



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

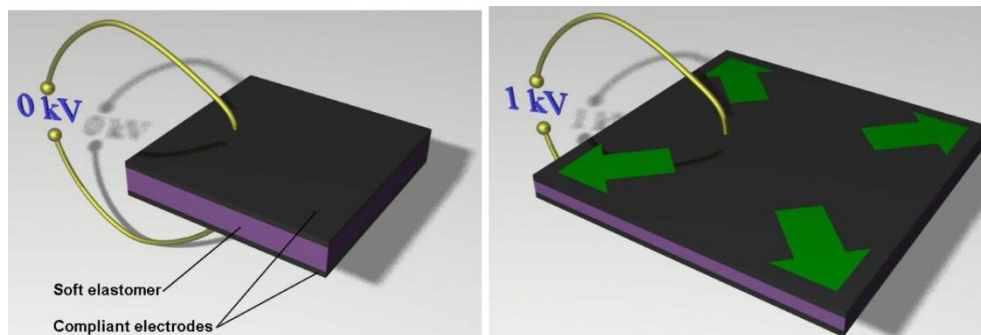
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη Διηλεκτρικών Ελαστομερών για Χρήση ως
Επενεργητές



Βρυζάλας Παναγιώτης

Επιβλέπων : Αντωνιάδης Ιωάννης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2014

Ευχαριστίες

Θεωρώ χρέος μου πριν ξεκινήσει η ανάπτυξη και παρουσίαση του θέματος της Διπλωματικής μου εργασίας να ευχαριστήσω ορισμένα άτομα που με βοήθησαν και συνέβαλαν σημαντικά σε αυτή.

Κατ' αρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Δρ. Αντωνιάδη Ιωάννη για την ανάθεση του θέματος άλλα και για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ το προσωπικό του εργαστηρίου Δυναμικής και Κατασκευών και τον υποψήφιο διδάκτορα Φώτη Παπασπυρίδη για τις συμβουλές, την καθοδήγηση και την συνολική βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Έχοντας βαθιά και ουσιαστική γνώση του θέματος προσέφερε τον πολύτιμο χρόνο του και την ουσιαστική υποστήριξή του όπου ήταν αναγκαίο.

Ευχαριστώ την οικογένεια μου που με στήριξε όλα τα προηγούμενα χρόνια σε όλες μου τις προσπάθειες και συνεχίζει να με στηρίζει.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η συμπεριφορά των διηλεκτρικών ελαστομερών υλικών αναφορικά με την χρήση τους στην τεχνολογία των επενεργητών. Το θεωρητικό μέρος περιλαμβάνει μία βιβλιογραφική αναφορά στους ‘‘τεχνητούς μύες’’-η εναλλακτική ονομασία των διηλεκτρικών ελαστομερών για αυτή την χρήση- και αναλύεται η εφαρμογή τους σε σημαντικά τεχνολογικά πεδία καθώς και η σύγκρισή τους με τις συμβατικές τεχνολογίες επενέργησης. Επίσης γίνεται αναφορά στα ελαστικά μοντέλα που περιγράφουν τις παραμορφώσεις των υλικών αυτών.

Στο πειραματικό σκέλος έγιναν μετρήσεις και κατεγράφησαν η επιμήκυνση του ελαστομερούς φιλμ και η μεταβολή της δύναμης που ασκεί, όταν σε αυτό επιβάλλεται ηλεκτρικό πεδίο. Μέσω της πρότυπης πειραματικής διάταξης, που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για τους σκοπούς της εργασίας αυτής, μετρήθηκαν δύο διαφορετικά φιλμ και δοκιμάστηκαν διάφοροι τύποι ηλεκτροδίων. Μεταβάλλοντας την προένταση των ελαστικών δοκιμίων, την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και τον ρυθμό επιβολής του, εξήχθησαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα οσον αφορά στην χρήση των υλικών αυτών ως επενεργητές. Σκοπός ήταν να γίνει μία περιγραφή της συμπεριφοράς των διηλεκτρικών ελαστομερών και των ιδιοτήτων τους ως συνάρτηση της ηλεκτρικής τάσης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτροενεργά Πολυμερή, τεχνητοί μύες, επενεργητής, διηλεκτρικά ελαστομερή, κυματική ενέργεια, κινηματική ενέργεια,

“STUDY OF DIELECTRIC ELASTOMERS FOR USE AS ACTUATORS ”

ABSTRACT

In this diploma thesis we study the behavior of dielectric elastomer materials regarding their use in actuators technology. The theoretical part includes a bibliographic reference to "artificial muscles" -an alternative name of dielectric elastomers for this use- and an analysis of their application at important technological fields and a comparison with conventional actuators technology takes place. Also a reference is made for elastic models describing the deformation of these materials .

In the experimental part, measurements took place in order to record the displacement of the elastomer film and the change in the force exerted when this was imposed in electric field. Through the pilot experimental structure, which was designed and constructed for the purposes of this study, two different films were measured and tested various types of electrodes. By varying the preload, the electric field intensity and rate enforcement and its rhythm of imposition, interesting conclusions concerning the use of these materials as actuators were exported. The aim was to have a description of the behavior of dielectric elastomers and their properties as a function of voltage .

Keywords:

electro active polymers, EAPs ,artificial muscles, actuator, dielectric elastomers, wave energy, kinetic energy

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΚΑΙ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ

1.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

1.3 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ

1.4 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ

1.5 ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΕΣ

1.6 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΩΝ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΩΝ (Δ.Ε.Ε.)

1.7 ΕΝΤΑΣΕΙΣ MAXWELL

1.8 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

1.9 ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ HOOKE

2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΝΕΟΗΟΟΚΕΑΝ

2.3 ΜΟΝΤΕΛΟ MOONEY-RIVLIN

2.4 ΜΟΝΤΕΛΟ OGDEN

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΩΝ

3.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ

3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΤΡΟΝΙΚΗ

3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

3.4 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

- 3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ
- 3.6 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΗ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
- 3.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΕΠΕΝΕΡΓΗΣΗΣ
- 3.8 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

- 4.1 Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ
- 4.2 ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
- 4.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ
- 4.4 Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ
 - 4.4.1 ΕΡΠΥΣΜΟΣ ΚΑΙ ΧΑΛΑΡΩΣΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ
 - 4.4.2 ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ, ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

- 5.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΟΥΣ
- 5.2 ΕΡΠΥΣΜΟΣ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΟΥΣ
- 5.3 ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΗ
- 5.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΗ
- 5.5 ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΗ
- 5.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Διηλεκτρικά Ελαστομερή ανήκουν σε μία μεγαλύτερη κατηγορία υλικών, τα Ηλεκτροενεργά Πολυμερή (EAPs). Τα EAPs χαρακτηρίζονται από την δυνατότητά τους να ανταποκρίνονται σε εξωτερικά ηλεκτρικά ερεθίσματα παρουσιάζοντας μια σημαντική παραμόρφωση σε σχήμα και μέγεθος.

Την τελευταία δεκαετία το ενδιαφέρον γύρω από υλικά τα οποία ανταποκρίνονται σε εξωτερικά ερεθίσματα όπως θερμοκρασία, ΡΗ, ακτινοβολία, ηλεκτρικά πεδία μεταβάλλοντας το σχήμα και το μέγεθος τους έχει αυξηθεί σημαντικά. Πιο κλασικές εφαρμογές όπως πιεζοηλεκτρικά συστήματα, πολλά υδραυλικά συστήματα ή ηλεκτρομαγνητικά πολυμερή, ερευνώνται ως νέα υλικά. Γίνονται προσεγγίσεις που περιλαμβάνουν παραμορφώσιμα πολυμερή όπως υδρογελή υλικά, διηλεκτρικά ελαστομερή, αγώγιμα πολυμερή, νανοσωλήνες άνθρακα, ηλεκτρομαγνητικοί σωλήνες και ελαστομερή υγρών κρυστάλλων.

Ανάμεσα στα παραμορφώσιμα υλικά, τα ηλεκτροενεργά πολυμερή (EAPs) παρουσιάζουν μηχανικές ιδιότητες (δύναμη, παραμόρφωση) όταν διεγείρονται ηλεκτρικά, για αυτό και βρίσκονται στο επίκεντρο της έρευνας την τελευταία δεκαετία. Αυτή η κλάση των υλικών μπορεί να υποδιαιρεθεί σε ιονικά και ηλεκτρικά EAPs αναφορικά με την αρχή λειτουργίας και διέγερσης. Στα ιονικά EAPs η δύναμεις ενεργοποίησης προκύπτουν από τη διάλυση ελευθέρων ιόντων, ενώ στα ηλεκτρικά το φαινόμενο προκύπτει μόνο από τη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθούν τα ηλεκτρικά EAPs.

1.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τα υλικά γενικά χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες, σε σχέση με την ικανότητα τους να επιτρέπουν κίνηση ηλεκτρικών φορτίων

- Αγωγούς
- Ημιαγωγούς
- μονωτές

Επίσης, με βάση τη φυσική τους κατάσταση χωρίζονται σε υγρά, στερεά και αέρια. Η κατηγορία που θα μελετηθεί στην διατριβή αυτή είναι εκείνη των μονωτών. Επίσης ένας άλλο κριτήριο κατηγοριοποίησης των υλικών είναι το ενεργειακό διάκενο E_g που έχει το υλικό. Το ενεργειακό διάκενο αποτελεί την ενέργεια που διαχωρίζει τη ζώνη σθένους από τη ζώνη αγωγιμότητας. Η ζώνη σθένους περιλαμβάνει τα ηλεκτρόνια τα οποία συμβάλουν στη συνοχή του υλικού, ενώ η ζώνη αγωγιμότητας τα ηλεκτρόνια που συμβάλουν και προσδιορίζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του

μέσου. Ουσιαστικά το ενεργειακό διάκενο απεικονίζει την απαιτούμενη ενέργεια προκειμένου να διασπασθεί ο χημικός δεσμός που υπάρχει μεταξύ των ατόμων του υλικού. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με το εύρος των ενεργειακών διακενών για μονωτικά και ημιαγώγιμα υλικά.

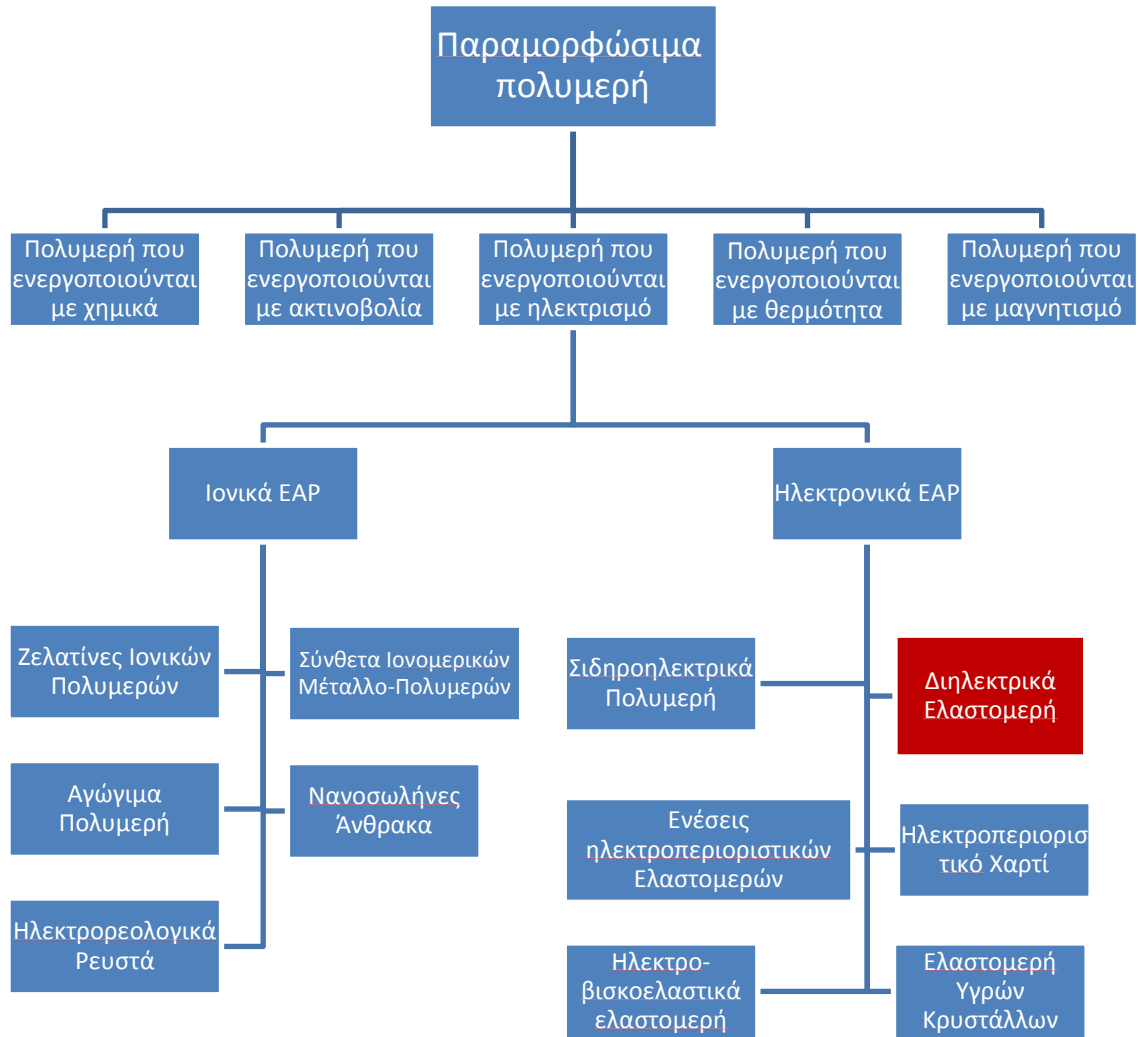
Κατηγορίες υλικών	Εύρος ενεργειακών διακενών (eV)
Μονωτικά	2,5-10
Ημιαγώγιμα	0,5-2,5

Οι χημικοί δεσμοί που συνήθως υπάρχουν στα μονωτικά υλικά είναι είτε ομοιοπολικοί είτε ιοντικοί. Στα μονωτικά υλικά οι ενέργειες με τις οποίες συνδέονται τα άτομα μεταξύ τους είναι μεγαλύτερες, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των ημιαγωγών όπως φαίνεται και στο πίνακα.

Κατηγορίες χημικών δεσμών σε μονωτικά υλικά	Ενέργεια ανά χημικό δεσμό (eV)
Ομοιοπολικοί	2,5-5
Ιοντικοί	5-10

1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα παραμορφώσιμα ηλεκτροενεργά πολυμερή είναι μια μεγάλη κατηγορία υλικών που χωρίζεται σε υποκατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο ενεργοποίησής τους. Αυτός μπορεί να είναι με χημικό, ακτινοβολία, ηλεκτρικό, θερμότητα και μαγνητισμό.



Σχήμα 1.2: Κατηγορίες των Παραμορφώσιμων πολυμερών υλικών

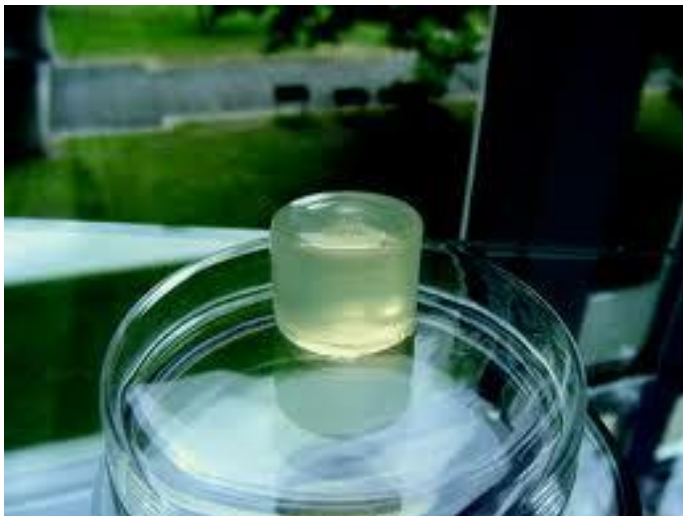
1.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΕΝΕΡΓΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Τα ηλεκτροενεργά πολυμερή μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα ιονικά και τα ηλεκτρονικά. Γενικότερα τα ηλεκτρονικά ΗΕΠ ενεργοποιούνται από ένα ηλεκτρικό πεδίο ή δυνάμεις Coulomb, ενώ ο μηχανισμός ενεργοποίησης για τα ιονικά ΕΑΡ περιλαμβάνει την διάχυση ή την κινητικότητα των ιόντων.

1.3.1 ΙΟΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΕΝΕΡΓΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Ιονικές γέλες

Η επιβολή της ηλεκτρικής τάσης στις ιονικές γέλες-ζελατίνες(IGLSs), όπως η πολυακρυλική οξική γέλη, προκαλεί την κίνηση ιόντων υδρογόνου μέσα ή έξω από τη ζελατίνα αλλάζοντας έτσι το περιβάλλον από όξινο σε αλκαλικό προκαλώντας τη γέλη να γίνει συστελλόμενη και διαστελλόμενη αναλόγως. Υπό ενεργοποίηση, η γέλη από πολυακρυλικό οξύ κάμπτεται με μία κοίλη θετική επιφάνεια εφόσον η γέλη είναι σε επαφή με την άνοδο, μία διαδικασία η οποία οφείλεται στην οξύτητα. Αν η γέλη δεν έχει επαφή με κανένα ηλεκτρόδιο, τότε το ζελέ κάμπτεται με την αρνητική κοίλη επιφάνεια (σχήμα), κάμψη η οποία προκαλείται από την διαφορά του ρυθμό εξάπλωσης των ιόντων μέσα στη γέλη και στον ηλεκτρολύτη. Παρά το γεγονός ότι η απαιτούμενη ηλεκτρική τάση για την επενέργηση των IGLs είναι χαμηλή, η διάχυση των ιόντων προκαλεί αργή λειτουργία. Τα πολυμερή αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός τεχνητού ουρηθρικού σφιγκτήρα, αλλά στο μεγαλύτερο τους μέρος είναι στα πρώιμα στάδια ανάπτυξης τεχνητών μυών.



Σχήμα 1.3.1.1 Δοκίμιο Ιονικής γέλης

Πολυμερή με συνθετικά μέταλλα (IPMCs)

Τα ιονικά πολυμερή με συνθετικά μέταλλα (IPMCs) είναι μία κατηγορία των ΗΕΠ, τα οποία κάμπτονται στην αντίδραση τους από σχετικά χαμηλή ηλεκτρική τάση ενεργοποίησης. Η χημική ηλεκτρόλυση των πολυμερικών αυτών φιλμ επιτυγχάνεται με την διάχυση μεταλλικών ιόντων στις υδροφυλικές περιοχές της πολυμερικής επιφάνειας, οι οποίες ακολούθως μειώνονται σε μηδενικού σθένους άτομα μετάλλου. Ένα IPMC αποτελείται από έναν πολυμερικό ηλεκτρολύτη ενθυλακωμένο μεταξύ δύο λεπτών μεταλλικών επιφανειών. Ένα πεδίο προκαλεί αλλαγή στην συγκέντρωση των ιόντων, η οποία προσελκύει τα μόρια του νερού στην μία πλευρά του πολυμερούς προκαλώντας την εκτροπή της διαστρωματικής δομής προς ένα από τα μεταλλικά ηλεκτρόδια. Τα IPMC δεν παράγουν γραμμική επενέργηση παρά μόνο κάμπτονται. Το 2003 στον τομέα των ΗΕΠ κατασκευάστηκε ένα εμπορικό προϊόν. Το προϊόν αυτό είναι ένα ψάρι ρομπότ το οποίο οδηγείται από έναν ICPM και ενεργοποιείται από πηνία τοποθετημένα στην άνω και κάτω τομέα της δεξαμενής, μέσω των οποίων παράγεται ισχύς σε ένα πηνίο στο εσωτερικό του ψαριού. Το ψάρι ρομπότ αναπτύχθηκε από τον Eamex, Japan. Τα IPMCs έχουν ακόμα δείξει δυνατότητες ως ρομποτικές λαβίδες.

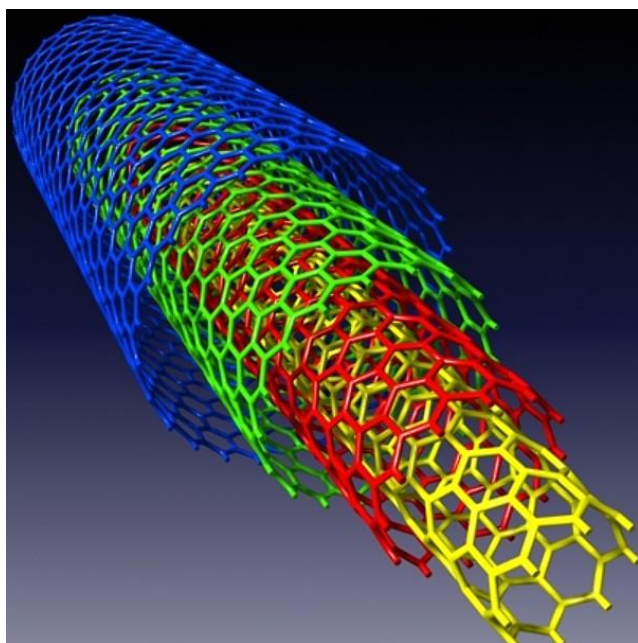
Αγώγιμα πολυμερή

Τα αγώγιμα πολυμερή (CPs) όπως η πολυπυρόλη (polypyrrole) και η πολυανιλίνη (polyaniline) διογκώνονται με την παρουσία ηλεκτρικής τάσης ως αποτέλεσμα της οξείδωσης ή αναγωγής, ανάλογα με την πολικότητα, προκαλώντας την εισαγωγή ιόντων ή κατιόντων. Η οξείδωση και η αναγωγή εμφανίζονται στα ηλεκτρόδια προκαλώντας μία αξιόλογη αλλαγή τιμής λόγω της ανταλλαγής ιόντων με έναν ηλεκτρολύτη. Αλλαγές στις διαστάσεις παρουσιάζονται πρωταρχικά λόγω της αναγωγής των ιόντων. Η ηλεκτρομηχανική ζευγοποίηση των CPs είναι χαμηλή (<1%), για αυτό το λόγο χωρίς ουσιαστική είσοδο επαναφοράς ενέργειας, ο βαθμός απόδοσης θα είναι επίσης χαμηλός. Αυτή η χαμηλή ζευγοποίηση ωστόσο δεν είναι μοναδική στα αγώγιμα πολυμερή και είναι χαρακτηριστικό άλλων ιονικών ΗΕΠ όπως τα ICPM και τους νανοσωλήνες άνθρακα. Απαιτούνται πολύ υψηλά ρεύματα για να λειτουργήσουν σε μεγάλη ισχύ λόγω της χαμηλής ηλεκτρομηχανικής ζευγοποίησης και της χαμηλής ηλεκτρικής τάσης ενεργοποίησης.

Νανοσωλήνες άνθρακα (Carbon Nanotubes CNT)

Από το 1999 στην κατηγορία των ηλεκτροενεργών πολυμερών ανήκουν τυπικά και οι νανοσωλήνες άνθρακα, οι μηχανικές ιδιότητες των οποίων παρουσιάζονται ανάλογες με αυτές του διαμαντιού. Ο μηχανισμός ενεργοποίησης επιτυγχάνεται μέσω ενός ηλεκτρολυτικού μέσου και την αλλαγή στο μήκος του χημικού δεσμού μέσω της

διάχυσης φορτίων τα οποία επηρεάζουν την ισορροπία των φορτισμένων ιόντων ανάμεσα στο νανοσωλήνα και τον ηλεκτρολύτη. Όσο πιο πολλά φορτία διαχέονται μέσα στον νανοσωλήνα τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή στις διαστάσεις. Έτσι στρώματα από μονά επίπεδα νανοσωλήνων, τα οποία στην ουσία λειτουργούν σαν υπεραγωγοί, μπορούν να φορτιστούν σε κάποιο διάλυμα ηλεκτρολύτη. Τα ιόντα του ηλεκτρολύτη σχηματίζουν ένα διπλό στρώμα το οποίο αντισταθμίζει τα φορτία. Με αυτόν τον τρόπο έχουν μετρηθεί γραμμικές εντάσεις της τάξεως του 2.5% και τάσεις ίσες με 1 MPa.



Σχήμα 1.3.1.2 Νανοσωλήνες άνθρακα

Το αποτέλεσμα της μηχανικής δύναμης, της ελαστικής σταθεράς, και της μέγιστης μετατόπισης που επιτυγχάνεται με επενεργητές από νανοσωλήνες άνθρακα είναι ότι αυτά τα συστήματα ξεχωρίζουν για το υψηλότερο έργο ανά κύκλο εργασίας τους, ενώ παράλληλα παράγουν πολύ περισσότερη μηχανική ενέργεια σε σχέση με τους άλλους τύπους ΗΕΠ. Η τεχνική είναι σχετικά νέα και η εξέλιξη της διαδικασίας θεωρείται «κλειδί» για περαιτέρω βελτιώσεις.

1.3.2 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΕΝΕΡΓΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

Φερροηλεκτρικά πολυμερή ηλεκτροσυρρικνόμενου χαλαρωτή (*Electrostrictive relaxor ferroelectric polymers*)

Ο πιεζοηλεκτρισμός είναι μία σύζευξη μεταξύ της μηχανικής και της ηλεκτρικής συμπεριφοράς ενός υλικού. Όταν ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό συμπιέζεται, ένα ηλεκτρικό φορτίο συγκεντρώνει επί της επιφανείας του. Ο φερροηλεκτρισμός είναι το αντίθετο αποτέλεσμα του πιεζοηλεκτρισμού. Η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου προκαλεί την ευθυγράμμιση των πολικών περιοχών και, ως άμεση συνέπεια, την κρυσταλλική επιμήκυνση. Αυτή η αναστρέψιμη ευθυγράμμιση των πολικών ομάδων παράγει μια συστολή μέχρι και 10% κατά τη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου. Τα φερροηλεκτρικά πολυμερή μπορούν να λειτουργήσουν ως επενεργητές στον αέρα, το κενό ή το νερό. Δεδομένου ότι ο πιεζοηλεκτρισμός είναι μια γραμμική επίδραση, όπου όχι μόνο το υλικό παραμορφώνεται κατά την εφαρμογή της ηλεκτρικής τάσης, αλλά επίσης προκαλείται και ένα σήμα ηλεκτρικό σήμα όταν εφαρμόζεται σε αυτό μια τάση. Εν συνεχεία πρέπει να εφαρμοστεί ένα μεγάλο ηλεκτρικό πεδίο προς την αντίθετη κατεύθυνση σε σχέση με την αρχική για να αντιστραφεί η πόλωση,

Ελαστομερή ηλεκτροσυρρικνόμενου μοσχεύματος (*Electrostrictive graft elastomers*)

Τα Ελαστομερή Ηλεκτροσυρρικνόμενου Μοσχεύματος είναι πολυμερή τα οποία αποτελούνται από δύο συστατικά, το σκελετό ενός ευέλικτο μακρομορίου και ένα μόσχευμα πολυμερούς, που μπορεί να παραχθεί σε κρυσταλλική μορφή. Εδώ θεωρούμε τα ΕΗΜ ως ξεχωριστή κατηγορία ηλεκτρονικών ΗΕΠ, όμως δεδομένου ότι ο μηχανισμός ενεργοποίησής τους είναι ηλεκτροσυρρικνόμενος από φύση του είναι θεμελιωδώς ίδιος με τα φερροηλεκτρικά πολυμερή που περιγράφονται στη προηγούμενη παράγραφο.

Ελαστομερή υγρών κρυστάλλων (*Liquid crystal elastomers*)

Τα ελαστομερή υγρών κρυστάλλων συνίστανται από κρυσταλλικά μόρια (μεσογενή) που προσαρτώνται σε ένα συμβατό πολυμερή σκελετό. Ο μαλακός σκελετός επιτρέπει τον επαναπροσανατολισμό των μεσογενών, ενώ εμποδίζει την ελεύθερη ροή των μορίων. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συμβεί με θερμικά ή ηλεκτρικά μέσα. Ο επαναπροσανατολισμός των μεσογενών προκαλεί τάσεις επί του σκελετού με αποτέλεσμα τη παραμόρφωση του στέλεχος του ΕΥΚ (Ελαστομερούς Υγρών Κρυστάλλων). Λόγω διάχυσης θερμότητας, τα θερμικά ενεργοποιημένα ΕΥΚ είναι σχετικά αργά, ιδιαίτερα κατά την διαδικασία της χαλάρωσης (~ 10 s) και απαιτούν ενεργή ψύξη. Ο μηχανισμός ενεργοποίησης περιλαμβάνει μια αλλαγή στο μέσο

μοριακό σχήμα από το σφαιρικό στο σφαιροειδή, καθώς το πολυμερές μεταβαίνει από την νηματική στην ισοτροπική φάση.

Διηλεκτρικά Ελαστομερή

Θα αναπτυχθούν στη συνέχεια της εργασίας.

1.4 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ

Τα διηλεκτρικά ελαστομερή (ονομάζονται επίσης ηλεκτροστατικά πολυμερή) ανήκουν στην ομάδα των ηλεκτροενεργών πολυμερών. Με βάση την απλή αρχή λειτουργίας τους, οι επενεργητές από διηλεκτρικά ελαστομερή μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια, όταν υποβληθούν σε ηλεκτρικό πεδίο, απευθείας σε μηχανικό έργο. Παρακάτω γίνεται η μακροσκοπική προσέγγιση των διηλεκτρικών και αναλύεται η αρχή λειτουργίας τους.

1.5 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ

Από τις βασικές ιδιότητες ενός διηλεκτρικού υλικού είναι η διηλεκτρική του επιτρεπτότητα ϵ' . Η διηλεκτρική του επιτρεπτότητα δείχνει τον βαθμό της δυνατότητας αποθήκευσης φορτίου στο υλικό αυτό όταν εφαρμοσθεί ηλεκτρικό πεδίο. Για να ορίσουμε το μέγεθος αυτό θα χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο του πυκνωτή. Στην περίπτωση του πυκνωτή παράλληλων πλακών χωρίς διηλεκτρικό έχουμε από το νόμο του Gauss ότι:

$$\epsilon_0 \oint E ds = \epsilon_0 \cdot E_0 \cdot S = Q \rightarrow E_0 = \frac{Q}{\epsilon \cdot S}$$

Με $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ Cb}^2$ τη διηλεκτρική σταθερά του κενού

Όταν ο πυκνωτής έχει διηλεκτρικό ο νόμος του Gauss γράφεται:

$$\epsilon_0 \oint E ds = \epsilon_0 \cdot E_0 \cdot S = Q - Q' \rightarrow E = \frac{Q - Q'}{\epsilon_0 \cdot S}$$

Η εισαγωγή διηλεκτρικού εξασθενίζει το πεδίο στην τιμή E και ο λόγος των δύο τιμών λέγεται ηλεκτρική διαπερατότητα ϵ' του μέσου ή διηλεκτρική σταθερά.

$$\varepsilon' = \frac{E_0}{E}$$

Η αιτία είναι η εμφάνιση φορτίων στην επιφάνεια του διηλεκτρικού αναγκάζοντας την άφιξη νέων φορτίων από τη μπαταρία για να κρατήσει σταθερή τη διαφορά δυναμικού.

1.6 ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΕΣ

Τα ηλεκτροενεργά πολυμερή (EAPs) και συγκεκριμένα τα Διηλεκτρικά Ηλεκτροενεργά Πολυμερή έχουν πολύ μεγάλες δυνατότητες ως επενεργητές. **Επενεργητές** ονομάζονται οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την κίνηση ή τον έλεγχο ενός μηχανισμού ή ενός συστήματος. Λειτουργούν μέσω μίας πηγής ενέργειας (υδραυλική, πνευματική ή ηλεκτρική) και μετατρέπουν την ενέργεια αυτή σε κίνηση. Χρησιμοποιούνται επίσης για την εφαρμογή μιας δύναμης. Συνήθως εφαρμόζονται στον κατασκευαστικό ή βιομηχανικό τομέα και αρκετά συχνά σε διατάξεις όπως κινητήρες, αντλίες, διακόπτες και βαλβίδες.

