισορροπούν την ανάγκη για ευκαμψία με την ικανότητα να διατηρούν τη λειτουργικότητά τους υπό διάφορες συνθήκες [5].

Η πίεση που ασκεί το ύφασμα στο δέρμα προκαλείται από τη βαρύτητα του υφάσματος, την επαφή με το δέρμα και τις κινήσεις του χρήστη. Ρούχα με ανεπαρκές μέγεθος ή λάθος σχεδιασμό μπορεί να επηρεάσουν αυτή την πίεση, ειδικά όταν το ύφασμα δεν προσαρμόζεται στις κινήσεις του σώματος. Επομένως, η σωστή εφαρμογή και η επιλογή υλικών είναι καθοριστικοί παράγοντες για την άνεση κατά τη διάρκεια της άσκησης [8], [10].

Η ελαστικότητα των υφασμάτων είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την άνεση εφαρμογής. Υφάσματα που περιέχουν ελαστικά νήματα, όπως το σπαντέξ, χρησιμοποιούνται ευρέως σε αθλητικά ρούχα, προσφέροντας μεγαλύτερη ευκαμψία και προσαρμοστικότητα στις κινήσεις του σώματος [6]. Ωστόσο, η ελαστικότητα πρέπει να συνοδεύεται από καλή σταθερότητα και ανθεκτικότητα, να προσφέρει σωστή υποστήριξη και να μην προκαλεί δυσφορία [9].

Επιπλέον, η χαλαρότητα του υφάσματος παίζει σημαντικό ρόλο και στην άνεση εφαρμογής. Τα ρούχα πρέπει να προσαρμόζονται στις ανάγκες του χρήστη ανάλογα με το είδος της δραστηριότητας. Για παράδειγμα, τα ρούχα για γιόγκα απαιτούν μεγάλη ελαστικότητα και προσαρμογή στο σώμα, ενώ καθημερινά ρούχα, όπως πουκάμισα και κοστούμια, χρειάζονται μικρότερη ελαστικότητα για να διατηρούν τη σιλουέτα τους [2], [10]. Η σωστή ισορροπία μεταξύ της χαλαρότητας και της εφαρμογής εξασφαλίζει την άνεση χωρίς να θυσιάζεται η λειτουργικότητα ή η αισθητική.

Η άνεση εφαρμογής αξιολογείται τόσο μέσω υποκειμενικών όσο και αντικειμενικών μεθόδων. Οι υποκειμενικές μέθοδοι βασίζονται στις προτιμήσεις και τις εμπειρίες του χρήστη, ενώ οι αντικειμενικές μετρήσεις περιλαμβάνουν δοκιμές που μετρούν την πίεση που ασκείται στο δέρμα μέσω αισθητήρων ή εικονικών δοκιμών [7]. Συνδυάζοντας και τις δύο μεθόδους, μπορούμε να βελτιώσουμε τον σχεδιασμό των ρούχων ώστε να παρέχουν την καλύτερη δυνατή άνεση κατά τη χρήση τους.

Οι εύκαμπτες και ελαστικές δομές των TENGs, όταν ενσωματώνονται σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, συμβάλλουν στη μεγιστοποίηση της άνεσης εφαρμογής [8], [9]. Τα αθλητικά ρούχα είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα όπου η ευελιξία και η αντοχή είναι απαραίτητες για να διατηρείται η λειτουργικότητα του ενδύματος χωρίς να περιορίζεται η κίνηση του χρήστη. Η σωστή επιλογή υλικών και η κατάλληλη τεχνολογία κατασκευής διασφαλίζουν ότι

τα TENGs προσφέρουν τόσο άνεση όσο και λειτουργικότητα σε καθημερινές και αθλητικές δραστηριότητες [7]. [12].

3.3: Άνεση θερμότητας-υγρασίας

Η θερμική άνεση και η άνεση υγρασίας είναι κρίσιμες παράμετροι για τη χρήση τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών (TENGs) με βάση τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, καθώς επηρεάζουν την αίσθηση του χρήστη κατά τη διάρκεια της χρήσης. Οι χρήστες πρέπει να αισθάνονται άνετα τόσο από άποψη θερμοκρασίας όσο και διαχείρισης της υγρασίας, ειδικά όταν φορούν TENGs κατά τη διάρκεια έντονης σωματικής δραστηριότητας [2], [6].

Η θερμική άνεση επιτυγχάνεται όταν τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα ρούχα βοηθούν στη διατήρηση της ισορροπίας θερμοκρασίας μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντος. Υλικά όπως το βαμβάκι και ο πολυεστέρας έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά για την απορρόφηση και απαγωγή της θερμότητας, διατηρώντας το σώμα δροσερό το καλοκαίρι και ζεστό το χειμώνα [4]. Οι πόροι στα υφάσματα επιτρέπουν την κυκλοφορία του αέρα, κάτι που βοηθάει στη μείωση της θερμικής καταπόνησης του σώματος [6].

Παράλληλα, η άνεση υγρασίας είναι εξίσου σημαντική για τη διατήρηση της θερμικής ισορροπίας. Η ικανότητα ενός υφάσματος να απορροφά και να απομακρύνει την υγρασία από το σώμα διασφαλίζει ότι το μικροκλίμα μεταξύ του υφάσματος και του δέρματος παραμένει ισορροπημένο [6]. Υλικά όπως το βαμβάκι είναι γνωστά για την υψηλή τους απορροφητικότητα, ενώ ο πολυεστέρας στεγνώνει πιο γρήγορα, κάνοντάς τον κατάλληλο για αθλητικά ρούχα και άλλες εφαρμογές που απαιτούν διαχείριση της υγρασίας [2].

Η εφαρμογή υδροφοβικών επιστρώσεων σε υφάσματα έχει βελτιώσει περαιτέρω την άνεση υγρασίας, επιτρέποντας στα ρούχα να απωθούν το νερό και να παραμένουν στεγνά ακόμα και σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία [7]. Επιπλέον, οι πολυστρωματικές δομές των υφασμάτων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία TENGs συμβάλλουν στη ρύθμιση της θερμοκρασίας και της υγρασίας, καθιστώντας τα ρούχα πιο διαπνέοντα και άνετα για καθημερινή χρήση [5].

Η αξιολόγηση της θερμικής άνεσης και της άνεσης υγρασίας γίνεται με τη χρήση εξειδικευμένων μεθόδων και οργάνων. Οι δοκιμές θερμικής αγωγιμότητας και διαπερατότητας υγρασίας επιτρέπουν την αντικειμενική μέτρηση της ικανότητας των υφασμάτων να διαχειρίζονται τη θερμότητα και την υγρασία, ενώ οι υποκειμενικές δοκιμές βασίζονται στην αντίληψη του χρήστη για τη θερμική αίσθηση και την αίσθηση υγρασίας [6], [7].

3.4: Αισθητική εμφάνιση

Η αισθητική εμφάνιση των ρούχων που ενσωματώνουν τριβοηλεκτρικές νανογεννήτριες (TENGs) αποτελεί βασικό κριτήριο για την αποδοχή και χρήση αυτών των προϊόντων. Εκτός από τη λειτουργικότητά τους στην παραγωγή ενέργειας, οι TENGs πρέπει να ενσωματώνονται στα ρούχα με τρόπο που να διατηρούν την αισθητική και την απτική τους ελκυστικότητα. Οι τεχνικές παραγωγής, όπως η πλέξη και η ύφανση, παίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία υφασμάτων που προσφέρουν οπτική ποικιλία και απτική άνεση [2]. [6].

Η ανάπτυξη φορετών συσκευών, όπως οι TENGs, βασίζεται στη δυνατότητα των καινοτόμων υλικών να προσαρμόζονται στις ανάγκες της αγοράς, διατηρώντας ταυτόχρονα την αισθητική τους. Τα σχέδια και τα μοτίβα που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία παραγωγής προσθέτουν βάθος και ελκυστικότητα στα υφάσματα, ενώ οι υδροφοβικές επεξεργασίες εξασφαλίζουν τη μακροχρόνια διατήρηση της αισθητικής τους, παρά τις εξωτερικές επιρροές [7].

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

Παράλληλα, τα υλικά όπως οι αγώγιμες ίνες που χρησιμοποιούνται σε TENGs μπορούν να διατηρήσουν την αισθητική και τη λειτουργικότητά τους, ακόμη και σε απαιτητικά περιβάλλοντα. Η ευκαμψία των υφασμάτων και η αντοχή τους στη φθορά μέσω επαναλαμβανόμενων χρήσεων και πλύσεων διατηρούν την αισθητική τους αξία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Νέες τεχνικές παραγωγής που βασίζονται σε τρισδιάστατες διατάξεις και ειδικές υφές ενισχύουν τη συνολική εμπειρία χρήσης [3]. [8].

Επιπλέον, οι αισθητικές απαιτήσεις των σύγχρονων καταναλωτών ενισχύουν την ανάγκη για προϊόντα που όχι μόνο λειτουργούν αποδοτικά αλλά είναι και οπτικά ευχάριστα. Στο πλαίσιο αυτό, οι TENGs επωφελούνται από εξελιγμένες μεθόδους κατασκευής που εξασφαλίζουν την αισθητική εμφάνιση και τη μακροχρόνια απόδοση. Η χρήση πολυμερικών και μεταλλικών επιστρώσεων, ενισχύουν την ανθεκτικότητα και τη διατήρηση της αισθητικής εμφάνισης, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα υψηλά επίπεδα λειτουργικότητας [7]. [9].

4: Πρόοδος των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών με βάση τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα

Η πρόοδος των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών (TENGs) με βάση τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα έχει καθορίσει μια νέα εποχή στον τομέα των έξυπνων φορετών συστημάτων. Οι TENGs, με την ικανότητά τους να συλλέγουν μηχανική ενέργεια από κινήσεις του σώματος, αποτελούν τον πυρήνα τεχνολογιών που μπορούν να αξιοποιηθούν σε φορετές συσκευές για την παραγωγή ενέργειας, την παρακολούθηση φυσιολογικών παραμέτρων και την υποστήριξη συστημάτων IoT [5].

Αυτό το κεφάλαιο επικεντρώνεται στην εξέλιξη των τεχνολογιών TENGs και στη δυνατότητά τους να ενσωματώνονται σε πραγματικές εφαρμογές, όπως η ενσωμάτωση σε έξυπνα φορετά συστήματα και η μαζική παραγωγή [10]. Η εξέλιξη των TENGs αφορά κυρίως την αποτελεσματικότητα και την απόδοση των υλικών που χρησιμοποιούνται, όπως οι αγωγιμες ίνες και οι ειδικές τεχνολογίες κατασκευής, που εξασφαλίζουν την ανθεκτικότητα και τη λειτουργικότητα των γεννητριών [6]. Το κεφάλαιο αυτό εξετάζει νέες στρατηγικές ενσωμάτωσης των TENGs σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα και αναλύει την εμπορική εφαρμογή τους σε φορετές συσκευές, εστιάζοντας στην απόδοση, τη μακροχρόνια χρήση και τη βιωσιμότητα [3].

Οι TENGs έχουν επιδείξει μεγάλη πρόοδο όσον αφορά τη δυνατότητα τους να προσαρμόζονται σε φορετά υλικά, διατηρώντας την απόδοσή τους σε συνθήκες καθημερινής χρήσης. Οι νέες τεχνικές κατασκευής και η βελτίωση των υλικών έχουν επιτρέψει τη μαζική παραγωγή φορετών προϊόντων με ενσωματωμένες τριβοηλεκτρικές δυνατότητες [7].

4.1: Πλενόμενες Τριβοηλεκτρικές Νανογεννήτριες

Μια από τις πιο σημαντικές προόδους στον τομέα των TENGs είναι η βελτίωση της πλενόμενης φύσης των υλικών. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε TENGs για φορετά συστήματα πρέπει να είναι ικανά να αντέχουν επαναλαμβανόμενες χρήσεις και πλύσεις, διατηρώντας παράλληλα την απόδοσή τους. Με την εφαρμογή υδροφοβικών επιστρώσεων και ειδικών πολυμερικών στρωμάτων, τα υφάσματα μπορούν να αντέχουν στις απαιτήσεις της καθημερινής χρήσης, ενώ παραμένουν εύκαμπτα και λειτουργικά [7].

Νέες έρευνες δείχνουν ότι οι τριβοηλεκτρικές νανογεννήτριες με βάση πολυμερή όπως το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE) και πολυουρεθάνιο (PU) διατηρούν τις ιδιότητές τους ακόμα και μετά από πολλαπλούς κύκλους πλυσίματος, καθιστώντας τα κατάλληλα για χρήση σε καθημερινά ρούχα και αθλητικά είδη [9]. Η ανθεκτικότητα στη φθορά και το πλύσιμο έχει βελτιώσει σημαντικά την εμπορική βιωσιμότητα αυτών των υφασμάτων, ενισχύοντας τη συνολική διάρκεια ζωής τους [3], [7].

4.2: Πολυλειτουργικές Ιδιότητες των Τριβοηλεκτρικών Νανογεννητριών

Εκτός από την πλενόμενη φύση των υλικών, οι πολυλειτουργικές ιδιότητες των TENGs παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της τεχνολογίας τους. Τα υφάσματα που ενσωματώνουν TENGs δεν είναι πλέον μόνο φορείς παραγωγής ενέργειας, αλλά προσφέρουν επιπλέον ιδιότητες, όπως αδιαβροχότητας, αντιβακτηριακής προστασίας, αντοχής στη φωτιά και προστασίας από την υπερϊώδη ακτινοβολία [6].

Η πολυλειτουργικότητα των TENGs επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ειδικών υλικών και τεχνικών κατασκευής. Για παράδειγμα, η ενσωμάτωση αγωγίμων ινών και νανοϋλικών επιτρέπει τη δημιουργία υφασμάτων που είναι ικανά να προσαρμόζονται σε διάφορες περιβαλλοντικές

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

συνθήκες, ενώ παραμένουν λειτουργικά και ανθεκτικά. Αυτές οι ιδιότητες κάνουν τις TENGs κατάλληλες για εφαρμογές όπως η παρακολούθηση βιοϊατρικών παραμέτρων, η χρήση σε έξυπνα ρούχα και η συγκομιδή ενέργειας σε συνθήκες ακραίας υγρασίας ή θερμοκρασίας [8].

Η πολυλειτουργικότητα και η ανθεκτικότητα των TENGs διευρύνουν τις δυνατότητές τους για χρήση σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως η προστασία από ακραίες συνθήκες, καθιστώντας τις τεχνολογίες αυτές πιο ευέλικτες και εμπορικά βιώσιμες [9].

4.3 Έξυπνα φορητά συστήματα και στρατηγικές μαζικής παραγωγής

Η ενσωμάτωση των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών (TENGs) με βάση τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα σε έξυπνα φορητά συστήματα και η μαζική παραγωγή αυτών των προϊόντων παρουσιάζουν ορισμένες προκλήσεις. Για την επιτυχημένη εφαρμογή τους απαιτείται βελτιστοποίηση της απόδοσης μετατροπής ενέργειας, ενσωμάτωση με τα κυκλώματα και τις φορητές συσκευές, και ανάπτυξη αποδοτικών μεθόδων μαζικής παραγωγής. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικά βήματα για την επίλυση αυτών των ζητημάτων, με τους ερευνητές να προτείνουν συστήματα διαχείρισης ενέργειας, νέες στρατηγικές ενσωμάτωσης και τεχνικές παραγωγής μεγάλης κλίμακας [13], [14].

