

**Ευφυείς αυτο-ελεγχόμενες και αυτο-επιδιορθώμενες
κοχλιωτές συνδέσεις σε μεταλλικές κατασκευές**

Παπαντωνίου Γιάννης
Χασαπόπουλος Θάνος

Διπλωματική Εργασία που εκπονήθηκε στο εργαστήριο εφαρμοσμένης
μηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης

Επιβλέπων καθηγητής: Προβιάκης Κωσταντίνος

Οκτώβριος 2010
Χανιά, Κρήτη

Πρόλογος

Η ανάπτυξη μεθοδολογιών για τον εντοπισμό βλαβών σε υλικά δομικών στοιχείων και κατασκευών και η επιδιόρθωση τους αποτελεί βασικά ενδιαφέρον στο τομέα της εφαρμοσμένης μηχανικής. Η δυνατότητα ελέγχου της δομικής ακεραιότητας των υφιστάμενων κατασκευών αλλά και η έγκυρη προειδοποίηση που τυχόν παρουσιάζεται σε αυτές είναι ζωτικής σημασίας. Η εξέλιξη των ευφύων υλικών και η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους στον τομέα του ελέγχου κατασκευών είναι ένα αντικείμενο που παρά την υπάρχουσα τεχνολογία έχει μεγάλες δυνατότητες περαιτέρω έρευνας. Συγχρόνως, πολύ σημαντικό επίτευγμα της μηχανικής αποτελεί η επισκευή των κατασκευών με τη χρήση ευφύων συστημάτων με στόχο την παράταση της διάρκειας λειτουργίας τους και την ασφάλεια των ανθρώπων που τη χρησιμοποιούν.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο εφαρμοσμένης μηχανικής του γενικού τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης κατά το ακαδημαϊκό έτος 2009-2010.

Ο βασικός στόχος της είναι η ανάπτυξη τεχνικών ελέγχου δομικής ακεραιότητας και αυτόματης επιδιόρθωσης μεταλλικών κατασκευών με κοχλιοσύνδεση, με τη χρήση ευφύων υλικών.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό, νιώθουμε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε ορισμένους ανθρώπους που συνέβαλαν ο καθένας με τον τρόπο του στην εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Εκφράζουμε θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μας Κωνσταντίνο Προβιδάκη, καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την πολύτιμη επιστημονική βοήθεια, την άψογη συνεργασία, τον χρόνο που μας αφιέρωσε, την αμεσότητα στην επικοινωνία μας καθώς και την φιλική του στάση απέναντι μας η οποία αποτέλεσε σημαντική παρότρυνση στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Ευχαριστούμε τους καθηγητές της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής:

- Αλέξανδρο Γκότση, Αναπληρωτή Καθηγητή Γενικού Τμήματος Πολυτεχνείου Κρήτης.
- Αριστομένη Αντωνιάδη, Αναπληρωτή Καθηγητή Τμήματος Μ.Π.Δ. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Επίσης νιώθουμε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε, για την βοήθειά του και τις συμβουλές του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, τον Βαγγέλη Διαράκος. Ο οποίος εκτός από πολύ καλός επιστήμονας είναι και καλός μας φίλος.

Εν τέλει θέλουμε να ευχαριστήσουμε όλα τα μέλη του εργαστηρίου και κυρίως την Μαρία Στυλιανή Βουτετάκη, την Ιωάννα Τζαβάρα και την Πόπη Στεφανάκη στην οποία και ευχόμαστε καλή αρχή στο διδακτορικό της.

1. Μέρος πρώτο

Εισαγωγή	
1.1 Ευφυή υλικά	7
1.2 Αισθητήρες στα ευφυή συστήματα	11
1.3 Ενεργοποιητές στα ευφυή συστήματα	12
1.3.1 Πιεζοηλεκτρικά υλικά	12
1.3.2 Μαγνητοσυστολικά υλικά	13
1.3.3 Ηλεκτροσυστολικά υλικά	16
1.3.4 Ηλεκτρορεολογικά υλικά	19
1.3.5 Μαγνητορεολογικά υλικά	19
1.3.6 Κράματα μνήμης μορφής	21
1.3.7 Μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα	22
1.4 Πιεζοηλεκτρισμός	23
1.4.1 Ιστορία του πιεζοηλεκτρισμού	23
1.4.2 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	23
1.4.3 Υλικά που εμφανίζουν πιεζοηλεκτρισμό	28
1.4.4 Πλεονεκτήματα πιεζοηλεκτρικών υλικών	31
1.4.5 Μαθηματική περιγραφή φαινομένου	32
1.4.6 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και οι εφαρμογές τους	34
1.4.7 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων	35
1.5 Έλεγχος δομικής ακεραιότητας των κατασκευών	38
1.5.1 Αναγκαιότητα ελέγχων στις κατασκευές	38
1.5.2 Μέθοδοι ελέγχου κατασκευών	39
1.5.3 Ιστορική αναδρομή μη καταστροφικού ελέγχου	41
1.5.4 Εφαρμογές μη καταστροφικού ελέγχου	42
1.5.5 Έλεγχος δομικής ακεραιότητας	43
1.5.6 Μέθοδοι SHM που βασίζονται στην εξαναγκασμένη μηχανική ταλάντωση της κατασκευής	45
1.6 Μέθοδος ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αντίστασης	48
1.6.1 Βασικές αρχές για την εφαρμογή της μεθόδου EMA	50
1.6.2 Παράμετροι της μεθόδου σύνθετης αγωγιμότητας	50
1.6.3 Το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής σύνθετης αγωγιμότητας	52
1.6.4 Περιοχή κάλυψης των αισθητήρων σύνθετης αγωγιμότητας	52
1.6.5 Σύγκριση και πλεονεκτήματα EMA σε σχέση με άλλες μεθόδους	53
1.7 Διάγνωση βλαβών σε δομικά στοιχεία με την χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών	54
1.7.1 Δείκτες ανίχνευσης βλαβών	55
1.8 Self Healing Structures – SMA	57
1.8.1 Self healing structures	57

1.9	Κράματα μνήμης μορφής	59
1.9.1	Εφαρμογές κραμάτων μνήμης μορφής	62
1.9.2	Σύνθετα SMA	64
2.	Μέρος δεύτερο	
	Φασματική πυκνότητα	66
	Θόρυβος περιβάλλοντος	69
2.0	Πρώτο σκέλος πειράματος	70
2.0.1	Σκοπός πειράματος	70
2.0.2	Περιγραφή πειράματος	70
2.1	Αποτελέσματα πειράματος με χρήση του SignalExpress	79
2.2	Ανάπτυξη μεταφερόμενου αισθητήρα	109
2.3	Λειτουργία και προγραμματισμός στο περιβάλλον SignalExpres	111
2.4	Δεύτερο σκέλος πειράματος	116
2.4.1	Εμπέδηση	116
3.	Μέρος τρίτο	
	Healing – Adaptive bolted joints	132
3.0	Εισαγωγή	132
3.1	Πείραμα θέρμανσης	133
3.2	Συμπεράσματα	139
4.	Μέρος τέταρτο	
	Τελικά συμπεράσματα και παρατηρήσεις	140
4.0	Συμπεράσματα	140
	Βιβλιογραφία	

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

Εισαγωγή

Οι κοχλιωτές συνδέσεις είναι από τα πιο βασικά μηχανολογικά εξαρτήματα σε όλων των μορφών τις κατασκευές. Πολύ συχνά αυτές οι συνδέσεις είναι ζωτικής σημασίας για την λειτουργία της κατασκευής και οι βλάβες τους ενδέχεται να έχουν μεγάλο κόστος και πιθανώς να θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές. Οι συνδέσεις υφίστανται βλάβες διαφόρων μορφών και η έρευνα σε αυτές απασχολεί ιδιαίτερα τους μηχανικούς. Ο σκοπός και το <<στοίχημα>> αυτής της εργασίας είναι να μειώσει την πιθανότητα εμφάνισης βλάβης αλλά και το κόστος ελέγχου και συντήρησης των κοχλιωτών συνδέσεων.

Η πιο συνηθισμένη βλάβη σε μια κοχλιοσύνδεση είναι η χαλάρωση της. Για να μειώσουμε την εμφάνιση αυτής της βλάβης αναπτύσσεται η μέθοδος αυτο-ελεγχόμενων και αυτο-επιδιορθωμένων κοχλιωτών συνδέσεων. Αυτό περιλαμβάνει τεχνικές παρακολούθησης της υγείας της κατασκευής με διεγέρτες και αισθητήρες αλλά και την χρησιμοποίηση υλικών μνήμης μορφής για την επαναφορά της τάσης στην σύνδεση. Αυτού του είδους τα συστήματα ονομάζονται ευφυή συστήματα επειδή έχουν την ικανότητα να <<αισθάνονται>> την κατάσταση της κατασκευής και να αντιδρούν ανάλογα με αυτή. Σε γενικές γραμμές οι έξυπνες κατασκευές χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό αισθητήρων, διεγερτών και ελεγκτών για να προσαρμόζονται και να παρακολουθούν την δομική ακεραιότητα της εκάστοτε κατασκευής.

Τα έξυπνα υλικά έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν την ενέργεια μιας μορφής σε ενέργεια άλλης μορφής. Για παράδειγμα μπορούν να μετατρέπουν την ηλεκτρική σε μηχανική και αντιστρόφως με την χρησιμοποίηση πιεζοηλεκτρικών υλικών, την θερμότητα σε μηχανική ενέργεια με την χρήση κραμάτων μνήμης μορφής(SMA) , την μαγνητική σε μηχανική με χρήση MR fluids κ.α. Αυτή η σύζευξη που επιτυγχάνεται με την χρήση έξυπνων υλικών μεταξύ δύο μορφών ενέργειας έχει πολλά πλεονεκτήματα για την χρήση τους στον έλεγχο κατασκευών. Επιπλέον τα υλικά αυτά κατασκευάζονται σε πολλά διαφορετικά σχήματα και μεγέθη κάτι που να καθιστά κατάλληλα για χρησιμοποίηση σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Η βασική ιδέα είναι η χρησιμοποίηση δονήσεων διαφόρων συχνοτήτων για τοπικό έλεγχο σε πραγματικό χρόνο μιας περιοχής μιας κατασκευής με σκοπό την διαπίστωση τυχόν αλλαγών ή βλαβών.

Μια μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής, είναι η χρήση διαφορετικών πιεζοηλεκτρικών που στέλνουν και λαμβάνουν αντίστοιχα μηχανικό κύμα.

Μια άλλη πολλά υποσχόμενη μέθοδος παρακολούθησης υγείας των κατασκευών που χρησιμοποιήθηκε είναι η ηλεκτρομηχανική σύνθετη εμπέδηση. Η βασική ιδέα των τεχνικών εμπέδησης είναι η χρησιμοποίηση δονήσεων υψηλών συχνοτήτων για την παρακολούθηση μιας περιοχής της κατασκευής για τυχόν αλλαγές στο φάσμα πυκνότητας της εμπέδησης, οι οποίες θα υποδείξουν ζημιά.

Αυτό γίνεται με την χρησιμοποίηση πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων/διεγερτών των οποίων η ηλεκτρική εμπέδηση είναι άμεσα συνυφασμένη με την μηχανική εμπέδηση της κατασκευής. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πολύ υψηλές συχνότητες. Το κοντό μήκος κύματος σε αυτές τις συχνότητες επέτρεψε τον εντοπισμό ακόμα και μικρών αλλαγών στην ακεραιότητα της κατασκευής.

Η μέθοδος της εμπέδησης θα χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με ενεργοποιητές κραμάτων μνήμης μορφής (SMA) ώστε να αναπτυχθεί μια κοχλιοσύνδεση που θα έχει την ικανότητα να εντοπίζει και να διορθώνει την βλάβη αυτόματα. Οι ενεργοποιητές αυτοί έχουν την μορφή ροδέλας και θα εγκατασταθούν στην κοχλιοσύνδεση. Επιπλέον θα διερευνηθούν τρόποι θέρμανσης των κραμάτων μνήμης μορφής αλλά και των διαστάσεων που αλλάζουν κατά την ενεργοποίηση.

Ο σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας κοχλιωτής σύνδεσης με την ικανότητα να ανιχνεύει αυτόματα βλάβες και να επιδιορθώνεται.

1.1 ΕΥΦΥΗ ΥΛΙΚΑ (SMART MATERIALS)

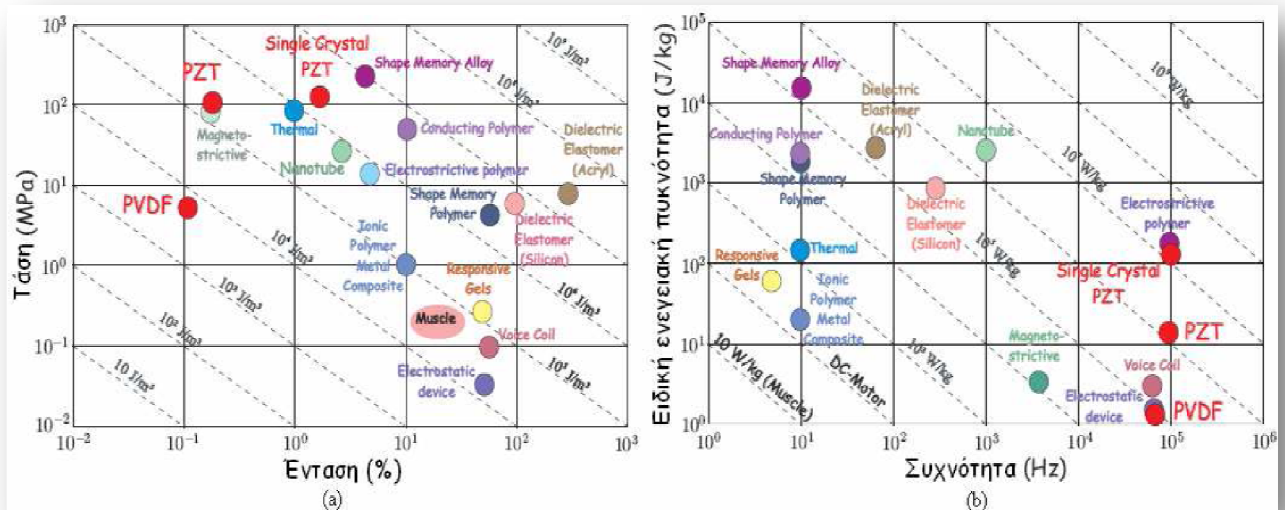
Ως ευφυή ορίζονται τα υλικά τα οποία αλλάζουν κάποιες από τις ιδιότητές τους με προδιαγεγραμμένο τρόπο μετά από επιβολή σε αυτά μιας εξωτερικής διέγερσης. Όλα τα ευφυή υλικά έχουν ως κοινό στοιχείο την ικανότητά τους να αντιδρούν μηχανικά σε εξωτερικά ερεθίσματα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα διάφορα φαινόμενα που παρατηρούνται στα υλικά αυτά σε σχέση με διάφορες εισόδους.

Εξόδος Είσοδος	Ένταση	Ηλεκτρική φόρτιση	Μαγνητική ροή	Θερμοκρασία	Φως
Τάση	Ελαστικότητα	Πιεζο- ηλεκτρισμός	Μαγνητο- συστολή		Φωτο- ελαστικότητα
Ηλεκτρικό πεδίο	Πιεζο- ηλεκτρισμός	Διηλεκτρική σταθερά			Ηλεκτρο- οπτικό φαινόμενο
Μαγνητικό πεδίο	Μαγνητο- συστολή	Μαγνητο- ηλεκτρικό φαινόμενο	Διαπερατότητα		
Θερμότητα	Θερμική διαστολή	Πυρο- ηλεκτρισμός		Ειδική θερμότητα	
Φως	Φωτοσυστολή	Φωτοβολταϊκό φαινόμενο			Δείκτης διάθλασης

Πίνακας 1: Φαινόμενα που παρατηρούνται σε υλικά σε σχέση με διάφορα ερεθίσματα

Η σύζευξη μεταξύ διάφορων φυσικών πεδίων εκφράζεται από τα στοιχεία του πίνακα εκτός της κύριας διαγωνίου. Εάν τα μεγέθη είναι κατάλληλα, η σύζευξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη κατασκευή διακριτών ή κατανεμημένων διατάξεων μετατροπής, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αισθητήρες και διεγέρτες.

Οι μηχανικές ιδιότητες κάποιων ευφύων υλικών, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ελέγχου, φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Μηχανικές ιδιότητες διάφορων ευφυών υλικών.

Στο σχήμα (a) αναπαρίσταται η μέγιστη τάση σε συνάρτηση με την μέγιστη ένταση. Οι διαγώνιες γραμμές υποδεικνύουν τις διάφορες τάξεις σταθερής ενεργειακής πυκνότητας. Στο σχήμα (b) φαίνεται η ειδική ενεργειακή πυκνότητα σε συνάρτηση με την μέγιστη συχνότητα. Οι διαγώνιες γραμμές στο σχήμα αυτό υποδεικνύουν τις διάφορες τάξεις σταθερής ειδικής πυκνότητας ισχύος. Τα χαρακτηριστικά των υλικών ποικίλουν ανάλογα με τις διάφορες τάξεις των μεγεθών. Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι τα πλέον ώριμα, καθώς και αυτά με το μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών.

Στην ουσία ως ευφυή υλικά μπορούμε να ορίσουμε τα υλικά που έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τη συμπεριφορά τους ή ορισμένα χαρακτηριστικά τους όπως το σχήμα τους, την ιδιοσυχνότητα τους, τον συντελεστή απόσβεσης δονήσεων και άλλα χαρακτηριστικά με δεδομένο και με ικανοποιητικά ελεγχόμενο τρόπο, κάτω από την επίδραση μιας διέγερσης [Psarras, 2000].

Ο τομέας των έξυπνων υλικών έχει προσελκύσει το μεγάλο ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας τις τελευταίες δεκαετίες με αποτέλεσμα τα ευφυή υλικά να έχουν πλέον σημαντικές χρήσεις σε εμπορικά προϊόντα αλλά και στρατιωτικές εφαρμογές. Σε παγκόσμιο επίπεδο οι πωλήσεις των υλικών αυτών ξεπερνούν το ένα δισεκατομμύριο δολάρια ετησίως, με τα ηλεκτροσυστολικά υλικά να κυριαρχούν στο 75% της αγοράς, τα μαγνητοσυστολικά και τα υλικά μνήμης μορφής να αντιπροσωπεύουν 10% το καθένα και τα ρεολογικά υγρά το υπόλοιπο 5%.

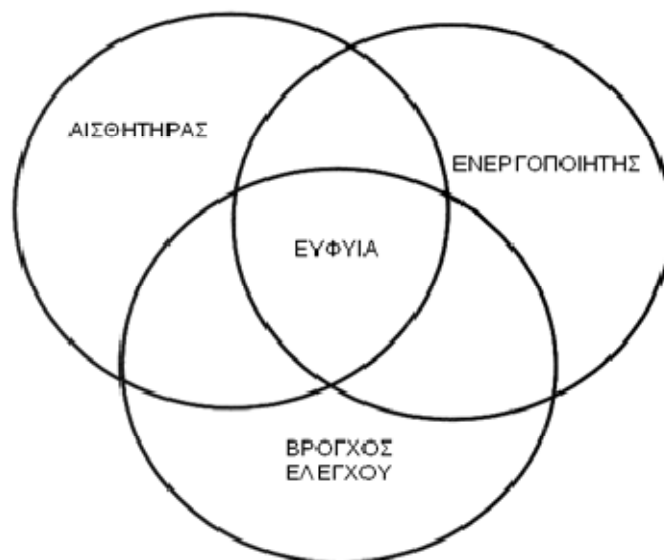
Τα ευφυή υλικά ονομάζονται και «λειτουργικά» και «αυτοπροσαρμοζόμενα». Στα υλικά αυτά μεγαλύτερη σημασία έχουν οι λειτουργίες/ενέργειες που μπορούν να εκτελέσουν παρά οι ονομαστικές τιμές κάποιων φυσικών ιδιοτήτων ή χαρακτηριστικών τους (όπως το μέτρο ελαστικότητας, η ειδική αντίσταση κτλ) [Gandhi, 1992]. Η ανάπτυξη των ευφύων υλικών-συστημάτων είναι αποτέλεσμα της συγχώνευσης των επιτευγμάτων της τεχνολογίας των υλικών με αυτήν της πληροφορίας και των συστημάτων.

Τα ευφυή συστήματα ενσωματώνουν στην λειτουργία τους αισθητήρες και ενεργοποιητές, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλο βρόγχο ελέγχου και έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν «ευφυώς» συγκεκριμένες λειτουργίες, αποκρινόμενα σε εξωτερικές διεγέρσεις. Οι αισθητήρες χρησιμεύουν στην αναγνώριση αλλαγών στο εξωτερικό περιβάλλον όπως π.χ. αλλαγές στην επιβαλλόμενη τάση και αλλαγές στην θερμοκρασία, ή αλλαγές στη δομή τους όπως π.χ. ανάπτυξη ατελειών ή μεταβολή της κρυσταλλικής δομής. Το ευφύες σύστημα αποκρίνεται σε αυτές τις αλλαγές με τους ενεργοποιητές οι οποίοι αλλάζουνε κάποια ιδιότητά τους (π.χ. δυσκαμψία, σχήμα, ικανότητα απόσβεσης) προς ορισμένη κατεύθυνση.

Εκμεταλλεόμενοι τις ιδιότητες των ευφύων υλικών μπορούν να σχεδιαστούν κατασκευές που να μπορούν να λειτουργήσουν στα δομικά τους όρια χωρίς τον κίνδυνο να τα ξεπεράσουν. Επιπλέον τα εφαρμοσμένα ευφυή συστήματα θα μπορούν να πληροφορήσουν τους χρήστες για όλη την ιστορία λειτουργίας τους, όπως για τη δημιουργία αστοχιών, το βαθμό ανάπτυξής τους και τα σημεία που συμβαίνουν, ενώ ταυτόχρονα θα έχουν τη δυνατότητα να αντιδράσουν σε επικίνδυνες για αυτά συνθήκες, όπως υπερβολικές δονήσεις, ή θα μπορούν να αυτοεπιδιορθωθούν (SELF HEALING STRUCTURES) [Gandhi, 1992].

Ένα τέλειο ευφύες σύστημα είναι αυτό που η πηγή της απαραίτητης ενέργειας (η κινούσα δύναμη) που απαιτείται για να λάβει χώρα η αντίδραση στο εξωτερικό ερέθισμα, είναι ενσωματωμένη στο ίδιο σύστημα και οι λειτουργίες του εκτελούνται από δομικά του στοιχεία.

Τα ευφυή συστήματα μπορούμε να τα παρομοιάσουμε και την λειτουργία ενός βιολογικού οργανισμού. Οι αισθητήρες λειτουργούν σαν το νευρικό σύστημα, οι ενεργοποιητές σαν το μυϊκό σύστημα και ο βρόχος ελέγχου σαν τον εγκέφαλο του ζωντανού οργανισμού που ελέγχει το όλο σύστημα [Kelly,2000].



«Έξυπνο» σύστημα. Το σημείο τομής των τριών κύκλων ορίζει την ύπαρξη των ευφύων υλικών [Kelly, 2000].

Στη βιβλιογραφία συστήματα που είναι σε θέση να εκτελούν λειτουργίες αναφέρονται με διάφορους όρους όπως «έξυπνο», «ευφύες», «αυτοπροσαρμοζόμενο» και «σοφό» σύστημα που ακόμα δεν έχουν διευκρινιστεί πλήρως. Γενικά «αυτοπροσαρμοζόμενο» αναφέρεται το σύστημα που αισθάνεται ερεθίσματα από το περιβάλλον του. «Έξυπνο» είναι το σύστημα που αντιδρά στα ερεθίσματα με συγκεκριμένο τρόπο. «Ευφύες» είναι το σύστημα που η απαραίτητη ενέργεια για να λάβει χώρα η αντίδραση στο εξωτερικό ερέθισμα είναι ενσωματωμένη στο σύνθετο σύστημα. Και τέλος «σοφό» είναι το σύστημα αυτό που μπορεί με την πάροδο του χρόνου να αποφασίζει τις αντιδράσεις του [Kelly, 2000].

1.2 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΣΤΑ ΕΥΦΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Οι αισθητήρες μπορεί να είναι τοποθετημένοι είτε στην επιφάνεια του σύνθετου, είτε ενσωματωμένοι στο υλικό και μπορούν να είναι πρόσθετα στοιχεία ή δομικά στοιχεία του σύνθετου συστήματος. Η λειτουργία της αίσθησης επιτελείται από ένα λειτουργικό υλικό το οποίο μπορεί να έχει την ικανότητα, για παράδειγμα, να μετράει την ένταση της διέγερσης μέσω ενός φαινομένου ηλεκτρισμού, θερμότητας ή ακτινοβολίας. Επιπλέον, το φαινόμενο αυτό μπορεί να είναι χημικό ή να σχετίζεται με εφαρμογή τάσης ή παραμόρφωσης [Parthenios, 2001], [Psarras, 2001], [Gandhi, 1992].

Ως αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα ευφυή υλικά όπως π.χ. οι οπτικές ίνες, τα κράματα μνήμης σχήματος (SMA), τα πιεζοηλεκτρικά υλικά και οι σκεδαστές Raman.

Οπτικές ίνες

Οι οπτικές ίνες ενσωματώθηκαν στα προϊόντα υψηλής τεχνολογίας την δεκαετία του 1970 όταν χρησιμοποιήθηκαν, για πρώτη φορά, στις τηλεπικοινωνίες για τη μετάδοση πληροφοριών. Οι ιδιότητές τους δεν υποβαθμίζονται από τη διαδικασία παρασκευής του σύνθετου και είναι ικανές να αντέχουν παραμορφώσεις της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτό. Προσφέρουν έτσι τη δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης της δομής του σύνθετου σε όλα τα στάδια της ζωής του. Οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως αισθητήρες θερμοκρασίας, μηχανικής παραμόρφωσης και τάσης [Kelly, 2000]. Στις ημέρες μας οι οπτικές ίνες μπορούν να φέρουν αισθητήρες Fabry - Perot και φράγματα Bragg (Bragg gratings), με αποτέλεσμα να είναι αυτές που χρησιμοποιούνται κυρίως ως αισθητήρες στα ευφυή σύνθετα υλικά. Τα τελευταία χρόνια γίνονται έρευνες για τη χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών και κραμάτων μνήμης σχήματος σε εφαρμογές που οι οπτικές ίνες κρίνονται ακατάλληλες [Flatau, 2002].



1.3 ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΕΣ ΣΤΑ ΕΥΦΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Οι ενεργοποιητές βρίσκονται και αυτοί είτε στην επιφάνεια του σύνθετου, είτε ενσωματωμένοι στο υλικό αποτελώντας κι αυτοί πρόσθετα ή δομικά στοιχεία του συστήματος. Παίρνουν εντολή από το βρόχο ελέγχου και ανάλογα με τις λειτουργικές τους ικανότητες αλλάζουν κάποια ιδιότητα του ευφυούς υλικού. Υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη τέτοιων υλικών από τη βιομηχανία και το στρατό. Συνήθως ως ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται τα κράματα μνήμης σχήματος, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, τα μαγνητοσυστολικά υλικά, τα ηλεκτροσυστολικά υλικά και τα ηλεκτρορρολογικά και μαγνητορρολογικά αιωρήματα.

Τα υλικά αυτά ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και τον τρόπο παρασκευής της «ευφυούς» δομής μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως αισθητήρες/ενεργοποιητές αλλά και ως δομικά στοιχεία.

1.3.1 Πιεζοηλεκτρικά υλικά

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά εμφανίζουν το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Η εφαρμογή μηχανικών παραμορφώσεων οδηγεί σε μεταβολή της κρυσταλλικής συμμετρίας, στο σχηματισμό διπόλων και στην ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού που εξαρτάται από την επιβαλλόμενη παραμόρφωση. Το φαινόμενο εκδηλώνεται και αντίστροφα, δηλαδή μπορούν να αλλάξουν οι διαστάσεις του υλικού αν αυτό βρεθεί μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο.

Τα υλικά της κατηγορίας αυτής που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι τα πιεζοκεραμικά, όπως το Lead Zirconate Titanate (PZT) και τα πιεζοπολυμερή, όπως το polyvinylidene fluorides (PVDF) [Gandhi, 1992], [Kelly, 2000]. Για τον πιεζοηλεκτρισμό και τα πιεζοηλεκτρικά υλικά(τα οποία χρησιμοποιούμε και στα ερευνητικά μας πειράματα) θα αναφερθούμε εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο.



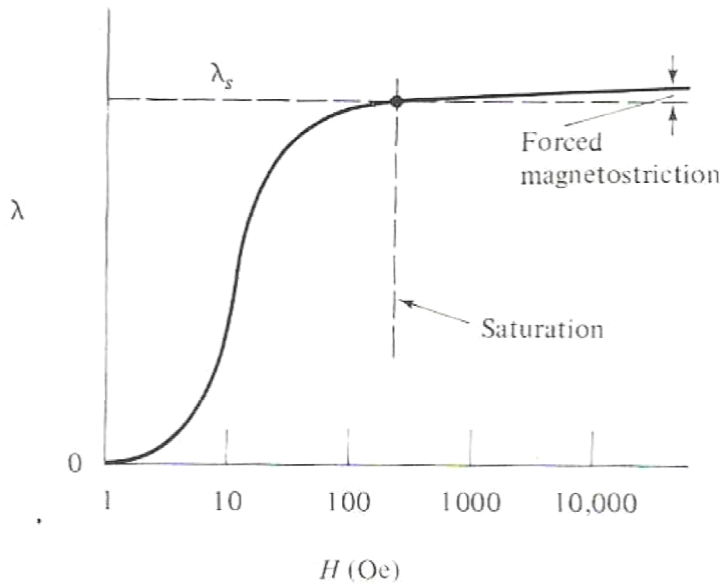
1.3.2 Μαγνητοσυστολικά υλικά

Το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής παρουσιάζεται σε ορισμένα υλικά(σιδυρομαγνητικά υλικά) όπως το νικέλιο, το κοβάλτιο και διάφορα άλλα κράματα τα οποία εμφανίζουν αυτή τη συμπεριφορά. Στο φαινόμενο αυτό, όταν μια ράβδος από σιδυρομαγνητικό υλικό, αφού μαγνητιστεί και τοποθετηθεί σε ένα πηνίο, βραχυνθεί ή επιμηκυνθεί, τότε στα άκρα του πηνίου εμφανίζεται μια μαγνητεγερτική δύναμη. Αντιστρόφως, εάν ένα εναλλασσόμενο δυναμικό εφαρμοστεί στο πηνίο που περιβάλλει τη μαγνητισμένη σιδυρομαγνητική ράβδο, τότε η ράβδος ταλαντώνεται κάτω από την επίδραση του μαγνητικού πεδίου του πηνίου.

Η μαγνητοσυστολή l ορίζεται ως η κλασματική μεταβολή του μεγέθους του υλικού:

$$l = \frac{\Delta l}{l}$$

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρείται η αύξηση του μεγέθους της μαγνητοσυστολής με το πεδίο.

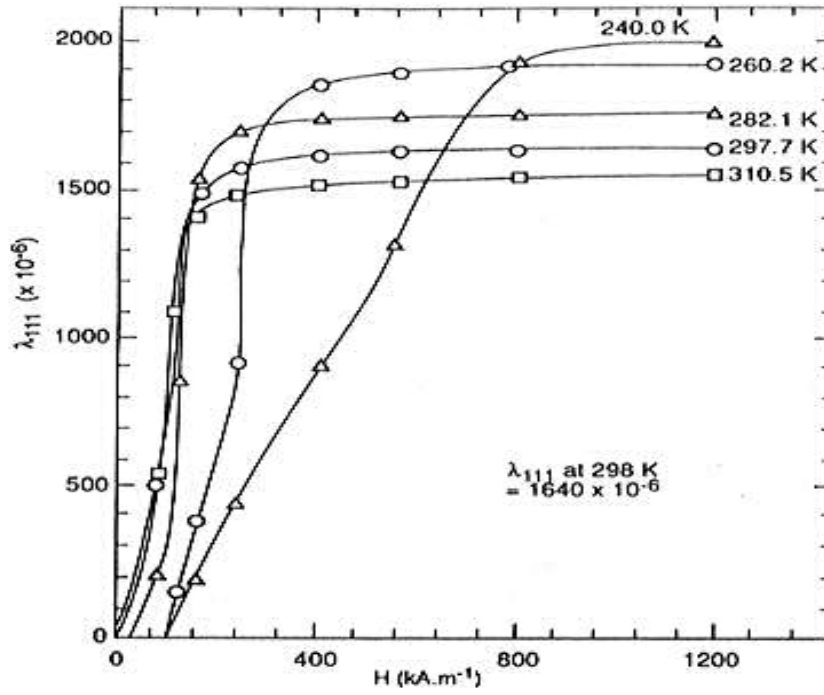


Μεταβολή της μαγνητοσυστολής λ με το πεδίο H

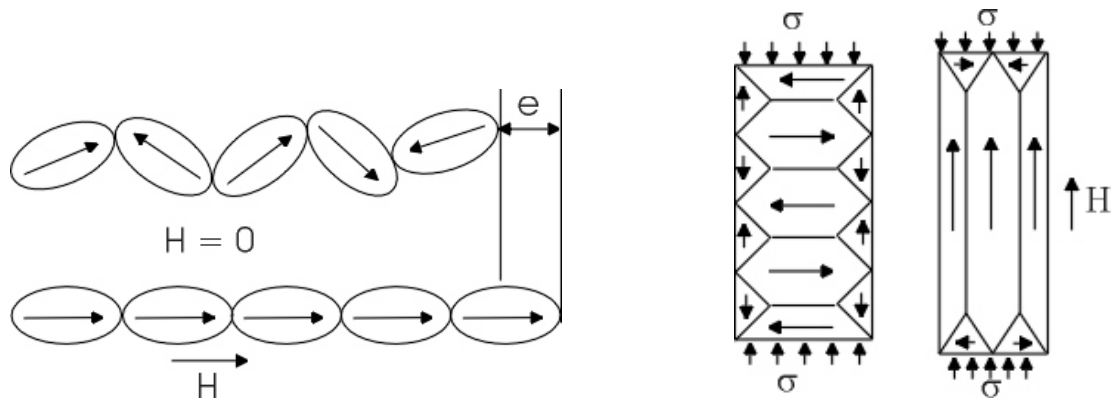
Τα μαγνητοσυστολικά υλικά στην ουσία αλλάζουν το μέγεθός τους με την εφαρμογή σε αυτά ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Η ιδιότητα αυτή είναι πολύ χρήσιμη για την κατασκευή τηλεμηχανισμών εφαρμογής (remote actuator systems), μετατρέποντας ένα μαγνητικό σήμα σε μηχανική έξοδο. Χαρακτηριστικά μαγνητοσυστολικά υλικά είναι κράματα NdFe, TbCo και πολυστρωματικά υμένια TbFe/TbCo τα οποία έχουν υψηλό συντελεστή μαγνητοσυστολής. Επίσης μαγνητοσυστολή παρουσιάζει και το Tefonel-D το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως σε μικροαισθητήρες. (Clark, A. E., Wolfhart, E.P).

Επίσης με το φαινόμενο της μαγνητοσυστολής παράγονται υπερηχητικές ταλαντώσεις υψηλής ενέργειας αλλά μικρών συχνοτήτων (μέχρι 100KHz). Οι ταλαντωτές μαγνητοσυστολής είναι συχνά φτιαγμένοι από λεπτά φύλλα σιδηρομαγνητικών υλικών τα οποία βρίσκονται είτε κολλημένα στην κατασκευή είτε έχουν την μορφή σωλήνων για την αποφυγή απωλειών από επαγωγικά ρεύματα ή λόγο μαγνητικής υστέρησης.

Σύμφωνα με μελέτες της NASA οι μαγνητοσυστολικοί ενεργοποιητές φύλλων αλουμινίου είναι ανώτεροι από τα πιεζοηλεκτρικά σε αξιοπιστία, σταθερότητα, δυνατότητα να κατασκευαστούν και ευελιξία. Παρόλα αυτά οι εφαρμογές των συστολικών είναι περιορισμένες επειδή για την ενεργοποίησή τους πρέπει να εφαρμοστεί κάποιο μαγνητικό πεδίο στη δομή των υλικών.



Terfenol-D response around room temperature



Πόλωση σιδηρομαγνητικού υλικού

1.3.3 Ηλεκτροσυστολικά υλικά

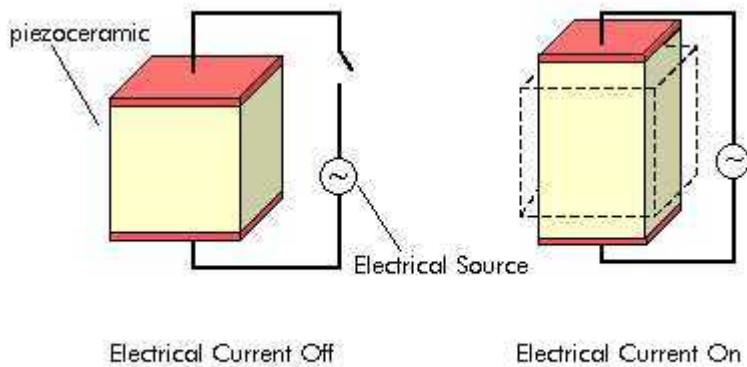
Η ηλεκτρική συμπεριφορά των ενεργών διηλεκτρικών είναι αποτέλεσμα άμεσης αλληλεπίδρασης μεταξύ εξωτερικών παραγόντων(μηχανική τάση, ένταση ηλεκτρικού πεδίου , θερμοκρασία κ.α.) και εσωτερικών μεταβολών που συντελούνται στα υλικά(παραμόρφωση, πόλωση εντροπία κ.α.).

Σήμερα υπάρχει μεγάλος αριθμός διηλεκτρικών υλικών, ο οποίος όλο και αυξάνεται αφού πάνω σε αυτόν τον τομέα υπάρχει πληθώρα ερευνών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν τα σιδηροηλεκτρικά διηλεκτρικά τα οποία αποτελούν πρώτης τάξεως υλικά για την κατασκευή δυναμικών μνημών(non-volatile memories) για εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας.

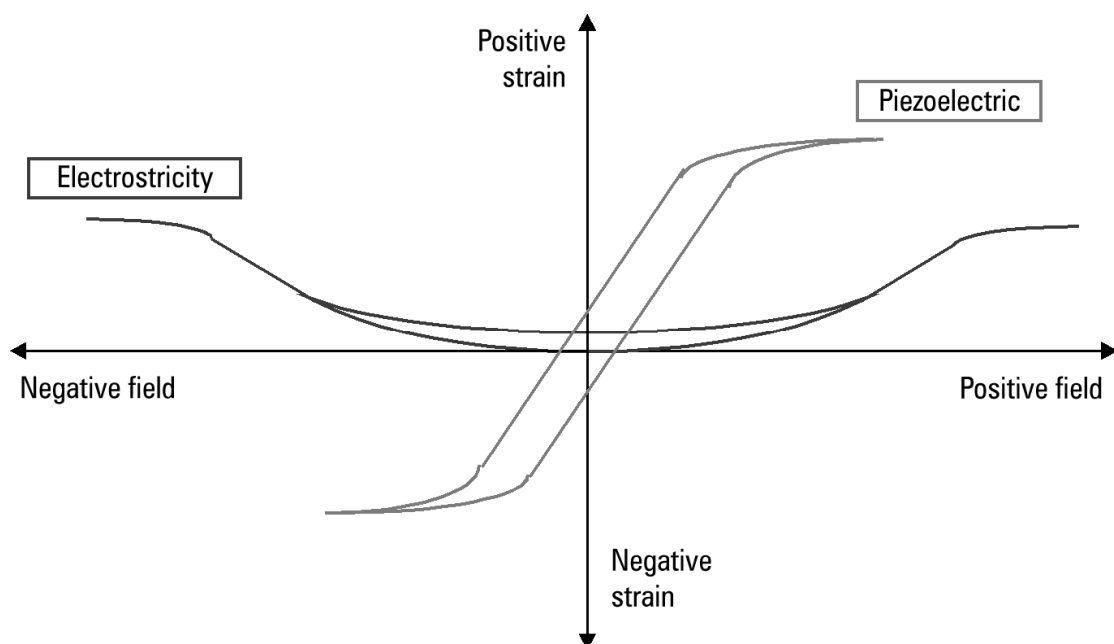
Τα σιδηροηλεκτρικά υλικά, όπως και τα πιεζοηλεκτρικά, μεταβάλλουν το σχήμα τους όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται στα άκρα τους ή παράγεται μια ηλεκτρική τάση όταν εφαρμοστεί μια μηχανική τάση. Η διαφορά είναι ότι η προκληθείσα τάση είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται, ανεξάρτητα από την πολικότητα.

Τα σιδηροηλεκτρικά παρουσιάζουν αυθόρμητη πόλωση απουσία ηλεκτρικού πεδίου. Το υλικό θεωρείται ότι αποτελείται από μικροσκοπικές σιδηροηλεκτρικές περιοχές ή τομείς(domains) μέσα στις οποίες τα δίπολα προσανατολίζονται αυθόρμητα προς την ίδια κατεύθυνση.

Πριν την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου ο προσανατολισμός της πόλωσης κάθε περιοχής είναι τυχαίος με αποτέλεσμα η συνολική πόλωση του υλικού να είναι μηδέν. Με την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, τα δίπολα κάθε τομέα τείνουν να προσανατολιστούν προς την διεύθυνση του πεδίου με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της πόλωσης του υλικού. Αυτό συμβαίνει με μετακίνηση ορίων των σιδηροηλεκτρικών περιοχών μέσα στον κρύσταλλο.



Με την αφαίρεση του εξωτερικού πεδίου η πόλωση δεν επιστρέφει στο μηδέν επειδή οι προσανατολισμένες περιοχές αδυνατούν να επιστρέψουν στην αρχική αυθόρμητη πόλωση τους χωρίς να δεχτούν επιπλέον ενέργεια με επιβολή ηλεκτρικού πεδίου αντίθετης πολικότητας. Η ενέργεια αυτή απαιτείται για την αλλαγή του προσανατολισμού των σιδηροηλεκτρικών τομέων.



Μεταβολή της πόλωσης συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου για πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και για σιδηροηλεκτρισμό.

Η μέγιστη πόλωση εμφανίζεται όταν όλες οι περιοχές ίδιας πόλωσης προσανατολίζονται προς τη διεύθυνση του πεδίου, και ονομάζεται πόλωση κορεσμού (saturation polarization).

Το φαινόμενο της ηλεκτροσυστολής είναι παρόν σε όλα τα διηλεκτρικά υλικά, αλλά είναι μικρότερο σε σχέση με το επικρατέστερο στα υλικά αυτά πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Επιπλέον κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των πιεζοηλεκτρικών εφαρμογών το φαινόμενο της ηλεκτροσυστολής αμελείται στις περισσότερες εφαρμογές. Παρόλα αυτά τα υλικά που έχουν υψηλή διηλεκτρική σταθερά(μεγάλη πόλωση) όπως τα φεροηλεκτρικά υλικά μπορούν να επιτύχουν πολύ μεγάλες ηλεκτροσυστολικές τάσεις.

Τα πιο σημαντικά φεροηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες εφαρμογές είναι το νιόβιο μαγνησίου-μολύβδου(PMN), ή οι συμπαγείς του μορφές με τιτάνιο μολύβδου (PMN-PT). Το PMN είναι διαθέσιμο και σε φύλλα όπως και τα PZT και μπορεί να ενσωματωθεί στο υλικό προς μέτρηση ή να τοποθετηθεί στην επιφάνεια του.

Τα ηλεκτροσυστολικά υλικά θεωρούνται πιο αξιόπιστα από τα πιεζοηλεκτρικά υλικά αφού βασίζονται σε ορισμένες φυσικές ιδιότητες όπως η υστέρηση, ο συντελεστής πολικότητας, η επίδραση της θερμοκρασίας και η εξωτερική παρέμβαση.

Τα υλικά PMN έχουν αντικαταστήσει πολλούς πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές, χρησιμοποιούμενους σε συσκευές ακριβείας, επειδή η απόκλιση των υλικών PMN είναι λιγότερο από 3% για πάνω από δύο ημέρες λειτουργίας, σε σύγκριση με το 10 - 15 % μιας πιεζοηλεκτρικής συσκευής που βρίσκεται υπό φόρτιση.



Ultra-Resolution Electrostrictive Actuator

1.3.4 Ηλεκτρορεολογικά υλικά

Τα ρευστά ηλεκτρορεολογικά υλικά αποτελούν μια αιώρηση πολωμένων σωματιδίων σε μη αγώγιμο διανεμημένο διαλύτη. Τα ηλεκτρορεολογικά υλικά αποτελούνται από διαλύτη από κάποιο σιλικονούχο υλικό ή ορυκτό έλαιο και τα αιωρούμενα σωματίδια από εστέρα πυριτικού οξέως ή πολυαμίδιο.

Χωρίς την εφαρμογή κάποιου ηλεκτρικού πεδίου το ηλεκτρορεολογικό υλικό συμπεριφέρεται όπως ένα νευτώνιο ρευστό, εντούτοις μόλις εφαρμοστεί ένα ικανοποιητικό ηλεκτρικό πεδίο το ρευστό υποβάλλεται σε αλλαγή των ιδιοτήτων του.

Όταν εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο τα αιωρούμενα σωματίδια σχηματίζουν αλυσίδες που προκαλούν αντίσταση στην ροή ή αντίσταση στην μετακίνηση. Η αύξηση στην αντίσταση είναι στενά συνδεδεμένη με την αύξηση του ιξώδους του ρευστού και με την αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Το αρνητικό στην χρήση ηλεκτρορεολογικών υλικών είναι ότι απαιτείται ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο για να ενεργοποιηθούν οι ηλεκτρορεολογικές του ιδιότητες.

Τα ηλεκτρορεολογικά υλικά έχουν βρει πρακτική εφαρμογή στους αποσβεστήρες (Newmann, 1996), υποστηρίγματα μηχανών και απόσβεση των λεπίδων ελικοπτέρων.

1.3.5 Μαγνητορεολογικά υλικά

Τα μαγνητορεολογικά υλικά περιέχουν μαγνητίσιμα μόρια (Ινώδης άνθρακας που αιωρείται σε ένα ρευστό διαλύτη). Τα φερομεταλλικά μόρια, όπως ο σίδηρο καρβονυλίων και άλλες ενώσεις χρησιμοποιούνται ως μαγνητίσιμα μόρια και το σιλικονούχο πυρίτιο χρησιμοποιείται ως φέρον ρευστό.

Το μαγνητορεολογικό ρευστό μπορεί επίσης να περιέχει ένα μέσο επιβολής για να ενισχύσει την αναστολή των μαγνητισμένων στερεο - φερομεταλλικών μορίων . Όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα εφαρμόζεται σ αυτά τα ρευστά τα χαρακτηριστικά ροής αλλάζουν σχεδόν αμέσως. Κατά

συνέπεια να ρευστό με χαμηλό ιξώδες μπορεί να αυξήσει το ιξώδες του με την εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου ελεγχόμενου μαγνητικά. Ο βαθμός στον οποίο αλλάζει το ιξώδες είναι αναλόγως του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

Η πιο σημαντική διαφορά μεταξύ των ηλεκτρορρολογικών και των μαγνητορρολογικών ρευστών, είναι η εφαρμοσμένη τάση. Τα ηλεκτρορρολογικά υλικά αποκρίνονται στις υψηλής τάσεως και χαμηλής έντασης ηλεκτρικά πεδία ενώ τα μαγνητορρολογικά υλικά αποκρίνονται στα μαγνητικά πεδία που αναπτύσσονται μέσω της τάσης μπαταριών και παράγει την υψηλή διατμητική τάση στην δομή των ρευστών.

Υπάρχει μια άλλη διάφορα σχετικά με την αποδοτικότητα τους, τα ηλεκτρορρολογικά απαιτούν χιλιάδες Volt για τις χαμηλές διατμητικές τάσεις λειτουργίας και παραγωγής. Με αυτή την ενέργεια που απαιτείται υπάρχει κίνδυνος κατά την χρήση των υλικών αυτών και καθιστούν δύσκολη την εφαρμογή τους. Επειδή τα μαγνητορρολογικά ρευστά αποκρίνονται σε μαγνητικά ερεθίσματα δεν χρειάζονται υψηλή τάση και παράγουν συνήθως πολύ υψηλότερη διατμητική τάση σε σχέση με τα ηλεκτρορρολογικά υλικά.

Τα μαγνητορρολογικά υλικά παρουσιάζουν ως πλεονέκτημα πολύ χαμηλή διατμητική τάση, όταν δεν εφαρμόζεται μαγνητικό πεδίο, υψηλές διατμητικές τάσεις όταν εφαρμόζεται η μέγιστη μαγνητοεργιτική δύναμη του μαγνητικού πεδίου, μικρή υστέρηση, χημική αδράνεια, θερμοκρασιακή σταθερότητα και γρήγορο χρόνο απόκρισης.

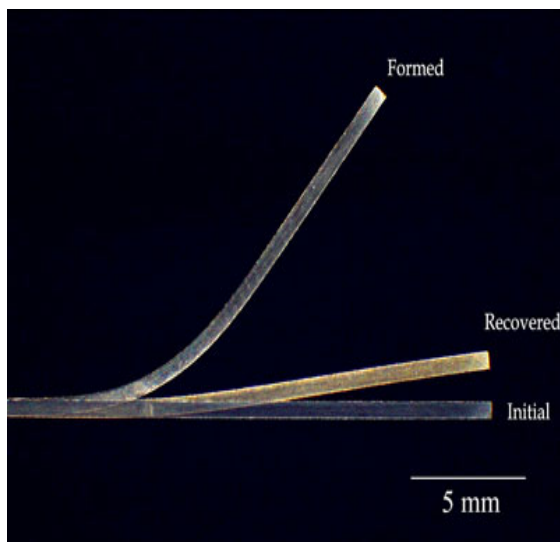
Εφαρμογές των υλικών αυτών περιλαμβάνουν την ενεργό απομόνωση δόμησης, ελεγχόμενες διατάξεις απόσβεσης, συσκευές απόσβεσης ταινιών συμπίεσεων, ενεργοί αποσβεστήρες οχημάτων, περιστροφική ενεργός διάταξη απόσβεσης ελέγχου κλπ.

1.3.6 Κράματα μνήμης μορφής (SMA)

Τα κράματα μνήμης μορφής μπορούν να ανακτούν μεγάλες παραμορφώσεις, υφιστάμενα κρυσταλλογραφικό μετασχηματισμό λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας. Ιδιαίτερα στην περίπτωση που παρεμποδίζονται να ανακτήσουν το σχήμα τους, παράγουν υψηλές τιμές θλιπτικών τάσεων στο μέσο που τα παρεμποδίζει [Gandhi, 1992], [Kelly, 2000], [Schrooten, 2002]. Με τα κράματα μνήμης μορφής επιτυγχάνεται η μεταβολή ή η διατήρηση του σχήματος κρίσιμων κατασκευών, με έναν ελεγχόμενο τρόπο. Ο ενεργητικός έλεγχος που προκύπτει αντισταθμίζει τις αλλαγές σχήματος ή τις παραμορφώσεις, ως αποτέλεσμα της επίδρασης εξωτερικών διαταραχών.

Η ανίχνευση του επιθυμητού σχήματος επιτυγχάνεται διαμέσου της χρήσης επιλεγμένων ζευγών αισθητήρων/ενεργοποιητών, οι οποίοι είναι συνήθως ενσωματωμένοι στο σκελετό της σύνθετης κατασκευής. Η ανάκτηση του σχήματος μιας πόρτας αυτοκινήτου με κοίλωμα είναι ένα παράδειγμα στατικού ελέγχου σχήματος, ενώ ο έλεγχος των παραμορφωμένων επιφανειών ενός καθρέφτη είναι παράδειγμα δυναμικού ελέγχου σχήματος [Baz, 2000], [Kelly, 2000].

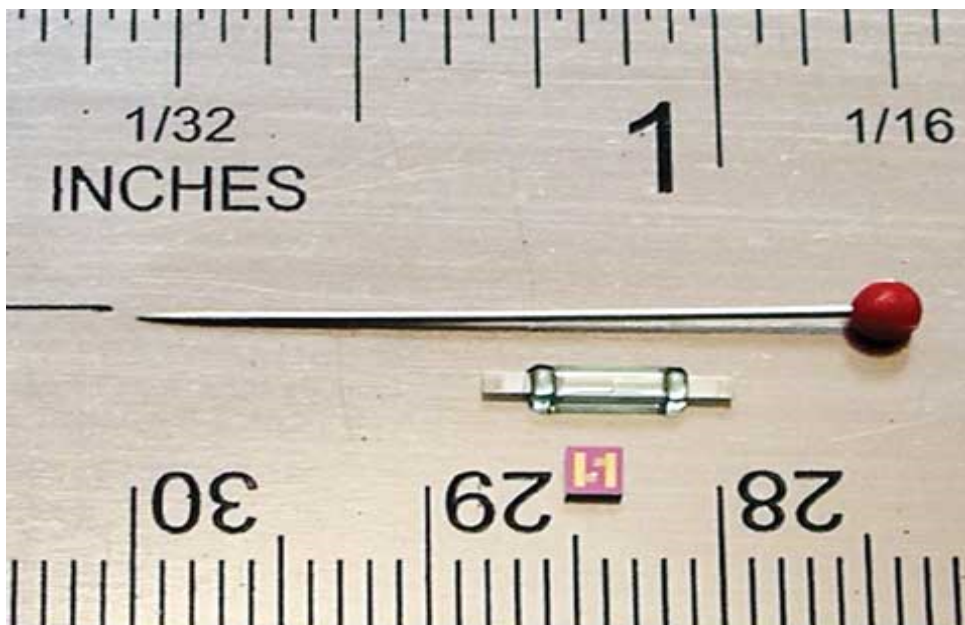
Για τα SHM(τα οποία χρησιμοποιούμε και στο πείραμά μας) θα αναφερθούμε εκτενέστερα στα επόμενα κεφάλαια.