Ιστορικά η πρώτη μορφή επενεργητή θεωρείται «ο κοχλίας του Αρχιμήδη» (287-212 π.Χ) όπου χρησιμοποιήθηκε για την μεταφορά νερού από χαμηλή σε υψηλή στάθμη και εφαρμόζεται ακόμα και σήμερα για άντληση υδάτων και στερεών σε κόκκους, όπως ο άνθρακας και το σιτάρι.

Αρκετά σχέδια επενεργητών από διηλεκτρικά ελαστομερή έχουν υλοποιηθεί για πειραματικούς σκοπούς όπως για παράδειγμα:

- Επίπεδοι
- Δίμορφοι
- Κυβικοί
- Διαφράγματος
- Αραχοειδής και
- Δεσμού τόξου (μονού επιπέδου)

Οι διηλεκτρικοί ελαστομερής επενεργητές (Δ.Ε.Ε) είναι γνωστοί για τις μοναδικές ιδιότητές τους, συνδυάζοντας μεγάλες επιμηκύνσεις, υψηλό ειδικό συντελεστή ελαστικής ενεργειακής πυκνότητας (3.4 J/g), καλή απόδοση και γρήγορη ανταπόκριση της τάξης των millisecond. Παράλληλα οι διηλεκτρικοί επενεργητές χαρακτηρίζονται από μικρό βάρος, ευελιξία, απλά και κοινά υλικά, χαρακτηριστικά που τους καθιστούν ιδανικούς για πλειάδα εφαρμογών υψηλής απόδοσης σε συνδυασμό με χαμηλό κόστος. Ιδιότητες κατά παραγγελία και κατασκευή πολλών γεωμετριών και κατασκευών μπορούν να υλοποιηθούν. Πολλαπλές είναι οι

εφαρμογές που χρησιμοποιούν τους διηλεκτρικούς ελαστομερείς επενεργητές, όπως κινητά μικρο-ρομπότ, μικρο-βαλβίδες, μικρά εναέρια οχήματα, σκληροί δίσκοι, προσθετικές συσκευές και επίπεδα ηχεία. Οι ιδιαιτερότητες των EAPs παραλληλίζονται με αυτές των ανθρώπινων μυών, για αυτό και τα EAPs συχνά αναφέρονται και με το όνομα “τεχνητοί μύες”.

Οι επενεργητές από διηλεκτρικά υλικά ελαστομερών βασικά αποτελούνται από έναν πυκνωτή με ένα λεπτό ελαστομερές φιλμ (τυπικά σιλικονούχο ή ακρυλικό) ενθυλακωμένου ανάμεσα σε δύο κατάλληλα ηλεκτρόδια. Τα διηλεκτρικά ελαστομερή είναι συνεκτικά-ελαστικά, ασυμπίεστα ελαστομερή με υψηλή διηλεκτρική σταθερά. Σε αυτή την εφαρμογή το πολυμερές λειτουργεί ως διηλεκτρικό ενός ηλεκτρικού πυκνωτή. Όταν εφαρμόσουμε στα άκρα μία ηλεκτρική τάση, ένα ηλεκτροστατικό πεδίο προκύπτει και η ηλεκτροστατική δύναμη φορτίζει μηχανικά το φιλμ του πολυμερούς. Εξαιτίας αυτής της μηχανικής συμπίεσης, το ουσιαστικά ασυμπίεστο ελαστομερές φιλμ, επιδρά κατά τη διεύθυνση του πάχους. Ως συνέπεια αυτού, το πολυμερές μεγεθύνεται ελαστικά στο επίπεδο (φόρτιση Maxwell). Η ηλεκτροστατική πίεση P_{el} που επιδρά στο μονωμένο ελαστομερές φιλμ δύναται να υπολογιστεί για δεδομένη διαφορά δυναμικού V και πάχος φιλμ d βάση της σχέσης:

$$P_{el} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot (U/d)^2$$

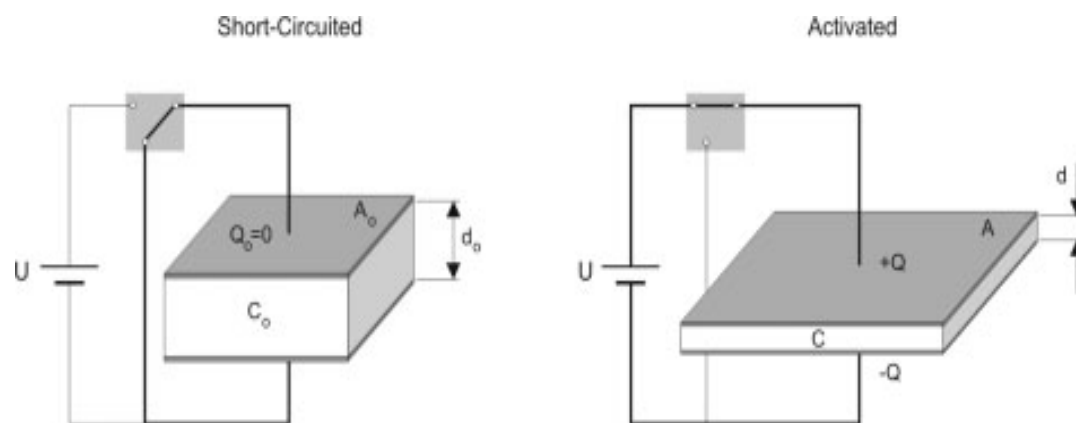
Όπου ϵ_0 : $8.85 \times 10^{-12} \text{As/Vm}$ και ϵ_r : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του ελαστομερούς

Αυτή η παραμόρφωση δημιουργεί κινήσεις ή δυνάμεις. Με την πάυση της ηλεκτρικής τάσης στα άκρα των ηλεκτροδίων και με τη βραχυκύκλωση αυτών, ο πυκνωτής επιστρέφει στο αρχικό του μέγεθος.

Για αυτό το λόγο τα ηλεκτρόδια πρέπει να συμπεριφέρονται ως επίπεδα και πολύ εύκαμπτα ούτως ώστε να προβάλλουν την ελάχιστη δυνατή αντίσταση στην παραμόρφωση. Για να βελτιώσουμε την απόδοση τους, τα διηλεκτρικά ελαστομερή προεντείνονται, τυπικά πέντε φορές σε σχέση με τις αρχικές τους διαστάσεις. Συνδυάζοντας πολλαπλά επίπεδα επενεργητών εν παραλλήλω, η συνισταμένη δύναμη εμφανίζεται αρκετά ισχυρότερη και η στιβαρότητα του υλικού μπορεί να αυξηθεί. Όταν δε οι επενεργητές συνδυάζονται σε σειρά, η προκύπτουσα παραμόρφωση γίνεται αρκετά μεγαλύτερη. Προκειμένου να μειώσουμε την τάση ενεργοποίησης χωρίς να μειώσουμε την επιμήκυνση των επενεργητών, το πάχος όπως και η σχετική διαπερατότητα του φιλμ δύναται να τα αυξήσουμε. Το 2000 οι Pelrine, Kornbluh και Kofod δημοσίευσαν μία διατριβή σχετικά με τους διηλεκτρικούς ελαστομερείς επενεργητές παρουσιάζοντας την καινοτόμα δουλειά τους πάνω στο αντικείμενο. Έκτοτε το ενδιαφέρον γύρω από τους διηλεκτρικούς EAP αυξήθηκε. Επιπρόσθετη μελέτη γύρω από τα υλικά των επενεργητών και τα συστήματα αυτών διεξάγεται σε παγκόσμιο επίπεδο προκειμένου να κατανοηθεί σφαιρικότερα το πεδίο αυτών των επενεργητών. Αυτό πραγματοποιείται μέσα από πειραματικές μετρήσεις όπως και μοντελοποιήσεις.

1.7 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΩΝ ΕΠΕΝΕΡΓΗΤΩΝ (Δ.Ε.Ε.)

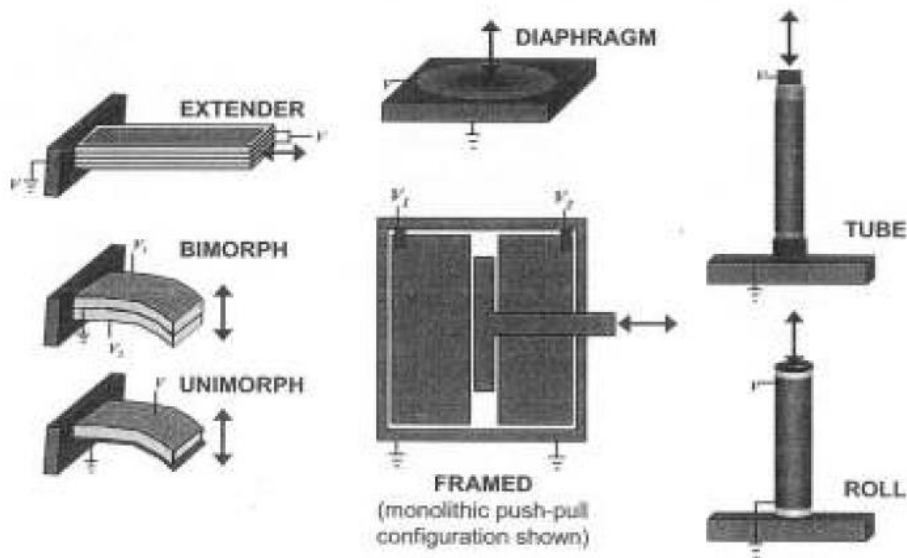
Οι Διηλεκτρικοί Ελαστομερείς Επενεργητές (Δ.Ε.Ε) έχουν προταθεί ως μεγάλου εκτοπίσματος επενεργητές για χρήση σε μηχανικές συσκευές. Είναι απλοί, χαμηλού κόστους και μικρού βάρους. Οι ΔΕΕ αποτελούνται από ένα λεπτό φύλλο ελαστομερούς, επικαλυμμένο και στις δύο πλευρές με συμβατά ηλεκτρόδια, βλ. Σχήμα.1.7 Όταν εφαρμόζεται διαφορετική τάση κατά μήκος των δύο συμβατών ηλεκτροδίων, τότε παράγονται «εντάσεις Maxwell» στο φιλμ. Λόγω της ασυμπίεστότητας του ελαστομερούς, η προκύπτουσα μείωση στο πάχος του φιλμ προκαλεί την χωρική επέκτασή του. Η χωρική επέκταση αυτή, μπορεί να συλληφθεί από ένα πλαίσιο έτσι ώστε να παράγει μια γραμμική επιμήκυνση.



Σχήμα 1.7 Σε μία τέτοια διάταξη το Διηλεκτρικό Ελαστομερές συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής.

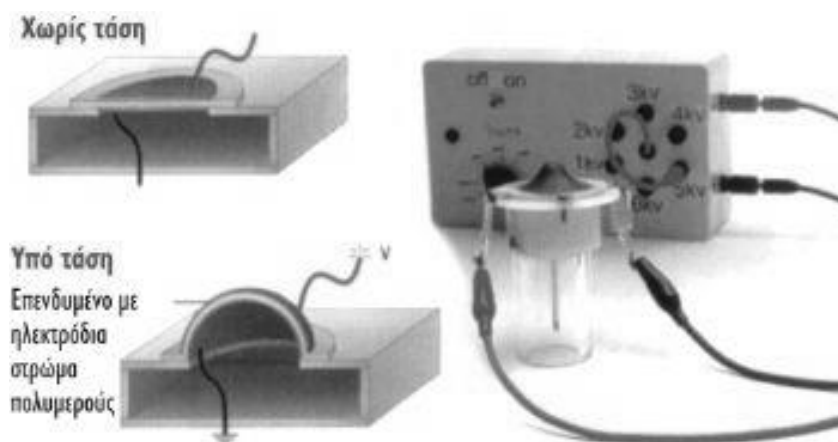
Τα πολυμερή που εκτείνονται υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου επιτρέπουν την κατασκευή μηχανισμών που μακραίνουν ή λυγίζουν κατά βούληση. Για την κατασκευή τους στρώματα ελαστομερούς με ελαστικά ηλεκτρόδια τυλίγονται γύρω από ελατήρια σχηματίζοντας συμπαγείς κυλίνδρους. Οι κύλινδροι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ρομποτικούς μηχανισμούς, στην προσθετική τεχνητών μελών, σε βαλβίδες και αντλίες και οπουδήποτε απαιτείται ευθύγραμμη μηχανική κίνηση. Μέχρι στιγμής έχουν καταφέρει να φτάσουν σε δύναμη τα 30 N, σε μετατόπιση τα 2 εκατοστά και σε ταχύτητα επανάληψης της κίνησης τους 50 κύκλους το δευτερόλεπτο. Για τη βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων μπορούν είτε να κατασκευαστούν σε μεγαλύτερα μεγέθη, είτε να τοποθετηθούν σε σειρά ή

παράλληλα.



Σχήμα 1.7.1. Διαμορφώσεις διηλεκτρικών ελαστομερών.

Σχετικά απλές τροποποιήσεις μπορούν να δώσουν συσκευές που λυγίζουν. Αν δύο στρώματα ελαστομερούς τοποθετηθούν έτσι που το καθένα να καλύπτει τον μισό κύλινδρο (κατά μήκος), τότε εφαρμόζοντας τάση μόνο στο ένα στρώμα ο κύλινδρος λυγίζει προς την άλλη μεριά (που χωρίς τάση δεν εκτείνεται όπως η πρώτη). Πιο σύνθετες διατάξεις μπορούν να δώσουν ακόμα πιο σύνθετες κινήσεις, όπως η μίμηση της κίνησης του τζόιστικ ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Σχήμα 1.7.2 ηλεκτρόδιο επενδυμένο με στρώμα πολυμερούς.

Χρησιμοποιώντας ένα διηλεκτρικό ελαστομερές στρώμα κυκλικού σχήματος που είναι στερεωμένο στα άκρα, πάνω σε άκαμπτη στεφάνη, μπορεί να κατασκευαστεί διάφραγμα που ενεργοποιείται (φουσκώνει προς τη μια ή την άλλη κατεύθυνση) όταν εφαρμόζεται τάση πάνω στα ηλεκτρόδιά του στην εικόνα 1.7.2 φαίνεται υπό τάση και χωρίς τάση επενδυμένο ηλεκτρόδιο με στρώμα πολυμερούς που “φουσκώνει”. Διαφράγματα αυτού του είδους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν κινητήρες αντλιών και σε μεγάφωνα ηχείων. Στους τομείς αυτούς χρησιμοποιούνται εδώ και πολύ καιρό πιεζοηλεκτρικά υλικά, αλλά τα διηλεκτρικά ελαστομερή διαφράγματα προσφέρουν πολύ μεγαλύτερες εκτοπίσεις ρευστού.

1.8 ΕΝΤΑΣΕΙΣ MAXWELL

Η μηχανική δύναμη του διηλεκτρικού ελαστομερούς επενεργητή προέρχεται από την έλξη του φορτίου Coulomb. Όταν ο πυκνωτής φορτίζεται από την εφαρμογή του ηλεκτρικού πεδίου, θετικά φορτία μετακινούνται στο ένα ηλεκτρόδιο ισορροπώντας με τα αρνητικά φορτία στο άλλο ηλεκτρόδιο. Η ευκαμψία του ελαστομερούς επιτρέπει στα φορτία να μετακινηθούν κοντύτερα το ένα με το άλλο συμπιέζοντας τον πυκνωτή. Η αρχή της διατήρησης ωθεί το ελαστομερές να επεκταθεί παράλληλα με το ηλεκτρικό πεδίο αυξάνοντας την επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Η αύξηση αυτή αφήνει τα ομώνυμα φορτία στο κάθε ηλεκτρόδιο να απομακρυνθούν το ένα από το άλλο, μειώνοντας την εσωτερική ενέργεια της φόρτισης. Αυτή είναι, με λόγια, η αρχή πίσω από τον διηλεκτρικό ελαστομερή επενεργητή. Ακολουθεί μία μαθηματική ετυμολογία, σε όσο το δυνατόν απλούστερη μορφή.

Η χωρητικότητα του πυκνωτή $C = \epsilon E_0 A/z$, τοποθετώντας τον δείκτη r στο E_r , και χρησιμοποιώντας το z για το πάχος του πυκνωτή. Η ενεργειακή πυκνότητα του ηλεκτρικού πεδίου είναι

$$u = \frac{1}{2} DE = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 E^2$$

Όπου η τελευταία ισότητα είναι σταθερή διότι D και E είναι στην ίδια κατεύθυνση, όπως στην περίπτωση των ισοτροπικών διηλεκτρικών. Αυτή η έκφραση μετασχηματίζεται χρησιμοποιώντας $E = V/z$ και δίνει:

$$U = uAz = \frac{1}{2} CV^2$$

Τη γνώριμη έκφραση της ενέργειας που αποθηκεύεται σε έναν πυκνωτή. Η δύναμη μεταξύ των ηλεκτροδίων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f = -\frac{dU}{dz}$$

Η παράγωγος της ενέργειας είναι:

$$dU = \frac{\epsilon\epsilon_0 V^2}{2} d\left(\frac{A}{z}\right) = \frac{\epsilon\epsilon_0 V^2}{2} \left(\frac{1}{z} dA - \frac{A}{z^2} dz\right)$$

Όταν η ηλεκτρική τάση είναι σταθερή. Η παράγωγος του A/z υπολογίζεται από το γεγονός ότι η τιμή αυτού παραμένει σταθερή κατά την παραμόρφωση.

$$d(A/z) = z dA + A dz = 0 \Leftrightarrow \frac{dA}{A} = -\frac{dz}{z}$$

Η οποία εισέρχεται στην πάνω σχέση και δίνει

$$dU = \frac{\epsilon\epsilon_0 V^2}{2} \frac{2A}{z^2} dz = \epsilon\epsilon_0 A E^2 dz \Leftrightarrow f = -\frac{dU}{dz} = \epsilon\epsilon_0 A E^2$$

για τη δύναμη μεταξύ των ηλεκτροδίων. Είναι πιο πρακτικό η τάση να υπολογιστεί από την τον ορισμό που εκφράστηκε στη σχέση 2.2.

$$\sigma = \frac{f}{A} = \epsilon\epsilon_0 E^2$$

Η τάση δεν επηρεάζεται άμεσα από κανέναν γεωμετρικό παράγοντα. Για αυτό τον λόγο, ο Δ.Ε.Ε μπορεί να έχει οποιοδήποτε επιθυμητό μέγεθος, οριοθετημένο μόνο από περιορισμούς κατασκευής και εφαρμογής αυτού. Η τάση είναι ανάλογη της διηλεκτρικής σταθεράς. Η διηλεκτρική σταθερά ενός διηλεκτρικού ελαστομερούς βρίσκεται τυπικά στο εύρος 2-8 E_0 . Υλικά με διηλεκτρική σταθερά $> 10.000 E_0$ υπάρχουν, είναι τυπικά κρυσταλλικά και δεν εφαρμόζονται σε Δ.Ε.Ε, μόνο σαν υλικό πλήρωσης.

Γράφοντας το ηλεκτρικό πεδίο ως $E = V/z$, είναι εμφανές ότι το πάχος του μονωτικού ελαστικού φιλμ εισέρχεται, και στην πραγματικότητα η τάση είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου τους πάχους. Αυτό ανοίγει δύο δρόμους αύξησης της τάσης. Είτε λεπταίνοντας το φιλμ, είτε αυξάνοντας την ηλεκτρική τάση.

1.9 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΜΕΣΩ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Βασικά ελαστικά μοντέλα έχουν προταθεί για να περιγράψουν τις παραμορφώσεις που επιτυγχάνονται από την εφαρμογή μιας ηλεκτρικής τάσης επιφανειακής του φιλμ. Προηγούμενα μοντέλα χρησιμοποιούσαν γραμμικές (Hookean) σχέσεις τάσης/εξάπλωσης. Αυτές οι μελέτες έδειξαν ότι οι γραμμικές μέθοδοι είναι ανεπαρκείς για να μοντελοποιήσουν τους Δ.Ε.Ε υπό μεγάλες προεντάσεις και μεγάλες παραμορφώσεις. Για την μοντελοποίηση αυτών των μεγάλων παραμορφώσεων των Δ.Ε.Ε. η έρευνα στράφηκε σε μοντέλα συνεχών μηχανισμών υπερελαστικών υλικών όπως τα μοντέλα των Mooney Rivlin και Ogden. Τέτοιες μέθοδοι έχουν δείξει να είναι επαρκείς για περιπτώσεις σταθερού ρυθμού εξάπλωσης αλλά δεν μπορούν να χειριστούν τις προκύπτουσες ιξωδοελαστικές συνέπειες όταν μεταβάλλεται ο ρυθμός εξάπλωσης.

Η εξωδοελαστική συμπεριφορά των Δ.Ε.Ε περιγράφεται χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο Mooney – Rivlin με ιξώδες Maxwell. Το μοντέλο αυτό αφορούσε ένα ομοαξονικό δοκίμιο για μικρές επιμηκύνσεις (ανοίγματα <1.8). Παρόμοιες μελέτες διεξήχθησαν για επιμηκύνσεις έως 3.0. Ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ενός “κύκλου επέκτασης” χρησιμοποιήθηκε για φαινομενικά γραμμική ιξωδοελαστικότητα και βρέθηκε σύμφωνο σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικά αποτελέσματα. Αυτά τα μοντέλα παρότι χρήσιμα δεν αποτέλεσε σπουδή στην επίδοση των Δ.Ε.Ε. και περιορίστηκαν σε σχετικά χαμηλές προεντάσεις, συγκριτικά με τυπικές εφαρμογές Δ.Ε.Ε. που μπορούν να λειτουργήσουν με προένταση έως και 5.0. Ο ρόλος της ιξωδοελαστικότητας στην αποτυχία των Δ.Ε.Ε. μελετήθηκε χρησιμοποιώντας ένα υπέρ-ελαστικό μοντέλο Ogden σε ποικίλες τιμές προέντασης, μπορούν να παραχθούν εσωτερικές ιξώδεις δυνάμεις που αποτρέπουν τις “εσω-κυκλικές” αστοχίες. “Εσω-κυκλική” αστοχία είναι ένας αστάθμητος παράγοντας που εμφανίζεται όταν η ηλεκτροστατική πίεση Maxwell γίνεται πάντα μεγαλύτερη της αντοχής του υλικού σε συμπίεση.

Ένας άλλος σημαντικός μηχανισμός που επηρεάζει την απόδοση των Δ.Ε.Ε. είναι η διαρροή του ρεύματος μέσα στο φιλμ. Αυτά τα ρεύματα έχουν μετρηθεί πειραματικά αλλά δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί μοντέλα της επιρροής αυτών στον βαθμό απόδοσης του επενεργητή.

Γενικά η κατασκευή μοντέλων με νόημα χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα από την απόδοση των Δ.Ε.Ε. είναι περιορισμένη. Τα περισσότερα δεδομένα αφορούν σε μεμονωμένες περιπτώσεις, τυπικά για μέγιστες επιμηκύνσεις και χαλάρωση τάσεων για συγκεκριμένο σετ εργαστηριακών συνθηκών. Θεωρείται σημαντικό πριν αναφερθούν τα 4 μοντέλα παρακολούθησης και γίνει ανάλυση της εξωδοελαστικής συμπεριφοράς, να περιγραφεί αναλυτικότερα το φαινόμενο αυτό στα ελαστομερή υλικά καθώς και το φαινόμενο του ερπυσμού.

1.10 ΙΞΩΔΟΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα ελαστομερή συμπεριφέρονται διαφορετικά επειδή χαρακτηρίζονται ως ιξωδοελαστικά υλικά, δηλαδή απαρτίζονται από ελαστικά και από ρευστά συστατικά.

Όταν ένα ελαστομερές φορτίζεται με στατικό φορτίο, παίρνει άμεσα την επιμήκυνση του προβλέπεται από τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης και στην συνέχεια εξακολουθεί να παραμορφώνεται με ένα πολύ βραδύτερο ρυθμό. Η αργή αυτή παραμόρφωση που συνεχίζεται μέχρι τη θραύση του υλικού, εφόσον το φορτίο είναι μεγάλο, ονομάζεται ερπυσμός.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Αναλύονται τα 4 σημαντικά μαθηματικά μοντέλα παρακολούθησης της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς των ελαστομερών υλικών

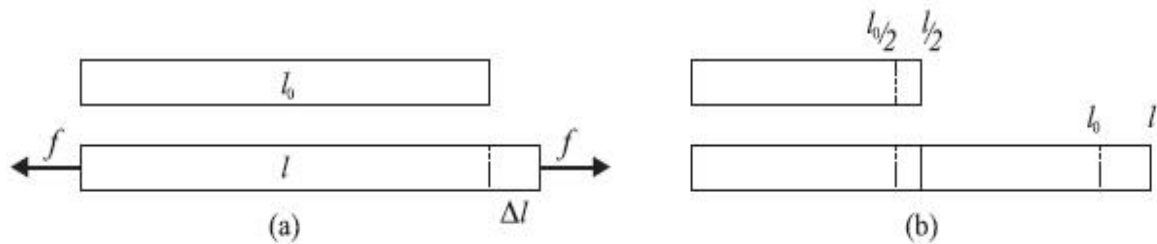
2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ HOOKE

Το μοντέλο του Hooke (επίσης γνωστό και ως μοντέλο του ελατηρίου) είναι το απλούστερο μοντέλο περιγραφής της μεταβολής του μήκους ενός κομματιού από λάστιχο στην ανταπόκριση του (response) σε μία εξωτερική δύναμη. Το μοντέλο είναι γραμμικό, προβλέποντας ότι η δύναμη f στα άκρα του δείγματος είναι ανάλογη της μεταβολής του μήκους Δl . Αυτό φαίνεται στην εικόνα 2.2(α). Η μαθηματική διατύπωση αυτής της συμπεριφοράς είναι:

$$f = k(l - l_0) = k\Delta l > l_0 \quad (2.1)$$

Όπου k η σταθερά του ελατηρίου, η οποία είναι συγκεκριμένη για δεδομένο δοκίμιο. Ένα μοντέλο περιγραφής της σχέσης μεταξύ δύναμης και μήκους είναι ακατάλληλο, καθώς εξαρτάται από το υλικό του δοκιμίου και την γεωμετρία αυτού. Προκειμένου να συγκριθούν ελαστικές ιδιότητες μεταξύ δύο υλικών, είναι απαραίτητο να αφαιρεθεί κάθε αναφορά στην πραγματική γεωμετρία του δοκιμίου, πάνω στην οποία μετρήθηκε η ιδιότητα. Αυτή η αναγκαιότητα παρουσιάζεται παρακάτω.

Εφελκύνοντας το λαστιχένιο κομμάτι στην εικόνα 2.2 (b), απαιτείται μία δύναμη $f = k_1(l-l_0)$, η οποία είναι η ίδια σε όλο το λάστιχο. Το τέλος του λαστιχένιου δοκιμίου μετακινήθηκε από l_0 στο l . Το σημείο αρχικά στο $l_0/2$ μετακινήθηκε κατά $l/2$, δίνοντας μία δύναμη $f = k_2(l/2 - l_0/2)$, η οποία πρέπει να είναι η ίδια με την προηγούμενη. Για να είναι ίσες οι δυνάμεις, $k_2 = 2 k_1$, έτσι η σταθερά της δύναμης του κοντύτερου λαστιχένιου μέρους είναι διπλάσια από του μακρύτερου κι αν είναι φτιαγμένα ακριβώς από το ίδιο υλικό. Μία ποσότητα που περιγράφει τις ελαστικές ιδιότητες ενός υλικού, ακόμα είναι ανεξάρτητη από τη γεωμετρία του δείγματος, είναι αναγκαία για την σύγκριση ιδιοτήτων μεταξύ δύο υλικών. Η διατύπωση της σταθεράς της δύναμης όπως εκφράστηκε στη σχέση 2.1 είναι συνεπώς ανάρμοστη, αλλά εισαγάγει τις σταθερές της πίεσης και της παραμόρφωσης που διέπουν το μοντέλο.



Εισάγοντας τον λόγο παραμόρφωσης $\alpha = l / l_0$ (παρακάτω ο ‘λόγος παραμόρφωσης’ και ο λόγος τεντώματος θα αναφέρονται ως α), και η παραμόρφωση $\varepsilon = \alpha - 1$, η δύναμη Hooke γράφεται ως εξής:

$$f = kl_0(\alpha - 1) = kl_0\varepsilon$$

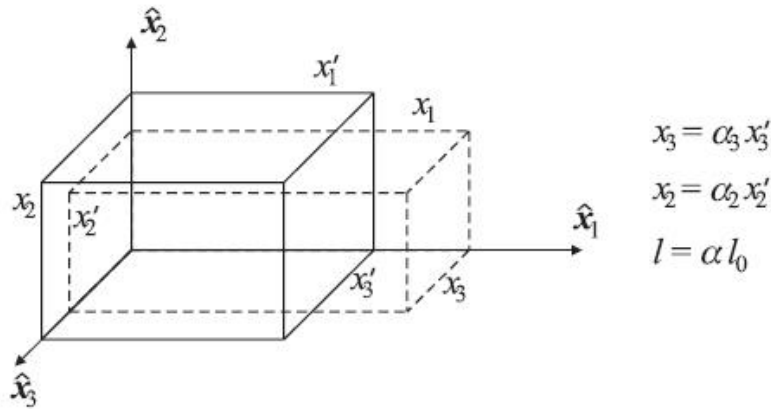
Η παραμόρφωση ορίζεται ως εξής:

$$\sigma = \frac{f}{A}$$

Όπου $A = x_2 \times x_3$ η ακριβής επιφάνεια του ελαστομερούς που προκύπτει κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της σταθεράς του ελατηρίου εισάγεται μία μεταβλητή εξαρτώμενη από το υλικό, ανεξάρτητη από τη γεωμετρία και από το moduli του εφελκυσμού, η οποία ορίζεται ως E και εκφράζει την κλίση στην αρχή της καμπύλης του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \rightarrow E \quad \text{οταν} \quad \varepsilon \rightarrow 0$$

Το ελαστομερές υλικό παραμορφώνεται μονοαξονικά κατά τρόπο ώστε οι μόνες αλλαγές στην γεωμετρία του να συντελούνται κατά μήκος των κύριων αξόνων της ελαστικής πλάκας για αυτό και η πλάκα παραμένει επίπεδη. Με άλλα λόγια δηλαδή μπορούμε να πούμε ότι η παραμόρφωση δεν περιλαμβάνει διάτμηση. Ο όγκος του ελαστομερούς θεωρείται σταθερός κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης,



Διάγραμμα 2.3: Ένα σχέδιο των παραμορφώσεων στο οποίο υπόκειται ένα ελαστομερές, μία ελαστική πλάκα κατά διάρκεια μονό αξονικού εφελκυσμού. Ενώ το ελαστομερές επιμηκύνεται κατά τη διεύθυνση \hat{x}_1 συρρικνώνεται ανάλογα κατά τις διευθύνσεις \hat{x}_2 και \hat{x}_3 .