4.3.1 Αύξηση της απόδοσης

Η αύξηση της απόδοσης των TENGs είναι απαραίτητη για την ευρεία χρήση τους σε έξυπνα φορητά συστήματα. Προηγμένες στρατηγικές, όπως η τροποποίηση της επιφάνειας των υλικών και η βελτιστοποίηση των δομών της συσκευής, έχουν δείξει ότι μπορούν να αυξήσουν την αποδοτικότητα των TENGs, καθιστώντας τις πιο αποδοτικές σε καθημερινή χρήση. Επιφανειακές νανοδομές, όπως nanoparticles και nanowires, επιτρέπουν την αύξηση της πυκνότητας του φορτίου και της αποδοτικότητας μετατροπής ενέργειας [14]. Παράλληλα, η βελτίωση της αγωγιμότητας των υλικών έχει οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσης εξόδου, καθιστώντας τις TENGs πιο αποδοτικές στη συγκομιδή ενέργειας από την κίνηση του σώματος [15].

4.3.2 Διαχείριση Ισχύος

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που σχετίζονται με τις TENGs είναι η διαχείριση της ενέργειας. Οι TENGs παράγουν συνήθως υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα, γεγονός που απαιτεί την ενσωμάτωση συστημάτων διαχείρισης ισχύος για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης τους. Ειδικές μονάδες μετατροπής εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έχουν αναπτυχθεί για να ενισχύσουν την απόδοση των TENGs και να τις καταστήσουν ικανές για χρήση σε φορητές συσκευές που απαιτούν σταθερή πηγή ενέργειας [13], [15].

Η ανάπτυξη εξωτερικών κυκλωμάτων και διακοπών ρεύματος βελτιώνει τη συνολική απόδοση των TENGs, επιτρέποντάς τους να λειτουργούν πιο αποδοτικά σε περιβάλλοντα με διακυμάνσεις κίνησης, όπως είναι η καθημερινή χρήση ενδυμάτων. Επιπλέον, οι νέες τεχνολογίες διαχείρισης ισχύος επιτρέπουν τη συλλογή και αποθήκευση ενέργειας, καθιστώντας τις TENGs πιο βιώσιμες για εφαρμογές όπως η παρακολούθηση φυσιολογικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο [13].

4.3.3 Ενσωμάτωση των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών με βάση τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα σε έξυπνα φορετά συστήματα.

Η απρόσκοπτη ενσωμάτωση των TENGs σε έξυπνα φορετά συστήματα είναι κρίσιμη για τη λειτουργία και την αποδοχή τους από τους καταναλωτές. Οι νέες τεχνολογίες πλέξης και ύφανσης έχουν βελτιώσει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης των TENGs σε ρούχα, επιτρέποντας τη δημιουργία ινωδών και εύκαμπτων συσκευών που προσαρμόζονται στις κινήσεις του σώματος [9]. Ένα παράδειγμα αποτελεί η ενσωμάτωση τριβοηλεκτρικών ινών σε πλεκτά υφάσματα, τα οποία ακολουθούν την κίνηση του σώματος και συλλέγουν ενέργεια χωρίς να επηρεάζεται η άνεση του χρήστη [12].

Η ενσωμάτωση των TENGs με κυκλώματα και έξυπνα συστήματα παρακολούθησης υγείας καθιστά τις συσκευές αυτές ιδανικές για εφαρμογές που απαιτούν συνεχή παρακολούθηση φυσιολογικών δεδομένων, όπως η καταγραφή της κίνησης ή η ανάλυση του ιδρώτα. Αυτές οι εφαρμογές δείχνουν την πρακτική αξία των TENGs ως πηγές αυτοτροφοδοτούμενης ενέργειας σε φορετά συστήματα [6], [13].

4.3.4 Μαζική παραγωγή

Η εμπορική εφαρμογή των TENGs εξαρτάται από τη δυνατότητα μαζικής παραγωγής τους σε κλίμακα που να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της αγοράς. Παρά τις προκλήσεις που υπάρχουν στην κατασκευή, η τεχνολογία ύφανσης και πλέξης έχει κάνει σημαντικά βήματα για τη μαζική παραγωγή τριβοηλεκτρικών υφασμάτων με ενσωματωμένες ίνες που επιτρέπουν τη συγκομιδή ενέργειας [10]. Επιπλέον, η χρήση λειτουργικών ινών με μικρή διάμετρο και ικανή αντοχή διευκολύνει την παραγωγή σε μεγαλύτερη κλίμακα, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η ανθεκτικότητα των υφασμάτων [14].

Οι στρατηγικές μαζικής παραγωγής επικεντρώνονται επίσης στην ενσωμάτωση των TENGs στα ενδύματα με τυπικές βιομηχανικές μεθόδους, επιτρέποντας την παραγωγή ενδυμάτων με χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα. Οι ερευνητές συνεχίζουν να αναπτύσσουν τεχνολογίες που μειώνουν το κόστος παραγωγής, ώστε να επιτρέψουν την ευρεία διάδοση των TENGs στην αγορά των έξυπνων φορετών συστημάτων [15].

5: Εφαρμογές των τριβοηλεκτρικών νανογεννητριών με βάση τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα

Οι τριβοηλεκτρικές νανογεννήτριες (TENGs) με βάση τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα έχουν καταστεί ένας σημαντικός παράγοντας στις φορετές τεχνολογίες, καθώς συνδυάζουν ευελιξία, ανθεκτικότητα και πολυλειτουργικότητα. Οι TENGs έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικές στην αξιοποίηση της μηχανικής ενέργειας και την ενσωμάτωση σε καθημερινά αντικείμενα, όπως ρούχα και αξεσουάρ. Το πεδίο των εφαρμογών τους κυμαίνεται από την αυτοτροφοδότηση μικρών συσκευών έως την παρακολούθηση φυσιολογικών δεδομένων και την ενσωμάτωση με έξυπνα περιβάλλοντα και τεχνολογίες IoT [6], [9].

5.1 Τριβοηλεκτρικές Νανογεννήτριες για Συγκομιδή Μηχανικής Ενέργειας

Οι TENGs που ενσωματώνονται σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν ενέργεια από τις μηχανικές κινήσεις του σώματος, όπως το περπάτημα ή το τρέξιμο, και να την μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η λειτουργία είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε φορετές συσκευές που απαιτούν αυτονομία και φορητότητα. Έξυπνα ρούχα με ενσωματωμένες TENGs μπορούν να προσφέρουν συνεχή τροφοδότηση σε μικρές συσκευές, όπως έξυπνα ρολόγια, αισθητήρες υγείας και άλλα προϊόντα χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας [7], [13].

Επιπλέον, οι TENGs μπορούν να συνδυαστούν με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες ή πυκνωτές, προκειμένου να διασφαλίζεται η συνεχής τροφοδότηση των συσκευών ακόμα και σε περιόδους αδράνειας. Τέτοιες συσκευές βρίσκουν εφαρμογή σε αθλητικά ρούχα, στρατιωτικό εξοπλισμό και ρούχα εργασίας, όπου η μηχανική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί για την τροφοδότηση αισθητήρων και άλλων συσκευών [10], [12].

5.2 Αυτοτροφοδοτούμενα Αισθητήρια Συστήματα

Οι TENGs έχουν βρει ευρεία εφαρμογή και στον τομέα των αυτοτροφοδοτούμενων αισθητήρων. Τα έξυπνα υφάσματα που ενσωματώνουν TENGs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση φυσιολογικών παραμέτρων του σώματος, όπως η καρδιακή συχνότητα, η θερμοκρασία, και οι κινήσεις των αρθρώσεων. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να συλλεχθούν και να μεταδοθούν σε συστήματα IoT για ανάλυση σε πραγματικό χρόνο [10], [14].

Αυτοτροφοδοτούμενα ρούχα που χρησιμοποιούν TENGs μπορούν να επιτρέψουν την παρακολούθηση της φυσιολογικής κατάστασης του χρήστη χωρίς την ανάγκη για εξωτερική τροφοδότηση ή επαναφόρτιση συσκευών. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές όπως η παρακολούθηση ασθενών ή η ανάλυση των κινήσεων αθλητών, προσφέροντας συνεχή παρακολούθηση με ακρίβεια και αξιοπιστία [15], [16].

5.3 Εφαρμογές στις Τεχνολογίες IoT και Έξυπνα Περιβάλλοντα

Η ενσωμάτωση των TENGs σε συστήματα IoT και έξυπνα περιβάλλοντα έχει ανοίξει νέες προοπτικές για την αυτοτροφοδοτούμενη παρακολούθηση και διαχείριση ενέργειας. Τα έξυπνα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα μπορούν να συλλέγουν μηχανική ενέργεια από τις κινήσεις των χρηστών και να τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία αισθητήρων και συστημάτων IoT.

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

Παράλληλα, οι TENGs βρίσκουν εφαρμογές σε βιομηχανικά περιβάλλοντα και έξυπνα κτίρια, όπου οι έξυπνοι αισθητήρες μπορούν να παρακολουθούν την κίνηση και άλλες παραμέτρους για την καλύτερη διαχείριση της ενέργειας και των πόρων [7], [13]. Τα έξυπνα ρούχα μπορούν να συλλέγουν δεδομένα και να αλληλεπιδρούν με τα έξυπνα συστήματα, επιτρέποντας την καλύτερη προσαρμογή του περιβάλλοντος στις ανάγκες των χρηστών [6], [12].

5.4 Προκλήσεις και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Παρά την πρόοδο στις εφαρμογές των TENGs, υπάρχουν ακόμα προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η αποδοτικότητα των υλικών, η εμπορική παραγωγή και η βελτίωση της ανθεκτικότητας παραμένουν ζητήματα που απαιτούν περαιτέρω έρευνα. Ειδικά στην περίπτωση των έξυπνων φορετών συστημάτων, οι ερευνητές εργάζονται για να αναπτύξουν πιο βιώσιμα υλικά που να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της καθημερινής χρήσης και να αντέχουν στη φθορά [6].

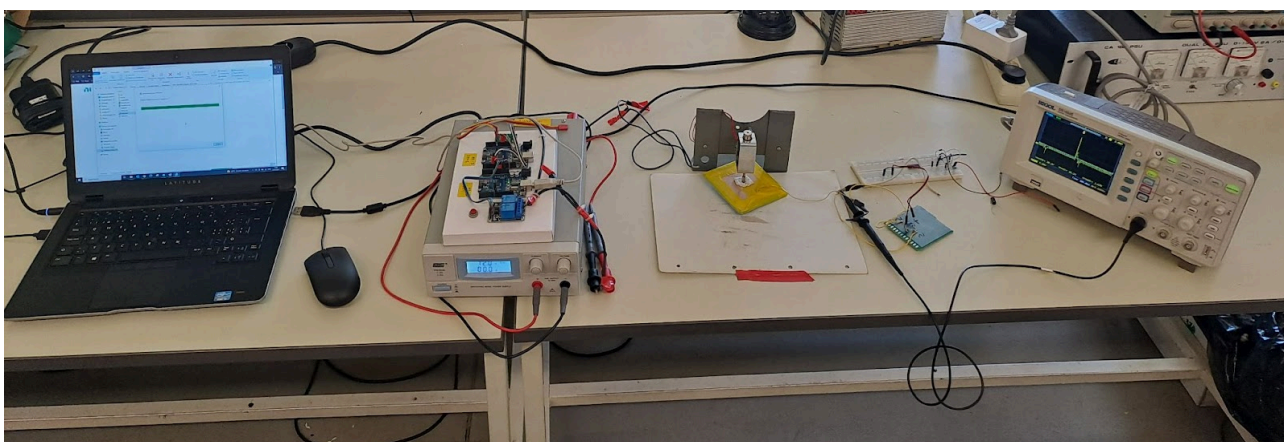
Οι μελλοντικές κατευθύνσεις της έρευνας επικεντρώνονται στην ενσωμάτωση των TENGs σε ευρύτερο φάσμα εφαρμογών, όπως η υγειονομική περίθαλψη, η αθλητική τεχνολογία και η βιομηχανία. Η περαιτέρω βελτίωση της τεχνολογίας θα επιτρέψει τη μαζική παραγωγή αυτών των συστημάτων με χαμηλότερο κόστος, διευρύνοντας την εμπορική τους χρήση [7], [15].

6: Η Πειραματική διάταξη

Για τους σκοπούς της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε μία πειραματική διάταξη μέσω της οποίας, με αυτοματοποιημένο τρόπο θα μπορέσουμε να αναλύσουμε την συμπεριφορά των υλικών μας με διαφορετικές παραμέτρους και φορτία.

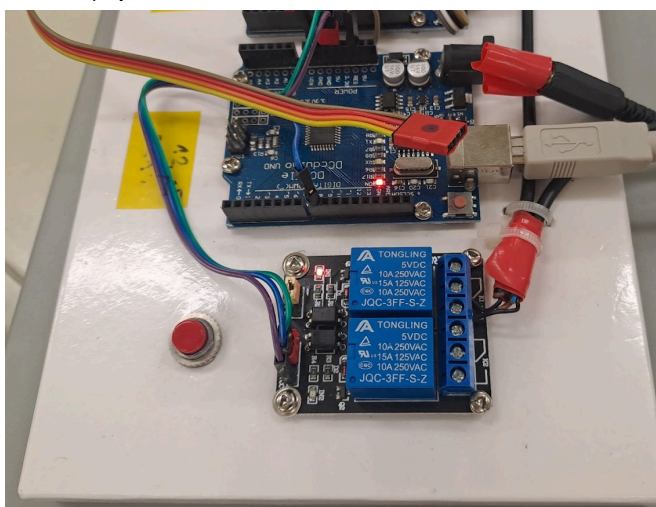
Τα κύρια μέρη της πειραματικής μας διάταξης είναι τα εξής:

- Ένα ηλεκτρομαγνητικό έμβολο της εταιρείας Mecalectro
- Έναν μικροελεγκτή Arduino Uno
- Μία πλακέτα ελέγχου φορτίου με την χρήση ρελέ
- Το τροφοδοτικό PS3030 της εταιρείας OJE μεταβλητής τάσης και 0-30V και 0-30A
- Τον Παλμογράφο DS1052E της RIGOL
- Έναν Ηλεκτρονικό Υπολογιστή με εγκατεστημένα το ARDUINO IDE και το λογισμικό της RIGOL για τον έλεγχο του παλμογράφου
- Τα ηλεκτρόδια της τριβογεννήτριας με διαφορετικά υλικά και τις λοιπές ανορθωτικές διατάξεις και πυκνωτές φόρτισης.