Αλλαγή φάσεων SMA με την παροχή ενέργειας.

1.3.7 Μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS)

Τα μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS) είναι συσκευές πολύ μικρές σε μέγεθος οι οποίες κατασκευάστηκαν με τη μικρομηχανική και άλλες διαδικασίες που αναπτύχθηκαν, για να αποτελέσουν ολοκληρωμένα κυκλώματα. Το μικρό μέγεθος τους (μικρότερο από 1 χιλιοστό) τους κάνει μια συναρπαστική τεχνολογία για τους ενεργοποιητές, αλλά τους κάνει και ταυτόχρονα οικονομικά δυσπρόσιτους στις περισσότερες εφαρμογές. Αυτή τη στιγμή το μεγαλύτερο μέρος της χρήσης των MEMS βρίσκεται σε αυτοκινητικούς και βιοιατρικούς τομείς στους οποίους ο μεγάλος αριθμός των MEMS που απαιτούνται αντισταθμίζουν το κόστος παραγωγής.



1.4 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

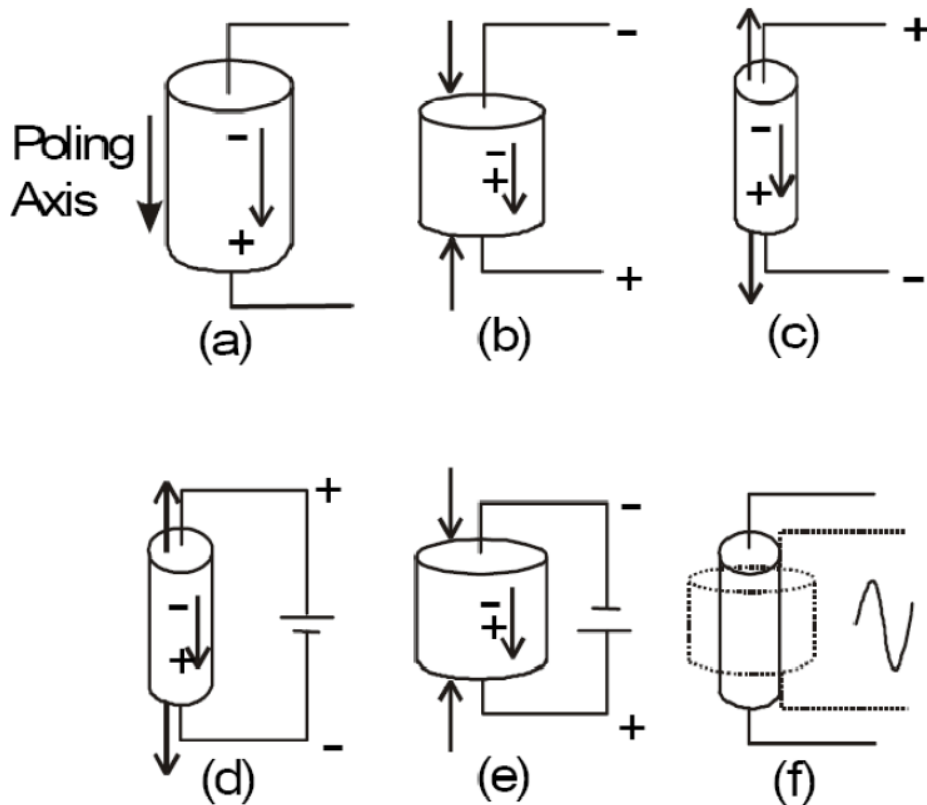
1.4.1 Ιστορία του πιεζοηλεκτρισμού:

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο αναφέρθηκε από τον Γάλλο μεταλλειολόγο René Just Ha το 1817. Η πρώτη εφαρμογή έγινε από τους Pierre και Jacques Curie το 1880. Τα πειράματά τους, τους οδήγησαν να διατυπώσουν την θεωρία του πιεζοηλεκτρισμού. Αυτή η θεωρία συμπληρώθηκε από την περαιτέρω εργασία των G. Lippman, W.G.Hankel, Lord Kelvin και W.Voigt στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, όπου ο πιεζοηλεκτρισμός συνέχιζε τις εφαρμογές του στα εργαστήρια. Οι πρώτες εφαρμογές εμφανίστηκαν κατά την διάρκεια του πρώτου παγκοσμίου πολέμου με τα σόναρ. Στην συνέχεια μετά τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο ανακαλύφθηκαν οι περισσότερες από τις πιεζοηλεκτρικές εφαρμογές που εξοικειωνόμαστε τώρα (μικρόφωνα, επιταχυνσιόμετρα, υπερηχητικοί μετατροπείς, πένσες κ.τ.λ.). Με την ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και της σιδηροηλεκτρικής κεραμικής κατά την διάρκεια του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου αυξήθηκε η χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών.

1.4.2 Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο:

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο πρόκειται για την δυνατότητα ορισμένων κρυστάλλινων υλικών να παραγάγουν μια ηλεκτρική τάση με την εφαρμογή μιας εξωτερικής δύναμης.

Επίσης σύμφωνα με το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, ένα ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί μια παραμόρφωση του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο έχει εφαρμοστεί στο σχεδιασμό ενεργοποιητών.



Παράδειγμα πιεζοηλεκτρικού φαινομένου.

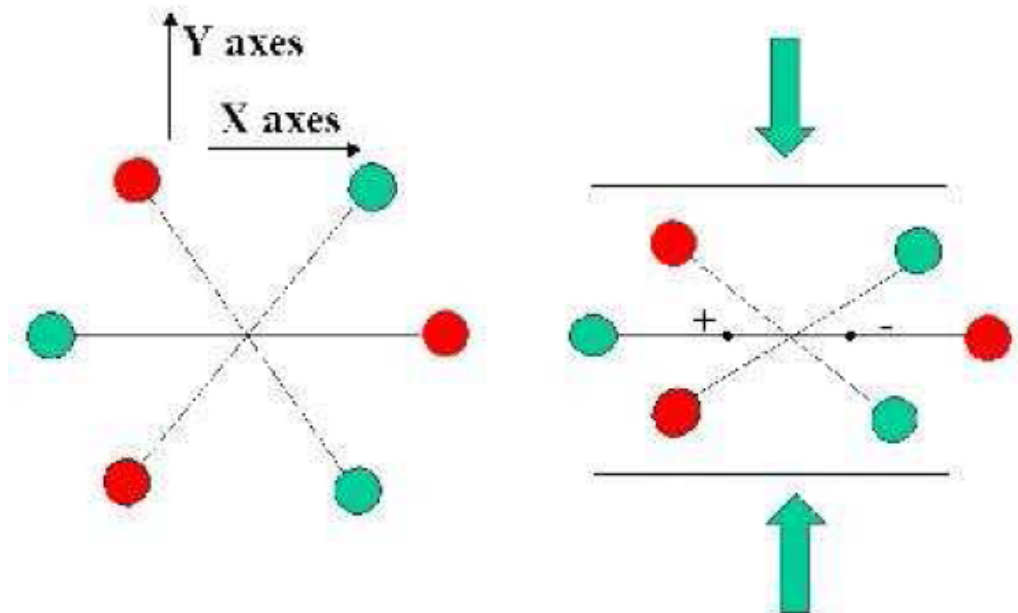
Η παραπάνω εικόνα δείχνει ένα πιεζοηλεκτρικό υλικό προτού αυτό υποστεί κάποια δύναμη ή εφαρμοστεί ρεύμα. Αν το υλικό συμπιεστεί (b), τότε μια τάση ίδιας πολικότητας με την τάση πόλωσης θα εμφανιστεί μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Αν το υλικό επιμηκυνθεί (c) εμφανίζεται τάση ανάστροφη ως προς την πόλωση. Αντίστροφα αν εφαρμοστεί τάση το υλικό θα παραμορφωθεί. Μια τάση ανάστροφης πόλωσης ως προς την τάση πόλωσης θα προκαλέσει διαστολή του υλικού (d). Αντίθετα μια τάση ίδιας πολικότητας προκαλεί συστολή-συμπίεση (e) του υλικού.

Αν εφαρμοστεί ένα εναλλασσόμενο σήμα τότε το υλικό θα δονείται σύμφωνα με την συχνότητα του σήματος (f). Δηλαδή για κάθε χρονική στιγμή το σώμα θα συστέλλεται ή θα διαστέλλεται ανάλογα προς την πολικότητα της τάσης τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Αν υπάρχει κέντρο συμμετρίας θα συνεχίσει να υπάρχει και μετά την παραμόρφωση, με αποτέλεσμα να μην δημιουργηθεί πόλωση. Με αυτή την λογική ένα υλικό που ανήκει στο κυβικό σύστημα δεν μπορεί να είναι πιεζοηλεκτρικό.

Το σχήμα που ακολουθεί βοηθά στην κατανόηση της ύπαρξης του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου:



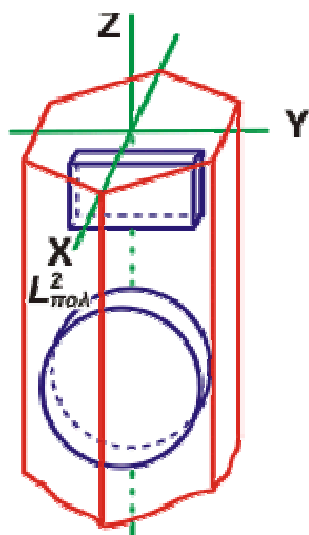
Αναπαριστώνται έξι σημειακά φορτία, θετικά τα κόκκινα και αρνητικά τα πράσινα. Σε κατάσταση ηρεμίας χωρίς την επίδραση δυνάμεων, διατάσσονται στις κορυφές ενός εξαγώνου. Αν το ηλεκτρικό δυναμικό σε ένα σημείο κατά μήκος του άξονα x και σε απόσταση από αυτά τα φορτία, κανείς μπορεί να δει τα τρία θετικά φορτία να ενεργοποιούνται στο κέντρο του εξαγώνου όπως και τα τρία αρνητικά. Η θετική και η αρνητική διάταξη των φορτίων αλληλοαναιρείται και το δυναμικό σε μια απόσταση κατά μήκος του άξονα x θα είναι μηδέν.

Αν εφαρμοστεί μια θλιπτική δύναμη στο εξάγωνο κατά μήκος του άξονα y , η διάταξη διαταράσσεται με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να έρχονται δυο θετικά φορτία κοντύτερα μεταξύ τους σε ένα άκρο, και τα αρνητικά φορτία να μαζεύονται στην άλλη άκρη. Η παραπάνω κατάσταση διαμορφώνει ένα δίπολο όπου το ένα άκρο της διάταξης είναι θετικό και το άλλο αρνητικό. Ένα δυναμικό καταμετράται κατά μήκος του άξονα x , που δεν είναι πια μηδενικό.

Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος αποκρίνεται (συστέλλεται ή διαστέλλεται) με διαφορετικούς τρόπους σε διαφορετικές συχνότητες του σήματος. Προκειμένου να επιτύχουμε διαφορετικούς τρόπους δόνησης του υλικού παράγονται πιεζοκρύσταλλοι σε διάφορα σχήματα.

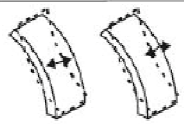
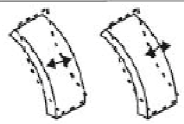
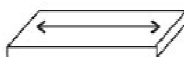
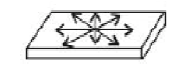
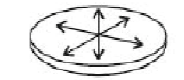
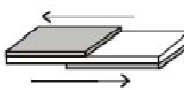
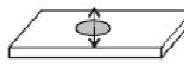
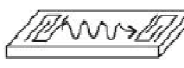
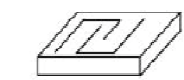
Για την πραγματοποίηση μικρών, χαμηλού κόστους και υψηλής απόδοσης τέτοιων προϊόντων έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένοι τύποι δόνησης. Αυτοί λοιπόν προκύπτουν για συγκεκριμένες περιοχές συχνοτήτων. Έτσι υπάρχει δυνατότητα παραγωγής πιεζοηλεκτρικών προϊόντων που λειτουργούν-αποκρίνονται σε συχνότητες της τάξης των kHz μέχρι και την τάξη MHz.

Μια σημαντική κατηγορία πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι τα κεραμικά. Από αυτά μπορούν κατασκευαστούν με εκμετάλλευση του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου στοιχεία όπως ενεργοποιητές, και ζωνοδιαβατά φίλτρα.



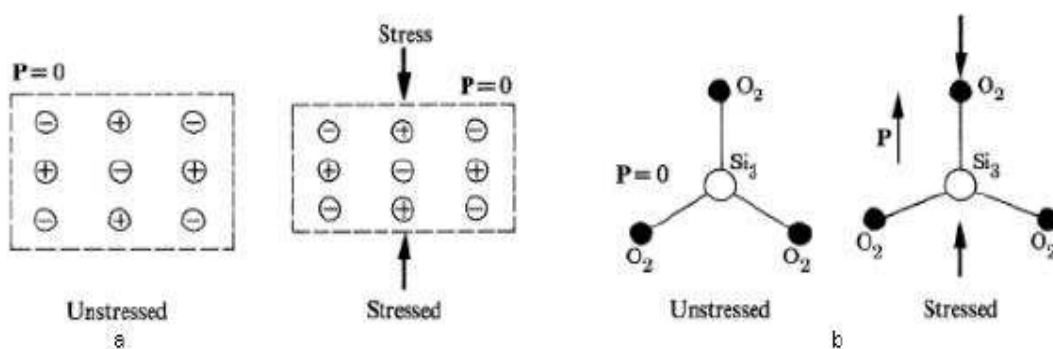
Πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τους τυποποιημένους τρόπους απόκρισης ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού και την περιοχή συχνοτήτων στην οποία αυτό συμβαίνει. Επίσης δίνει και την αξιοποίηση σε εφαρμογές για κάθε περίπτωση.

Vibration Mode		Frequency (Hz)							Application
		1K	10K	100K	1M	10M	100M	1G	
Flexure Vibration		█	█	█					Piezo Buzzer
Lengthwise Vibration					█				KHz Filter
Area Vibration					█				KHz Resonator
Radius Vibration					█				
Thickness Shear Vibration						█			MHz Filter
Thickness Trapped Vibration						█	█		MHz Resonator
Surface Acoustic Wave						█	█	█	SAW Filter SAW Resonator
BGS Wave							█	█	SH Trap SH Resonator SH Filter

Τρόποι απόκρισης πιεζοηλεκτρικών υλικών.

Σε περίπτωση απουσίας μηχανικής παραμόρφωσης, η συνεισφορά των ιόντων φορτίων είναι συμμετρική, δίνοντας μηδενική πόλωση και μηδενικό πεδίο. Έτσι ένα υλικό θα είναι συμμετρικό μόνο όταν έχει κέντρο συμμετρίας. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

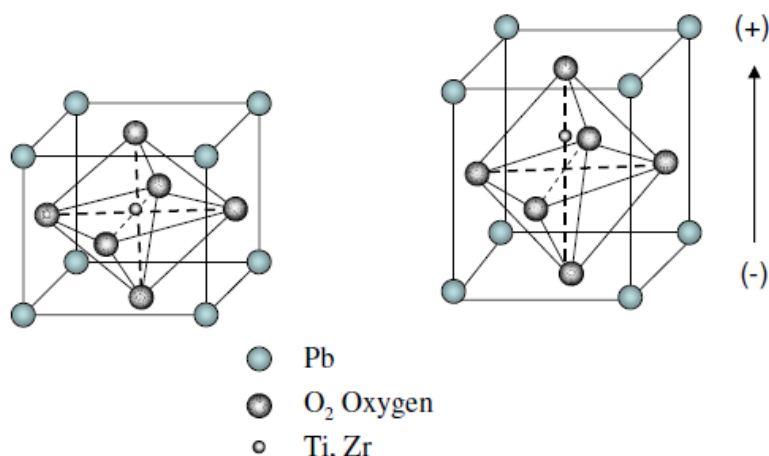


- α. ρύσταλλοι με κέντρο συμμετρίας δεν έχουν *pzt* φαινόμενο.
- β. ρύσταλλοι *quartz* χωρίς κέντρο συμμετρίας με *pzt* φαινόμενο.

1.4.3 Υλικά που εμφανίζουν πιεζοηλεκτρισμό:

Από τις 32 κρυσταλλικές τάξεις, 20 είναι μη-κεντροσυμμετρικές. Σε αυτές τις 20 ανήκουν όλοι οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι. Όμως για να είναι ένας κρύσταλλος πιεζοηλεκτρικός θα πρέπει να τηρούνται και άλλες βασικές συνθήκες. Έτσι λοιπόν περιορίζεται ο αριθμός κρυστάλλων που δίδουν πιεζοηλεκτρισμό.

Θέση τομών πιεζοηλεκτρικών πλακιδίων στο χαλαζία:



Δομή Perovskite σε PZT (lead zirconate titanate)

Αυτόματη παραμόρφωση και πόλωση σε μία δομή Perovskite lead zirconate titanate (PZT):

(α) Τύπος Perovskite κρυσταλλικής μονάδας στην συμμετρική κυβική κατάσταση πάνω από την θερμοκρασία Curie, (β) Τύπος Perovskite κρυσταλλικής μονάδας κάτω από τη θερμοκρασία Curie. Η κρυσταλλική μονάδα είναι τετραγωνικά διαστρεβλωμένη με το κεντρικό άτομο να τοποθετείται ασύμμετρα. Σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται πόλωση (φεροηλεκτρική φάση)

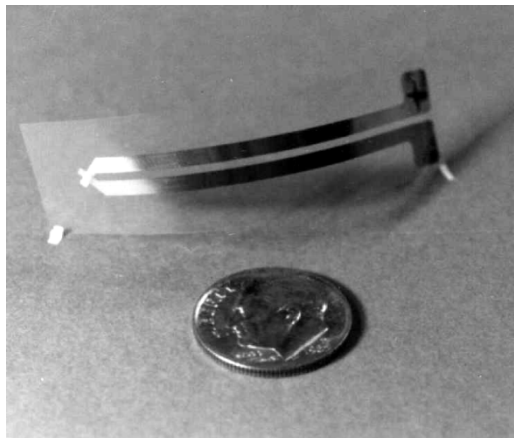
Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι κρυσταλλικές ομάδες που υποστηρίζουν το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού. Στην πράξη το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται σε πολύ λίγα υλικά. Μονοκρυσταλλοί από NH₄H₂PO₄, H₂PO₄, α-χαλαζία, άλας του Rochelle και σε μερικές περιπτώσει πολυκρυσταλλικά κεραμικά.

Σύστημα	Κρυσταλλογραφικές ομάδες που δίνουν πιεζοηλεκτρισμό	Κρυσταλλογραφικές ομάδες που δε δίνουν πιεζοηλεκτρισμό
Τρικλινές	1	$\bar{1}$
Μονοκλινές	2, m	2/m
Ορθορομβικό	222, mm2	Mmm
Τετραγωνικό	4, 4, 422, 4mm, 42m	4/m, 4/mmm
Τριγωνικό	3, 32, 3m	$\bar{3}$, 3m
Εξαγωνικό	6, $\bar{6}$, 622, 6mm, $\bar{6}m2$	6/m, 6/mmm
Κυβικό	23, $\bar{4}3m$	$M\bar{3}$, 432, m $\bar{3}m$

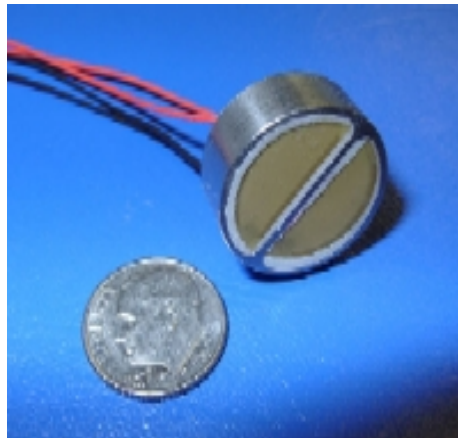
Μορφή πιεζοηλεκτρικών υλικών.

Υπάρχουν δυο κατηγορίες πιεζοηλεκτρικών που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο δόνησης, τα κεραμικά και τα πολυμερή. Από τα πιο γνωστά πιεζοκεραμικά είναι ο μόλυβδος ζirkονίου τιτανίου (PZT), το οποίο έχει ανακτήσιμη τάση 0.1% και χρησιμοποιείται ευρέως ως ενεργοποιητής και

αισθητήρας για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένων των υπερηχητικών εφαρμογών και έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια. Τα πιεζοπολυμερή χρησιμοποιούνται πιο πολύ ως αισθητήρες και το πιο γνωστό είναι το PVDF.



PVDF sensor



PZT sensor

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά έχουν βρει εφαρμογή σε πολλές δραστηριότητες. Χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες δύναμης ή μετατοπίσεων εφαρμόζοντας το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και για την ανίχνευση των υπερηχητικών κυμάτων. Το αντίστροφο φαινόμενο χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή υπερηχητικών κυμάτων. Δηλαδή ο ίδιος κρύσταλλος μπορεί να λειτουργήσει και σαν πομπός και σαν δέκτης.

Ο πιο γνωστός φυσικός κρύσταλλος που εμφανίζει το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ο κρύσταλλος χαλαζία ο οποίος έχει την μορφή εξαγωνικού πρίσματος. Στην ουσία το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεταφορά μεταξύ ηλεκτρικής και μηχανικής ενέργειας, η οποία μπορεί να προκληθεί όταν τα υλικά είναι ηλεκτρικά φορτισμένα και μπορούν πολωθούν. Στα πιεζοηλεκτρικά υλικά τα οποία παρουσιάζουν ανισότροπη συμπεριφορά, η κρυσταλλική τους δομή δεν έχει κέντρο συμμετρίας. Τα περισσότερα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι στερεά κρυστάλλων, αυτά μπορεί να είναι είτε μονοί κρύσταλλοι σχηματισμένοι φυσικά ή με συνθετικές διαδικασίες, είτε πολυκρυσταλλικά υλικά όπως π.χ. τα φεροηλεκτρικά κεραμικά, στα οποία τους δίνεται μια συμμετρία μονού κρυστάλλου με την διαδικασίας

της πόλωσης δηλαδή με την εφαρμογή ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου κοντά σε θερμοκρασία Curie. Τα πολυμερή μπορούν να λειτουργήσουν ως πιεζοηλεκτρικά κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου.

1.4.4 Πλεονεκτήματα πιεζοηλεκτρικών υλικών έναντι υπολοίπων ευφύων υλικών :

- Λειτουργία πιεζοηλεκτρικών σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων.
- Μικρός χρόνος απόκρισης,
- Απλή ενσωμάτωση τους στην κατασκευή λόγω του μικρού μεγέθους τους,
- Χαμηλό κόστος κατασκευής,
- Δυνατότητα τους να παράγουν μεγάλη ισχύ,
- Μεγάλη γκάμα και διαθεσιμότητα πιεζοπολυμερών και πιεζοκεραμικών στην αγορά,
- Ύπαρξη καλής τεχνογνωσίας αυτών των υλικών από προγενέστερες χρήσεις τους.

1.4.5 Μαθηματική περιγραφή φαινομένου.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι ότι οι φυσικές τους ιδιότητες (θερμική, ηλεκτρική αγωγιμότητα, ελαστικότητα, ηλεκτρική πόλωση) εξαρτώνται από την διεύθυνση στην οποία μετρούνται.

Αυτές οι ιδιότητες ονομάζονται ανισοτροπικές. Προκειμένου να προσδιορίσουμε την τιμή αυτών των ιδιοτήτων, χρησιμοποιούμε μαθηματικές ποσότητες που ονομάζονται τανυστές. Αν δηλώσουμε τους άξονες x, y, z ως 1, 2, 3 αντίστοιχα, τότε οι σχέσεις μεταξύ πόλωσης και έντασης εφαρμοζόμενου P ηλεκτρικού πεδίου E είναι οι παρακάτω:

$$P_1 = \epsilon_0 \chi_{11} E_1 + \epsilon_0 \chi_{12} E_2 + \epsilon_0 \chi_{13} E_3$$

$$P_2 = \epsilon_0 \chi_{21} E_1 + \epsilon_0 \chi_{22} E_2 + \epsilon_0 \chi_{23} E_3$$

$$P_3 = \epsilon_0 \chi_{31} E_1 + \epsilon_0 \chi_{32} E_2 + \epsilon_0 \chi_{33} E_3$$

Έτσι ένα πεδίο E_1 θα γεννήσει τρεις συνιστώσες πόλωση R_1, R_2, R_3 που δίδονται από τις σχέσεις:

$$P_1 = \epsilon_0 \chi_{11} E_1$$

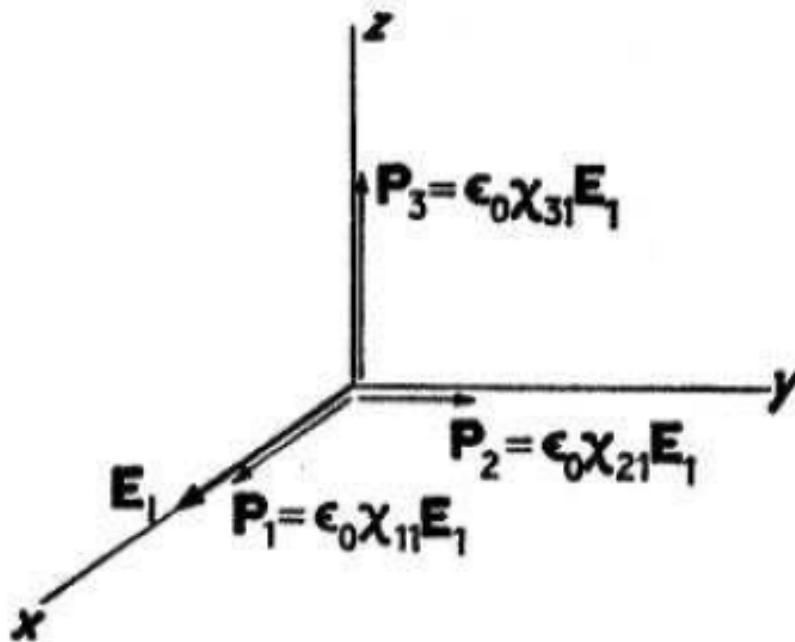
$$P_2 = \epsilon_0 \chi_{21} E_1$$

$$P_3 = \epsilon_0 \chi_{31} E_1$$

Όπου, ϵ_0 είναι η διαπερατότητα του κενού, χ_{ij} η ηλεκτρική επιδεκτικότητα και ως πίνακοστοιχείο δίδει τη συνισταμένη της πόλωσης κατά μήκος της διεύθυνσης $-i$ ως αποτέλεσμα εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου κατά τη

διεύθυνση j . Πρέπει να σημειωθεί ότι σε ένα κρύσταλλο όταν εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο \mathbf{E}_1 στον άξονα 1 θα δημιουργήσει πόλωση κατά μήκος και των τριών αξόνων 1, 2, 3.

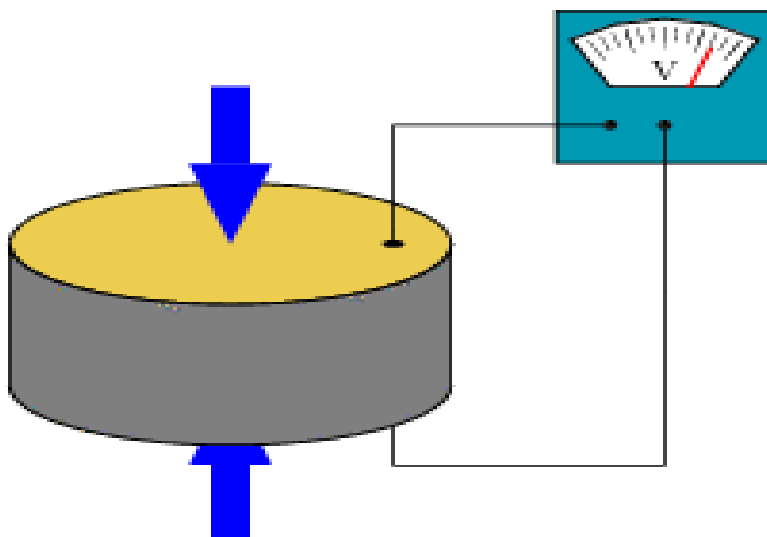
Έτσι η πόλωση δεν είναι παράλληλη προς το εφαρμοζόμενο πεδίο. Αυτό φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Πόλωση κατά μήκος των τριών αξόνων.

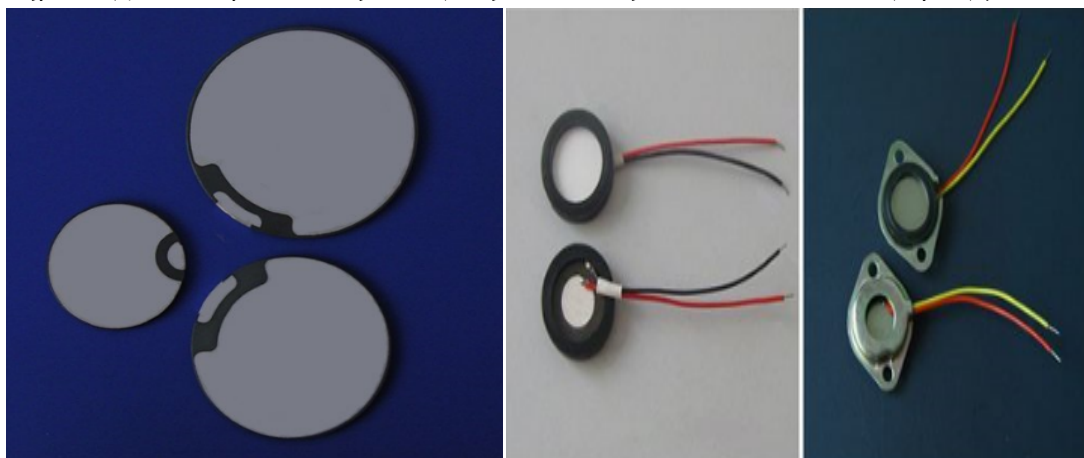
1.4.6 Πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες και οι εφαρμογές τους.

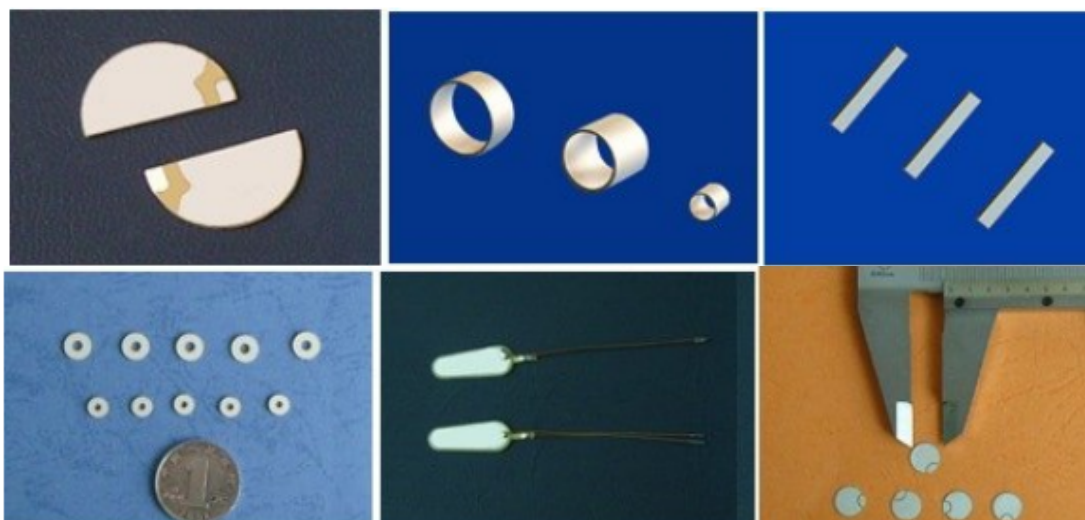
Ένας πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα είναι μια συσκευή που χρησιμοποιεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο για τη μέτρηση της πίεσης , επιτάχυνση , καταπόνηση ή ισχύ μετατρέποντας τους σε ηλεκτρικό σήμα.



Δημιουργία ηλεκτρικής τάσης από παραμόρφωση πιεζοηλεκτρικού δίσκου.

Όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα, ο πιεζοηλεκτρικός δίσκος δημιουργεί μια ηλεκτρική τάση όταν παραμορφώνεται.





Διάφοροι τύποι πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων.

1.4.7 Εφαρμογές πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες έχουν αποδειχθεί ότι είναι ευέλικτα εργαλεία για τη μέτρηση στοιχείων σε διάφορες εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται για τη διασφάλιση της ποιότητας , έλεγχο των διαδικασιών και για την έρευνα και ανάπτυξη σε διάφορους κλάδους παραγωγής. Αν και το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Κιουρί το 1880, μόνο στη δεκαετία του 1950 άρχισε να χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές. Από τότε, αυτή η αρχή του πιεζοηλεκτρισμού για λήψη μετρήσεων χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο και μπορεί να θεωρηθεί ως μια τεχνολογία με μια εξαιρετική εγγενή αξιοπιστία. Έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε ένα σύνολο εφαρμογών, όπως στην ιατρική , αεροδιαστημική , πυρηνική τεχνολογία. Στην αυτοκινητοβιομηχανία πιεζοηλεκτρικά στοιχεία χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της καύσης κατά την ανάπτυξη των κινητήρων εσωτερικής καύσης. Η άνοδος της πιεζοηλεκτρική τεχνολογίας είναι άμεσα συνδεδεμένη με μια σειρά από εγγενή πλεονεκτήματα.

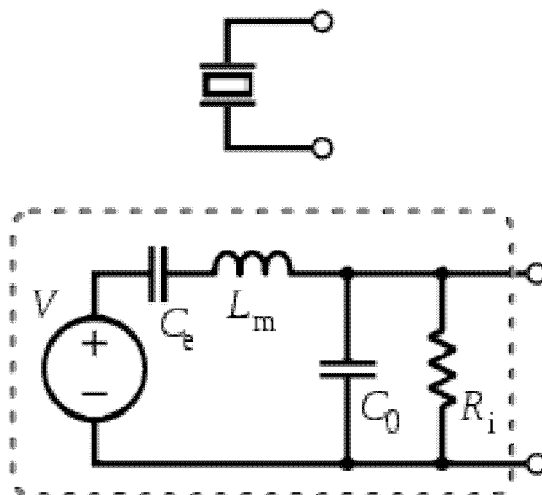
Αν και οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι ηλεκτρομηχανικά συστήματα που αντιδρούν με συμπίεση , τα αισθητήρια στοιχεία δείχνουν σχεδόν μηδενική απόκλιση. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες έχουν εξαιρετικά υψηλή φυσική συχνότητα και μια εξαιρετική γραμμικότητα σε ένα μεγάλο εύρος φάσματος.

Επιπλέον, οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και στην ακτινοβολία, γεγονός που επιτρέπει την χρησιμοποίησή τους υπό σκληρές συνθήκες. Μερικά υλικά που χρησιμοποιούνται (ιδίως φωσφορικά γάλλιο ή τουρμαλίνη) έχουν μια ακραία σταθερότητα ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες, επιτρέποντας τους αισθητήρες να έχουν μια περιοχή εργασίας έως και 1000 °C.

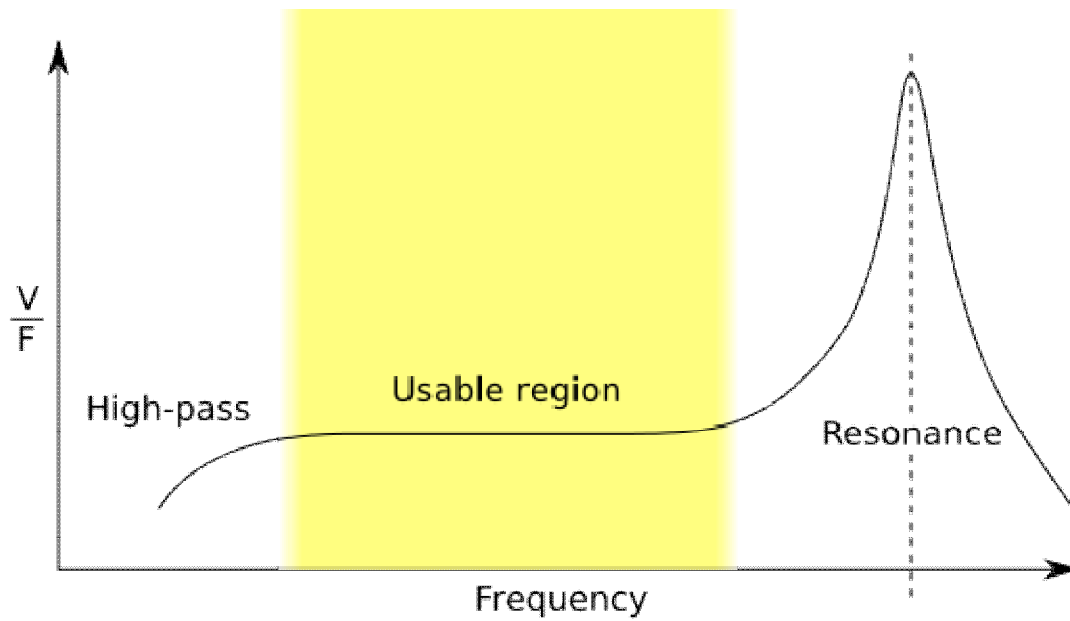
Η τουρμαλίνη εμφανίζει εκτός από το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, πυροηλεκτρισμό. Ο πυροηλεκτρισμός είναι η ικανότητα να παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα, όταν η θερμοκρασία του κρυστάλλου αλλάζει. Αυτή η επίδραση είναι επίσης κοινή με τα πιεζοκεραμικά υλικά.

Ένα μειονέκτημα των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων είναι ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στατικές μετρήσεις. Μια στατική δύναμη θα έχει ως αποτέλεσμα ένα σταθερό μέγεθος φορτίσεων του πιεζοηλεκτρικού υλικού.

Επιπλέον υψηλές θερμοκρασίες προκαλούν πρόσθετη πτώση στην εσωτερική αντίσταση και στην ευαισθησία του πιεζοηλεκτρικού υλικού. Σε συνεχώς αυξανόμενα φορτία πίεσης και θερμοκρασίας τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χάνουν την ευαισθησία τους.



Σχηματική απεικόνιση και το αντίστοιχο ηλεκτρονικό κύκλωμα ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα.



Frequency response ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα. Ένταση προς εφαρμοζόμενη δύναμη.

Ενώ οι αισθητήρες χαλαζία χρειάζεται να ψύχονται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων σε θερμοκρασίες άνω των 300 ° C, ειδικοί τύποι κρυστάλλων, όπως GaPO₄ φωσφορικό γαλλίου δεν δείχνουν καμία δίδυμο σχηματισμό μέχρι το σημείο τήξης του ίδιου του υλικού.

1.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΜΙΚΗΣ ΑΚΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ – STRUCTURAL HEALTH MONITORING

1.5.1 Αναγκαιότητα ελέγχων στις κατασκευές

Οι κατασκευές αποτελούν σύνολα δομικών στοιχείων φέροντος οργανισμού φορτίων τα οποία έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να πληρούνται απαιτήσεις αντοχής και λειτουργικότητας. Κατά τη διάρκεια ζωής τους οι κατασκευές φθείρονται λόγω γήρανσης των υλικών κατασκευής, εκτεταμένης χρήσης, περιβαλλοντικών συνθηκών και ανεπαρκούς συντήρησης. Γι' αυτό πολλές φορές μετά από μία φυσική καταστροφή, όπως ένας σεισμός τα δομικά στοιχεία παρουσιάζουν βλάβες και δεν συμπεριφέρονται πλέον όπως αρχικά είχαν σχεδιαστεί. Έτσι κατά τη διάρκεια ζωής τους θέτονται κίνδυνοι ασφάλειας και τίθεται θέμα αξιοπιστίας.

Η κτιριακή υποδομή που περιλαμβάνει πολλά παλαιά κτήρια, γέφυρες, σήραγγες, φράγματα, μνημεία κ.λπ., από ποικίλα δομικά υλικά ανάλογα με την περίοδο κατασκευής τους, απαιτεί τον συνεχή έλεγχο και συντήρηση για να διατηρηθούν δομικά σε καλή κατάσταση με την έγκαιρη διάγνωση προβλημάτων στατικότητας ή ελλιπούς αντισεισμικής ικανότητας. Με το διαρκή έλεγχο και την απαραίτητη συντήρηση τα κτίρια θα είναι ασφαλή κατά τη διάρκεια της χρήσης τους από μόνιμα φορτία ή λόγω ενός επικείμενου σεισμού.

Η γρήγορη απόκριση και ο αυτοματισμός με σκοπό τον εντοπισμό φθορών και βλαβών οι οποίες υπονομεύουν τη λειτουργικότητα των κατασκευών γίνεται επιτακτική ανάγκη και μάλιστα με συνεχείς και επί τόπου τεχνικές ελέγχου κυρίως σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Ο έλεγχος της δομικής κατάστασης γίνεται με μεθόδους οι οποίες συνεχώς βελτιώνονται μέσω της ανάπτυξης της τεχνολογίας και των υλικών στον τομέα αυτό.

Η δυνατότητα ελέγχου μιας κατασκευής και ανίχνευσης βλάβης σε αυτή στο πιο αρχικό στάδιο της αποτελεί κυρίαρχο ενδιαφέρον σε όλα τα επιστημονικά πεδία της εφαρμοσμένης μηχανικής. Συνεχώς νέοι μέθοδοι ελέγχου αναπτύσσονται συστηματικά και παράλληλα με τη βελτίωση και

εξέλιξη νέων υλικών και τεχνολογιών. Ταυτόχρονα, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων ασφάλειας και λειτουργικότητας στις κατασκευές οι έλεγχοι θα πρέπει να γίνονται συχνά κατά την διάρκεια λειτουργίας τους και χωρίς να έχουν αρνητική επιρροή σε αυτές.

1.5.2 Μέθοδοι ελέγχου κατασκευών

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την τεχνική εφαρμογής τους, σε καταστρεπτικές και σε μη καταστρεπτικές μεθόδους (Non Destructive Evaluation, NDE). Για τις καταστρεπτικές δοκιμές, απαιτείται και λαμβάνεται για έλεγχο μικρό τμήμα της κατασκευής έτσι ώστε να αξιολογηθεί η δομική κατάσταση (μηχανικές ιδιότητες κλπ). Με αυτό τον τρόπο ο έλεγχος είναι προγραμματισμένος και περιορίζεται σε τοπικό επίπεδο ενώ ταυτόχρονα επηρεάζεται άμεσα η λειτουργία της κατασκευής. Οι μέθοδοι αυτοί παρουσιάζουν πολλές φορές προβλήματα λόγω της ιδιομορφίας, της πολυπλοκότητας και του μεγέθους της κατασκευής.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά τις μη καταστρεπτικές μεθόδους οι οποίες δεν προκαλούν ζημιά στην κατασκευή. Έρευνες των τελευταίων ετών έχουν ως αποτέλεσμα την εξέλιξη και βελτίωση αυτών των τεχνικών. Σ' αυτές τις μεθόδους χρησιμοποιούνται κυρίως νέα υλικά τεχνολογίας αιχμής όπως είναι τα ευφυή υλικά. Αυτές οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι επιπλέον χρησιμοποιούνται και για τον έλεγχο της δομικής κατάστασης της κατασκευής και των υλικών (εντατική κατάσταση, ιδιότητες υλικών) σε συνεχή βάση. Κυρίως αυτή η επιδίωξη οδήγησε στην δημιουργία και ανάπτυξη μεθόδων ελέγχου δομικής ακεραιότητας οι οποίες να έχουν τη δυνατότητα να διενεργούνται υπό συνεχή και αδιάκοπη λειτουργία.

Παραδοσιακές μέθοδοι διάγνωσης βλαβών είναι οι οπτικοί ή οι τοπικά πειραματικοί μέθοδοι, όπως οι μέθοδοι ακουστικής ή υπερηχητικής εκπομπής, οι μέθοδοι μαγνητικών πεδίων, η ραδιογραφία, οι μέθοδοι ρευμάτων αυτεπαγωγής, θερμικού πεδίου κ.λπ. Όλες οι παραπάνω μέθοδοι είναι παραμετρικές δηλαδή περιορίζονται στην απαίτηση γνώσης κάποιων παραμέτρων της κατασκευής εκ των προτέρων. Μερικές από τις παραμέτρους της κατασκευής είναι οι ιδιότητες των υλικών, οι ιδιομορφές,

οι συντελεστές απόσβεσης κ.λπ. Δεδομένων αυτών των περιορισμών αυτές οι πειραματικές μέθοδοι μπορούν να διαγνώσουν βλάβη μόνο επάνω ή κοντά στην επιφάνεια της κατασκευής. Η ανάγκη ανάπτυξης γενικών μεθόδων διάγνωσης βλαβών που θα μπορούν να εφαρμοστούν σε περισσότερο πολύπλοκες κατασκευές έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη μη-παραμετρικών μεθόδων οι οποίες εξετάζουν αλλαγές στα χαρακτηριστικά μηχανικής ταλάντωσης των κατασκευών.

Τις τελευταίες δεκαετίες σε έρευνες επάνω στο πεδίο του δομικού ελέγχου με χρήση μη καταστρεπτικών μεθόδων έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές. Μερικές από αυτές είναι η τεχνική στατικής απόκρισης των κατασκευών, η χαμηλής συχνότητας δυναμική απόκριση και οι τεχνικές οι οποίες υιοθετούν τα ευφή υλικά και συστήματα. Τεχνικές οι οποίες βασίζονται στην μετατόπιση στατικής απόκρισης, (Banan and Hjelmstad, 1994) και σε υπολογισμό στατικής τάσης (Sanayei and Saletnik, 1996) εμπεριέχουν τον υπολογισμό πραγματικών μετατοπίσεων και τάσεων το οποίο όμως είναι περίπλοκη διαδικασία για μεγάλης κλίμακας κατασκευές.

Πολλές από τις συμβατικές μη καταστρεπτικές μεθόδους αξιολόγησης (NDE), όπως η ραδιογραφία, η ακουστική εκπομπή, η επίδραση του μαγνητικού πεδίου, το ρεύμα αυτεπαγωγής, το θερμικό πεδίο και η τεχνική των υπερήχων εμφανίζουν σοβαρούς περιορισμούς για τις επιτόπου εφαρμογές. Όλες αυτές οι μέθοδοι απαιτούν δυνατότητα πρόσβασης στα επιθεωρούμενα δομικά στοιχεία και περιλαμβάνουν συνήθως ογκώδη εξοπλισμό.

1.5.3 Ιστορική αναδρομή μη καταστροφικού ελέγχου (Non Destructive Evaluation)

Παρακάτω παραθέτουμε μερικά αξιοσημείωτα γεγονότα που άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξη των τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου στις κατασκευές:

- 1854: Δυστύχημα από αστοχία πιεστικού δοχείου με 21 θύματα και 50 τραυματίες στο Hartford του Connecticut. 10 χρόνια μετά ψηφίζεται νόμος για υποχρεωτικούς ετήσιους ελέγχους.
- 1895: Ο Wilhelm Conrad Röntgen ανακαλύπτει τις γνωστές πλέον Ακτίνες-Χ και στην ανακοίνωσή του αναφέρει τη δυνατότητα εντοπισμού ελαττωμάτων.
- 1880 – 1920: Εφαρμόζεται ο πρόδρομος της μεθόδου ελέγχου με Διεισδυτικό Υγρό με τη χρήση λαδιού και λευκού χρώματος (το εξάρτημα βυθίζεται σε λεπτόρρευστο λάδι και μετά βάφεται με λευκό χρώμα το οποίο μετατρέπεται σε καφέ όταν το λάδι που παράμεινε σε τυχόν ρωγμές βγαίνει προς τα έξω).
- 1920: Ο Δρ. H. H. Lester αναπτύσσει τη βιομηχανική Ραδιογραφία των μετάλλων.
- 1926: Διατίθεται το πρώτο όργανο Ρευμάτων Eddy που μετρά το πάχος υλικού.
- 1927 – 1928: Το πρώτο σύστημα Μαγνητικής Επαγωγής εφαρμόζεται σε σιδηροδρομικές γραμμές.
- 1940 – 1944: Αναπτύσσεται η μέθοδος Υπερήχων από τον Δρ. Floyd Firestone.
- 1950: Ο J. Kaiser εισάγει την μέθοδο ΜΚΕ των Ακουστικών Εκπομπών.

1.5.4 Εφαρμογές Μη Καταστροφικού Ελέγχου (NDE)

Πολλές κατασκευές, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, χρειάζονται περιοδικούς Μη Καταστροφικούς Ελέγχους ώστε να εντοπιστούν πιθανές ζημιές που δεν θα γίνονταν αντιληπτές με τις απλές καθημερινές μεθόδους. Για παράδειγμα ο σκελετός ή η επένδυση των αεροσκαφών, οι υπόγειες σωληνώσεις, οι κατασκευές από σκυρόδεμα και στον οπλισμό τους, τα πιεστικά δοχεία χημικών αντιδραστηρίων, τα συρματόσχοινα γεφυρών, κ.ά.

Οι εφαρμογές των ΜΚΕ, σήμερα, καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σχεδόν παντού:

- στην αυτοκινητοβιομηχανία (μηχανή, πλαίσιο),
- στην αεροδιαστημική (Πλαίσια αεροπλάνων & διαστημοπλοίων, πύραυλοι, κινητήρες τζετ)
- στις κατασκευές (κτίρια, γέφυρες)
- στη βιομηχανία (μηχανικά εξαρτήματα, καλούπια, πρέσες)
- σε εγκαταστάσεις πετροχημικές, πυρηνικές, παραγωγής ρεύματος, ορυχεία (πιεστικά δοχεία, δεξαμενές, λέβητες, εναλλάκτες, τουρμπίνες, σωληνώσεις, συγκολλήσεις)
- στο σιδηρόδρομο (σιδηροτροχιές, τροχοί και άξονες)
- σε αγωγούς αερίου και πετρελαιοαγωγούς
- στα πάρκα αναψυχής (παιχνίδια και τραίνα μεγάλης ταχύτητας)
- στην ιατρική (τομογραφίες, υπέρηχοι, ακτινογραφίες, καρδιογραφήματα, εγκεφαλογραφήματα, κλπ.).

1.5.5 Έλεγχος δομικής ακεραιότητας

Σήμερα έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται πολλές τεχνικές εντοπισμού βλαβών στις κατασκευές οι οποίες αποτελούν τις μεθόδους ελέγχου δομικής ακεραιότητας (Structural Health Monitoring, SHM). Έλεγχος δομικής ακεραιότητας SHM είναι η διαδικασία της εφαρμογής μιας ολοκληρωμένης τεχνικής προσδιορισμού βλαβών στις κατασκευές. Ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας δημιουργήθηκε από τη συνύπαρξη διαφόρων τεχνικών και μπορεί να περιλαμβάνει στη διαδικασία του προϋπάρχουσες παραδοσιακές μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου των κατασκευών.

Ο τομέας του ελέγχου των κατασκευών είναι ζωτικής σημασίας σε πολλούς τομείς της σύγχρονης εφαρμοσμένης μηχανικής. Στις σύγχρονες κατασκευές οι ανάγκες για συνεχή έλεγχο με ασφάλεια πρακτικότητα και αξιοπιστία είναι ιδιαίτερα αυξημένες με αποτέλεσμα την συνεχόμενη ανάπτυξη και εφαρμογή πολλών μεθόδων και τεχνικών εντοπισμού βλαβών στις κατασκευές.

Με την τεχνολογική πρόοδο των ευφυών υλικών, των αισθητήρων, την επεξεργασία σήματος και την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος καθώς επίσης και με τις αυξανόμενες ανάγκες για συνεχή έλεγχο και αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας, ο SHM έχει προκύψει ως μετεξέλιξη από τις παραδοσιακές τεχνολογίες δομικών ελέγχων για να καλύψει αυτές τις απαιτήσεις

Η βασική συνεισφορά του SHM βασίζεται στην ανάπτυξη νέων ευαίσθητων υλικών τεχνολογίας αιχμής για τη δημιουργία αισθητήρων και διεγερτών με στόχο το συνεχή και αδιάκοπο έλεγχο των κατασκευών με ταυτόχρονη λειτουργία της κατασκευής εν ώρα ελέγχου.

Χαρακτηριστικό του SHM είναι ότι εφαρμόζεται στο σύνολο της κατασκευής και όχι τμηματικά και ο στόχος τους είναι η συνεχής παρακολούθηση της <<υγείας>> της κατασκευής με σκοπό όχι απλά την ανίχνευση της βλάβης αλλά και την πρόβλεψη της στον βαθμό που αυτό είναι δυνατόν.