Το ελαστομερές παραμορφώνεται με μία περιστροφική συμμετρία. Με άλλα λόγια οι παραμορφώσεις κατά μήκος των κατευθύνσεων \hat{x}_2 και \hat{x}_3 είναι ίσες. Βλέπε διάγραμμα (2.3). Ο αρχικός όγκος της ελαστομερούς πλάκας είναι ίσος $V' = l_0 \chi_2 \chi_3$ ενώ ο τελικός όγκος ορίζεται $V = l \chi_1 \chi_2$. Όπου $\chi_2 = \alpha_2 x_2'$ και $\chi_3 = \alpha_3 x_3'$. Δεδομένου ότι η παραμόρφωση είναι περιστροφικά συμμετρική κάθετα στις προεκτάσεις των διευθύνσεων $\alpha_2 = \alpha_3$ και χρησιμοποιώντας την αρχή διατήρησης του όγκου/ασυμπίεστο

$$V = V' \Leftrightarrow l_0 x_2' x_3' = l x_2 x_3 \Leftrightarrow 1 = \frac{l x_2 x_3}{l_0 x_2' x_3'} = \alpha_2^2 \alpha \Rightarrow \alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha}}$$

Η διατομή της επιφάνειας A μεταβάλλεται σε σχέση με την παραμόρφωση σύμφωνα με τη σχέση

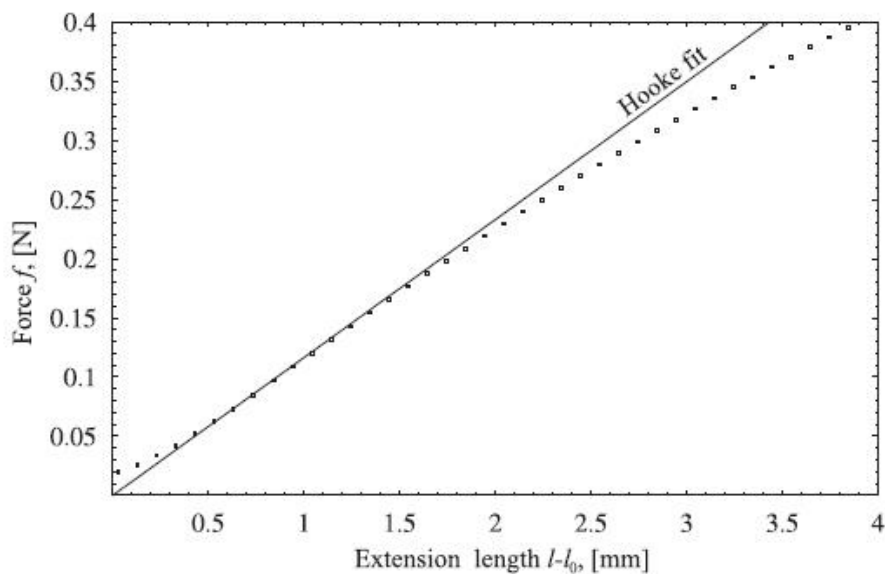
$$A = x_2 x_3 = x_2' x_3' \alpha_2^2 = \frac{x_2' x_3'}{\alpha} = \frac{A_0}{\alpha}$$

Συγκεντρώνοντας τις παραπάνω σχέσεις το μοντέλο του Hooke δίνει μία συνάρτηση υπολογισμού της τάσης σ .

$$\sigma = \frac{f}{A} = \frac{fa}{A_0} = \frac{kl_0 \varepsilon \alpha}{A_0} = \frac{kl_0}{A_0} (\varepsilon^2 + \varepsilon) = kl_0 (\alpha^2 - \alpha)$$

Από τον ορισμό του Modul εφελκυσμού προκύπτει τελικά η παρακάτω σχέση:

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon} \frac{kl_0}{A_0} (\varepsilon^2 + \varepsilon) = \frac{kl_0}{A_0} (2\varepsilon + 1) \rightarrow \frac{kl_0}{A_0} \text{ για } \varepsilon \rightarrow 0 \Rightarrow E = \frac{kl_0}{A_0}$$



Διάγραμμα 2.4: Μία αντιπαράθεση της καμπύλης του μοντέλου Hooke σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα του διαγράμματος 2.1.

Το μοντέλο Hooke μας δίνει μία εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας του εφελκυσμού, βάση της σχέσης $E = kl_0 / A_0$. Στην πραγματικότητα αυτό σημαίνει ότι το μέτρο ελαστικότητας του εφελκυσμού μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα μετρώντας την δύναμη-επιμήκυνση όταν φυσικά γνωρίζουμε τα αρχικά γεωμετρικά μήκη προ παραμόρφωσης και παράλληλα μπορεί να υπολογιστεί η σταθερά της δύναμης ως όριο της ελάχιστης τάσης. Κλείνοντας μπορούμε να πούμε ότι εφαρμόζοντας μία υπολογιστική ρουτίνα μέσω κάποιου μαθηματικού πακέτου της αγοράς πάνω στο μοντέλο Hooke μπορούμε να εκτιμήσουμε το μέτρο ελαστικότητας του εφελκυσμού και όλα τα κρίσιμα μεγέθη που σχετίζονται με την παραμόρφωση του ελαστομερούς.

2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΝΕΟ ΗΟΟΚΕΑΝ

Η απλούστερη εξίσωση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης ενός ελαστικού φορέα είναι η Neo Hookean η οποία θεωρεί ότι η τάση είναι ανάλογη της παραμόρφωσης.

$$\sigma_{ij} = GB_{ij} \quad 2.4$$

Όπου G είναι το μέτρο της ελαστικής διάτμησης. Όπου σ_{ij} ο τανυστής των τάσεων και B_{ij} ο τανυστής δείκτης της τάσης. Το μοντέλο Neo Hookean είναι μία επέκταση ενός μονοδιάστατου μοντέλου σε τρισδιάστατο της συμπεριφοράς της παραμόρφωσης ενός ελαστικού φορέα. Το μοντέλο Neo Hookean είναι γραμμικό αλλά η γραμμική σχέση μεταξύ τάσης και έντασης αντικαθιστά τη γραμμική σχέση μεταξύ δύναμης και παραμόρφωσης του απλού μοντέλου Hooke. Συνολική τάση αποδίδεται από τη σχέση 2.4 και είναι

$$T_{ij} = p\delta_{ij} + GB_{ij} \quad 2.5$$

Όπου δ_{ij} είναι ένας χαρακτηριστικός πίνακας, και ο τανυστής B_{ij} είναι:

$$B_{ij} = \begin{pmatrix} a_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & a_1^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & a_1^{-1} \end{pmatrix}$$

Οι οριακές συνθήκες καθορίζουν το p για ένα δεδομένο πρόβλημα. Η σχέση τάσης παραμόρφωσης για το μοντέλο Neo Hookean υπολογίζεται για περιπτώσεις μόνο αξονικών φορέων. Οι συντελεστές της τάσης του ελαστομερούς είναι

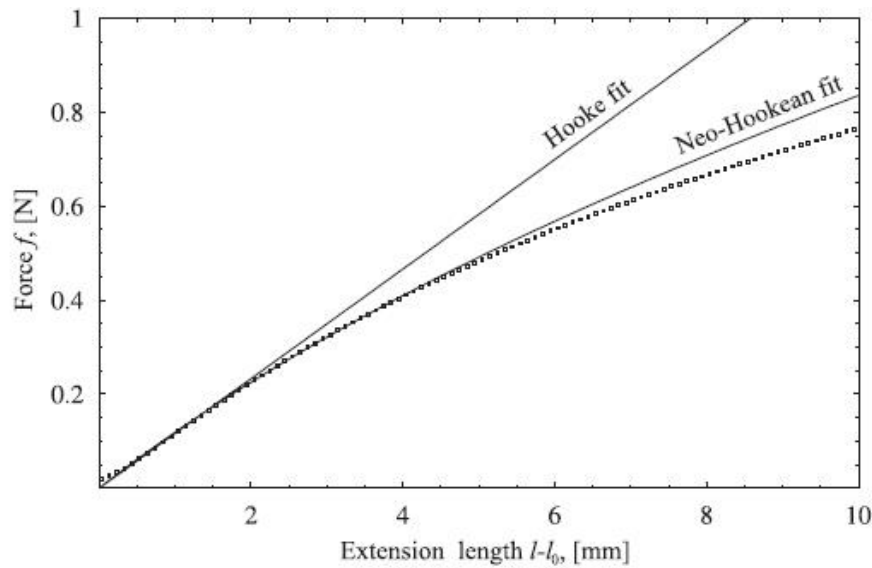
$$T_{11} = -p + Ga_1^2 T_{22} = T_{33} = -p + \frac{G}{a_1}$$

Δεδομένου ότι οι πλευρές του ελαστομερούς παραμορφώνονται ελεύθερα μέχρι το σημείο ισοροπίας η συνολική τάση σε αυτές τις κατευθύνσεις τελικά πρέπει να είναι μηδενική. Επομένως στην κατεύθυνση του $\hat{\chi}_2$

$$T_{22} = 0 = \sigma_{22} - p \Rightarrow p = \sigma_{22}$$

Όταν η αξία της μεταβλητής p είναι γνωστή, η συνολική τάση κατά την κατεύθυνση $\hat{\chi}_1$ ισούται:

$$T_{11} = \sigma_{11} - \sigma_{22} = G a_1^2 - G \frac{1}{a_1} = G \left(a_1^2 - \frac{1}{a_1} \right)$$



Διάγραμμα 2.5: Αντιπαραβάλλεται το μοντέλο Neo Hookean επάνω σε ένα διάγραμμα δύναμης παραμόρφωσης και παρουσιάζει μία καλή προσέγγιση για τα πρώτα 5 mm (σε αντίθεση με το απλό μοντέλο Hooke που έδινε για τα πρώτα 1.5 mm) το οποίο αντιπροσωπεύει το 33% της παραμόρφωσης.

Η δύναμη που μετρείται στις άκρες του ελαστομερούς προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την συνολική τάση στις άκρες με την επιφάνεια

$$a_1 = x_2 x_3 = x_2' x_3' a_1^{-1}$$

$$f_1 = T_{11} a_1 = x_2' x_3' G \left(a_1 - \frac{1}{a_1} \right) \quad 2.6$$

Όπου οι αρχικές διαστάσεις του ελαστομερούς είναι χ_2' και χ_3' .

Το μέτρο ελαστικότητας του εφελκυσμού υπολογίζεται από τον ορισμό του:

$$\frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left[G \left(a_1 - \frac{1}{a_1} \right) \right] \rightarrow 3G \text{ για } \varepsilon \rightarrow 0 \Rightarrow E = 3G$$

Όπου χρησιμοποιήθηκε $\varepsilon = a_1 - 1$.

Με αυτό το μοντέλο μπορεί να γίνει μία βελτιωμένη προσέγγιση της συμπεριφοράς της παραμόρφωσης με το απλό Hook χρησιμοποιώντας πάλι κάποιο ευρέως

διαδεδομένο μαθηματικό πακέτο (mathcad) μπορούμε να υπολογίσουμε τη σταθερά του εφελκυσμού με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με το απλό μοντέλο του Hooke.

2.3 ΜΟΝΤΕΛΟ MOONEY-RIVLIN

Ένα ακόμα πιο ακριβές μοντέλο που περιγράφει τη σχέση τάσης παραμόρφωσης ενός ελαστικού φορέα και προκύπτει μέσα από μία ανάλυση ελαχιστοποίησης της ενέργειας της παραμόρφωσης. Πρόκειται για ένα ενεργειακό μοντέλο όπου η ενέργεια της παραμόρφωσης, Φ , προκύπτει ως συνάρτηση των στοιχείων του τανυστή των τάσεων

$$I_1^B = a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 \frac{1}{a_1} \quad I_2^B = \frac{1}{a_1^2} + \frac{1}{a_2^2} + \frac{1}{a_3^2}$$

$$\varphi = C_1(I_1^B - 3) + C_2(I_2^B - 3)$$

Η τάση τελικά προκύπτει ως η παράγωγος της ενέργειας ως συνάρτηση του λόγου επιμήκυνσης.

$$T_{ii} = a_i \frac{\partial \varphi}{\partial a_i} - p = a_i(C_1 2a_i + C_2(-2) \frac{1}{a_i^3}) - p = 2C_1 a_i^2 + 2C_2 \frac{1}{a_i^2} - p \quad (2.7)$$

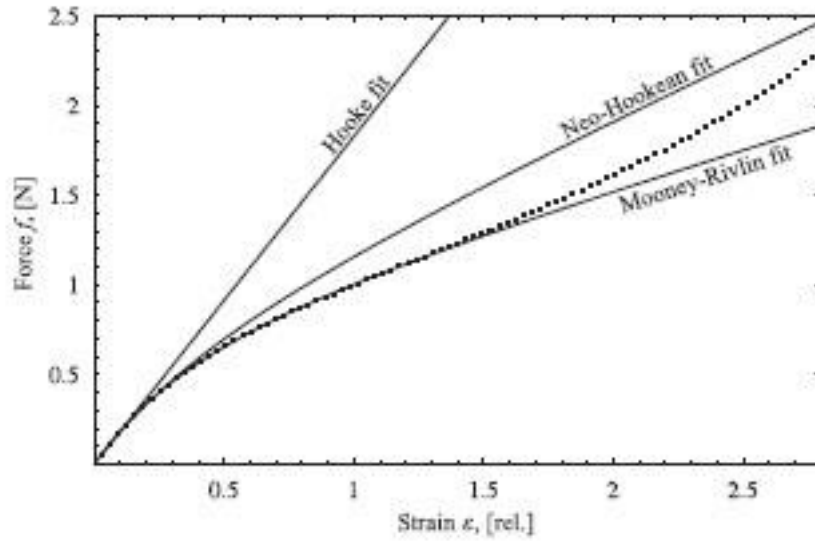
Και δύναται να γραφτεί και σε διανυσματική μορφή

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + 2C_1\mathbf{B} + 2C_2\mathbf{B}^{-1}$$

$$T_{ij} = -p\delta_{ij} + 2C_1 B_{ij} + 2C_2 B_{ij}^{-1} \quad (2.8)$$

Για την περίπτωση του ασυμπίεστου.

Το μοντέλο Neo Hookean προκύπτει όταν η $C_2=0$ και $2C_1=G$. Το μοντέλο Neo Hookean είναι προφανώς μονοπαραμετρικό μοντέλο ενώ το Mooney-Rivlin εμπεριέχει δύο παραμέτρους.



Διαγραμμα 2.6: Η εκτίμηση μέσω του μοντέλου MOONEY έχει μία ακρίβεια της τάξης του 150% της παραμόρφωσης. Σαφώς πολύ βελτιωμένο σε σχέση με τα μοντέλα Hookean και Neo Hookean.

2.4 ΜΟΝΤΕΛΟ OGDEN

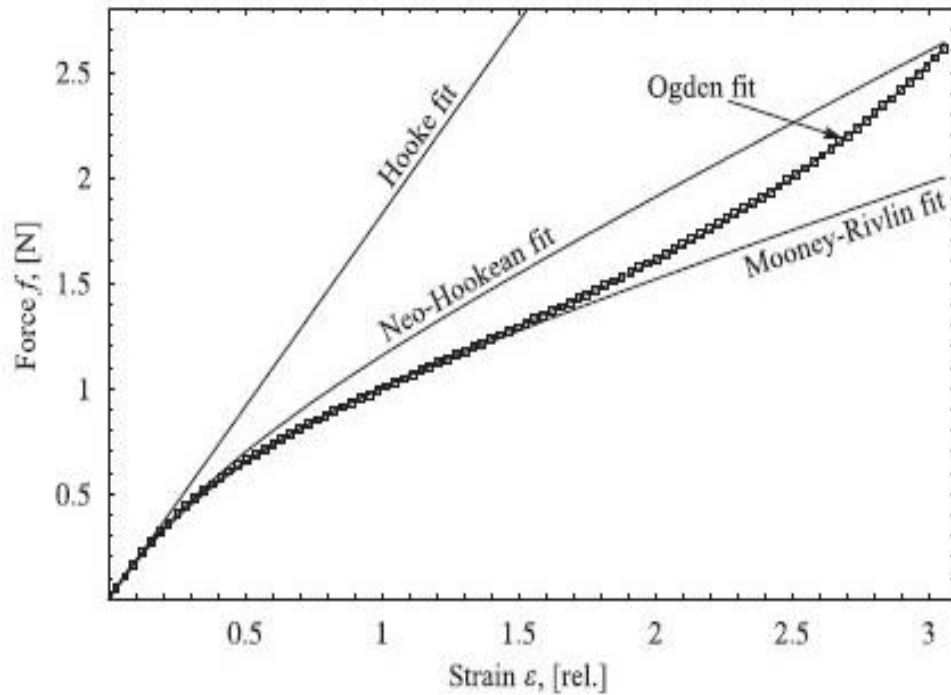
Μία προσεκτική ανάγνωση του διαγράμματος 2.6 αποκαλύπτει ότι το μοντέλο του Mooney-Rivlin δεν περιγράφει ακριβώς τη συμπεριφορά του ελαστομερούς καθ'όλο το μήκος του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περιοχή του 150% της παραμόρφωσης και πλέον δεν ακολουθεί τα πειραματικά αποτελέσματα. Η συμπεριφορά του μοντέλου στην περιοχή αυτή εμφανίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο *strainhardening*. Αυτή η υστέρηση του μοντέλου Mooney-Rivlin αντιμετωπίστηκε με μία θεωρία που εισήγαγε ο Ogden. Παρόμοια με τους Mooney και Rivlin μία σχέση τάσης-παραμόρφωσης προκύπτει ως συνάρτηση της ενέργειας παραμόρφωσης. Η παραμόρφωση εκφράζεται από τη σχέση

$$\varepsilon_1 = \frac{\alpha_1^k - 1}{k} k \neq 0$$

k είναι πραγματικός μη μηδενικός αριθμός.

Παρατηρούμε στη σχέση πως η παραμόρφωση δεν εξαρτάται γραμμικά από τον λόγο επιμήκυνσης και ο αμετάβλητος τανυστής της παραμόρφωσης μπορεί να γραφτεί ως:

$$\varphi(k) = \frac{\alpha_1^k + \alpha_2^k + \alpha_3^k - 3}{k}$$



Διάγραμμα Ogden 2.7: Το μοντέλο Ogden προβλέπει τη συμπεριφορά του ελαστομερούς κατά μήκος του ελαστικού φορέα με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. Ο Ogden Χρησιμοποίησε ένα τρισδιάστατο μοντέλο και κατάφερε να προσομοιάσει πειραματικά δεδομένα επιμήκυνσης της τάξης του 750%.

Model	Stress	Tensile modulus	Fit value
Hooke	$\frac{kI_0}{A_0}(\epsilon^2 + \epsilon)$	$\frac{kI_0}{A_0}$	1.13 MPa
Neo-Hookean	$G\left(\alpha^2 - \frac{1}{\alpha}\right)$	$3G$	1.22 MPa
Mooney-Rivlin	$\left(2C_1 - \frac{2C_2}{\alpha}\right)\left(\alpha^2 - \frac{1}{\alpha}\right)$	$3(2C_1 - 2C_2)$	1.32 MPa
Ogden	$\mu_1\left(\alpha^{k_1} - \alpha^{-k_1}\right)$	$\mu_1 k_1$	1.70 MPa

Πίνακας 2.1: αποτελέσματα των τεσσάρων μοντέλων που παρουσιάστηκαν για τη συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης.

Όταν αναφέρονται τιμές της σταθεράς του μέτρο ελαστικότητας του εφελκυσμού είναι σημαντικό να ορίσουμε βάση ποιού μοντέλου υπολογίστηκε και ειδικότερα στα πειράματα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη διαδικασία υπολογισμού. Συνήθως η τιμή της σταθεράς εφελκυσμού προκύπτει από το απλό μοντέλο Hooke το οποίο μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για μικρές παραμορφώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΩΝ

Τα διηλεκτρικά ελαστομερή υπόσχονται μια πληθώρα εφαρμογών τόσο στην απλή καθημερινή μας ζωή όσο και σε πιο εξειδικευμένους τομείς όπως αυτούς της βιομηχανίας, των επιστημών ακόμα και του στρατού. Το χαμηλό τους κόστος, το μικρό τους βάρος τα καθιστά εύχρηστα σε πολλούς τομείς. Εφαρμογές έχουν γίνει στους τομείς της μηχανικής, της ιατρικής (κατασκευή τεχνητών μυών), των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας-συλλέκτες και προσπάθειες γίνονται για κινητήρες μεταβλητής χωρητικότητας και γεννήτριες που θα λειτουργούν με την αλλαγή του σχήματος των πολυμερών όταν διεγερθούν ηλεκτρικά.

3.1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΙΑΤΡΙΚΗ

Εδώ και δεκαετίες, οι μηχανικοί που φτιάχνουν κάθε λογής κινητήρες αναζητούν το τεχνητό ισοδύναμο του μυός. Τα ηλεκτροενεργά πολυμερή (ElectroActivePolymers-EAPs) θα είναι η βάση για τους μελλοντικούς τεχνητούς μυς ακόμα και για τεχνητές καρδιές. Τα EAPs μπορούν να παραμορφωθούν επανηλειμμένα με την εφαρμογή εξωτερικής τάσης και γρήγορα επανέρχονται στην αρχική τους μορφή όταν αντιστρέφεται η πόλωση. Μεταβάλλοντας το μήκος τους κάτω από την **επίδραση νευρικών ερεθισμάτων**, οι μύες μπορούν να εξασκήσουν δυνάμεις ικανές ώστε να προκαλέσουν από ένα βλεφαρισμό, μέχρι την άρση ενός βαριού αντικειμένου. Οι ερευνητές με την μελέτη τους, πάνω στα ηλεκτροενεργά πολυμερή προσπαθούν να δώσουν με αυτά μικρότερες, ελαφρότερες και φτηνότερες εναλλακτικές λύσεις σε μια σειρά εφαρμογών στην προσθετική μελών. Ιδιαίτερες προσπάθειες καταβάλλονται για να μειωθεί η απαιτούμενη ηλεκτρική τάση και να εξασφαλιστεί η μακρόχρονη λειτουργία τους χωρίς να υπάρχει πτώση των ποιοτικών και μηχανικών λειτουργιών τους. Οι σημερινές έρευνες εστιάζονται και στην χρήση EAPs για την κατασκευή ανθρωπόμορφων ρομπότ.

Οι πιο παλιές εφαρμογές τεχνητών μελών εκμεταλλεύονταν την ιδιότητα του ατόμου να κινεί τις περιβάλλουσες ομάδες μυών της προβληματικής περιοχής ή χρησιμοποιούνταν ηλεκτρικοί κινητήρες ή άλλους κοινούς κινησιαγόνους μηχανισμούς που είχαν αρκετά μειονεκτήματα. Κάποια από αυτά είναι το βάρος, ο όγκος και ήταν τελικά δύσχρηστα. Εν αντίθεση, τα ηλεκτροενεργά ελαστομερή παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Αποκρίνονται ταχύτατα στα ηλεκτρικά σήματα.
- Αποδίδουν ισχυρές μηχανικές δυνάμεις
- Δε χρειάζονται προστατευτικά περικαλύμματα

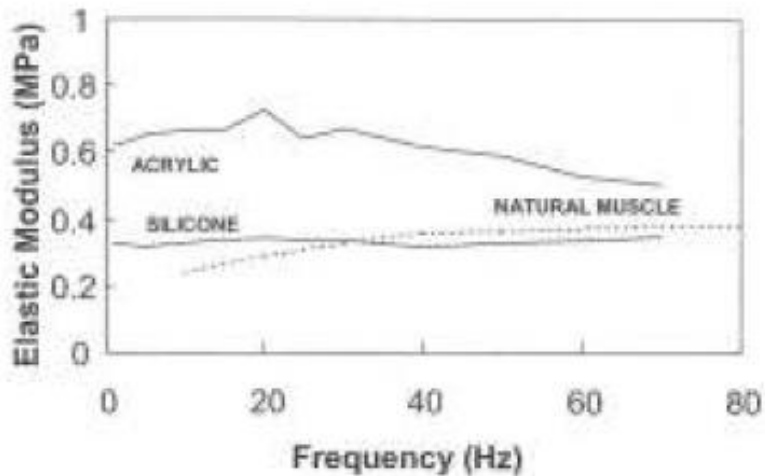
- Απαιτούν μικρής έντασης ρεύμα για να παραμείνουν στην κατάσταση στην οποία βρίσκονται

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται κατασκευή ανθρώπινου σκελετικού βραχίονα βασισμένο σε διηλεκτρικά ελαστομερή υλικά.

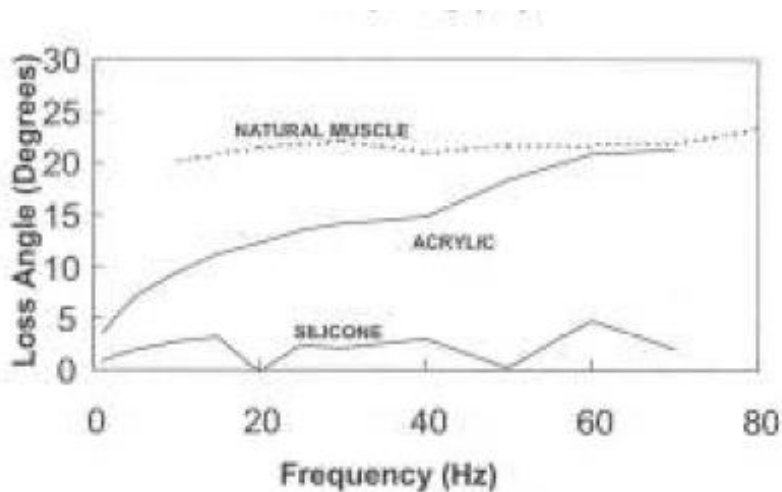


Σχήμα 3.1.1 Μοντέλο ενός ανθρώπινου σκελετικού βραχίονα από “τεχνητούς μύες”. Ακόμα βρίσκεται σε ερευνητικό επίπεδο αλλά οι ελπίδες για γρήγορη και αποτελεσματική εφαρμογή σε ανθρώπους είναι δεδομένες.

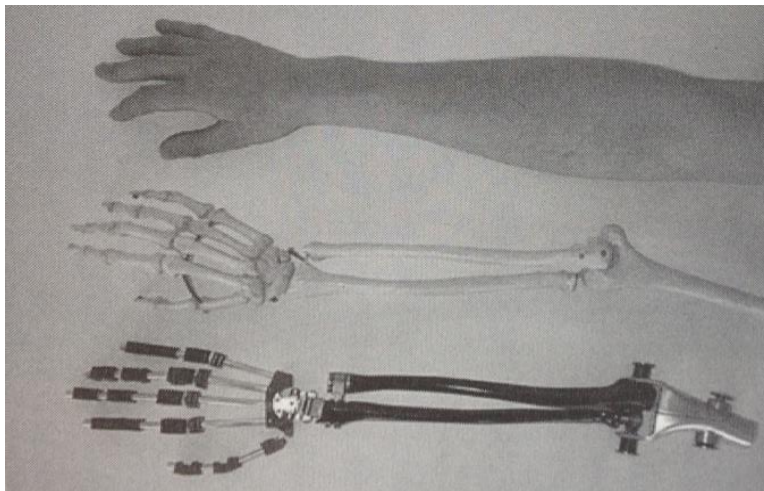
Πειράματα και συγκρίσεις για τις ιξωδοελαστικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας γωνία μηχανικών απωλειών), μεταξύ φυσικών μυών κατσαρίδας (ποδιών) και δυο διηλεκτρικών ελαστομερών υλικών παρουσιάζονται στα επόμενα δυο διαγράμματα 3.1.2 και 3.1.3.



Σχήμα 3.1.2. Παρουσίαση μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει της συχνότητας για φυσικούς μυς κατσαρίδας και δυο διηλεκτρικών ελαστομερών ακρυλικού και σιλικόνης.



Σχήμα 3.1.3. Παρουσίαση γωνίας μηχανικών απωλειών συναρτήσει της συχνότητας για φυσικούς μυς κατσαρίδας και δυο διηλεκτρικών ελαστομερών ακρυλικού και σιλικόνης.



Σχήμα 3.1.4
Τεχνητά μέλη

Ενεργές ορθωτικές και προσθετικές θεραπευτικές εφαρμογές

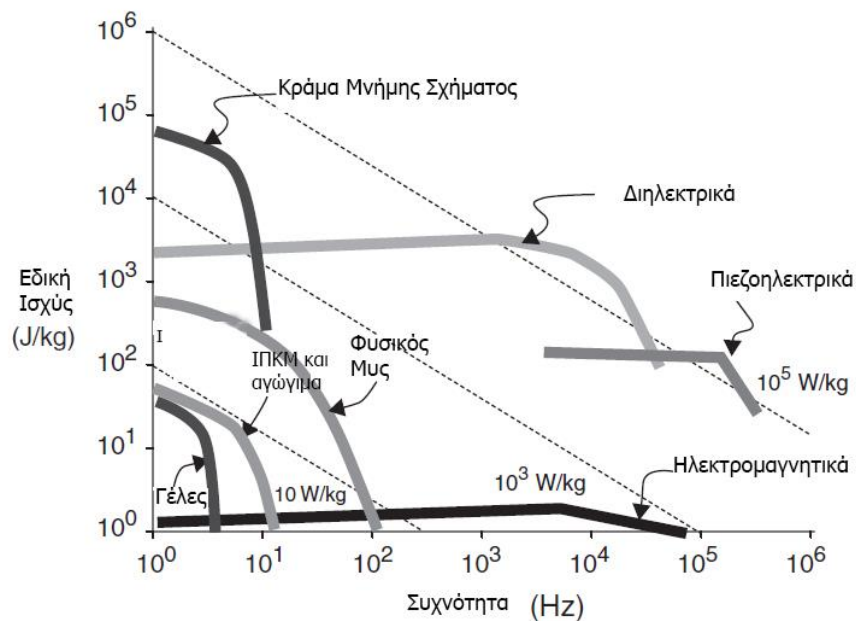
Οι Διηλεκτρικοί Ελαστομερείς Επενεργητές (ΔΕΕ) είτε χρησιμοποιούνται ως τεχνητοί μύες είτε ως αντιακαταστάτες των συμβατικών επενεργητών παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες για χρήση σε μοντέρνες ενεργές ορθωτικές και προσθετικές θεραπευτικές εφαρμογές. Τέτοιοι επενεργητές είναι σχεδόν παρόμοιοι σε λειτουργία και βιο-μηχανική με τον φυσικό μυ, συμπεριλαμβάνοντας την δυνατότητα να παράγουν την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα που απαιτείται για παρόμοιες με τον φυσικό μυ επενεργήσεις απλοποιώντας τον βιομημητικό και βιο-εμπνευσμένο σχεδιασμό. Επιπλέον οι ΔΕΕ είναι ικανοί για επενέργηση πολλαπλών κατευθύνσεων, επιτρέποντας εξωτερικό και εμφυτεύσιμο σχεδιασμό που δεν είναι τόσο κατάλληλος για τις συμβατικές τεχνολογίες επενέργησης. Παραδείγματα περιλαμβάνουν προσθετικά χέρια κινούμενα από τεχνητούς μύες, ενεργές ορθώσεις αστραγάλου-ποδιού και συσκευές κοιλιακής υποβοήθησης. Ενώ οι προκλήσεις υπάρχουν σήμερα για την χρήση διηλεκτρικών ελαστομερικών βάσεων επενεργητών για το πεδίο της βιοιατρικής, η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες για την ανάπτυξη προηγμένων ορθώσεων και προθέσεων, που οδηγεί σε ένα σημαντικό όφελος για τα άτομα με σωματικές αναπηρίες και ειδικές ανάγκες.

Οι ΔΕΕ είναι ιδιαίτερα υποσχόμενοι για ορθωτικές και προσθετικές εφαρμογές λόγω της ομοιότητας τους με τους φυσικούς νύες. Τα πιθανά πλεονεκτήματα τους συγκριτικά με τις συμβατικές επενεργητικές τεχνολογίες περιλαμβάνουν:

- Ελαφρότητα: Οι ελαστομερικοί επενεργητές ενώ είναι ικανοί για την ίδια ισχύ ζυγίζουν πολύ λιγότερο σε σχέση με ανταγωνιστικές ηλεκτρικές τεχνολογίες επενέργησης, επιτρέποντας πιο άνετη και φυσική βιομημητική εφαρμογή καθώς και τη χρήση των επενεργητών σε ορθωτικά συστήματα αυξάνοντας τα σημεία του σώματος/άκρα παραδοσιακά ανέκανα να υποστηρίξουν το βάρος του συστήματος.
- Επενέργηση πολλαπλών κατευθύνσεων: Επίπεδα φύλλα πολυμερικών διηλεκτρικών επενεργητών είναι ικανά να αναλάβουν περίπλοκες (κυρτές) διαμορφώσεις και να επεκταθούν σε δύο επίπεδες κατευθύνσεις ή να επενεργήσουν σε κατευθύνσεις εκτός επιπέδου, σε σχέση με το φύλλο, δημιουργώντας δύναμη κάθετη προς την καμπύλη. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να φανεί πολύ βολική για εμφυτευτικές συσκευές όπου, για παράδειγμα, είναι επιθυμητή η μίμηση της συμπεριφοράς ενός μη επίπεδου μυϊκού συστήματος όπως οι καρδιακοί ή οι αναπνευστικοί διαφραγματικοί μύες.
- Κλιμάκωση επενέργησης: Οι ΔΕΕ είναι σχετικά μοναδικοί στο γεγονός ότι οι στίβες από διάφορους επενεργητές μπορούν στην πράξη να χρησιμοποιηθούν

εν παραλλήλω προς αύξηση της δύναμης εξόδου και σε σειρά για αύξηση της μετατόπισης.