Εικόνα 6.1: Η πειραματική μας διάταξη

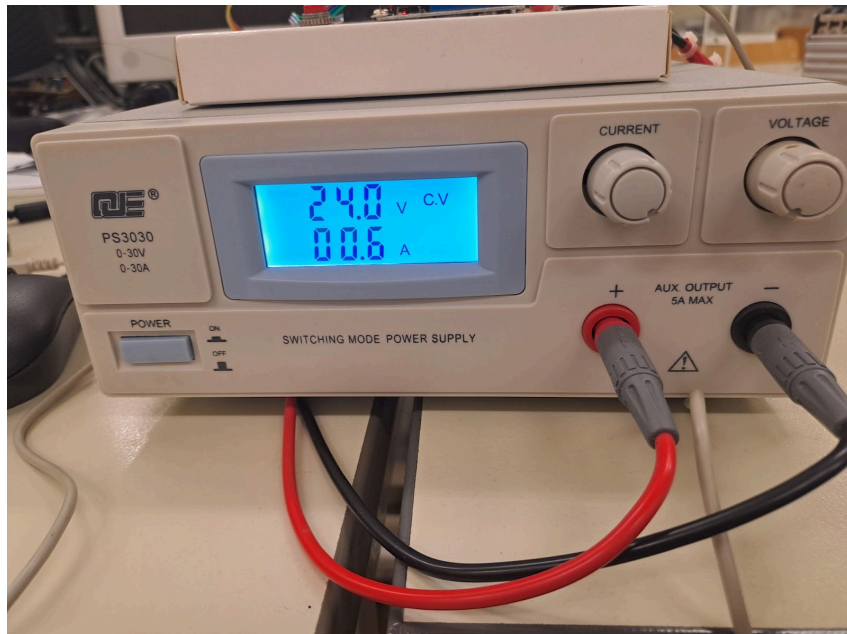
Το Arduino μέσω κώδικα ελέγχει το ρελέ το οποίο με την σειρά του ελέγχει το έμβολο. Μέσω του κώδικα του Arduino μπορούμε να ελέγξουμε την συχνότητα με την οποία θα χτυπάει το έμβολο και των αριθμό των συγκρούσεων.



Εικόνα 6.2: Ο μικροελεγκτής Arduino UNO και το ρελέ το οποίο ελέγχει

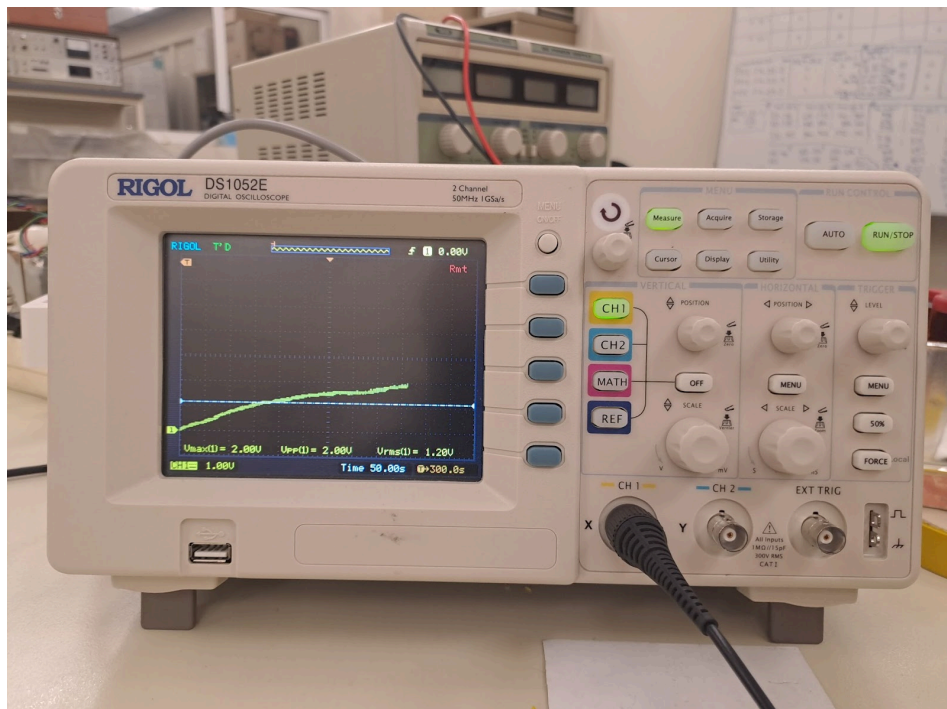
Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

Το τροφοδοτικό τροφοδοτεί το έμβολο μέσω του ρελέ το οποίο τροφοδοτικό μας δίνει την δυνατότητα να ελέγξουμε την τάση τροφοδοσίας του εμβόλου συνεπώς και την δύναμη με την οποία χτυπάει.



Εικόνα 6.3: Το τροφοδοτικό μεταβλητής τάσης εξόδου

Στο έμβολο συνδέεται το κινούμενο ηλεκτρόδιο και από κάτω του τοποθετείται το σταθερό ηλεκτρόδιο. Η δομή των ηλεκτροδίων θα αναλυθεί παρακάτω. Με τον παλμογράφο παίρνουμε μετρήσεις είτε σε ανοιχτό κύκλωμα, δειγματοληπώντας την τάση στα άκρα των ηλεκτροδίων, είτε στα ακρά της ανορθωτικής μας διάταξης με ή χωρίς φορτίο.



Εικόνα 6.4: Ο παλμογράφος κατά την μέτρηση φόρτισης ενός πυκνωτή

6.1 Προκλήσεις στην Συλλογή Μετρήσεων από Τριβοηλεκτρικές Γεννήτριες.

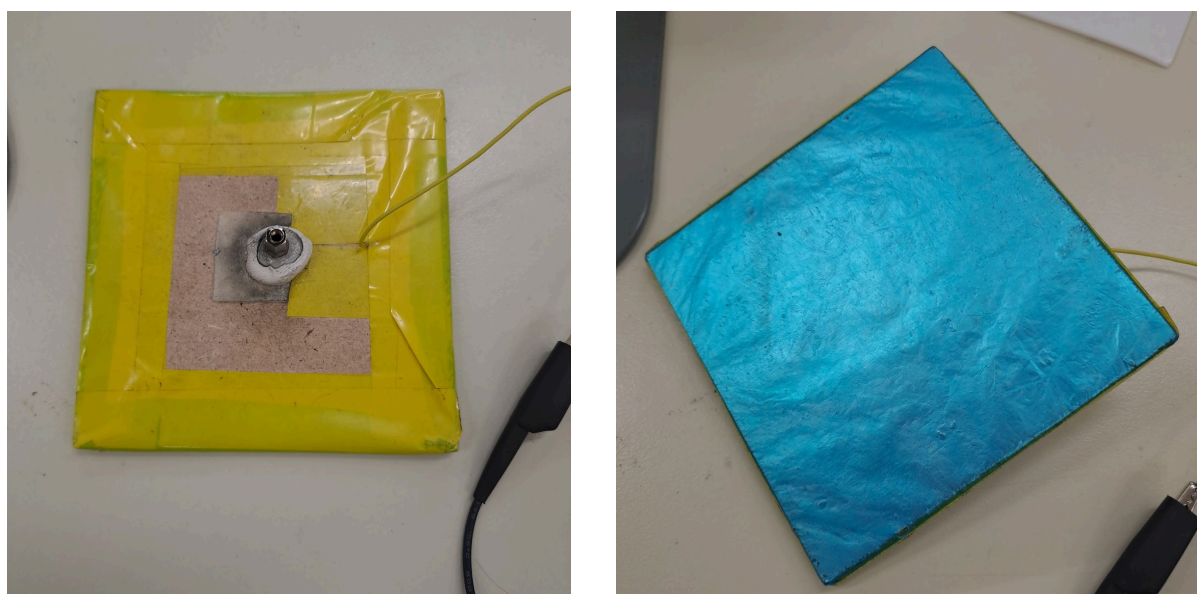
Οι τριβοηλεκτρικές γεννήτριες γενικά, αποτελούν συσκευές οι οποίες χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή ισχύ παραγωγής, της τάξης των μA με mA όπως προαναφέραμε. Για να μετρήσουμε με σχετική αξιοπιστία τα φαινόμενα αυτά θα πρέπει να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εσωτερική αντίσταση στα όργανα μέτρησης μας, προκειμένου να επηρεάσουν τις μετρήσεις μας όσο λιγότερο γίνεται. Στην περίπτωση μας το probe του παλμογράφου έχει τις ενδείξεις X1 και X10. Η δυνατότητα αυτή του probe μας επιτρέπει να αλλάξουμε την χαρακτηριστική του αντίσταση. Αυτό συνήθως προσφέρεται για την δυνατότητα μέτρησης μεγαλύτερων τάσεων χωρίς τον κίνδυνο βλάβης του παλμογράφου. Στην περίπτωση μας όμως μας εξυπηρετεί προκειμένου να πετύχουμε μεγαλύτερη χαρακτηριστική αντίσταση για πιο αξιόπιστη μέτρηση των τριβοηλεκτρικών φαινομένων. Στην περίπτωση μας η ρύθμιση X1 δίνει $1\text{M}\Omega$ εσωτερική αντίσταση ενώ η ρύθμιση X10 μας δίνει $10\text{M}\Omega$ εσωτερική αντίσταση. Για το πείραμα μας λοιπόν θα μείνουμε στην ρύθμιση X10.

6.2 Τα Ηλεκτρόδια και τα Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν

Όπως αναφέραμε, η διάταξη μας αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, το κινητό και το σταθερό. Το κινητό ηλεκτρόδιο σε όλα μας τα πειράματα από εδώ και μπρος αποτελείται από τα εξής:

- Μία ξύλινη βάση $9.5 \times 9.5 \text{ cm}$.
- Ένα FR4 board επίσης διάστασης $9.5 \times 9.5 \text{ cm}$.

Πάνω στην ξύλινη βάση έχει κολληθεί η μη αγωγίμη πλευρά του FR4 board. Πάνω στο FR4 board έχει κολληθεί ένα καλώδιο, ως σημείο σύνδεσης για τις διατάξεις μας. Πάνω στο FR4 board έχει εφαρμοστεί ένα κομμάτι φιλμ πολυαιθυλενίου η οποία έχει τεντωθεί και κολληθεί με ταινία πίσω στην ξύλινη βάση. Η συνολική κατασκευή πιάνεται στην συνέχεια πάνω στο έμβολο με προσωρινό τρόπο από την μεριά της ξύλινης βάσης. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε και τοποθετήθηκε στο κινητό ηλεκτρόδιο ήταν το *φιλμ από Πολυαιθυλένιο*



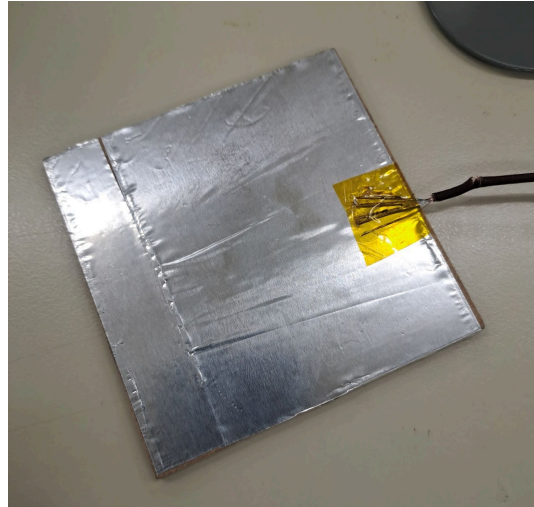
Εικόνα 6.5: Το κινητό ηλεκτρόδιο

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

Για το σταθερό ηλεκτροδίο της συσκευής χρησιμοποιήθηκε:

- Ταινία αλουμινίου για το αγώγιμο μέρος του ηλεκτροδίου κολλημένο σε ξύλινη βάση 9.5x9.5 cm.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και τοποθετήθηκαν στο σταθερό ηλεκτρόδιο ήταν *Τεφλον πάχους 1mm*, *πλεκτό δοκίμιο από βαμβάκι*, *πλεκτό δοκίμιο από μαλλί*, και *ύφασμα με επίστρωση τεφλόν για τον μονωτή*



Εικόνα 6.6 Η ταινία αλουμινίου κολλημένη σε ξύλινη επιφάνεια.

Κατα προφανή τρόπο πάνω στην αγώγιμη πλευρά της ταινίας αλουμινίου ακουμπά το υπό δοκιμή ύφασμα. Το ηλεκτρόδιο αυτό τοποθετείται στην συσκευή μας με την αγώγιμη πλευρά προς τα πάνω άρα κατά την λειτουργία θα έρχονται σε επαφή τα δύο ηλεκτρόδια, το φιλμ Πολυαιθυλενίου με το υπό δοκιμή υλικό.

6.3 Λειτουργία της Συσκευής και Μετρήσεις

Όπως είπαμε και νωρίτερα, στην ουσία η συσκευή φέρνει τα δύο ηλεκτρόδια μας σε επαφή και στην συνέχεια τα απομακρύνει, σύμφωνα με την συχνότητα και των αριθμό επαναλήψεων που θέτουμε εμείς.



Εικόνα 6.7 Αρχή λειτουργίας της συσκευής: Ξύλινη επιφάνεια, FR4 Board, PE, υπό δοκιμή υλικό, ταινία αλουμινίου, Ξύλινη επιφάνεια.

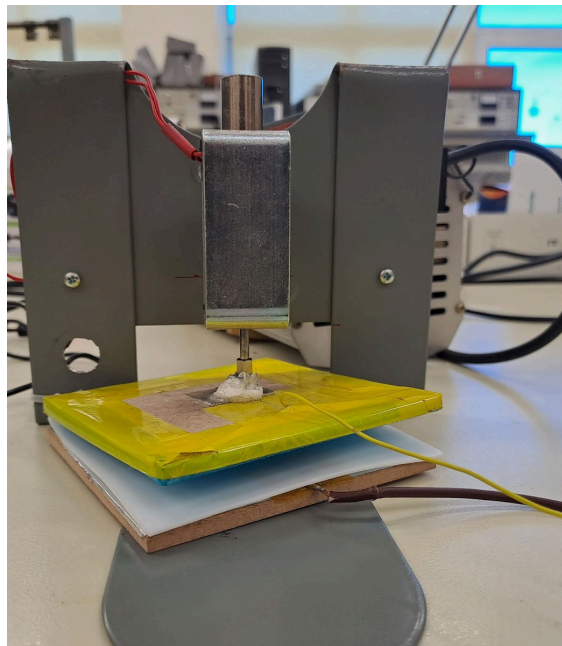
6.3.1: Μετρήσεις σε ανοιχτό κύκλωμα

Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε τα ευρήματά μας σε σχέση με το προς εξέταση υλικό. Οι πρώτες μετρήσεις θα μας βοηθήσουν να ορίσουμε τις βασικές παραμέτρους του πειράματος αυτές δηλαδή της συχνότητας και της τάσης λειτουργίας του εμβόλου, με την βοήθεια ενός υλικού το οποίο βρέθηκε να έχει ισχυρές τριβοηλεκτρικές ιδιότητες. Βάσει των παραμέτρων αυτών θα συνεχίσουμε τα πειράματά μας και με τα υπόλοιπα υλικά προκειμένου να περιορίσουμε τον αριθμό πειραμάτων.

6.3.1.1: Proof of concept δοκιμές με λευκό Τεφλόν πάχους 1mm ως προς εξέταση υλικό

Ένα υλικό το οποίο βρέθηκε να έχει ιδιαίτερες τριβοηλεκτρικές ιδιότητες είναι το Τεφλόν. Το υλικό αυτό χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να ορίσουμε τις παραμέτρους του πειράματος. Με την διάταξη αυτή, λάβαμε πολύ έντονα φαινόμενα με αποτέλεσμα υψηλές τάσεις στο ανοιχτό κύκλωμα.

Παρακάτω θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας, σε διάφορες τάσεις λειτουργίας και συχνότητες στο έμβολο μας, σε ανοιχτό κύκλωμα για τον συνδυασμό υλικών που προαναφέραμε.