Ως βλάβη ορίζονται οι αλλαγές που υφίσταται ένα δομικό σύστημα οι οποίες έχουν αρνητική επίδραση στην παρούσα ή μελλοντική απόκρισή του. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να συμβούν στις ιδιότητες των υλικών, στις

συνοριακές συνθήκες ή στην ενότητα του συστήματος. Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό, δεν είναι σημαντική η έννοια της βλάβης χωρίς τη σύγκριση δύο διαφορετικών καταστάσεων του συστήματος, μια από τις οποίες αντιπροσωπεύει το αρχικό, και συχνά υγιές σύστημα.

Η βλάβη δεν σημαίνει απαραίτητα συνολική απώλεια της λειτουργίας του συστήματος, αλλά ότι το σύστημα δεν λειτουργεί πλέον με το βέλτιστο τρόπο. Δεδομένου ότι η βλάβη έχει διαβαθμίσεις, διαδοχικά αυξάνεται και φθάνει σε ένα επίπεδο όπου οι επιπτώσεις της είναι σημαντικές για τη λειτουργία του δομικού συστήματος και δεν θεωρείται πλέον αποδεκτή. Αυτό το σημείο αναφέρεται ως αστοχία. Με την τεχνική SHM επιτυγχάνεται η πρόληψη της αστοχίας αφού η διάγνωση της βλάβης γίνεται σε αρχικό στάδιο.

Η βλάβη που προσδιορίζεται από τις αλλαγές στα δυναμικά χαρακτηριστικά ή στην απόκριση των κατασκευών λαμβάνει ιδιαίτερη σημασία στη σύγχρονη βιβλιογραφία. Η βασική ιδέα για την ανίχνευσή της είναι ότι οι ιδιομορφικές παράμετροι, ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές και ιδιομορφική απόσβεση έχουν σχέση με τις φυσικές ιδιότητες της κατασκευής όπως μάζα, απόσβεση και δυσκαμψία. Επομένως, αλλαγές στις φυσικές ιδιότητες μπορεί να προκαλέσουν αλλαγές στις ιδιομορφικές ιδιότητες. Είναι γνωστό, ότι οι βλάβες μικρού σχετικά βαθμού δεν εντοπίζονται άμεσα αλλά παραμένουν μη ανιχνεύσιμες ενώ ταυτόχρονα επεκτείνονται σε υψηλότερα επίπεδα και τελικώς προκαλούν την αστοχία. Όμως η έγκαιρη ανίχνευση της βλάβης μπορεί να αποτρέψει την καταστροφική αστοχία.

1.5.6 Μέθοδοι SHM που βασίζονται στη μηχανική ταλάντωση της κατασκευής

Οι περισσότερες έρευνες στο πεδίο του ελέγχου της δομικής ακεραιότητας SHM μέχρι σήμερα έχουν εστιάσει σε μεθόδους μηχανικής ταλάντωσης οι οποίες χρησιμοποιούν χαμηλές φυσικές συχνότητες και ιδιομορφές. Μεγάλη ώθηση στον έλεγχο δομικής ακεραιότητας έχει δοθεί λόγω της ταχείας ανάπτυξης αισθητήρων όπως π.χ. οι πιεζοηλεκτρικοί, οι οπτικές ίνες, τα MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems), τα Strain-gages, τα κράματα μνήμης σχήματος, τα ηλεκτρο-συστολικά υλικά, τα μαγνητο-συστολικά υλικά, τα ηλεκτρο-ρεολογικά υγρά κ.λπ.

Οι παραπάνω αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να καταγράψουν μεταβλητές απόκρισης όπως παραμόρφωση, επιτάχυνση, κύματα ήχου, ηλεκτρική ή μαγνητική αντίσταση, πίεση ή θερμοκρασία. Γενικά τα παραπάνω συστήματα μπορούν να διαχωριστούν σε παθητικά και ενεργητικά συστήματα δειγματοληψίας, Kessler (2002).

Τα παθητικά συστήματα δειγματοληψίας είναι εκείνα που λειτουργούν ανιχνεύοντας την απόκριση της κατασκευής λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών χωρίς οποιαδήποτε εισαγόμενη τεχνητή ενέργεια, ενώ τα ενεργητικά συστήματα είναι εκείνα που απαιτούν εξωτερικά παρεχόμενη ενέργεια υπό μορφή πίεσης ή ηλεκτρομαγνητικού κύματος για να λειτουργήσουν κατάλληλα.

Τα ενεργά συστήματα που λειτουργούν με τη μηχανική ταλάντωση περιλαμβάνουν την μέθοδο συνάρτησης μετατροπής στην ανάλυση ιδιομορφών και τη διάδοση κυμάτων Lamb. Οι παθητικές τεχνικές τείνουν να είναι απλούστερες στην εφαρμογή και τη λειτουργία σε ένα σύστημα ελέγχου δομικής ακεραιότητας και παρέχουν χρήσιμες γενικές ικανότητες ανίχνευσης βλάβης, εντούτοις γενικά οι μέθοδοι με ενεργά συστήματα είναι περισσότερο ακριβείς στην παροχή συγκεκριμένων πληροφοριών για μια περιοχή με βλάβη. Γι' αυτό τα τελευταία χρόνια οι τεχνικές διάγνωσης βλάβης που χρησιμοποιούν εξαναγκασμένες μηχανικές ταλαντώσεις εξελίσσονται συνεχώς.

Όσο οι κατασκευές γίνονται μεγαλύτερες και περισσότερο σύνθετες, μερικές από τις παθητικές τεχνικές γίνονται πρακτικά ανέφικτες και για το λόγο αυτό θα πρέπει να αναπτυχθούν περισσότερο κατάλληλες

μέθοδοι. Έχει διαπιστωθεί ότι σε συμβατικούς αισθητήρες προβλήματα προκύπτουν από α) το μέγεθος του αισθητήρα ο οποίος είναι ογκώδης, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε μία συνήθη κατασκευή, και β) το κόστος των αισθητήρων το οποίο περιορίζει τον αριθμό τους και έτσι δεν μπορεί να αναπτυχθεί μία γενική ολοκληρωμένη διαδικασία αλλά μόνο επαναλαμβανόμενος και τοπικός έλεγχος.

Η πρόσφατη χρήση των ευφυών υλικών, όπως τα πιεζοηλεκτρικά υλικά, τα κράματα μνήμης σχήματος και οι οπτικές ίνες έχουν προσθέσει μια νέα προοπτική στον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών (Structural Health Monitoring, SHM).

Τι τελευταίες δεκαέτιες έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στην ανάπτυξη διαφόρων τύπων συμβατικών αισθητήρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται για να καταγράψουν μεταβλητές απόκλισης όπως παραμόρφωση, επιτάχυνση, ηλεκτρική μαγνητική αντίσταση, πίεση ή θερμοκρασία, (Kessler 2002). Τέτοιοι τύποι αισθητήρων όπως έχουμε προαναφέρει αναλυτικά και στο πρώτο κεφάλαιο είναι οι οπτικές ίνες, οι πιεζοηλεκτρικοί, τα MEMS (Micro Electromechanical Systems), τα strain gauges (μετρητές τάσεις) , τα SMA (Shape Memory Alloys), τα ηλεκτροσυστολικά υλικά, τα μαγνητοσυστολικά υλικά, τα ηλεκτρο-ρεολογικά υγρά κ.λ.π. (Piefort 2001).

Πάνω στον τομέα του μη καταστροφικού ελέγχου με την τεχνική της εξαναγκασμένης ταλάντωσης, έχουν γίνει πολλές έρευνες και υπάρχει πλήθος σχετικών επιστημονικών δημοσιεύσεων με κυριότερη την εκτενή έρευνα 300 δημοσιεύσεων του Doebbling et al. (1998). Η πρώτη δημοσίευση στον τομέα του μη καταστροφικού ελέγχου με τη χρήση εξαναγκασμένης ταλάντωσης(vibration based NDE) έγινε το 1969 από τον Liftshits and Rotem.

Οι περισσότερες αρχικές έρευνες ελέγχου δομικής ακεραιότητας εφαρμόστηκαν σε πλατφόρμες πετρελαίου και ιδιαίτερα σε πυρηνικά εργοστάσια και σε περιστροφικές μηχανές. Στην δεκαετία του 1980 υπήρξε ραγδαία ανάπτυξη του τομέα και αυτή η μέθοδος ελέγχου εφαρμόστηκε σε τουρμπινομηχανές και σε κτηριακές κατασκευές

αεροναυπηγικής, (Carneiro 2000). Τα τελευταία χρόνια ο έλεγχος και η ανίχνευση σφαλμάτων σε κατασκευές έγινε το κύριο σημείο εστίασης μεγάλων διεθνών συνεδρίων, (SPIE's Symposium, Structural Health Monitoring Conference, International Modal Analysis Conference).

1.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (ELECTROMECHANICAL ADMITTANCE EMA)

Η μέθοδος σύνθετης ηλεκτρομηχανικής αντίστασης προτάθηκε πρώτα από τον Liang (1994) στο τμήμα ευφύων υλικών και κατασκευών του πολυτεχνείου της Βιρτζίνια με αρχικό σκοπό την έρευνα των εφαρμογών του σε μηχανικές και αεροναυπηγικές κατασκευές. Οι σύγχρονες έρευνες έχουν εστιάσει στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των ευφύων αυτών υλικών για τον έλεγχο της δομική ακεραιότητας συστημάτων, (Park et al. 2000a).

Η μέθοδος EMA εφαρμόστηκε στην συνέχεια σε αστικές κατασκευές όπως γέφυρες, μεταλλικές κατασκευές και δομικά στοιχεία κτηρίων. Ο έλεγχος δομικής ακεραιότητας με την χρήση της μεθόδου σύνθετης ηλεκτρομηχανικής αντίστασης είναι δυνατή με την χρήση της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Συγκεκριμένα μια πιεζοηλεκτρική διάταξη επικολλάται στην κατασκευή και εξυπηρετεί διπλή λειτουργία, ταλαντώνει τοπικά σε υψηλές συχνότητες και ταυτόχρονα λαμβάνει την τοπική δυναμική απόκριση της κατασκευής.

Τα τελευταία χρόνια η τεχνική έχει προσελκύσει την προσοχή στο επιστημονικό πεδίο των δομικών κατασκευών. Επιτυχείς πειραματικές εφαρμογές στις κατασκευές τέτοιων έργων βρίσκονται στις εργασίες των Ayres et al. (1998), Soh et al. (2000), Park et al. (2000a), Bhalla and Soh (2003 – 2004a). Στις παραπάνω έχουν παρουσιάσει τη δυνατότητα επί τόπου ελέγχου των κατασκευών μέσω της ηλεκτρομηχανικής μεθόδου σύνθετης αντίστασης.

Το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται εκτενώς στην κατασκευή των περισσότερων δομικών κατασκευών. Οι κατασκευές από σκυρόδεμα κατασκευάζονται για να καλύψουν πολλά χρόνια ζωής και σπάνια αντικαθίστανται εφόσον κατασκευαστούν. Κατά την διάρκεια της ζωής τους στο σκυρόδεμα επέρχεται φθορά και κόπωση οδηγώντας στην απώλεια της δομικής του ακεραιότητας. Ο συνεχής έλεγχος της κατάστασης του σκυροδέματος είναι επομένως κρίσιμος στην εξασφάλιση της αξιόπιστης απόδοσης των κατασκευών.

Τα αποτελέσματα συλλέγονται άμεσα στην περιοχή υψηλών συχνοτήτων, επειδή σε αυτές τις συχνότητες εμφανίζει υψηλή ευαισθησία η μέθοδος σε μικρές βλάβες και λόγω αυτού η χρήση αισθητήρων όπως οι πιεζοηλεκτρικοί μπορούν να το επιτύχουν. Κατά συνέπεια, η μέθοδος EMA με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών φαίνεται να υπερέχει πέρα από τις υπάρχουσες συμβατικές μεθόδους, (Bhalla and Soh, 2003).

Συγκεκριμένα, η τεχνική της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας, που χρησιμοποιεί ευφυή πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά (PZT), έχει προκύψει ως ισχυρή τεχνική για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας SHM (Structural Health Monitoring), (Soh et al., 2000), (Park et 2001), (Giurgiutiu and Zagrai, 2000), (Bhalia and Soh, 2004a,b).

Στην συνέχεια αναπτύσσονται οι κύριες αρχές της, ερευνώνται οι ιδιότητες των πιεζοηλεκτρικών υλικών όσο αφορά την μέθοδο αυτή καθώς και οι περιορισμοί που θα πρέπει να ξεπεραστούν για να είναι κατάλληλη η μέθοδος για ευρύ φάσμα κατασκευών.

Λόγω των ξεχωριστών πλεονεκτημάτων της η EMA έχει εξελιχθεί σε ισχυρή τεχνική για τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας των κατασκευών. Η μέθοδος αυτή αξιοποιεί την ιδιότητα της ηλεκτρομηχανικής σύζευξης των πιεζοηλεκτρικών υλικών. Μια πιεζοηλεκτρική διάταξη επικολλάται στην κατασκευή και εξυπηρετεί διπλή λειτουργία, ταλαντώνει τοπικά σε υψηλές συχνότητες και ταυτόχρονα λαμβάνει την τοπική δυναμική απόκριση της κατασκευής. Ο έλεγχος της δομικής ακεραιότητας των κατασκευών με χρήση της μεθόδου EMA βασίζεται στις ιδιότητες και την χρήση των πιεζοηλεκτρικών υλικών

Η νέα τεχνική που χρησιμοποιεί τα πιεζοκεραμικά υλικά όπως το lead zirconate titanate για έλεγχο της δομικής ακεραιότητας προτάθηκε αρχικά από του Sun et al. (1995). Βασισμένη σε ταλάντωση υψηλών συχνοτήτων η μέθοδος παρουσιάζει εξαιρετική ευαισθησία σε εν τη γενέσει βλάβες. (Tseng and Naidu, 2002). Για την ποσοτικοποίηση των αλλαγών στην απόκριση λόγω της παρουσίας βλάβης αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα βαθμιαίο δείκτη βλάβης (π.χ. απόκλιση ελαχίστων τετραγώνων, απόκλιση μέσης τετραγωνικής τιμής ή κάποια άλλη στατιστική ένδειξη) ενώ δεν απαιτεί λεπτομερείς γνώσεις των ευπαθών μερών και της μορφολογίας της κατασκευής και μπορεί να αντιμετωπίσει απρόβλεπτους τύπους αστοχίας. Επομένως η μέθοδος αυτή παρέχει περισσότερες δυνατότητες και πλεονεκτήματα συγκρινόμενη με άλλες παραμετρικές μεθόδους όπως οι μέθοδοι μηχανικής ταλάντωσης σε χαμηλές συχνότητες. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να ελέγχεται διαρκώς σε πραγματικό χρόνο μια κατασκευή κατά την διάρκεια της λειτουργίας της. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να γίνουν εμφανείς οι αστοχίες αλλά και ο ρυθμός με τον οποίο επεκτείνονται, ώστε να ληφθούν έγκαιρα τα κατάλληλα μέτρα για την ασφάλεια της κατασκευής που συνεπάγεται και της ανθρώπινης ζωής. Λόγω της διακριτικής εφαρμογής των υλικών αυτών η λειτουργία της κατασκευής συνεχίζεται κατά την διενέργεια του ελέγχου ενώ ταυτόχρονα ο έλεγχος μπορεί να είναι αυτοματοποιημένος. Επιπλέον η μάζα των πιεζοηλεκτρικών υλικών είναι πολύ μικρή σχεδόν αμελητέα με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής.

1.6.1 Βασικές αρχές για την εφαρμογή της μεθόδου EMA

Η μέθοδος σύνθετης αγωγιμότητας ως τεχνική ελέγχου των κατασκευών έχει αναπτυχθεί ως σπουδαίο μέσο αξιολόγηση υλικών βλαβών σε πραγματικό χρόνο. Η βασική αρχή ανάπτυξης της μεθόδου αυτής είναι η ηλεκτρομηχανική σύζευξη μεταξύ του πιεζοηλεκτρικού PZT – επιθέματος (PZT – patch) διεγέρτη/αισθητήρα και της κατασκευής. Βασική προϋπόθεση της μεθόδου είναι να χρησιμοποιηθούν υψηλής συχνότητας μηχανικές ταλαντώσεις που μόνο οι πιεζοηλεκτρικοί διεγέρτες μπορούν να προκαλέσουν. Η χρήση της στοχεύει στον έλεγχο της περιοχής μιας κατασκευής με γνώμονα τις αλλαγές στη δομική σύνθετη αντίσταση που θα προκαλούσε μια επικείμενη βλάβη.

Η βάση αυτής της αντίληψης ενεργού τεχνολογίας είναι η μεταφορά ενέργειας μεταξύ του διεγέρτη και του μηχανιού συστήματος της κατασκευής. Έχει αποδειχθεί ότι η ηλεκτρική σύνθετη αντίσταση του υλικού PZT επηρεάζεται άμεσα από τη μηχανική σύνθετη αντίσταση ενός δομικού τμήματος της κατασκευής όπου επικολλάται το επίθεμα PZT.

Το μικρό, μη καταστρεπτικό PZT μπορεί να εγκατασταθεί εύκολα και να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει μακρινή, απρόσιτη θέση χωρίς να χρειάζεται αφαίρεση μετά το πέρας της διαδικασίας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος και το βάρος του επιθέματος PZT θεωρούνται αμελητέα σε σχέση με τις κατασκευές έτσι ώστε η επικόλληση τους στην κατασκευή δεν δημιουργεί καμία μεταβολή στα δυναμικά χαρακτηριστικά της. Κατά συνέπεια, η μέθοδος σύνθετης αντίστασης φαίνεται να υπερέχει πέρα από τις υπάρχουσες συμβατικές μεθόδους μηχανικής ταλάντωσης, (Bhalia and Soh, 2003). Στην συνέχεια αναπτύσσονται οι βασικότερες παράμετροι της μεθόδου EMA, (Park et al. 2003).

1.6.2 Παράμετροι της μεθόδου Σύνθετης Αγωγιμότητας

Περιοχές συχνότητων

Η μέθοδος σύνθετης αντίστασης ακολουθεί την μεθοδολογία που βασίζεται στην συνεχή σύγκριση των αποκρίσεων μηχανικής ταλάντωσης που λαμβάνονται από τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες για να αξιολογήσει τη δομική ακεραιότητα μιας κατασκευής. Η μέθοδος αυτή λαμβάνει τις αποκρίσεις της

μηχανικής ταλάντωσης σε μια «υγιή» κατάσταση μια κατασκευής, σε σύγκριση με της απόκριση της μηχανικής ταλάντωσης που λαμβάνεται σε διάφορους χρόνους κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής της κατασκευής για της αξιολόγηση της κατάστασης της. Τα δεδομένα των μετρήσεων εξετάζονται χρησιμοποιώντας τεχνικές επεξεργασίας σήματος για να διερευνηθούν οι αλλαγές στα χαρακτηριστικά που θα δηλώσουν την παρουσία βλάβης.

Η ευαισθησία της τεχνικής αυτής για την ανίχνευση βλάβης συνδέεται στενά με την ζώνη συχνότητας που επιλέγεται. Ειδικό βάρος κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής δίδεται στις περιοχές των συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των αλλαγών των αποκρίσεων. Η πιο συνηθισμένη τεχνική ανάλυσης βασίζεται στην ανάλυση στο πεδίο συχνοτήτων.

Για να διαισθανθεί τον τύπο της βλάβης που ενδεχομένως να αντιστοιχεί ακόμη και στην έναρξη της, θα πρέπει το μήκος κύματος της διέγερσης να είναι μικρότερο από το χαρακτηριστικό μήκος της βλάβης που ανιχνεύεται. Προκειμένου να εξασφαλίσει υψηλή ευαισθησία στην επικείμενη βλάβη, η απόκριση της ηλεκτρικής σύνθετης αντίστασης λαμβάνεται σε υψηλές συχνότητες συνήθως μέσα στις περιοχές των 30-400 KHz. Κάτω από αυτές τις υψηλές τάξεις συχνοτήτων, το μήκος κύματος της διέγερσης είναι μικρό, και αρκετά ευαίσθητο ώστε να ανιχνεύει ελάχιστες αλλαγές στην ακεραιότητα της κατασκευής. Η περιοχής συχνοτήτων για μια δεδομένη κατασκευή καθορίζεται συνήθως από μια διαδικασία δόκιμης σφάλματος και έχει υπάρξει λίγη αναλυτική ερευνητική εργασία σχετικά με τις κατάλληλες περιοχές συχνοτήτων.

Για την μέθοδο H/M σύνθετης αγωγιμότητας EMA επιλέγονται συνήθως, τα φάσματα συχνότητας που περιέχουν αρκετές αιχμές στην απόκριση τους. Η μεγάλη πυκνότητα των αιχμών σε μια περιοχή συχνότητας αποτελεί ένδειξη μεγαλύτερης δυναμικής αλληλεπίδρασης στο φάσμα αυτό της συχνότητας σε σχέση με κάποια άλλα φάσματα. Εκτός λοιπόν από την ανάγκη διεγέρσεως σε περιοχές υψηλών συχνοτήτων, θα πρέπει η απόκριση να περιέχει αρκετές αιχμηρές κορυφές για να είναι αξιολογήσιμη.

Οι Sin et al. (1995) πρότειναν ότι μια περιοχή διέγερσης σε υψηλές συχνότητες με πλήθος αιχμηρών κορυφών είναι ευνοϊκή δεδομένου ότι περιέχει γενικά περισσότερες αξιολογήσιμες δομικές πληροφορίες για την κατάσταση μιας κατασκευής. Επίσης προτείνουν ότι οι συχνότητες πάνω από 200 KHz μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καλύψουν μεγαλύτερες περιοχές ελέγχου.

Οι περιοχές συχνοτήτων υψηλότερες από 500 KHz έχει παρατηρηθεί ότι είναι δυσμενείς. Σε αυτή την περίπτωση, επειδή η περιοχή κάλυψης γίνεται εξαιρετικά μικρή, οι αισθητήρες PZT παρουσιάζουν δυσμενή ευαισθησία στις συνοριακές συνθήκες τους με την κατασκευή και όχι με την ευαισθησία του PZT σε σχέση

με την συμπεριφορά της ελεγχόμενης κατασκευής. Στις υψηλές συχνότητες όπως και πάνω από 500 KHz οι συνθήκες επικόλλησης των PZT επάνω στην κατασκευής φαίνεται να παίζουν σημαντικότερο ρόλο από την αλληλεπίδραση του PZT και της κατασκευής λόγω βλάβης της κατασκευής.

1.6.3 Το πραγματικό μέρος της ηλεκτρική σύνθετης αγωγιμότητας

Σύμφωνα με τους Sun et al. (1995) και Bhalia et al. (2003) το πραγματικό μέρος της ηλεκτρικής σύνθετης αγωγιμότητας είναι πιο ευαίσθητο στην βλάβη ή αλλιώς στην αλλαγή της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής από ότι το φανταστικό μέρος. Η αλλαγή της απόκρισης της σύνθετης αγωγιμότητας της κατασκευής αποδίδεται στην αλλαγή της δομικής ακεραιότητας της λόγω της βλάβης. Αυτό το χαρακτηριστικό εκδηλώνεται έντονα μόνο στο πραγματικό μέρος της απόκρισης της σύνθετης αγωγιμότητας.

1.6.4 Περιοχή κάλυψης των αισθητήρων σύνθετης αγωγιμότητας

Κάτω από περιοχές συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο που βασίζεται στη σύνθετη αντίσταση η περιοχή κάλυψης του PZT περιλαμβάνει τη γύρω περιοχή που έχει τοποθετηθεί.

Με κατάλληλη αριθμητική προσομοίωση οι Esteban and Rogers βασιζόμενοι στην θεωρία διάδοσης των κυμάτων ερευνούν τον προσδιορισμό της περιοχής κάλυψης των PZT που βασίζεται η μέθοδος σύνθετης αγωγιμότητας. Η εργασία τους περιλαμβάνει επίσης μια παραμετρική μελέτη για την περιοχή κάλυψης ενός διεγέρτη – αισθητήρα PZT ή ενός με την εξέταση διαφόρων παραγόντων όπως της γεωμετρίας, την επίδραση του φορτίου μάζας, τις ασυνέχειες στην διατομή, τις πολυμελείς συνδέσεις, τις άκαμπτες κατασκευές, και τα ενεργειακά απορροφητικά ενδιάμεσα στρώματα.

Εντούτοις σε τέτοιες περιοχές υψηλής συχνότητας οι υπολογιστικές μετρήσεις και ο προσδιορισμός της ποσότητας της ενεργειακής απώλειας γίνεται δύσκολος και έχουν υπάρξουν πολύ λίγες πρόσθετες πληροφορίες από τη διεθνή βιβλιογραφία. Συμπληρωματικά από την βιβλιογραφία προκύπτει ότι η περιοχή κάλυψης ενός αισθητήρα σύνθετης αντίστασης είναι στενά συνδεδεμένη με τις ιδιότητες του υλικού μια κατασκευής, της γεωμετρίας της, των περιοχών

συχνότητας που χρησιμοποιούνται και των ιδιοτήτων του πιεζοηλεκτρικού υλικού PZT, Με βάση τη γνώση που αποκτάται μέσω των διάφορων περιπτώσιολογικών ερευνών, έχει υπολογιστεί ότι η περιοχή αισθαντικότητας ή αλλιώς κάλυψης ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα μπορεί να ποικίλει γύρω στο 0.4 m. (ακτίνα αντίληψης και κάλυψης) στις σύνθετες κατασκευές και σε 2 m στις απλές μεταλλικές δοκούς. Δηλαδή η περιοχή κάλυψης των αισθητήρων εξαρτάται άμεσα από την πολυπλοκότητα των κατασκευών.

1.6.5 Σύγκριση και πλεονεκτήματα EMA σε σχέση με άλλες μεθόδους

Η δυνατότητα και τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ηλεκτρομηχανικής αγωγιμότητας EMA σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές έχουν πειραματικά αναγνωριστεί. (Sun et al. 1995), (Ayres et al. 1998), (Giurgiutiu and Rogers, 1999), (Park et al. 1999, 2000a,b). Υπάρχουν πολλές διαθέσιμες προσεγγίσεις για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας και η περιοχής αυτής της έρευνας παρουσιάζει συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον από τους ερευνητές.

Στις παραδοσιακές μη καταστρεπτικές μεθόδους αποτίμησης περιλαμβάνονται η τεχνολογία των υπερήχων, της ακουστική εκπομπής, η ανάλυση μαγνητικού πεδίου, οι διεισδυτικές δοκιμές, οι τεχνικές ρευμάτων αυτεπαγωγής, η ανάλυση με ακτίνες Χ, ο έλεγχος επίδρασης ηχοβολισμού, οι αναλύσεις απόκρισης κατασκευής, και οι οπτικές παρατηρήσεις. Κάθε μέθοδος από τις προαναφερόμενες είναι διαδεδομένες σε ποικίλες εφαρμογές. Πολλές NDE τεχνικές απαιτούν περιόδους εκτός λειτουργίας της κατασκευής, ή εφαρμογή σε συγκεκριμένες περιόδους ή διαστήματα, ενώ η μέθοδος EMA εξασφαλίζει συνεχή έλεγχο και ελεγχόμενη εποπτεία από υπολογιστή και με το ενδεχόμενο αυτόνομης χρήσης.

1.7 ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Το πιο σημαντικό θέμα που διερευνούν οι μέθοδοι διάγνωσης βλαβών είναι η βεβαίωση της ύπαρξης ή όχι της βλάβης. Αυτό αποτελεί θεμελιώδες ζήτημα σε όλες τις μεθόδους ελέγχου δομικής ακεραιότητας από τις πιο απλές μέχρι τις πιο σύνθετες και από τις πιο παλιές μέχρι τις πιο σύγχρονες. Εφόσον ανιχνευθεί η βλάβη ουσιαστικής σημασίας κρίνεται επίσης η ταυτοποίησή της. Με αυτό τον τρόπο γίνεται γνωστή η θέση και η έκτασή της ώστε να προσδιοριστεί στη συνέχεια και ο τρόπος επιδιόρθωσής της.

Στην παρούσα εργασία, η διαδικασία ελέγχου ακεραιότητας των κατασκευών με τη χρήση ευφυών υλικών και συγκεκριμένα πιεζοηλεκτρικών υλικών περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια. Το πρώτο αφορά την ανίχνευση και το δεύτερο την ταυτοποίηση των βλαβών σε ένα δομικό σύστημα. Στην περίπτωση που η ανίχνευση είναι θετική και άρα υπάρχει κάποια μορφή βλάβης, η διαδικασία συνεχίζεται με την ταυτοποίησή της. Η ταυτοποίηση έχει ως στόχο τον προσδιορισμό της θέσης και της έκτασης της βλάβης.

1.7.1 Δείκτες ανίχνευσης βλαβών

Ο δείκτης βλάβης (Damage Index) είναι μια αριθμητική τιμή που προκύπτει από τη συγκριτική επεξεργασία των αποκρίσεων σύνθετης H/M αγωγιμότητας και εκφράζει τη διαφορά μεταξύ των αποκρίσεων δύο καταστάσεων λόγω της παρουσίας βλάβης. Μέχρι σήμερα, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι δείκτες βλάβης για να συγκρίνουν τις αποκρίσεις σύνθετης αγωγιμότητας και να αξιολογήσουν την παρουσία βλάβης. Οι Zagrai και Giurgiutiu (2002) εξέτασαν δείκτες βλάβης βασισμένους σε στατιστικές μετρήσεις, όπως η τετραγωνική ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόκλισης, η μέση απόλυτη ποσοστιαία απόκλιση, η μεταβολή της συνδιακύμανσης και ο συντελεστής συσχέτισης της απόκλισης. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των δεικτών βλάβης είναι ο τρόπος που θα καθοριστούν τα κατάλληλα όρια εμπιστοσύνης και η στατιστική σταθερότητα που θα οδηγήσει στην απόφαση ότι υπάρχει ή όχι βλάβη σε μια κατασκευή.

Για την ποσοτικοποίηση της βλάβης στην παρούσα διατριβή αρχικά χρησιμοποιείται ο δείκτης απόκλισης μέσης τετραγωνικής τιμής (RMSD) ο οποίος είναι ποσοτικός και φαίνεται να μπορεί να δώσει μία αρχική ποσοτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Αυτός ο δείκτης βλάβης συγκρίνει δύο τουλάχιστον διαφορετικές αποκρίσεις (εκ των οποίων η μία αντιπροσωπεύει την αρχική) του συστήματος και ορίζει μια τιμή η οποία υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$\text{RMSD} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{[\text{Re}(Y_{i,1}) - \text{Re}(Y_{i,2})]^2}{[\text{Re}(Y_{i,1})]^2}}$$

Όπου n είναι ο αριθμός των σημείων i των αποκρίσεων σε μία περιοχή συχνότητων, $Y_{i,1}$ είναι η απόκριση της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος PZT που υπολογίζεται στην υγιή ή αρχική κατάσταση και $Y_{i,2}$ η απόκριση της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας του πιεζοηλεκτρικού PZT για την 'υπό διερεύνηση' κατάσταση καθώς συγκρίνεται με το σύστημα αναφοράς (αρχικό δοκίμιο) υπολογισμένο σε κάθε σημείο i του διαστήματος συχνότητων.

Ο δείκτης βλάβης RMSD βασίζεται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων η οποία ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγώνων των κατακόρυφων αποκλίσεων των σημείων των δεδομένων σε μία ευθεία ή κατ' επέκταση και σε

γενικότερες συναρτήσεις μη-γραμμικής μορφής όπως είναι οι αποκρίσεις της Η/Μ αγωγιμότητας. Όσο μεγαλύτερη η αριθμητική τιμή του RMSD τόσο μεγαλύτερη η διαφορά μεταξύ του αρχικού και του 'υπό διερεύνηση' υπολογισμού ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αγωγιμότητας, η οποία και υποδεικνύει ύπαρξη βλάβης στο δομικό σύστημα.

1.8 SELF HEALING STRUCTURES-SMA

1.8.1 Self healing structures

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά συστήματα ευφών υλικών και κατασκευών τα οποία όμως χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση αστοχιών με την κυρίως μέθοδο vibration based NDE. Μια νέα κατηγορία ευφών συστημάτων είναι τα self-healing structures. Αυτά τα συστήματα αντιδρούν όταν εμφανιστεί αστοχία και μέσα από ένα σύνολο αυτόματων ενεργειών έχουν την ικανότητα να επιδιορθώσουν την βλάβη. Έρευνα σχετική με αυτά τα ευφυή συστήματα πραγματοποιήθηκε από τον Siochi et al. (2002).

Ένα από τα πρώτα συστήματα ευφυής επιδιόρθωσης αστοχιών με την χρήση πολυμερών σύνθετων υλικών αναπτύχθηκε από τον White et al. (2001) στο Πανεπιστήμιο του Ιλινόις. Το πολυμερές που αναπτύχθηκε μπορεί να επιδιορθώσει αυτόματα ρωγμές και αστοχίες όταν εμφανίζονται στην κατασκευή. Συγκεκριμένα όταν εμφανίζεται μια ρωγμή το πολυμερές αυτό ενεργοποιεί τις ενσωματωμένες μικροκάψουλες οι οποίες απελευθερώνουν ένα συστατικό το οποίο απελευθερώνεται στην ρωγμή ενώ ένας καταλύτης από το σύνθετο υλικό το μετατρέπει σε στερεό πολυμερές. Οι έρευνες πάνω στην συγκεκριμένη μέθοδο δείχνουν ότι οι επιδιορθωμένες περιοχές εμφανίζουν αποκατάσταση στην σκληρότητα της τάξης του 75% και 20% αντίστοιχα στο όριο θραύσης.

Ένα παρόμοιο σύστημα αναπτύχθηκε από τους Zako and Takano (1999) το οποίο απαιτεί θερμότητα. Η θερμότητα αυτή παρέχεται από μια δέσμη laser η οποία θερμαίνει τοπικά την περιοχή της βλάβης για να λιώσουν οι εποξικοί παράγοντες και να επιδιορθωθεί η ρωγμή.

Ένα άλλο παράδειγμα εφαρμογής συστήματος αυτόματης επιδιόρθωσης αστοχιών είναι ένα υλικό το οποίο έχει την δυνατότητα να επιδιορθώνεται αυτόματα σε περίπτωση που σκιστεί και είναι κατάλληλο για να χρησιμοποιηθεί σε κατασκευές που απαιτείται ιδιαίτερα αυξημένη πίεση. Συγκεκριμένα το υλικό αυτό βρίσκεται εφαρμογή σε διαστημικές στολές και σε ειδικούς τεχνητούς δορυφόρους στους οποίους απαιτούνται ελαστικές δεξαμενές πεπιεσμένου αέρα. Ειδικότερα στο τομέα των διαστημικών στολών, οι σημερινές στολές σε περίπτωση που εμφανίσουν σκίσιμο μικρότερο των 4 χιλιοστών ο μέγιστος χρόνος στον οποίο ο αστροναύτης πρέπει να επιστρέψει με ασφάλεια στο διαστημικό σκάφος είναι 30 λεπτά. Η χρησιμοποίηση του προαναφερθέντος έξυπνου υλικού, το οποίο θα χρησιμοποιείται στις διαστημικές στολές και θα

μπαίνει ανάμεσα στις διάφορες στρώσεις από τις οποίες αποτελείται θα έχει την δυνατότητα να σφραγίζει αυτόματα σκισίματα που πιθανώς να εμφανίζονται. Ο στόχος των σημερινών ερευνών σε αυτό το υλικό εστιάζεται στην ελαχιστοποίηση του βάρους του και στην αύξηση της ελαστικότητας και της αντοχής του (Ware et al. 2001).

Άλλη μια χρήση έξυπνου υλικού είναι μια βαφή η οποία μπορεί να καλύπτει μεταλλικές κατασκευές. Ουσιαστικά αυτή η βαφή δεν στεγνώνει ποτέ και έχει την δυνατότητα να ρέει και να επικαλύπτει ξανά σημεία στα οποία μπορεί να φύγει, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο μια νέα επικάλυψη η οποία έχει την δυνατότητα να προστατεύει εκ νέου από την διάβρωση.

Η NASA κάνει έρευνες πάνω στην ανάπτυξη SMA υλικού το οποίο θα τοποθετείται στην έξοδο ή στον πυρήνα των κινητήρων έτσι ώστε να μειώνεται ο θόρυβος κατά την απογείωση. Το υλικό αυτό μετά την απογείωση θα έχει την ικανότητα να αλλάζει σχήμα έτσι ώστε να μην μειώνεται η απόδοση των κινητήρων μετά την απογείωση. Έτσι θα επιτευχθεί μείωση θορύβων κατά την απογείωση και διατήρηση της απόδοσης των κινητήρων μετά την απογείωση. Τα SMA που θα αναπτυχθούν θα πρέπει να αντέχουν σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες και πιέσεις.

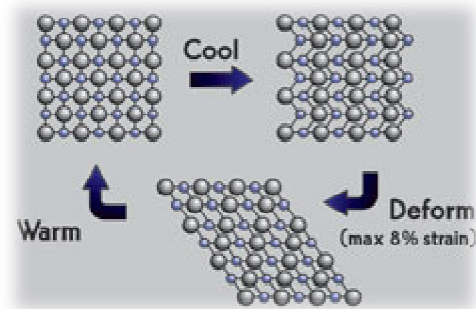


Μείωση θορύβου κινητήρα με τη χρήση SMA.

1.9 ΚΡΑΜΜΑΤΑ ΜΝΗΜΗΣ ΜΟΡΦΗΣ - SHAPE MEMORY ALLOY TECHNOLOGY (SMA)

Το φαινόμενο μνήμης μορφής (shape memory effect) είναι η ικανότητα συγκεκριμένων κραμάτων να αλλάζουν το σχήμα τους σε χαμηλές θερμοκρασίες και να μένουν στην ίδια κατάσταση μέχρι να θερμανθούν. Το εύρος ζώνης του ενεργοποιητή περιορίζεται από την ταχύτητα με την οποία μπορεί να ψυχθεί μεταξύ των θερμάνσεων. Υπάρχουν πολλά κράματα που εμφανίζουν αυτές τις ιδιότητες. Τα πιο κοινά είναι τα κράματα Νικέλιου-Τιτανίου (NiTi or Nitinol), Copper-Zinc-Aluminum and Copper-Aluminium-Nickel. Στις περισσότερες εφαρμογές SMA χρησιμοποιούμε κράμα Νικέλιου-Τιτανίου καθώς εμφανίζει την μεγαλύτερη ικανότητα να ανακτά το αρχικό του σχήμα, έχει εξαιρετική αντοχή στην διάβρωση, σταθερές θερμοκρασίες μετασχηματισμού και έχει την δυνατότητα ως μεταλλικό κράμα να θερμαίνεται ηλεκτρικά. Επιπλέον ανάλογα με το ποσοστό του Νικελίου στο κράμα η θερμοκρασία μετασχηματισμού του βρίσκεται κάτω από την θερμοκρασία των -100 C και πάνω από +100 C.

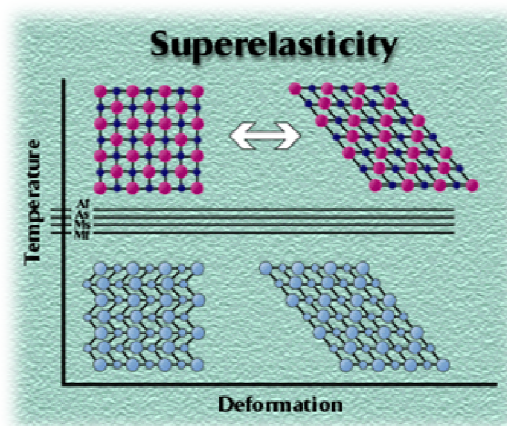
Το φαινόμενο μνήμης μορφής βασίζεται στην κίνηση των περιοχών των κρυστάλλων κάτω από την επίδραση εξωτερικού θερμικού πεδίου, όταν το υλικό βρίσκεται σε πλήρη μαρτενσιτική κατάσταση (complete martensite state). Όταν το SMA υπόκειται σε εξωτερική θέρμανση τα δίπολλα που είναι προσανατολισμένα σε παράλληλη ή σχεδόν παράλληλη κατεύθυνση σχετικά με την κατεύθυνση του πεδίου αυξάνονται σε βάρος των άλλων διπόλων, με αποτέλεσμα την αλλαγή του σχήματος του υλικού. Ο μετασχηματισμός πραγματοποιείται μεταξύ μιας πιο χαμηλής θερμοκρασίας φάσης μαρτενσίτη και μιας υψηλότερης θερμοκρασίας φάσης ωστενίτη. Η αύξηση της ακαμψίας μεταξύ των δύο φάσεων μπορεί να είναι τριπλάσια ή και πολλαπλάσια σε σχέση με τους άλλους ενεργοποιητές.



Στις περισσότερες περιπτώσεις τα SMA θα παραμείνουν στην μορφή που απέκτησαν μετά την θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό πρόκειται για το φαινόμενο μνήμης μορφής μιας κατεύθυνσης. Βέβαια, αν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε έναν ενεργοποιητή κράματος μνήμης μορφής, για να παρέχουμε την ίδια κίνηση διαδοχικά και επαναλαμβανόμενα, πρέπει να είναι

σχεδιασμένος με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχεται δύναμη η οποία θα του επιτρέπει να επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Επομένως εκτός από το φαινόμενο μνήμης μορφής μίας κατεύθυνσης, υπάρχουν και δύο λιγότερο συνηθισμένα φαινόμενα μνήμης μορφής, αυτά της διπλής κατεύθυνσης και το κυκλικό. Στο φαινόμενο μνήμης μορφής διπλής κατεύθυνσης όταν το SMA ψύχεται επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση χωρίς να χρειάζεται να εφαρμοστεί πάνω του επιπλέον δύναμη. Το κυκλικό φαινόμενο μνήμης μορφής είναι ίδιο με το φαινόμενο διπλής κατεύθυνσης με τη διαφορά ότι το σχήμα του SMA στην υψηλή και στην χαμηλή θερμοκρασία είναι ακριβώς αντίθετα μεταξύ τους με αποτέλεσμα μεγαλύτερη αλλαγή σχήματος.

Στην ουσία το πλεονέκτημα εφαρμογής του φαινομένου διπλής κατεύθυνσης και του κυκλικό φαινομένου είναι η ικανότητα τους όταν ψύχονται να επιστρέφουν στο αρχικό τους σχήμα κάτι το οποίο έχει μεγάλη εφαρμογή στη βιομηχανία ακόμα και σε συσκευές που χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητά μας (π.χ. θερμοστάτες). Το βασικό μειονέκτημα τους είναι ότι δεν είναι τόσο αξιόπιστα όπως τα SMA μίας κατεύθυνσης και η συνηθισμένη εφαρμογή τους είναι στην μείωση της αντίθετης δύναμης που χρειάζεται.

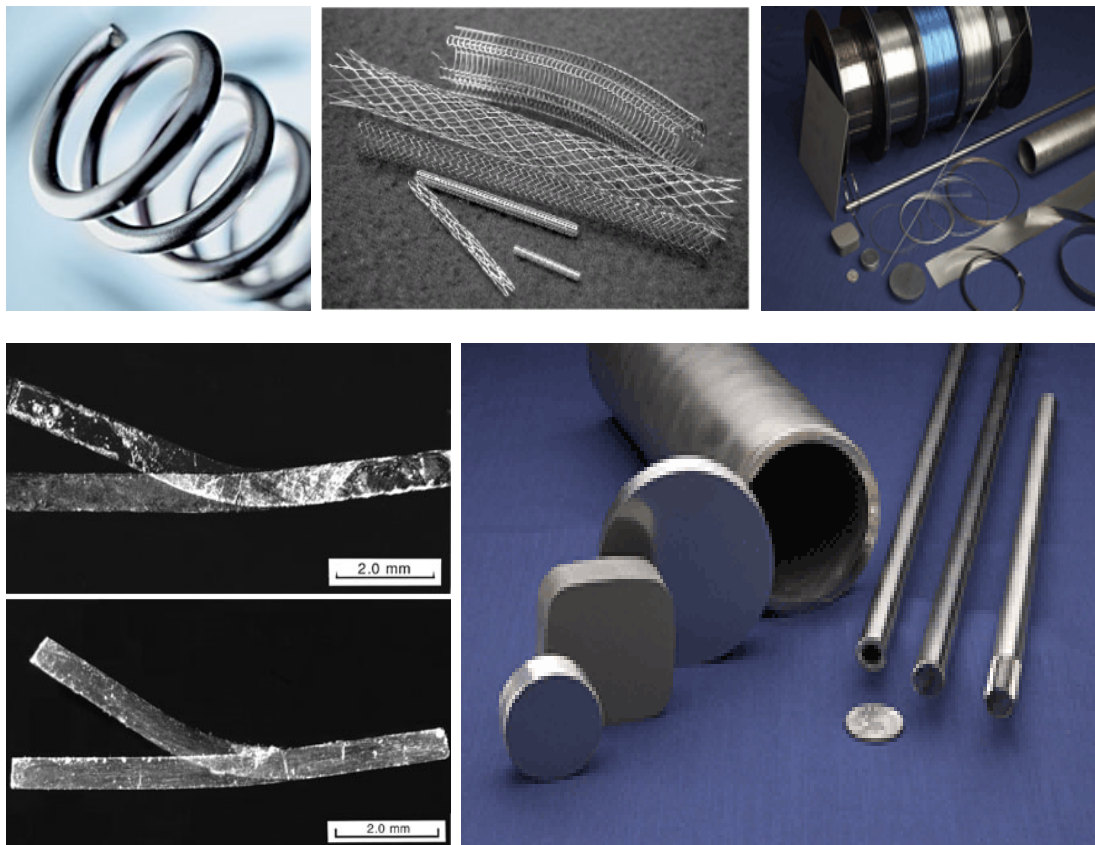


Μια ακόμα ιδιότητα των SMA είναι η υπερελαστικότητα. Το φαινόμενο της υπερελαστικότητας επιτρέπει μεγάλες αλλαγές στην κρυσταλλική δομή του κράματος της τάξεως του 5-10 % και είναι αποτέλεσμα των αλλαγών των τιμών M_s , M_f , A_s , A_f με το επίπεδο της φόρτισης. Οι τιμές αυξάνονται με την φόρτιση. Η κατάσταση ωστενίτη είναι η σταθερή φάση στη θερμοκρασία A_f χωρίς τη φόρτιση κάποιου φορτίου. Το υλικό επιστρέφει στη σταθερή του κατάσταση μόλις το φορτίο αποσυρθεί. Καθώς ψύχεται το υλικό, η ελαστικότητά του μειώνεται. Το NiTi εμφανίζει το φαινόμενο της υπερελαστικότητας σε θερμοκρασίες αρκετά υψηλότερες από τη A_f θερμοκρασία.

Πολλές εφαρμογές της τεχνολογίας των κραμάτων μνήμης μορφής αναπτύχθηκαν αξιοποιώντας και το φαινόμενο της μνήμης και την υπερελαστικότητα.

Συνήθως τα SMA δεν χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες, ωστόσο έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες που τα χρησιμοποιούν ως αισθητήρες με επιτυχή αποτελέσματα.

Υπάρχουν διάφορα κράματα μνήμης σε ποικίλες μορφές και διαμορφώσεις. Σχηματικά συναντιόνται ως καλώδια, κορδέλες, φύλλα και ελατήρια. Επίσης είναι δυνατός ο σχηματισμός δύο μορφών αντί ενός το οποίο καλείται επίδραση μνήμης μορφής διπλής κατεύθυνσης.



Φωτογραφίες από διάφορα κράματα μνήμης μορφής σε ποικίλες μορφές και σχήματα.

Τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάζουν οι ενεργοποιητές κραμάτων μνήμης μορφής είναι ότι περιλαμβάνουν χαμηλό εύρος ζώνης (bandwidth). Ο χρόνος αντίδρασης του ενεργοποιητή μπορεί να είναι ταχύς αλλά πρώτου να μπορέσει να δράσει εκ νέου θα πρέπει να ψυχθεί στην αρχική του μορφή. Ο χρόνος ψύξης μπορεί να μειωθεί ιδιαίτερα με συγκεκριμένες μεθόδους (π.χ. υδρόψυξη) οι οποίες όμως έχουν υψηλό κόστος και αντισταθμίζουν τα οφέλη.

Άλλα προβλήματα που παρουσιάζουν οι ενεργοποιητές SMA είναι η υστέρηση στην πορεία φόρτισης ώστε ο ενσωματωμένος ενεργοποιητής να μεταφέρει άμεσα την θερμότητα στην περιβάλλουσα δομή. Η υστέρηση είναι ένα πρόβλημα που περιορίζεται με την προσθήκη χαλκού στο κράμα. Επίσης σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το μέγεθος του ενσωματωμένου ενεργοποιητή και πρέπει να προσεχτεί ιδιαίτερα ώστε να μην δημιουργηθεί αλλοίωση στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Εν τέλει προσοχή πρέπει να δοθεί

και στην επιλογή της κατάλληλης θερμοκρασίας μετασχηματισμού έτσι ώστε η παραγόμενη θερμότητα να μην αλλοιώσει την δομή του υπό μέτρηση υλικού.

1.9.1 Εφαρμογές των κραμάτων μνήμης μορφής:

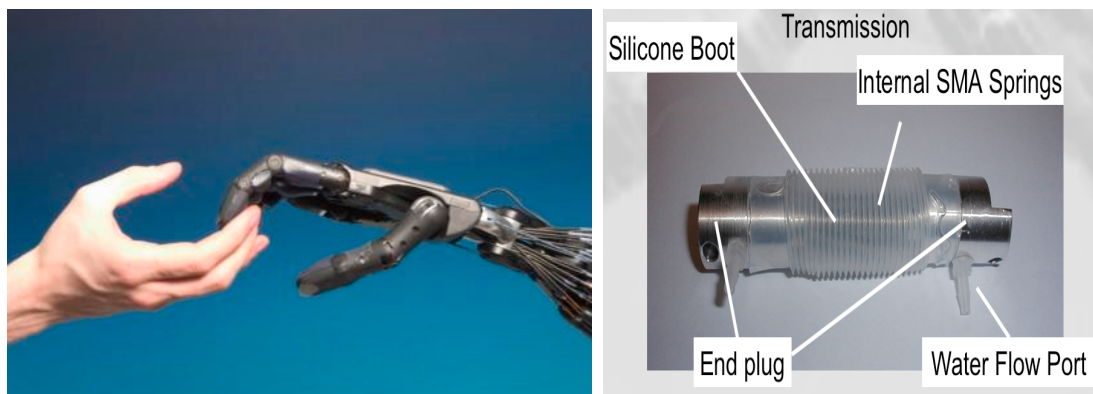
Τα κράματα με μνήμη σχήματος βρίσκουν πολλές χρήσεις στη βιομηχανία, οι οποίες επεκτείνονται από την ιατρική ως την τεχνολογία διαστήματος. Τα κράματα Ni-Ti έχουν επίσης εξαιρετική βιοσυμβατότητα και κατά την τελευταία δεκαετία βρίσκουν εφαρμογές ως βιοϋλικά στην ιατρική. Παράδειγμα αποτελούν οι μεταλλικές ενδοπροθέσεις (ενδαυτικοί νάρθηκες, Stent), που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις αρτηριοσκλήρωσης και σε μερικές περιπτώσεις ακολουθούν την αγγειοπλαστική με μπαλόνι. Επίσης τα SMA έχουν βρει χρήση και στον τομέα της ορθοδοντικής όπου βρίσκουν χρήση σε ορθοδοντικά υπερελαστικά σύρματα.

Τα SMA χρησιμοποιούνται και για την ανάπτυξη του εξοπλισμού δορυφόρων. Φύλλα και ράβδοι Ni-Ti συστρέφονται μέσα σε κωνικά και ελικοειδή ελατήρια και τοποθετούνται στο δορυφόρο. Αφού ο δορυφόρος εκτοξευτεί και πετύχει σταθερή τροχιά, η κεραία ζεσταίνεται χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτρικό θερμαστή ή το προσπίπτων φως του ηλίου και ξεδιπλώνεται στο διάστημα. Αυτή η τεχνική ερευνήθηκε από τη NASA ως μια μέθοδος, για την ανύψωση της παραβολικής κεραίας που χρησιμοποιείται στο φεγγάρι, αλλά το εγχείρημα δεν ολοκληρώθηκε [Funakubo, 1987].

Τα κράματα μνήμης σχήματος (SMA) αρχικά χρησιμοποιήθηκαν ως φαινόμενο μιας κατεύθυνσης και από τα πρώτα πρακτικά προϊόντα που δημιουργήθηκαν ήταν η σύζευξη σωλήνων (pipe coupling). Πάνω από εκατό χιλιάδες τέτοιες συζεύξεις χρησιμοποιούνται στο υδραυλικό σύστημα του μαχητικού αεροσκάφους F-14 [Funakubo, 1987]. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης συζεύξεων από στοιχεία SMA εκτός της μεγάλης αξιοπιστίας τους, είναι ότι δεν προκαλείται θερμική ζημιά του περιβάλλοντος υλικού, εξαιτίας του ότι δε χρειάζονται υψηλές θερμοκρασίες για τοπική συγκόλληση και ότι οι συζεύξεις μπορούν να αφαιρεθούν απλά με ψύξη. Αυτός ο τύπος σύζευξης έχει χρησιμοποιηθεί σε πολεμικά πλοία και ατομικά υποβρύχια, καθώς και στη διατήρηση και επισκευή σωλήνων (με διαμέτρους 150 mm) που βρίσκονται στο βυθό ωκεανών και μεταφέρουν πετρέλαιο από πετρελαιοπηγές.