- Χαμηλό κόστος: Οι Διηλεκτρικοί Ελαστομερείς Επενεργητές είναι δυνητικά αρκετά φτηνοί ώστε να μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν, μετριάζοντας απαιτήσεις αξιοπιστίας.
- Θόρυβος : Οι συσκευές που λειτουργούν με βάση τους τεχνητούς μύες μπορούν να λειτουργούν αθόρυβα μια σημαντική ανησυχία για τη χρηστικότητα και την ποιότητα ζωής εκ μέρους του χρήστη.
- Βιοσυμβατότητα : Οι παρόμοιες φυσικές ιδιότητες των ΔΕΕ σε σύγκριση με τους φυσικούς μαλακούς ιστούς του ανθρώπινου σώματος θα μπορούσε να βοηθήσει στη βιοσυμβατότητα σε σχέση με ορθωτικά και προσθετικά εμφυτεύματα. Επιπρόσθετα, τα διηλεκτρικά ελαστομερή υλικά όπως οι σιλικόνες έχουν ήδη αποδειχθεί ότι είναι βιο- ασφαλή και βιοσυμβατά και έχουν ένα αποδεδειγμένο ιστορικό για εσωτερική και εξωτερική χρήση.



Σχήμα 3.1.6: Σύγκριση διαφόρων επενεργητών σε σχέση με τον φυσικό μυ, αναφορικά με την ενεργειακή ισχύ και το φάσμα των συχνοτήτων.

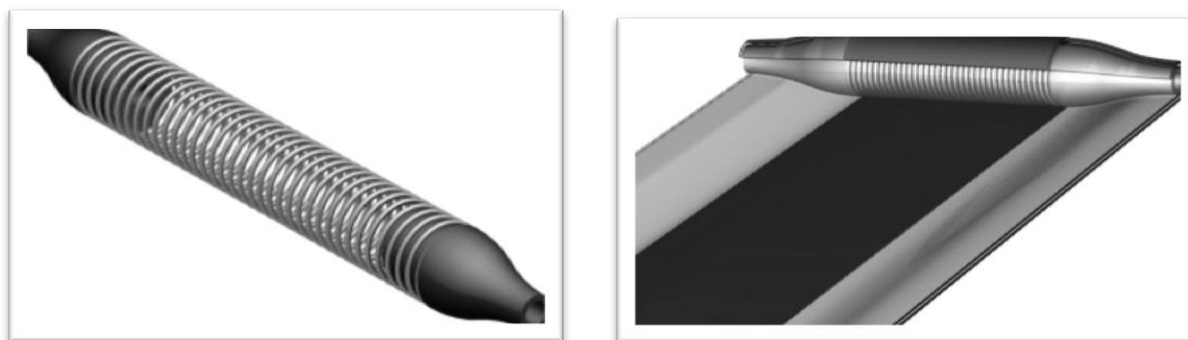
3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΤΡΟΝΙΚΗ

Εμπνευσμένοι από την φύση οι ερευνητές προσπαθούν να φτιάξουν μηχανικές συσκευές (ρομπότ) που αντιγράφουν τις κινητικές λειτουργίες του ανθρώπου και των ζώων. Η απευθείας μετάδοση κίνησης μέσω απλών μηχανισμών εκτός ότι ενεργειακά είναι πολύ αποδοτικό είναι επίσης απλό στην κατασκευή του και στην λειτουργία του. Παρακάτω παρουσιάζονται ρομποτικές εφαρμογές

κατασκευασμένες με διηλεκτρικά ελαστομερή υλικά αντιγράφοντας την λειτουργία των φυσικών μυών τόσο του ανθρώπου όσο και άλλων ζώωντων πλασμάτων.

Επενεργητές τύπου Springroll

Μία νέα αρκετά υποσχόμενη γεωμετρία επενεργητή η οποία χρησιμοποιεί Διηλεκτρικά Ελαστομερή καλείται springroll επενεργητής. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής αυτού του τύπου επενεργητών μία διαξονική προ-φορτισμένη και διπλής επίστρωσης επιφάνεια φιλμ, τυλίγεται γύρω από ένα συμπιεσμένο μεταλλικό σπειροειδές έλασμα. Στο Σχήμα 3.3.4 φαίνεται αυτή η γεωμετρία επενεργητή.



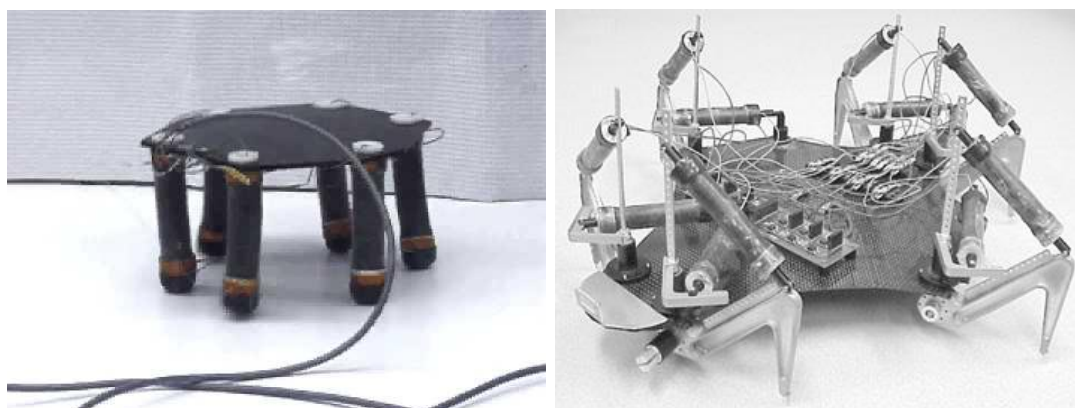
Σχήμα 3.2.1 Springroll επενεργητής

Μέχρι στιγμής η δυνατότητα επιμήκυνσης των springroll επενεργητών φέρεται να είναι στο εύρος του 26%. Έχουν καταμετρηθείδυνάμεις έως και 15 Newton. Υλοποιώντας ένα βίο-μιμητικό ρομπότ που περπατάει ,συμπεριλαμβανομένου των springroll επενεργητών στη θέση των ποδιών του ρομπότ, αντιλαμβανόμαστε την ισχύ αυτών των επενεργητών σε εφαρμογές όπου απαιτείται η πολύ-λειτουργικότητα. Συναφής springroll επενεργητές και balloonshell επενεργητές έχουν υλοποιηθεί από το γκρουπ του Kovacs στο εργαστήριο αντοχής και τεχνολογίας στο EMPA με σκοπό την ενσωμάτωση της τεχνολογίας των επενεργητών σε διάφορες κατασκευές.

Αν συγκρίνουμε τον επίπεδο με τον springroll επενεργητή , ο πρώτος εμφανίζει μέγιστη μετατόπιση 20% και ο δεύτερος 6% σε εφαρμοζόμενο πεδίο 50MV/m. Το βασικό μειονέκτημα αυτού του τύπου επενεργητών είναι η κατασκευαστική δυσκολία που απαιτείται σε σχέση με μία επίπεδη γεωμετρία.

Σκελετώδεις ρομπότ

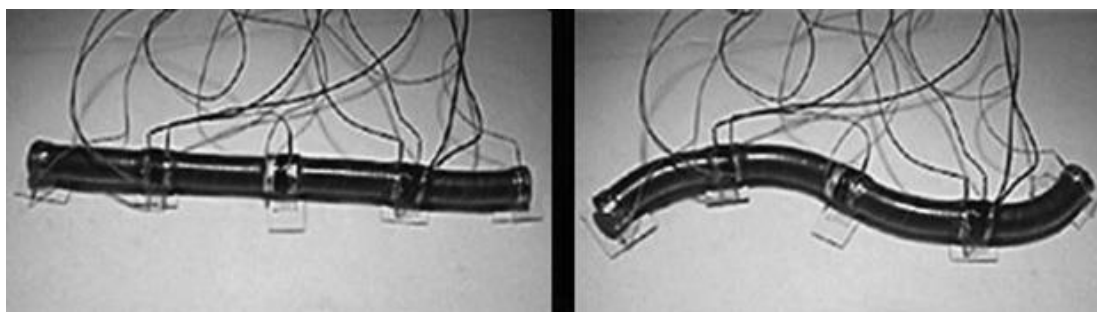
Το συγκεκριμένο ρομπότ όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3.4 έχει πόδια που είναι κατασκευασμένα με διηλεκτρικό ελαστομερή υλικό σε περιτύλιξη, οι διαστάσεις του είναι 18*18*30 εκ. και συνολικό του βάρος 292 γραμ. Το ρομπότ έχει κατασκευαστή από 6 'πόδια' διηλεκτρικού ελαστομερούς υλικού και το πλαίσιο που τα δένει καθώς και τα καλώδια που συνδέονται με το όλο σύστημα. Όταν κινείται ενεργοποιούνται τρία 'πόδια', με αυτόν τον τρόπο αντίστοιχα παρέχεται και εμπρός και πίσω κίνηση. Η μέγιστη ταχύτητα του είναι 13,6 εκ./δευτ. στα 7 Hz με 5,5 KV τάση ενεργοποίησης. Στο μέλλον τέτοια ρομπότ θα μπορούν να εκτελούν παρόμοιες κινήσεις με αυτές των αραχνών και των αστεριών.



Σχήμα 3.2.2. Εφαρμογές διηλεκτρικών ελαστομερών (roll) για την κατασκευή ρομπότ

Σερπαντίνα (φίδι) ρομπότ:

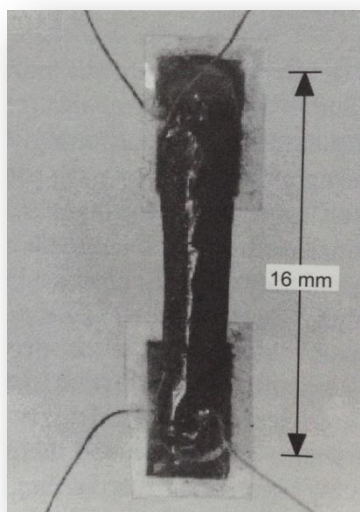
Αυτό το ρομπότ μέσω της κάμψης μπορεί να αναπαραγάγει αποτελεσματικά την κίνηση φιδιού, σκουληκιού. Πολλοί ερευνητές προσπάθησα να κινήσουν ρομποτικές συσκευές με κινήσεις τύπου φιδιού (ελικοειδής κινήσεις) μέσα από ηλεκτροκινητήρες και οδοντωτούς τροχούς πράγμα που ήταν πολύπλοκο και το κόστος μεγάλο, επίσης δεν μπορούσαν να αναπαραγάγουν την δυναμική μια τέτοιας κίνησης με αποτέλεσμα να είναι ανέφικτο να ξεπερνούν ένα ευρύ φάσμα εμποδίων κατά την κίνηση τους. Στην Εικόνα 3.3.5 δείχνει πως με την συγκεκριμένη διάταξη των διηλεκτρικών ελαστομερών μπορούμε να καταφέρουμε τις συγκεκριμένες ελικοειδείς κινήσεις.



Σχήμα 3.2.3 ρομπότ τύπου φιδιού.

Κάμπια ρομπότ

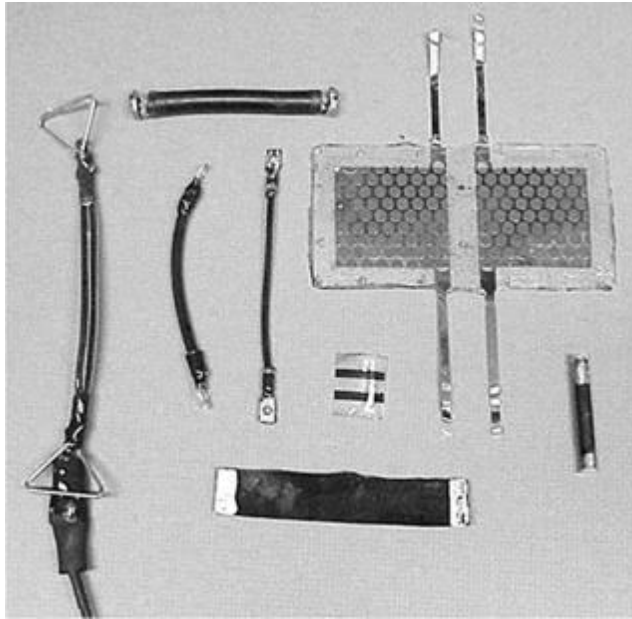
Στο σχήμα 3.2.4 παρουσιάζεται μια μικρή ρομποτική συσκευή τύπου κίνησης κάμπιας, με μέγεθος σε επιμήκυνση 16 χιλ. Έχει κατασκευαστή από σιλικόνη σε ρολό και στα δυο άκρα του έχουμε δακτυλίδια ηλεκτροστατικής φόρτισης που επιτρέπουν την κίνηση τόσο σε οριζόντιο όσο και σε κατακόρυφο επίπεδο με μέγιστη ταχύτητα τα 10 εκα./ δευτ. Αυτές οι ρομποτικές συσκευές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε επιθεωρήσεις μέσα σε στενούς αγωγούς.



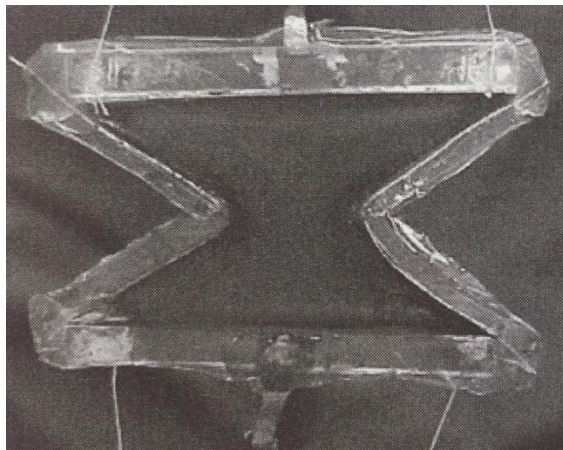
Σχήμα 3.2.4 ρομποτική κάμπια από διηλεκτρική ελαστομερή σιλικόνη σε σχήμα ρολού με ηλεκτροστατικά δακτυλίδια στις δυο άκρες του.

3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

Μελέτες γίνονται για την δημιουργία αισθητήρων από διηλεκτρικά ελαστομερή καθώς έχουν μια πληθώρα συγκριτικών πλεονεκτημάτων με την συμβατική τεχνολογία που χρησιμοποιείται ως σήμερα. Σε πολλές εφαρμογές οι αισθητήρες μπορούν να αντικαταστήσουν πιο ογκώδης και πιο δαπανηρές συσκευές, όπως ποτενσιόμετρα και κωδικοποιητές. Στην Εικόνα 3.3.1 φαίνονται οι βασικές κατηγορίες αισθητήρων διηλεκτρικών ελαστομερών.



Σχήμα3.3.1 Βασικές κατηγορίες αισθητήρων διηλεκτρικών ελαστομερών



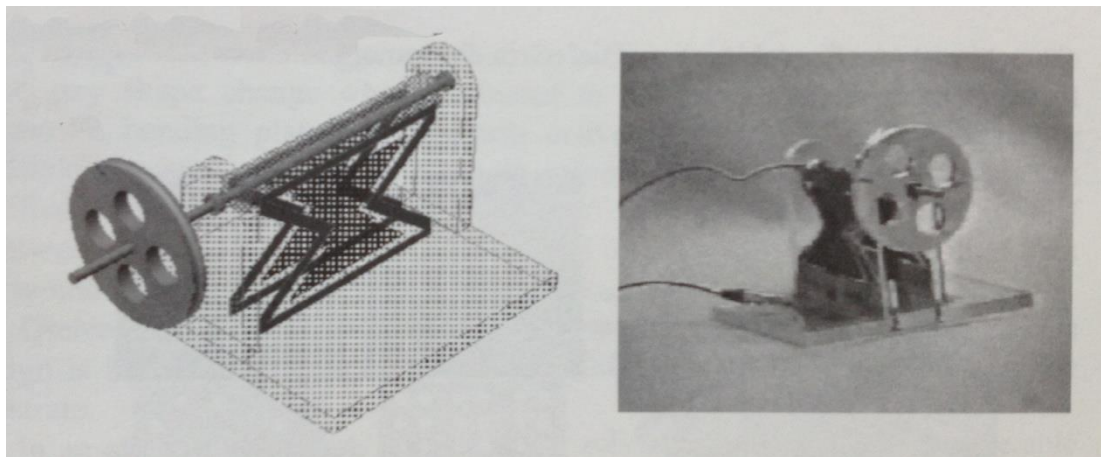
Σχήμα 3.3.2 bow-tie επενεργητές απο φίλμ σιλικόνης

3.4 ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Η μεγάλη παραγωγή ενέργειας ανά κύκλο και η ταχύτητα της ανταπόκρισης των διηλεκτρικών ελαστομερών μπορεί να αξιοποιηθεί για να κατασκευαστούν κινητήρες που προσφέρουν υψηλή ισχύ και μεγάλη ροπή. Για να πούμε με βεβαιότητα ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εμπορικές εφαρμογές πρέπει να υπερβούν την ισχύ των ηλεκτρομαγνητικών κινητήρων.

Στην εικόνα 3.4.1 φαίνεται ένας κινητήρας ως παράδειγμα. Ένα ζευγάρι bow-tie επενεργητές όπως είναι στην Εικόνα λειτουργούν με διαφορά φάσεις 180 μοίρες και ταλαντεύονται σε σταθερό άξονα. Η κίνηση ταλάντωσης ανορθώνεται μέσω ενός συμπλέκτη μονής κατεύθυνσης για να παράγει περιστροφική κίνηση. Αυτό το μοτέρ έχει φτάσει σε περιστροφική ταχύτητα μέχρι τις 650 στροφές/λεπτό. Πρόσφατα

κατασκευάστηκε κινητήρας με απόδοση 4 W μόλις στις 100 στροφές/λεπτό. Αν και δεν έχει επιτευχθεί ισχύς ανάλογη με ένα ηλεκτρομαγνητικό κινητήρα η ιδιαιτερότητα να αποδίδουν σχετικά υψηλή ισχύ σε χαμηλές στροφές είναι ένα ενθαρρυντικό στοιχείο για την περαιτέρω εξέλιξη τους.



Σχήμα3.4.1 Απλώς περιστροφικός κινητήρα με βάση τα διηλεκτρικά ελαστομερή

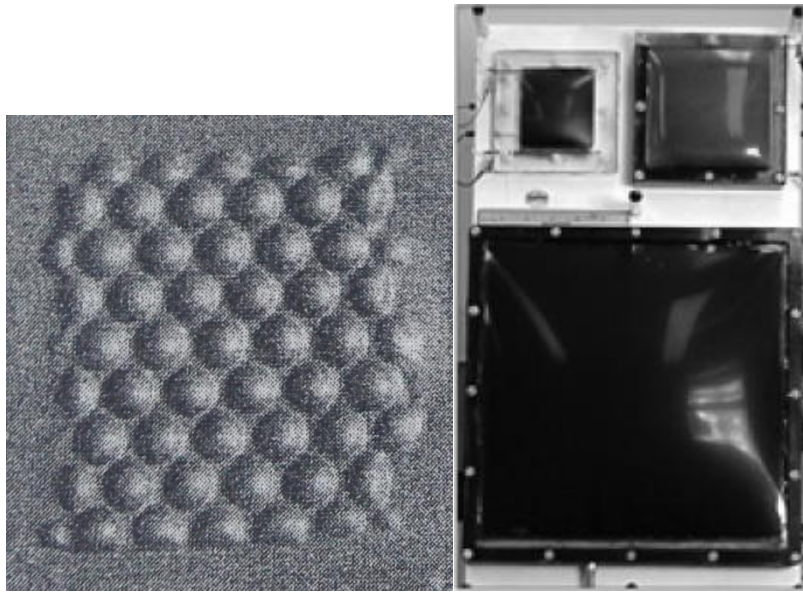
3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

Ακουστικοί Επενεργητές (Ηχεία)



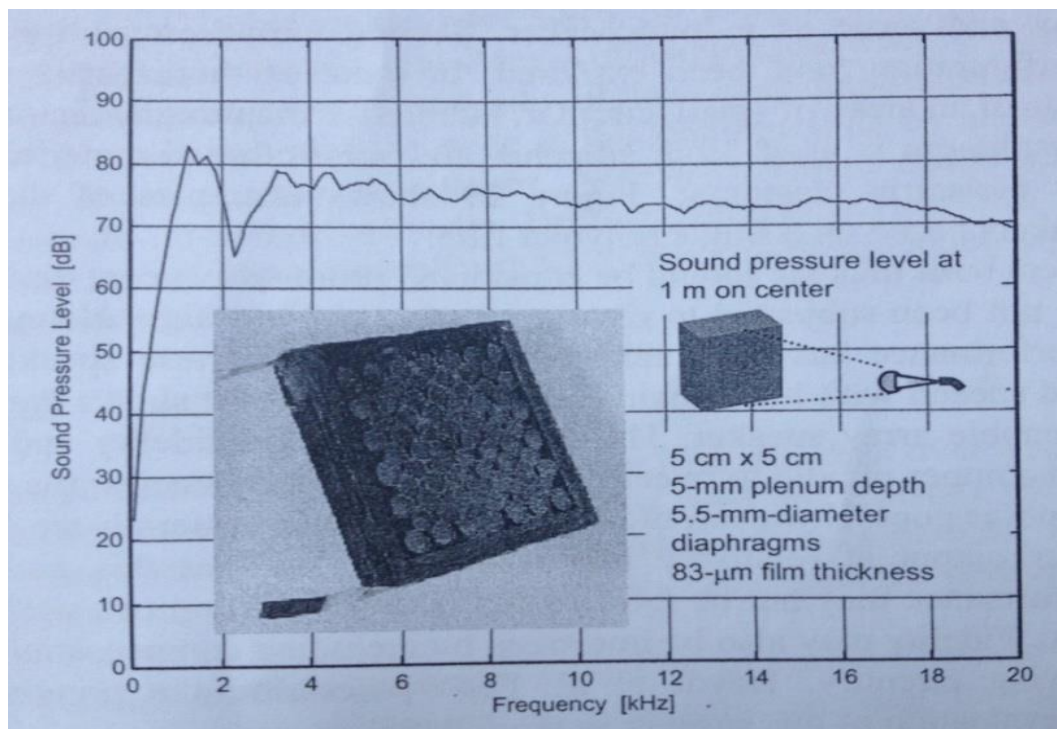
Σχήμα 3.5.1

Μία διάταξη διαφράγματος, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα ρευστά, δύναται να αντλήσει αέρα, εφόσον ενεργοποιηθεί σε υψηλότερες συχνότητες. Με άλλα λόγια μπορεί να δημιουργήσει μία ακουστική έξοδο και να λειτουργήσει ως ηχείο. Έχουν μελετηθεί διάφορες παραλλαγές αυτής της διάταξης. Άλλοτε η επιφάνεια αποτελείται από μικρά, κυκλικά διαφράγματα-φουσαλίδες και σε άλλες περιπτώσεις από ένα μόνο μεγάλο διάφραγμα. Τέτοιοι επενεργητές φαίνονται στο Σχήμα3.5.1



Σχήμα 3.5.2 Ακουστικοί επενεργητές

Ποιοτικά αυτά τα ηχεία μπορούν να αποδώσουν μουσική και λόγο με μικρή εμφανή παραμόρφωση. Το Σχήμα 3.5.3 δείχνει την έξοδο ενός ηχείου από σιλικόνη και με διάταξη-φουσαλίδας. Στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες, η έξοδος εμφανίζει καλή πιστότητα ήχου. Στις χαμηλές συχνότητες η πιστότητα και η δυναμική έξοδος είναι φτωχή. Ωστόσο τα διηλεκτρικά ελαστομερή υλικά είναι ικανά για καλή δυναμική έξοδο σε αυτό το χαμηλό εύρος συχνοτήτων, συνεπώς αυτή η φτωχή χαμηλής συχνότητας απόδοση ίσως να μην είναι θεμελιώδης και δύναται να βελτιωθεί με καλύτερο σχεδιασμό.

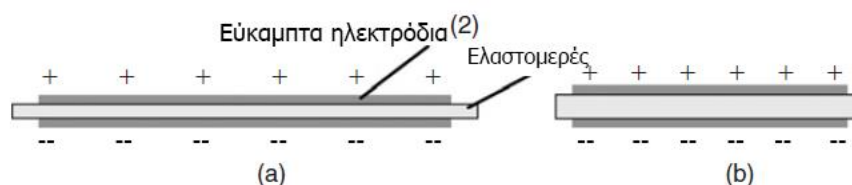


Σχήμα 3.5.3 Διάγραμμα πιστότητας ήχου σε σχέση με τη συχνότητα

3.6 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΗ ΚΑΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Αρχή λειτουργίας των διηλεκτρικών ελαστομερών ως γεννήτριες

Τα διηλεκτρικά ελαστομερή μπορούν να “τρέξουν” σε αντίστροφη από την συνηθισμένη τους λειτουργία επενέργησης και να πραγματοποιήσουν μηχανική σε ηλεκτρική μετατροπή. Στη λειτουργία ως γεννήτρια, τοποθετούνται φορτία πάνω στο ελαστομερές φιλμ στην τεντωμένη κατάσταση. Κατά την συστολή, η αύξηση του πάχους του ελαστομερούς αυξάνει τον διαχωρισμό των αντίθετων φορτίων και η μείωση επιφάνειας στο επίπεδο(πλάτος του φιλμ) φέρνει κοντά τα ομώνυμα φορτία. Οι δύο αυτές αλλαγές αυξάνουν την τάση της φόρτισης και ως εκ τούτου την αύξηση της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα Δ.Ε έχουν δείξει πολύ καλή απόδοση, όπως μέχρι τα 0.4 J/g ενεργειακή πυκνότητα γεννήτριας. Το πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα διηλεκτρικά ελαστομερή έχουν μοναδικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις ανταγωνιστικές ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες. Συγκεκριμένα έχουν εξαιρετική απόκριση σε χαμηλές και μεταβλητές συχνότητες και συνδυαστικά με την υψηλή ενεργειακή τους πυκνότητα είναι τα πλέον κατάλληλα υλικά για σχέδια άμεσης οδήγησης που εξαλείφουν την ανάγκη για δαπανηρές και πολύπλοκες μεταδόσεις. Οι γεννήτριες από διηλεκτρικά ελαστομερή είναι υποσχόμενες για αμφοτερές εφαρμογές σημειακών πηγών όπως γεννήτρια-τακούνη για συγκομιδή ενέργειας από το ανθρώπινο περπάτημα, όπως και σε εφαρμογές διανεμημένων πηγών όπως η αιολική και η κυματική ενέργεια.



Σχήμα 3.6.1: Αρχή λειτουργίας γεννήτριας από διηλεκτρικά ελαστομερή (a) τεντωμένο διηλεκτρικό ελαστομερές (φορτίο σε χαμηλή τάση) και (b) διηλεκτρικό ελαστομερές σε συστολή (φορτίο σε υψηλή τάση)

Ενώ η τεχνολογία αυτή είναι ελπιδοφόρα, υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει να καλυφθούν, προκειμένου τα διηλεκτρικά ελαστομερή να είναι μια επιτυχημένη και οικονομικά βιώσιμη τεχνολογία συγκομιδής ενέργειας. Ήδη ο στρατός των ΗΠΑ προσπαθεί να αξιοποιήσει τη νέα τεχνολογία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ικανής να τροφοδοτήσει ένα κινητό τηλέφωνο, τοποθετώντας ένα στρώμα πολυμερούς σε κάθε τακούνη της αρβύλας των στρατιωτών. Υπολογίζεται ότι κάθε τακούνη - γεννήτρια θα παρέχει ηλεκτρική ισχύ 1 watt ανά βήμα. Η συγκεκριμένη εφαρμογή εκτός από στρατιωτική χρήση θα μπορούσε να έχει πολλές εμπορικές εφαρμογές όπως φόρτιση μπαταριών για συσκευές πλοήγησης και φωτά νυκτός για

πεζοπορία. Στην εικόνα 3.6.1 παρουσιάζεται η κατασκευή που τοποθετείται στην σόλα του παπουτσιού.



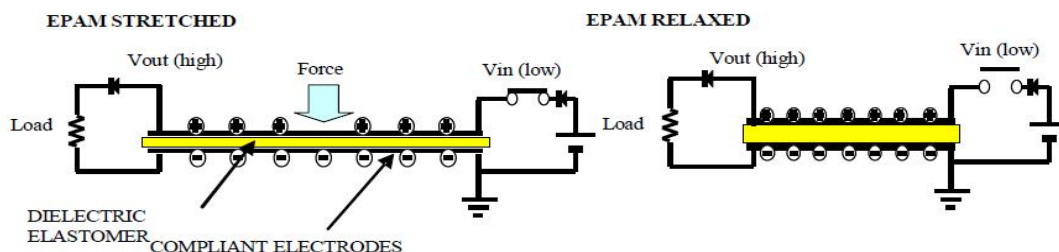
Σχήμα 3.6.1 Γεννήτρια παραγωγής ρεύματος τοποθετημένη στον πάτο του παπουτσιού κατασκευασμένη από ελαστομερή διηλεκτρικά, ενεργοποιείται κατά το βάδισμα ή το τρέξιμο

Οι προκλήσεις είναι πολλές και αυτές περιλαμβάνουν την ανάπτυξη υλικών και συσκευασιών που παρέχουν μεγάλη διάρκεια ζωής μέσα σε ένα εύρος περιβαλλοντικών συνθηκών, του σχεδιασμού των συσκευών που τεντώνουν το ελαστομερές υλικό, καθώς και θέματα συστήματος, όπως πρακτικά και αποδοτικά κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας. Έχει σημειωθεί πρόοδος σε πολλούς από αυτούς τους τομείς. Έχουν παρουσιαστεί μετατροπείς συγκομιδής ενέργειας οι οποίοι έχουν λειτουργήσει πάνω από 5 εκατομμύρια κύκλους. Έχει επίσης αποδειχτεί η ικανότητα των Διηλεκτρικών Ελαστομερών να επιβιώνουν για μήνες καθώς υποβάλλονται υποβρυχίως σε ηλεκτρικούς κύκλους. Έχουν δείξει κυκλώματα ικανά για μέχρι και 78% απόδοση ενεργειακής συγκομιδής. Ενώ έχει αποδειχθεί η πιθανότητα της μακράς διάρκειας ζωής σε επίπεδο watt, για μια αξιόπιστη κλιμάκωση μέχρι τα επίπεδα ισχύος που απαιτούνται για την παροχή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ή για τοπική χρήση, πιθανόν να απαιτηθεί περαιτέρω ανάπτυξη από το υλικό μέχρι το επίπεδο των συστημάτων.

Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικής γεννήτριας βασισμένης στην τεχνολογία των Τεχνητών Μυών

Η αρχή λειτουργίας των Τεχνητών Μυών Ηλεκτροενεργών Πολυμερών ως ηλεκτρογεννήτριες, βασίζεται στη μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική,

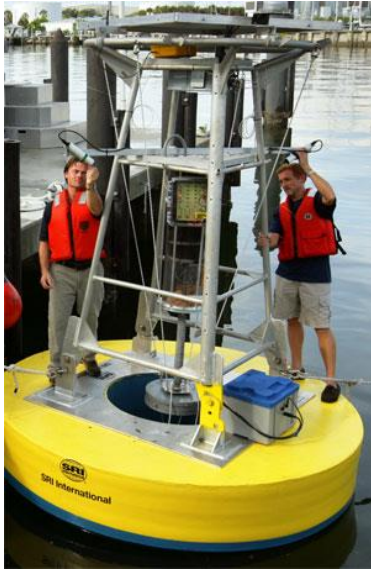
μέσω της παραμόρφωσής τους. Λειτουργικά αυτή η εφαρμογή μοιάζει στον πιεζοηλεκτρισμό, όμως στην ουσία πρόκειται για έναν πολύ διαφορετικό μηχανισμό παραγωγής ενέργειας. Με τους τεχνητούς μύες μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια ακόμα και με παραμορφώσεις που συμβαίνουν σε αργούς ρυθμούς, ενώ με τις πιεζοηλεκτρικές συσκευές χρειάζεται ακαριαία εφαρμογή μηχανικών δυνάμεων. Επίσης η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται και γενικότερα η αποδοτικότητα της μετατροπής ενέργειας από μηχανική σε ηλεκτρική μπορεί να είναι πολύ καλύτερη από τον πιεζοηλεκτρισμό.