Εικόνα 6.8: Η διάταξη μας κατά την δοκιμή με Τεφλόν

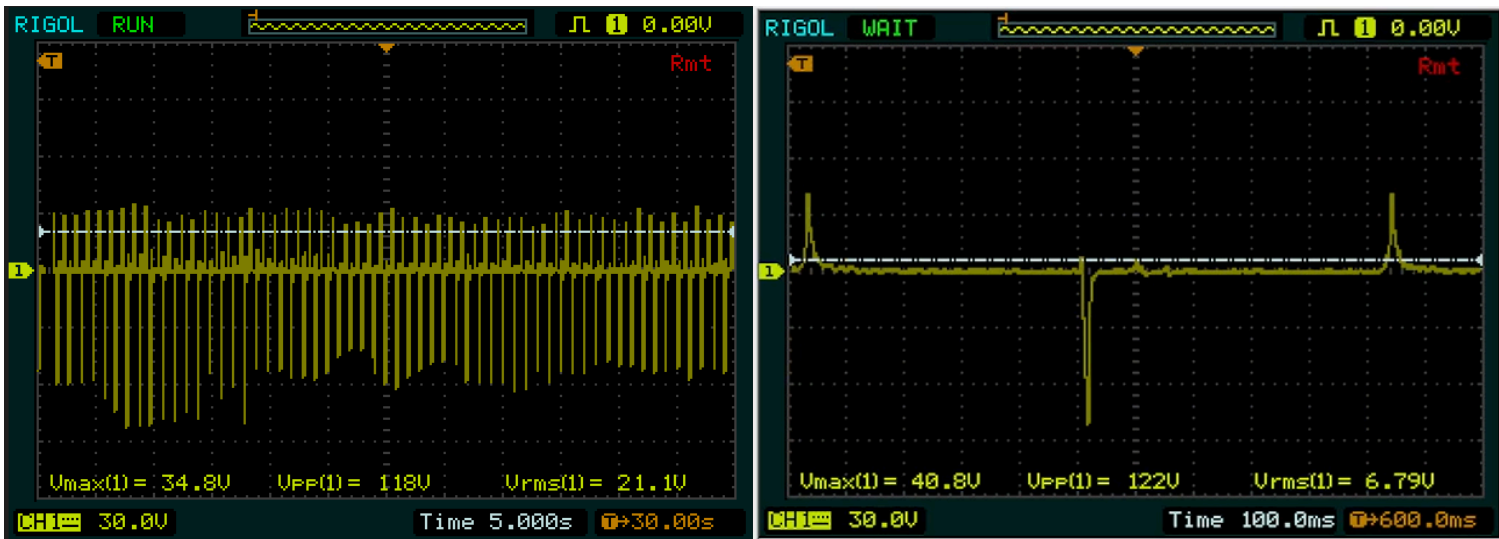
Η δύναμη που εφαρμόζει το έμβολο αναλογα με την τάση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Τάση λειτουργίας εμβόλου (V)	Δύναμη (gf)
12	90
24	250
30	370

Πίνακας 6.1: Τάσεις λειτουργίας και δύναμη του εμβόλου

12VDC 1Hz

Όπως φαίνεται παρακάτω στην πάροδο ενός λεπτού στο 1 Hz (60 χτυπήματα) πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

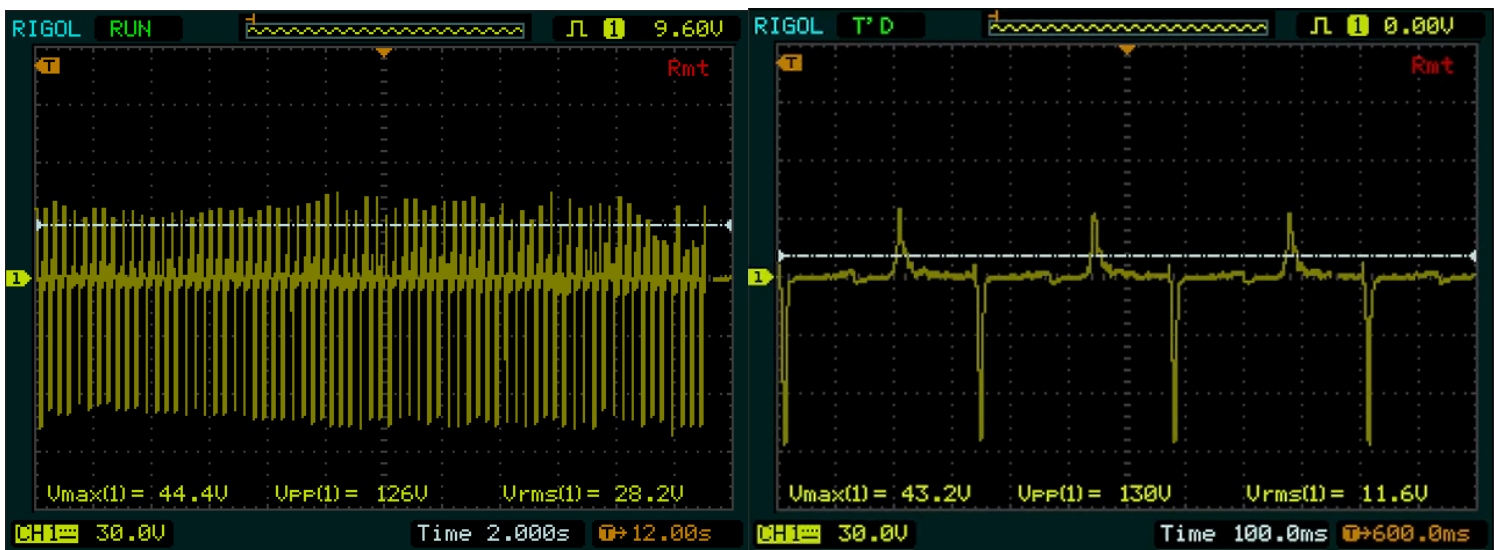


Εικόνα 6.9: Αριστερά: 12VDC 1HZ στην πάροδο ενός λεπτού. Δεξιά: Λεπτομερής απεικόνιση ενός τυπικού παλμου σε διάστημα 1.2 second.

Η τάση εξόδου, αν και όχι σταθερή είναι σίγουρα αρκετά υψηλή προκειμένου να γίνει αξιοποιήσιμη μέσω μιας ανορθωτικής διάταξης και ενός πυκνωτή. Αλλά θα μελετήσουμε περαιτέρω.

12VDC 3Hz

Η συχνότητα των 3Hz επιλέχθηκε καθότι προσεγγίζει τον ρυθμό με τον οποίο χτυπάνε τα πόδια ενός ανθρώπου όταν τρέχει. Όπως φαίνεται παρακάτω με έναν υψηλότερο ρυθμό όπως αυτός, μπορεί να επιτευχθεί σταθερά πιο υψηλή τάση και σίγουρα πιο αξιοποιήσιμη.

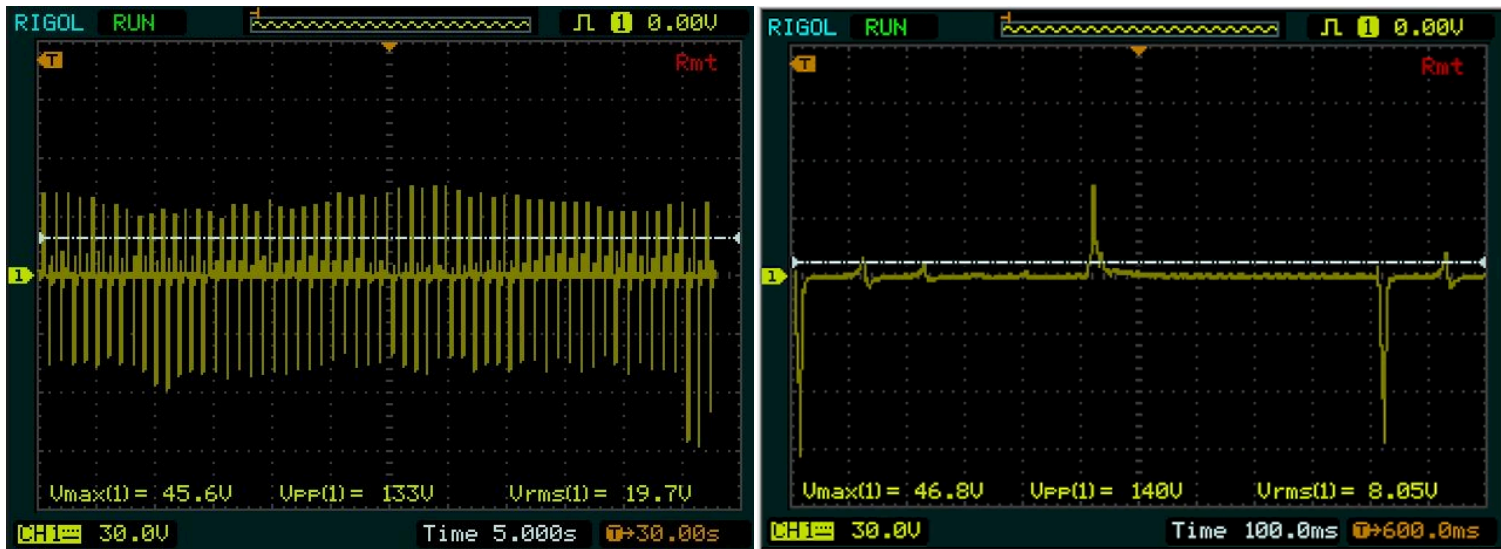


Εικόνα 6.10: Αριστερά: 12VDC 3HZ στην πάροδο 24 sec. Δεξιά: Λεπτομερής απεικόνιση τριών τυπικών παλμών σε διάστημα 1.2 second.

Ας δοκιμάσουμε τώρα τις δύο αυτές συχνότητες με τάση λειτουργίας στα 24VDC προκειμένου να ασκήσουμε μεγαλύτερη δύναμη με το έμβολο.

24VDC 1Hz

Παρακάτω βλέπουμε το αποτέλεσμα της αύξησης της τάσης. Όπως φαίνεται η αύξηση της τάσης δημιουργεί πιο έντονα φαινόμενα και συνεπώς σταθερά πιο υψηλές τάσεις.

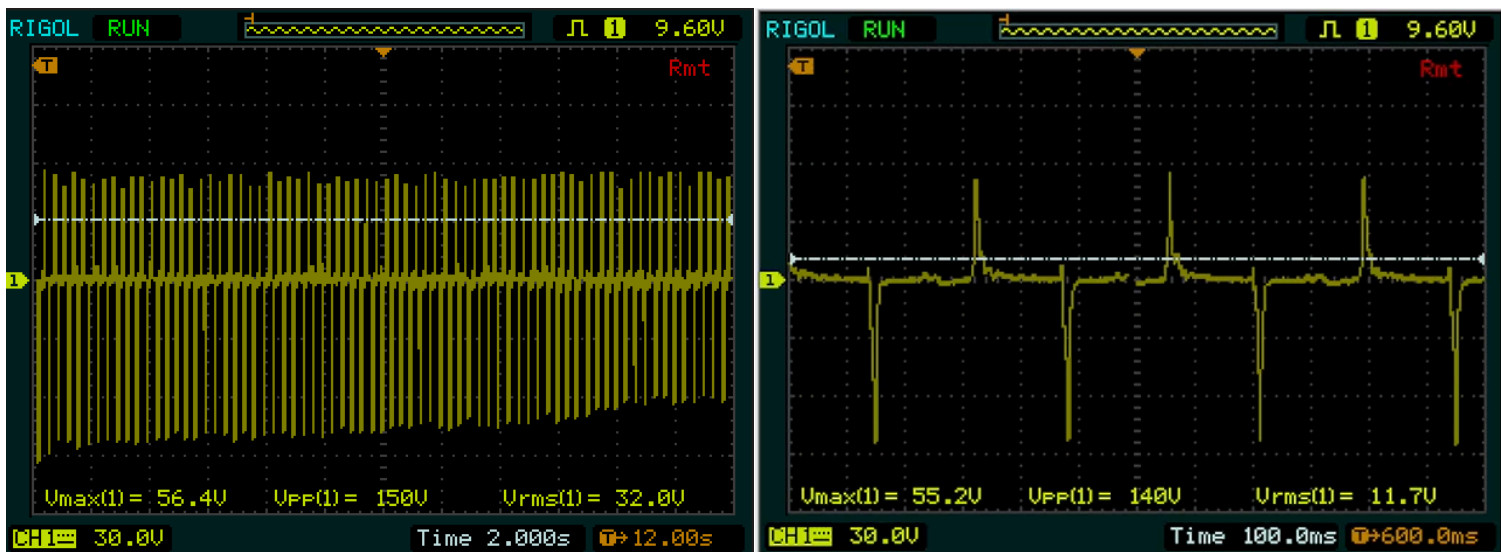


Εικόνα 6.11: Αριστερά: 24VDC 1HZ στην πάροδο ενός λεπτού. Δεξιά: Ένας τυπικός παλμός σε διάστημα 1.2 second.

Ας δοκιμάσουμε λοιπόν και την συχνότητα των 3Hz με αυξημένη τάση.

24VDC 3Hz

Όπως βλέπουμε λοιπόν σε αυτή την συχνότητα και τάση λειτουργίας τα peaks τείνουν να είναι υψηλότερα. Η δύναμη και η συχνότητα με την οποία επαναλαμβάνονται οι χτύποι ακόμα και στο άκουσμα προσεγγίζουν το ανθρώπινο τρέξιμο.



Εικόνα 6.12: Αριστερά: 24VDC 3HZ στην πάροδο 24 sec. Δεξιά: Τρεις τυπικοί παλμοί σε διάστημα 1.2 second.