Στη ρομποτική, ένα πρότυπο μικρορομπότ με πέντε βαθμούς ελευθερίας που ανταποκρίνεται στα ανθρώπινα δάκτυλα, καρπό, αγκώνα, ώμο και άλλα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σπείρες Ni-Ti που υπάρχουν στα δάκτυλα και στον καρπό ενεργοποιούν το λύγισμα, κλείσιμο και άνοιγμα, ενώ

συστολή και διαστολή με σύρματα Ni-Ti που είναι ίσα και δεν καμπυλώνουν, στους ώμους και στον αγκώνα. Η θέση και η ταχύτητα της λειτουργίας της διάταξης ελέγχεται με παλμούς που διέρχονται μέσα από όλα τα συστατικά [Funakubo, 1987].



Ρομπωτικό χέρι που χρησιμοποιεί ενσωματωμένες Ni-Ti σπείρες.

Τα κράματα μνήμης σχήματος τα συναντάμε και σε άλλες εφαρμογές όπως σε θερμικές μηχανές, μηχανές ανύψωσης, στα κλιματιστικά (airconditions), σε ηλεκτρικούς φούρνους και σε ψυκτικά συστήματα αυτοκινήτων.

Επίσης τα κράματα μνήμης σχήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς γεφυρών. Χρησιμοποιώντας SMA παρεμποδιστές μειώνεται η σχετική μετατόπιση μεταξύ των τμημάτων της γέφυρας. Έτσι δεν μετακινούνται από τους αρμούς και συνεπώς μειώνεται ο κίνδυνος κατάρρευσης της γέφυρας. Ακόμα μειώνεται η φθορά που προκαλείται κατά την τριβή των τμημάτων μεταξύ τους. Τέλος, η απορρόφηση των κραδασμών που παρέχουν επιτρέπει τη μείωση του αριθμού των ξεχωριστών τμημάτων σε μια πολυτμηματική γέφυρα και συνεπώς ελαττώνεται ο αριθμός των κολώνων που είναι αναγκαίες [Roches, 2001]

Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφέρουμε ότι τα SMA τα συναντάμε και σε αντικείμενα καθημερινής χρήσης, για παράδειγμα στο ρουχισμό, όπως στηθόδεσμοι, νυφικά, μεσοφόρια και παπούτσια που χρησιμοποιούν το φαινόμενο της υπερελαστικότητας για να διατηρούν το σχήμα τους και παράλληλα να είναι άνετα. Ακόμα, χρησιμοποιούνται σε σκελετούς γυαλιών οράσεως και ηλίου.



Διάφορες περιέργες εφαρμογές SMA.

Τέλος, εξαιτίας των εξαιρετικών ιδιοτήτων απόσβεσης των κραμάτων μνήμης σχήματος (SMA), χρησιμοποιούνται σε ρακέτες αντισφαίρισης και σε χιονοπέδιλα με ενσωματωμένες λωρίδες SMA, που όταν έρχονται σε επαφή με το χιόνι, μετασχηματίζονται σε μαρτενσίτη και βελτιώνουν την ικανότητα απόσβεσής τους. Επίσης, έχουν γίνει και δίχτυα από SMA που μοιάζουν με νάιλον όμως έχουν μεγαλύτερη αντοχή και ελαστικότητα [Tsoi, 2002].

1.9.2 Σύνθετα SMA

Το έντονο ενδιαφέρον για τη χρήση των κραμάτων μνήμης σχήματος ως συστατικά σύνθετων κατασκευών, έγκειται στο ότι τα SMA προσδίδουν στο σύνθετο καλύτερη μηχανική συμπεριφορά και έτσι μπορούν να δημιουργηθούν κατασκευές με αυξημένες λειτουργικές ιδιότητες. Η μετάβαση από την ωστενιτική στη μαρτενσιτική κατάσταση οδηγεί σε αύξηση της ικανότητας απόσβεσης δονήσεων και μείωση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού. Αν η διαφορά στο μέτρο ελαστικότητας της μήτρας και του σύρματος SMA είναι μεγάλη, τότε αλλάζει σημαντικά το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου. Έτσι μπορεί να κατασκευαστεί σύνθετο, του οποίου το μέτρο ελαστικότητας να αλλάζει επιλεκτικά. Τα SMA μπορούν να είναι θερμοευαίσθητα στοιχεία απόσβεσης, καθώς η ικανότητα απόσβεσης αυξάνει με το μαρτενσιτικό μετασχηματισμό [Duerig, 1990], [Gandhi, 1992].

Όταν σύρματα SMA ενσωματωθούν στο σύνθετο με μορφή προταυσιμένων συρμάτων και θερμανθούν, θα δημιουργηθούν θλιπτικές τάσεις καθώς η μήτρα θα παρεμποδίζει τα σύρματα να ανακτήσουν το αρχικό τους μήκος. Αρχικά η ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων δρα ανασταλτικά στη διάδοση ρωγμών και μικρό-κενών στο υλικό, αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής του, ενώ σε μερικές περιπτώσεις μπορεί ακόμα και να επιτύχει «αυτό-επισκευή» ενός εξαρτήματος που υπέστη βλάβη μετά από κρούση. Παράλληλα, μπορεί να βελτιώσει τοπικά και τις μηχανικές του ιδιότητες.

Έχει αποδειχτεί ότι η ενσωμάτωση ινών SMA σε μεταλλικές δομές βελτιώνει τη μηχανική τους συμπεριφορά. Με δέσμες laser κάνουμε οπές στη μεταλλική μήτρα και τοποθετούμε σε αυτές τις ίνες SMA, οπότε το προκύπτον σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας, έχει βελτιωμένες ιδιότητες απόσβεσης, βελτιωμένη αντοχή διαρροής και δυσκαμψία [Taya, 1991]. Επιπρόσθετα, η αλλαγή των ιδιοσυχνοτήτων δόνησης ενός υλικού μπορεί να οδηγήσει σε ελεγχόμενη αλλαγή του τρόπου δόνησής του [Schrooten, 2002].

Για παράδειγμα, είναι δυνατή η κατασκευή μιας προπέλας που να εκπέμπει κάθε φορά διαφορετικό θόρυβο, με αποτέλεσμα να αναγνωρίζεται το σκάφος που τη χρησιμοποιεί [Gandhi, 1992]. Η ανάπτυξη θλιπτικών τάσεων μπορεί να οδηγήσει και σε αλλαγή του σχήματος όλου του συνθέτου, οπότε μπορούν να δημιουργηθούν σύνθετα που να αλλάζουν το σχήμα τους ελεγχόμενα [Psarras, 2001], [Schrooten, 2002]. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να κατασκευαστεί ένα φτερό αεροπλάνου, του οποίου το σχήμα να μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες πτήσης του αεροσκάφους. Ή ακόμα να κατασκευαστεί ένα κάτοπτρο που να αλλάζει σχήμα, άρα και εστιακή απόσταση κατά βούληση [Μπόλλας, 2002], [Beauchamp, 1992].

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

Φασματική πυκνότητα

Ένας τρόπος για να εξετάσουμε ένα σήμα είναι να το εξετάσουμε στο διακριτό πεδίο του χρόνου, το οποίο θέτει μια σειρά αξιών διαδοχικά στο χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για το σήμα σε κάθε χρονική στιγμή και να μπορούμε να κάνουμε κάποιες υποθέσεις για τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του. Ωστόσο είναι μάλλον δύσκολο να κρίνουμε τη βραχυπρόθεσμη συμπεριφορά η οποία σχετίζεται με τη βραχυπρόθεσμη ανάπτυξη του σήματος. Ένας άλλος τρόπος να δούμε και να μελετήσουμε το σήμα είναι μέσα από την φασματική πυκνότητα, δηλαδή τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier του σήματος. Με τον μετασχηματισμός Fourier βλέπουμε το σήμα ως προς το σύνολο του. Αλλάζουμε δηλαδή τη διάσταση του χρόνου με τη διάσταση της συχνότητας. Μπορούμε να θεωρήσουμε τον μετασχηματισμό Fourier ως ένα συνδυασμό από αργές και γρήγορες ταλαντώσεις με διαφορετική ένταση. Μια πολύ υψηλή και μια αργή συνιστώσα στο πεδίο της συχνότητας σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των μεγάλων κομματιών του σήματος στο πεδίο του χρόνου. Επομένως αν το σήμα μας $f(t)$ παίρνει τιμές σε κάθε στιγμή του χρόνου τότε ο μετασχηματισμός του Fourier $F(\omega)$ μας δείχνει τη δύναμη της κάθε ταλάντωσης στο πεδίο των συχνοτήτων για το συγκεκριμένο πεδίο χρόνου. Αυτά τα δύο σήματα συνδέονται μεταξύ τους με τον ακόλουθο τύπο:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt.$$

Κάποιος μπορεί να σκεφτεί την ανάπτυξη του σήματος στο χρόνο σαν να ακούει μια μελωδία ενώ τη φασματική πυκνότητα μπορεί να τη θεωρήσει σαν να ακούει μια χορδή.

Στον μετασχηματισμό του Fourier οι ταλαντώσεις χαρακτηρίζονται με ημιτονοειδής συναρτήσεις. Η μέση τιμή της οποιαδήποτε λείας ταλάντωσης, γρήγορης ή αργής, ισχυρής ή αδύναμης, είναι μηδέν. Αμα χρησιμοποιήσουμε την τετράγωνο των αξιών στο χρόνο μπορούμε να μελετήσουμε τη δύναμη αυτών των ταλαντώσεων με τον ίδιο τρόπο που μελετούμε το αυθεντικό

σήμα. Η θεωρία του Parseval για σήματα ενέργειας αναφέρει ότι:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega$$

Η ανάλυση με τη μέθοδο μετασχηματισμού Fourier θεωρεί τα χρονικά πλαίσια της ζωής του σήματος από το μείον άπειρο έως το συν άπειρο. Για τον λόγο αυτό όταν η ανάλυση γίνεται για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα θεωρούμε είτε ότι το σήμα είναι περιοδικό είτε ότι έχει ένα πεπερασμένο ποσό ενέργειας. Θεωρητικά ένα σωστό φάσμα ισχύος ενός σήματος πρέπει να εξετάσει το σήμα από το συν άπειρο έως το μείον άπειρο. Ωστόσο, δεν είμαστε πάντα σε θέση να παρατηρήσουμε ένα σήμα με αυτό τον τρόπο ή να αντλήσουμε ακριβείς λειτουργίες για αυτό. Μπορούμε να ορίσουμε ποιος είναι ο μετασχηματισμός Fourier του σήματος σε περίοδο T και να ορίσουμε το φάσμα ισχύος ως εξής:

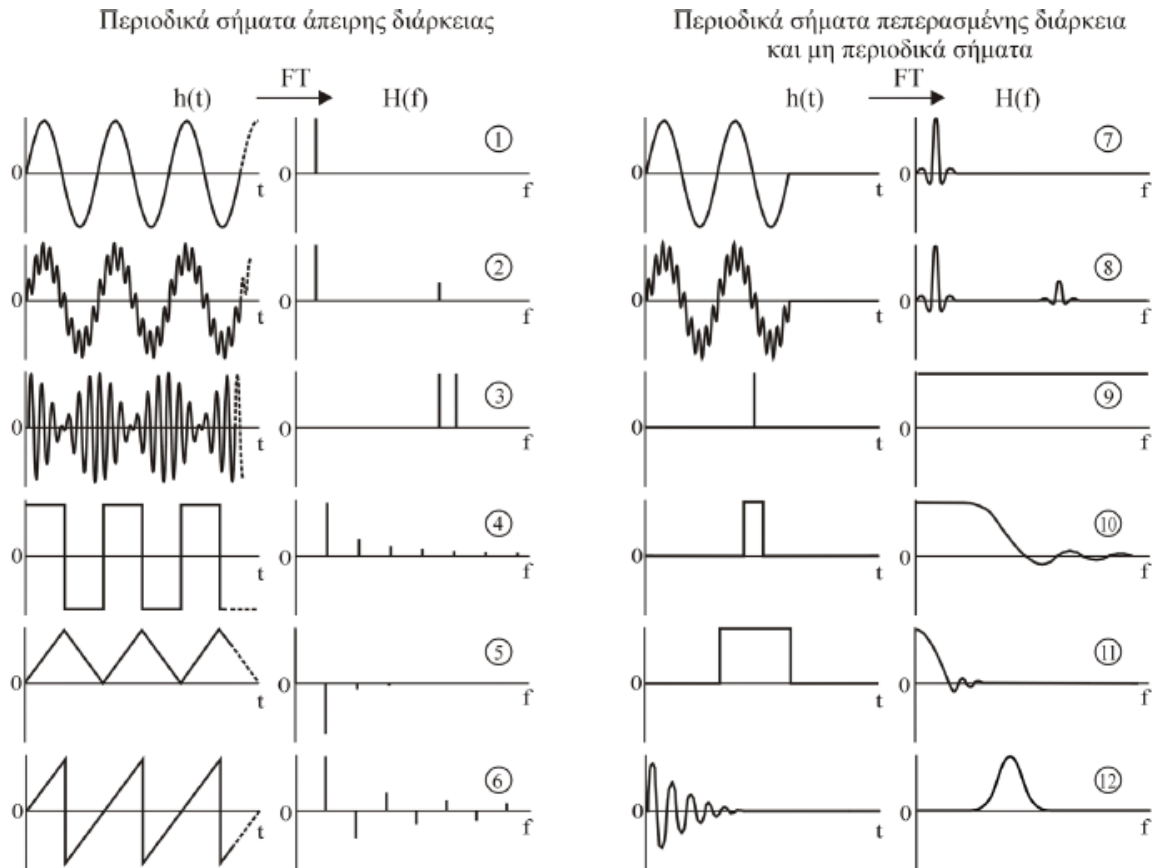
$$S_f(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |F_T(\omega)|^2$$

Το ίδιο το φάσμα ισχύος προκύπτει από τον μετασχηματισμό Fourier της αυτοσυσχέτισης.

$$\langle f(t)f(t+\tau) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S_f(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Το **φάσμα πυκνότητας πλάτους** (amplitude density spectrum), ή απλά φάσμα πλάτους, αντιπροσωπεύει τη γραφική παράσταση της πυκνότητας πλάτους (π.χ. σε μονάδες Volt/Hz) ως προς τη συχνότητα (σε μονάδες Hz).

Τυπικά παραδείγματα ζευγών συναρτήσεων $h(t)$ και $H(f)$ σημάτων που ανήκουν και στις δύο κατηγορίες δείχνονται στο παρακάτω σχήμα .



Τυπικά παραδείγματα μετασχηματισμού Fourier (FT) σημάτων διαφόρων μορφών.

Χαρακτηριστική είναι η διαφορά των φασμάτων των σημάτων της πρώτης κατηγορίας, όπου οι επιμέρους συνιστώσες συχνότητες διακρίνονται μεταξύ τους (γραμμωτά φάσματα), ενώ τα φάσματα των σημάτων της δεύτερης (γενικότερης) κατηγορίας δεν περιέχουν διακριτές συχνότητες, αλλά ζώνες συχνοτήτων (ταινιωτά φάσματα). Τα ζεύγη συναρτήσεων 1, 2 και 3 αποτελούν περιπτώσεις καθαρού ημιτονικού σήματος και σύνθεσης δύο ημιτονικών σημάτων με απέχουσες και παραπλήσιες συχνότητες. Τα ζεύγη συναρτήσεων 4, 5 και 6 αφορούν σε μη ημιτονικά περιοδικά σήματα και τα φάσματά τους περιέχουν απειρία γραμμών σε αντίθεση με τα προηγούμενα. Είναι χαρακτηριστική η παρουσία της συνεχούς συνιστώσας ($f = 0$) στην περίπτωση του τριγωνικού σήματος και η παρουσία θετικών και αρνητικών τιμών $H(f)$.

Η διεύρυνση των φασματικών γραμμών και η εμφάνιση δορυφορικών λοβών εναλλασσόμενου πρόσημου, είναι χαρακτηριστική στα φάσματα ημιτονικών σημάτων πεπερασμένης διάρκειας (ζεύγη 7 και 8). Εάν το σήμα είναι ένας παλμός απειροστά μικρής διάρκειας (ζεύγος 9), τότε το αντίστοιχο φάσμα είναι λευκό (white spectrum). Επομένως, για να διέλθει ένα τέτοιο σήμα μέσω μιας μονάδας χωρίς καμιά παραμόρφωση, η μονάδα θα έπρεπε να διαθέτει άπειρο εύρος ζώνης διέλευσης συχνοτήτων. Όσο ο παλμός διευρύνεται χρονικά (ζεύγη 10 και 11), τόσο το περιεχόμενό του σε υψηλές συχνότητες μειώνεται και το

φάσμα συχνοτήτων τείνει να “συρρικνωθεί” προς την περιοχή της μηδενικής συχνότητας, αφού το σήμα τείνει να γίνει συνεχές.

Αποδεικνύεται ότι το φασματικό εύρος Δf που καταλαμβάνουν οι συνιστώσες ενός παλμικού σήματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της χρονικής διάρκειας του παλμού.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση ημιτονικού σήματος που αποσβήνεται εκθετικά (ζεύγος 12). Το φάσμα συχνοτήτων του σήματος αυτού αποδίδεται από μια κορυφή Lorentz. Οι κορυφές Lorentz και οι παρόμοιες με αυτές κορυφές Gauss, αποτελούν (κατά προσέγγιση) τα στοιχειώδη συστατικά κάθε ηλεκτρονιακού ή μοριακού φάσματος.

Το **φάσμα πυκνότητας ισχύος** (power density spectrum), ή απλά φάσμα ισχύος, είναι η γραφική παράσταση της πυκνότητας ισχύος (π.χ. σε μονάδες Watt/Hz) ως προς τη συχνότητα (σε μονάδες Hz) και αποδίδει τη διασπορά της ενέργειας ενός σήματος σε διάφορες συχνότητες. Επειδή η ισχύς είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους του σήματος, τα φάσματα ισχύος δεν περιέχουν αρνητικές κορυφές, όπως τα φάσματα πλάτους(4) και στην ουσία αποτελούν τη γραφική παράσταση $[H(f)]^2 \cdot f$.

Θόρυβος περιβάλλοντος

Ο **θόρυβος περιβάλλοντος** (environmental noise) ή **θόρυβος παρεμβολής** (interference noise) αποτελεί τυπική περίπτωση εξωγενούς, μη θεμελιώδους θορύβου και κατά κανόνα ανθρωπογενούς προέλευσης. Είναι γνωστό ότι η επιτάχυνση φορέων ηλεκτρικού φορτίου (π.χ. ηλεκτρονίων) έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Έτσι, π.χ., στις γραμμές ηλεκτρικής τροφοδοσίας, που περιβάλλουν κάθε χώρο διαβίωσης και εργασίας, ηλεκτρικά φορτία υπόκεινται σε αρμονικές ταλαντώσεις 50 Hz (συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου). Οι γραμμές αυτές δρουν ως κεραίες εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας 50 Hz. Η ακτινοβολία αυτή “συλλαμβάνεται” επαγωγικά από κάθε αθωράκιστο αγωγό, ο οποίος δρα ως κεραία λήψης. Ο θόρυβος των 50 Hz συνοδεύεται και από τις αρμονικές συχνότητες 100, 150, 200 Hz κ.ο.κ. με συνεχώς μειούμενο πλάτος. Ηλεκτρικές εκκενώσεις (π.χ. ατμοσφαιρικά φαινόμενα, σπινθηριστές μηχανών εσωτερικής καύσης) προκαλούν την εμφάνιση παροδικού θορύβου σε ευρύτατο πλάτος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Σε υψηλότερες συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, εμφανίζονται θόρυβοι στην περιοχή ραδιοφωνικών συχνοτήτων και των μικροκυμάτων, που οφείλονται σε πομπούς ραδιοφωνίας και τηλεόρασης, σε συσκευές διαθερμίας και μικροκυμάτων, στην κινητή τηλεφωνία, ραντάρ κ.λπ. Οι θόρυβοι περιβάλλοντος, που εμφανίζονται σε περιοχές συχνοτήτων μεγαλύτερες από 100 kHz, δεν αποτελούν ιδιαίτερο πρόβλημα στη χημική οργανολογία, δεδομένου του γεγονότος ότι δεν

αντιμετωπίζεται η μέτρηση ποσοτήτων με συνιστώσες συχνοτήτων στην περιοχή αυτή με εξαίρεση τις φασματοσκοπίες NMR και ESR.

Οι θόρυβοι περιβάλλοντος αντιμετωπίζονται με διάφορες τεχνικές υλισμικού, (hardware), όπως με σχολαστική θωράκιση των ευαίσθητων μονάδων, χρησιμοποίηση φίλτρων αποκοπής ζώνης συχνοτήτων ή με “μεταφορά” της πληροφορίας σε σχετικά “ήσυχες” περιοχές συχνοτήτων.

2.0 ΠΡΩΤΟ ΣΚΕΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

2.0.1 Σκοπός πειράματος

Ο σκοπός αυτού του πειράματος είναι να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα των τεχνικών εξαναγκασμένης ταλάντωσης για την ανίχνευση αλλαγών στην ροπή σύσφιξης κοχλιωτών συνδέσεων και σε επόμενο στάδιο η αυτόματη επαναφορά σε κατάλληλες ροπές με την χρήση ευφυών συστημάτων. Επιπλέον στο πείραμα αυτό χρησιμοποιήθηκαν πιεζοηλεκτρικά υλικά μικρά σε κόστος και μέγεθος με σκοπό να αποδειχθεί ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον έλεγχο δομικής ακεραιότητας κατασκευών που φέρουν κοχλιωτές συνδέσεις με αποτέλεσμα την διαρκή παρακολούθηση της «υγείας» τους με σχετικά μικρό κόστος αλλά και την ευκολία της εφαρμογής των συστημάτων αυτών καθώς το πολύ μικρό μέγεθος των αισθητήρων-διεγερτών αλλά και η σχετικά απλή διαδικασία ενσωμάτωσης τους στην κατασκευή μπορεί να απλοποιήσει την διαδικασία αλλά και τον χρόνο εγκατάστασης των συστημάτων αυτών σε μια κατασκευή.

2.0.2 Περιγραφή πειράματος

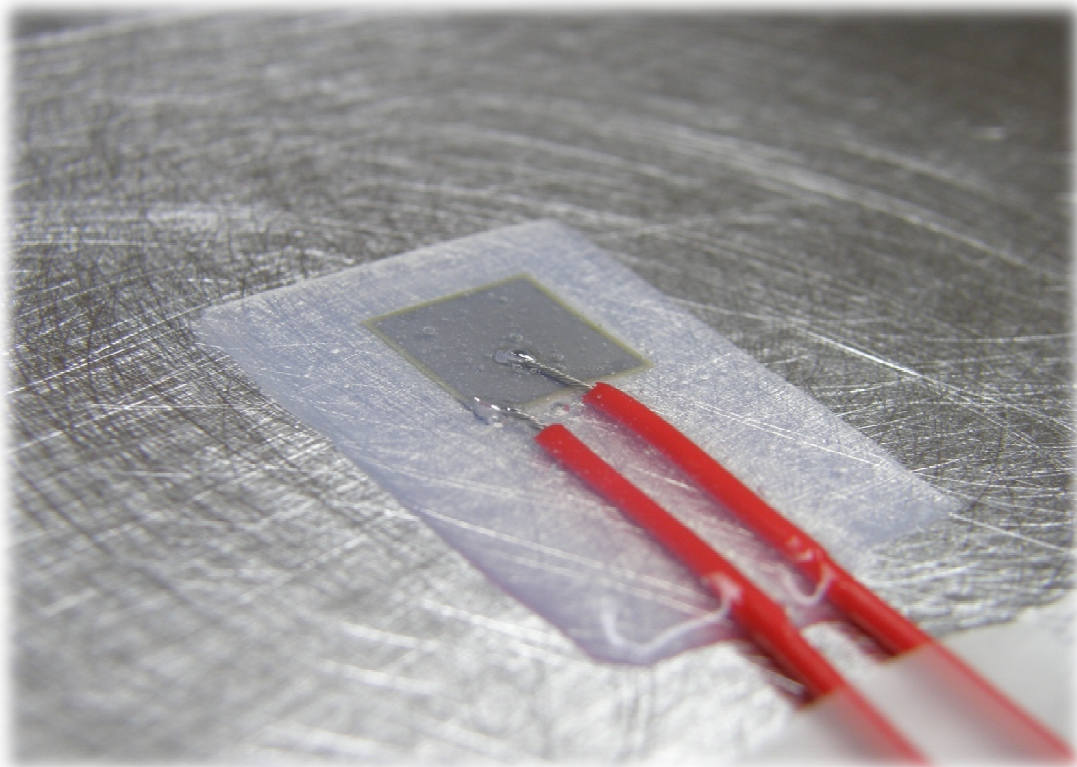
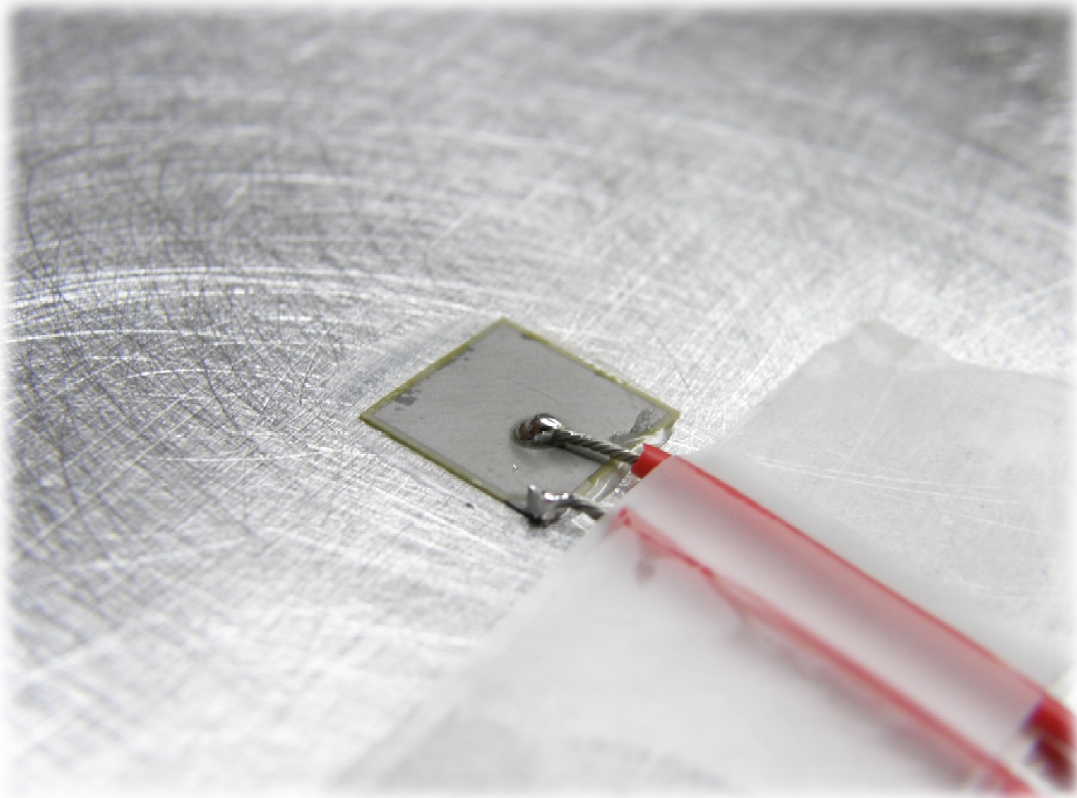
Αρχικά για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε μια μεταλλική πλάκα αλουμινίου μάρκας και τύπου Fortal HR IS 5400 T651 σχήματος ορθογωνίου με διαστάσεις 88,5 cm πλάτος, 26 cm μήκος και 1 cm πάχος, στην οποία ανοίχτηκε μια οπή διαμέτρου 1,6 cm.

Το λογισμικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα είναι το υποπρόγραμμα Signal Express του LabView. Η acquisition card που χρησιμοποιήθηκε είναι η National Instruments NI USB-625.

Ως πρώτο κομμάτι του πειράματος μας η αλουμινένια πλάκα πακτώθηκε στο ένα άκρο της και προσκολλήθηκε σε αυτή επιταχυνσιόμετρο PCB Piezotronics shear accelerometer model 252A78 sensitivity 963 mv/g ώστε να ελέγξουμε τον τρόπο απόκρισης της πλάκας και το σήμα που λαμβάνουμε ανάλογα με την ταλάντωση που εφαρμόζεται, αλλά και των δυνατοτήτων των εφαρμογών του προγράμματος. Αφού χρησιμοποιήσαμε το επιταχυνσιόμετρο ως αισθητήρα και φτιάξαμε ένα απλό πρόγραμμα στο SignalExpress για να λαμβάνουμε την απόκριση της κατασκευής σε ζωντανό χρόνο διαπιστώσαμε ότι οποιαδήποτε αλλαγή στην πλάκα και εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων σε αυτή με την μορφή χτυπήματος μπορούν να φανούν αμέσως στην απόκριση της κατασκευής. Αφού διαπιστώσαμε την αρμονική λειτουργία του προγράμματος SignalExpress και αφού υπήρξε η απαραίτητη εξοικείωση με το πρόγραμμα προχωρήσαμε στο επόμενο στάδιο που αναφέρουμε παρακάτω.

Στην συνέχεια στο αλουμινένιο πάνελ προσκολλήθηκαν με την χρήση εποξειδικής κόλλας δυο στοιχείων δυο πιεζοηλεκτρικά υλικά συμμετρικά στα δυο άκρα της πλάκας. Τα pzt που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα PI platte PIC 151 με διαστάσεις 1.0x1.0x0,2.

Μετά την κόλληση τους και αφού πέρασε χρονικό διάστημα 4-5 ώρες ώστε να στεγνώσει η κόλλα, συγκολλήθηκαν καλώδια στου δυο πόλους του κάθε πιεζοηλεκτρικού όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Στην συνέχεια η πάνω ελεύθερη επιφάνεια του pzt καλύφθηκε με ένα στρώμα της ίδιας εποξειδικής κόλλας δυο στοιχείων με σκοπό την προστασία του πιεζοηλεκτρικού υλικού από την διάβρωση, την στεγανοποίηση του αλλά και την

προστασία της ευαίσθητης συγκόλλησης μεταξύ καλωδίων και των πόλων του πιεζοηλεκτρικού, αλλά και την συγκράτηση των καλωδίων. Τα PZT επιχειρήθηκε να καλυφθούν με εποξεική ρητίνη αλλά διαπιστώθηκε ότι η χρησιμοποίηση κόλλας ενδείκνυται γιατί τα προστατεύει καλύτερα από τις εξωτερικές συνθήκες.

Στο επόμενο βήμα τα pzt συνδέθηκαν με την κάρτα ώστε να διαπιστωθεί σε πρώτο στάδιο εάν λειτουργούν και στην συνέχεια εάν έχουν την ικανότητα να στέλνουν και να λαμβάνουν αντίστοιχα σήματα. Συγκεκριμένα ελέγχθηκαν τα pzt με το ίδιο πρόγραμμα του SignalExpress που δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκε για τα επιταχυνσιόμετρα. Διαπιστώθηκε ότι τα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να ανιχνεύουν την απόκριση της κατασκευής αλλά και να εμφανίζουν στην απόκριση σε ζωντανό χρόνο τις αλλαγές που συμβαίνουν στην κατασκευή με παρόμοιο τρόπο όπως και τα καλιμπραρισμένα επιταχυνσιόμετρα που χρησιμοποιήσαμε προηγουμένως. Επιπλέον συνδέσαμε και τα δύο έξυπνα πιεζοηλεκτρικά στις θύρες εισόδου της κάρτας NI USB-6251 και παρατηρήθηκε ότι τα pzt έχουν κοινές <<αντιδράσεις>> όταν εφαρμόζουμε εξωτερική δύναμεις στην κατασκευή.

Στο επόμενο στάδιο το ένα pzt χρησιμοποιήθηκε ως διεγέρτης στέλνοντας ένα μηχανικό κύμα στην πλάκα και το δεύτερο pzt χρησιμοποιήθηκε ως αισθητήρας ικανός να λαμβάνει το σήμα του διεγέρτη. Συγκεκριμένα το ένα έξυπνο υλικό συνδέθηκε στην θύρα εξόδου της Data acquisition Card της National Instruments και το άλλο στην θύρα εισόδου. Δημιουργήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα στο SignalExpress το οποίο στέλνει στο ένα pzt εναλλασσόμενο ρεύμα κάποιας τάσης και ανιχνεύει το μηχανικό αυτό κύμα όπως προσπίπτει στο άλλο pzt περνώντας από την κατασκευή. Αρχικά σε αυτό το στάδιο στείλαμε εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής τάσης περίπου 2 – 5 Volts στον διεγέρτη.

Στο σημείο αυτό διαπιστώθηκε ότι τυχόν ανάλογα με το πόσο ισχυρά και καλά είναι κολλημένα τα πιεζοηλεκτρικά στην επιφάνεια του αλουμινίου το κάθε pzt έχει μεγαλύτερη ή μικρότερη ευαισθησία. Επίσης διαπιστώθηκε ότι η ευαισθησία του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα το καθιστά ικανό να λαμβάνει και σήματα από εξωτερικούς παράγοντες, τα οποία είναι ο θόρυβος που εισέρχεται στο σύστημα από το περιβάλλον, όπως αναφέρεται αναλυτικά στην αρχή του κεφαλαίου. Αυτόν τον θόρυβο που εισέρχεται στο σύστημα αφού τον διαπιστώσαμε αντιληφθήκαμε και την ανάγκη να τον απομονώσουμε στην συνέχεια του πειράματος για να οδηγηθούμε σε σωστότερα αποτελέσματα.

Καταλαβαίνουμε ότι με την χρήση του λογισμικού και των πιεζοηλεκτρικών υλικών είμαστε ικανοί να παρακολουθούμε διαρκώς την δυναμική απόκριση της

κατασκευής και τις αλλαγές στην απόκριση κάτω από διάφορες επιδράσεις (αλλαγή στήριξης, εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων κτλ.). Επομένως το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ευφύες σύστημα για την διαρκή παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής.

Στο επόμενο στάδιο χρησιμοποιήσαμε μια μικρότερη πλάκα διαστάσεων 62 cm μήκος και 13,5 cm πλάτος ίδιου υλικού με την αρχική, στην οποία ανοίξαμε μια οπή ίδιας διαμέτρου με αυτή της άλλης πλάκας και στην οποία κολλήθηκαν με την ίδια διαδικασία δυο πιεζοηλεκτρικά υλικά, το ένα κοντά στο σημείο της οπής και το άλλο κοντά στο ελεύθερο άκρο της πλάκας.

Στην συνέχεια οι δύο πλάκες βιδώθηκαν μεταξύ τους με μια κοχλιωτή σύνδεση σε σχήμα T όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:

Χρησιμοποιήθηκε βίδα με παξιμάδι διαμέτρου 1 ίντσας και δύο μεταλλικές ροδέλες όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



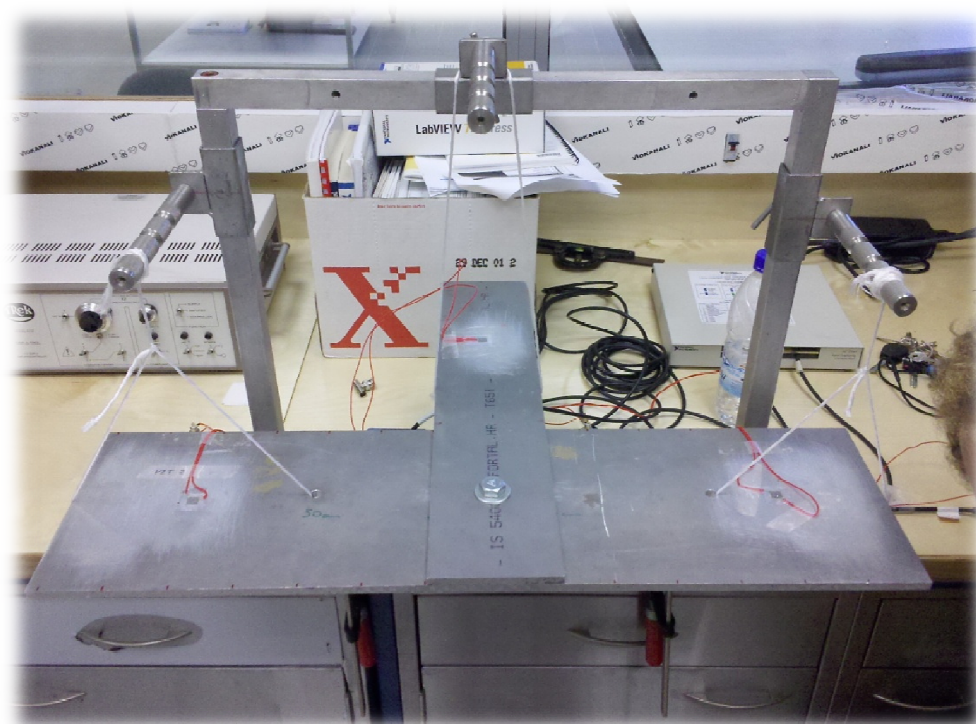
οχλιοσύνδεση πειράματος

Ο σκοπός αυτή την ενέργειας ήταν να ελέγξουμε την απόκριση της κατασκευής λαμβάνοντας σήματα από τους αισθητήρες και αυτής της πλάκας ώστε να έχουμε εικόνα και από τα δύο τμήματα της κατασκευής που ενώνονται μεταξύ τους με ένα κοχλία και να μπορέσουμε αν κάνουμε παρατηρήσεις για την

μετάδοση του μηχανικού κύμα διαμέσου του σημείου διεπαφής των πλακών αλλά και της κοχλιοσύνδεσης.

Επιπλέον πάνω στην μεγάλη αλουμινένια πλάκα και κοντά στο σημείο επαφής των δύο πλακών κολλήθηκε ένα ακόμα πιεζοηλεκτρικό υλικό.

Για να απομονωθεί σε ένα βαθμό από τον εξωτερικό θόρυβο όπως για παράδειγμα δονήσεις από την ανθρώπινη δραστηριότητα αλλά και από την λειτουργία των υπολογιστικών συστημάτων η κατασκευή αυτή αιωρήθηκε σε ένα μεταλλικό πλαίσιο όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Για την σύσφιξη της βίδας για τιμές από 0-100Nm χρησιμοποιήθηκαν δύο ροπόκλειδα, τα Beta Nm 8/60 και Beta Nm 40/200.

Αφού διαπιστώθηκε η σωστή λειτουργία όλων των πιεζοηλεκτρικών υλικών και αφού τα συνδέσαμε όλα στην κάρτα DAQmx προχωρήσαμε σε πειράματα ώστε να διαπιστώσουμε τρόπους να ελέγχουμε την κατάσταση της κοχλιοσύνδεσης δηλαδή την ένταση σύσφιξης/προέντασης της βίδας μέσα από τα αποτελέσματα που παίρνουμε από το ευφύες σύστημα(ενεργοποιητής-αισθητήρες).

Στα πειράματα μας, για να διαπιστώνουμε τις διάφορες καταστάσεις σύσφιξης της βίδας, θα ελέγχουμε τη φασματική πυκνότητα (Power Spectrum) του σήματος που λαμβάνουν οι αισθητήρες. Συγκεκριμένα θα βρούμε τη σχέση μεταξύ φασματικής πυκνότητας και ροπής σύσφιξης της βίδας, δηλαδή το πώς επηρεάζεται το φάσμα της κατασκευής για διάφορες τιμές ροπής της βίδας. Το

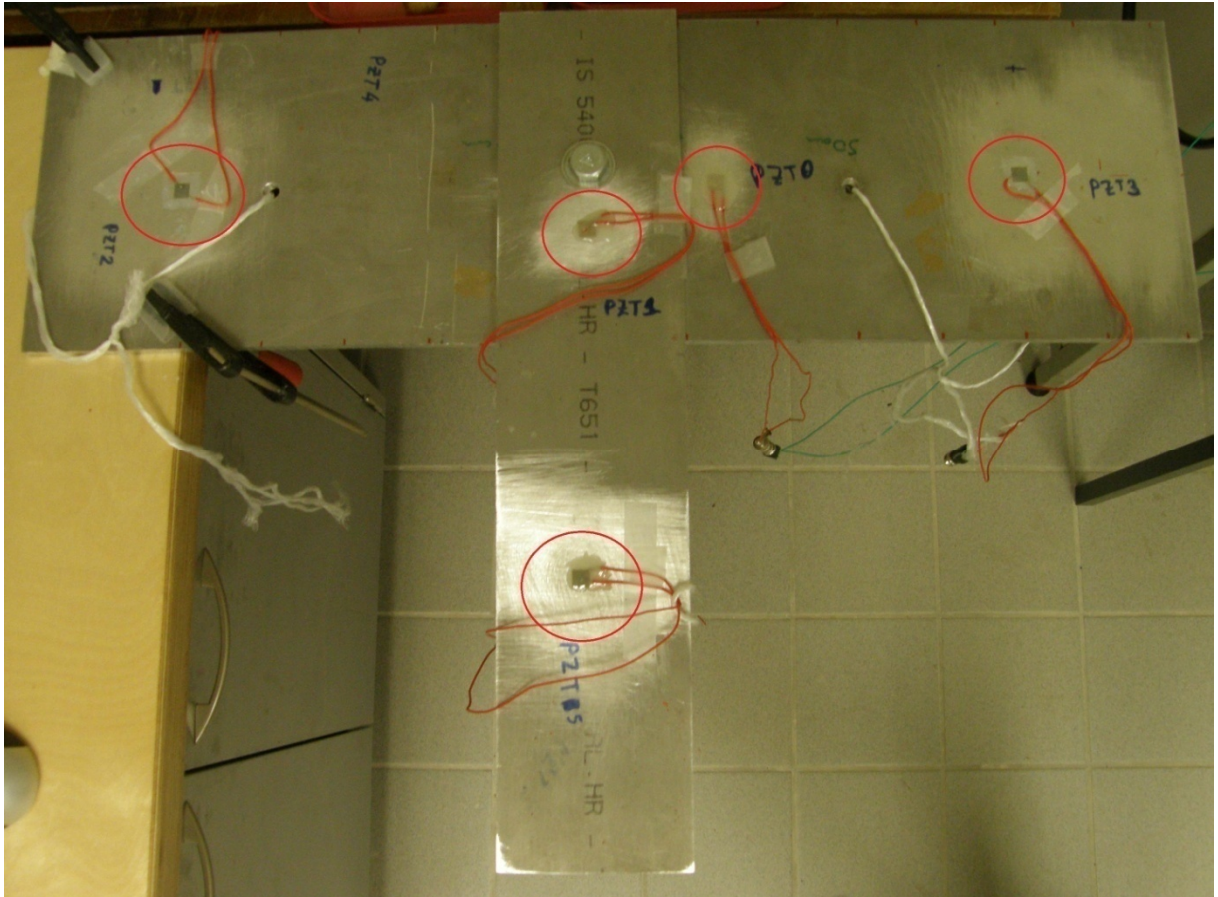
στατιστικό μέγεθος που θα χρησιμοποιήσουμε για να ποσοτικοποιήσουμε τις αλλαγές στη φασματική πυκνότητα είναι το Root Mean Square Deviation (RMSD).

Μετά από πειραματική έρευνα αφού ελέγχθηκε ο βαθμός αλλαγής της φασματικής πυκνότητας για διάφορες τιμές ροπής της βίδας σε φάσμα συχνοτήτων μέχρι 50 KHz διαπιστώθηκε οι μεγαλύτερες αλλαγές στο φάσμα πυκνότητας της παρουσιάζονται σε χαμηλές συχνότητες μέχρι 2KHz.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στο SignalExpress δοκιμάστηκε πλήθος διαφορετικών τρόπων αποστολής και ανίχνευσης σήματος. Συγκεκριμένα ελέγξαμε το φάσμα πυκνότητας στέλνοντας στον διεγέρτη διαφορετικής μορφής εναλλασσόμενο ρεύμα (Sawtooth, Multitone, noise, multi-tone) αλλά και διαφορετικών συχνοτήτων. Επίσης προγραμματίζοντας τους αισθητήρες δοκιμάσαμε ανίχνευση σήματος σε διαφορετικές συχνότητες και για διάφορες μεγέθη δειγματοληψίας. Επιπλέον το SignalExpress δίνει την δυνατότητα χρησιμοποίησης πλήθους διαφορετικών φίλτρων για βελτιστοποίηση του σήματος που λαμβάνουμε. Εμείς προσπαθήσαμε χρησιμοποιώντας διάφορα φίλτρα και για διαφορετικές συχνότητες καταλήξαμε σε 3 διαφορετικούς τρόπου ανίχνευσης και φιλτραρίσματος του σήματος στα οποία παρατηρήσαμε μείωση του θορύβου που εισέρχεται στο σύστημα. Επιπλέον με την χρήση της εφαρμογής του Scale and Resample στο Signal Express μπορούμε να κρατάμε συγκεκριμένα φάσματα συχνοτήτων για έλεγχο.

Οι μεγάλες αλλαγές στην φασματική πυκνότητα σε χαμηλές τιμές συχνοτήτων μπορεί να αιτιολογηθεί και θεωρητικά. Στο πείραμα μας, αυτό που ψάχνουμε να βρούμε είναι η στήριξη(επαφή δύο πλακών ανάλογα με τη ροπή στη κοχλιοσύνδεση). Όπως γνωρίζουμε για να ανιχνεύσουμε διαφορές στη στήριξη που έχει να κάνει με την επαφή των δύο πλακών στο πείραμα αυτό πρέπει να ελέγχουμε φασματική πυκνότητα για μεγάλο μήκος κύματος και άρα χαμηλές συχνότητες. Αυτό καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο λιγότερο εξασθενεί όταν περνά από <<εμπόδια>> όπως είναι το σημείο διεπαφής των δύο πλακών.

Όπως προαναφέρθηκε αυτό επιβεβαιώθηκε και πειραματικά καθώς αφού ελέγξαμε τις αλλαγές στην φασματική πυκνότητα σε αρκετά μεγάλη μπάνα συχνοτήτων διαπιστώσαμε ότι για μικρές συχνότητες μεταξύ 0 και 2 KHz το φάσμα πυκνότητας παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στις αλλαγές σύσφιξης της βίδας.



Διάταξη pzt στην κατασκευή.

Στο πείραμα μας αποφασίσαμε να χρησιμοποιηθεί ως διεγέρτης (actuator) ο αισθητήρας νούμερο 5 και οι υπόλοιποι θα χρησιμοποιούνται ως αισθητήρες (sensors). Το κύμα που στέλνουμε είναι ημιτονοειδές με συχνότητα 500 HTz, έντασης 8 Volt. Οι αισθητήρες έχουν προγραμματιστεί να ανιχνεύουν σε εύρος συχνοτήτων 0-2 KHz με 200 samples. Για τον υπολογισμό του Power Spectrum χρησιμοποιούμε RMS averaging. Για κάθε μια τιμή της ροπής θα πάρουμε τέσσερις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού φάσματος.

- Αφιλτράριστο σήμα όπως λαμβάνεται από τον αισθητήρα.
- Με χρήση φίλτρου σήματος IIR filter lowpass (order 3, cutoff 200 HTz,butterwoth).
- Με χρήση φίλτρου σήματος IIR filter highpass(order 3, cutoff 600 HTz,butterwoth).
- Χρήση και των δύο παραπάνω φίλτρων ταυτόχρονα.

Για τον υπολογισμό του RMSD συγκρίναμε το φάσμα πυκνότητας των αισθητήρων 0 , 2 , 3 σε σχέση με το φάσμα πυκνότητας του αισθητήρα

1(αισθητήρας στην μικρή πλάκα κοντά στον actuator). Δηλαδή χρησιμοποιούμε έναν αισθητήρα αναφοράς (reference sensor) ο οποίος παίρνει μηχανικό κύμα σχεδόν ίδιας έντασης με αυτό που στέλνει ο διεγέρτης αφού βρίσκεται στην ίδια πλάκα και σε αρκετά κοντινή απόσταση οπότε δεν προλαβαίνει να εξασθενήσει, και με την υπολογισμό RMSD τον συγκρίνουμε με το εξασθενημένο μηχανικό κύμα που φτάνει στους αισθητήρες.

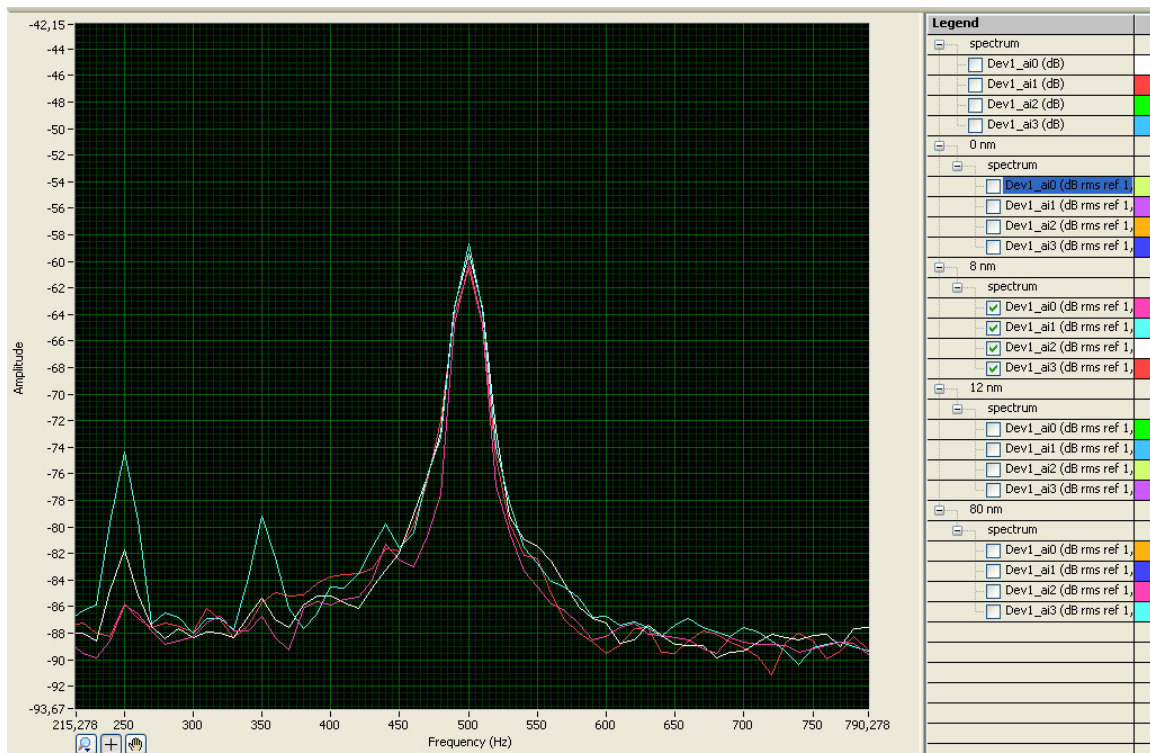
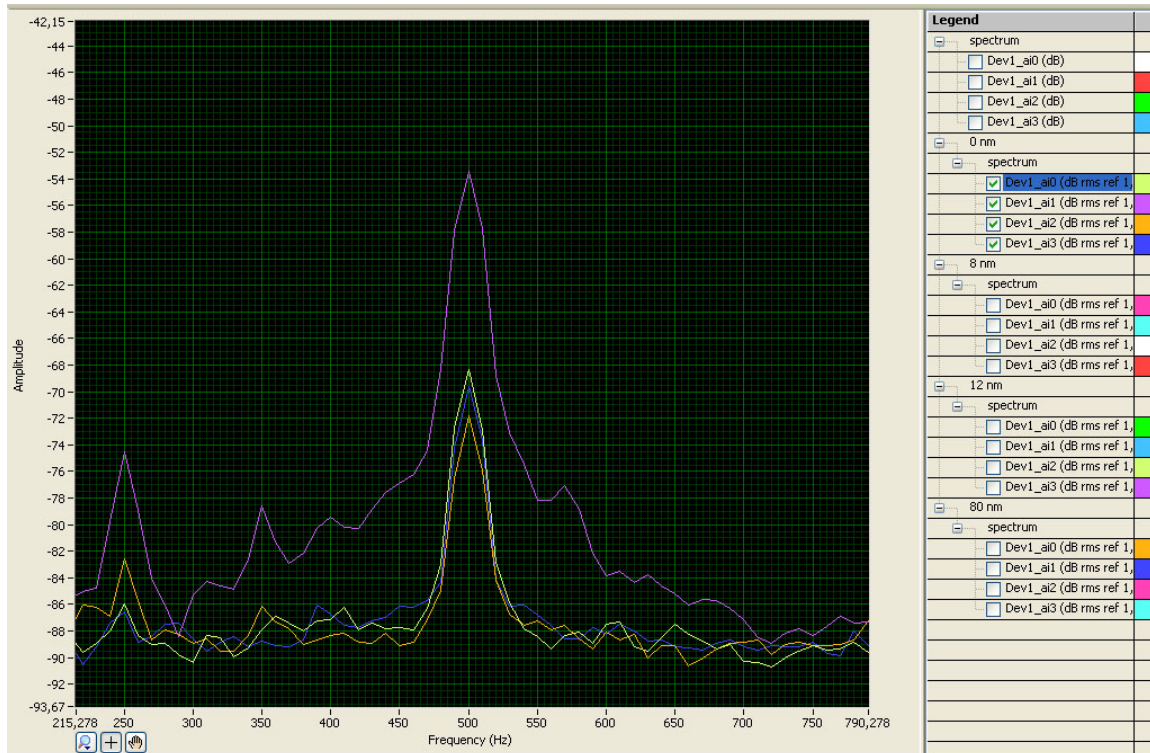
Το μηχανικό κύμα εξασθενεί από το πέραςμα του στην πλάκα αλλά και από την μετάδοση του στην πάνω πλάκα εξαιτίας της αντίστασης επαφής των δύο πλακών. Αλλάζοντας τις τιμές της ροπής και ουσιαστικά σφίγγοντας την βίδα η δυο επιφάνειες ασκού μεγαλύτερη δύναμη η μία στη άλλη επομένως μειώνεται η αντίσταση επαφής των δύο πλακών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μηχανικό κύμα να χάνει λιγότερη ενέργεια περνώντας από το σημείο διεπαφής των δύο πλακών. Επομένως επιχειρώντας να ανιχνεύουμε σε πραγματικό χρόνο την ένταση του κύματος που φτάνει στους αισθητήρες για να καταλάβουμε πόσο καλή είναι η επαφή τω δύο πλακών και κατ' επέκταση πόση ροπή έχει η βίδα.