Σχήμα 3.6.2 Διάταξη ηλεκτρικής γεννήτριας βασισμένης στην τεχνολογία των Τεχνητών Μυών

Τα διηλεκτρικά ελαστομερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραδοσιακές σημειακές εφαρμογές γεννητριών, ως άμεσος αντικαταστάτης των ηλεκτρομαγνητικών γεννητριών. Μία γεννήτρια διηλεκτρικών ελαστομερών δύναται να συζευχθεί με μία μηχανή εσωτερικής καύσης διαμορφώνοντας για παράδειγμα μία βενζινοκίνητη γεννήτρια. Για αυτές τις κλασικές σημειακές εφαρμογές γεννητριών, τα διηλεκτρικά ελαστομερή μπορούν να προσφέρουν χαμηλό κόστος, μειωμένο βάρος ή μικρότερο μέγεθος. Ωστόσο, για τις παραδοσιακές αυτές εφαρμογές υψηλής συχνότητας, οι Γ.Δ.Ε αποτελούν μία νέα τεχνολογία που ανταγωνίζεται μία ώριμη τεχνολογία (ηλεκτρομαγνητισμός) η οποία είναι πολύ κατάλληλη για τέτοιου τύπου εφαρμογές. Ως εκ τούτου, η ανταγωνιστικότητα των διηλεκτρικών ελαστομερών σε αυτές τις παραδοσιακές εφαρμογές υψηλής συχνότητας μπορεί να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής.

Οι ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες πρέπει να χρησιμοποιούν μεταδόσεις ισχύος για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά σε χαμηλές ταχύτητες ή όταν η ταχύτητα είναι εξαιρετικά μεταβλητή. Οι μεταδόσεις αυτές μπορούν να προσθέσουν σημαντικό κόστος, πολυπλοκότητα ή μέγεθος στην κατασκευή. Έτσι, τα διηλεκτρικά ελαστομερή είναι πιο ανταγωνιστικά σε πεδία χαμηλής ή μεταβλητής συχνότητας. Ομοίως οι Γ.Δ.Ε είναι κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν σχετικά μεγάλες γραμμικές κινήσεις, σε σύγκριση με την περιστροφική κίνηση. Τα διηλεκτρικά ελαστομερή είναι κατάλληλα για τη συγκομιδή της ενέργειας από την ανθρώπινη κίνηση. Ο φυσικός μύς, η κινητήριος δύναμη για την ανθρώπινη κίνηση, είναι συνήθως χαμηλής συχνότητας και εγγενώς γραμμικός, αμφότερα χαρακτηριστικά όπου τα διηλεκτρικά ελαστομερή προσφέρουν πλεονεκτήματα.



Συγκομιδή ενέργειας από θαλάσσια κύματα

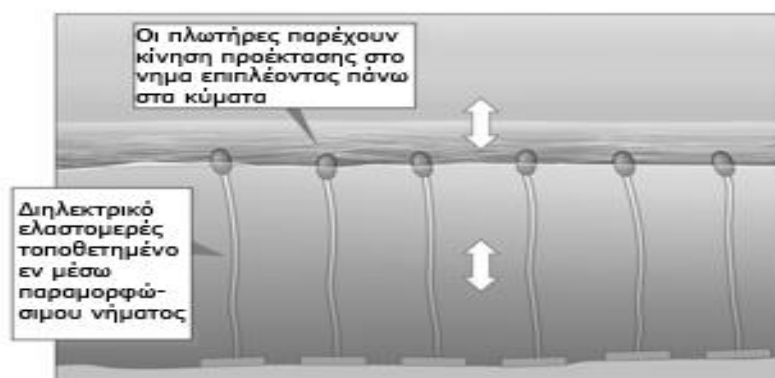
Το 2007 έγινε μια μελέτη και πειράματα σχετικά με τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον θαλάσσιο κυματισμό. Το πείραμα διεξήχθη σε βάθος 5 μέτρων και έδειξε ότι μπορούν να παραχθούν μέσο όρο 0,25 watt για κύματα ύψους μόλις 10 εκατοστών. Σε μεγαλύτερες εντάσεις εκτιμάται ότι το μέγιστο θα έφτανε σε παραγωγή μέσο όρο 2,2 watt. Με βάση τα δεδομένα του πειράματος υπολογίστηκε επίσης ότι η ενεργειακή απόδοση μετατροπής της γεννήτριας τεχνητών μυνών είναι περίπου 70% (χωρίς να περιέχει τις υδροδυναμικές απώλειες).

Μία άλλη ελκυστική εφαρμογή σημειακών γεννητριών είναι οι γεννήτριες-θαλάσσιοι σημαντήρες (σημαδούρες). Οι μπαταρίες των σημαντήρων είναι ακριβές και η αντικατάσταση ή επαναφόρτιση των μπαταριών αυτών είναι δαπανηρή και συχνά επικίνδυνη σε ανοιχτή θάλασσα. Έτσι, μία ενσωματωμένη γεννήτρια σημαντήρα όπου εξαλείφει ή ελαχιστοποιεί την χρήση μπαταριών θα ήταν μία ελκυστική εφαρμογή.

Τα υπάρχοντα εμπορικά συστήματα που βασίζονται σε ηλιακά κύτταρα και μικρές ανεμογεννήτριες δεν μπορούν να παράγουν τα επιθυμητά επίπεδα ισχύος σε ορισμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Ειδικότερα, τα ηλιακά κύτταρα παρουσιάζουν δυσκολίες στο σκοτάδι ή σε συνθήκες συννεφιάς καθώς επίσης τα σταγονίδια αλμυρού νερού και οι βιοακαθαρσίες αποτελούν το βασικό πρόβλημα. Οι ανεμογεννήτριες μπορεί κι αυτές να υποφέρουν από βιοακαθαρσίες και υποβάθμιση λειτουργίας σε περιβάλλον ανοιχτής θαλάσσης. Αμφότερες αιολικές και φωτοβολταϊκές τεχνολογίες στηρίζονται σε μεγάλες επιφάνειες για την παραγωγή ενέργειας οι οποίες είναι ανεπιθύμητες για τη σταθεροποίηση των σημαντήρων. Σε πολλές περιπτώσεις, η κίνηση των κυμάτων προσφέρει μεγαλύτερα επίπεδα ενέργειας και μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Η κίνηση των κυμάτων είναι συνήθως χαμηλής συχνότητας στο εύρος των 0.1-1 Hz, αλλά σχετικά υψηλά σε πλάτος (τα ύψη των κυμάτων της τάξεως του ενός μέτρου είναι κοινά). Γραμμικού τύπου γεννήτριες είναι κατάλληλες για αυτό το είδος της κίνησης. Απόδειξη αυτού αποτελούν οι σημαντήρες με γεννήτρια από διηλεκτρικά ελαστομερή οι οποίοι παρουσιάστηκαν σε πραγματικές συνθήκες εργασίας. Οι πρώτοι σημαντήρες παρήγαγαν πάνω από 5 J ανά κύκλο στα 0.3 Hz χρησιμοποιώντας μόνο περίπου 40 γραμμάρια από διηλεκτρικό ελαστομερές υλικό.

Σε δοκιμές σε πλατφόρμες κυμάτων, με κύματα των 10 εκατοστών, οι λυχνίες LED (τύποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σημαντήρες πλοήγησης) παρέμειναν αναμμένες συνεχώς, χρησιμοποιώντας ενέργεια αποκλειστικά από τα κύματα. Υπάρχουν πολλές ακόμα ενδιαφέρουσες εφαρμογές σημειακών γεννητριών για διηλεκτρικά ελαστομερή υλικά. Η χρήση απομακρυσμένων ασύρματων συσκευών αυξάνεται και οι εν λόγω συσκευές μπορούν ιδανικά να συλλέξουν την δική τους ενέργεια εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για αντικατάσταση μπαταριών. Τα διηλεκτρικά ελαστομερή είναι κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές εφόσον η μηχανική ενέργεια είναι διαθέσιμη μέσα από ταλαντώσεις ή δονητικές κινήσεις, όπως αυτές που μπορούν να προκύψουν από φορητές συσκευές συγκρατημένες από ανθρώπους, ζώα ή αυτοκινούμενα οχήματα. Πολλές από αυτές τις εφαρμογές απαντώνται στη φύση σε μικρή ή μικροσκοπική κλίμακα. Στις μικροσκοπικές Γ.Δ.Ε έχει γίνει περιορισμένη μελέτη αλλά η μελέτη σε μικροσκοπικής κλίμακας επενέργησης από διηλεκτρικά ελαστομερή είναι ενθαρρυντική για αυτόν τον τομέα εφαρμογών. Μία από τις πιο κοινές πηγές της μηχανικής ενέργειας στην σύγχρονη τεχνολογία είναι από χημικά καύσιμα. Αναφέρθηκαν εφαρμογές των Γ.Δ.Ε που αντικαθιστούν τις ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες σε οχήματα, αλλά ακόμα πιο επαναστατικές προσεγγίσεις είναι δυνατές.

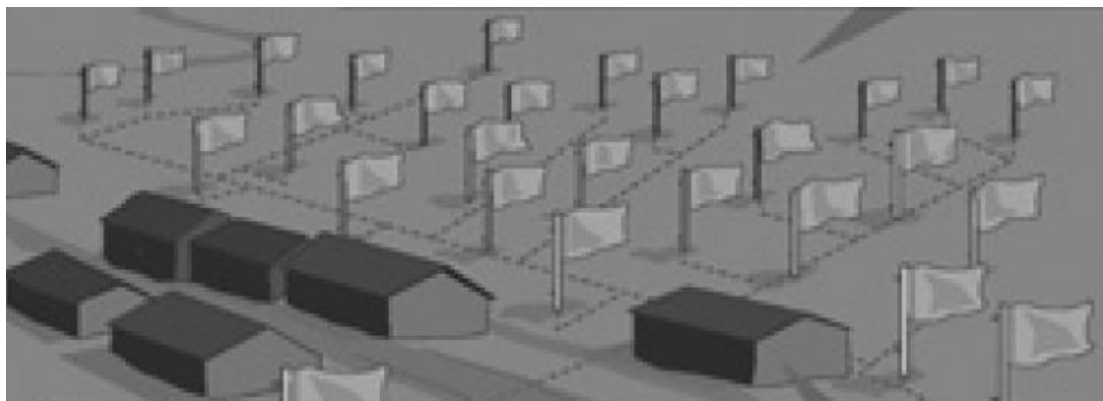


Σχήμα 3.6.3 γεννήτριες -θαλάσσιοι σημαντήρες

Ένα παράδειγμα σχεδιασμού φαίνεται στο σχήμα 3.6.3. Η κυματική ενέργεια είναι μια κατανεμημένη πηγή ενέργειας, αλλά έχει μια αρκετά υψηλή πυκνότητα ισχύος ανά μέτρο μήκους της καθέτου προς την κατεύθυνση της πορείας του κύματος. Η κυματική ενέργεια συνήθως μετριέται ως η ποσότητα ενέργειας που διατίθεται (ή συλλέγεται) ανά μονάδα μήκους κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Πυκνότητες ισχύος από 1-10 kW / m είναι συνήθεις για τα κύματα σε πολλούς τομείς. Τόσο η παράκτια όσο και η απομακρυσμένη κυματική ενέργεια μπορεί να ληφθεί υπ' όψη καθώς και το χαμηλό κόστος των ελαστομερών διηλεκτρικών υλικών υποδηλώνει ότι μεγάλα συστήματα μπορεί να είναι εφικτά. Το σχήμα 3.6.3 δείχνει ένα σύστημα γεννήτριας ισχύος για τις παράκτιες περιοχές που χρησιμοποιεί επιπλέοντες κατασκευές. Πολλά άλλα σχέδια είναι δυνατά.

Αιολική ενέργεια και διηλεκτρικά ελαστομερή

Τα διηλεκτρικά ελαστομερή μπορούν να παρασκευαστούν σε μεγάλες επιφάνειες φύλλων με υψηλή απόδοση. Ακόμα και αν δεν συσκευαστούν σε μορφή φύλλου, τα διηλεκτρικά ελαστομερή χρησιμοποιούν δυνητικά υλικά χαμηλού κόστους. Οι δυνατότητες αυτές υποδηλώνουν ότι τα διηλεκτρικά ελαστομερή μπορεί να είναι κατάλληλα για τη συγκομιδή της ενέργειας από ευρεία περιοχή με πηγές ισχύος όπως η αιολική και η κυματική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια που παρέχεται από τις συμβατικές ανεμογεννήτριες είναι μια ανταγωνιστική πηγή ενέργειας σε πολλά μέρη του κόσμου. Ωστόσο, οι ανεμογεννήτριες έχουν ένα αριθμό γνωστών μειονεκτημάτων, συμπεριλαμβανομένου του σχετικά υψηλού κόστους των πύργων και της συντήρησης αυτών, ηχορύπανση, υποβάθμιση των φυσικών τοπίων και παρεμβολή στην ορνιθοπανίδα. Πολλά από αυτά τα προβλήματα είναι ιδιαίτερα έντονα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές με την υψηλότερη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα προβλήματα με τις συμβατικές ανεμογεννήτριες μπορούν να αντιμετωπιστούν με γεννήτριες από διηλεκτρικό ελαστομερές υλικό.



Σχήμα 3.6.4 Σχεδιασμός αιολικού πάρκου με Γ.Δ.Ε

Πολλοί τύποι Γ.Δ.Ε θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αιολική ενέργεια. Όπως και με άλλες εφαρμογές, οι Γ.Δ.Ε μπορούν να αντικαταστήσουν άμεσα τις ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες, αλλά πιο ενδιαφέροντα σχέδια συστήματος χρησιμοποιώντας διηλεκτρικά ελαστομερή μπορεί να αποφέρουν μεγαλύτερα οφέλη. Το πτερύγισμα σημαίων από διηλεκτρικά ελαστομερή όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6.5, είναι μία προσέγγιση. Αυτές οι σημαίες μπορεί να είναι οποιουδήποτε επιθυμητού χρώματος, συμπεριλαμβανομένης της διαφάνειας, δε θα παρεμβαίνει στη ορνιθοπανίδα, και θα μπορούσε να υποβαθμίσει λιγότερο το φυσικό τοπίο. Φυσικά χαρακτηριστικά του τοπίου, όπως βουνά και κοιλάδες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εξάλειψη της ανάγκης πύργων σε τέτοιες τοποθεσίες. Πολύ μεγαλύτερα φορτία μπορούν να υποστηριχθούν σε εφελκυσμό από ό, τι σε κάμψη για το ίδιο ποσό του δομικού υλικού, έτσι ώστε με τη χρήση καλωδίων τάνυσης το μεγάλο μέρος του κατασκευαστικού κόστους να μειωθεί περαιτέρω. Ακόμη και αν χρησιμοποιούνται πύργοι, είναι πιθανό να είναι πολύ λιγότερο δαπανηρή η κατασκευή δύο πύργων υψηλού φορτίου με ένα καλώδιο παραγωγής ισχύος μεταξύ τους παρά να κατασκευάσει κανείς πολλαπλούς μικρότερους πύργους με μεμονωμένη

ανεμογεννήτρια καλύπτοντας την ίδια γραμμική απόσταση κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου. Το κόστος συντήρησης μπορεί επίσης να μειωθεί από μία προσέγγιση με καλώδια διότι οι σημαίες από διηλεκτρικά ελαστομερή μπορούν να συντηρηθούν εύκολα, χωρίς να απαιτείται εργάτες να ορειβατήσουν και να αποσυναρμολογήσουν πολύ μεγάλα πτερύγια ανεμογεννήτριας ξεχωριστά. Έχουν αναπτυχθεί σχέδια για σημαίες-γεννήτριες με διηλεκτρικά ελαστομερή υλικά και μία πρόιμη ανάλυση υποστηρίζει το συμπέρασμα ότι οι σημαίες-γεννήτριες μπορούν θεωρητικά να είναι αποτελεσματικές. Το συμπέρασμα αυτό ίσως να μην εκπλήσσει, διότι η κυματιστή κίνηση των σημαίων έχει ουσιαστικά χαμηλές απώλειες. Η κυματική ενέργεια είναι μία άλλη δυνατότητα των διηλεκτρικών ελαστομερών να παραδώσουν ισχύ ως γεννήτριες.



Σχήμα 3.6.5 Ανεμίζουσες ανεμογεννήτριες διηλεκτρικών ελαστομερών

Συμπεράσματα

Οι γεννήτριες από διηλεκτρικά ελαστομερή υλικά είναι δυνητικά εξίσου σημαντικές με τους διηλεκτρικούς ελαστομερείς επενεργητές. Σε λειτουργία γεννήτριας όταν το διηλεκτρικό ελαστομερές φιλμ συστέλλεται στον χώρο η ελαστομερική τάση λειτουργεί κατά της πίεσης του ηλεκτρικού πεδίου. Ηλεκτρικά η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εκδηλώνεται από μία αύξηση της ηλεκτρικής τάσης και μία σειρά από κλασικές ηλεκτρικές παραμέτρους όπως η χωρητικότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αναλυθεί η συμπεριφορά του συστήματος. Τα διηλεκτρικά ελαστομερή έχουν αποδείξει μία εξαιρετική απόδοση χρησιμοποιώντας μια σειρά από μετρήσεις, όπως ως $0,4 \text{ J / g}$ ενδεδειγμένη ενεργειακή πυκνότητα. Πολλές εφαρμογές εμφανίζονται εφικτές αλλά οι προκλήσεις παραμένουν. Τα διηλεκτρικά ελαστομερή εμφανίζονται πλέον συμφέροντα για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή ή μεταβλητή συχνότητα, χαμηλό κόστος, μεγάλες περιοχές και/ή άμεση οδήγηση. Τα διηλεκτρικά

ελαστομερή θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την άμεση αντικατάσταση των υφιστάμενων ηλεκτρομαγνητικών γεννητριών, αλλά ακόμα πιο συναρπαστικές πιθανές εφαρμογές υπάρχουν σε πηγές κατανεμημένης ισχύος, όπως η κυματική και αιολική ενέργεια.

Ανάλυση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της μελλοντικής ανάπτυξης των Τεχνητών Μυών

Ακόμη και χωρίς την τεχνολογία των Τεχνητών Μυών, η συγκομιδή κυματικής ενέργειας από τους ωκεανούς, έχει αρχίσει να ευδοκιμεί σε πολλές χώρες. Αυτά τα συστήματα εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας χρησιμοποιούν συνήθως υδραυλικά έμβολα που τίθενται σε κίνηση από τη δράση των κυμάτων. Το υδραυλικό ρευστό ρέει μέσω μια τουρμπίνας και δίνει κίνηση σε μια περιστροφική ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια. Μελλοντικά και όταν αυτά τα συστήματα αναπτυχθούν με επιτυχία για εμπορική χρήση, η τιμή μονάδας για τη παραγωγή μιας kWh ηλεκτρικής ενέργειας, υπολογίζεται να είναι περίπου 20 US Cents. Αυτά τα συστήματα κυματικής ενέργειας σχεδιάζονται συνήθως για κύματα που υπερβαίνουν σε ύψος τα 2 - 3 μέτρα. Σε σημαντικά μικρότερο κυματικό ύψος, τα συστήματα αυτά γίνονται από οικονομικής πλευράς, λιγότερο ελκυστικά.



Σχήμα 3.6.6: Σχέδιο διάταξης συγκομιδής της κυματικής ενέργειας με χρήση διηλεκτρικών ελαστομερών.

Λόγω της απλότητας, της αποτελεσματικότητας, και της επεκτασιμότητας του μεγέθους του, πιστεύεται ότι τα συστήματα εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας που βασίζονται στους Τεχνητούς Μύες μπορούν να είναι ελκυστικά όχι μόνο για εφαρμογές σε μεγάλα κύματα, αλλά και για εφαρμογές όπου τα κύματα είναι

μικρότερου μήκους. Εκτιμάται με βάση στοιχεία πειραμάτων, ότι είναι εφικτή η εγκατάσταση συστήματος παραγωγής 6 MW, σε θάλασσα με μέσο ετήσιο ύψος κύματος μόλις 1 μέτρο. Το ποσό αυτό της ενέργειας είναι αρκετό για να τροφοδοτήσει μικρούς οικισμούς ή βιομηχανίες. Η ικανότητα αυτή να παράγει την ενέργεια οπουδήποτε είναι αναγκαία, μπορεί να μειώσει το κόστος απώλειας ενέργειας λόγω μεταφοράς σε μακρινές αποστάσεις κάνοντας τα συστήματα εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας ακόμα πιο ελκυστικά. Στο εγγύς μέλλον, αναμένεται ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μονάδα μάζας ή όγκου υλικού για τη κατασκευή συστημάτων βασισμένα στους Τεχνητούς Μύες, μπορεί να διπλασιάσει, και ότι το αναμενόμενο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά κιλοβατώρα θα είναι 5 - 7,5 US Cents. Αυτή η τιμή είναι συγκρίσιμη με τη τιμή των ορυκτών καυσίμων για τους συμβατικούς, θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Φυσικά, οι σταθμοί εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας έχουν το επιπλέον πλεονέκτημα του ότι δεν απελευθερώνουν απόβλητα ή αέρια θερμοκηπίου.

Το γεγονός ότι βοηθούν την αντιμετώπιση κρίσιμων ζητημάτων, όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη, μέσω της αποτελεσματικής συγκομιδής ενέργειας προερχόμενης από ανέμους φυσικές πηγές, αποτελεί σαφώς ένα μεγάλο δυνητικό όφελος των Τεχνητών Μυών. Οι γεννήτριες Τεχνητών Μυών, μπορούν να γίνουν μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες, όχι μόνο για την παραγωγή του ρεύματος, αλλά μελλοντικά και για την παραγωγή υδρογόνου σε ωκεανούς και ερήμους.

3.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΕΠΕΝΕΡΓΗΣΗΣ

Οι συμβατικοί επενεργητές και η ανάγκη για καινούριες προσεγγίσεις

Στην πιο απλοϊκή του μορφή, ένας καλός επενεργητής χρειάζεται μόνο να εμφανίζει πολύ υψηλή ισχύ ανά μονάδα όγκου (πυκνότητα ισχύος) ή ισχύ ανά μονάδα μάζας (ειδική ισχύς). Το μηχανικό έργο μπορεί να παραδοθεί στο επιθυμητό ποσοστό μέχρι και το όριο ισχύος εξόδου του επενεργητή. Οι πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες εσωτερικής καύσης καθώς και οι υψηλόστροφοι ηλεκτροκινητήρες, λειτουργούν εξαιρετικά σε αυτό το πλαίσιο με συγκεκριμένη ισχύ που να υπερβαίνει τα 500 W/kg. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης είναι δύσκολο να νικηθούν στη χρήση σε αυτοκίνητα γιατί όχι μόνο έχουν μία πυκνότητα ισχύος του 1 kW/kg, αλλά επίσης καταναλώνουν καύσιμα πολύ υψηλής ενεργειακής πυκνότητας (40 MJ/kg, ελεύθερα διαθέσιμου αέρα), χρησιμοποιώντας ως εκ τούτου μόνο ένα μικρό τμήμα του όγκου του οχήματος. Ωστόσο οι μηχανές εσωτερικής καύσης και οι υψηλόστροφοι ηλεκτροκινητήρες έχουν ένα σχετικά μικρό εύρος ταχύτητας περιστροφής πάνω από το οποίο η έξοδος τους είναι βέλτιστη. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για διαδικασίες συνεχούς ταχύτητας, όπως την πρόωση των πλοίων, χρήση σε αυτοκινητόδρομο ή σταθερή

άντληση. Οι μεταδόσεις ισχύος επιτρέπουν το εύρος των ταχυτήτων λειτουργίας να διευρυνθεί. Όταν οι απαιτούμενες κινήσεις γίνονται πιο σύνθετες, η αποτελεσματική εφαρμογή των κινητήρων εσωτερικής καύσης και των υψηλόστροφων ηλεκτροκινητήρων γίνεται ολοένα και πιο προβληματική. Δεν είναι ιδιαίτερα εύκολο να δημιουργηθεί μία άρθρωση του αγκώνα που χρειάζεται να μετακινηθεί, να σταματήσει και να διατηρήσει τη δύναμη ή την δυσκαμψία και η πολυπλοκότητα της μετάδοσης υπερνικά τα οφέλη της υψηλής πυκνότητας ισχύος. Υδραυλικά ή πνευματικά συστήματα μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως μετάδοση όπως γίνεται στους βραχίονες εκσκαφέα για παράδειγμα, αλλά η απόδοση είναι χαμηλή και ο έλεγχος της ταχύτητας και της θέσης είναι συχνά κακής ποιότητας. Η Honda έχει χρησιμοποιήσει σερβοκινητήρες σε συνδυασμό με αρμονικές οδηγίες για τη δημιουργία υψηλής ροπής στο εντυπωσιακό ASIMO ανθρωποειδές ρομπότ τους. Ο μηχανισμός λειτουργεί όμορφα αλλά η διάχυση στην αρμονική οδήγηση μειώνει τον βαθμό απόδοσης. Επιπλέον, οι κινητήρες αυτοί δεν διαθέτουν σταθεροποιητή θέσης και δαπανούν ενέργεια για την συγκράτηση μίας σταθερής δύναμης. Μία εναλλακτική τεχνολογία επενεργητών που είναι καλύτερα προσαρμοσμένη για σταθερή θέση αλλά και διακοπτόμενη λειτουργία είναι, επομένως, επιθυμητή.

Τα **πιεζοκεραμικά** είναι πολύ κατάλληλα για τον έλεγχο της θέσης σε μικρές κλίμακες μήκους. Σε αυτά τα υλικά ένα ηλεκτρικό πεδίο ενεργεί σε μόνιμα δίπολα εντός του υλικού, που οδηγεί σε παραμόρφωση της κρυσταλλικής του δομής και περαιτέρω παραμόρφωση της τάξεως του 0.1%. Η έκταση της παραμόρφωσης είναι ανάλογη με την εφαρμοσμένη τάση. Το υλικό δρα ως πυκνωτής σε μέτριες προς χαμηλές συχνότητες. Κρατώντας μια σταθερή τάση οδηγεί στη διατήρηση μιας σταθερής θέσης χωρίς δαπάνη ενέργειας. Με άλλα λόγια αυτοί οι επενεργητές έχουν συγκράτηση της θέσης. Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη ενέργεια είναι υψηλή, είναι πρόκληση να συζευχθεί το μηχανικό έργο εξόδου της κατασκευής όταν απαιτούνται σχετικά μεγάλες μετατοπίσεις σε σύγκριση με το μέγεθος του επενεργητή.

Τα **πιεζοηλεκτρικά** λειτουργούν ικανοποιητικά για νανο-τοποθετήσεις δεδομένου ότι ο έλεγχος θέσης και το υψηλό φάσμα συχνοτήτων του επενεργητή επιτρέπει την επίτευξη υπό-ατομικών αναλύσεων τοποθέτησης. Οι βηματικοί μηχανισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν προς δημιουργία μεγαλύτερων μετατοπίσεων, όπως σε τοποθετητές των φακών μίας κάμερας. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα τέτοιων μηχανισμών μπορεί να είναι σχετικά χαμηλή, διότι ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας στις βηματικές συσκευές χρησιμοποιείται για σύσφιξη και το φάσμα της συχνότητας μειώνεται κατά αναλογία του χρόνου ενός βήματος προς το συνολικό πλήθος των βημάτων στην περιοχή της διαδρομής. Παρά το γεγονός ότι τα πιεζοηλεκτρικά έχουν εξαιρετικά υψηλή αναλογία ισχύος προς μάζα, η πρόκληση είναι να παραληφθεί το έργο εξόδου ειδικά όταν απαιτούνται μεγάλες μετατοπίσεις. Η απόδοση ενός διηλεκτρικού ελαστομερούς επενεργητή δεν επαρκεί προς το παρόν για να αντικαταστήσει κινητήρες αυτοκινήτων και μηχανές σταθερής ταχύτητας (ανεμιστήρες, μηχανικά εργαλεία, κτλ). Αν και οι πυκνότητες ισχύος

προσεγγίζουν το σωστό εύρος, ο κύκλος ζωής τους ως τώρα περιορίζεται σε περίπου ένα εκατομμύριο κύκλους. Τα διηλεκτρικά ελαστομερή προσφέρουν μεγάλο “χτύπημα” και μία σταθερή θέση επενέργησης, τα οποία, σε συνδυασμό με τη σχετικά υψηλή πυκνότητα ισχύος τα καθιστούν καλές εναλλακτικές λύσεις για μηχανές εσωτερικής καύσης, πιεζοηλεκτρικά και υψηλής συχνότητας ηλεκτροκινητήρες σε καταστάσεις όπου απαιτούνται η περιπλοκότητα και οι μη-περιοδικές κινήσεις .

Συμπεράσματα:

Τα διηλεκτρικά ελαστομερή δεν είναι έτοιμα να ανταγωνιστούν κινητήρες εσωτερικής καύσης και ηλεκτροκινητήρες για συνεχόμενη χρήση σε μηχανές ιδιαίτερα πάνω από ένα μεγάλο αριθμό κύκλων. Ωστόσο, προσαρμόζονται καλύτερα για διακοπτόμενη εργασία όπως για τον έλεγχο θέσης και για αντικατάσταση των μυών. Η υψηλή πυκνότητα έργου, η πυκνότητα ισχύος και η ηλεκτρομηχανική σύζευξη, συνδυαστικά με την εξαιρετική παραμόρφωση και την έτοιμη διάθεση των υλικών, καθιστά τα διηλεκτρικά ελαστομερή εξαιρετικά ελκυστικά για μεγάλο εύρος εφαρμογών. Οι υψηλές τάσεις που χρησιμοποιούνται είναι ένα πιθανό εμπόδιο σε ορισμένες εφαρμογές, ιδιαίτερα όταν είναι απαραίτητες πρόσθετες δαπάνες που συνδέονται με την μετατροπή της τάσης. Μια άλλη πρόκληση είναι η διατήρηση των εξαιρετικών πυκνοτήτων έργου, πυκνοτήτων ισχύος και παραμορφώσεων σε πρακτικές συσκευές βελτιστοποιώντας τους όγκους και τους περιορισμούς των μηχανισμών προέντασης καθώς και την μηχανική σύζευξη και την συσκευασία. Αυτά εμπόδια δύναται να ελαχιστοποιηθούν με την χρησιμοποίηση καινοτόμων μετατροπέων τάσης (π.χ. πιεζοηλεκτρικούς μετασχηματιστές) και εμπεριέχοντας την προένταση εντός του υλικού με χημικές μεθόδους. Όταν απαιτείται χαμηλή τάση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αγώγιμα πολυμερή, νανοσωλήνες άνθρακα και IPMC επενεργητές. Διαφορετικά, κανένας από αυτούς τους επενεργητές δεν παρουσιάζει κάποιο σαφές πλεονεκτήματα απόδοσης επί του παρόντος, ενώ έχουν τα μειονεκτήματα των πολύ μικρότερων ηλεκτρομηχανολογικών συζεύξεων και παραμορφώσεων. Οι φερροηλεκτρικοί χαλαρωτές και τα κράματα μνήμης σχήματος μπορούν να προσφέρουν βελτιωμένες πυκνότητες έργου και ισχύος οι οποίες μπορεί να είναι επωφελής για πλήθος εφαρμογών. Από την άλλη πλευρά, τα διηλεκτρικά ελαστομερή προσφέρουν υψηλότερη απόδοση , ιδιαίτερα σε σχέση με την διαμόρφωση κραμάτων μνήμης και μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Τα διηλεκτρικά ελαστομερή έχουν αποδειχθεί σε εργαστηριακό περιβάλλον ότι αποτελούν τεχνολογία επενέργησης υψηλής απόδοσης, σε σύγκριση με αμφοτέρους συμβατικούς όσο και αναδυόμενους επενεργητές. Μια βασική πρόκληση είναι τώρα να εντοπιστούν εκείνες οι εφαρμογές και να δημιουργηθούν σχέδια που θα χρησιμοποιούν αποτελεσματικά την υψηλή τους απόδοση.