Τάση λειτουργίας (V)	Συχνότητα λειτουργίας (Hz)	Μέγιστη Τάση Εξόδου Διάταξης (Vpp)
12	1	122
12	3	130
24	1	140
24	3	140

Πίνακας 6.2: Συνάρτηση τάσης και συχνότητας λειτουργίας ως προς την τάση εξόδου της διάταξης μας με Τεφλόν πάχους 1mm και φιλμ PE

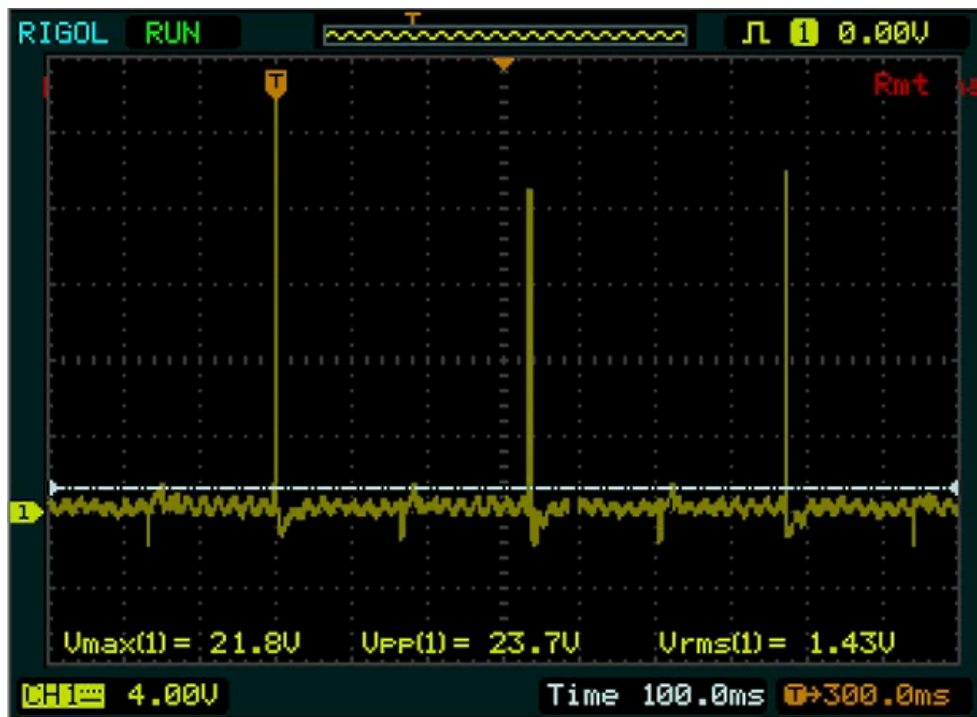
Με γνώμονα τις παραπάνω μετρήσεις θα πάρουμε ως μονιμα βέλτιστες παραμέτρους τα *24VDC τάση λειτουργίας και τα 3 Hz συχνότητα επανάληψης. Αν και μετρήθηκε η δύναμη του εμβόλου στην τάση των 30VDC, είναι εκτός προδιαγραφών και την αποφύγαμε γιατί το έμβολο υπερθερμαίνεται.*

6.3.1.2 Μετρήσεις σε ανοιχτό κύκλωμα με κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα

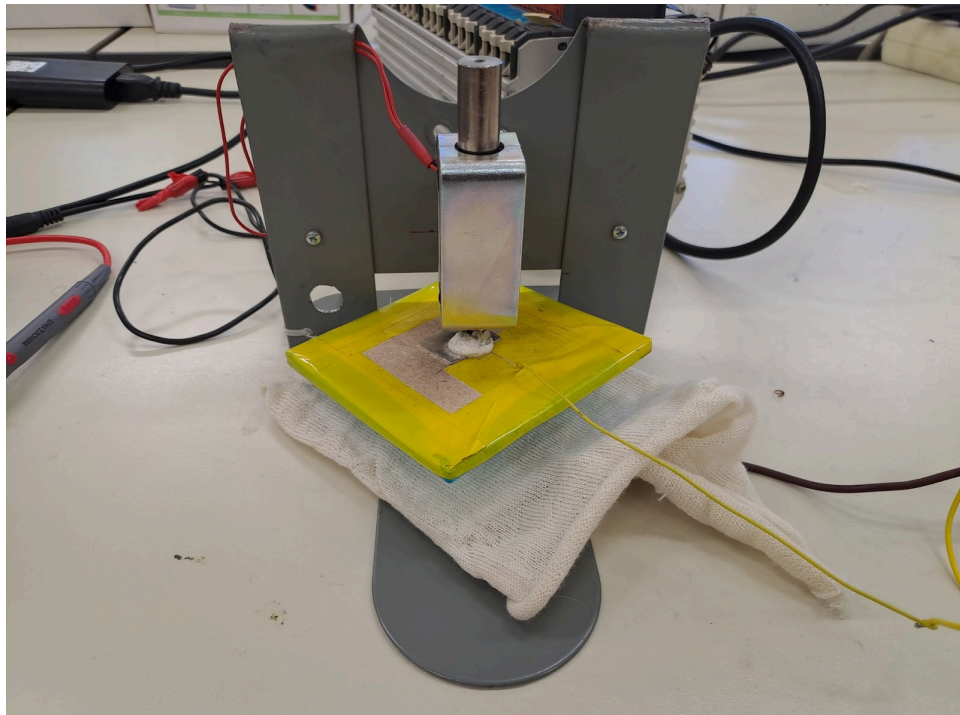
Στο σημείο αυτό θα πάρουμε διάφορες μετρήσεις για την αξιολόγηση των τριβοηλεκτρικών δυνατοτήτων μερικών κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων

Μετρήσεις με πλεκτό δοκίμιο από βαμβάκι ως προς εξέταση υλικό

Το πείραμα έγινε και για το πλεκτό βαμβάκι. Οι τάσεις που παράγει φαίνεται να ποικίλουν με το μεγαλύτερο peak που πιάσαμε σε δείγμα 72 χτύπων να είναι αυτό.



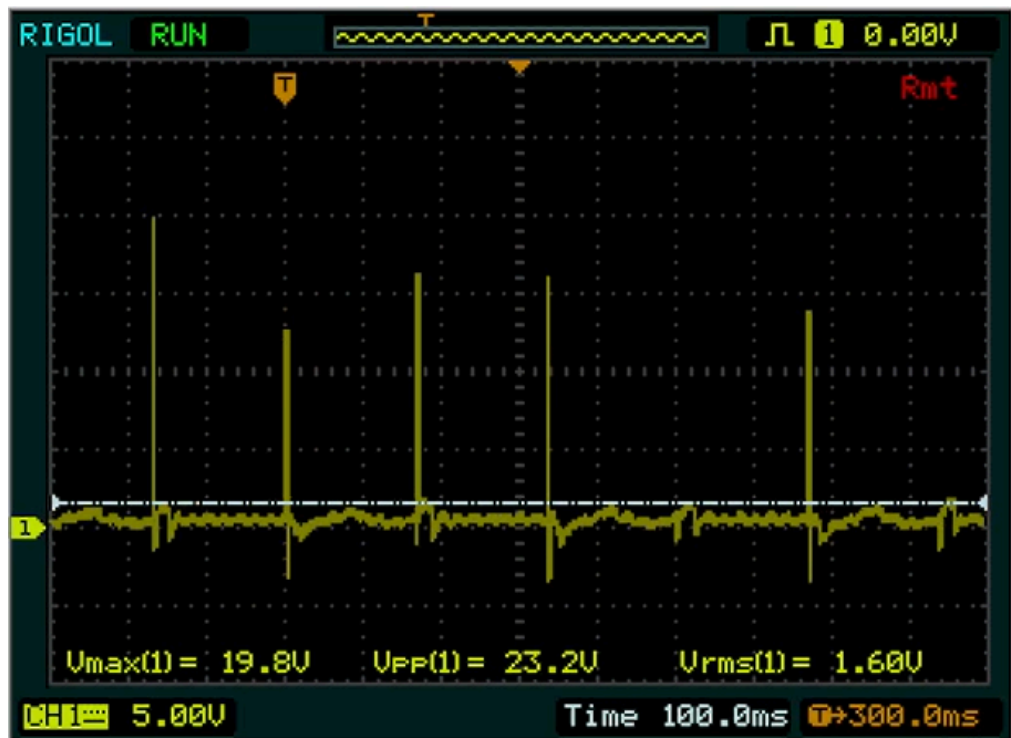
Εικόνα 6.13: Λεπτομερης απεικονιση 24VDC 3HZ το μεγαλύτερο peak σε δείγμα 72 χτύπων για το πλεκτό βαμβάκι.



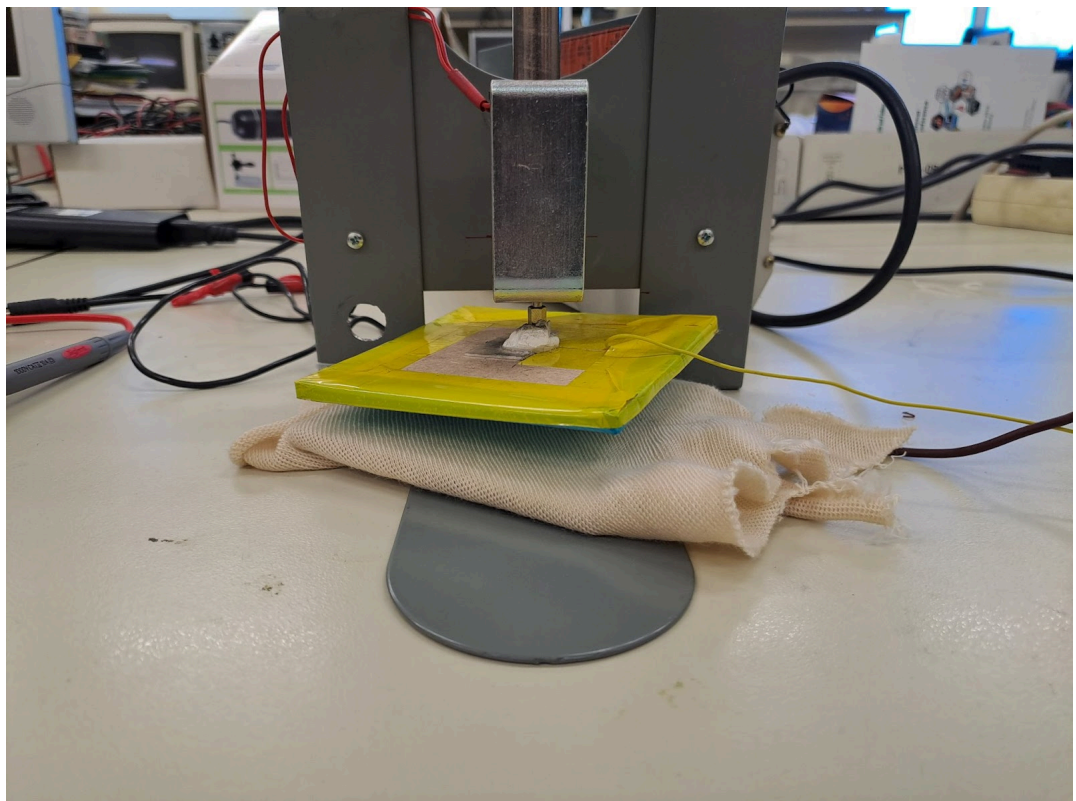
Εικόνα 6.14: Το δείγμα πλεκτού βαμβακιού

**Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων
Μετρήσεις με πλεκτό δοκίμιο από μαλλί ως προς εξέταση υλικό**

Το πείραμα έγινε και για το πλεκτό μαλλί με ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά με το προηγούμενο δείγμα. Οι τάσεις που παράγει φαίνεται να ποικίλουν με το μεγαλύτερο peak που πιάσαμε σε δείγμα 72 χτύπων να είναι αυτό.



Εικόνα 6.15: Λεπτομερής απεικόνιση 24VDC 3HZ το μεγαλύτερο peak σε δείγμα 72 χτύπων για το πλεκτό μαλλί.



Εικόνα 6.16: Το δείγμα πλεκτού μαλλιού

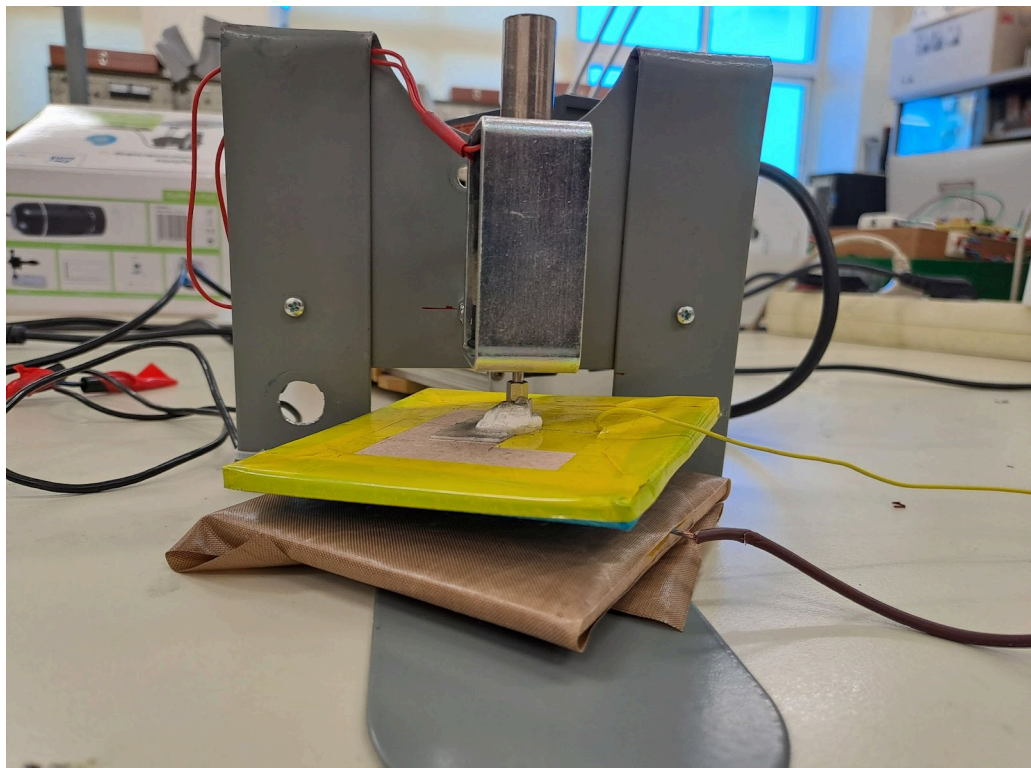
Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

Μετρήσεις με υφαντό από αραμιδικές ίνες με επίστρωση φιλμ τεφλόν

Το πείραμα έγινε και για το υφαντό με επίστρωση φιλμ τεφλόν. Το υλικό αυτό φαίνεται να είναι το πιο αποδοτικό ως προς τα υλικά που εξετάσαμε με χαρακτηριστικά μεγαλύτερες κορυφές σε σχέση με τα άλλα δύο υφάσματα που εξετάσαμε, χάρις στην επίστρωση τεφλόν. Για τον λόγο αυτό θα αποτελέσει και το κύριο δείγμα μας για τις μετρήσεις με φορτία.



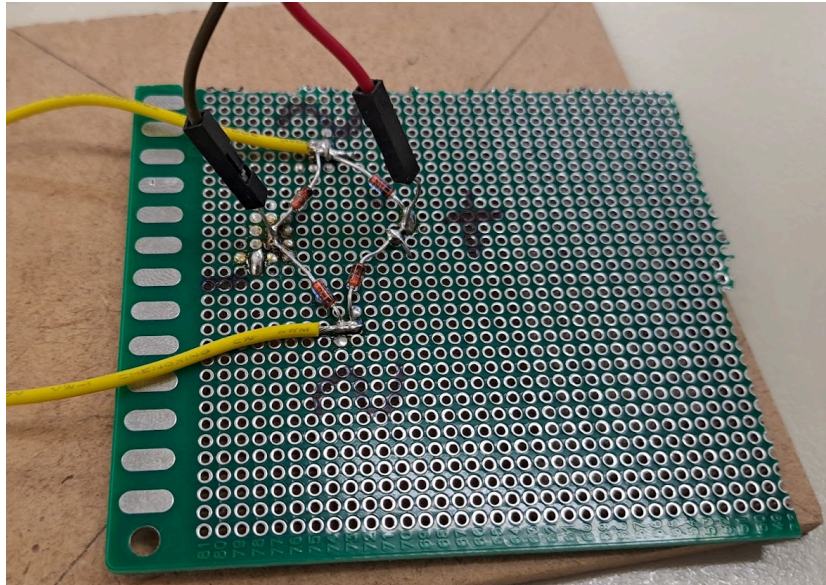
Εικόνα 6.17: Λεπτομερής απεικόνιση 24VDC 3HZ το μεγαλύτερο peak σε δείγμα 72 χτύπων για το υφαντό με επίστρωση Τεφλόν.