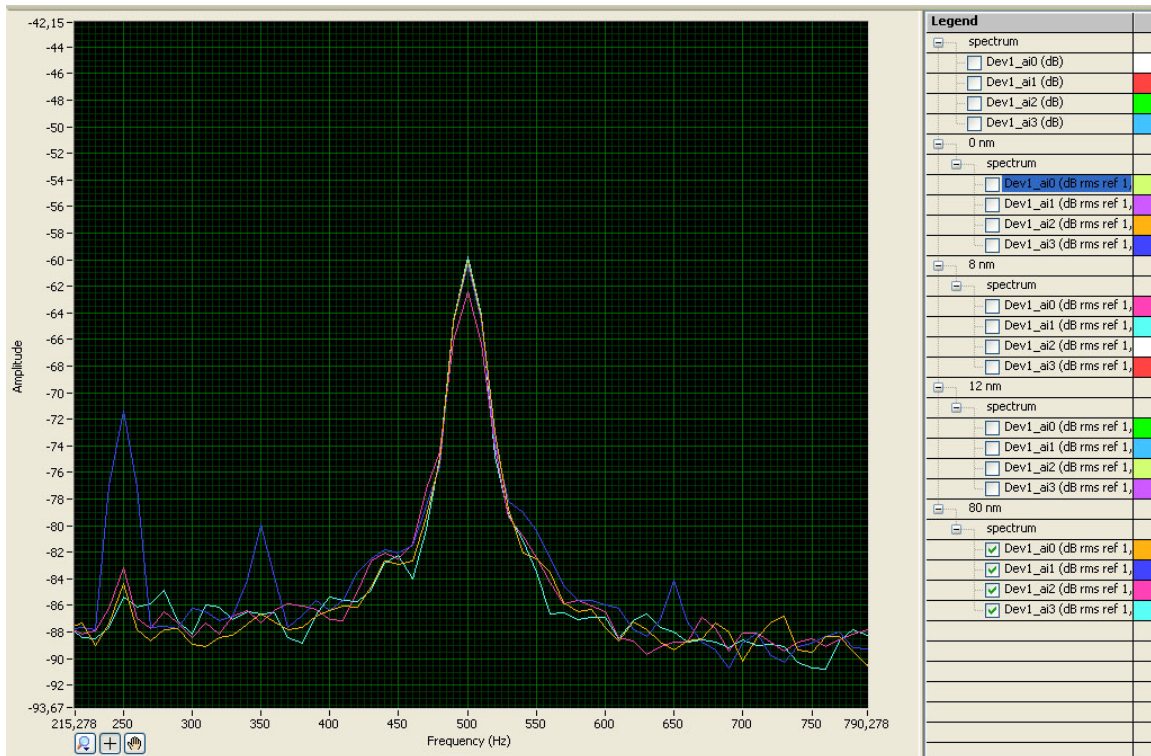
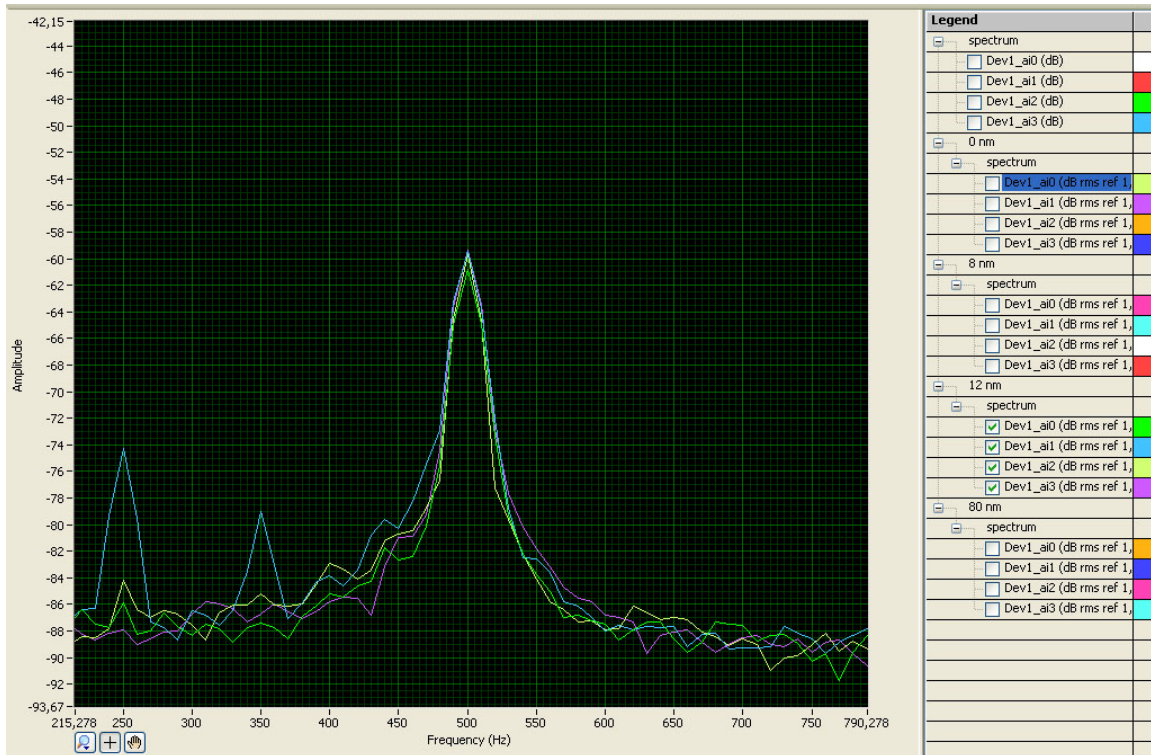
Στο πείραμά μας πήραμε μετρήσεις για τιμές ροπής: 0 , 8 , 12 , 16 , 20 , 30 , 40 , 60 , 80.

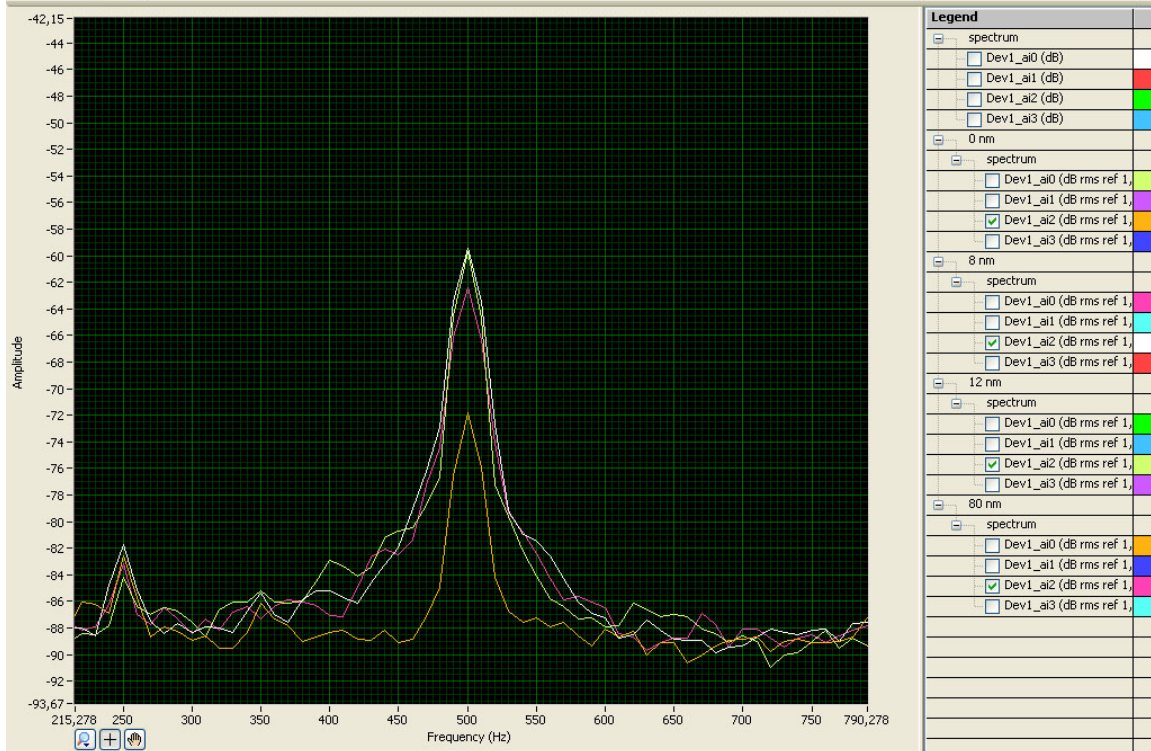
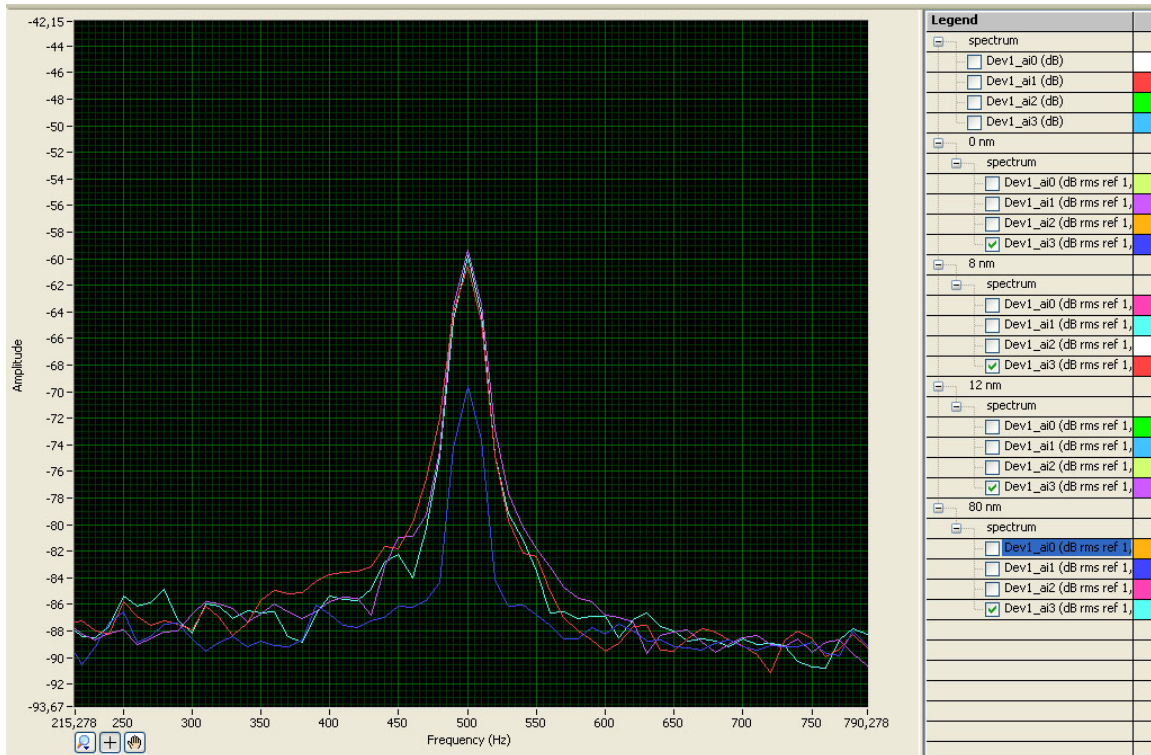
Στην συνέχεια παραθέτουμε ενδεικτικές εικόνες της φασματικής πυκνότητας για τις παραπάνω τιμές όπως φαίνεται στο interface του Signal Express. Για να είναι πιο εποπτικές οι αλλαγές στο φάσμα παραθέτουμε το φάσμα πυκνότητας για όλους τους αισθητήρες μαζί σε συγκεκριμένες ροπές και για κάθε αισθητήρα σε όλες τις ροπές μαζί. Ο αριθμός κάθε Dev1 ai() αντιστοιχεί στο αντίστοιχο pzt.

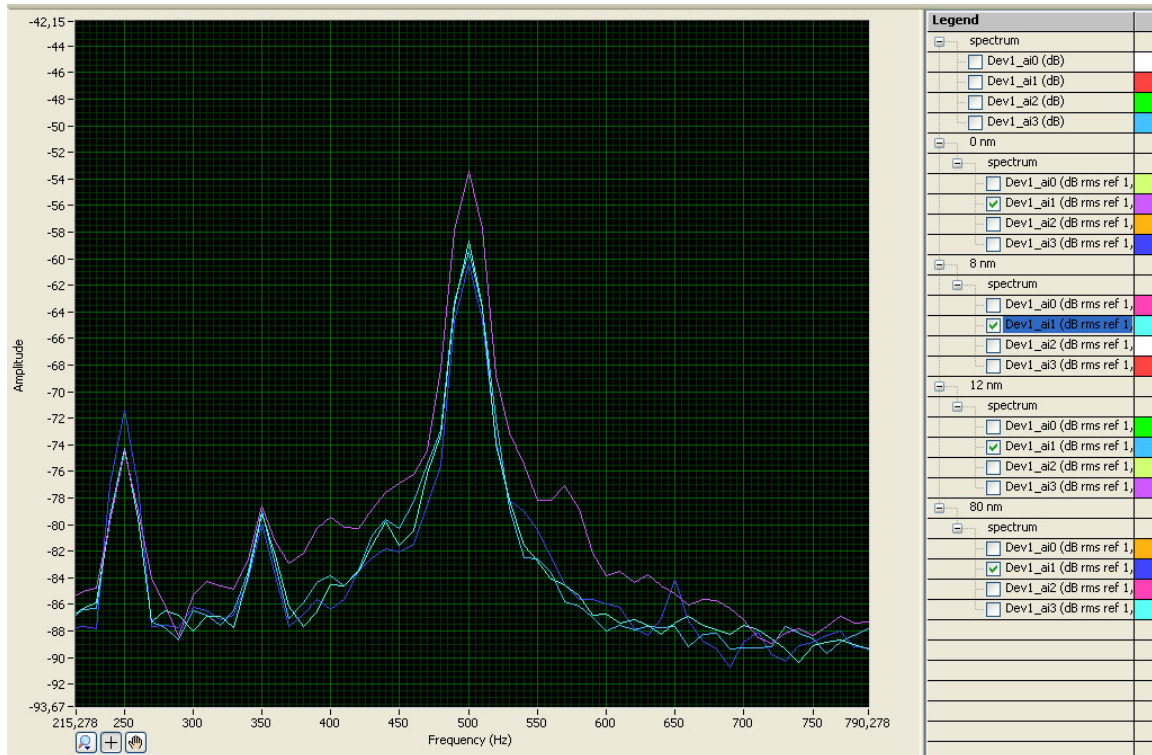
2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ SIGNAL EXPRESS

Φάσμα πυκνότητας για μετρήσεις χωρίς φίλτρο:

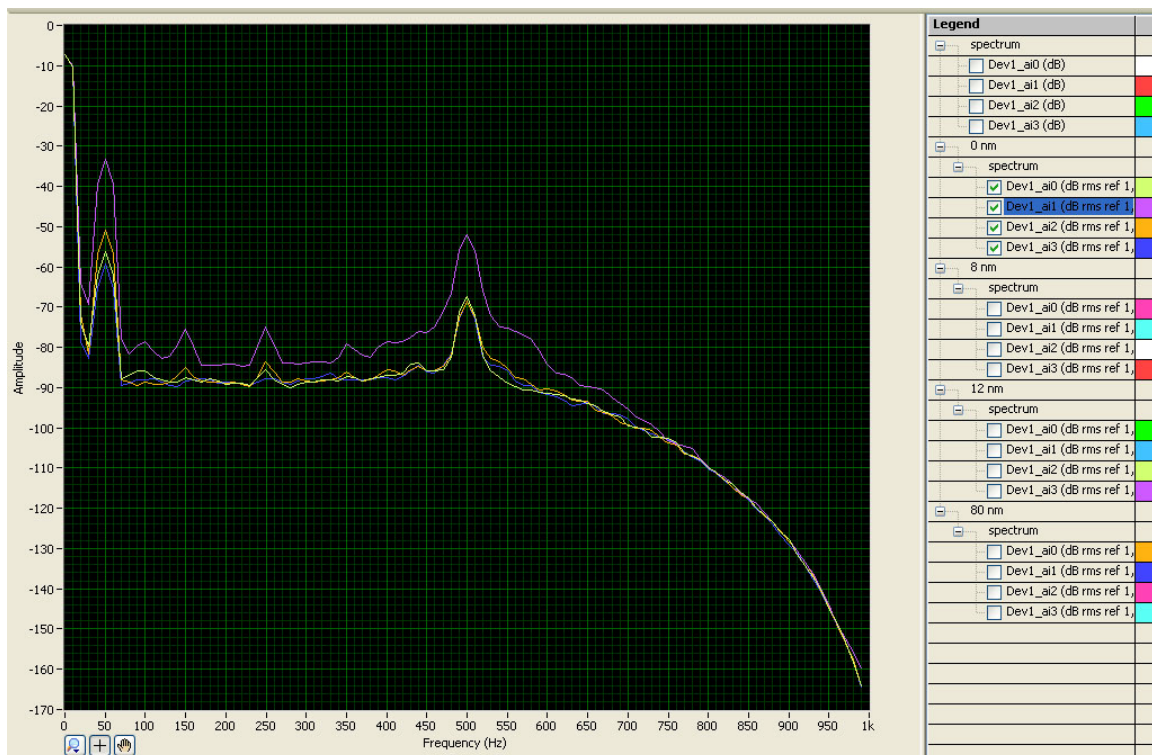


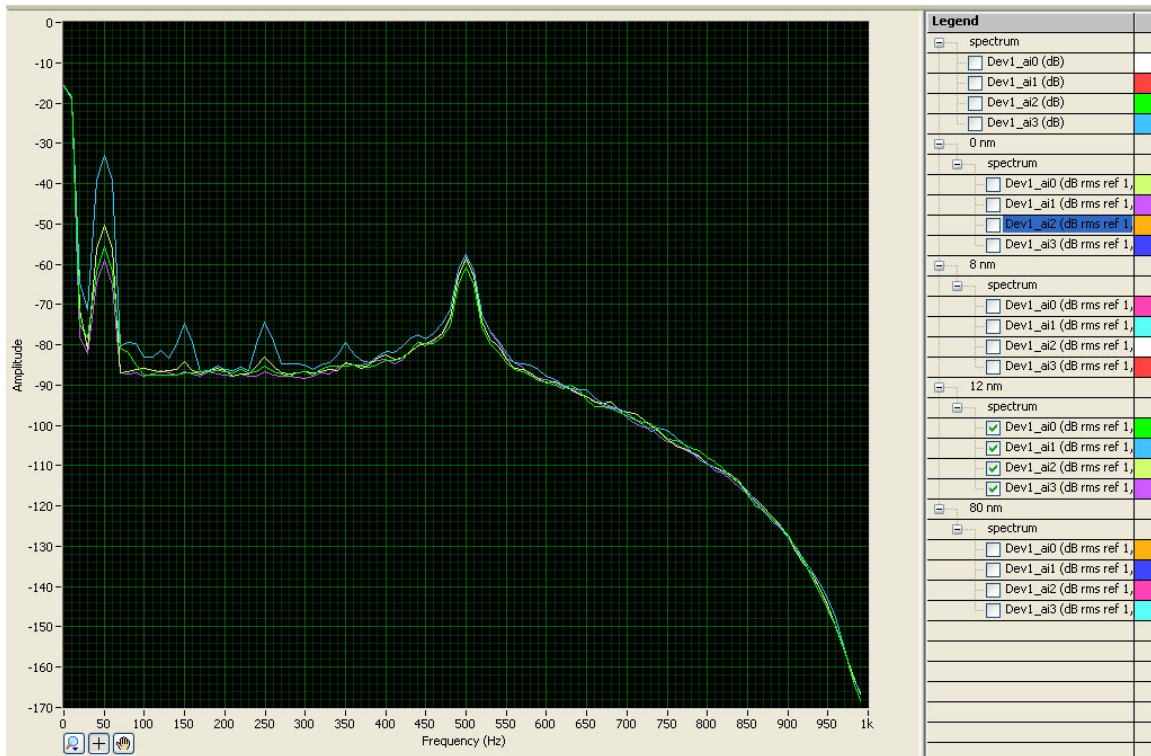
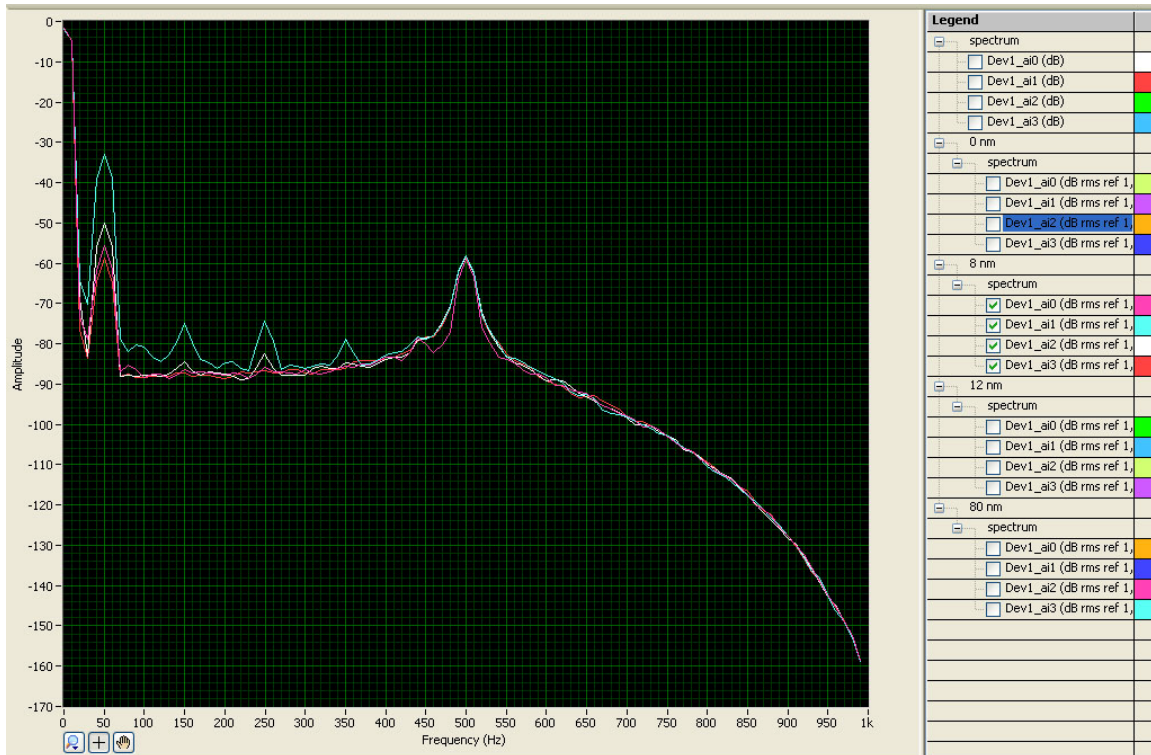


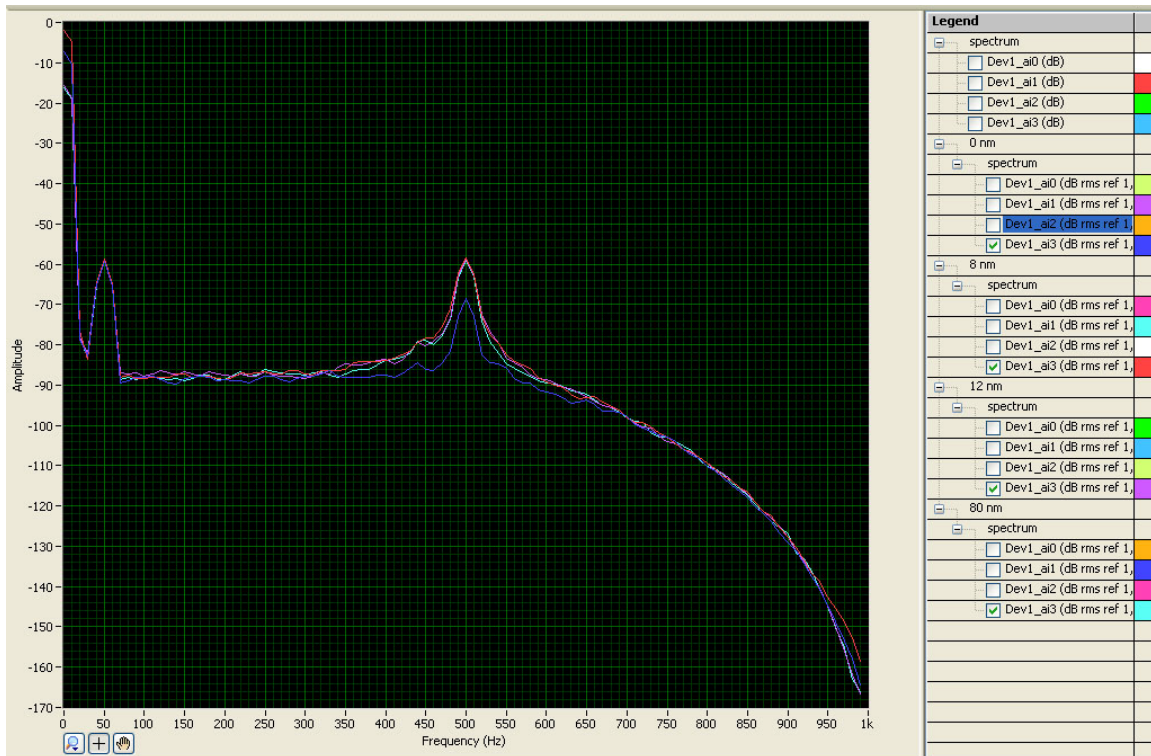
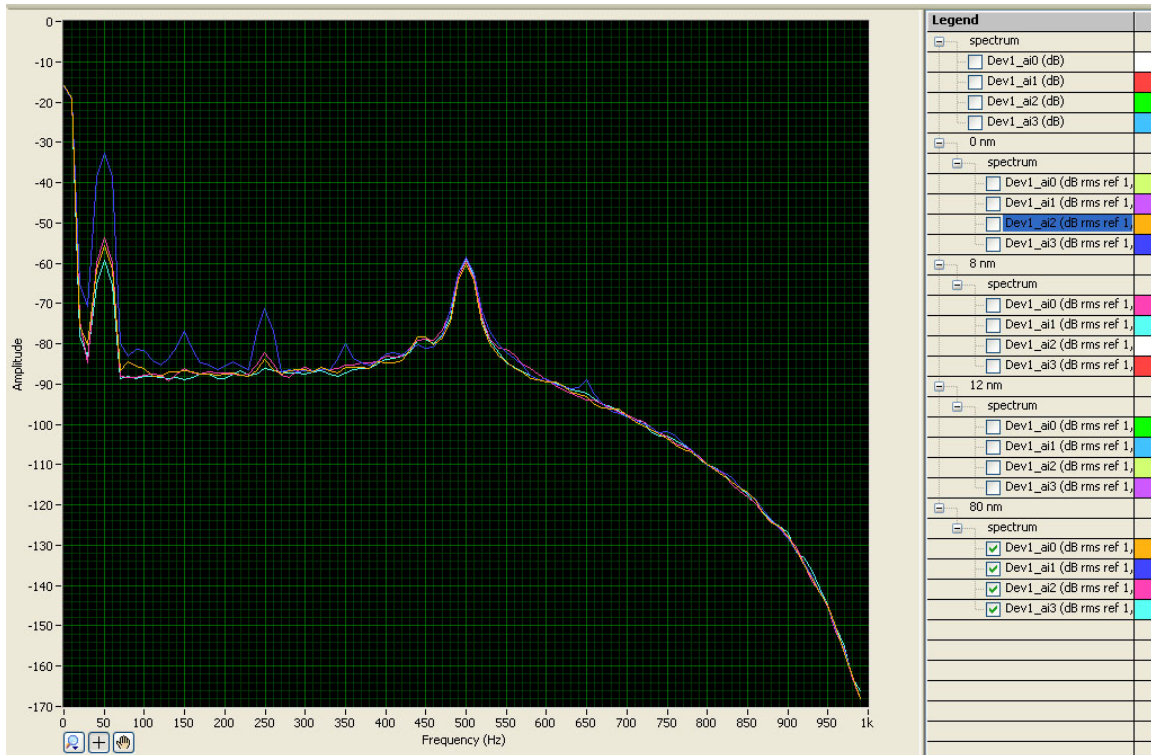


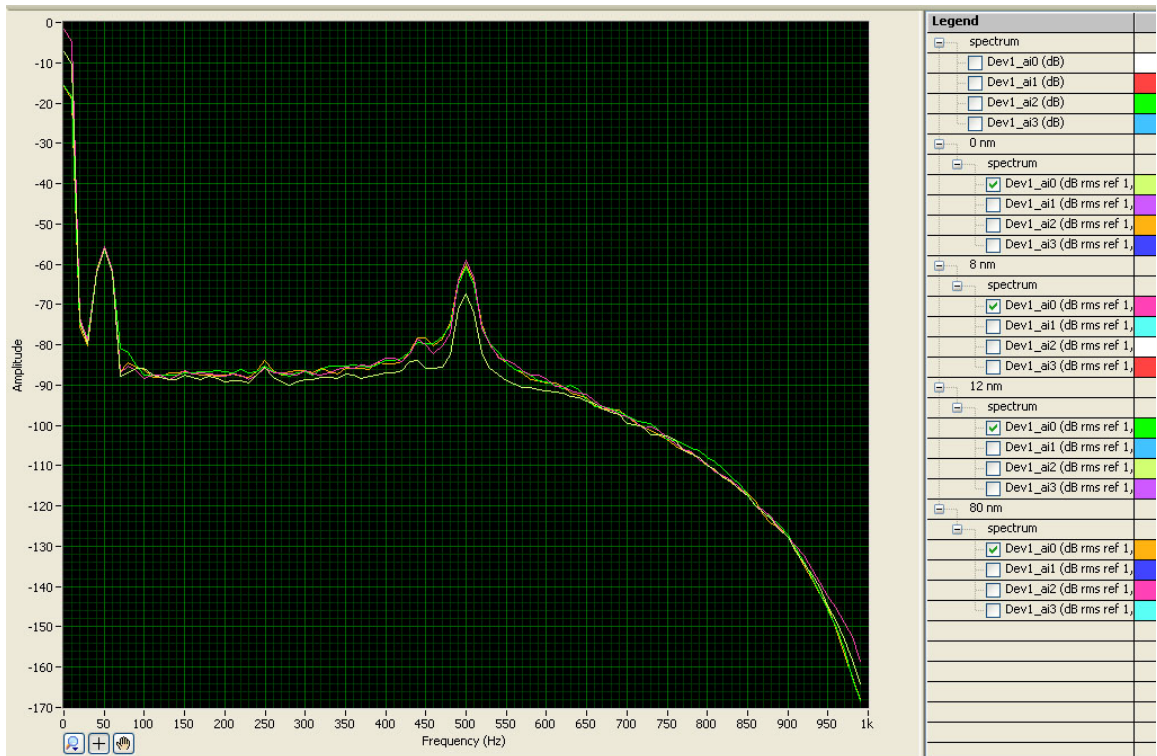
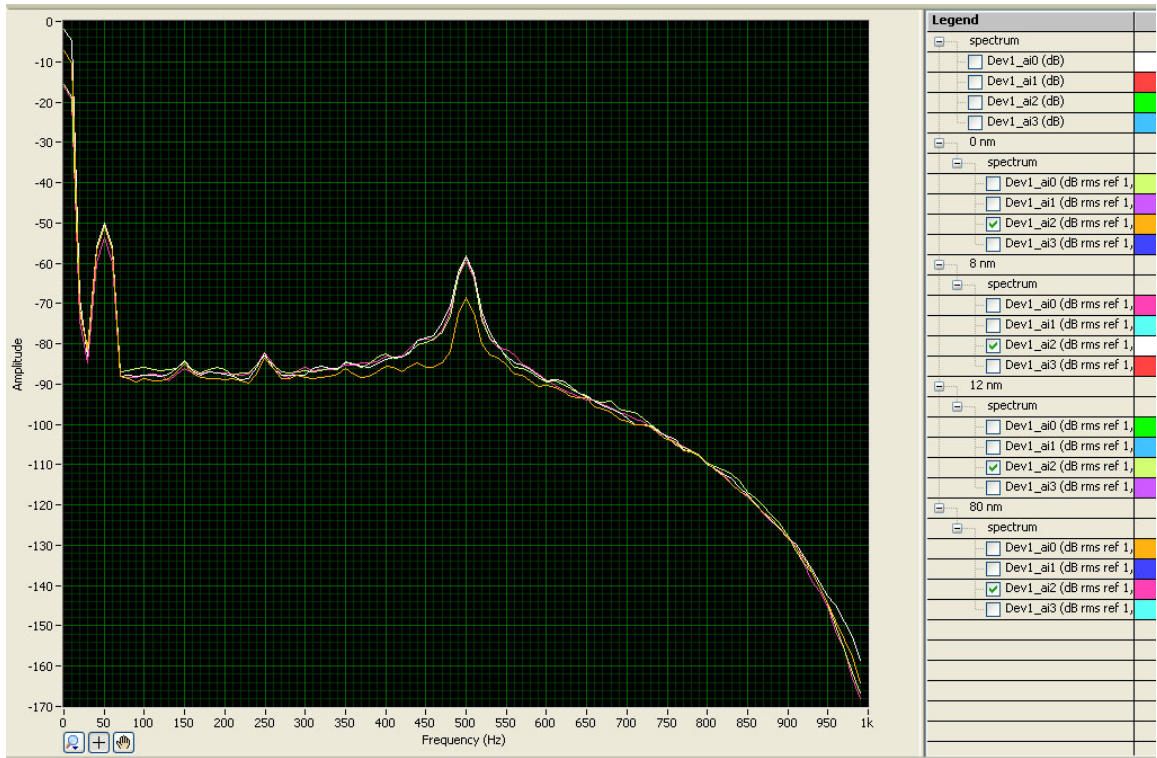


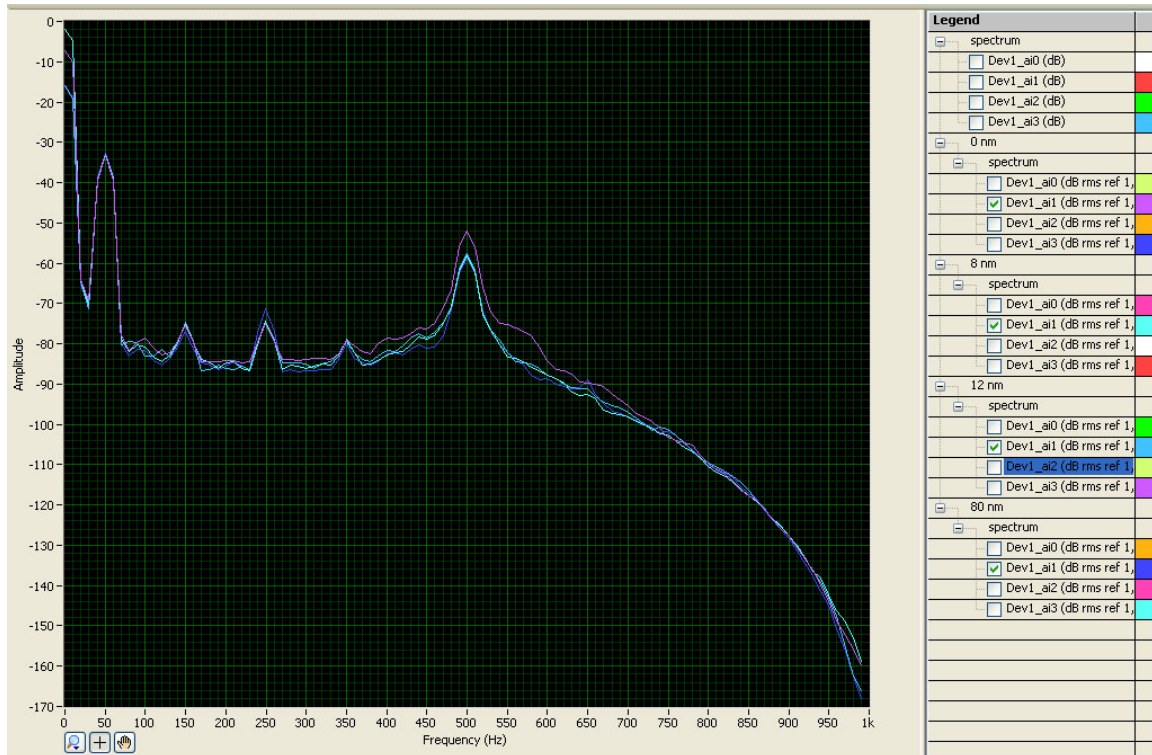
Φάσμα πυκνότητας για μετρήσεις με Lowpass filter:



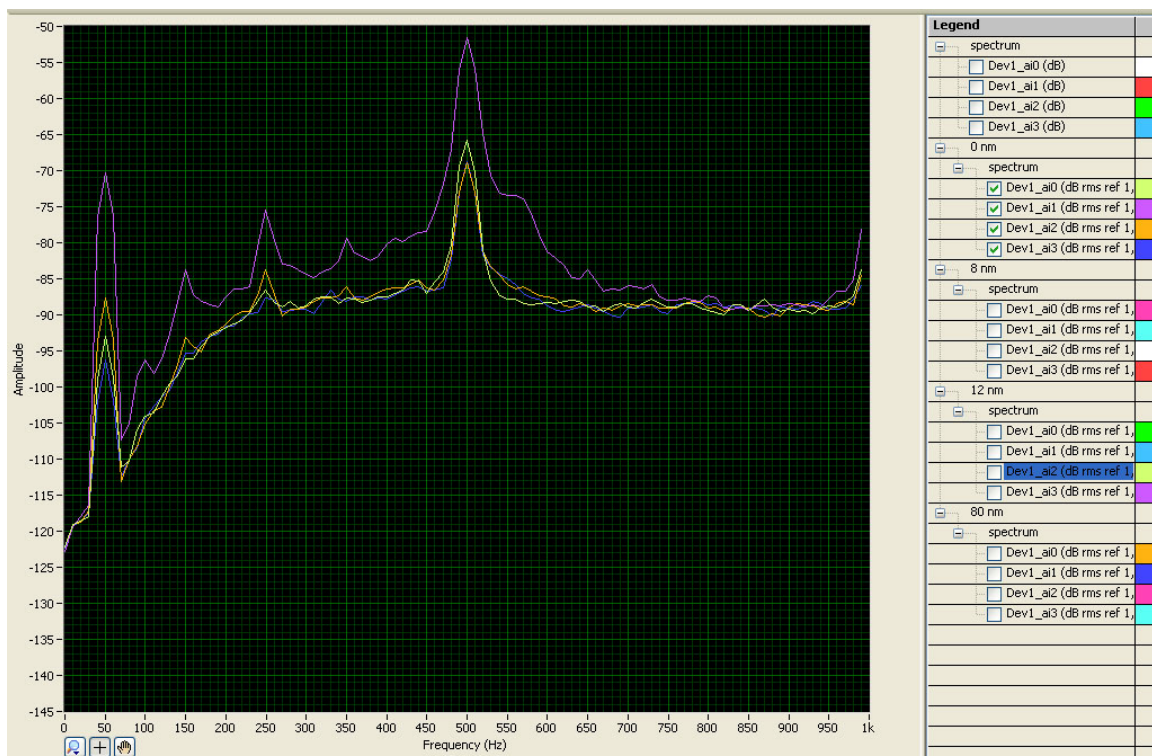


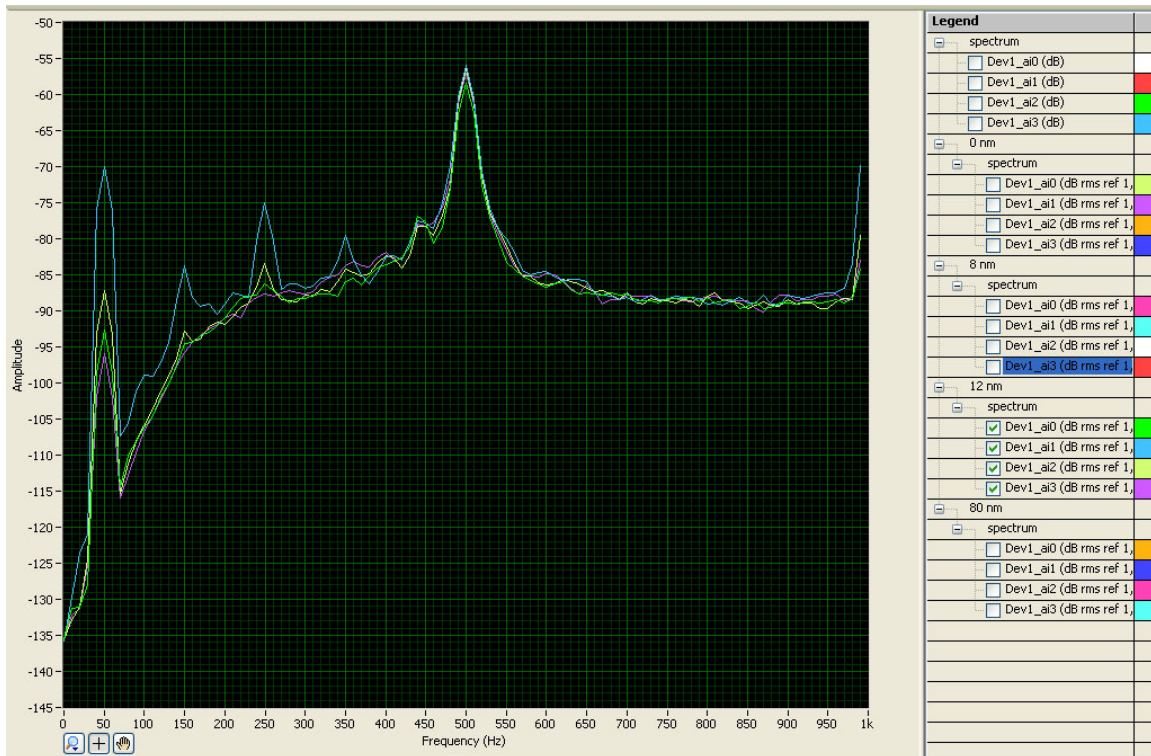
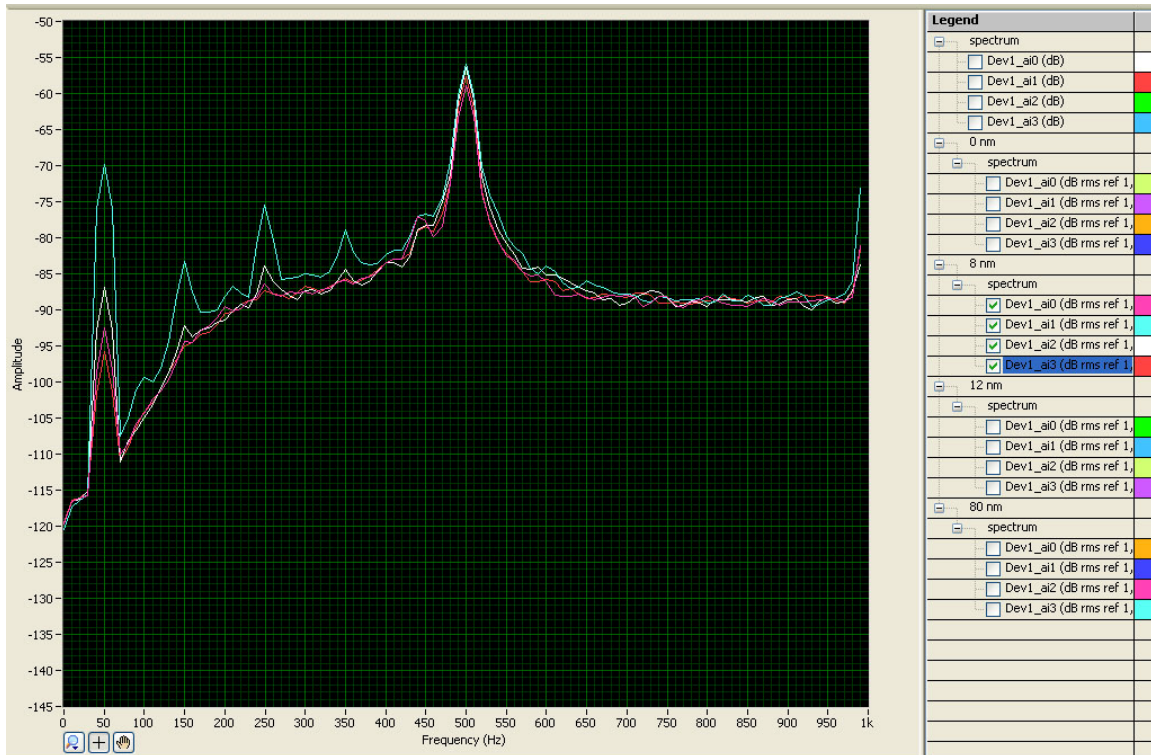


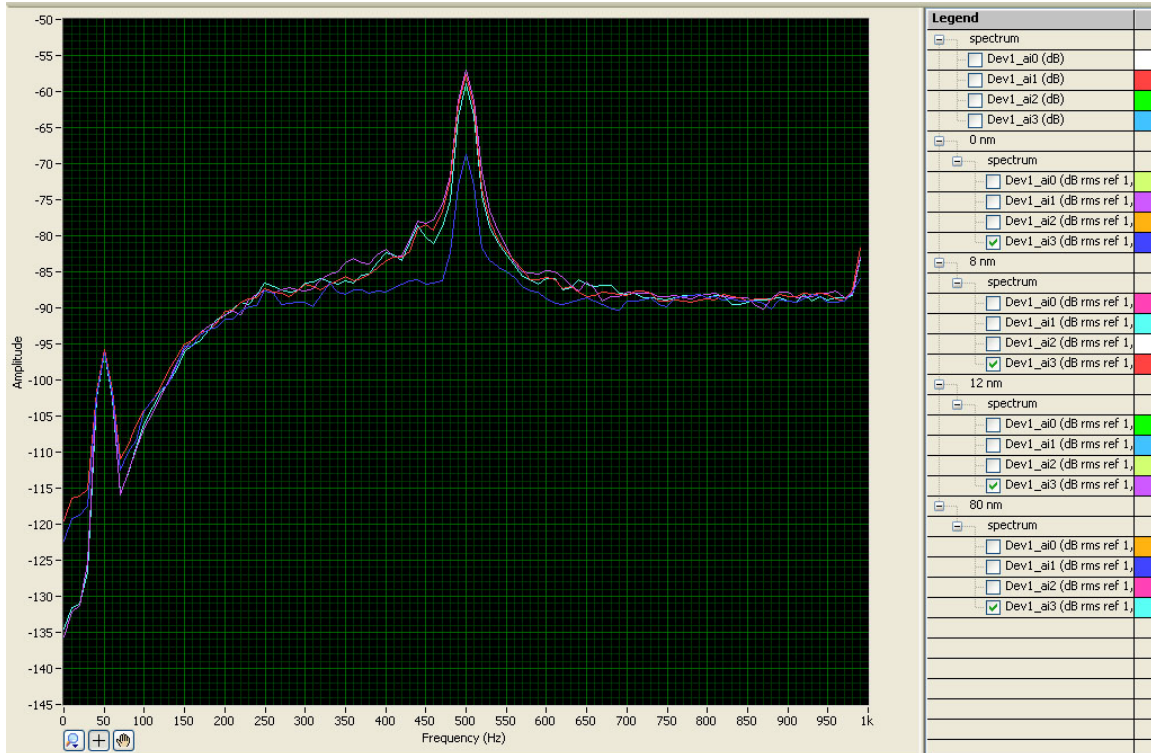
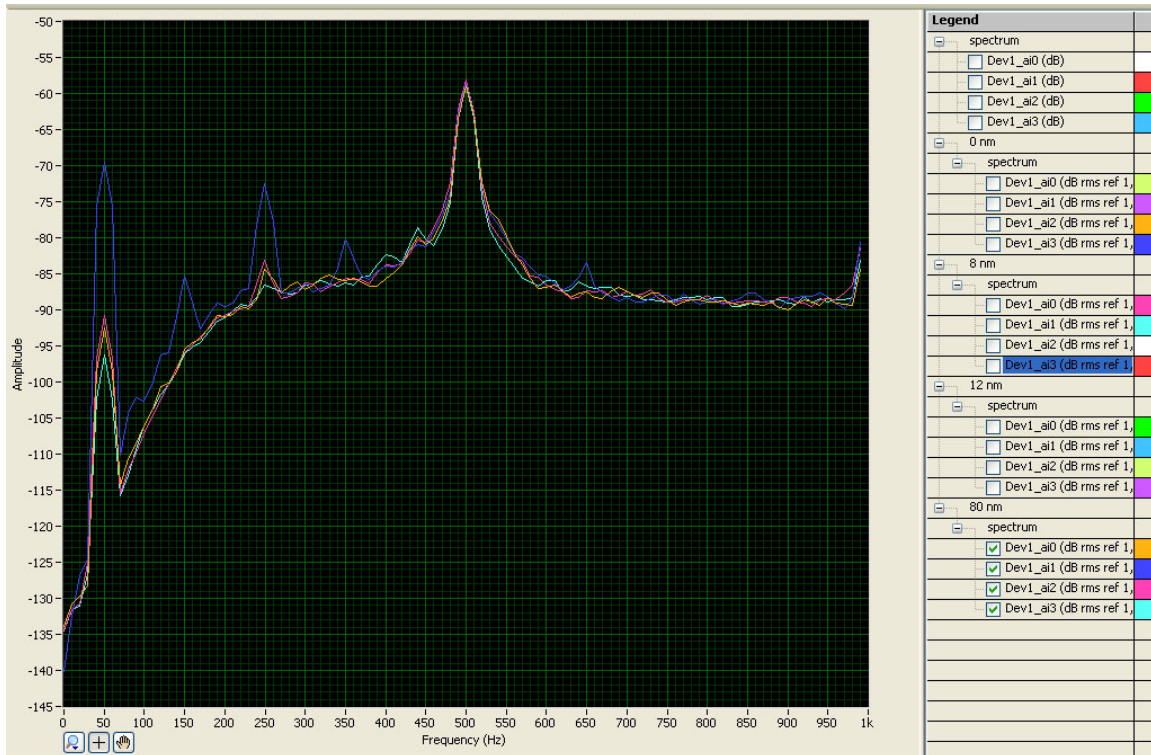