Ιδιότητες/Τύποι Επενεργητών	Θηλαστικός Σκελετικός Μυς	Διηλεκτρικά Ελαστομερή	Χαλαρωτές Φερροηλεκτρικών Πολυμερών	Αγώγιμα Πολυμερή	Κράματα Μνήμης Σχήματος (NiTi)
Παραμόρφωση (%)	20-40	10 ως >100	3-10	2-12	1-8
Τάση(Mpa)	0.1-0.35	0.1-2 συνήθως	20-45	1-100	200
Πυκνότητα έργου (kJ/m ³)	8-40	10-150 συνήθως, 3400 μέγιστη	~1000	70-100	>1000
Πυκνότητα(kg/m ³)	1037	~1000	~2000	~1300	6450
Δείκτης παραμόρφωσης (%/s)	>50	450 σε VHB, 34 000 σε σιλικόνη	>2000 @ 0.1% παραμόρφωση	1-12	300
Συνεχόμενη ισχύς (W/kg)	50-280	~500	>1000	150	>1000
Ηλεκτρομηχανική ζεύξη (%)	<40 απόδοση	30 συνήθως, 90 μέγιστο	10-40	<10	<5
Κύκλος ζωής	>10 ⁹	10 ⁶ @50% παραμόρφωση	-	800000	300 @ 5%, 107 @ 0.5%
Modulus (MPa)	10-60	0.1-3	400-1200	~500	20 000-80 000
Τάση (V)	<1	>1000	~1000	2	χαμηλή

Σχήμα 3.7.1 Πίνακας συγκρίσεων τύπων επενεργητών

Από το σχήμα 3.7.1 φαίνεται ότι κάθε είδος επενεργητή παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με την ιδιότητα στην οποία εξετάζεται. Οι χαλαρωτές φερροηλεκτρικών πολυμερών και τα κράματα μνήμης σχήματος εμφανίζουν ιδιαίτερα αυξημένη πυκνότητα έργου και συνεχόμενη ισχύ σε σχέση με τους λοιπούς επενεργητές. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι οι επενεργητές από διηλεκτρικά ελαστομερή αποδίδουν πολλαπλάσιες παραμορφώσεις και ιδιαίτερα αυξημένο ποσοστό ηλεκτρομηχανικής ζεύξης. Τέλος παρατηρείται ότι τα διηλεκτρικά ελαστομερή και τα φερροηλεκτρικά πολυμερή έχουν γενικά καλές ιδιότητες αλλά απαιτούν την εφαρμογή υψηλής τάσης.

3.8 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

A. Εύκαμπτα ηλεκτρόδια

Τα εύκαμπτα ηλεκτρόδια είναι το κλειδί για την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ΗΕΠ γιατί διατηρούν ενιαία επαφή πάνω σε όλη την ενεργή επιφάνεια του ελαστομερούς. Η λέξη εύκαμπτος περιέχει την ικανότητα ενός λεπτού αγώγιμου ηλεκτροδίου να παραμορφώνεται με το ελαστομερές χωρίς να ενεργοποιεί αντίθετες τάσεις ή να χάνει την συνεκτικότητά του. Με απλά λόγια, το ηλεκτρόδιο θα επεκταθεί μαζί με το ελαστομερές. Έχουν περιγραφεί διάφορες προσεγγίσεις περί εύκαμπτων ηλεκτροδίων για τον τομέα των διηλεκτρικών ελαστομερών. Αυτές οι προσεγγίσεις περιλάμβαναν μαύρου άνθρακα, ηλεκτρόδια γράσου, λαστιχένια ηλεκτρόδια, σκόνης και κολλώδη ηλεκτρόδια. Το βασικό μειονέκτημα των ηλεκτροδίων από γράσο είναι ότι λερώνουν κατά τον χειρισμό τους. Λαστιχένια ηλεκτρόδια δύναται να χρησιμοποιηθούν αλλά το μέτρο ελαστικότητας πρέπει να ταιριάζει με εκείνο του υλικού του επενεργητή αποκλείοντας έτσι τη μείωση της απόδοσης του επενεργητή. Το ηλεκτρόδιο από σκόνη μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε κολλώδη φιλμ όπως το VHB 4910 της 3M. Το ηλεκτρόδιο από αγώγιμο γράσο αποδείχτηκε το πιο επιτυχημένο. Δεν αναφέρθηκε μετακίνηση του υλικού των ηλεκτροδίων σε παραμόρφωση του επενεργητή κάτω από 50%. Μόνο πάνω από το 100% παραμόρφωσης του επενεργητή παρατηρήθηκε οπτικά μετακίνηση στην περιοχή όπου συγκεντρώθηκε το γράσο διαμορφώνοντας μικρούς κυλίνδρους κάθετους στην κατεύθυνση της παραμόρφωσης. Μία εκτεταμένη μελέτη σε ένα ακρυλικό ελαστομερές VHB 4910 της 3M, συμπέρανε ότι η ηλεκτρομηχανική απόδοση του διηλεκτρικού ελαστομερούς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό του ηλεκτροδίου και την τιμή της προέντασης.



Σχήμα 3.7.1 VHB 4910 της 3M

Αυτή η διατριβή ερευνά συμπυκνωμένο ηλεκτρολυτικό διαλύτη, σπρέι γραφίτη, γράσο άνθρακα και σκόνη γραφίτη ως υλικά ηλεκτροδίων. Παρουσιάζει δεδομένα από τα οποία μπορεί κάποιος να επιλέξει το πιο βολικό υλικό ηλεκτροδίου και προένταση με σκοπό να πετύχει την βέλτιστη τάση, παραμόρφωση και βαθμό απόδοσης για δεδομένο ηλεκτρικό πεδίο. Τα ηλεκτρόδια από συμπυκνωμένο ηλεκτρολυτικό διαλύτη αποδείχτηκαν τα καλύτερα για τις περισσότερες περιπτώσεις ηλεκτρικών φορτίων έως 20-25 V/ μm , πάνω από το οποίο τα ηλεκτρόδια από σπρέι γραφίτη ήταν γενικά βέλτιστα. Η διατριβή αυτή προτείνει ότι όχι μόνο η ηλεκτρομηχανική απόδοση εξαρτάται από το υλικό των ηλεκτροδίων αλλά ότι η εφαρμοστικότητα του υλικού των ηλεκτροδίων εξαρτάται και από το εύρος του ηλεκτρικού πεδίου. Στην αρχική περίοδο ανάπτυξης των διηλεκτρικών ελαστομερών, το γράσο άνθρακα ήταν η επιλογή για το υλικό των ηλεκτροδίων και χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα στα εργαστήρια με σκοπό την τεκμηρίωση απόψεων περί διαμόρφωσης επενεργητών και πειραμάτων. Η ακατάστατη φύση του γράσου από άνθρακα και τα προβλήματα ανομοιομορφίας οδήγησαν τους ερευνητές να εξετάσουν πιο εξεζητημένες εναλλακτικές.

Μία προσέγγιση στα εύκαμπτα ηλεκτρόδια από τον Peietal. Στη SR International, στην ανάπτυξη των πολύ-λειτουργικών ελαστομερών ρολών, χρησιμοποιώντας μία ειδική φόρμουλα από εύκαμπτη μογιό άνθρακα, αποδείχτηκε επιτυχής σε έναν αριθμό από ευρέως διαδεδομένα προϊόντα. Μία διατριβή του Perlineetal. αναφέρει την πρόσφατη πρόοδο στην κατασκευή υψηλής ευκαμψίας ηλεκτροδίων, τα οποία σχηματίζουν ζιγκ-ζαγκ διάταξη χρυσών ίχνων σιλικόνης. Μία κοινή σημερινή προσέγγιση στον σχεδιασμό ηλεκτροδίων είναι οι σιλικόνες γεμισμένες με άνθρακα, συγκεκριμένα για την περίπτωση των σιλικονούχων ελαστομερών επενεργητών. Η πιο πρόσφατη εξέλιξη στον σχεδιασμό εύκαμπτων ηλεκτροδίων παρουσιάστηκε από τον Yuanetal, χρησιμοποιώντας μονή πλάκα άνθρακα NTs. Η μελέτη αυτή εμπνεύστηκε από την ανάγκη να μειωθεί το κενό μεταξύ της δύναμης του ενθυλακωμένου υλικού και της δύναμης μεγάλου εκτοπίσματος επενεργητών απομονώνοντας ηλεκτρικά τις πτώσεις μέσα στο διηλεκτρικό. Όταν μία μετάπτωση αναπτύσσεται μέσα στον επενεργητή, το ηλεκτρόδιο σε αυτή την περιοχή γίνεται μη αγωγίμο λόγω της υποβάθμισης του άνθρακα NTs στην περιοχή της μετάπτωσης. Το πιο συναρπαστικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης ηλεκτροδίων είναι η ικανότητα του ηλεκτροδίου να αυτό καθαρίζεται κάνοντας τα διηλεκτρικά ελαστομερή πιο ανεκτικά σε μεταπτώσεις. Με εφαρμοζόμενη ηλεκτρική τάση 9.2 kV, το γράσο άνθρακα σε σιλικονούχο επενεργητή πέτυχε 33.7% παραμόρφωση και τελικά το φιλμ έπιασε φωτιά στο τελικό φορτίο των 320 V/ μm . Στην περίπτωση του άνθρακα NT σε σιλικονούχο επενεργητή επιτεύχθηκε παραμόρφωση 36% για 10 kV εφαρμοζόμενης ηλεκτρικής τάσης και σε πεδίο 250 V/ μm το φιλμ δεν αστόχησε. Στην περίπτωση του άνθρακα NT σε σιλικονούχο επενεργητή, ο καθαρισμός συνέβαινε σε αυτό το επίπεδο του φορτίου σαν απόδειξη από μικρές τρύπες και ακίδες ρεύματος που παρατηρήθηκαν.

B. Ηλεκτρικό πεδίο

Μία από τις βασικές προκλήσεις στην ανάπτυξη των διηλεκτρικών ελαστομερών επενεργητών είναι το υψηλό ηλεκτρικό πεδίο που απαιτείται. Ηλεκτρικές τάσεις έως και 150 V/ μm απαιτούνται για να ενεργοποιήσουν αυτά τα ελαστομερή φιλμ. Αυτό το υψηλό ηλεκτρικό πεδίο είναι διευθετημένο με διάφορους τρόπους. Μία αναλυτική μελέτη διεξήχθη από τον Zhangetal., μία ομάδα του Swiss Federal Laboratories ερευνήσε το φαινόμενο του crosslinking (τέμνουσα διασύνδεση), της προέντασης και του διηλεκτρικού υλικού πλήρωσης από σιλικόνη. Η σιλικόνη που ερευνήθηκε ήταν DC3481 από την Suter-Kunststoffe (Jegensdorf, Switzerland). Μία σειρά σκληρυντών από την ίδια εταιρία προστέθηκε σε αυτή τη σιλικόνη. Βρέθηκε ότι το μέτρο ελαστικότητας του Young αυξήθηκε και η διηλεκτρική σταθερά μειώθηκε αυξάνοντας την συγκέντρωση του σκληρυντή. Γενικά παρατηρήθηκε ότι μία αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας του Young, επιφέρει μείωση στην παραμόρφωση επενέργειας ενώ μία αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς επιφέρει αύξηση της παραμόρφωσης επενέργειας. Αυτή η διατριβή συμπέρανε ότι είναι αυτός ο λόγος ϵ/Y που είναι η σημαντική παράμετρος που προσδιορίζει την απόκριση της παραμόρφωσης. Η σιλικόνη που είχε την μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά αλλά το χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας του Young δίνοντας το μέγιστο λόγο ϵ/Y , απέδωσε τη μέγιστη απόκριση παραμόρφωσης. Επίσης διάφοροι σκληρυντές απέδωσαν διαφορετικές αποκρίσεις παραμόρφωσης, γεγονός που ανοίγει μία περιοχή για περαιτέρω έρευνα.

Τα διηλεκτρικά υλικά πλήρωσης αυξάνουν τη διηλεκτρική σταθερά ούτως ώστε το απαιτούμενο πεδίο για μία συγκεκριμένη παραμόρφωση να περιοριστεί. Ξανά ο Zhangetal, ανέφερε μία αύξηση στη διηλεκτρική σταθερά από 3.27 για γνήσια σιλικόνη σε 5.85 για σιλικόνη περιεκτικότητας 20% σε ολιγομερούς κοπερφοθαλοκυανίνης (CPO). Αυτή η αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς μεταφράστηκε σε μείωση του πεδίου από 32 V/ μm (σκληρυμένη σιλικόνη χωρίς γέμιση) σε 25 V/ μm για παραμόρφωση 10%. Ωστόσο παρατηρήθηκε ότι η πρόσμιξη προκαλεί επίσης μία μείωση του πεδίου θραύσης περιορίζοντας έτσι την απόκριση της παραμόρφωσης για μίγμα σιλικόνης.

Προεντείνοντας το ελαστομερές φιλμ εξυπηρετείται η λέπτυνση του φιλμ και για αυτό αυξάνεται το πεδίο θραύσης και επίσης αφαιρεί το όριο των δεσμών της ανενεργής περιοχής. Ωστόσο είναι γενικότερα σύμφωνο ότι αποτελέσματα υψηλής προέντασης σε χαμηλότερη απόκριση παραμόρφωσης του επενεργητή. Ο λόγος για τον οποίο η προένταση επιφέρει χαμηλότερη παραμόρφωση επενέργειας είναι ένα θέμα προς συζήτηση. Μία σπουδή που ασχολήθηκε με σιλικόνες του Zhangetal., απέδωσε την χαμηλότερη παραμόρφωση στην αύξηση του μέτρο ελαστικότητας του Young, λαμβάνοντας υπόψη την παραμόρφωση για δεδομένο ηλεκτρικό φορτίο.

Μία διατριβή από τον Choietal, εν τούτοις εξέτασε πιο ειδικευμένα το φαινόμενο της προέντασης στο ελαστικό μέτρο ελαστικότητας για ακρυλικό φιλμ της 3M. Συγκρίνοντας ένα διπλού σταδίου ελαστικό τεστ με ένα συνεχόμενο ελαστικό τεστ, παρατηρήθηκε ότι δεν υπήρξε αλλαγή στο ελαστικό μέτρο ελαστικότητας λόγω της προέντασης ανεξαρτήτως της φόρτισης και προτάθηκε ότι αυτό το γεγονός θα υποδεικνύει ότι η προένταση δεν επηρεάζει το ελαστικό μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Αυτή η παρατήρηση δεν είναι σύμφωνη με τεστ που διεξήχθησαν από άλλες ομάδες όπως του Zhangetal και Kornbluhetal. Για να εξηγήσει τη μείωση της παραμόρφωσης της επενέργησης, ο Choietal., εστίασε στην διηλεκτρική σταθερά. Παρουσίασαν αποτελέσματα τα οποία έδειξαν μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς με αυξανόμενη προένταση και απέδωσαν αυτή τη μείωση σε μία αντίστοιχη μείωση της παραμόρφωσης επενέργησης. Άλλες ομάδες παρατήρησαν αυτό το φαινόμενο αλλά το θεώρησαν ως μη εξέχον παράγοντα στην χαμηλή απόδοση του επενεργητή με αυξανόμενη προένταση. Αυτό το φαινόμενο που παρατηρήθηκε απαιτεί περαιτέρω έρευνα αλλά φαίνεται να έχει μεγάλη εξάρτηση από το υλικό, με την προένταση να παίζει διαφορετικό ρόλο για σιλικόνες αντίθετα με τα ακρυλικά κ.τ.λ.

Ωστόσο υψηλή προένταση προκαλεί δυσκαμψία στο υλικό με αύξηση του μέτρο ελαστικότητας του Young έχοντας σαν συνέπεια χαμηλότερη απόκριση παραμόρφωσης, λαμβάνοντας υπόψη την παραμόρφωση για συγκεκριμένο ηλεκτρικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάστηκε από τον Zhangetal, για σιλοκονούχα και από τον Kornbluhetal, για ακρυλικά υλικά. Αυτή η παρατήρηση έρχεται σε σύγκρουση με παρατηρήσεις του Choietal. Η εφαρμογή της προέντασης μπορεί να είναι διαξονική ή μονοαξονική και αυτό από μόνο του επηρεάζει την απόδοση του επενεργητή. Στην περίπτωση της διαξονικής προέντασης, η παραγόμενη παραμόρφωση επενέργησης είναι ισοκαταναμημένη και στις δύο κατευθύνσεις. Στην περίπτωση της μονοαξονικής προέντασης ωστόσο, ένα ανισότροπο τοπικό ελαστικό μέτρο ελαστικότητας και συνεπώς ο επενεργητής επενεργεί πρωταρχικά στην κατεύθυνση με την μικρότερη προένταση. Η ανισότροπη προένταση συνδυάζεται συχνά με γεωμετρικούς περιορισμούς για να παράγει επενέργηση σχεδόν αποκλειστικά σε μία κατεύθυνση. Ο μηχανισμός κατά τον οποίο το πεδίο θραύσης αυξάνεται με την προένταση είναι ενδιαφέρον αλλά δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητό και συνεπώς χρήζει περαιτέρω μελέτης.

Γ. Επιλογή του ελαστομερούς υλικού

Σήμερα, το μεγαλύτερο μερίδιο της έρευνας έχει εστιάσει γύρω από δύο διηλεκτρικά ελαστομερή υλικά, ακρυλικό (VHB 4910 της 3M) και πολυδιμεθυλοσιλοξάνη (CF 19-2186 από Nusi) τα οποία παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες συγκεκριμένα σε σχέση με την απόκριση της παραμόρφωσης. Άλλες σιλικόνες έχουν μελετηθεί

συμπεριλαμβάνοντας DownCorningHS3 σιλικόνη και μία πολύ μαλακιά σιλικόνη του εμπορίου TC-5005 A/BC (BJBEnterprisesInc., USA). Το 3M VHB 4910 είναι ένα ευαίσθητο στην πίεση, κολλώδες ελαστομερικό φιλμ, το οποίο έχει υπάρξει ως υποψήφιο διηλεκτρικό ελαστομερές υλικό για πολυάριθμα ερευνητικά εγχειρήματα. Αυτό το υλικό είναι διαθέσιμο ως προκατασκευασμένο σε πάχος ενός χιλιοστού, κολλώδες και σε επίπεδο. Είναι εξαιρετικά εύκαμπτο, ανοίγοντας μέχρι 36 φορές στο χώρο προτού σπάσει. Αυτό το υλικό είναι φτιαγμένο από μία μίξη από αλιφατικοακρυλικό (aliphaticacrylate) , φωτισμένο κατά την διαδικασία παραγωγής. Η ελαστικότητά του οφείλεται στον συνδυασμό μαλακών δεσμίδων αλιφατικών ομάδων και από τους χαλαρούς κάθετους δεσμούς της ακρυλικής πολυμερικής αλυσίδας. Ο χειρισμός του υλικού αυτού είναι ευκολότερος σε σχέση με τη σιλικόνη, καθώς το ίδιο το φιλμ, σαν ταινία διπλής όψης παρέχει κολλητική ικανότητα, τέτοια ώστε τα ηλεκτρόδια είναι εύκολο να εφαρμοστούν και διατηρούν καλή επαφή με το ελαστομερές. Καθώς το ακρυλικό ελαστομερές είναι ισχυρό υλικό σε σχέση με την απόκριση παραμόρφωσης, η σιλικόνη έχει γρηγορότερη χρονική απόκριση διότι το ακρυλικό έχει μεγαλύτερες βισκοελαστικές απώλειες. Ο Zhangetal, παρουσίασε μία καινούρια κλάση από σιλικονούχα ελαστομερή σε σύγκριση με τα ακρυλικά ελαστομερή. Έχουν το πλεονέκτημα της σταθερής δυσκαμψίας πάνω από ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και χαμηλότερο ιξώδες οδηγώντας σε υψηλότερες χρονικές αποκρίσεις επενέργειας. Το νέο αυτό σιλικονούχο ελαστομερές παράχθηκε αλλάζοντας τον τύπο και την συγκέντρωση του σκληρυντή και αναμιγνύοντας την σιλικόνη με οργανικά υλικά. Ο υψηλός βαθμός απόδοσης επενέργειας είναι ένα ακόμα πλεονέκτημα της σιλικόνης σε σχέση με τα ακρυλικά προερχόμενο από το χαμηλό ιξώδες. Ο σχεδιασμός επενεργητή από ακρυλικά ελαστομερή είναι εν δυνάμει μη πρακτικός σε σχέση με την μεγάλη τους μεταβολή στην θερμοκρασία. Η σιλικόνη ωστόσο δεν παρουσιάζει αυτήν την μειονεκτική θερμοκρασιακή εξάρτηση με την ελαστικότητα να παραμένει σταθερή για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

Δ. Μελλοντική ανάπτυξη και συνπεράσματα

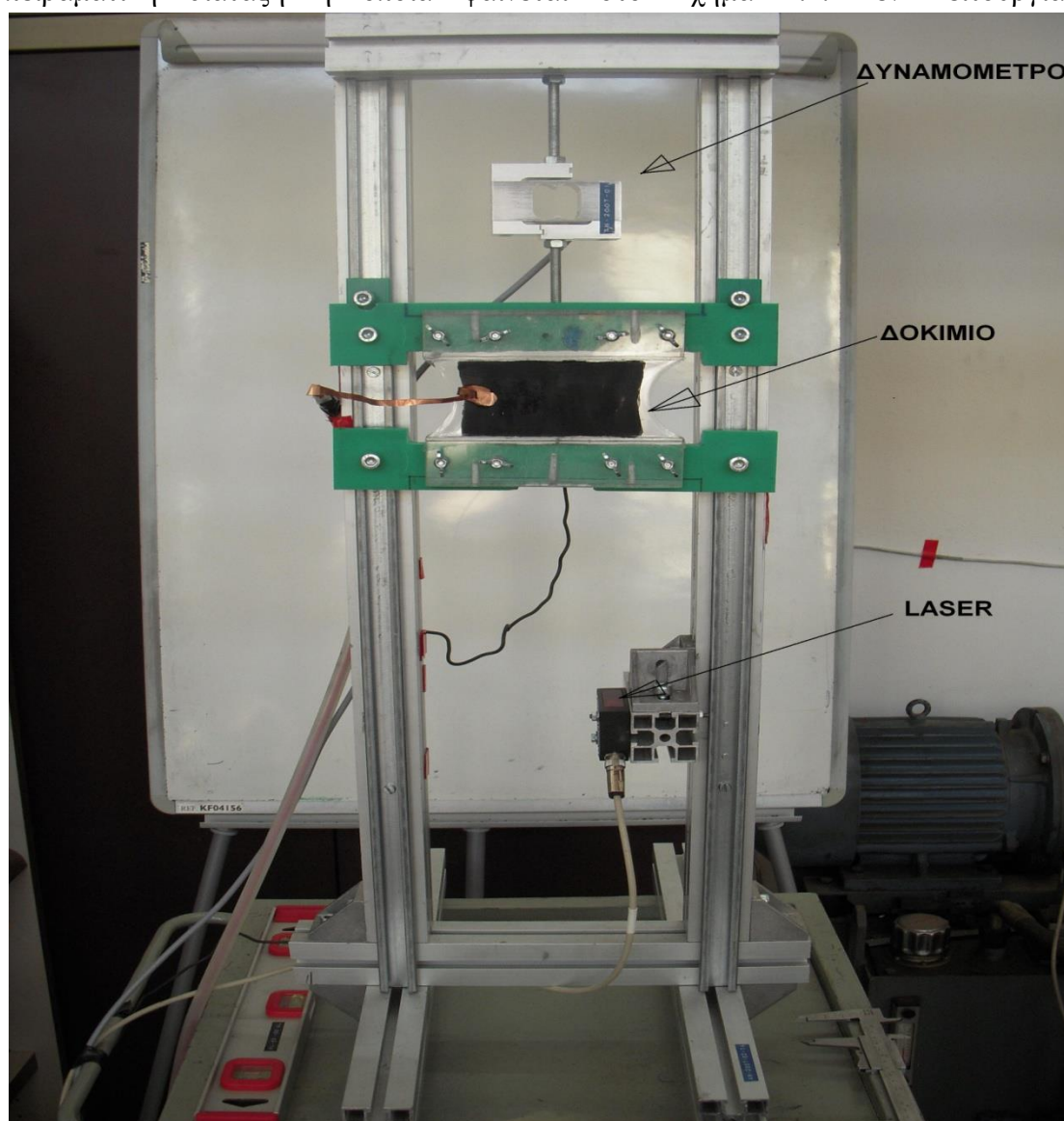
Η μελλοντική ανάπτυξη των διηλεκτρικών ελαστομερών ως μία βιώσιμη τεχνολογία επενεργητών απαιτεί πολύ μελέτη και μέχρι το σημείο αυτό αναμένονται πολυάριθμες συναρπαστικές προκλήσεις. Αρχικά η ανάπτυξη βελτιωμένων ελαστομερών ΗΕΠ είναι απαραίτητη. Συνεχόμενη έρευνα αναφορικά με την επίδραση των διάφορων τύπων σκληρυντών και συγκεντρώσεων στην απόδοση των επενεργητών καθώς και η συνένωση των διηλεκτρικών υλικών πλήρωσης μπορεί να οδηγήσει σε σύγχρονες βελτιώσεις της δύναμης επενέργειας και στην μείωση της τάσης λειτουργίας με μικρές απώλειες στην μηχανική παραμόρφωση. Τέτοιες βελτιώσεις θα εξυπηρετούσαν στην διεύρυνση του φάσματος των εφαρμογών τέτοιου τύπου επενεργητών. Για παράδειγμα τέτοιες μειώσεις της τάσης λειτουργίας θα μπορούσαν να εντάξουν εφαρμογές στον τομέα της βιοιατρικής και με την βελτίωση

της δύναμης επενέργησης θα μπορούσαμε να δούμε την αντικατάσταση βαρέων κινητήρων με ελαφρύτερους ελαστομερείς επενεργητές. Απαιτούνται περισσότερο εξειδικευμένα εύκαμπτα ηλεκτρόδια, που να είναι πολύ ελαστικά, να έχουν εξαιρετικά χαμηλό modulus, να είναι αγωγίμα και να προσαρτώνται ακλόνητα. Από πλευράς μοντελοποίησης, απαιτείται αρκετή δουλειά εύρεσης ακριβούς μοντέλου της συμπεριφοράς των διηλεκτρικών ελαστομερών ζευγοποιώντας ηλεκτρική και μηχανική συμπεριφορά ώστε να επιταχυνθεί η ανάπτυξη για νέους βελτιωμένους επενεργητές. Πρέπει να αναγνωριστούν κατάλληλοι παράμετροι ελέγχου και να αναπτυχθούν συστήματα ελέγχου ούτως ώστε τα διηλεκτρικά ελαστομερή να αντικαταστήσουν επάξια τις υπάρχουσες τεχνολογίες επενεργητών. Τα ΗΕΠ και συγκεκριμένα τα διηλεκτρικά ελαστομερή παρουσιάζονται ως υποψήφια συναρπαστικά υλικά για τη νέα γενιά υλικών επενέργησης. Συζητήθηκε το πλεονέκτημα των διηλεκτρικών ελαστομερών όσον αφορά στις συμβατικές τεχνολογίες επενεργητών σε σχέση με κάποια μοναδικά χαρακτηριστικά που μπορούν να προσφέρουν. Τα διηλεκτρικά ελαστομερή εξετάστηκαν από πλευράς υλικού όσο και επιπέδου διάταξης του επενεργητή. Επισημάνθηκαν σημαντικοί παράμετροι, μηχανικοί και ηλεκτρικοί και προτάθηκαν ποικίλες προσεγγίσεις προς την βελτιστοποίηση αυτών των ιδιοτήτων για την ανάπτυξη προηγμένων επενεργητών. Τέτοιες προσεγγίσεις περιέλαβαν την συνένωση των διηλεκτρικών υλικών πλήρωσης και την προένταση του υλικού. Η επιλογή των ηλεκτροδίων είναι αμφότερα εξαρτώμενη από το υλικό και την διαμόρφωση αυτών. Κρίνεται απαραίτητη η συνεχιζόμενη έρευνα στην ανάπτυξη πιο εξειδικευμένων εύκαμπτων ηλεκτροδίων με σκοπό την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ελαστομερών επενεργητών, σαν σύνολο. Ενώ υπάρχει ένας αριθμός από επιλογές εύκαμπτων ηλεκτροδίων τα οποία λειτουργούν πολύ καλά, περαιτέρω έρευνα στην εκτύπωση εύκαμπτων ηλεκτροδίων, για παράδειγμα, μπορεί να φανεί χρήσιμη στον τομέα των εφαρμογών με μικρό-επενεργητές. Συμπερασματικά, οι διηλεκτρικοί ελαστομερείς επενεργητές μελετήθηκαν εκτενώς κάτω από εργαστηριακές συνθήκες όπου έδειξαν υποσχόμενες επιδόσεις. Ωστόσο σε πρακτικές εφαρμογές, δεν έχουν ακόμα πετύχει το μέγιστο των δυνατοτήτων τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Τα πειράματα της παρούσας διατριβής έλαβαν χώρα στο εργαστήριο Δυναμικής και Κατασκευών του τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου. Όπως αναφέρθηκε στο 1^ο κεφάλαιο, το διηλεκτρικό ελαστομερές για να ενεργοποιηθεί, εφαρμόζονται δύο εύκαμπτα ηλεκτρόδια εκατέρωθεν των πλευρών του στα οποία διοχετεύεται ηλεκτρική τάση. Προκειμένου να προκύψει μία αντιπροσωπευτική εικόνα της δυναμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου υπό την επιβολή αυτής της τάσης, χρειάστηκε να καταγραφούν και να επεξεργαστούν φυσικά μεγέθη όπως η επιμήκυνση και η δύναμη, μεταβάλλοντας κάποιες παραμέτρους που θα αναφερθούν στη συνέχεια. Για αυτό τον λόγο κατασκευάστηκε μία πρωτότυπη πειραματική διάταξη η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4.1.1 εν λειτουργία.



Σχήμα 4.1.1 Η πειραματική διάταξη

Δεδομένου της φύσης του υλικού και των στόχων που επιλέχτηκαν, σχεδιάστηκε μία διάταξη με γνώμονα την απλότητα και τη λειτουργικότητα αυτής. Η διάταξη συγκρατεί το δοκίμιο με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούμε :

- να προσδοθεί στο δοκίμιο η απαραίτητη προένταση καθώς και τον έλεγχο αυτής (μέτρηση, σταθεροποίηση).
- να υπάρχει πρόσβαση εκατέρωθεν των πλευρών του φιλμ για την τοποθέτηση των εύκαμπτων ηλεκτροδίων.
- να υπάρχει η δυνατότητα κάθετης στήριξης και προστασίας των μετρητικών οργάνων (λείζερ, δυναμόμετρο).
- Η κινούμενη πλευρά του δοκιμίου να μπορεί να ολισθαίνει ελεύθερα και εναλλακτικά να σταθεροποιείται όταν αυτό είναι επιθυμητό.
- Όλες οι μετατοπίσεις, τοποθετήσεις μετρητικών οργάνων και ότι άλλο περιλαμβάνεται στη διάταξη, να είναι σε πλήρη συμφωνία με ένα ενιαίο σύστημα αξόνων xyz, όσο αυτό είναι εφικτό.

Υλικά

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιήθηκε το ελαστομερές φιλμ VHB 4910 της 3M και το HM 1100C της IMTX σε ρολλό 50cm που φαίνονται στο Σχήμα 4.1.2..