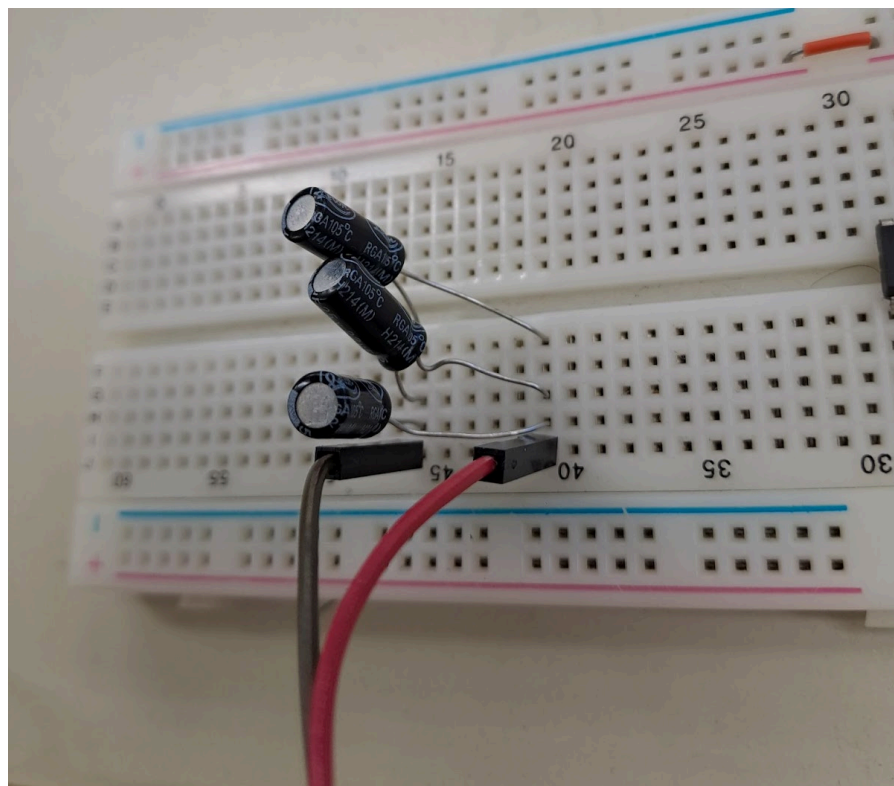
Εικόνα 6.18: Το δείγμα υφάσματος με επίστρωση Τεφλόν

6.3.2. Μετρήσεις σε κλειστό κύκλωμα

Στο σημείο αυτό θα εξετάσουμε την λειτουργία της γεννήτριας με τα υλικά μας σε κλειστό κύκλωμα και με την χρήση ενός πλήρους ανορθωτή με την χρήση διόδων γερμανίου λόγω της χαμηλότερης τάσης πόλωσης τους. Θα επικεντρωθούμε κυρίως στους χρόνους φόρτισης πυκνωτών και μάλιστα κυρίως σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Ας εξετάσουμε όμως πρώτα το Τεφλόν.



Εικόνα 6.19: Η ανορθωτική μας διάταξη. Τα κίτρινα καλώδια συνδέονται στα ηλεκτρόδια της γεννήτριας και το μαύρο και κόκκινο καλώδιο συνδέονται στους πυκνωτές μας με την κατάλληλη πολικότητα.

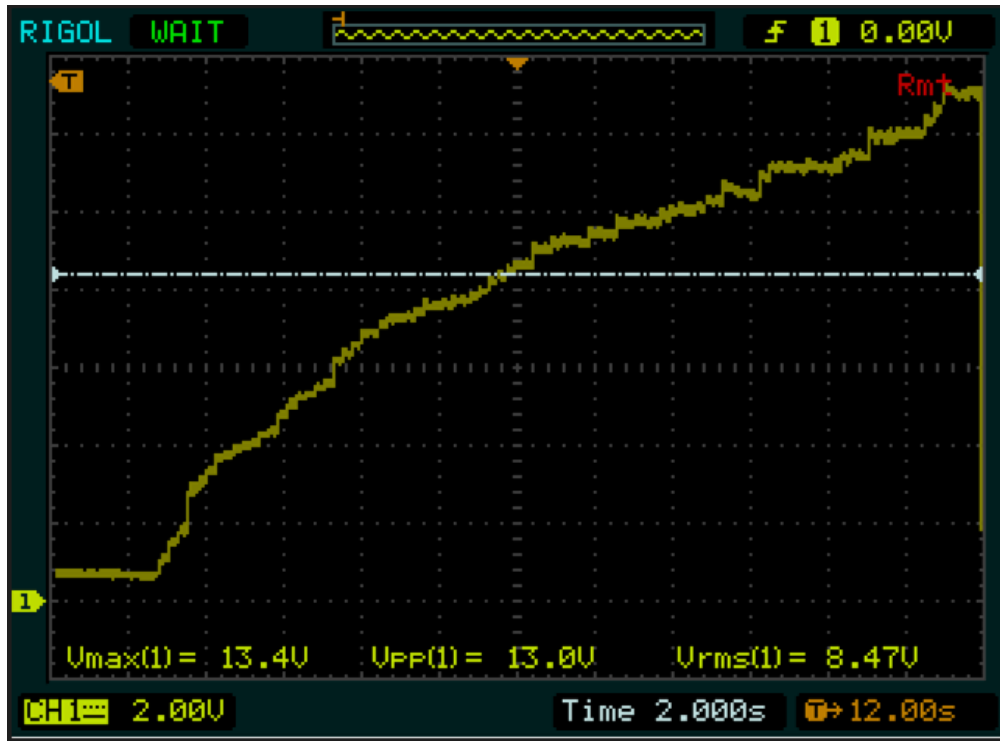


Εικόνα 6.20: Παράδειγμα δικτύωματος πυκνωτών

Μετρήσεις με Τεφλόν πάχους 1mm ως προς εξέταση υλικό

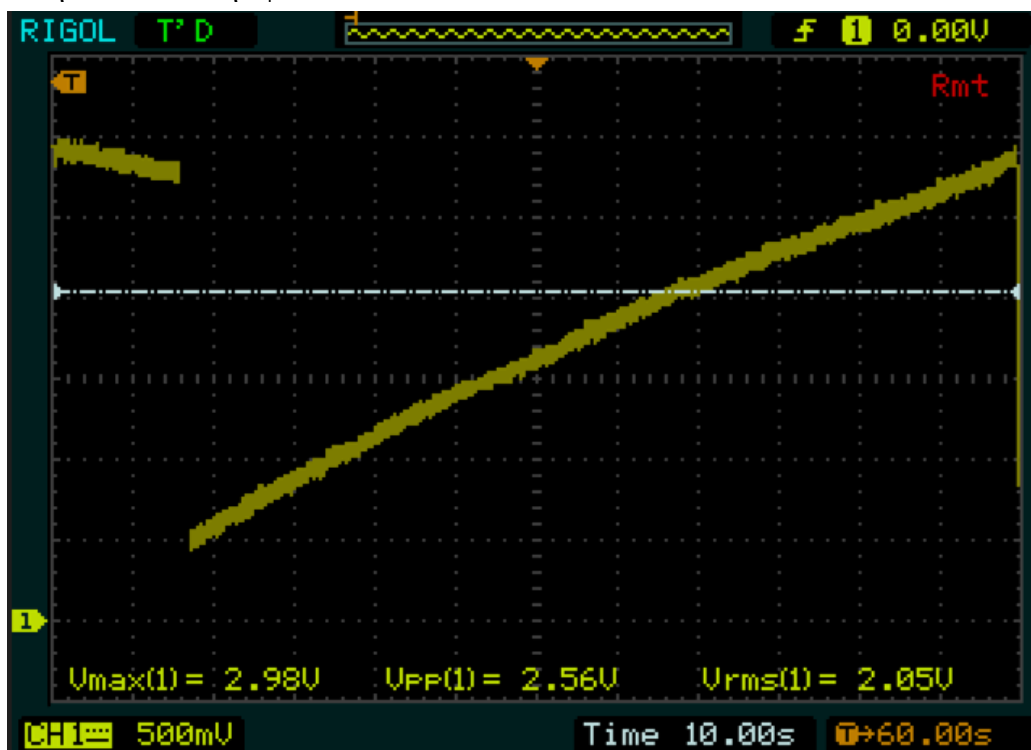
Όπως αναφέραμε και παραπάνω το Τεφλον έχει ιδιαίτερα καλές τριβηλεκτρικές ιδιότητες. Αν και δεν αποτελεί ύφασμα, στα οποία και επικεντρώνεται η διπλωματική μας, έγιναν κάποιες μετρήσεις για λόγους επίδειξης των άψογων ιδιοτήτων του.

Παρακάτω βλέπουμε την καμπύλη φόρτισης ενός δικτυώματος πυκνωτών 116nF. Παρατηρούμε πως μέσα σε 24 δευτερόλεπτα η τάση φόρτισης από περίπου 0 έφτασε τα 13.4V



Εικόνα 6.16: Φόρτιση δικτυώματος πυκνωτών 116nF με Τεφλόν 1mm σε 24 S

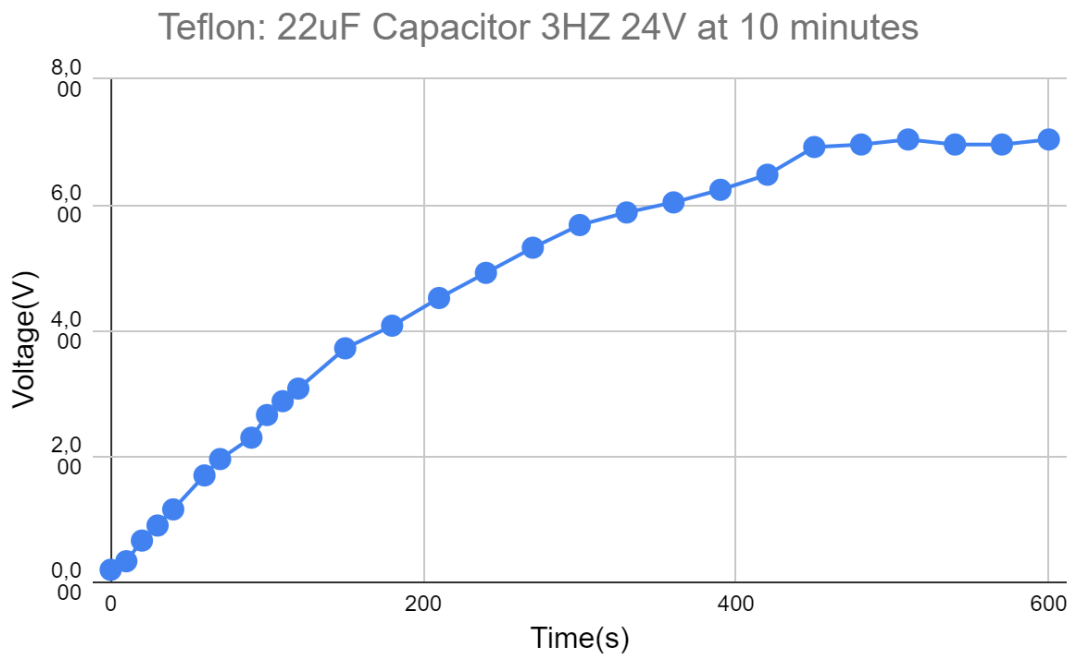
Στην συνέχεια παρατηρήσαμε την φόρτιση ενός πυκνωτή 22μF σε δύο λεπτά. Στο διάστημα αυτό η τάση του πυκνωτή έφτασε τα 2.98V



Εικόνα 6.17: Φόρτιση πυκνωτή 22μF σε δύο λεπτά με Τεφλόν 1mm

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

Έγινε και δεύτερη προσπάθεια στην φόρτιση πυκνωτή 22μF για 10 λεπτά και καταφέραμε φόρτιση στα 7 Volt περίπου.

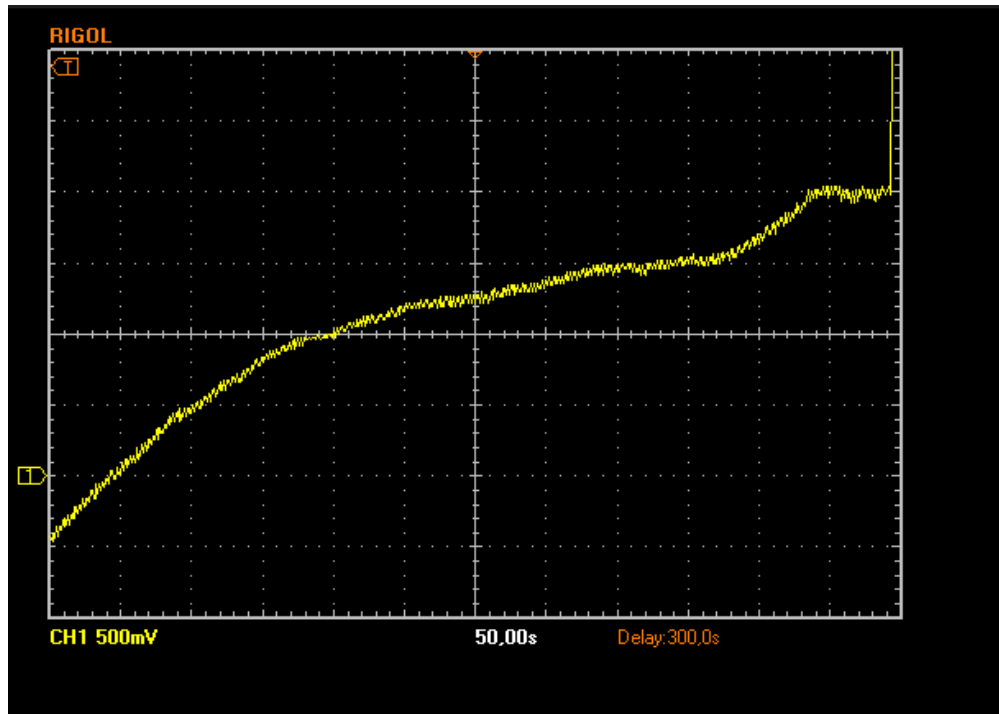


Εικόνα 6.18: Φόρτιση πυκνωτή 22μF σε δέκα λεπτά με Τεφλόν 1mm

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων
Μετρήσεις με πλεκτό δοκίμιο από βαμβάκι ως προς εξέταση υλικό

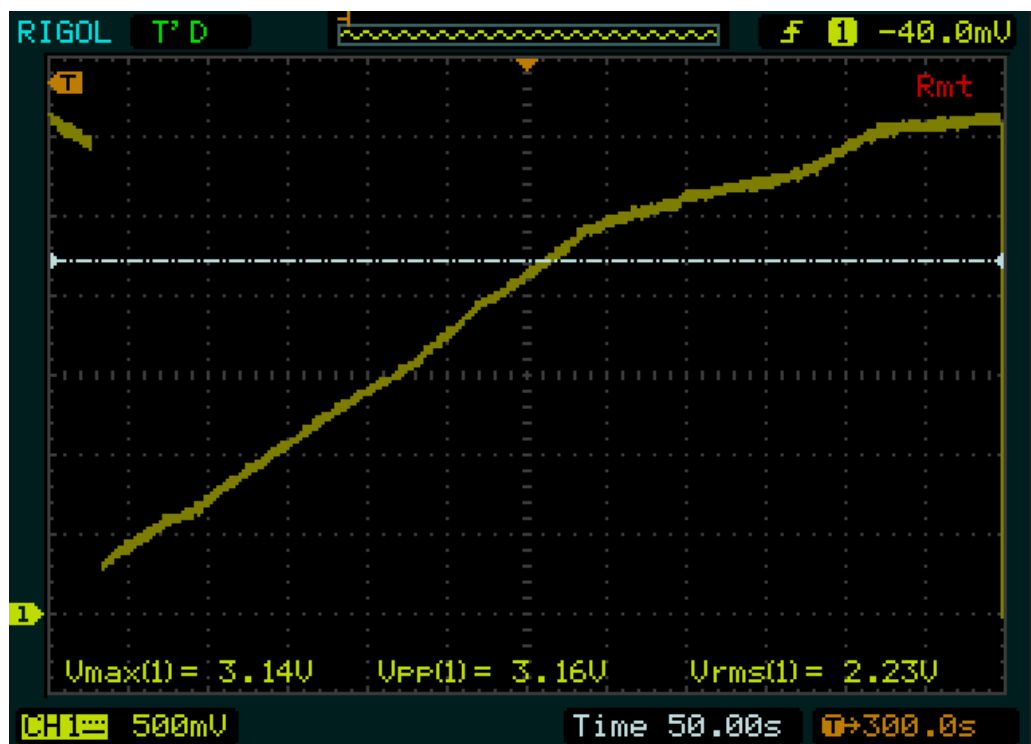
Στην συνέχεια θα δοκιμάσουμε τα υφαντά μας υλικά για την φόρτιση πυκνωτών για 22,44 και 66 μF για 10 λεπτά και θα συγκρίνουμε την ενέργεια φόρτισης από κάθε υλικό.