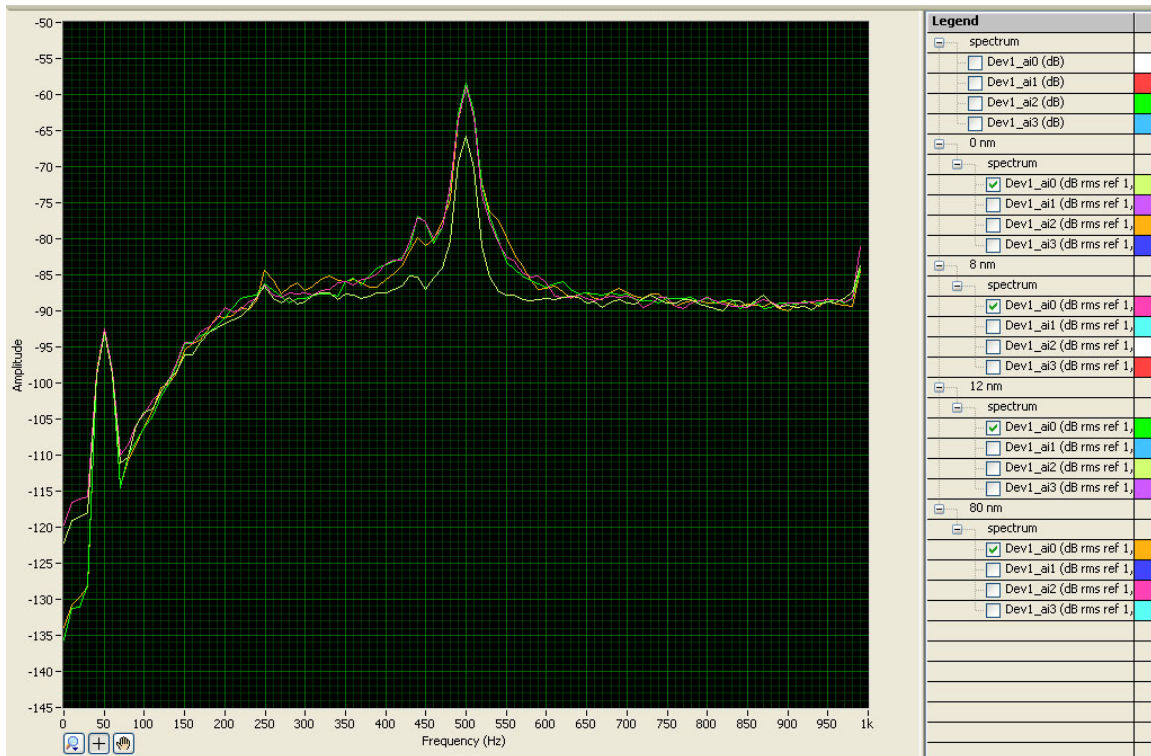
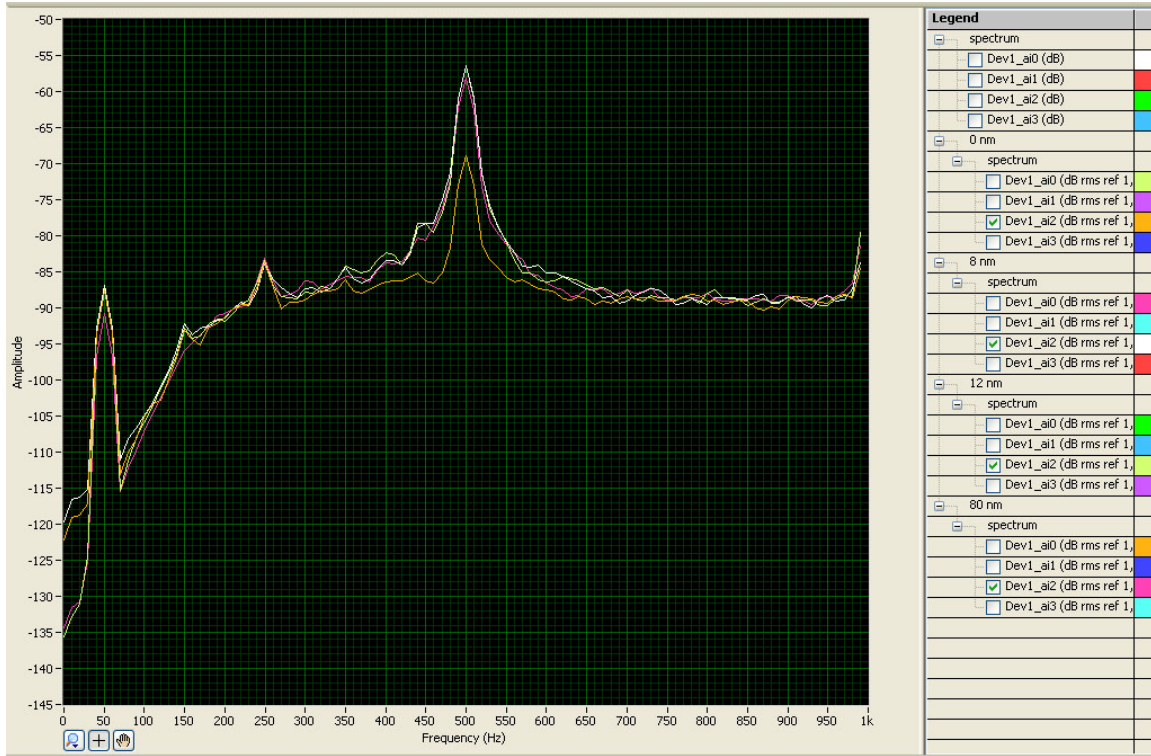


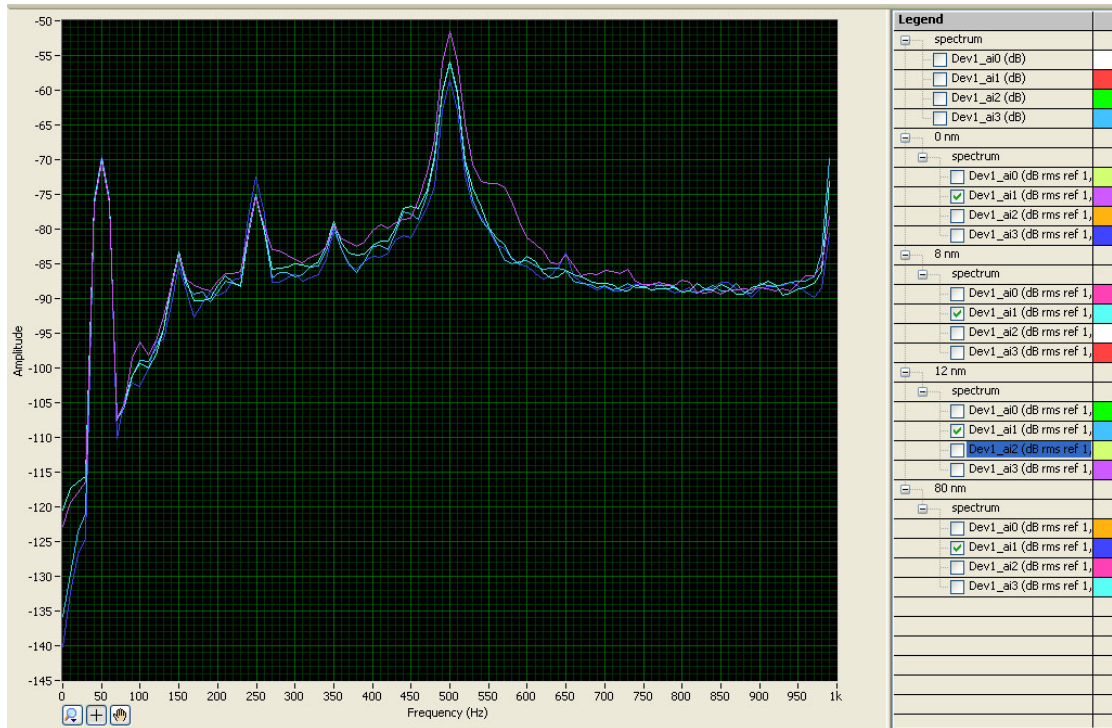
Φάσμα πυκνότητας για μετρήσεις με Highpass filter:



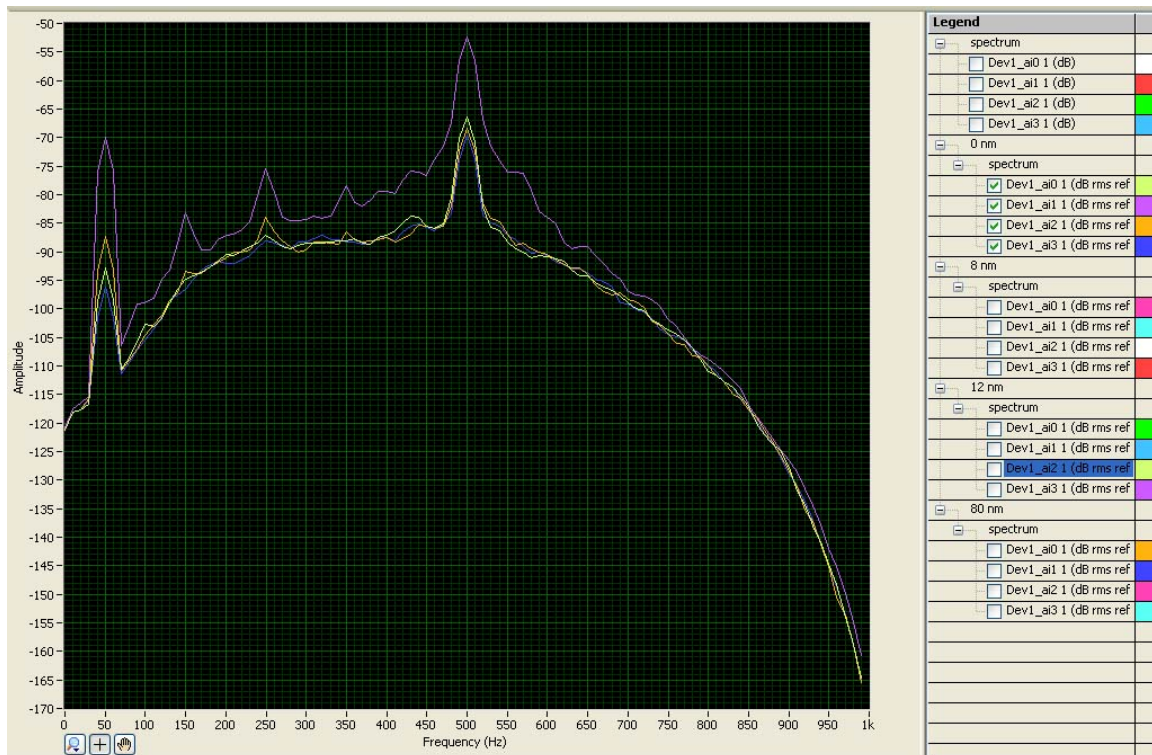


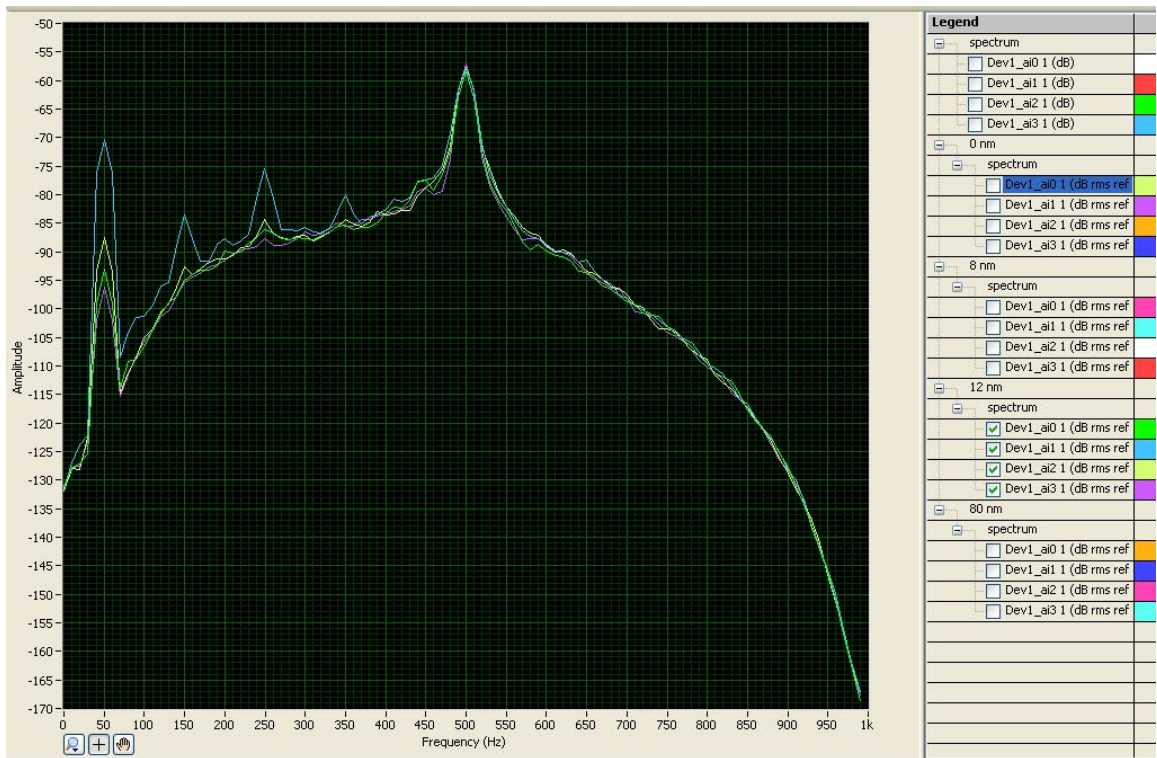
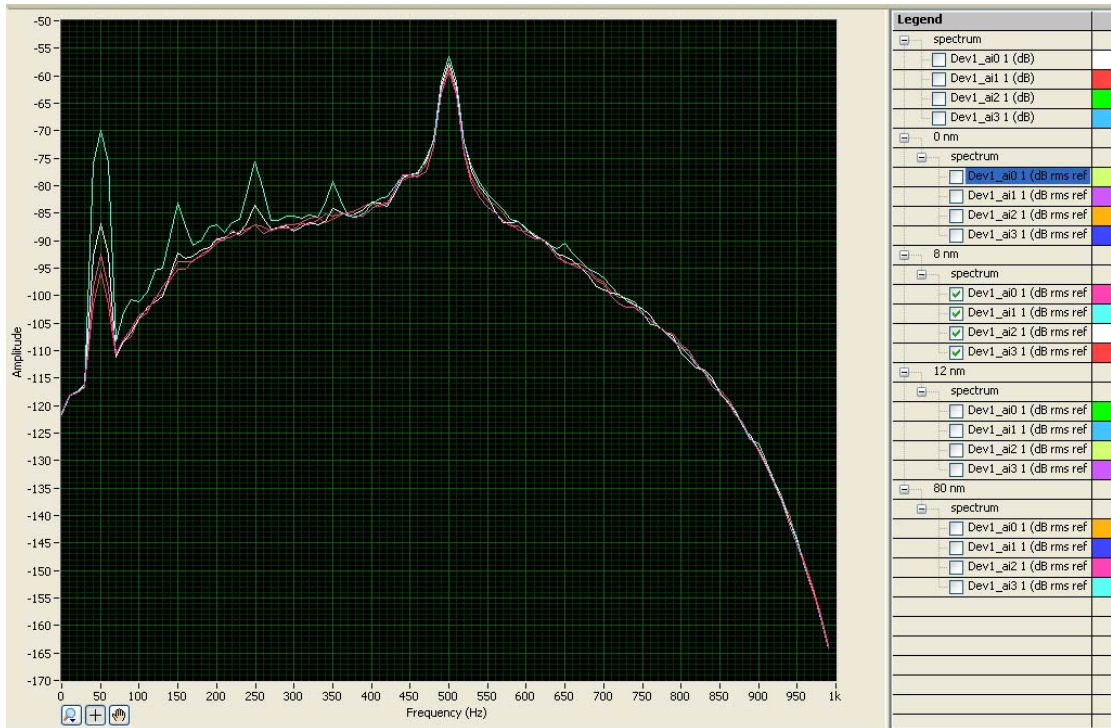


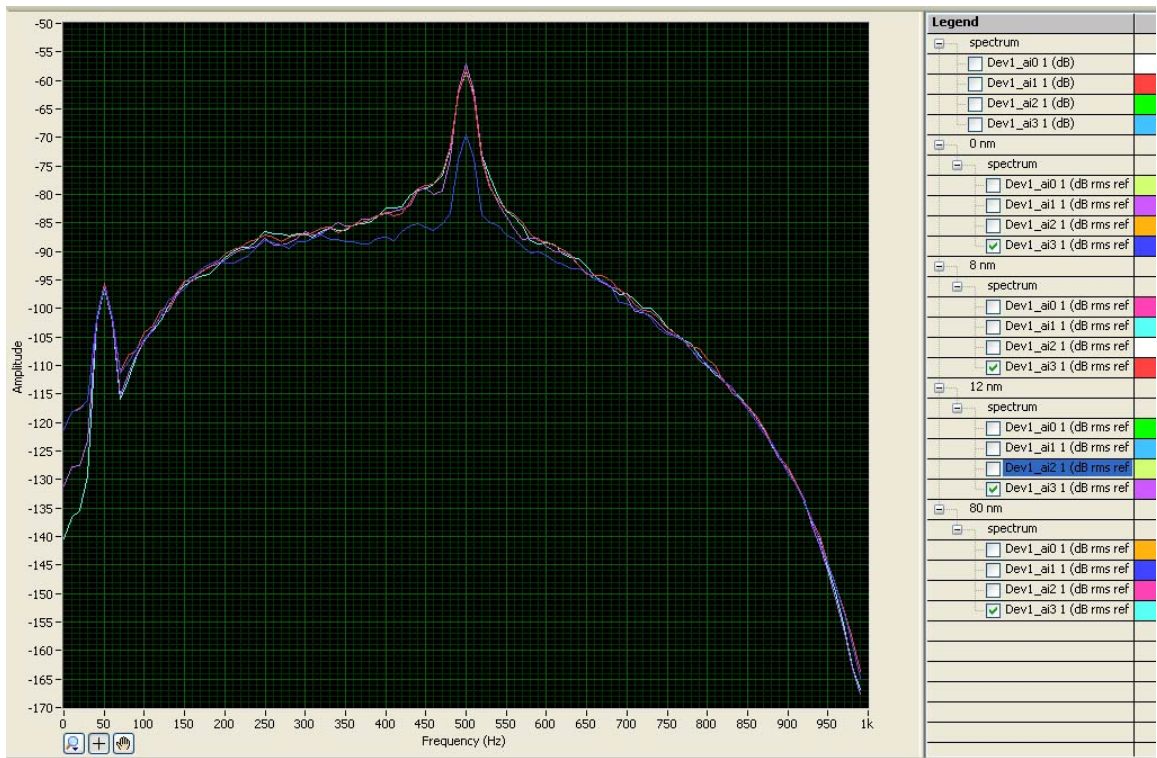
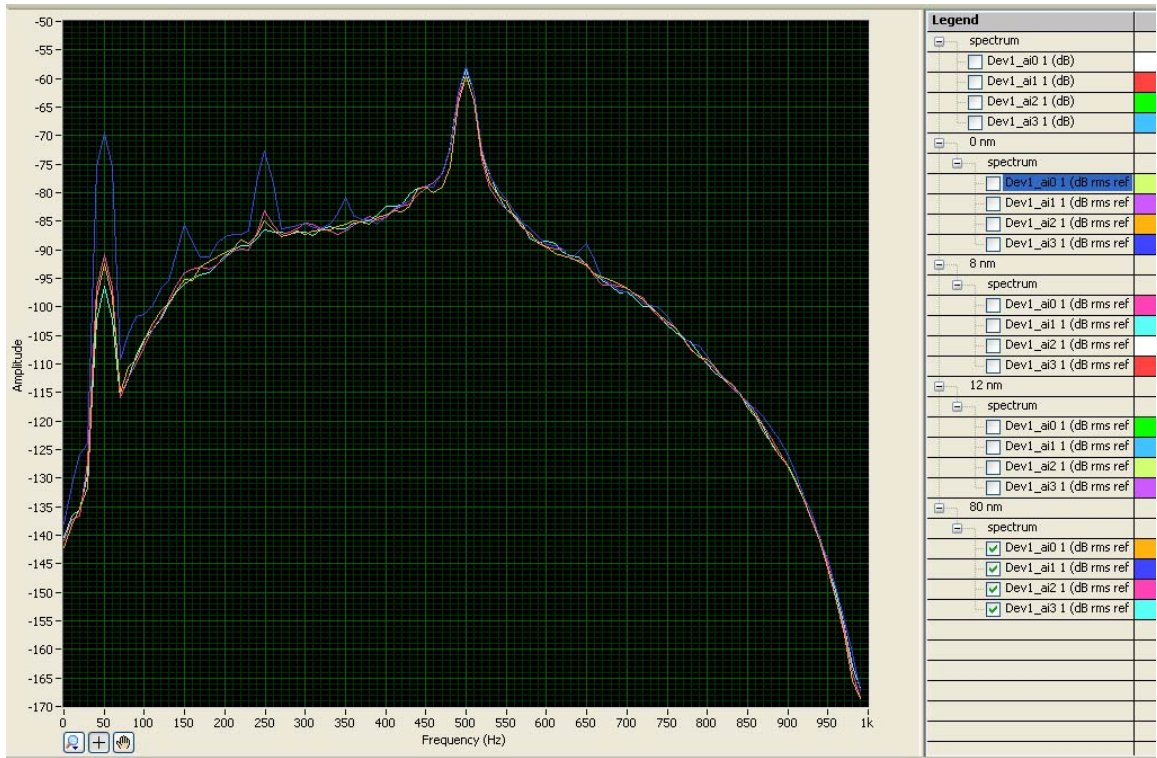


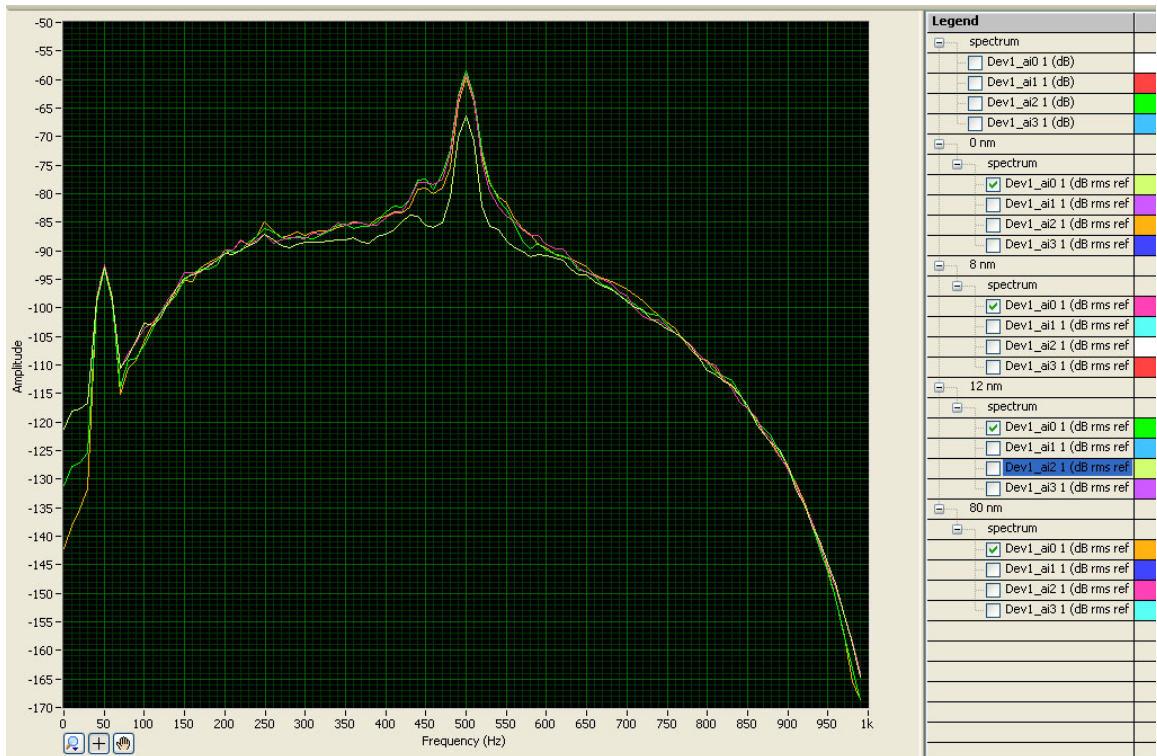
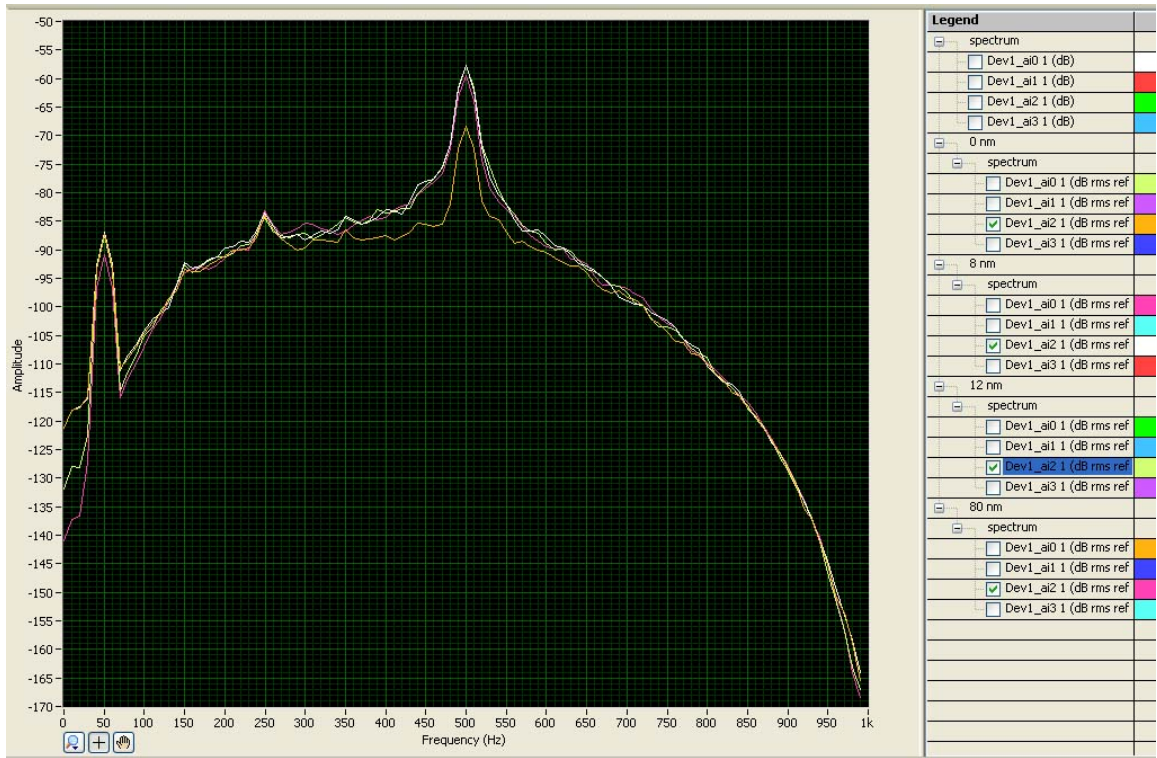


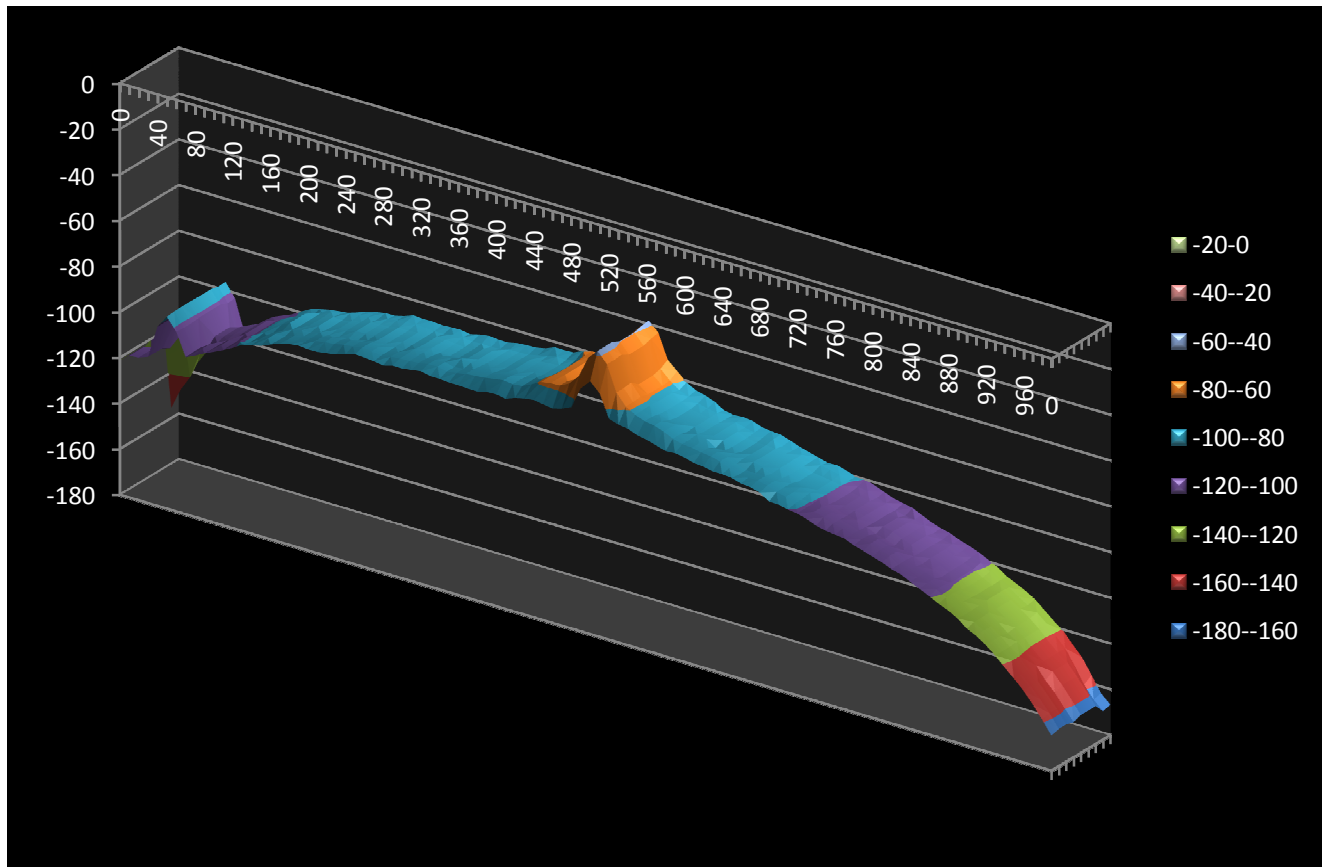
Φάσμα πυκνότητας για μετρήσεις με Highpass και Lowpass filter:











Pzt3 για όλες τις ροπέες.

Παρατηρήσεις

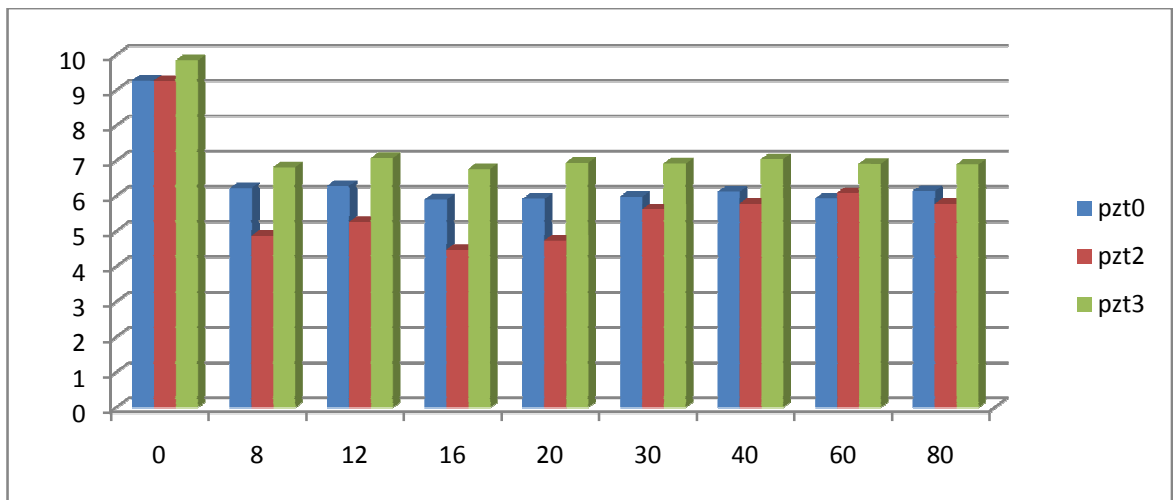
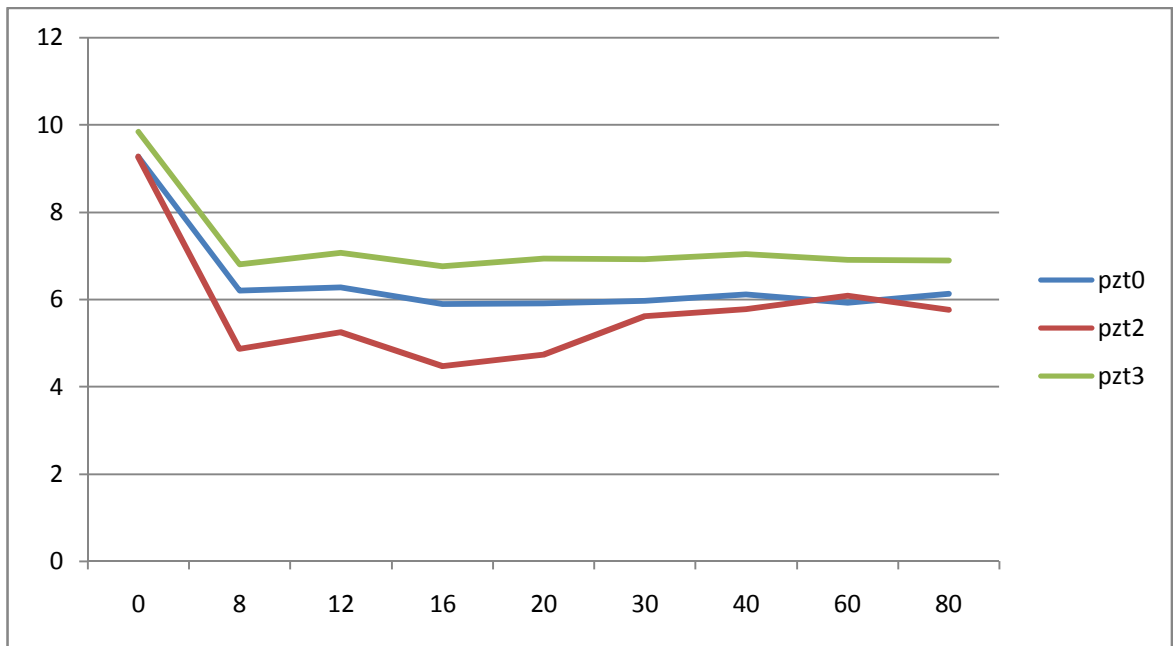
Στα παραπάνω γραφήματα φαίνονται οι αλλαγές στο φάσμα πυκνότητας (power spectrum) για διάφορες ροπές που δίνουμε στην κοχλιοσύνδεση και με τη χρήση τριών ειδών φίλτρων και χωρίς φίλτρα. Στα 500 Hz το peak που εμφανίζεται πρόκειται για το σήμα που στέλνουμε. Σε χαμηλές ροπές της κοχλιοσύνδεσης το pzt 1 που βρίσκεται στην ίδια πλάκα με τον actuator έχει μεγαλύτερη ένταση σε όλο το φάσμα πυκνότητας ενώ τα άλλα τρία pzt(0,2,3) έχουν πολύ μικρότερη ένταση στο φάσμα πυκνότητας τους για χαμηλές ροπές. Όσο αυξάνετε η ροπή στην κοχλιοσύνδεση για το pzt 1 μειώνεται η ένταση σε όλο το φάσμα και κυρίως στο peak στα 500 Hz. Στα άλλα τρία pzt όσο αυξάνεται η ροπή η ένταση του φάσματος και κυρίως η ένταση στο peak αυξάνεται και τείνει να γίνει ίδια με αυτή του pzt1. Δηλαδή όσο αυξάνονται οι ροπές, τα pzt 0 ,2 ,3 τείνουν να αποκτήσουν ακριβώς ίδιο φάσμα πυκνότητας με το φάσμα του pzt 1.

Επίσης είναι εμφανείς και στα παρακάτω γραφήματα αλλά και στα διαγράμματα RMSD που ακολουθούνε, πως το φάσμα που παίρνουμε για το pzt0 είναι μεγαλύτερο από το φάσμα για το pzt3 και αυτό συμβαίνει γιατί το pzt 0 βρίσκεται πιο κοντά στον actuator. Το φάσμα πυκνότητας που λαμβάνει το pzt2 είναι μεγαλύτερο από τα φάσματα του pzt 0 και pzt 3 ενώ κανονικά έπρεπε να παίρνει σχεδόν το ίδιο φάσμα με το pzt 3 αφού βρίσκονται τοποθετημένα αντιδιαμετρικά. Διαπιστώσαμε ότι ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι πως η πάνω πλάκα στην οποία βρίσκεται ο actuator πατάει καλύτερα από την μια πλευρά(η διαφορά φαίνεται οριακά με το μάτι), από την πλευρά που βρίσκεται το pzt 2, έτσι φτάνει μεγαλύτερο μηχανικό κύμα από τον actuator στο pzt 2.

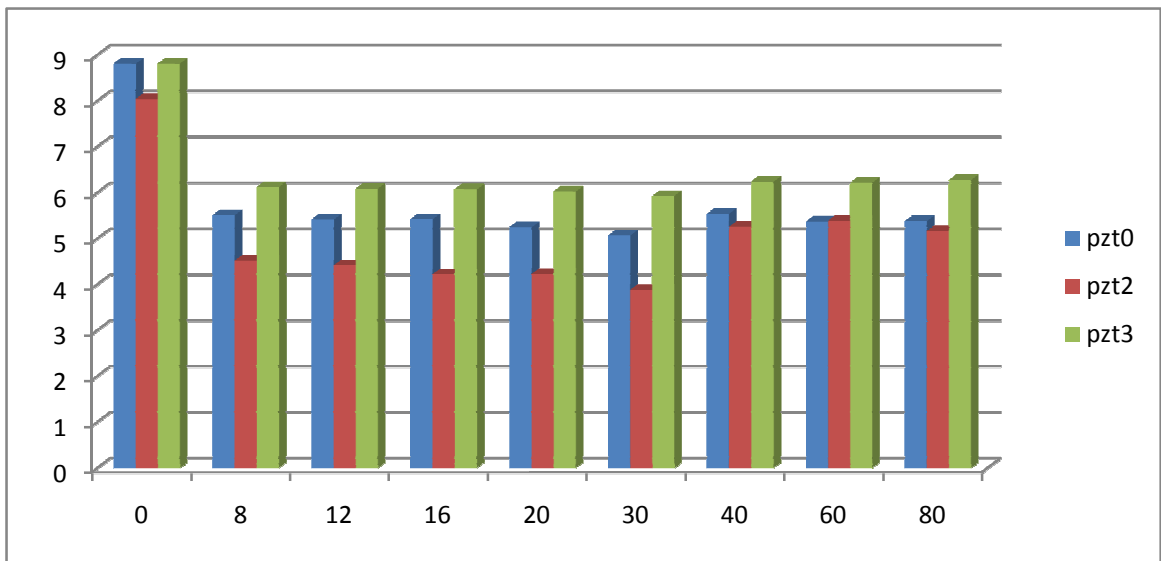
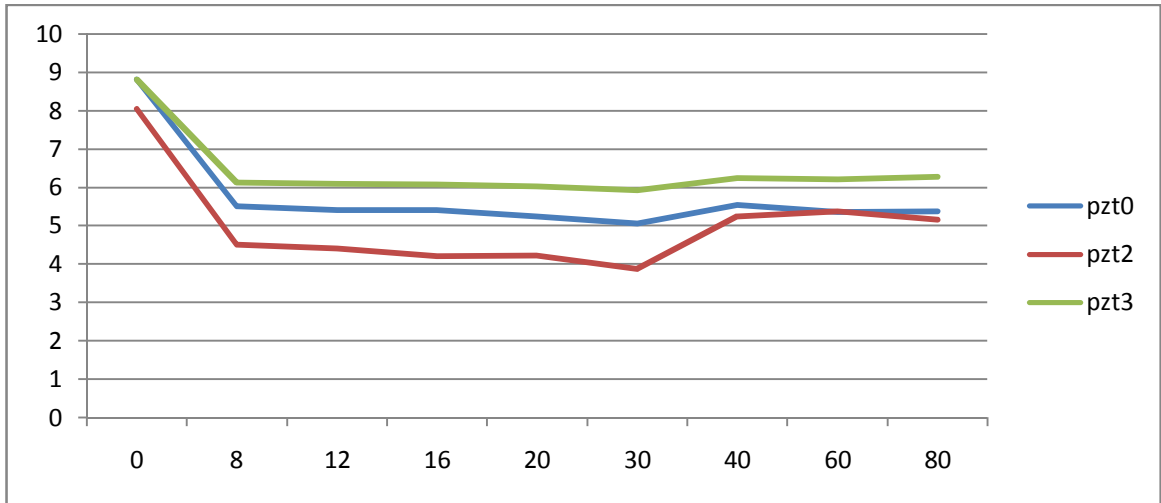
Τα peak που εμφανίζονται στα 50 Hz καθώς και τα μικρότερα που εμφανίζονται στα 100, 150, 200 Hz πρόκειται για εξωτερικούς θορύβους οι οποίοι προέρχονται από το ηλεκτρικό δίκτυο που λειτουργεί στα 50 Hz και οι ανακλάσεις του στα 100, 150, και 200 Hz.

Παρακάτω παραθέτουμε τα γραφήματα για το RMSD:

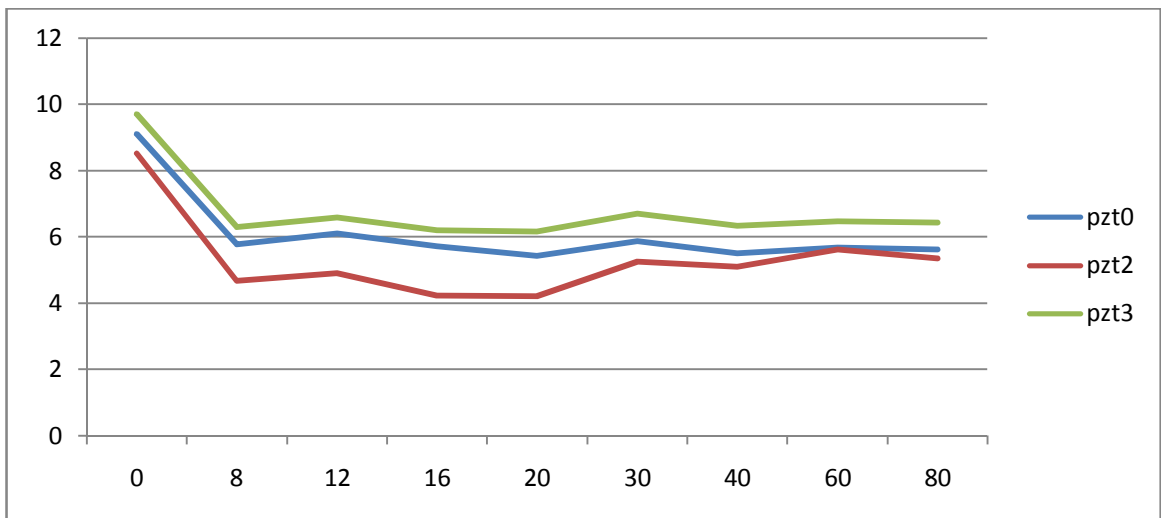
RMSD για αποτελέσματα χωρίς χρήση φίλτρου:

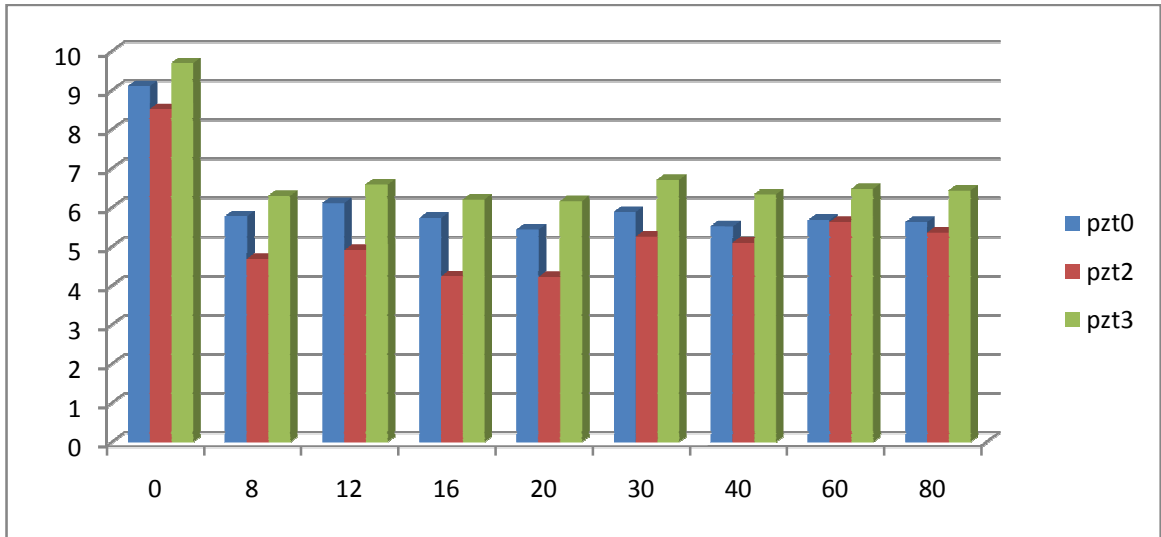


RMSD για αποτελέσματα με χρήση Lowpass filter :

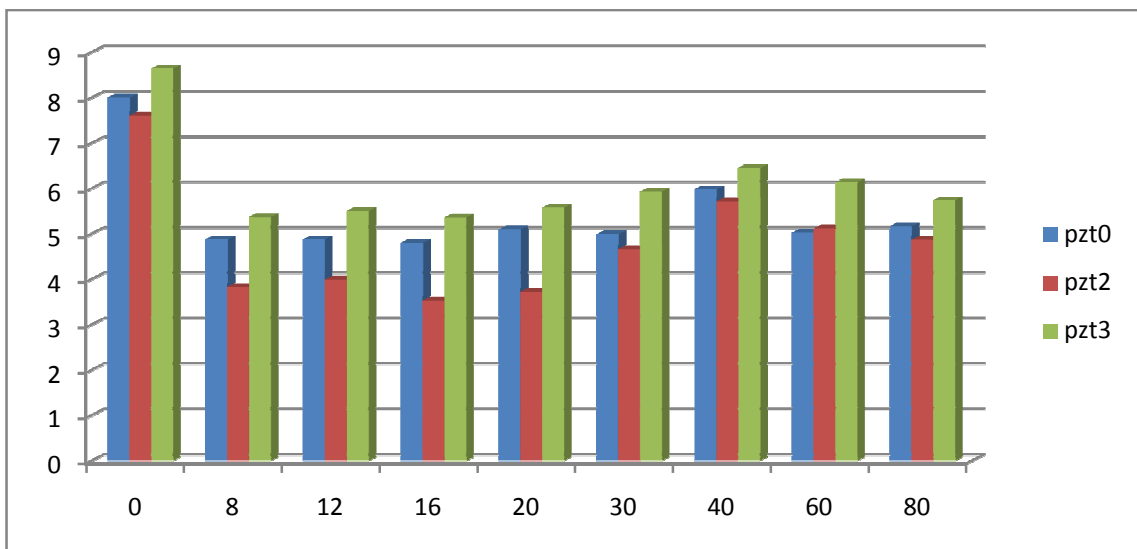
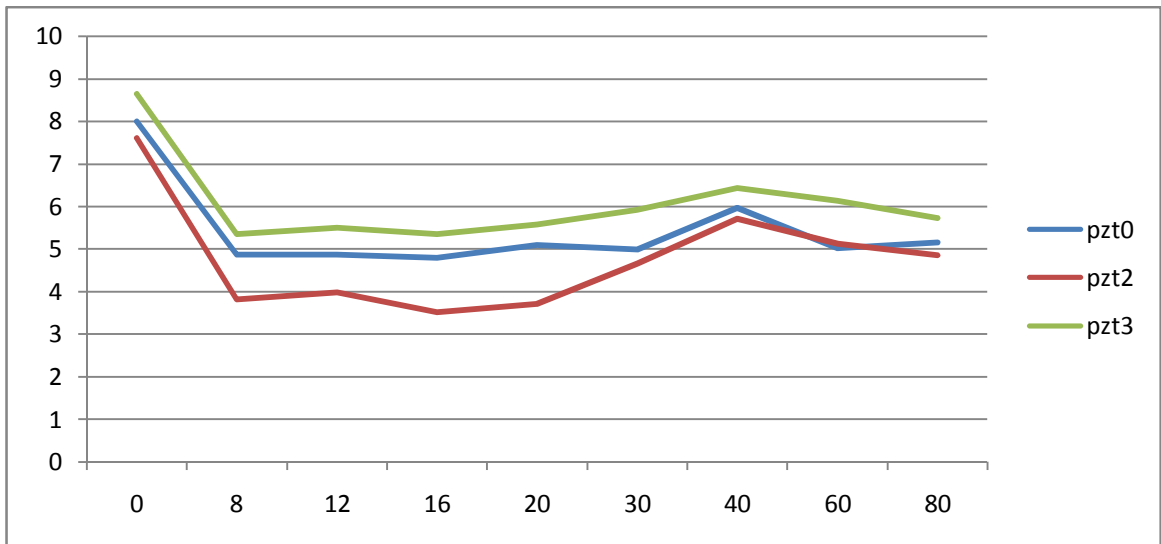


RMSD για αποτελέσματα με χρήση Highpass filter :

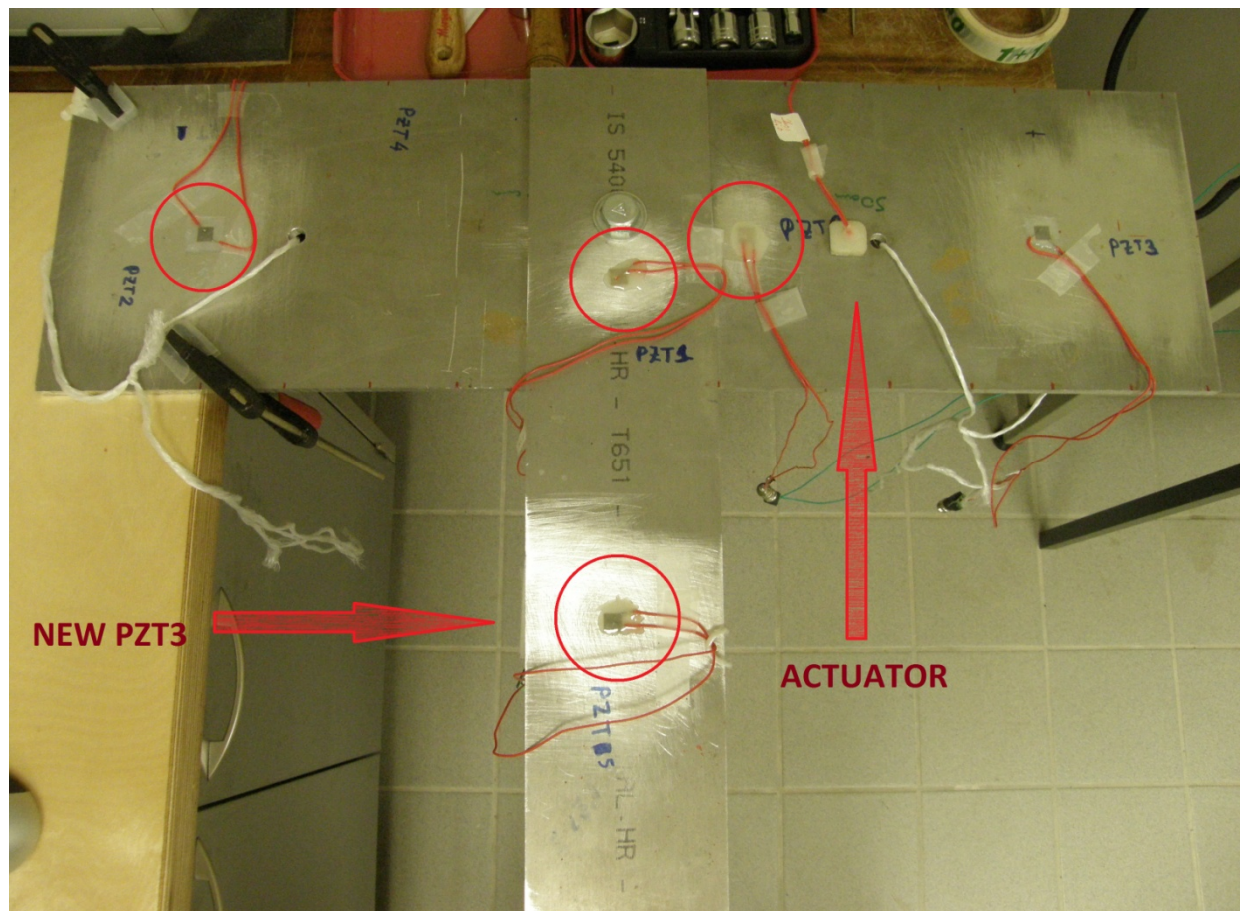




RMSD για αποτελέσματα με χρήση Highpass και Lowpass filter :