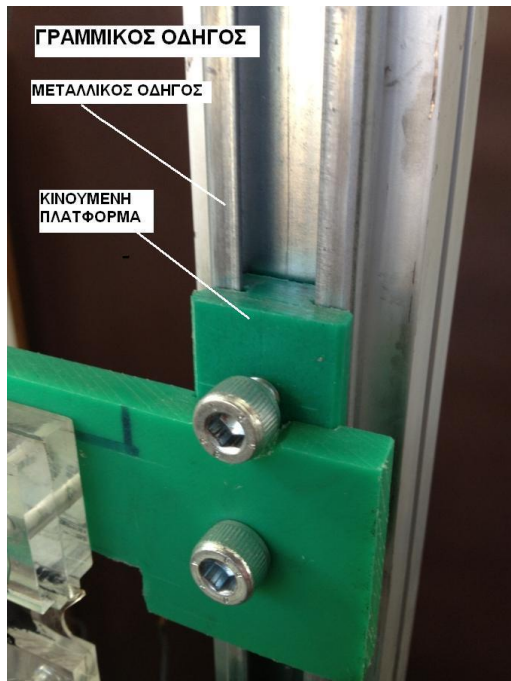
Από τα πολλά υλικά πολυμερικών φιλμ που μελετήθηκαν τα τελευταία 10 χρόνια το VHB 4910 ,στο πλείστο των περιπτώσεων, βρέθηκε να έχει την καλύτερη απόδοση αναφορικά με το έργο εξόδου για δεδομένη μάζα. Το πάχος των φιλμ είναι 1 mm.



Σχήμα 4.1.2 φιλμ VHB 4910 της 3M και το HM 1100C της IMTX

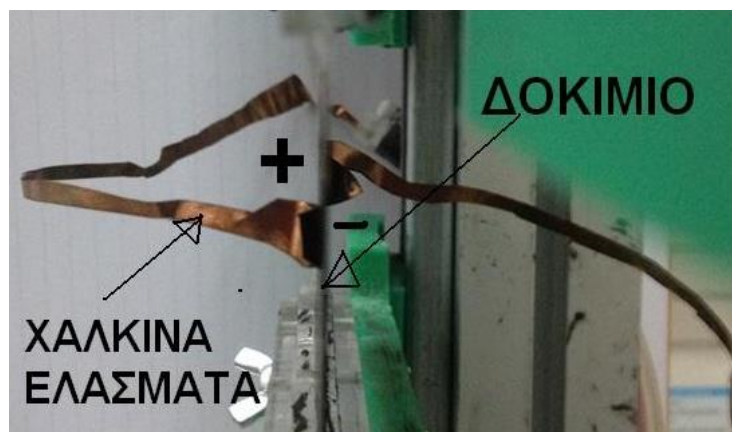
Το δοκίμιο συγκρατείται από τέσσερα διαμορφωμένα τεμάχια plexiglass τα οποία ανά δύο συγκρατούνται με 4 περαστούς κοχλίες. Πάλι με τη βοήθεια τεσσάρων κοχλιών, τα διαφανή plexiglass προσδέθηκαν σε 2 τεμάχια βιομηχανικού πλαστικού, πράσινου χρώματος όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Οι γραμμικοί οδηγοί στηρίχτηκαν σε προφίλ αλουμινίου τετραγωνικής διατομής, τεμάχια από τα οποία αποτελείται το βασικό πλαίσιο της διάταξης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.3.. Οι γραμμικοί οδηγοί κ

όλη η μεταλλική διάταξη είναι κατασκευασμένα ούτως ώστε να εξασφαλίζεται το επίπεδο στη βάση των οδηγών, οπότε κατά συνέπεια θεωρήθηκε πώς η ολίσθηση από την παραμόρφωση του δοκιμίου συντελείται κατά τον κάθετο άξονα Υ.



Σχήμα 4.1.3 Οι γραμμικοί οδηγοί

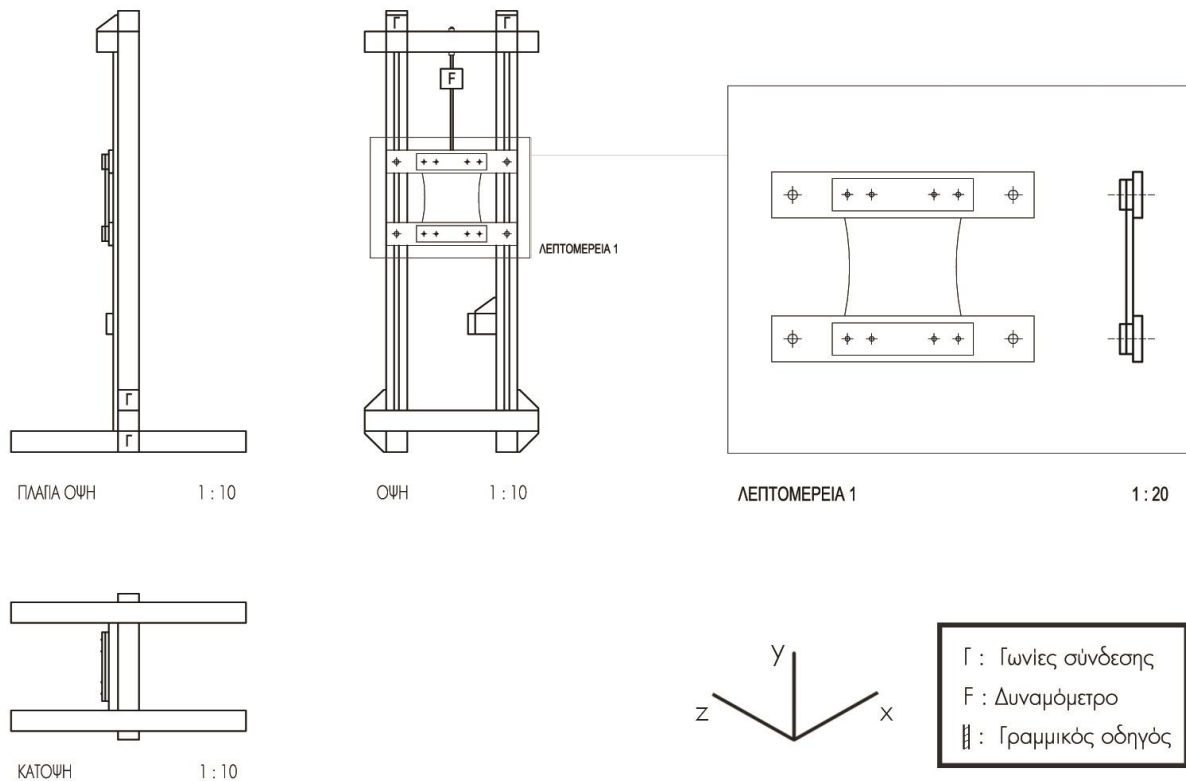
Λόγω της ευαισθησίας του δοκιμίου σε θράυση, διαμορφώθηκαν 2 ελάσματα που εφάπτονται στο φιλμ, ενεργοποιώντας τα ηλεκτρόδια. Ένα θετικό και ένα αρνητικό, όπως φαίνεται στην πλάγια όψη στο Σχήμα 4.1.4. Τα εν λόγω ελάσματα κατασκευάστηκαν αρχικά από αλουμίνιο και εν συνεχεία από χαλκό. Τελικά χρησιμοποιήθηκε χαλκός αφού έχει μεγαλύτερη ηλεκτρική διαπερατότητα.



Σχ. 4.1.4 Πλάγια όψη του δοκιμίου

Κοιτάζοντας το σχήμα 4.1.1 μπορεί κάποιος να παρατηρήσει μία μαύρη επιφάνεια. Είναι το θετικό εύκαμπτο ηλεκτρόδιο και αποτελείται από γράσο. Χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι τύποι ηλεκτροδίων όπως σκόνη, σπρέι καθώς και γράσο γραφίτη. Όλα προβάλλουν πολύ μικρή αντίσταση στην διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, παράμετρος που είναι βασική δεδομένου ότι στόχος μας είναι η ίση κατανομή των

ηλεκτροστατικών δυνάμεων σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου. Εν τέλει αποφασίστηκε η χρήση του γράσου Carbon Conductive Grease της MG chemicals καθώς βρέθηκε να είναι πιο εύκολο στην τοποθέτηση του πάνω στο διηλεκτρικό φιλμ. Επίσης επιλέχτηκε λόγω του γεγονότος ότι αφού εφαρμοστεί, κολλάει και «στέκεται» καλύτερα.



Σχήμα 4.1.5 Μηχανολογικό σχέδιο της διάταξης

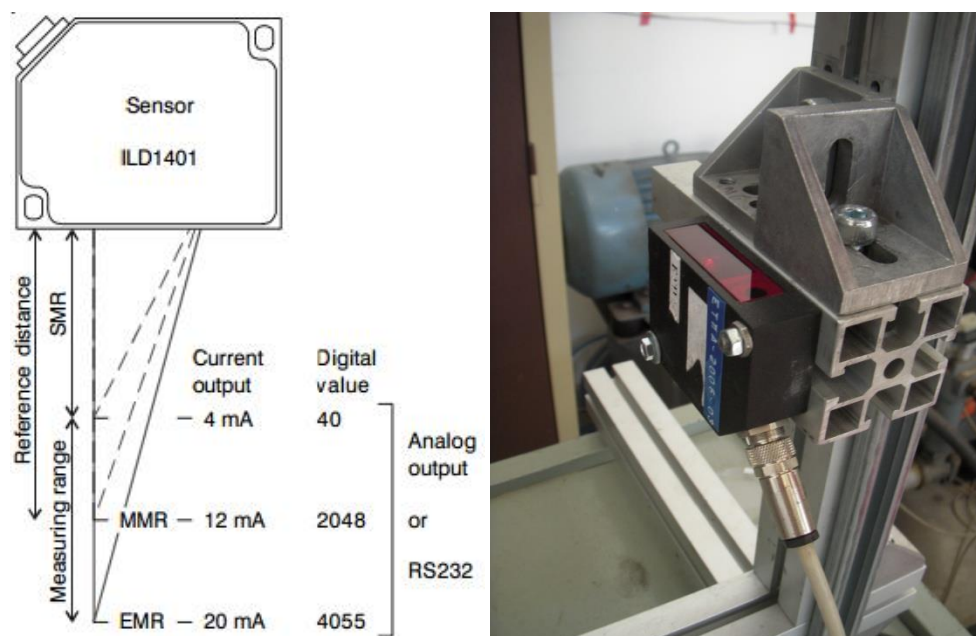
Στο Σχήμα 4.1.5 φαίνεται το μηχανολογικό σχέδιο της διάταξης σχεδιασμένο σε πρόγραμμα AutoCad.

4.2 ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Προκειμένου να καταγραφούν, να μεταφερθούν ψηφιακά και να γίνει επεξεργασία φυσικών μεγεθών όπως η επιμήκυνση, η δύναμη και η προένταση χρησιμοποιήθηκε μία σειρά περιφερειακών συσκευών (hardware) καθώς και συγκεκριμένο λογισμικό (software).

HARDWARE

Για την καταγραφή της προκύπτουσας επιμήκυνσης χρησιμοποιήθηκε η συσκευή **laserOPTO 1401** της εταιρίας MICROEPSILON. Αυτός ο αισθητήρας χρησιμοποιεί την αρχή της οπτικής τριγωνοποίησης, δηλαδή μία οπτικά κατευθυνόμενη ακτίνα φωτός προβάλλεται στην επιφάνεια του αντικειμένου. Συναρτήσει της απόστασης, μέρος της αντανάκλασης της ακτίνας παραλαμβάνεται από έναν αισθητήρα/στοιχείο CCD, το οποίο είναι ευαίσθητο σε μετατοπίσεις, δια μέσου του φακού λήψης ο οποίος βρίσκεται σε συγκεκριμένη γωνία συναρτήσει με τον οπτικό άξονα της δέσμης laser. Ο ελεγκτής υπολογίζει τη μετρούμενη αξία-μετατόπιση από τον αισθητήρα CCD. Μία εσωτερική επαναληπτική διαδικασία κλειστού βρόγχου, επιτρέπει στον αισθητήρα μετρήσεις σε διάφορες επιφάνειες, σύμφωνα με το ακόλουθο γράφημα



Σχήμα 4.2.1: Συσκευή LaserOPTO 1401

Το laser λειτουργεί μετροφοδοτικό AGILENT U8002A 0-30 V, 5A single output



Σχήμα 4.2.2 τροφοδοτικό laser



Σχήμα 4.2.3 : Δυναμόμετρο

Για την καταγραφή της μεταβολής των δυνάμεων καθώς και των τιμών της προέντασης χρησιμοποιήθηκε το **δυναμόμετρο S2 Force Transducer** της HottingerBaldwinMesstechnik που φαίνεται στο Σχήμα 4.2.3. Είναι πακτωμένο στην πάνω πλευρά πάνω στο προφίλ αλουμινίου. Ο κάτω κοχλίας συνδέεται με το σταθερό μέρος της διάταξης (τα άνω πλαστικά πράσινα τεμάχια) και κατά αυτόν τον τρόπο μπορούμε να έχουμε ένδειξη της δύναμης.

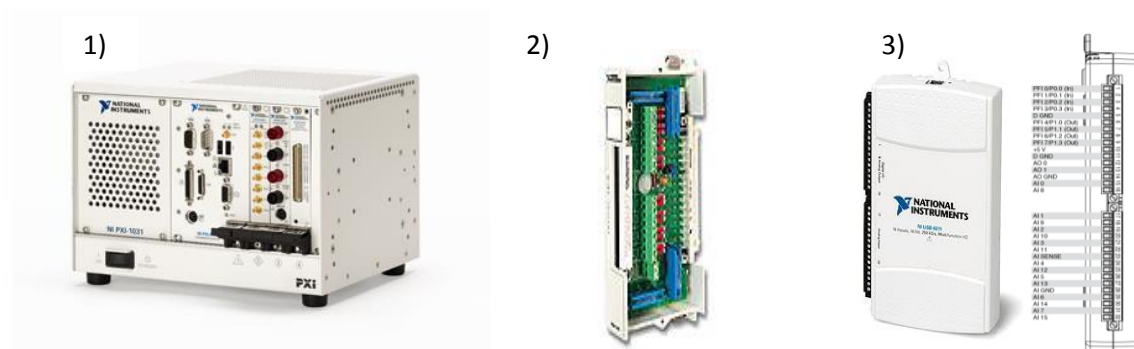


ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

Στο φιλμ εφαρμόζεται υψηλή τάση μέσω του τροφοδοτικού **TREK MODEL 10/10B HIGH VOLTAGE AMPLIFIER**. Είναι η κινητήριος δύναμη της διάταξης.

Σχήμα 4.2.4 : Τροφοδοτικό υψηλής τάσης

Επίσης χρησιμοποιήθηκε το PXI- 1031 της National Instruments με τις κάρτες SCXI - 1531 και NIUSB 6211 όπως φαίνονται στο σχήμα 4.2.5. Πάνω στην κάρτα USB συνδέθηκε το τροφοδοτικό υψηλής τάσης και τον ηλεκτρονικό υπολογιστή αποκτώντας τη δυνατότητα ελέγχου της εκάστοτε εφαρμοζόμενης τάσης.



σ σχήμα .4.2.5 PXI – 10312)SCXI– 1308 3) κάρτα NI USB 621

Το PXI συνδέθηκε μέσω καλωδίου ethernet στον Η/Υ και τέλος η κάρτα SCXI-1308 με τα μετρητικά όργανα (λείζερ, δυναμόμετρο).



Σχήμα 4.2.6 Φορητός Η/Υ συνδεδεμένος με τη διάταξη

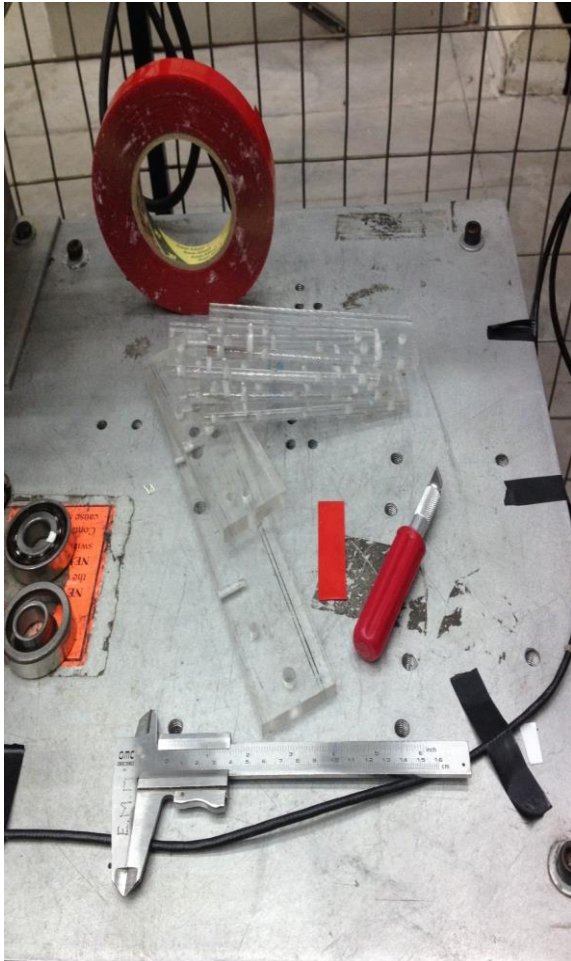
SOFTWARE

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν το πρόγραμμα LabVIEW καθώς και η γλώσσα προγραμματισμού MATLAB.

Με τη βοήθεια του LabVIEW έγινε η καταγραφή των αναλογικών σημάτων των μετρητικών οργάνων, έχοντας “φορτώσει” τον κατάλληλο αλγόριθμο στο PXI. Μέσω του Η/Υ και συνδυαστικά με το PXI και το LabVIEW, υπήρχε η δυνατότητα να φαίνεται σε πραγματικό χρόνο η επιβολή της τάσης. Σε δεύτερο χρόνο, έγινε παρατήρηση των διακυμάνσεων της επιμήκυνσης και της χαλάρωσης της δύναμης, μέσω της εφαρμογής *checkpin*. Τέλος, δουλεύοντας με το LabVIEW, υπήρχε πλήρης έλεγχος των παραμέτρων των πειραμάτων. Η συχνότητα δειγματοληψίας επιλέχτηκε να είναι $f=1000$ Hz

4.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

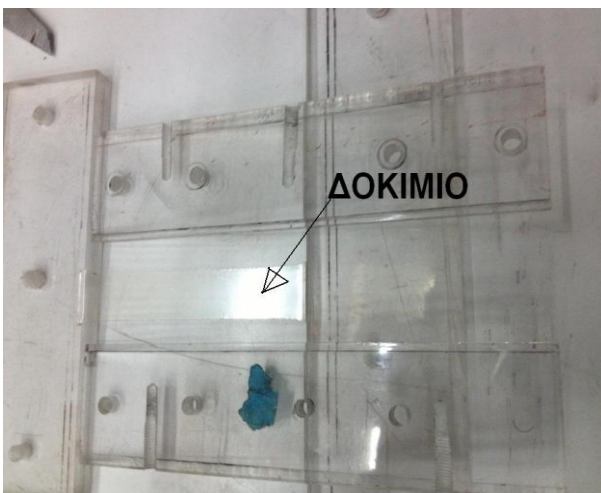
Σε αυτό το σημείο θα γίνει μία μικρή περιγραφή της προετοιμασίας του φιλμ από την εργοστασιακή του μορφή μέχρι την τελική του μορφή ως δοκίμιο, που



Χρησιμοποιήθηκαν τα τεμάχια συγκράτησης του δοκιμίου για να κοπεί και να προενταθεί το ελαστικό φιλμ.



Με τη βοήθεια του παχυμέτρου κόπηκε η ταινία στις επιθυμητές διαστάσεις και μετρήθηκαν οι διαστάσεις του δοκιμίου προς χάρην πληρότητας της πειραματικής διαδικασίας.



Σχήμα 4.3.3 Προένταση κατά τον άξονα X για τοποθέτηση



Σχήμα 4.3.4 Το δοκίμιο έτοιμο

Με τη βοήθεια των τεμαχιών plexiglass σαν οδηγούς, ήταν εφικτό να πιαστεί και να παραμορφωθεί το φιλμ στην επιθυμητή προέκταση κατά τον άξονα X. Αυτή η διαδικασία τηρήθηκε σε όλα τα πειράματα δίνοντας την δυνατότητα να ετοιμαστούν ιδίων διαστάσεων δοκίμια. Συγκρατούμενα πάνω στους άξονες X και Y, επετεύχθη καλύτερη ολίσθηση του κινούμενου μέρους πάνω στους γραμμικούς οδηγούς.



Αφού τοποθετήθηκε το δοκίμιο συγκρατούμενο από τα plexiglass, εφαρμόστηκε χειροκίνητα το γράσο και κατόπιν με τη βοήθεια επίπεδης πλάκας, απλώθηκε ομοιόμορφα στην επιφάνεια του ελαστομερούς φιλμ.

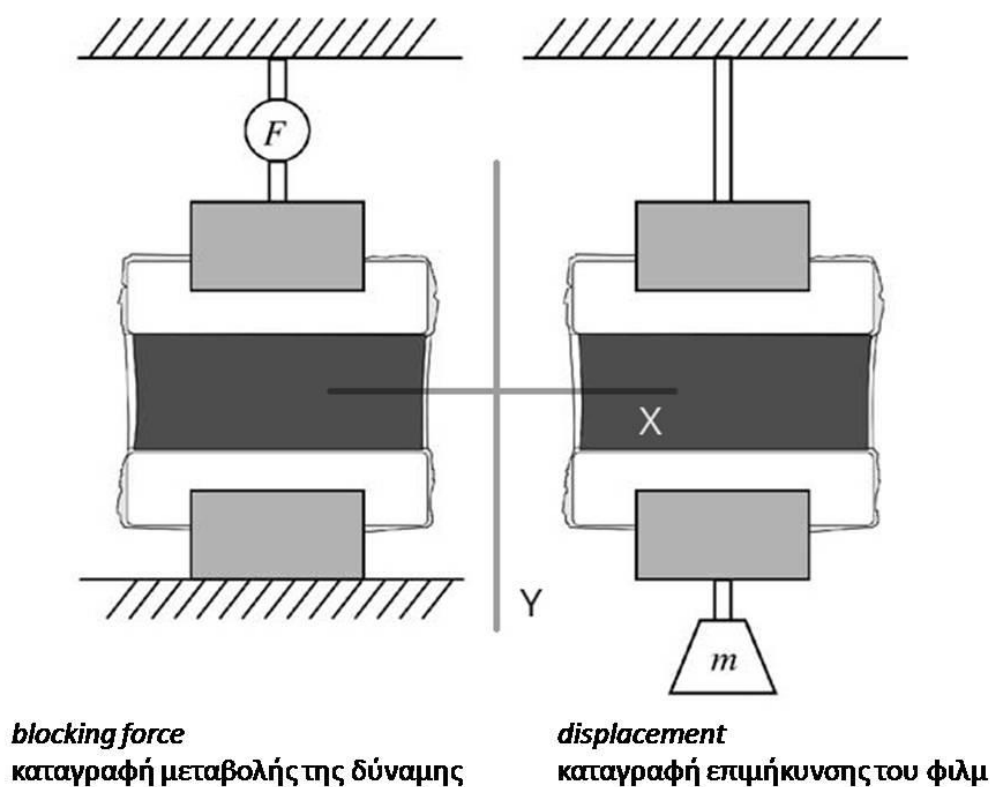
Τέλος τοποθετήθηκαν τα εύκαμπτα

ηλεκτρόδια πάνω στο δοκίμιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.5

4.4 Η ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Ο σκοπός της πειραματικής διαδικασίας ήταν η μελέτη και η ανάλυση των ηλεκτρομηχανικών ιδιοτήτων του διηλεκτρικού ελαστομερούς στη χρήση τους ως επενεργητή. Ύστερα από ανάγνωση των διεθνών διατριβών για τους Διηλεκτρικούς Ελάστομερης Επενεργητές και με πίστη στις ιδιαιτερότητες αυτών των υλικών σε μελλοντικές εφαρμογές, έγινε επιθυμητή η οργάνωση και η διεκπεραίωση μιας σειράς μετρήσεων. Στόχος της ήταν η παρατήρηση και η καταγραφή της ηλεκτρομηχανικής συμπεριφοράς τέτοιων υλικών καθώς και η ανάδειξη των πλεονεκτημάτων αλλά και των μειονεκτημάτων μίας τέτοιας διάταξης. Τέλος, μέσω της ανάλυσης και σύγκρισης δύο διαφορετικών ελαστομερικών φιλμ, η εργασία αυτή συμβάλλει έστω και λίγο στην επιστημονική έρευνα των επενεργητών από διηλεκτρικά ελαστομερή.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ



Σχήμα 4.4.1 Περιπτώσεις πειραμάτων και άξονες

Με σκοπό την καλύτερη απόδοση της διάταξης, το δοκίμιο προεντάθηκε κατά τον X άξονα και κατά τον Y , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.1. Ο όρος προένταση είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος στην εργασία αυτή, καθώς και στην γενικότερη έρευνα της χρήσης των υλικών αυτών σε επενεργητή. Με αυτόν τον τρόπο ουσιαστικά μειώθηκε η απόσταση των ηλεκτροδίων, αυξάνοντας τις εντάσεις Maxwell και θέτοντάς το ικανό να προσφέρει μεγαλύτερες επιμηκύνσεις κ δυνάμεις, περιορίζοντας το εύρος της ηλεκτρικής τάσης σε φυσιολογικά επίπεδα. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι τα 2 αντίθετα φορτισμένα εύκαμπτα ηλεκτρόδια βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους και δύναται να δημιουργήσουν μεγαλύτερες εντάσεις Maxwell.

Η προένταση X_{pre} στον άξονα των X , ήταν σταθερή για όλα τα πειράματα.

$$X_{pre} = \frac{X_2}{X_1} = \frac{160cm}{60cm} = 2.66$$

Όπου X_2 : το τελικό και

X_1 : το αρχικό πλάτος του δοκιμίου.

Κάθε δοκίμιο λοιπόν προεντάθηκε κατά 166%, σε σχέση με το αρχικό του πλάτος.

Αντίστοιχα για το μήκος ισχύει:

$Y_{pre} = \frac{Y_2}{Y_1}$, όπου Y_2 το τελικό και Y_1 το αρχικό μήκος του δοκιμίου. Η τιμή του Y_1 ήταν σταθερή σε όλα τα πειράματα.

$$Y_1 = 9 \text{ mm}$$

Όλα τα μετρήσιμα (επιμήκυνση, δύναμη) αλλά και τα μεταβαλλόμενα μεγέθη (βάρος, προένταση) καταγράφηκαν και επιβλήθηκαν, αντιστοίχα στον κάθετο άξονα, δηλ των Y (εικ.4).

Προένταση

Υπολογίζοντας το τελικό μήκος Y_2 του φιλμ, πριν την ενεργοποίηση, προκύπτει η προένταση.

Για $Y_2 = 45 \text{ mm}$ έχουμε $Y_{pre} = 5$ οπότε το δοκίμιο προεντάθηκε 400% σε σχέση με το αρχικό του μήκος.

Επιμήκυνση

Η επιμήκυνση του δοκιμίου επιτυγχάνεται μέσω της επιβολής της ηλεκτρικής τάσης και υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta Y = Y_3 - Y_2$$

Όπου Y_2 το μήκος του δοκιμίου πριν την ενεργοποίηση και
 Y_3 το μέγιστο μήκος του δοκιμίου όταν επιβάλλεται σε αυτό ηλεκτρική τάση.

Λόγος παραμόρφωσης (strain)

$$\varepsilon = \Delta Y / Y_2$$

4.4.1 ΕΡΠΥΣΜΟΣ ΕΛΑΣΤΟΜΕΡΟΥΣ

Αρχικά το ελαστομερές υποβλήθηκε σε εφελκυσμό χωρίς τη χρήση ηλεκτροδίων, άρα και ηλεκτρικού φορτίου. Από αυτή τη σειρά πειραμάτων εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά στην ιξωδοελαστικότητα του φιλμ, ουσιαστικά απομονώνοντας το μηχανικό μέρος από το ηλεκτρομηχανικό.

Για τον **ερπυσμό**, το δοκίμιο αφέθηκε ελεύθερο μόνο υπό την επίδραση βάρους και μέσω του laser καταγράφησαν οι αντίστοιχες επιμηκύνσεις. Το ελαστομερές φορτίστηκε με τρία διαφορετικά βάρη, **755, 920 και 1130 γραμμάρια**. Ο χρόνος επιβολής του βάρους ορίστηκε στα **300 sec**. Αυτή η χρονική διάρκεια θεωρήθηκε ικανοποιητική ώστε να αποτυπωθεί η συμπεριφορά του υλικού σε αυτή την καταπόνηση.

4.4.2 ΕΠΙΜΗΚΥΝΣΗ, ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ

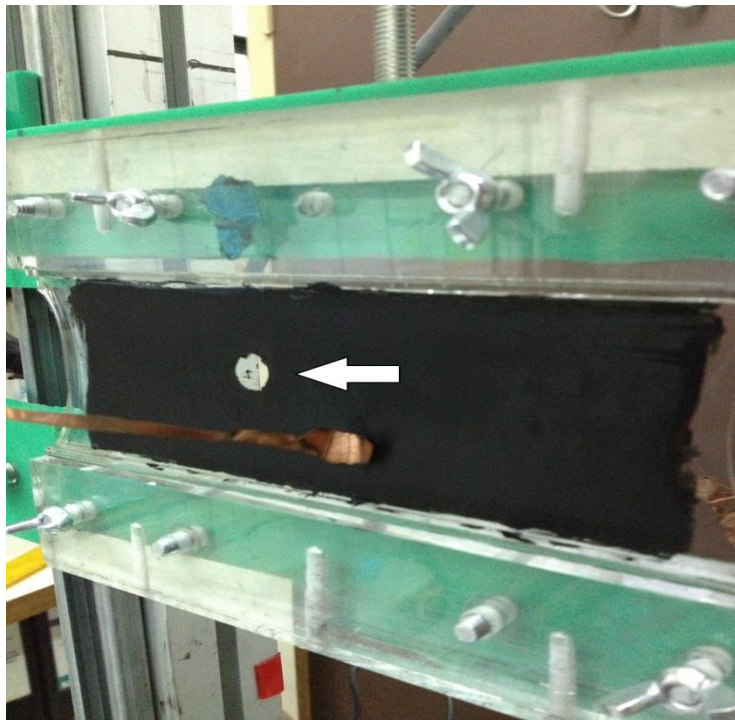
Η **κύρια σειρά πειραμάτων** που πραγματοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία αφορούν στην ηλεκτρομηχανική συμπεριφορά του φιλμ, παρουσία ηλεκτρικής τάσης.

Το μηχανικό μέρος είναι η επιμήκυνση του ελαστομερούς καθώς και η μεταβολή της δύναμης που ασκεί. Διεξήχθησαν πειράματα σε δύο διαφορετικά φιλμ με σκοπό να επιλέξουμε αυτά που θα είναι πιο αποδοτικά στη χρήση τους ως επενεργητές. Τα φιλμ είναι το VHB 4910 της 3M και το HM 1100C της IMTX . Οι παράμετροι που μεταβλήθηκαν ήταν η τιμή της τάσης, η τιμή της προέντασης και τέλος ο ρυθμός επιβολής της τάσης. Το μέγεθος της ηλεκτρικής τάσης [KV] αυξομειώνει τις εντάσεις Maxwell οι οποίες συμπιέζουν και τελικά παραμορφώνουν το ελαστομερές. Η προένταση του δοκιμίου οδηγεί σε μείωση του διηλεκτρικού κενού και μεταφράζεται σε πιο ισχυρές εντάσεις Maxwell, γεγονός που επιτρέπει στο δοκίμιο μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Η μεταβολή του ρυθμού της επιβολής της ηλεκτρικής τάσης επιλέχτηκε ώστε να υπάρχει μία εικόνα του χρόνου απόκρισης του δοκιμίου. Μελετήσαμε το δοκίμιο μέχρι το σημείο όπου θραύεται, μη μπορώντας να υπερνικήσει τις εντάσεις Maxwell.

Σε όλες τις περιπτώσεις, η προένταση ήταν **200, 400 και 600%** του αρχικού μήκους του ελαστομερούς φιλμ ενώ η ηλεκτρική τάση που επιβλήθηκε είχε τιμές **4,5 και 6 kV**. Όσον αφορά στην χρονική απόκριση, αρχικά η ηλεκτρική τάση επιβλήθηκε σε

χρονικό διάστημα **2 sec** και κατόπιν σε **0.1 sec**. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν για 2 διαφορετικές προεντάσεις **200 και 400%** σε σχέση πάντα με το αρχικό μήκος του φιλμ.