Όπως φαίνεται παρακάτω ο πυκνωτής των 22 μF φόρτισε στα 2.5 Volt σε διάστημα 10 λεπτών προσφέροντας ενέργεια 68.75 μJ



Εικόνα 6.19: Φόρτιση πυκνωτή 22 μF σε δέκα λεπτά με βαμβάκι

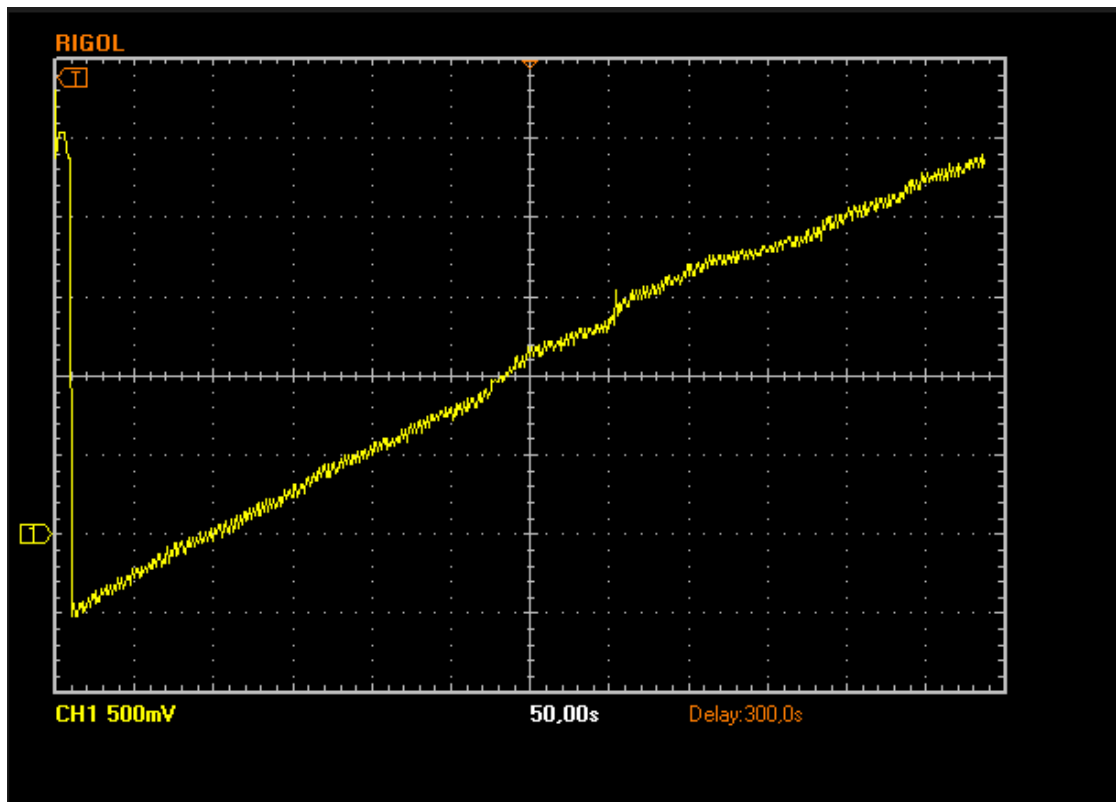
Ο πυκνωτής των 44 μF φόρτισε στα 3.14V σε διάστημα δέκα λεπτών προσφέροντας ενέργεια 216.9 μJ .



Εικόνα 6.20: Φόρτιση πυκνωτή 44 μF σε δέκα λεπτά με βαμβάκι

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

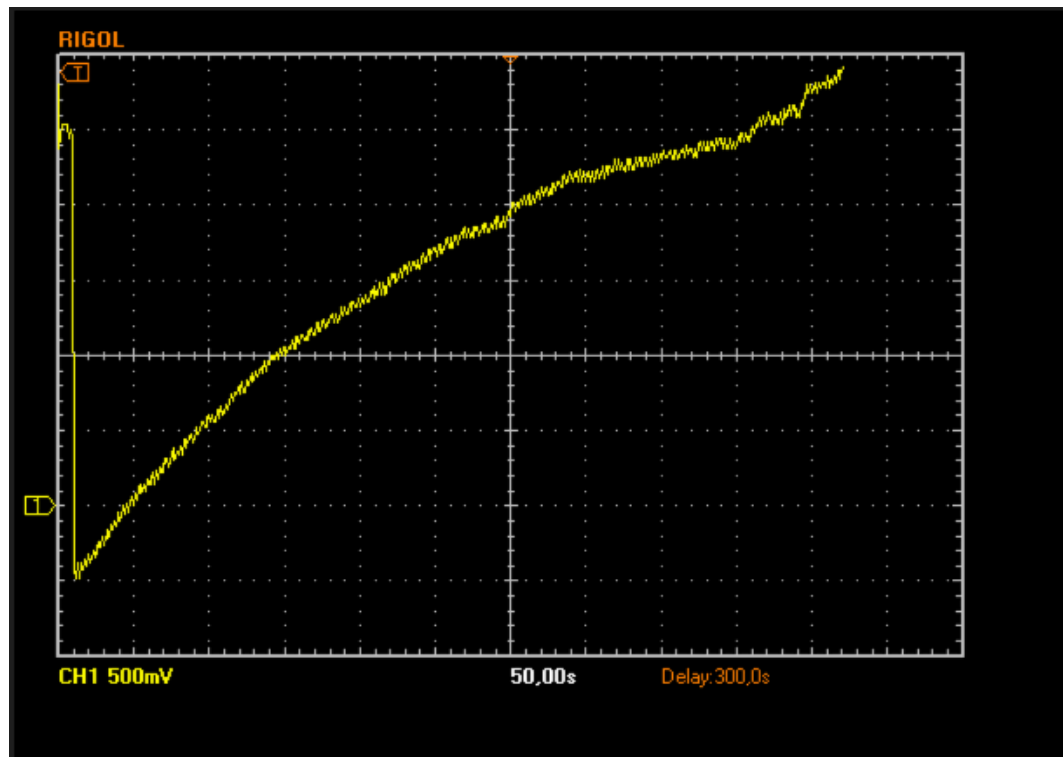
Ο πυκνωτής των 66 μF φόρτισε στα 2.8V σε διάστημα δέκα λεπτών προσφέροντας ενέργεια 258.72 μJ .



Εικόνα 6.21: Φόρτιση πυκνωτή 66 μF σε δέκα λεπτά με βαμβάκι

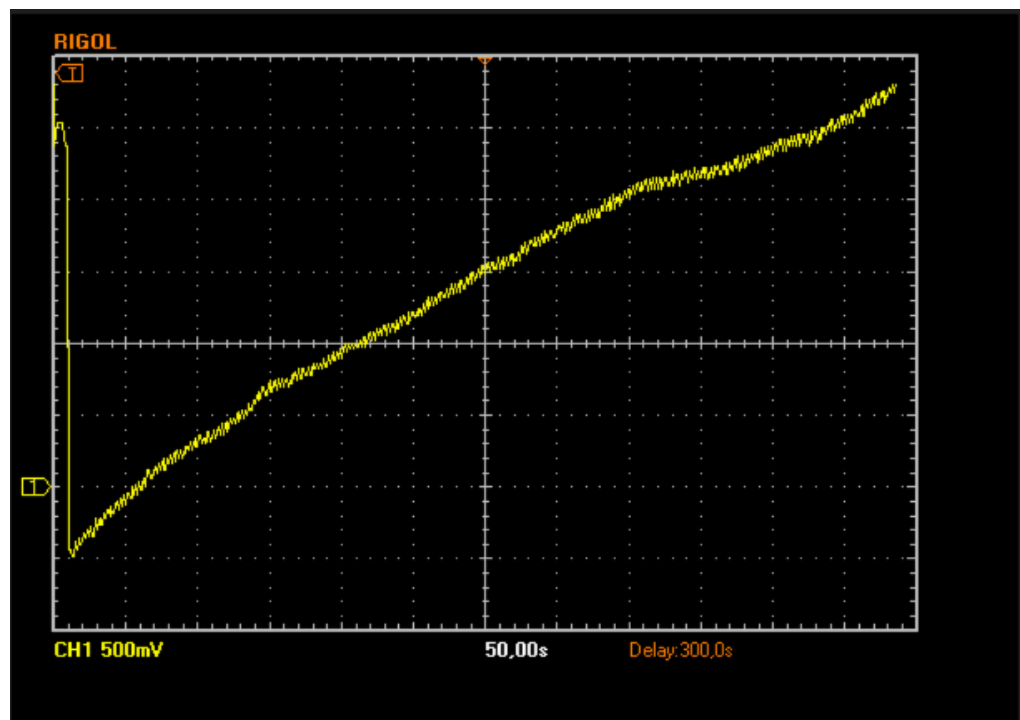
Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων
Μετρήσεις με πλεκτό δοκίμιο από μαλλί ως προς εξέταση υλικό

Ο πυκνωτής των 22 μF φόρτισε στα 3.4V σε διάστημα δέκα λεπτών προσφέροντας ενέργεια 127.16 μJ .



Εικόνα 6.22: Φόρτιση πυκνωτή 22 μF σε δέκα λεπτά με μαλλί

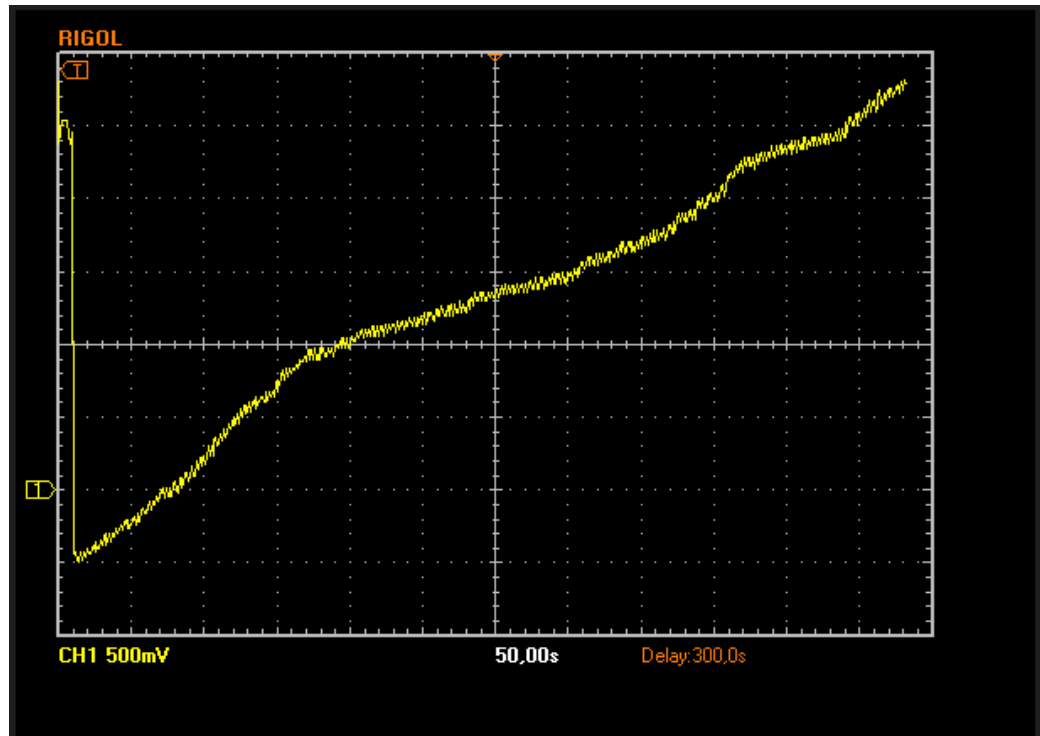
Ο πυκνωτής των 44 μF φόρτισε στα 3.6V σε διάστημα δέκα λεπτών προσφέροντας ενέργεια 285.12 μJ .



Εικόνα 6.23: Φόρτιση πυκνωτή 44 μF σε δέκα λεπτά με μαλλί

Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων

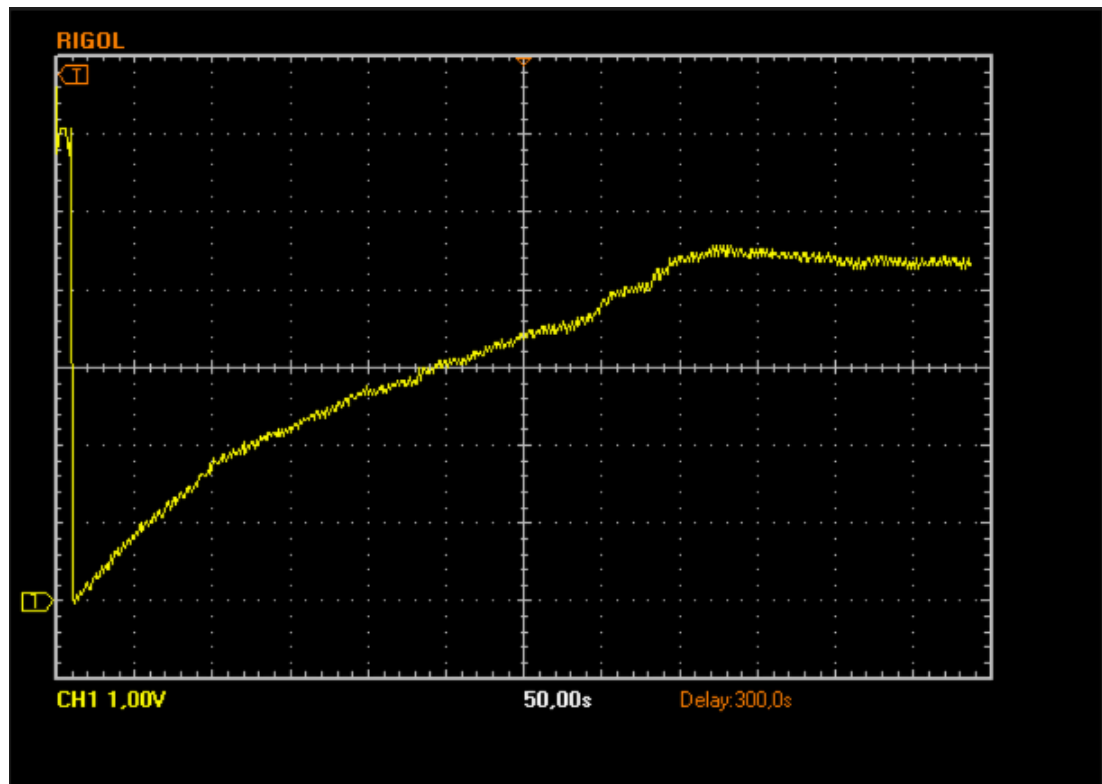
Ο πυκνωτής των 66 μF φόρτισε στα 3.6V σε διάστημα δέκα λεπτών προσφέροντας ενέργεια 427.68 μJ .