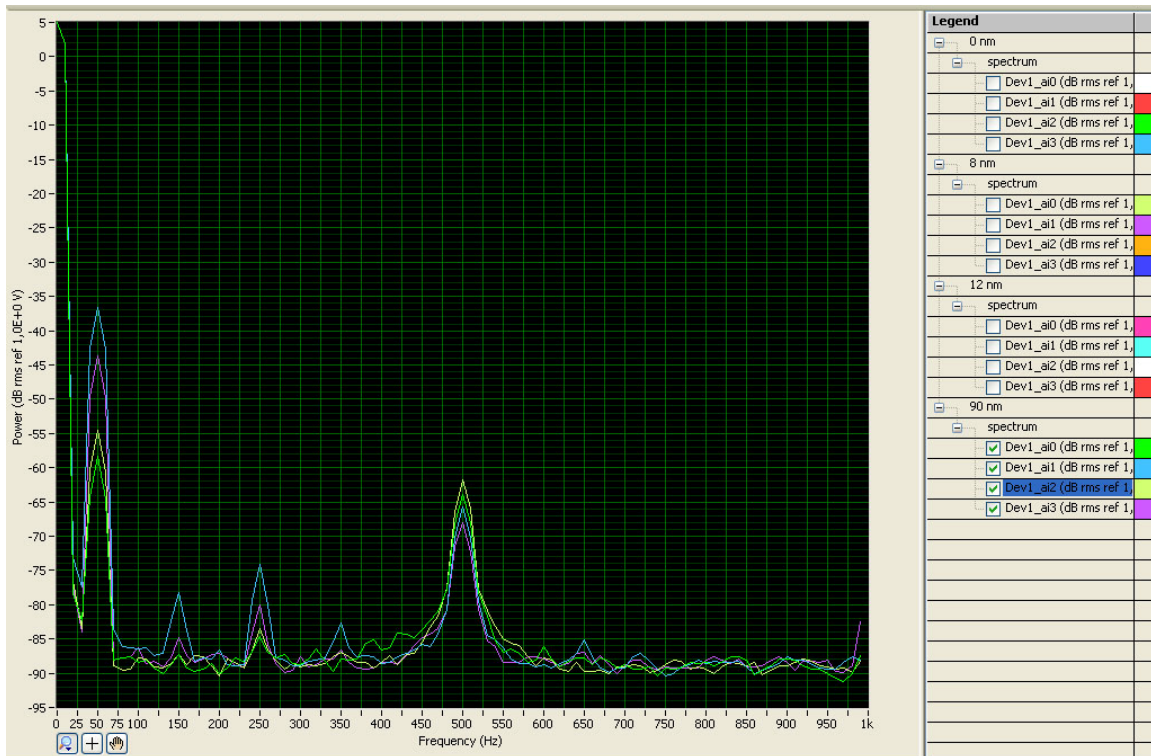
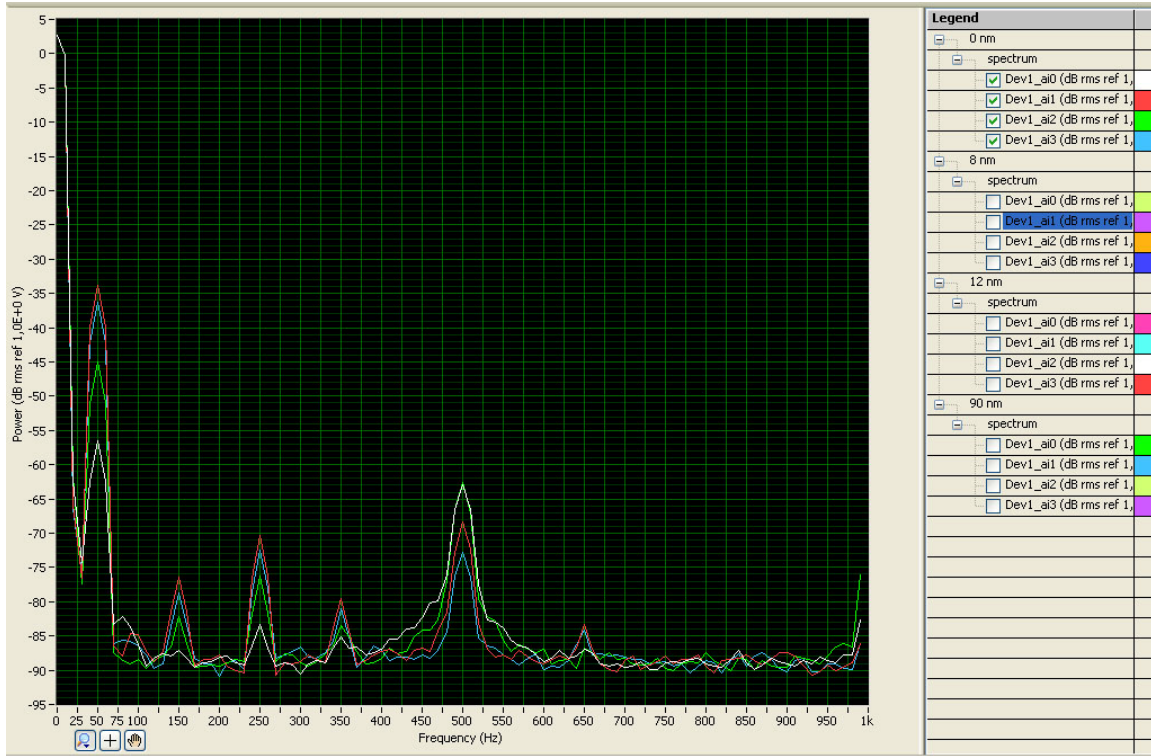


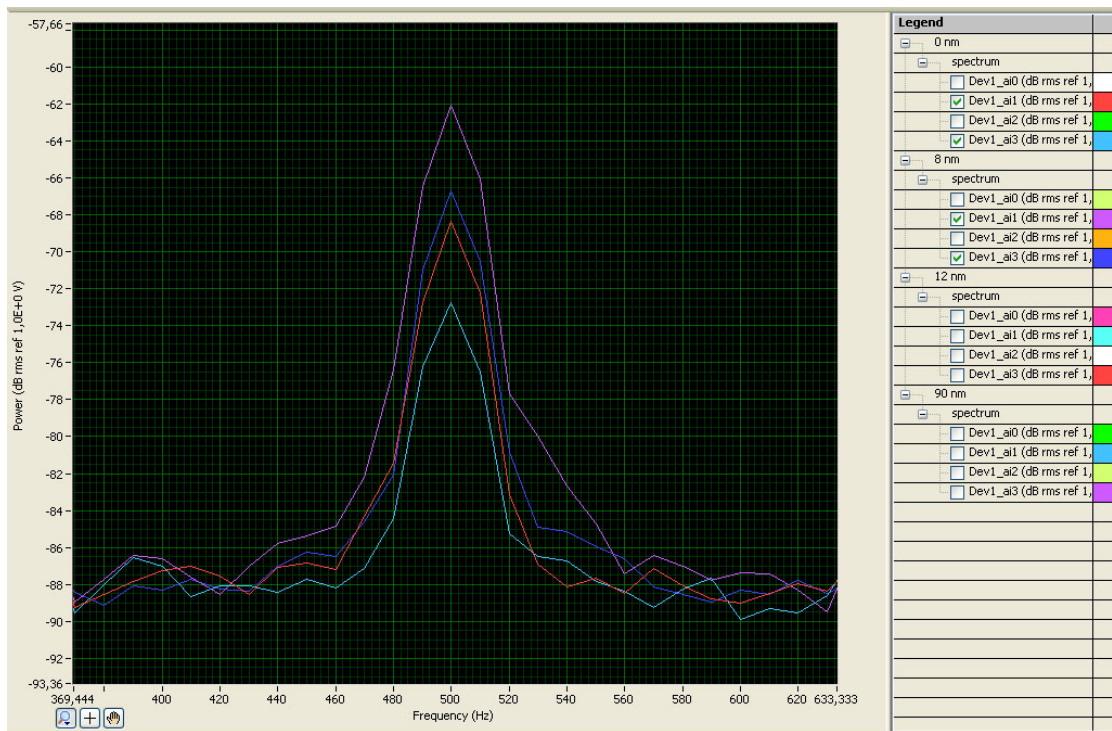
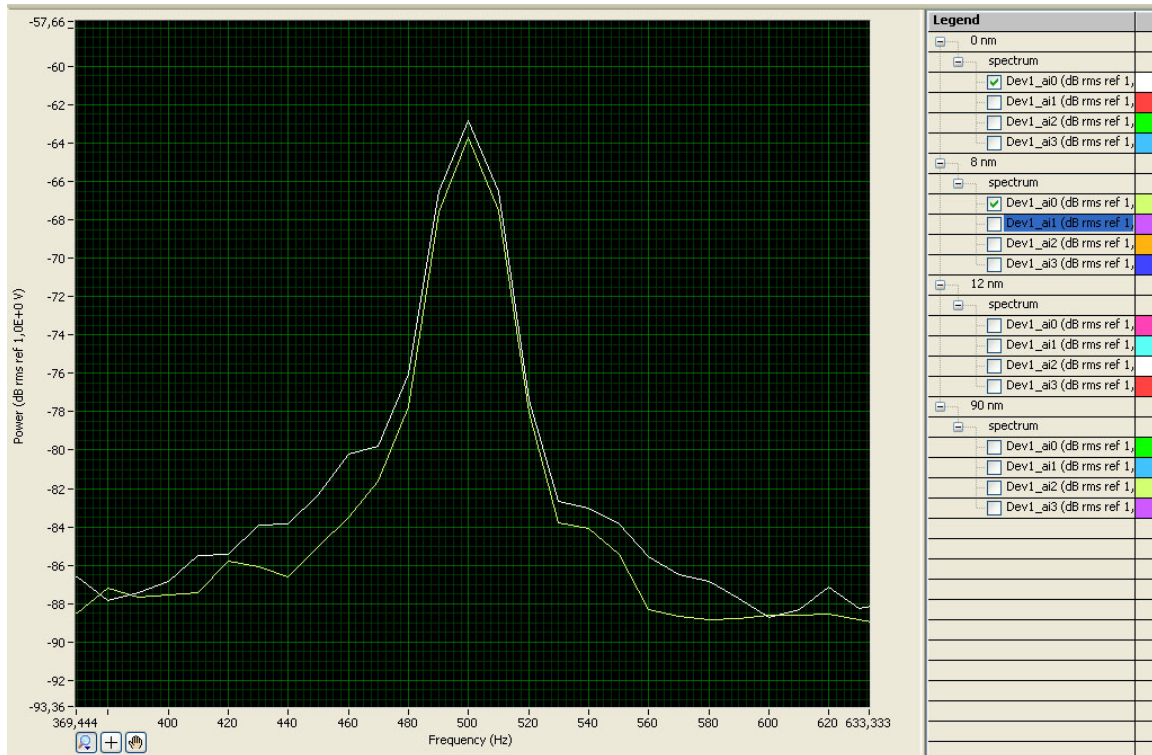
Στη συνέχεια δοκιμάσαμε το ίδιο πείραμα αλλάζοντας τη θέση του actuator και των sensors στο πείραμά μας. Η ακόλουθη διάταξη τους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



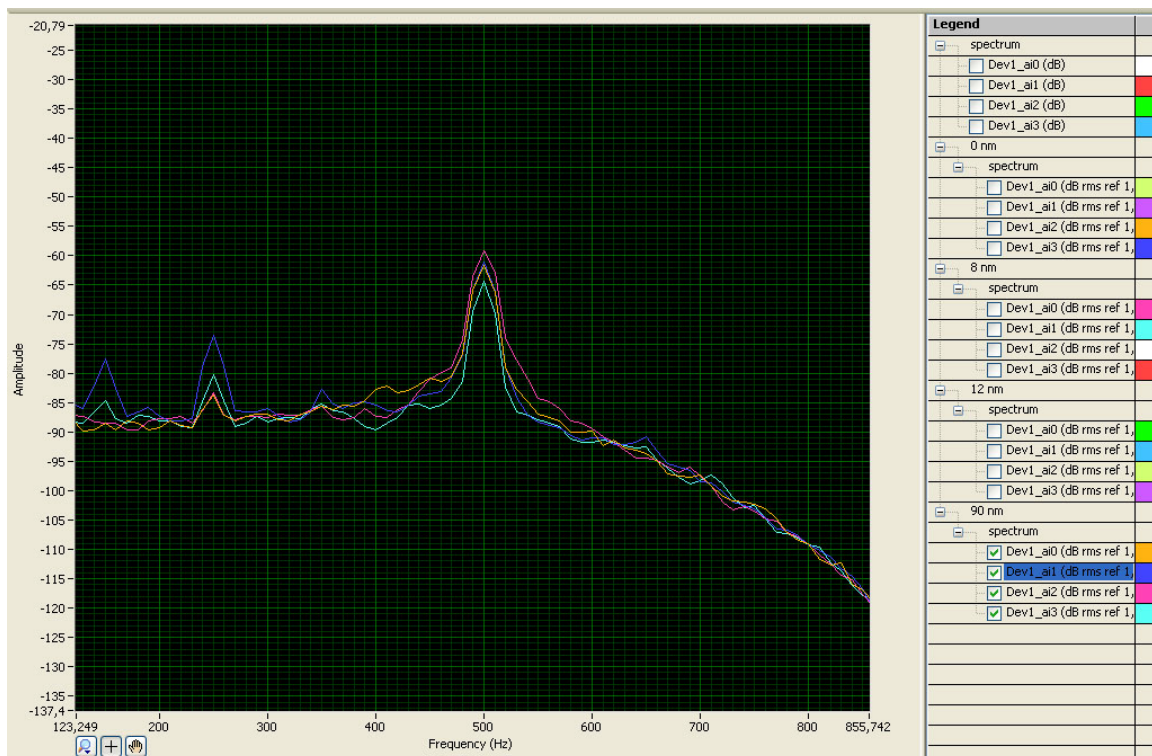
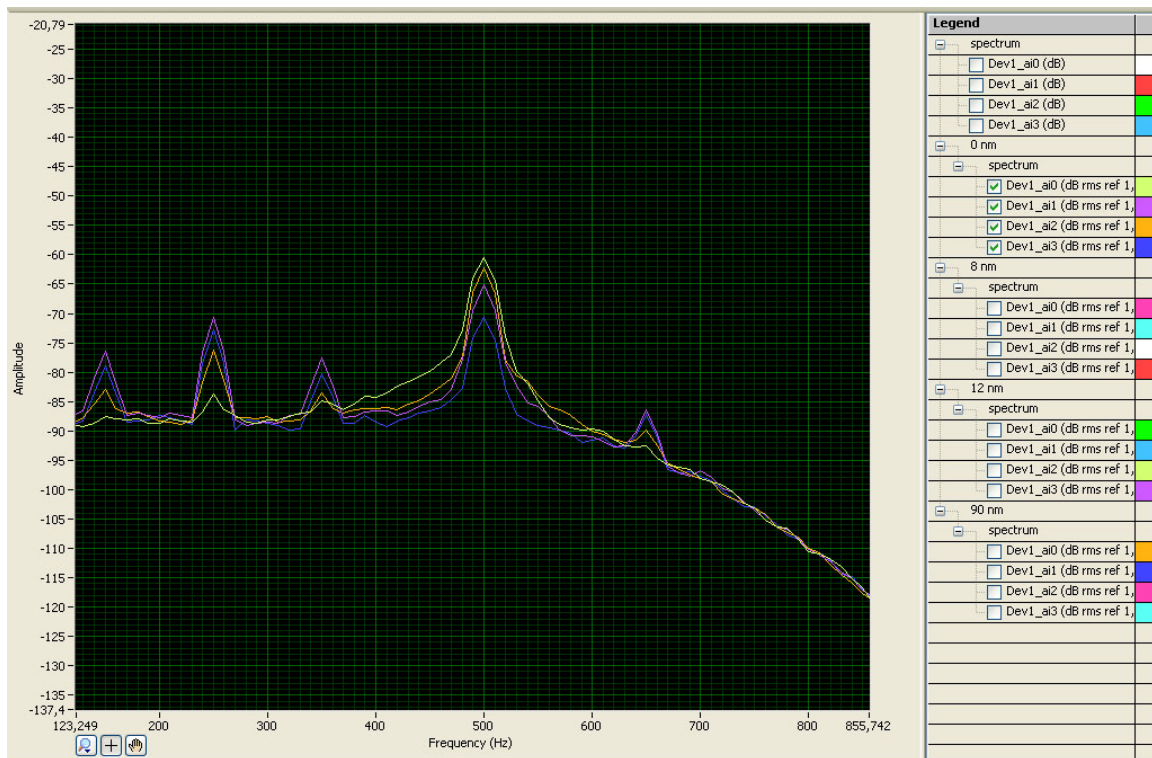
Στην συνέχεια παραθέτουμε ενδεικτικές εικόνες της φασματικής πυκνότητας για την νέα διάταξη διεγέρτη-αισθητήρων.

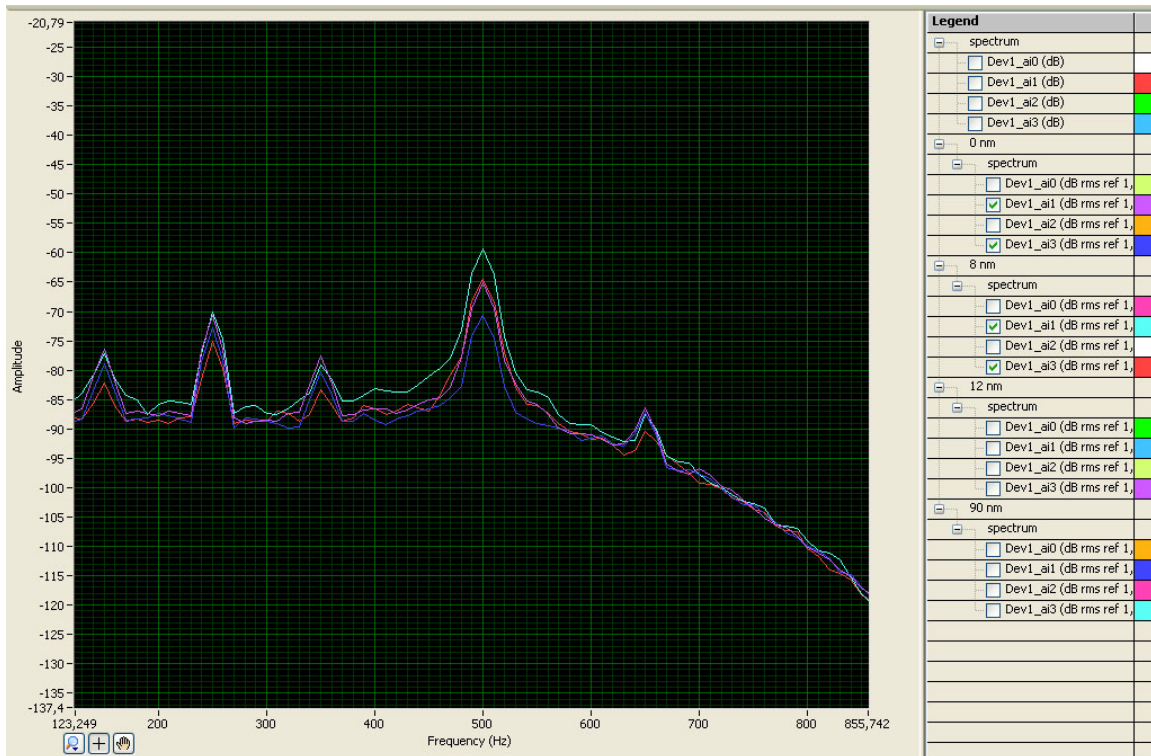
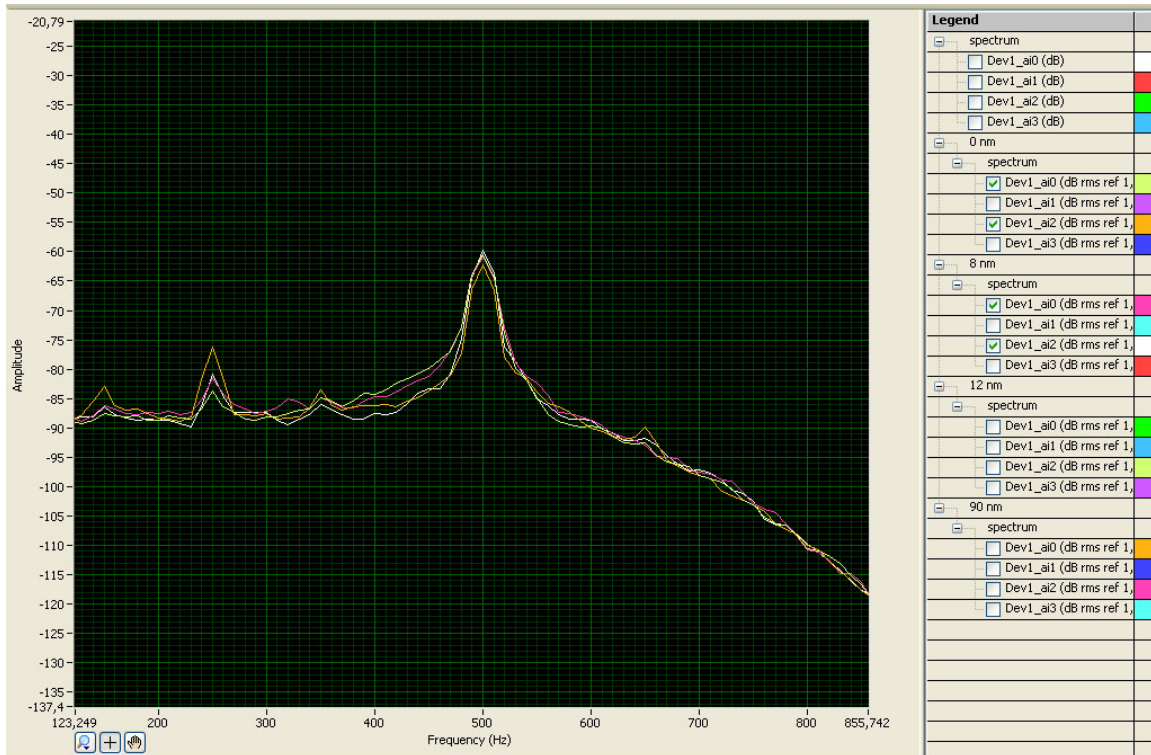
Φάσμα πυκνότητας για μετρήσεις χωρίς φίλτρα:



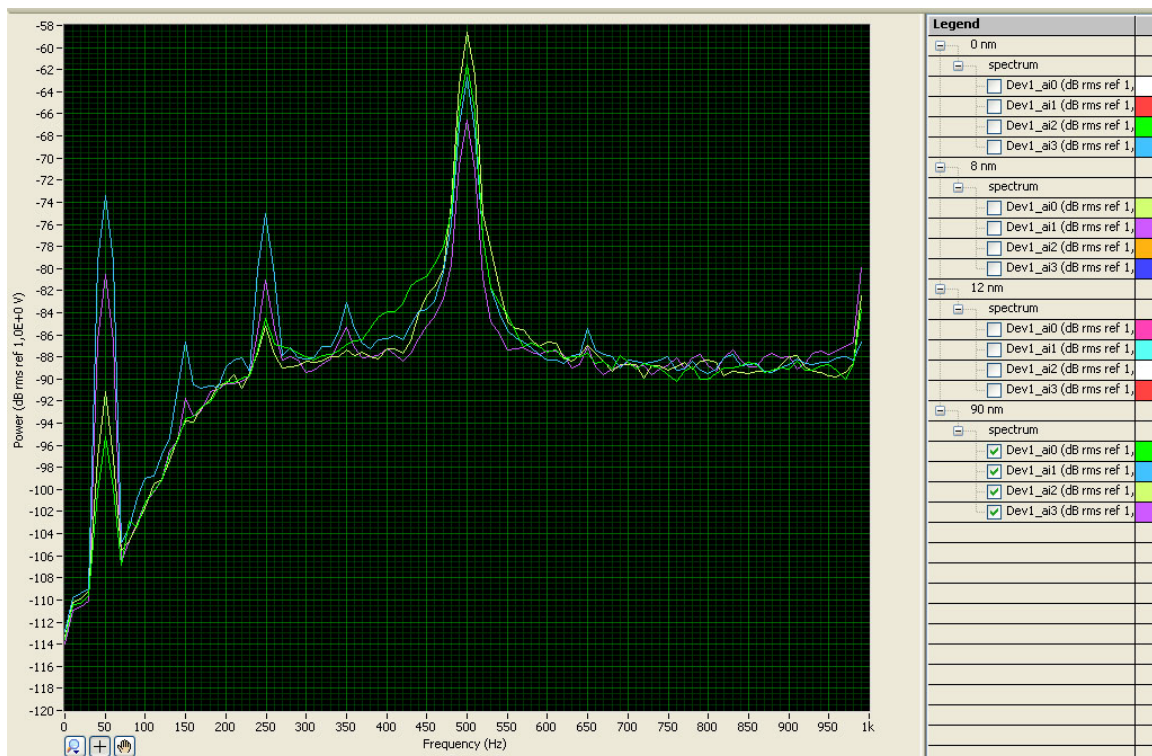
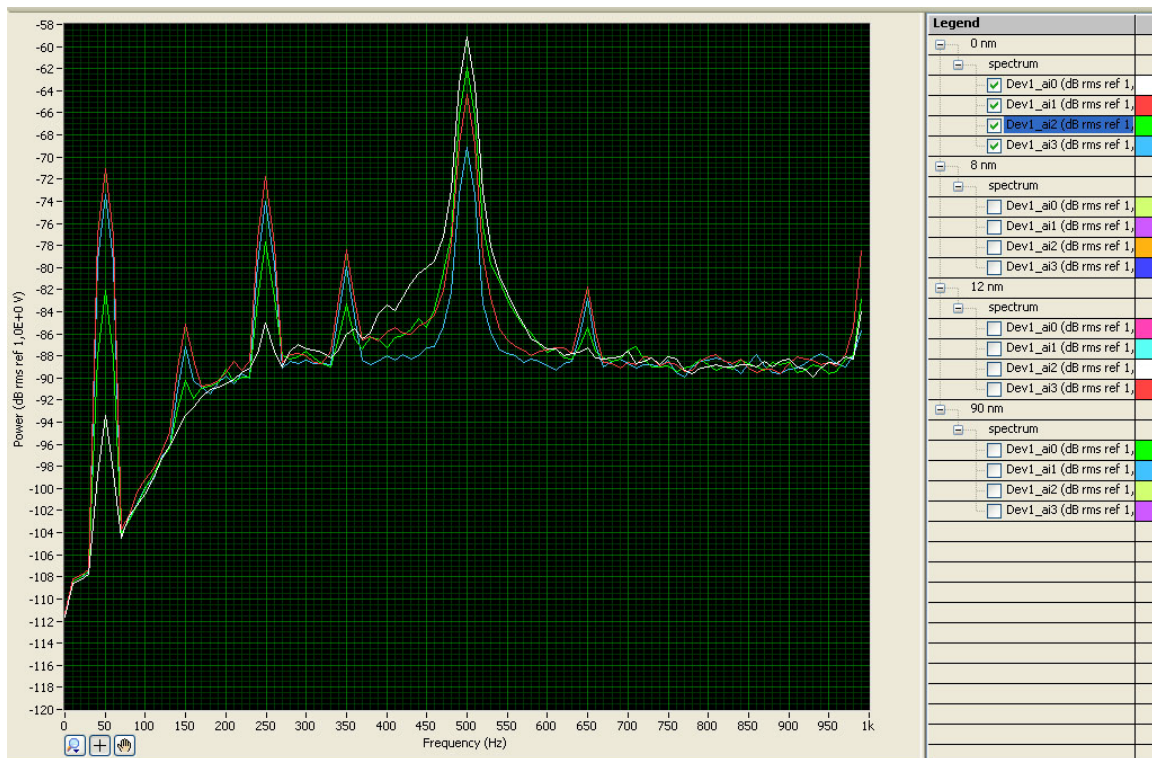


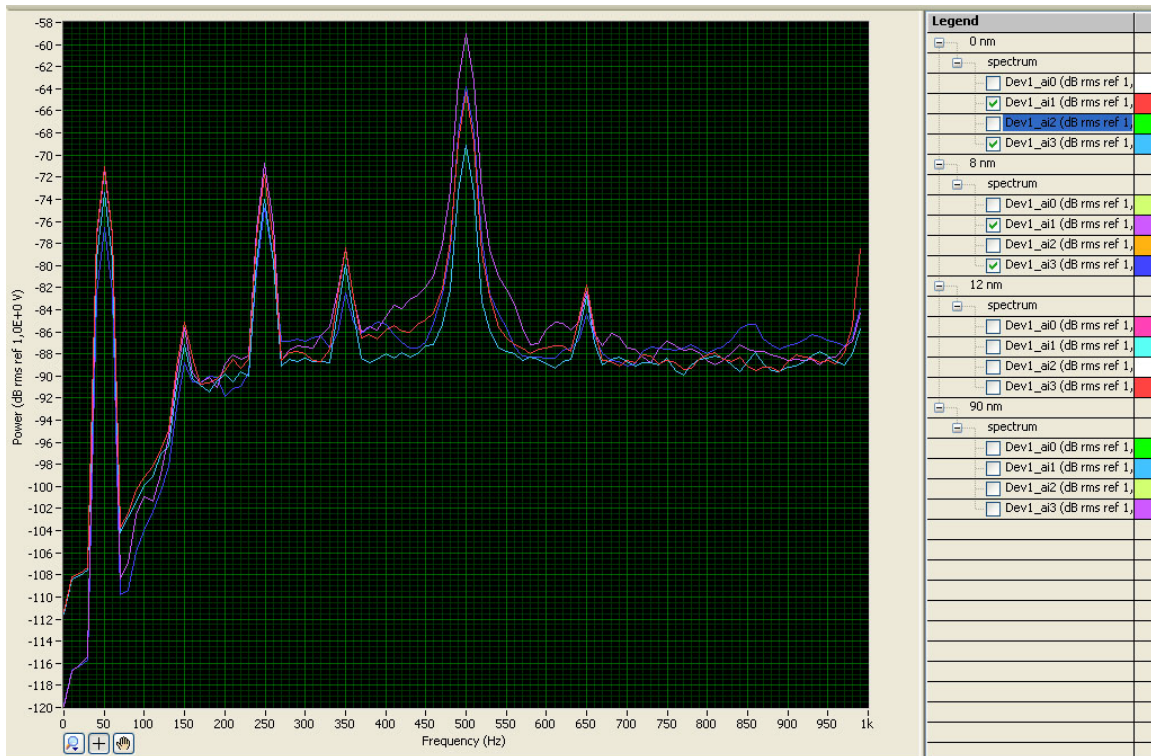
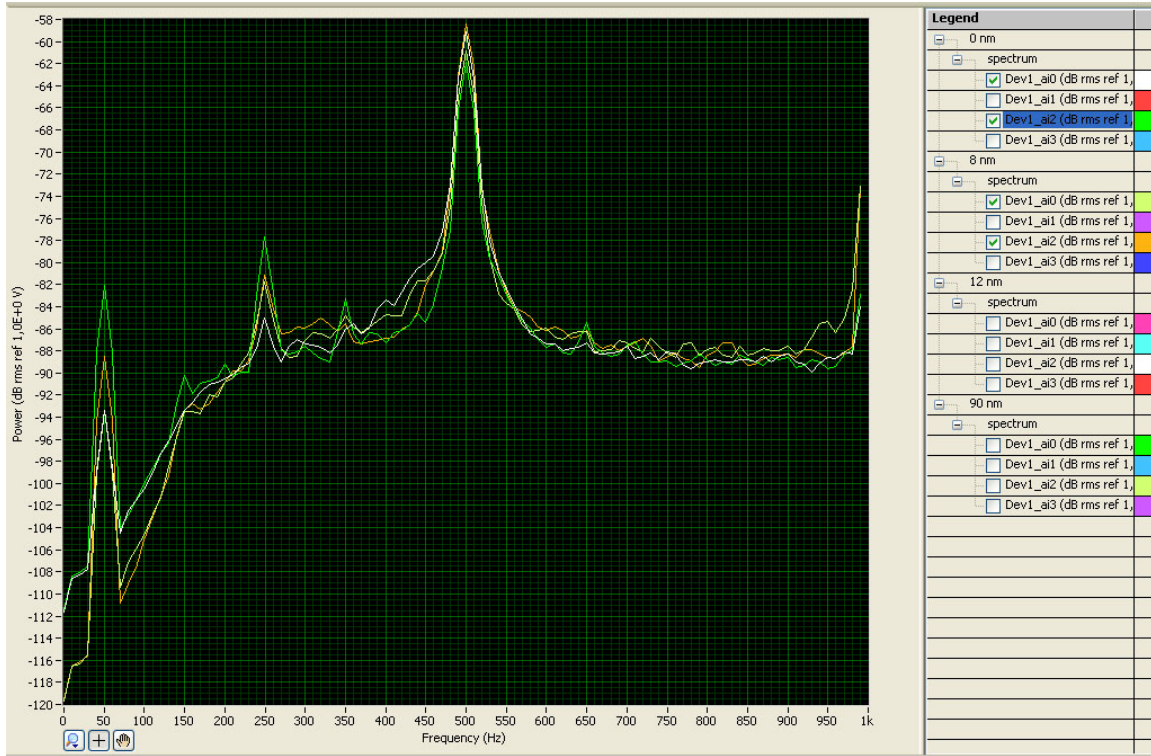
Φάσμα πυκνότητας για μετρήσεις με Lowpass filter:



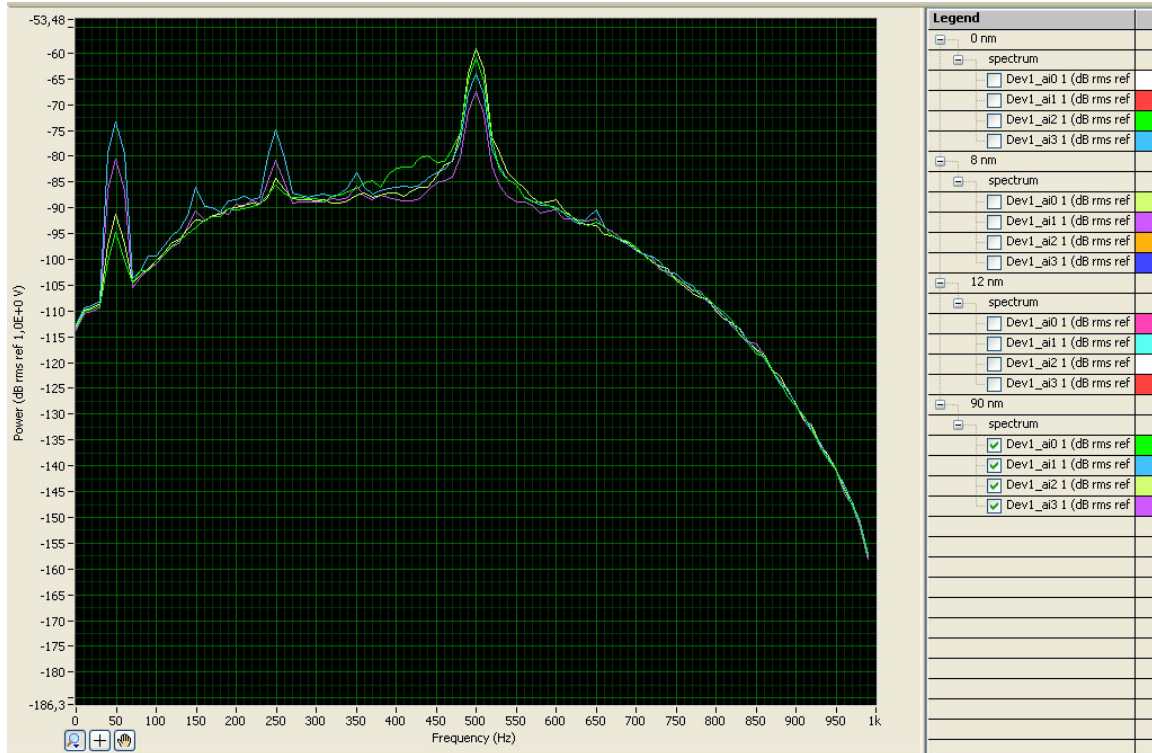
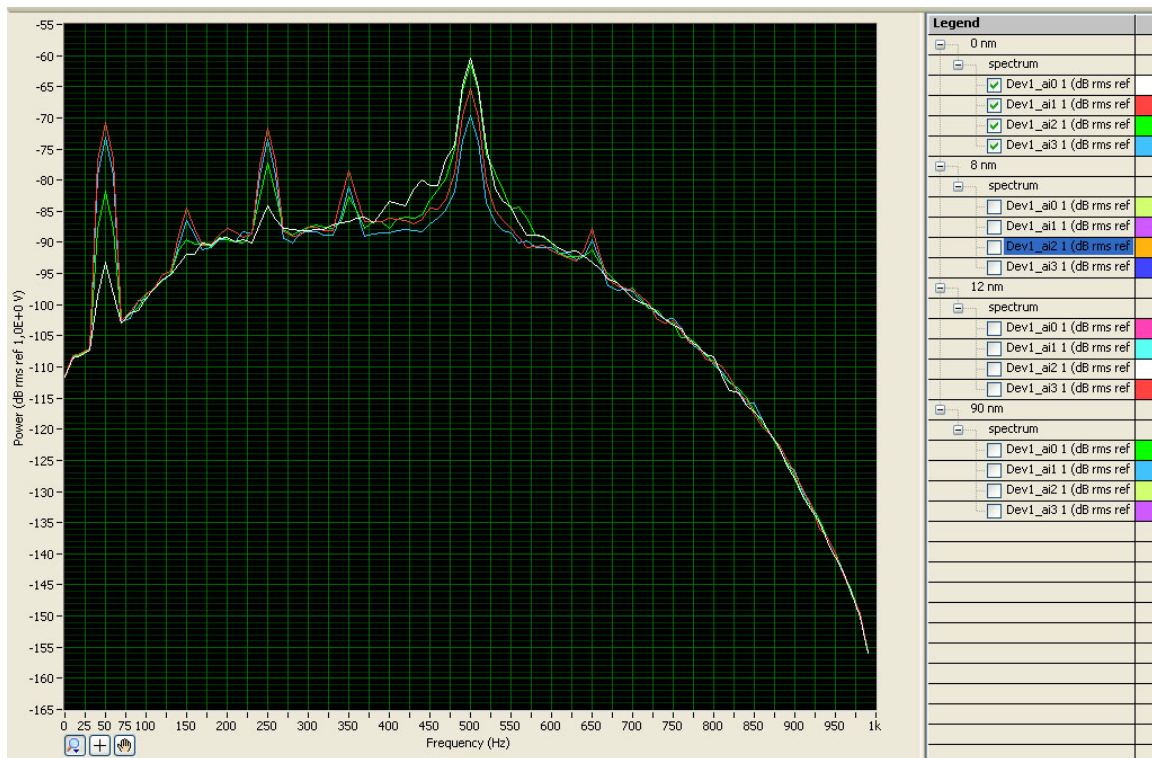


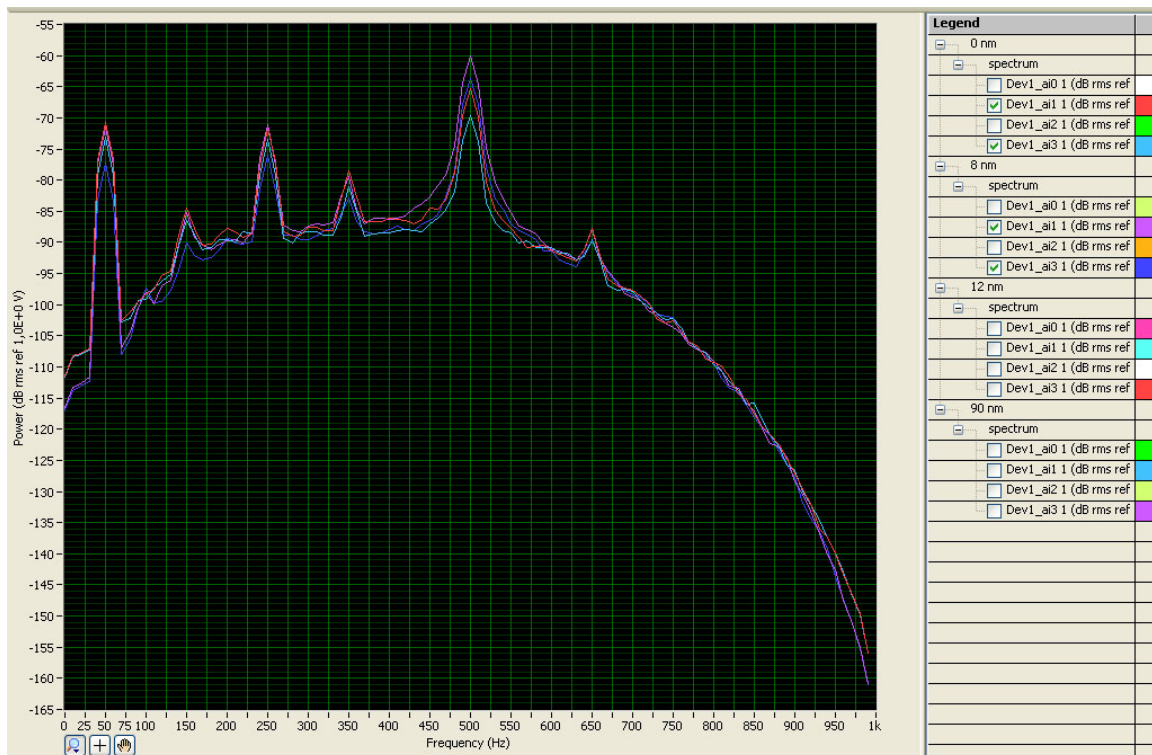
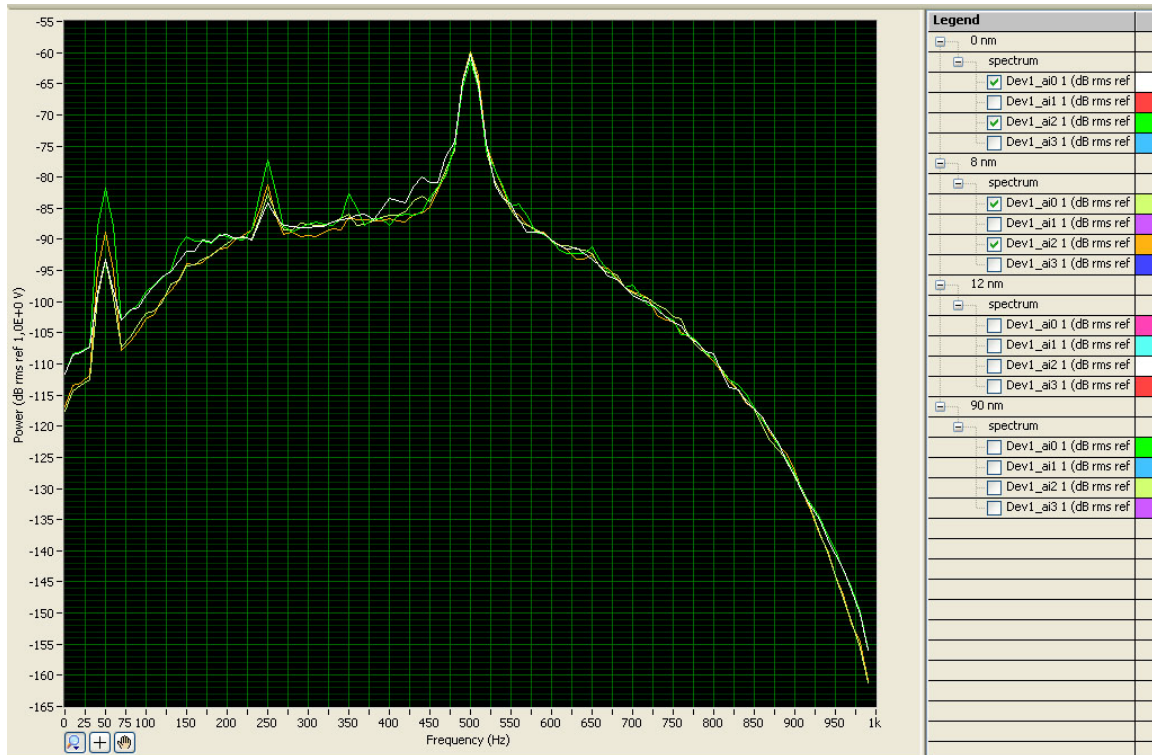
Φάσμα πυκνότητας για μετρήσεις με Highpass filter:





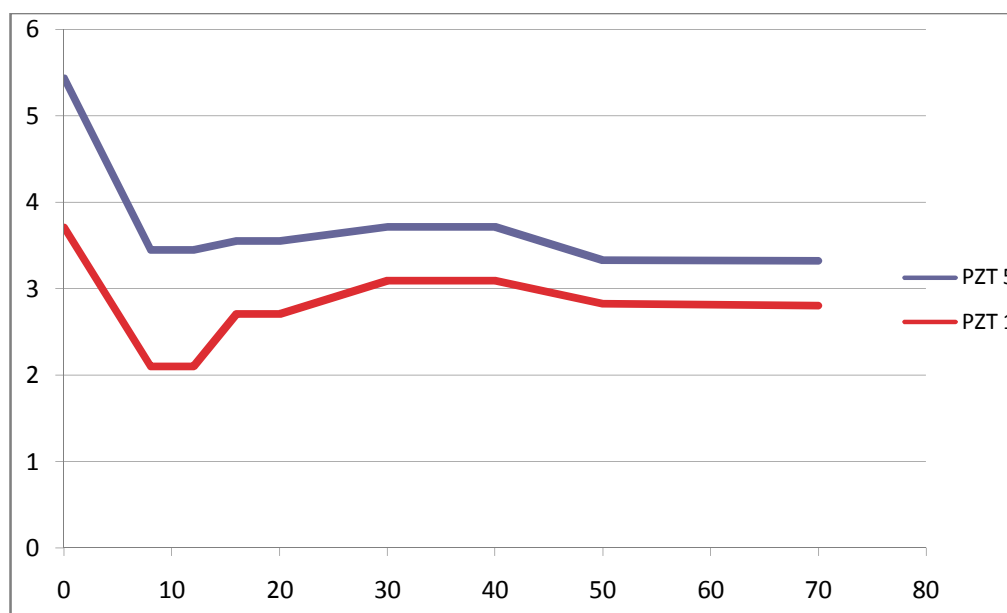
Φάσμα πυκνότητας για μετρήσεις με Highpass και Lowpass filter:





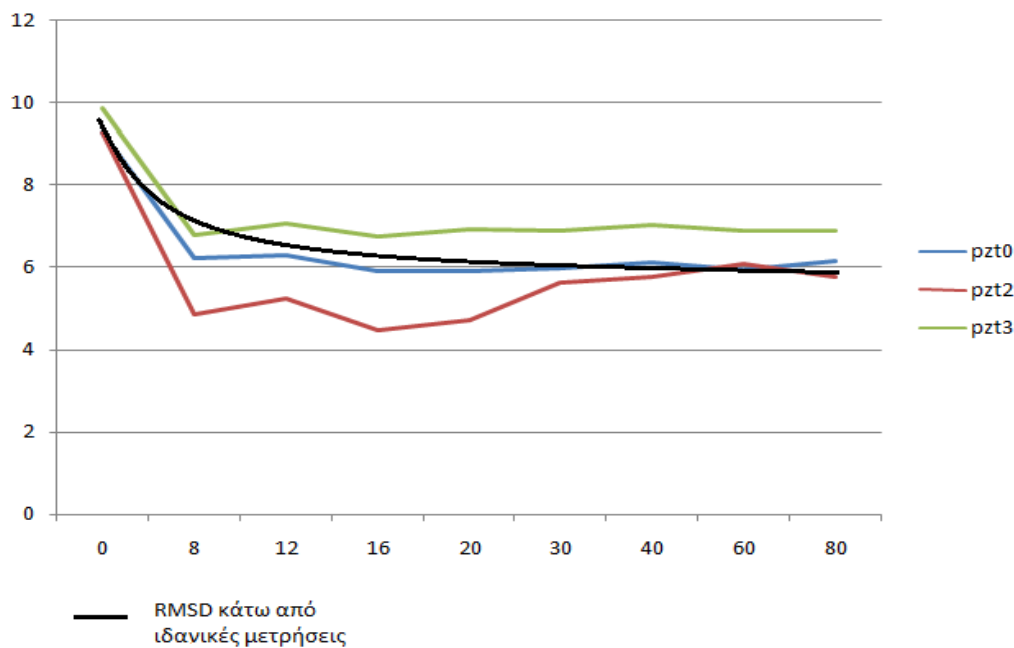
Παρακάτω παραθέτουμε ενδεικτικό γράφημα για το RMSD για τα pzt 1 και pzt5 χωρίς χρήση φίλτρου. Τις τιμές του RMSD τις πήραμε με reference το pzt 2 και για συχνότητες κοντά στο σήμα που στέλνουμε(380-620 Hz) . Παίροντας RMSD για συχνότητες κοντά στο σήμα που στέλνουμε μπορούμε να πετύχουμε καλύτερη

απομόνωση του αποτελέσματος από εξωτερικούς θορύβους(όπως τη συχνότητα του ρεύματος που παράγει το ηλεκτρικό κύκλωμα).



Όπως παρατηρούμε με την παραπάνω μέθοδο που αναπτύξαμε μπορούμε σε ζωντανό χρόνο(live monitoring) χωρίς να χρειαζόμαστε προηγούμενες μετρήσεις(μετρήσεις με πλήρως σφιγμένη την κοχλιοσύνδεση) να βρίσκουμε πότε η κοχλιοσύνδεση έχει λασκάρει(μέχρι σφίξιμο 10Nm). Η μέθοδος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κρίνουμε με αξιοπιστία πότε η κοχλιοσύνδεση βρίσκεται σφιγμένη σε ροπές από 10Nm και παραπάνω. Αυτό οφείλεται στην ακρίβεια της κάρτας που χρησιμοποιούμε. Επίσης άμα στέλναμε σήμα σε μεγαλύτερα Hz ίσως λαμβάναμε καλύτερα αποτελέσματα σε μεγαλύτερες ροπές αλλά θα χάναμε την ακρίβεια στις μικρές ροπές επειδή σε χαμηλές συχνότητες ελέγχουμε στήριξη.

Στον παρακάτω διάγραμμα δείχνουμε την μορφή που περιμένουμε να έχουν τα αποτελέσματα με ιδανικές μετρήσεις με μεγάλη ακρίβεια:



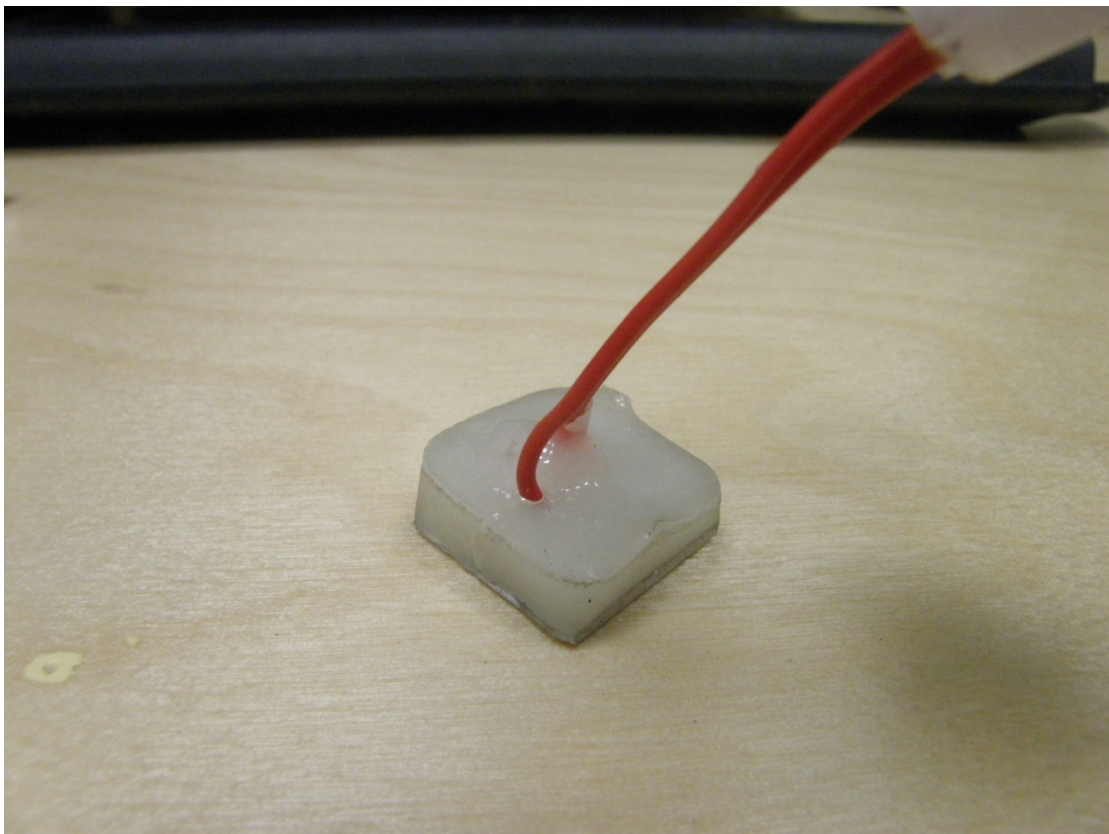
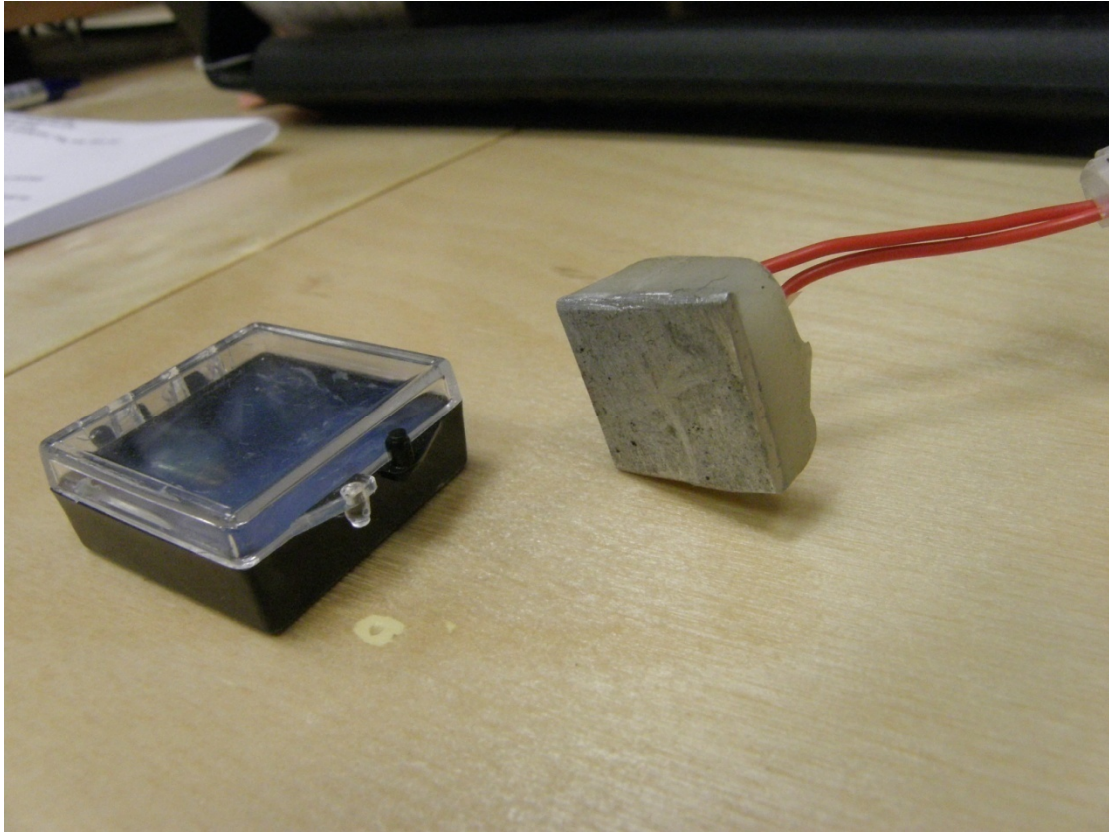
2.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ «ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ»

Για τις ανάγκες του πειράματός μας αναπτύξαμε έναν «μεταφερόμενο αισθητήρα» ο οποίος στην ουσία έχει την ίδια χρήση με τα επιταχυνσιόμετρα της αγοράς. Για την κατασκευή του συγκεκριμένου αισθητήρα πήραμε ένα τετράγωνο κομμάτι αλουμινίου πάχους 1.5 χιλιοστών και μήκους 2 εκατοστών στο οποίο κολλήσαμε έναν πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα στον οποίο προηγουμένως είχαμε συγκολλήσει καλώδια στους πόλους του.