Σε αρκετές περιπτώσεις το ελαστομερές φιλμ ανήμπορο να υπερνικήσει τις ηλεκτροστατικές πιέσεις, επήλθε σε θραύση. Ουσιαστικά πρόκειται για βραχυκύκλωμα με αποτέλεσμα ορισμένες φορές το φιλμ να τυλιχτεί και στις φλόγες. Μέσω της παρατήρησης αυτής επιλέχτηκε το άνω όριο της ηλεκτρικής τάσης (6 KV), πάντα σε σχέση με την προένταση του φιλμ. Στο σχήμα 4.4.2 φαίνεται η αστοχία ενός δοκιμίου.



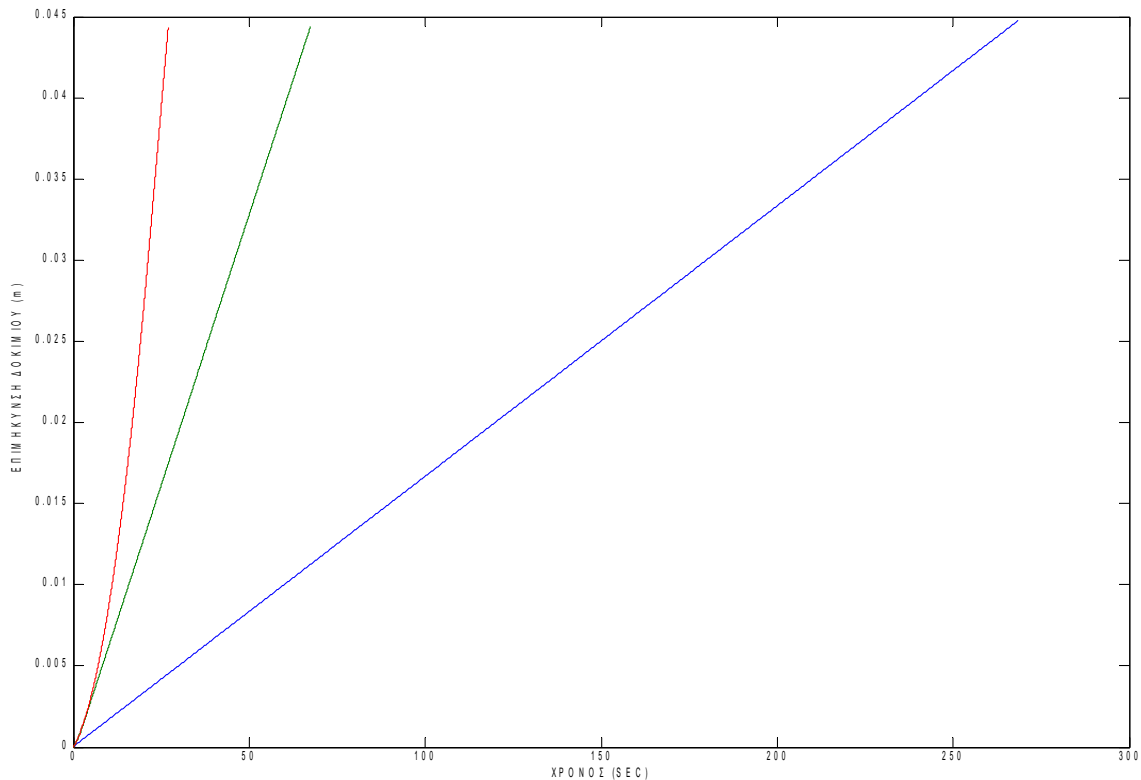
Σχήμα 4.4.2 : Αστοχία του ελαστομερούς φιλμ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

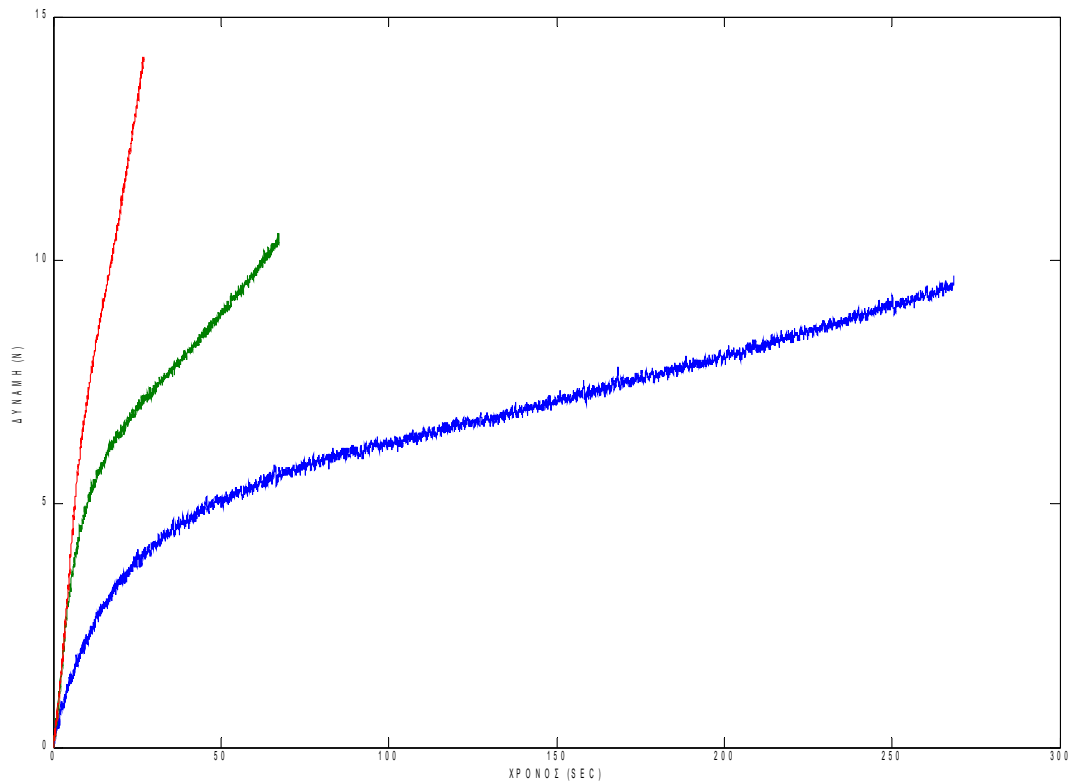
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Μηχανική Συμπεριφορά Ελαστομερούς

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η μηχανική συμπεριφορά του ελαστομερούς. Αποτελεί τμήμα παλαιότερης έρευνας στα πλαίσια του εργαστηρίου. Στα συγκεκριμένα διαγράμματα έχει χρησιμοποιηθεί ελαστομερές VHB 4910. Δοκίμιο ελαστομερούς, παραμορφώθηκε σε μηχανή εφελκυσμού, με τρεις διαφορετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης. Όπως φαίνεται στο πρώτο διάγραμμα, το δοκίμιο φτάνει στον ίδιο λόγο παραμόρφωσης, σε διαφορετικούς χρόνους.



Από το διάγραμμα τη δύναμης, συναρτήσει του χρόνου, προκύπτει η ισχυρή βισκοελαστική συμπεριφορά του υλικού. Όσο ταχύτερα επιβάλλεται η παραμόρφωση, αντιστοίχως αυξάνεται η ελαστική δύναμη του ελαστομερούς.



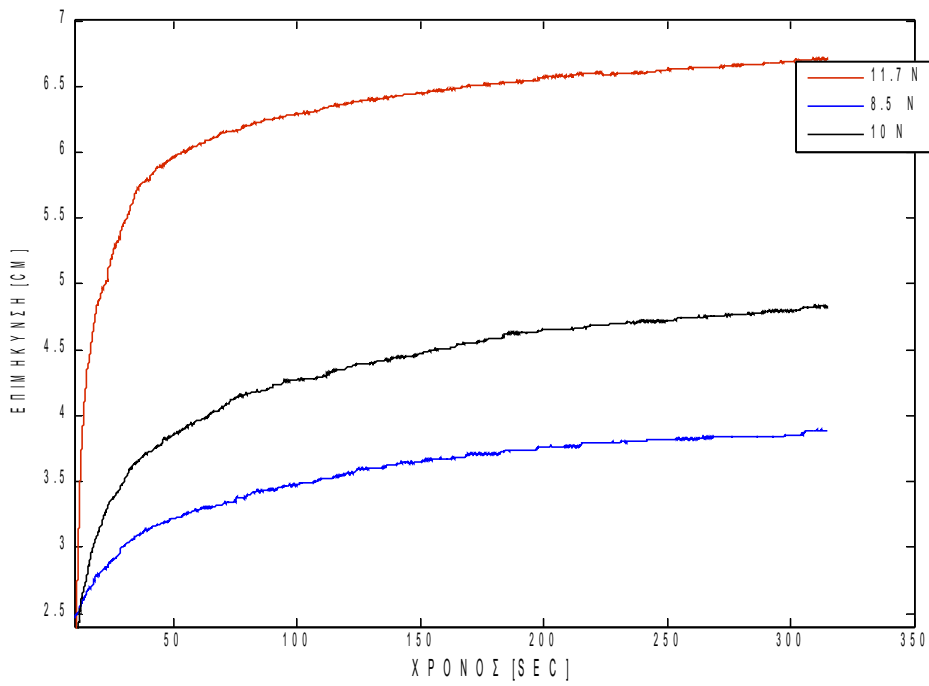
Σε σχέση με τα μοντέλα που αναλύθηκαν προηγουμένως, είναι προφανές πως, το μοντέλο Ogden, μπορεί να παρακολουθήσει καλύτερα τη συμπεριφορά του ελαστομερούς. Όμως σε κάθε διαφορετικό ρυθμό παραμόρφωσης αντιστοιχούν διαφορετικές τιμές για τις ελαστικές σταθερές. Εδώ φαίνεται πως το μη γραμμικό ελαστικό μοντέλο δεν μπορεί να περιγράψει πλήρως τη συμπεριφορά του υλικού, και πρέπει να χρησιμοποιηθούν μοντέλα μη γραμμικής βισκοελαστικότητας.

Ερπυσμός Ελαστομερούς

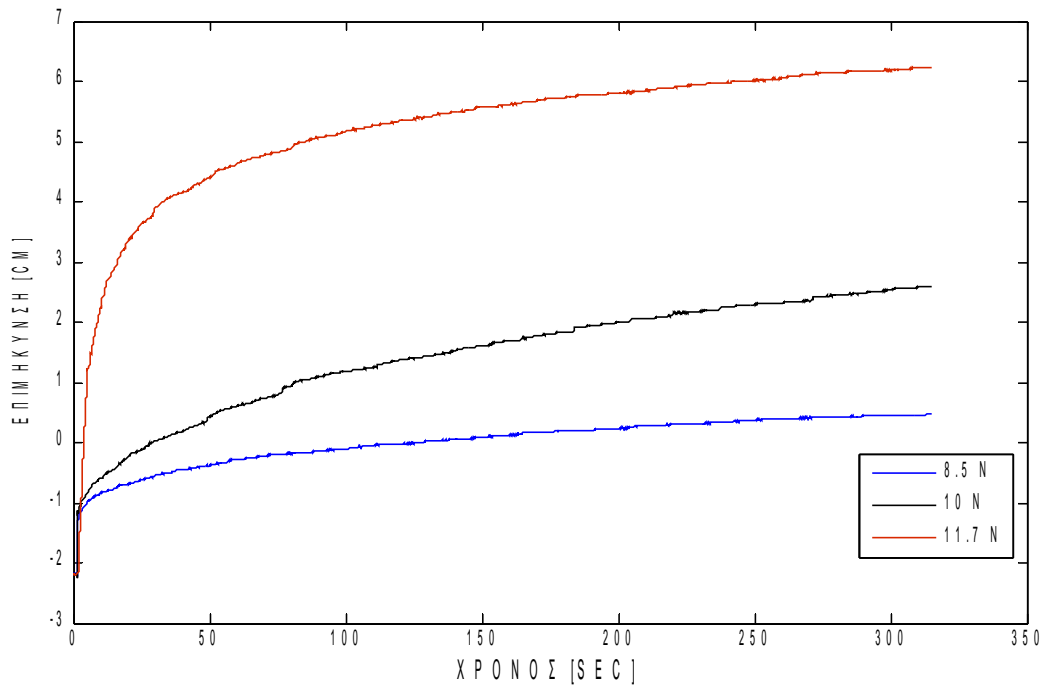
Για να αποκτηθεί βαθύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του ελαστομερούς, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, όπως περιγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας.

Ακολουθούν τα διαγράμματα ερπυσμού του ελαστομερούς, κάτω από την επίδραση ενός κατακόρυφου σταθερού βάρους (για τρεις διαφορετικές τιμές βάρους):

Για το υλικό VHB 4910



Για το υλικό HN 1100C

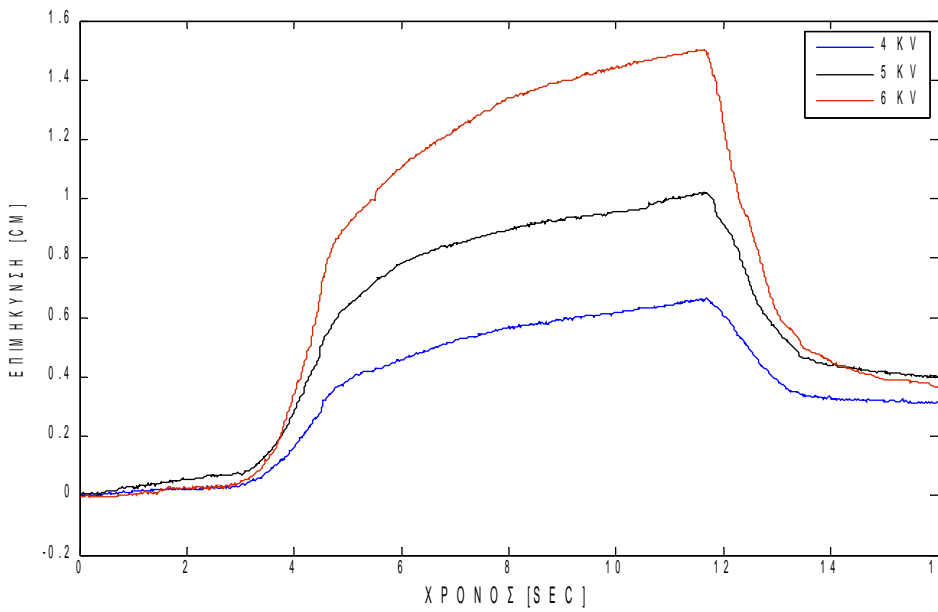


Και στα δύο υλικά, φαίνεται η ισχυρή επίδραση της βισκοελαστικότητας,

Επιμήκυνση Επενεργητή

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, μετρήθηκε η επιμήκυνση του επενεργητή, κάτω από την επίδραση της ηλεκτρικής τάσης.

Ενδεικτική μορφή των αποκρίσεων που ελήφθησαν, φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Επιμήκυνση συναρτήσει του χρόνου. Προένταση 400%

Είναι εμφανές πώς πέρα από την ηλεκτρική τάση, συνεισφέρει στην επιμήκυνση του επενεργητή ο ερπυσμός με την εφαρμογή της ηλεκτρικής δύναμης. Στοιχείο το οποίο δεν είναι επιθυμητό στο βαθμό που επιδιώκεται η ελεγχόμενη επιμήκυνση του επενεργητή.

Στους πίνακες που ακολουθούν είναι συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα: Η επιμήκυνση του επενεργητή, καθώς και ο λόγος παραμόρφωσης (strain), για τα δύο υλικά σε τρεις διαφορετικές προεντάσεις.

Για το υλικό VHB 4910

Προένταση 200%

Τάση (kV)	Επιμήκυνση (mm)	Strain %
4	1,5	8,3
5	3,7	20,5
6	6,1	33,8

Προένταση 400%

Τάση (kV)	Επιμήκυνση (mm)	Strain %
4	5,08	14,1
5	8,6	23,8
6	14,8	41,1

Προένταση 600%

Τάση (kV)	Επιμήκυνση (mm)	Strain %
4	6,6	12,3
5	12,8	23,7
6	21,2	39,2

Για το υλικό HN 1100C

Προένταση 200%

Τάση (kV)	Επιμήκυνση (mm)	Strain %
4	1,85	10,2
5	3,2	17,7
6	4,5	25

Προένταση 400%

Τάση (kV)	Επιμήκυνση (mm)	Strain %
4	4,7	13,3
5	8,4	23,3
6	14,3	39,7

Προένταση 600%

Τάση (kV)	Επιμήκυνση (mm)	Strain %
4	7,5	13,8
5	12,2	22,5
6	20,1	37,2

Και τα δύο υλικά εμφανίζουν αντίστοιχα επίπεδα λόγω παραμόρφωσης. Οι λόγοι παραμόρφωσης είναι ιδιαίτερος υψηλοί, αποδεικνύοντας τις δυνατότητες του υλικού, ως επενεργητή. Αντιστοίχως σε όλα τα επίπεδα προέντασης εμφανίζονται αντίστοιχα επίπεδα παραμόρφωσης. Η μέγιστη επιμήκυνση καθορίζει το επίπεδο προέντασης. Βεβαίως όσο μεγαλύτερη είναι η προένταση, μειώνεται και η μέγιστη τάση που μπορεί να επιβληθεί, γεγονός που πρέπει να διερευνηθεί.

Ηλεκτρική Δύναμη Επενεργητή

Όπως προαναφέρθηκε , μετρήθηκε η ηλεκτρική δύναμη που παράγει ο επενεργητής μέσω του block force experiment.

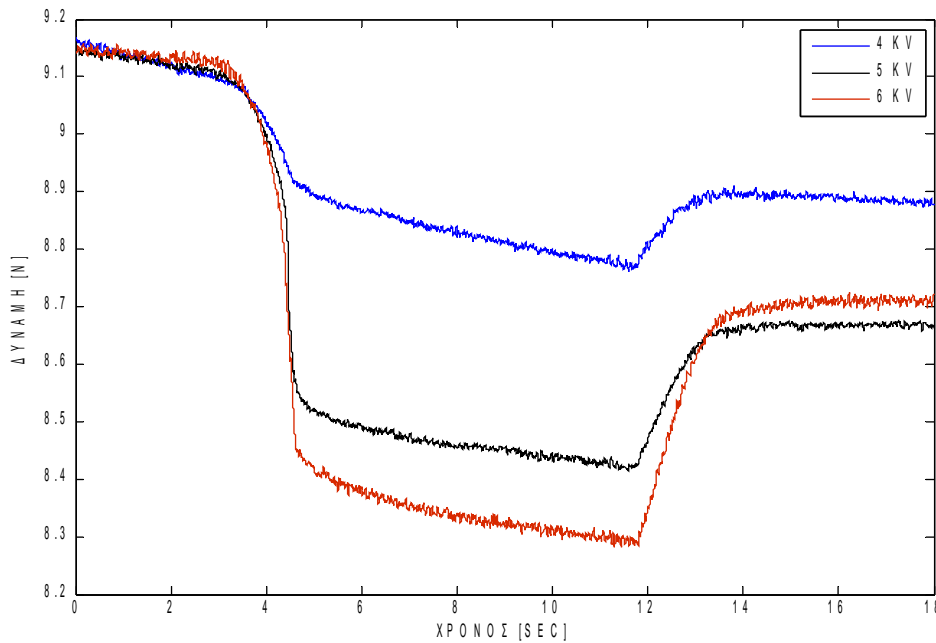
Γενικά ισχύει $F_{load} + F_{maxwell} = F_{elas}$.

Αγνοώντας τις βισκοελαστικές δυνάμεις, και τις δυνάμεις λόγω επιτάχυνσης, έχουμε:

F_{load} : Η εξωτερική δύναμη που επιβάλλεται στο ελαστομερές (για την προένταση), και μετράται από το δυναμόμετρο

F_{elas} : Η ελαστική δύναμη του ελαστομερούς.

Με την επιβολή ηλεκτρικής τάσης, παράγεται ηλεκτρική δύναμη, η οποία αναπαριστάται σαν πτώση της δύναμης που μετράται από το δυναμόμετρο, όπως φαίνεται παρακάτω στο ενδεικτικό διάγραμμα.



Στους πίνακες που ακολουθούν είναι συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα: Η ηλεκτρική δύναμη του επενεργητή, για τα δύο υλικά σε τρεις διαφορετικές προεντάσεις.

Για το υλικό VHB 4910

Προένταση 200%

Τάση (kV)	Δύναμη (N)
4	0,14
5	0,38
6	0,58

Προένταση 400%

Τάση (kV)	Δύναμη (N)
4	0,24
5	0,6
6	0,73

Προένταση 600%

Τάση (kV)	Δύναμη (N)
4	0,7
5	1,2
6	1,4

Για το υλικό HN 1100C

Προένταση 200%

Τάση (kV)	Δύναμη (N)
4	0,15
5	0,43
6	0,67

Προένταση 400%

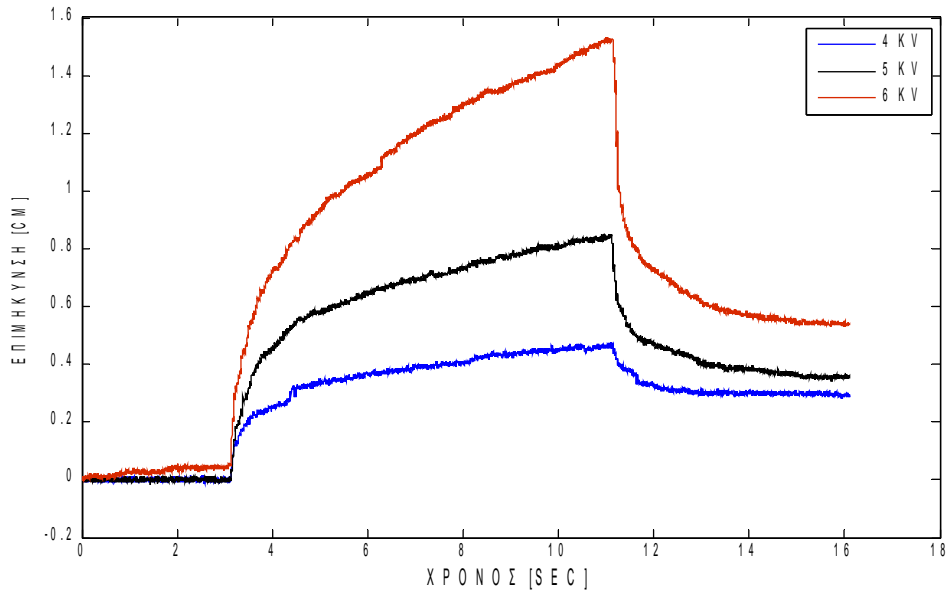
Τάση (kV)	Δύναμη (N)
4	0,21
5	0,37
6	1,2

Προένταση 600%

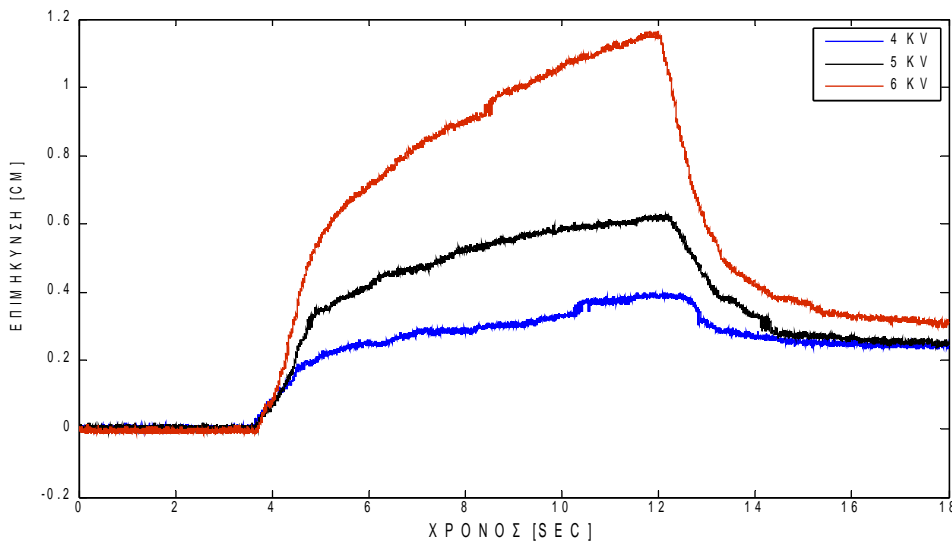
Τάση (kV)	Δύναμη (N)
4	0,4
5	1,15
6	1,87

Αντιστοίχως τα δύο υλικά παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Επίσης το επίπεδο προέντασης καθορίζει τη μέγιστη δυνατή δύναμη. Πρέπει να σημειωθεί πως μεγαλύτερα επίπεδα δύναμης, μπορούν να επιτευχθούν απο συστοιχία επενεργητών εν παραλλήλω.

Χρονική απόκριση επενεργητή



Επιμήκυνση συναρτήσει του χρόνου. Προένταση 400% και χρόνος επιβολής της τάσης 0.1 sec



Επιμήκυνση συναρτήσει του χρόνου. Προένταση 400% και χρόνος επιβολής της τάσης 2sec

Στα δύο παραπάνω διαγράμματα φαίνεται η επιμήκυνση του επενεργητή, με διαφορετικό το προφίλ εφαρμογής της τάσης. Όπως φαίνεται η ταχύτερη επιβολή της τάσης προκαλεί μεγαλύτερα επίπεδα παραμόρφωσης, γεγονός που πρέπει να διερευνηθεί.

Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια πρώτη διερεύνηση των δυνατοτήτων των διηλεκτρικών ελαστομερών, ως επενεργητών. Πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση. Αναδείχθηκε η πληθώρα των εφαρμογών και των δυνατοτήτων των συγκεκριμένων υλικών. Η πληθώρα μοντέλων, πρέπει να ελεγχθεί σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα που αποκτήθηκαν. Τα συγκεκριμένα ελαστικά μοντέλα, φαίνεται πως δεν μπορούν να καλύψουν τις δυναμικές περιπτώσεις φόρτισης, για μεγάλες παραμορφώσεις και πρέπει να ενσωματωθούν μοντέλα μη γραμμικής βισκοελαστικότητας για να περιγραφεί πλήρως η συμπεριφορά του υλικού,

Σε πειραματικό επίπεδο διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Η δυνατότητα για παραγωγή πολύ μεγάλων παραμορφώσεων. Τα επίπεδα επιμήκυνσης του επενεργητή, είναι πολύ ανώτερα από πολλές άλλες τεχνολογίες επενεργητών.
- Η δυνατότητα για παραγωγή μεγάλων δυνάμεων με την εν παραλλήλω χρήση επενεργητών.
- Η σημασία της προέντασης, για την παραγωγή μεγάλων επιμηκύνσεων. Ενώ οι λόγοι παραμόρφωσης φαίνονται να είναι ανεξάρτητοι, από την προένταση.
- Συγκρίθηκαν δύο υλικά διαφορετικών εταιρειών, και εμφάνισαν αντίστοιχες ιδιότητες.
- Η ισχυρή επίδραση της βισκοελαστικότητας του υλικού, το οποίο αποτελεί μειονέκτημα για τη λειτουργία του ως επενεργητή.

Τα συγκεκριμένα υλικά, εκτός των άλλων ιδιοτήτων τους, έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι είναι πολύ ελκυστικά από πλευράς κόστους. Το στοιχείο αυτό τα κάνει ιδιαίτερος ελκυστικά και σαν επενεργητές, αλλά και σαν υποψήφια υλικά για παραγωγή ενέργειας.

Σε μελλοντικό στάδιο πρέπει, ανάμεσα σε άλλα να ερευνηθούν τα κάτωθι:

- Προσομοίωση του ελαστομερούς με μοντέλα μη γραμμικής βισκοελαστικότητας, όπως αποτελεί το μοντέλο των Bergstrom-Boyce.
- Διάταξη ανταγωνιστικών επενεργητών, για την αντιμετώπιση των βισκοελαστικών φαινομένων, καθώς και για πιο αποτελεσματική εφαρμογή της αναγκαίας προέντασης.
- Βελτίωση της πειραματικής διάταξης, για τη μείωση των τριβών των οδηγών.
- “Εξυπνοι” τρόποι οδήγησης του ηλεκτρικού κυκλώματος, για την αντιμετώπιση των βισκοελαστικών φαινομένων (π.χ. PID).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βασιλείου Παναγιωτα - Ανδρεοπουλος Ανδreas. “Υλικά”. ΑθηνΑ.1999
- Xuequn Zhang, Cristiane Lowe, Michael Wissler, Bemd Jahne and Gador Kovacs(Advanced Engineering Materials) “Dielectric Elastomers in Actuator Technology. “.
- Στάθης Πανταζίδης. “Βιβλιογραφική ανασκόπηση διηλεκτρικών ηλεκτροενεργών πολυμερών και σχεδιασμός σχετικής μετρητικής διάταξης. Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών. ΕΜΠ. 2006
- Ευαγγελίου Γ. Νικόλαου Γιαταγάνα Θ. Πέτρου. Διπλωματική Εργασία: Κατασκευή και έλεγχος Ρομποτικού Πολυαρθρωτού Εργαλείου με Χρήση Εξυπνων Υλικων. Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών. Πολυτεχνικής Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών
- Παναγιωτου Κ. “Επιστημη και τεχνολογια πολυμερων”, 3η εκδοση . 2006
- Βασιλης Αγαπητος. Διπλωματικη Εργασια: Παραμετρικη μελετη ποδιου ρομποτ με ποδια και πειραματικη αξιολογηση επενεργησης πελματος από τεχνικο μυ (DEAP). Σχολη Μηχανολογων Μηχανικων Ε.Μ.Π.
- Guggi Kofod, Peter Sommer-Larsen, “Silicone dielectric elastomer actuators: Finite-elasticity model of actuation. 2005
- THEORY OF DIELECTRIC ELASTOMERS Zhigang Suo (School of Engineering and Applied Sciences, Kavli Institute for Nanobio Science and Technology. Harvand Unoversity, Cambridge)
- Καλκανη Γ.- Ι. Χατηρη. “Τεχνολογια Υλικων”, εκδοσεις Ιών . 2008
- Guggi Kofod, Peter Sommer-Larsen, “Silicone dielectric elastomer actuators: Finite-elasticity model of actuation. 2005
- Application of Dielectric Elastomer EAP Actuator Roy Kornbluh, Ron Pelrine, Qibing Pei, Marcus Rosenthal Scott Stantord, Neville Bonwit, Richard Heydt, Harsha Prahlad Subramanian V.Shastrri
- Ratner, Ed. , B. D. et al. (2004). Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine . Academic Press , New York, NY .
- Y. Bar-Cohen, *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles*
- Heydt R., R. Pelrine, J. Joseph, J. Eckerle and R. Kornbluh, ‘Acoustical performance of an electrostrictive polymer film loudspeaker’, *J Acoustical Society of America*, Vol 107, No 2(2000)
- Chiba S., M. Waki, R. Kornbluh, M. Waki, T. Yanagisawa and S. Yonemura, Electroactive polymer artificial muscles (energy harvesting mode and high efficiency actuation mode). Eco Design 2007, Tokyo, Japan, December 10-13, 2007.
- Chiba S., R. Kornbluh, R. Pelrine, M. Waki, “Novel Electric Generator Using Electroactive Polymer Artificial Muscle (EPAM)”, 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010
- Μεργος Ιωαννης Α. “Διηλεκτρικά Υλικά και Περιβάλλον”. Διδακτορικη Διατριβη ΑθηνΑ Ε.Μ.Π. 2007

- Hunter, I.W., and S. Lafontaine. 1992. "A Comparison of Muscle with Artificial Actuators," *Technical Digest of the IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head, South Carolina, pp. 178–185.
- Federico Carpi, Danilo de Rossi, Roy Kornbluh, Ronald Perline, Petter Sommer Larsen. 2007. "Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers"
- Ailish O'Halloran, Fergal O'Malley, Peter MacHug. "A review on dielectric elastomer actuators, technology, application and challenges." 2008. Department of Electronic Engineering, National University of Ireland