Εικόνα 6.23: Φόρτιση πυκνωτή 66 μF σε δέκα λεπτά με μαλλί

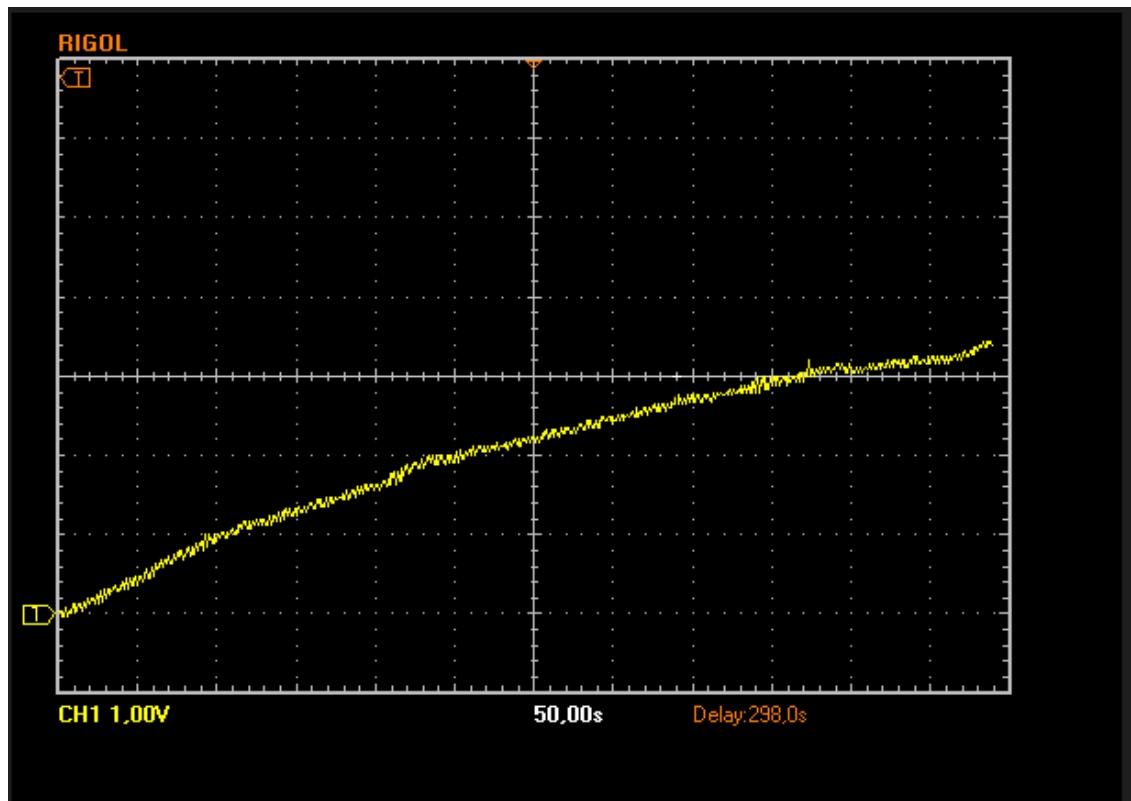
**Ανάπτυξη μετρητικών συστημάτων για υφάσματα και εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων
Μετρήσεις με υφαντό από αραμιδικές ίνες με επίστρωση φιλμ τεφλόν**

Ο πυκνωτής των 22 μF φόρτισε στα 4.4V σε διάστημα δέκα λεπτών προσφέροντας ενέργεια 212.96 μJ .



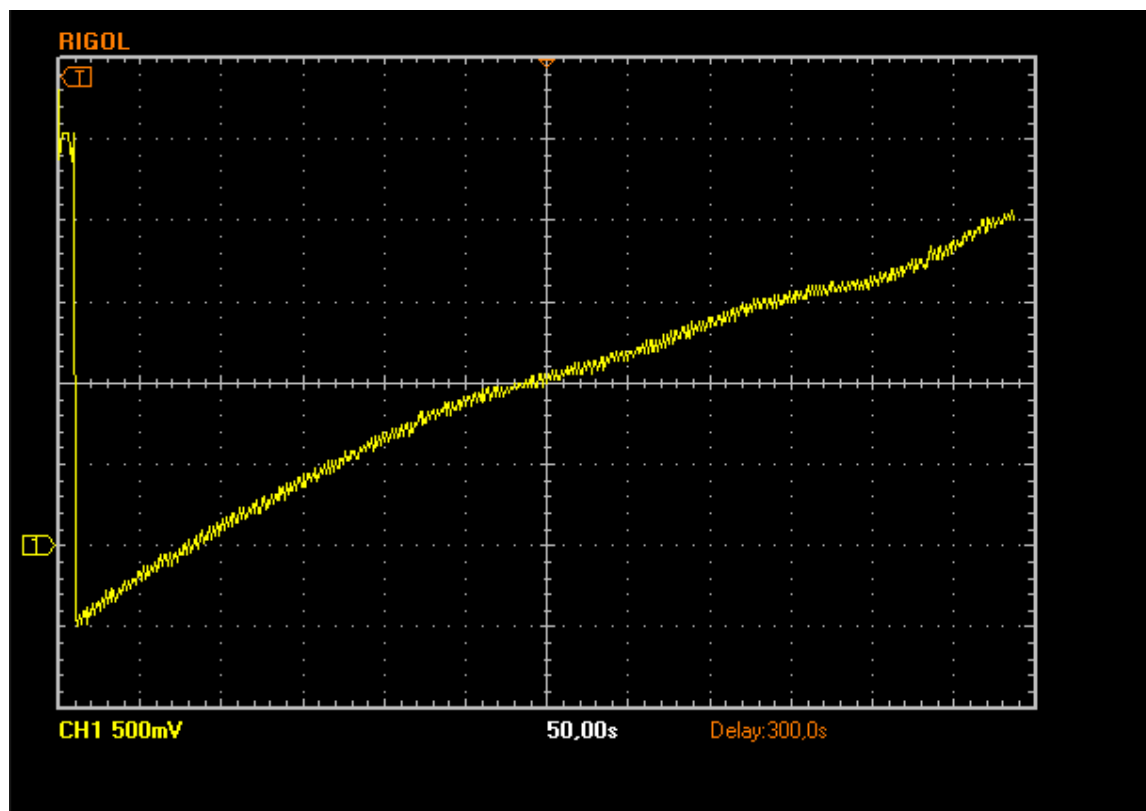
Εικόνα 6.24: Φόρτιση πυκνωτή 22 μF σε δέκα λεπτά με υφαντό με επίστρωση τεφλόν

Ο πυκνωτής των 44 μF φόρτισε στα 3.4V σε διάστημα δέκα λεπτών προσφέροντας ενέργεια 254.32 μJ .



Εικόνα 6.25: Φόρτιση πυκνωτή 44 μF σε δέκα λεπτά με υφαντό με επίστρωση τεφλόν
ΠΑΔΑ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Διπλωματική Εργασία, Π. Στούρας

Ο πυκνωτής των 66 μF φόρτισε στα 2.5V σε διάστημα δέκα λεπτών προσφέροντας ενέργεια 206.25 μJ .



Εικόνα 6.26: Φόρτιση πυκνωτή 66 μF σε δέκα λεπτά με υφαντό με επίστρωση τεφλών

Υλικό προς εξέταση	Χωρητικότητα πυκνωτών (μF)	Τάση φόρτισης (V)	Χρόνος Φόρτισης (S)	Αποθηκευμένη Ενέργεια (μJ)
Τεφλόν 1mm	0.122	13.5	24	11.13
Τεφλόν 1mm	22	2.98	120	97.68
Τεφλόν 1mm	22	7	600	536
Βαμβάκι	22	2.5	600	68.75
Βαμβάκι	44	3.14	600	216.9
Βαμβάκι	66	2.8	600	258.72
Μαλλί	22	3.4	600	127.16
Μαλλί	44	3.6	600	285.12
Μαλλί	66	3.6	600	427.68
Υφαντό Τεφλόν	22	4.4	600	212.96
Υφαντό Τεφλόν	44	3.4	600	254.32
Υφαντό Τεφλόν	66	2.5	600	206.25

Πίνακας 6.3: Οι πειραματικές μας μετρήσεις συγκεντρωτικά

7: Συμπεράσματα

Αυτή η Διπλωματική Εργασία αποτελεί μια πρακτική προσέγγιση στο φαινόμενο του τριβοηλεκτρισμού σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Εφόσον καλύψαμε το θεωρητικό υπόβαθρο για το φαινόμενο αυτό και αφότου συγκεντρώσαμε μερικά υλικά με αποδεδειγμένα καλές ιδιότητες με βάσει προηγούμενες έρευνες, επικεντρωθήκαμε στην προσομοίωση ενός ρεαλιστικού σεναρίου για την συγκέντρωση της ενέργειας μιας τριβοηλεκτρικής γεννήτριας.

Η συγκέντρωση της ενέργειας έγινε με μια απλή ανορθωτική διάταξη πλήρους γέφυρας και την χρήση διαφόρων συνδυασμών πυκνωτών. Μέσα από τις μετρήσεις μας καταλάβαμε πως μπορούμε να συγκεντρώσουμε ένα αξιοποιήσιμο ποσό ενέργειας, αρκεί να γίνει σωστή διαχείριση αυτής. Η φύση του πυκνωτή μας υποχρεώνει να διαχειριστούμε μια μεταβλητή τάση η οποία κατά την χρήση της ενέργειας του πυκνωτή πέφτει ραγδαία. Η εκμετάλλευση λοιπόν αυτής της ενέργειας, απαιτεί ένα υψηλής απόδοσης - χαμηλής απώλειας Power Management System (PMS) το οποίο θα μπορεί να κρίνει τότε συγκεντρώθηκε αρκετή ενέργεια προς χρήση και στην συνέχεια να την αποδεσμεύει προς το φορτίο. Το φορτίο αυτό θα έπρεπε φυσικά να είναι χαμηλής ισχύος, όπως για παράδειγμα ένας αισθητήρας θερμοκρασίας, ένας μικροελεγκτής πολύ χαμηλής ισχύος για κάποια πολύ σύντομη εργασία ή και άλλες εργασίες με χαμηλή απαίτηση ισχύος.

Με την μέθοδο αυτή θα μπορούσαμε να αναπτύξουμε πλήρως αυτόνομα συστήματα αισθητήρων όπως για παράδειγμα για την παρακολούθηση ζωτικών σημείων στον άνθρωπο, αισθητήρες σε οχήματα και άλλα πολλά.

Συνειδητοποιήσαμε λοιπόν πως υπάρχει ακόμα πολύς χώρος για έρευνα στον τομέα του τριβοηλεκτρισμού και των TENGs, πράγμα το οποίο ελπίζουμε να ενθαρρύνει ακόμα περισσότερους ερευνητές να απασχοληθούν με το φαινόμενο αυτό. Εξάλλου πράγματα όπως η δημιουργία έξυπνων υφασμάτων από ανακυκλωμένα υλικά, η απεξάρτηση από τις μπαταρίες για πολλές μικροσυσκευές και γενικώς η στροφή προς ένα μέλλον με επικέντρωση στις εναλλακτικές πηγές ενέργειας είναι κάποια από τα πολλά βήματα που μπορούν να οδηγήσουν σε ένα πιο βιώσιμο και με σεβασμό προς το περιβάλλον μέλλον

Παραπομπές

- [1] Repoulas, A. et al. "The Effect of Ambient Humidity on the Performance of a Wearable Textile Triboelectric Generator." *Energy Tech* (2023).
- [2] Tian, Z. et al. "Textile-Based Triboelectric Nanogenerators for Smart Wearable Systems: Comfort." *Adv. Materials Technologies* (2022).
- [3] Molnar, A. et al. "Triboelectricity and Construction of Power Generators Based on It." *Przegląd Elektrotechniczny* (2018).
- [4] Sreeja Sadanandan, K. et al. "Fabric-based triboelectric nanogenerators with ultrasonic spray coated graphene electrodes." *Nano Energy* (2023).
- [5] Wang, Z. et al. "Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics." *Nano Letters* (2012).
- [6] He, X. et al. "Humidity-Resistant, Fabric-Based, Wearable Triboelectric Energy Harvester by Treatment of Hydrophobic Self-Assembled Monolayers." *Journal of Materials Chemistry A* (2018).
- [7] Wang, T. et al. "Large-scale production of the 3D warp knitted terry fabric triboelectric nanogenerators for motion monitoring and energy harvesting." *Nano Energy* (2023).
- [8] Harmon, C. et al. "A power management system for triboelectric nanogenerators." *Journal of Energy Science* (2022).
- [9] Chen, J. et al. "Traditional weaving craft for one-piece self-charging power textile for wearable electronics." *Nano Energy* (2018).
- [10] Kim, S. et al. "3D customised triboelectric nanogenerator with high energy output via surface roughness enhancement." *Journal of Nanoscience* (2022).
- [11] Repoulas, A., Vassiliadis, S., Galata, S.F. "Triboelectricity and textile structures." *Journal of Textiles and Engineer* (2023).
- [12] Marrano, S. "Design and fabrication of flexible wearable triboelectric nanogenerators." *Energy Tech* (2020).
- [13] Macário et al. "Harvesting circuits for triboelectric nanogenerators." *iScience* (2022).
- [14] Li, J. et al. "Electrospun hydrolyzed collagen from tanned leather for energy-harvesting textiles." *ACS Sustainable Chem. Eng.* (2022).
- [15] Yin, J. et al. "All-electrospun triboelectric nanogenerator incorporated with textile structures." *Nano Energy* (2023).
- [16] Zhou, Y. et al. "Recent Progress of Switching Power Management for Triboelectric Nanogenerators." *Advanced Science* (2022).

Ακρωνύμια

AC: Alternate Current

DC: Direct Current

TEG: Triboelectric Generator

TENG: Triboelectric Nanogenerator

PTFE: Polytetrafluoroethylene

PDMS: Polydimethylsiloxane

IoT: Internet of Things

PU: Polyurethane

GPS: Global Positioning System

X1: Probe Scaling Factor

X10: Probe Scaling Factor

PMS: Power Management System