Στην συνέχεια αφού το τοποθετήσαμε σε ένα τετράγωνο καλούπι το γεμίσαμε με μια στρώση (ενός εκατοστού περίπου) με εποξειδική κόλλα δυο στοιχείων με σκοπό την προστασία του πιεζοηλεκτρικού υλικού από την διάβρωση, την στεγανοποίηση του αλλά και την προστασία της ευαίσθητης συγκόλλησης μεταξύ καλωδίων και των πόλων που πιεζοηλεκτρικού. Έτσι αυτό που επιτύχαμε είναι να έχουμε έναν μεταφερόμενο αισθητήρα pzt ο οποίος τοποθετώντας την αλουμινένια επιφάνεια του όπου θέλουμε έχουμε την ικανότητα να παίρνουμε φάσμα πυκνότητας.

Δοκιμάζοντάς το με τα επικολλημένα pzt της κατασκευής μας καθώς και με επιταχυνσιόμετρα εμπορίου (κόστους γύρω στα 1000 ευρώ) πήραμε τα ίδια αποτελέσματα στα φάσματα πυκνότητας. Επίσης την σωστή λειτουργία του ως αισθητήρα την επιβεβαιώσαμε αρχικά κάνοντας εμπέδηση και λαμβάνοντας το

φανταστικό μέρος του σήματος το οποίο παρατηρήσαμε σωστή πυκνωτική λειτουργία του αισθητήρα.



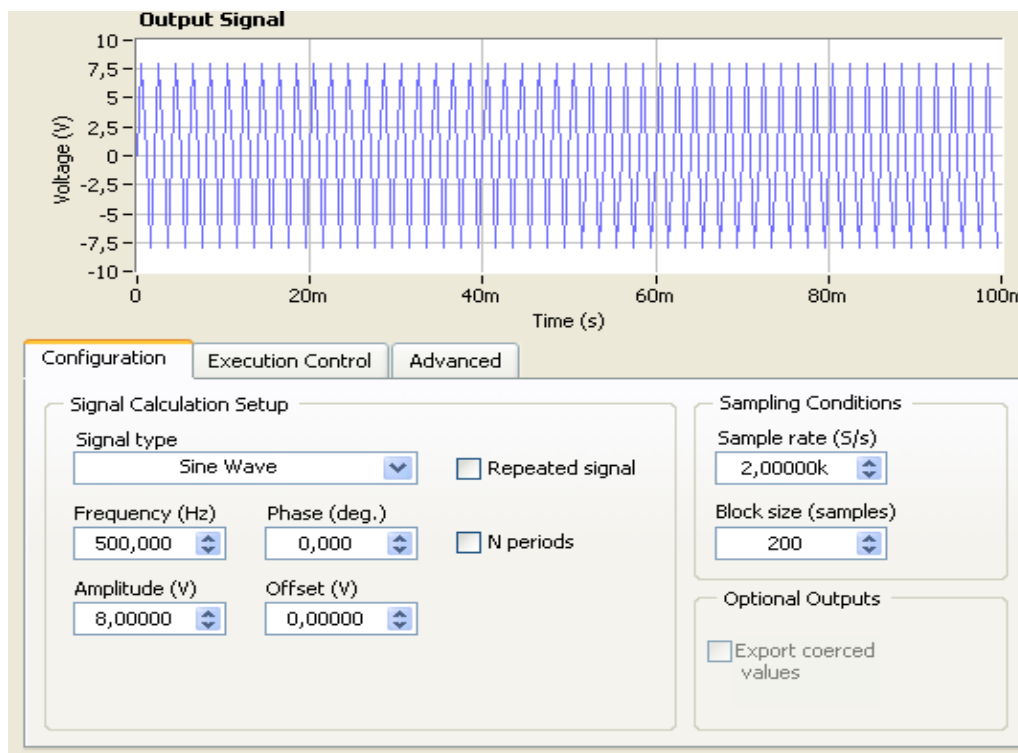
2.3 ΛΕΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ SIGNAL EXPRESS

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε αναλυτικά τα βήματα που χρησιμοποιήσαμε για την δημιουργία του προγράμματος μας στο Signal Express. Το Signal Express πρόκειται για υποπρόγραμμα που στηρίζεται στην λειτουργία του Labview της National Instruments. Στην ουσία το Signal Express απλοποιεί την επεξεργασία αποστολή και λήψη σημάτων και μας βοηθά στην αποφυγή λειτουργίας στο περίπλοκο προγραμματιστικό περιβάλλον του Labview. Παρακάτω παραθέτουμε τα βήματα που χρησιμοποιήσαμε για την δημιουργία του προγράμματος με το οποίο πήραμε τα αποτελέσματα του πρώτου μέρους του πειράματος μας.

Το πρώτο βήμα(step) είναι η δημιουργία σήματος.

Add step → Acquire Signals → DAQmx Acquire → Analog Input → Voltage

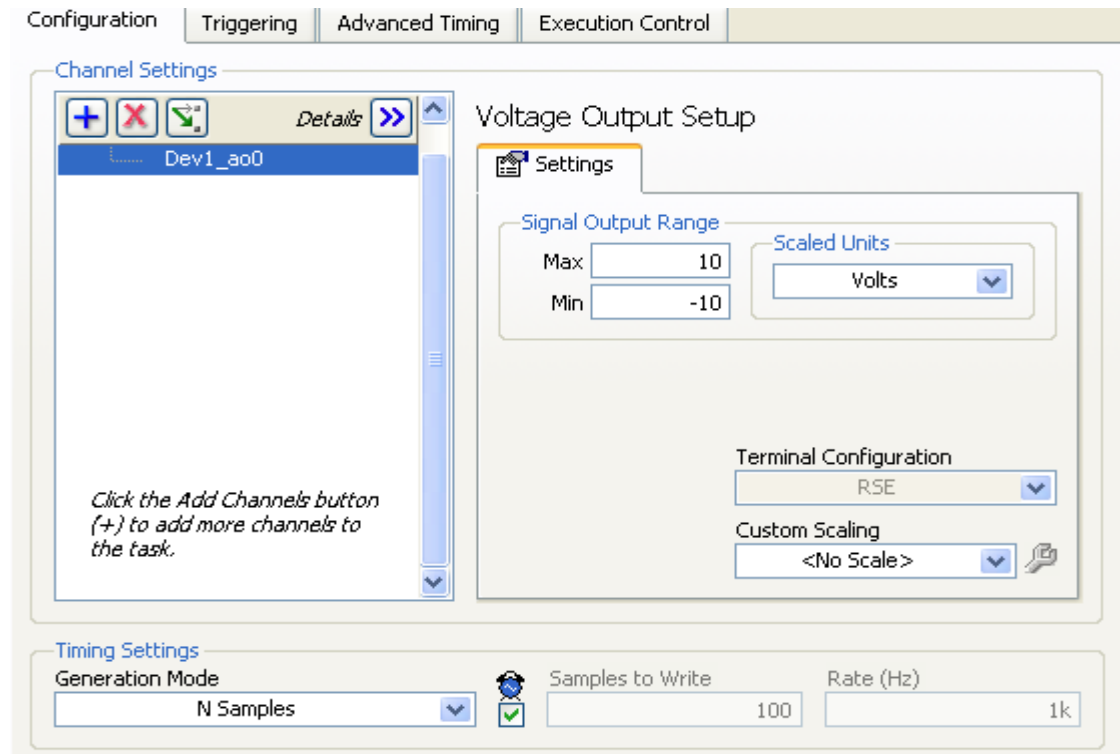
Στο παράθυρο που εμφανίζεται βάζουμε ημιτονοειδές σήμα με συχνότητα 500Hz ένταση 5 V. Στον πίνακα του sampling condition βάλουμε 2k Sample rate και 200 samples.



Αποστολή σήματος.

Add step → Generate signals → DAQmx generate → Analog Output → Voltage

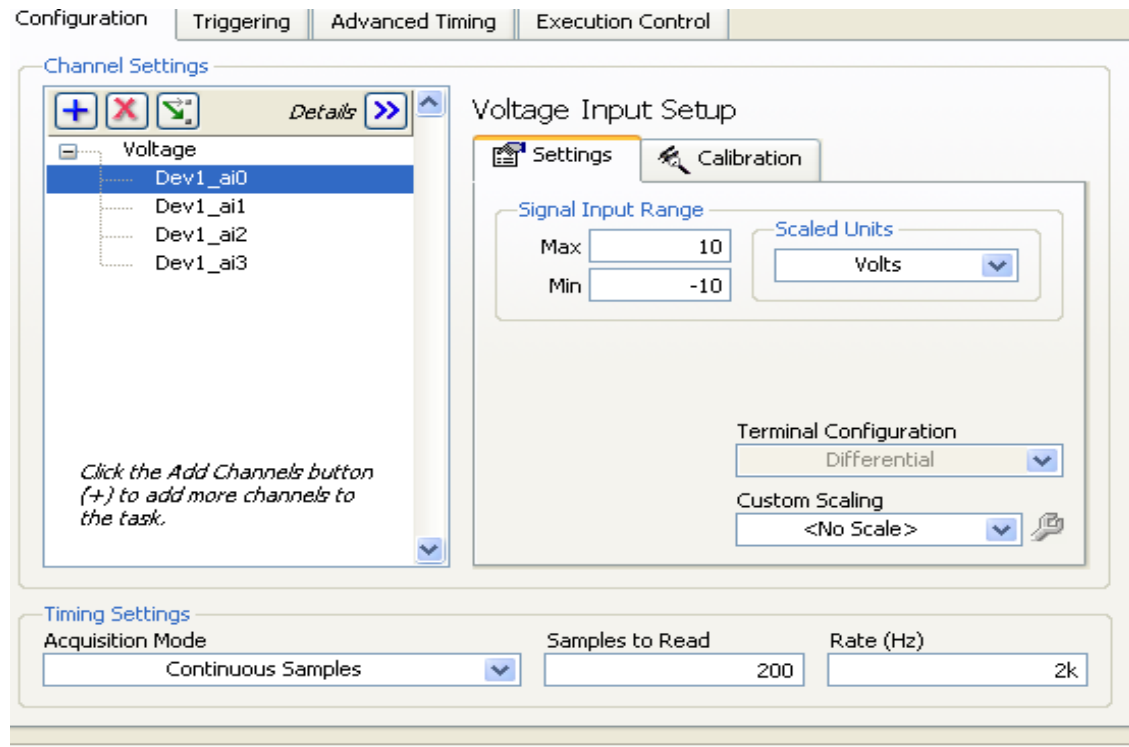
Στο παράθυρο που εμφανίζεται επιλέγουμε το Dev1_ao0 που αντιστοιχεί στο output που συνδέεται με τον actuator.



Λήψη σήματος από τους αισθητήρες.

Add step → Acquire signals → DAQmx acquire → Analog Input → Voltage

Στο παράθυρο που ακολουθεί επιλέγουμε τα Dev_ai0, Dev_ai1, Dev_ai2, Dev_ai3 που αντιστοιχούν στους αισθητήρες που χρησιμοποιήσαμε στο πείραμα μας. Στο Timing Settings βάζουμε 2k Rate(Hz) με 200 samples to read.



Εισαγωγή φίλτρων.

Στα σήματα που λαμβάνουμε από τους αισθητήρες βάζουμε φίλτρα έτσι ώστε να μειώσουμε τον θόρυβο σε διάφορες μπάντες συχνοτήτων. Φτιάξαμε τέσσερα διαφορετικά προγράμματα στα τρία από τα οποία χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά φίλτρα και στο τέταρτο δεν χρησιμοποιήθηκε κανένα φίλτρο.

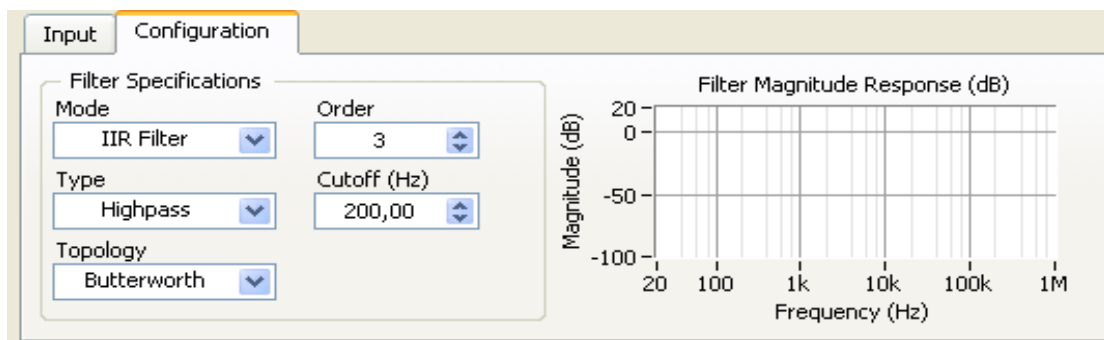
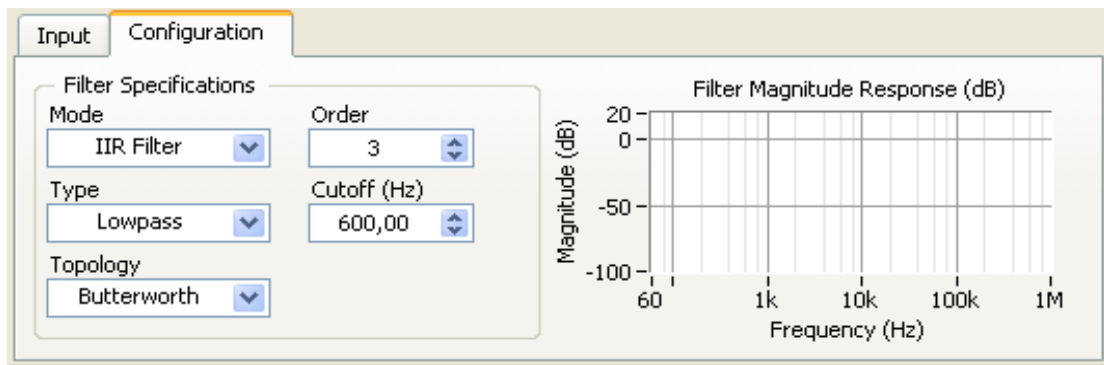
Για την εισαγωγή φίλτρων:

Add Step → Processing → Analog signals → Filter

Πρώτο πείραμα. Χρησιμοποιούμε IRR Filter τύπου Highpass, τοπολογίας Butterworth με order 3 και cutoff frequency 200Hz.

Δεύτερο πείραμα. Χρησιμοποιούμε IRR Filter τύπου Lowpass, τοπολογίας Butterworth με order 3 και cutoff frequency 600Hz.

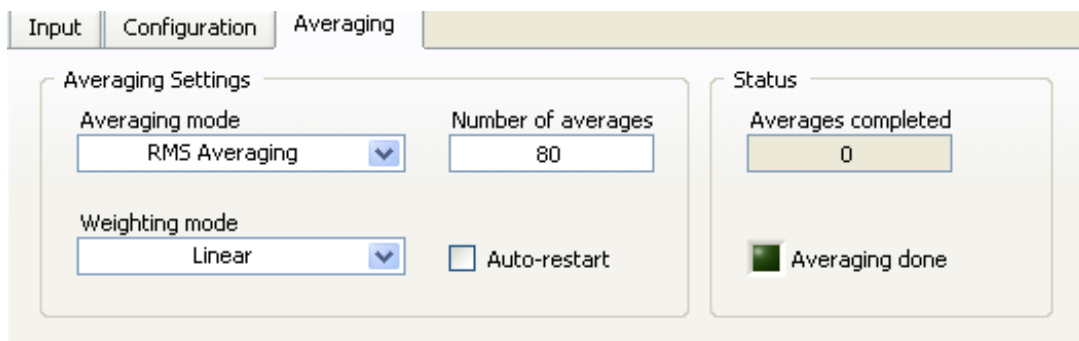
Τρίτο πείραμα. Χρησιμοποιούμε και τα δύο παραπάνω φίλτρα μαζί.



Φάσμα πυκνότητας.

Add Step → Analysis → Frequency-Domain Measurements → Power Spectrum

Στο παράθυρο του Power Spectrum ως είσοδο βάζουμε το σήμα των αισθητήρων στο τέταρτο πρόγραμμα και το φιλτραρισμένο σήμα στα άλλα τρία προγράμματα. Στο menu του configuration επιλέγουμε Hanning παραθυροποίηση. Στο menu Averaging επιλέγουμε RMS Averaging Weighting mode Linear number of averages 80.



Τα παραπάνω βήματα (step) είναι τα βασικά που χρησιμοποιήσαμε στο πρόγραμμα μας. Άλλα χρήσιμα step που χρησιμοποιήσαμε στο πείραμα μας είναι:

Amplitude and levels

Add Step → Analysis → Time-Domain Measurements → Amplitude and levels

Χρησιμεύει για την εξαγωγή τιμών για dc, rms, +peak, -peak, peak-peak.

Scaling and Conversion

Add Step → Processing → Analog signals → Scaling and Conversion

Το χρησιμοποιήσαμε για να κόψουμε το φάσμα πυκνότητας σε συγκεκριμένα κομμάτια κάτι που μας βοήθησε στην καλύτερη και πιο εποπτική μελέτη του.

Frequency Response

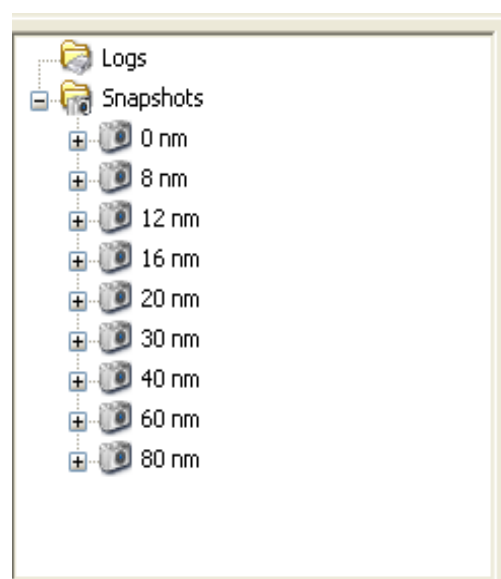
Add Step → Analysis → Frequency-Domain Measurements → Frequency Response

Συγκρίναμε την διαφορά του ημιτονοειδούς σήματος που στέλναμε με το σήμα που λαμβάνανε οι αισθητήρες.

Το πρόγραμμά μας επιλέξαμε να τρέχει για 10 sec. Η επιλογή αυτή έγινε επιλέγοντας:

Run → Configure Run → Run the program for “10” seconds.

Η πιο χρήσιμη επιλογή στην τελευταία έκδοση του Signal Express είναι η επιλογή των snapshots. Κάθε φορά που παίρναμε μετρήσεις και θέλαμε να τις κρατήσουμε επιλέγαμε αριστερό κλικ στο Data View και στη συνέχεια signals → Create snapshot. Με την επιλογή αυτή αποθηκευόντουσαν οι μετρήσεις και μπορούσαμε να ανατρέξουμε σε αυτές όποτε επιθυμούμε.



2.4 ΔΕΥΤΕΡΟ ΣΚΕΛΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

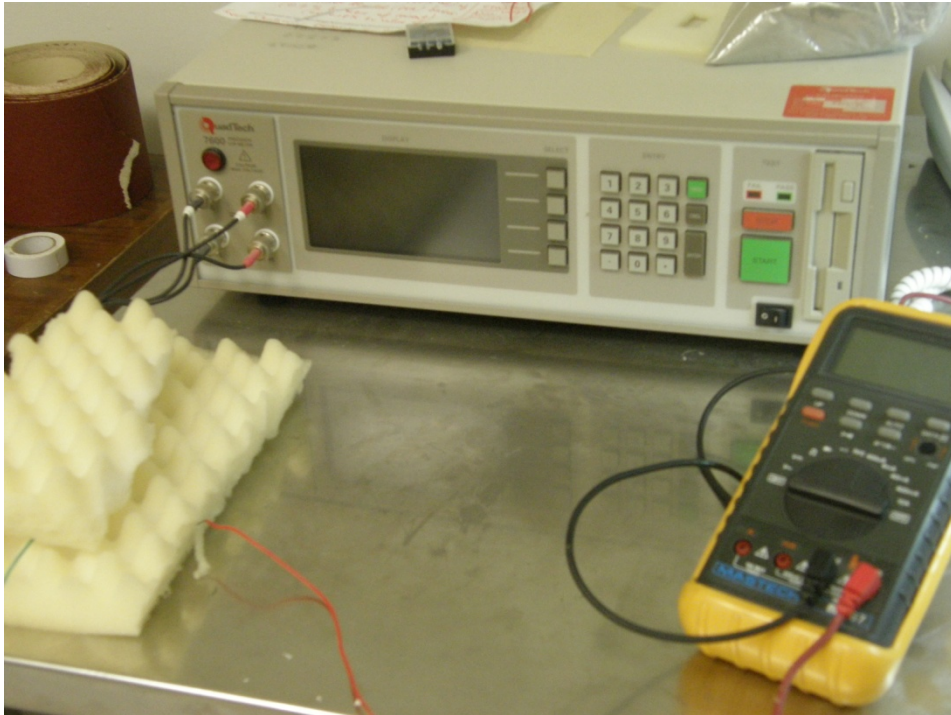
2.41 Εμπέδηση

Στο πρώτο κομμάτι του πειράματος για να ελέγξουμε την κατάσταση της κοχλιοσύνδεσης δοκιμάσαμε να στέλνουμε ένα σήμα σε χαμηλές συχνότητες και ανάλογα με το σήμα που λαμβάναμε στους αισθητήρες να κρίνουμε την κατάσταση της.

Στο δεύτερο μέρος θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο της ηλεκτρομηχανικής σύνθετης αντίστασης (εμπέδηση). Στην μέθοδο της εμπέδησης χρησιμοποιούμε ένα pzt το οποίο λειτουργεί ταυτόχρονα και ως αισθητήρας και ως διεγέρτης. Το pzt στέλνει ένα σήμα, λαμβάνει την απόκριση της κατασκευής και στην συνέχεια κάνει πάλι την ίδια διαδικασία μέχρι να καλύψει όλα το φάσμα των συχνοτήτων που έχουμε επιλέξει. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι να παίρνουμε ένα φάσμα πυκνότητας στο οποίο μπορούμε να βρούμε τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής όταν υπάρχει συντονισμός με το σήμα του διεγέρτη.

Συντονισμός στην κυματική καλείται το φαινόμενο της εξαναγκασμένης ταλάντωσης κατά το οποίο η συχνότητα του διεγέρτη ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή. Κατά το συντονισμό το σύστημα έχει το μέγιστο δυνατό πλάτος και τη μέγιστη δυνατή ενέργεια. Η κατάσταση αυτή θα ανιχνεύεται με την μέθοδο της εμπέδησης στην φασματική πυκνότητα της κατασκευής για την κάθε ροπή σύσφιξης της βίδας ως δημιουργία κορυφών μεγαλύτερου πλάτους.

Για το πείραμα μας χρησιμοποιήσαμε το Quadtech 7600 precision LCR meter το οποίο είναι πολύ αξιόπιστο και με μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις.

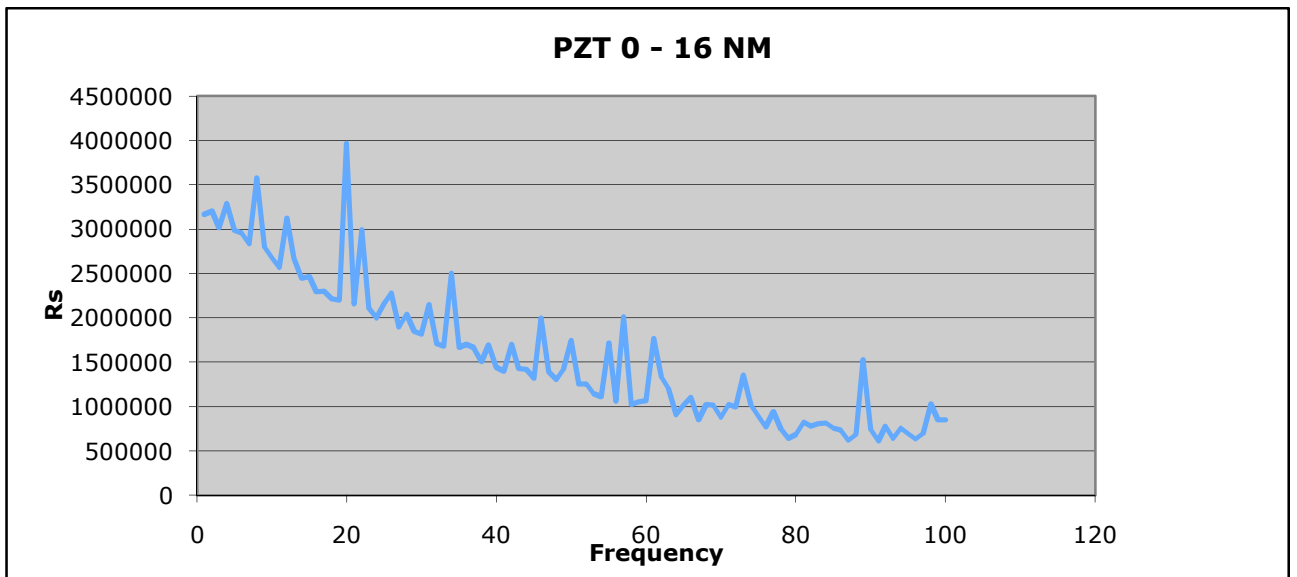
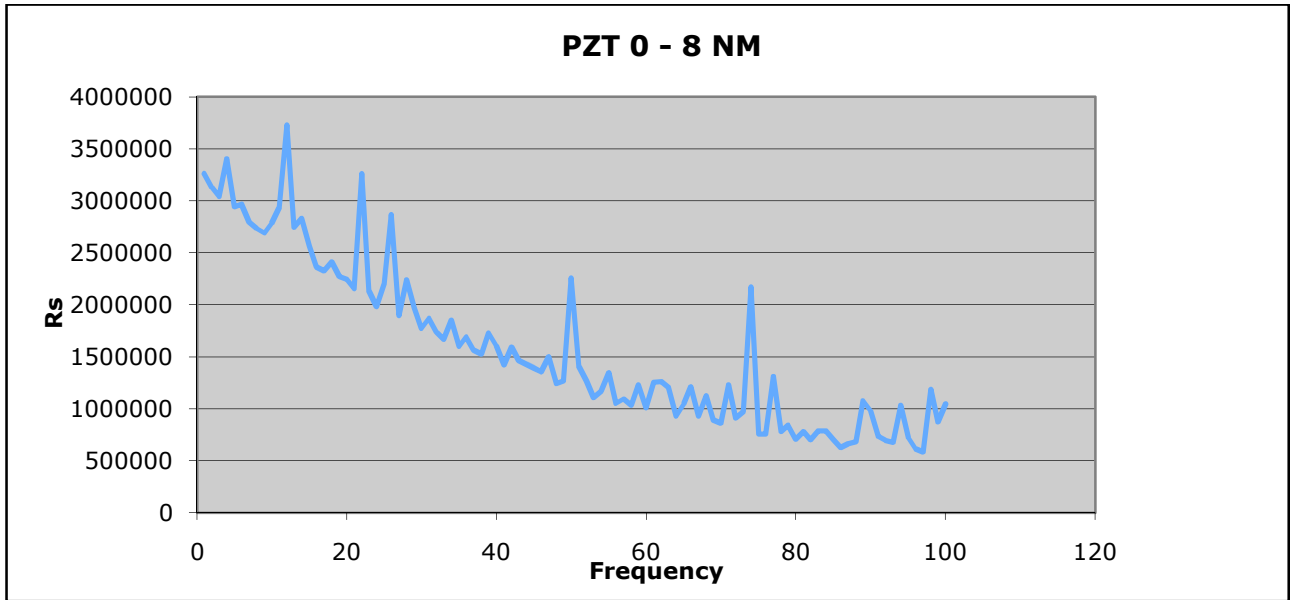
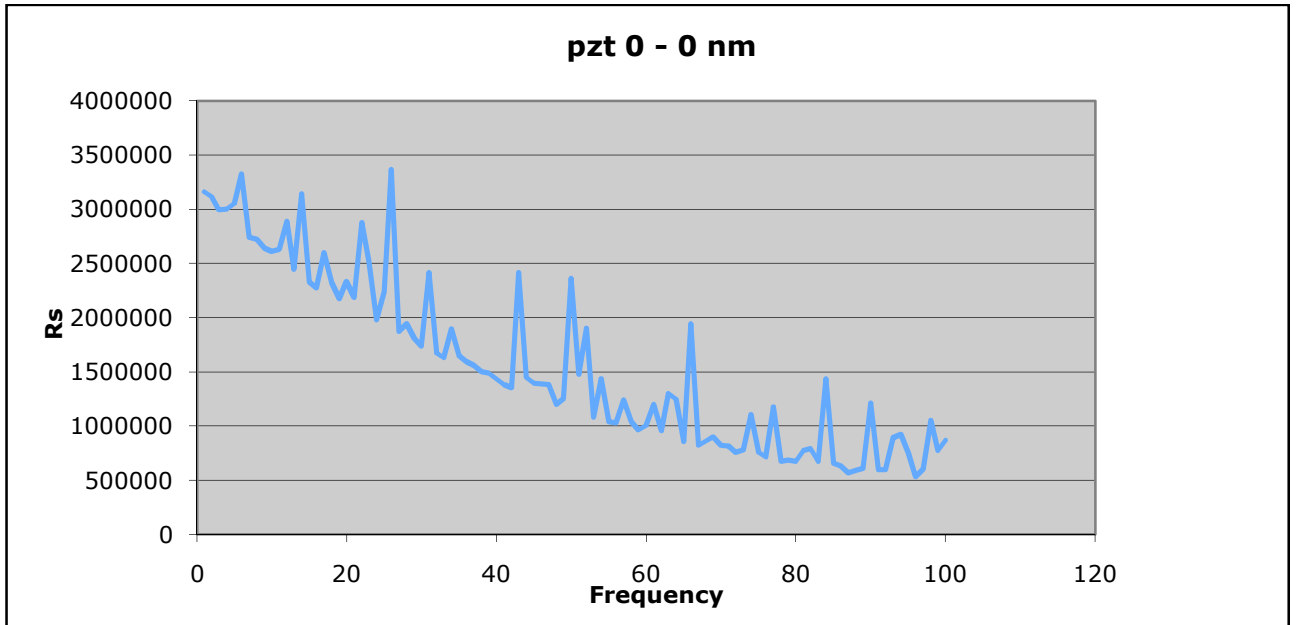


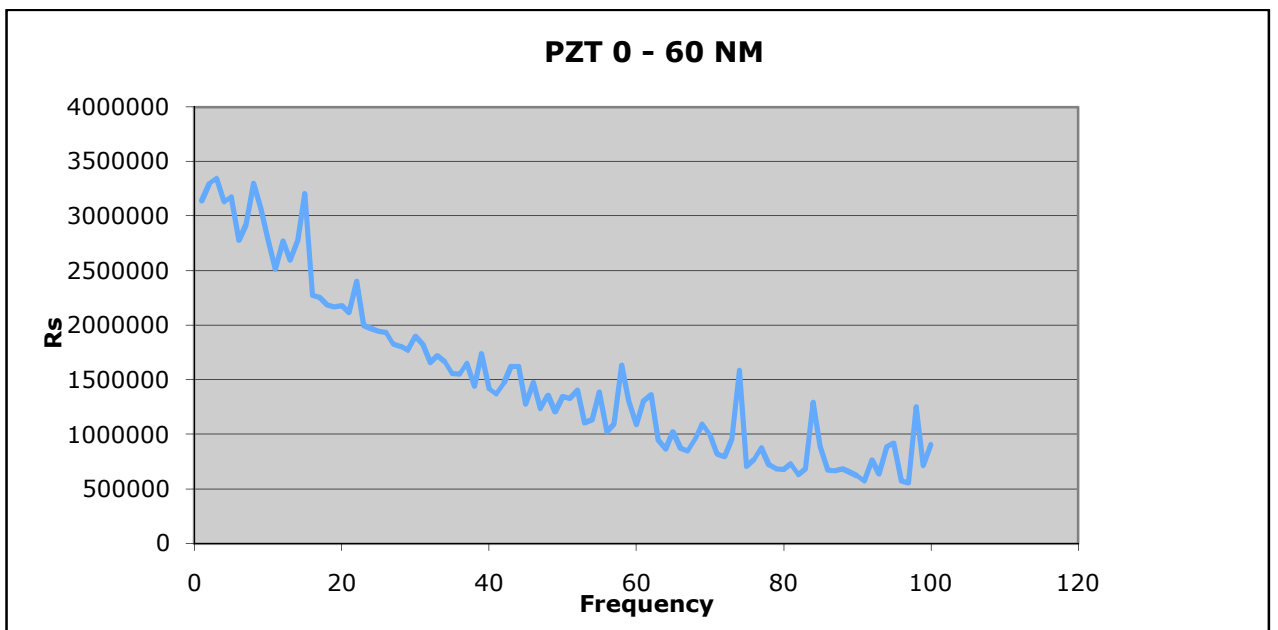
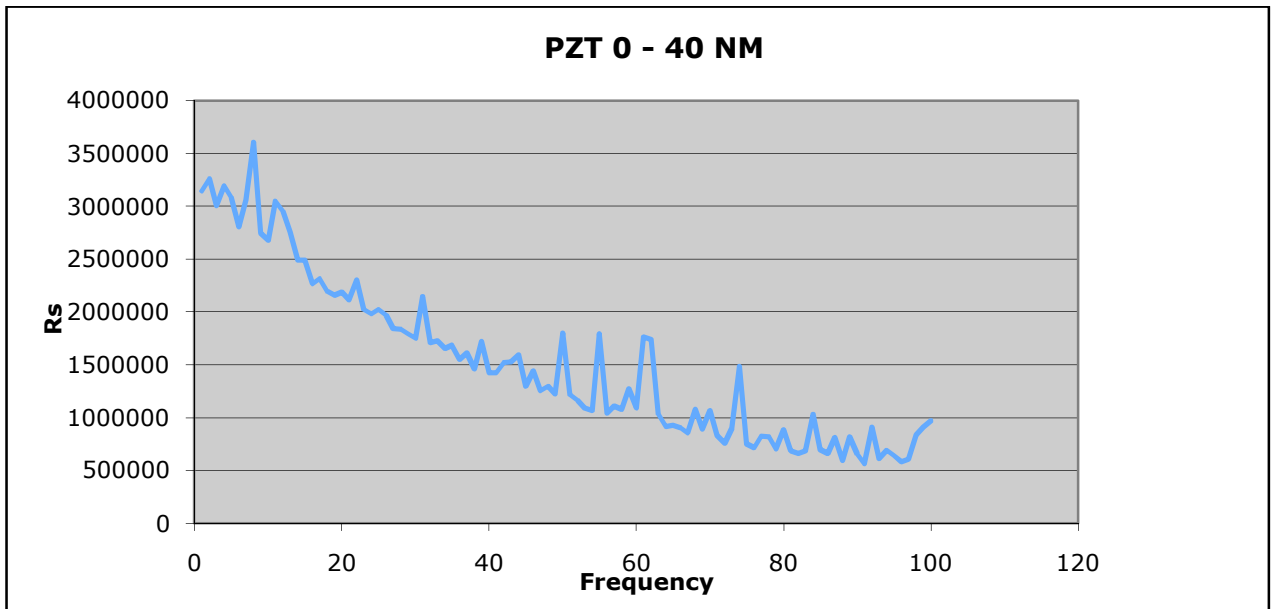
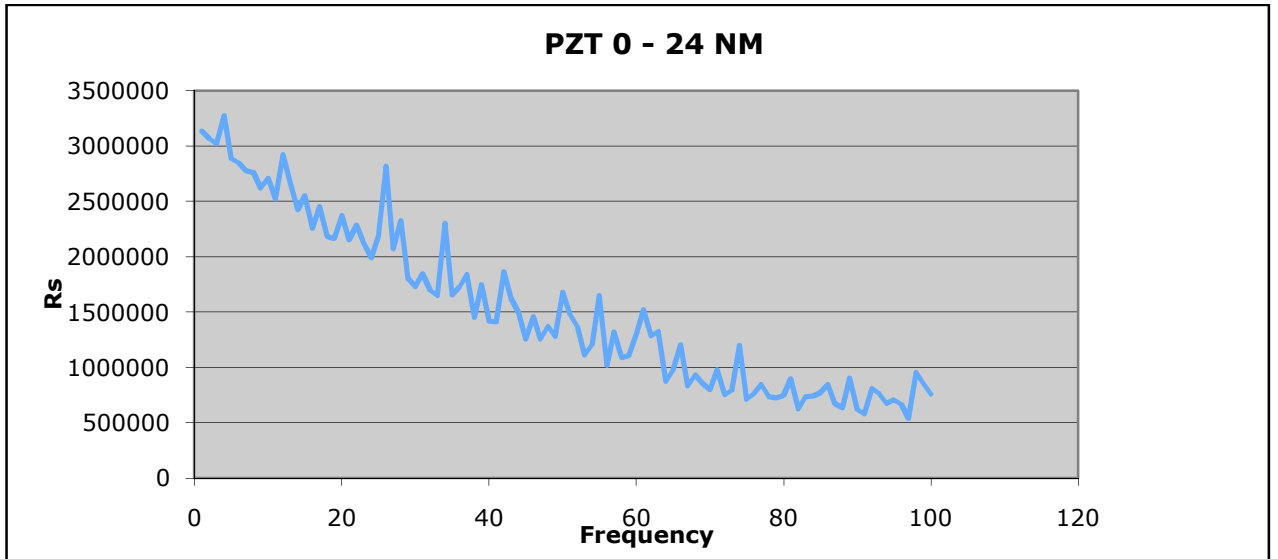
Quadtech 7600 precision LCR meter

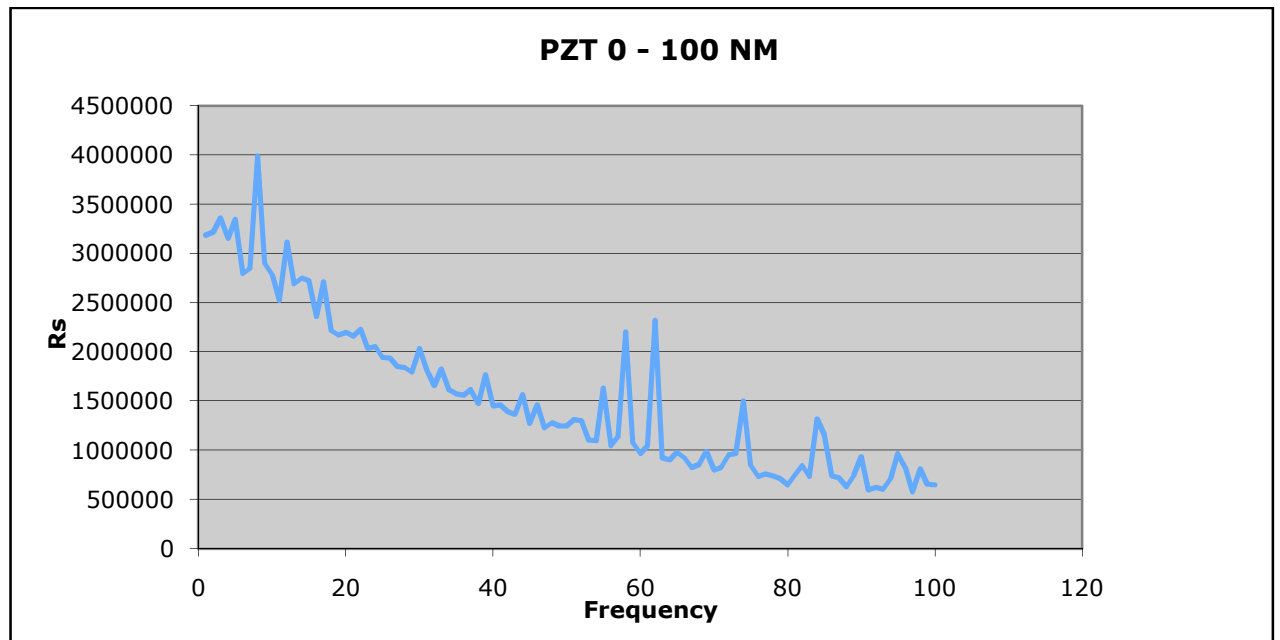
Το εύρος συχνοτήτων που σκανάραμε είναι από 10 KHz έως 100 KHz. Στα αποτελέσματα στο excel λαμβάνουμε το πραγματικό μέρος του σήματος από το οποίο βρίσκουμε τις ιδιοσυχνότητες και το φανταστικό μέρος από το οποίο μπορούμε να κρίνουμε την κατάσταση λειτουργίας του πιεζοηλεκτρικού υλικού που χρησιμοποιούμε.

Για το pzt 0 και το pzt 1 πήραμε μετρήσεις για καταστάσεις της κοχλιοσύνδεσης για 0 , 8 , 16 , 24 , 40 , 60 , 100 Nm. Τα δύο pzt όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως βρίσκονται στα δύο διαφορετικά μέρη της κατασκευής, για να μπορέσουμε συγκρίνοντάς τα φάσματα που θα παίρνουμε από κάθε pzt να διαπιστώσουμε πώς αλλάζει το φάσμα και αν αλλάζει για αισθητήρες που βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία πάνω στην κατασκευή.

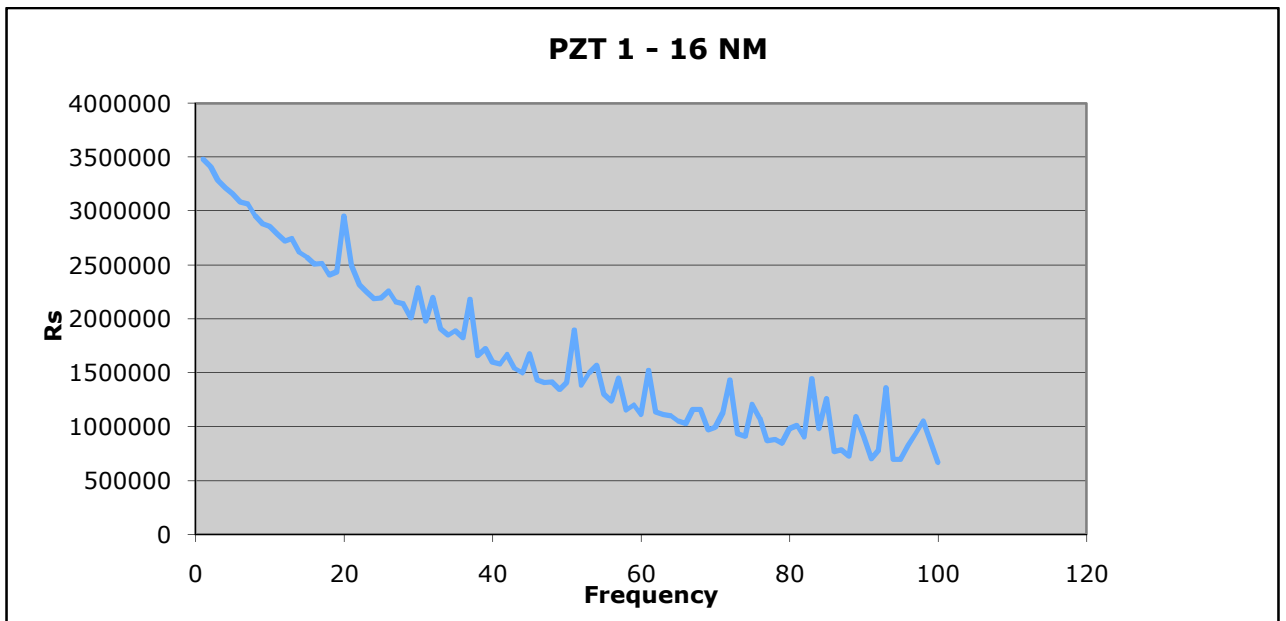
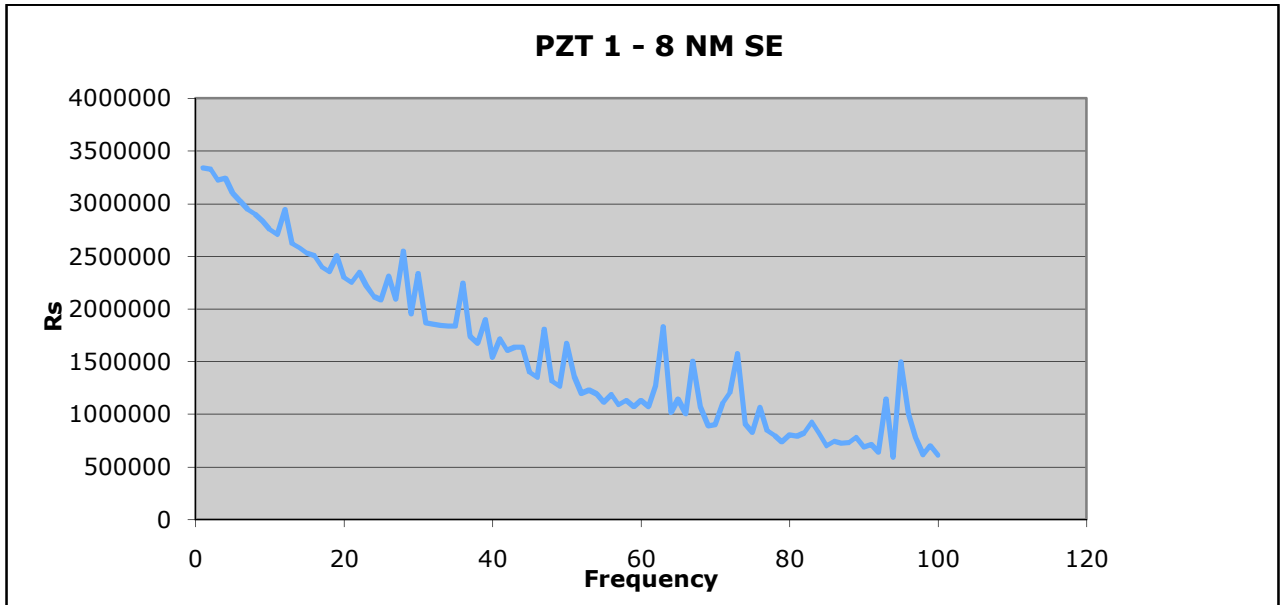
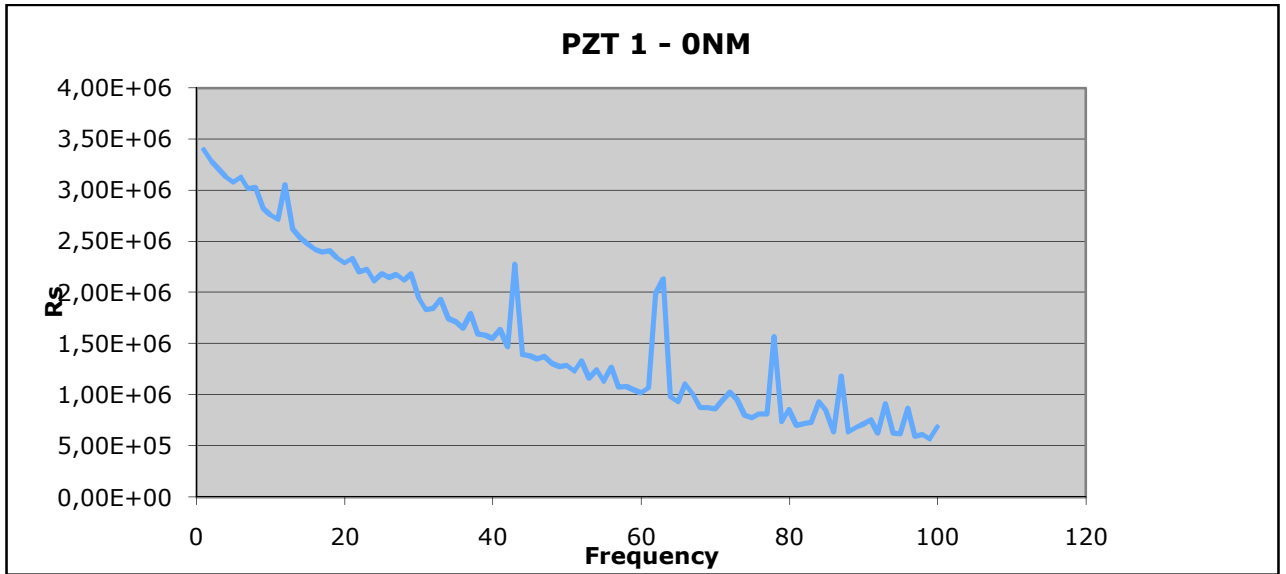
Στην συνέχεια παραθέτουμε τα διαγράμματα με την πραγματική τιμή(R_s) σε συνάρτηση με την συχνότητα(f) για το pzt0:

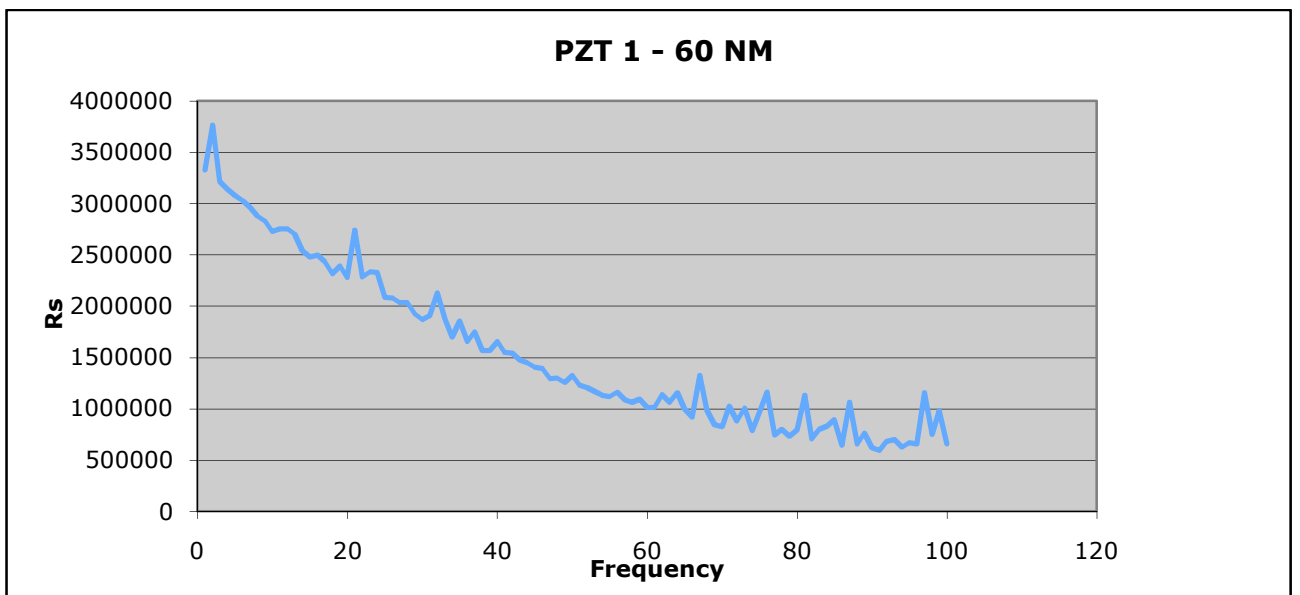
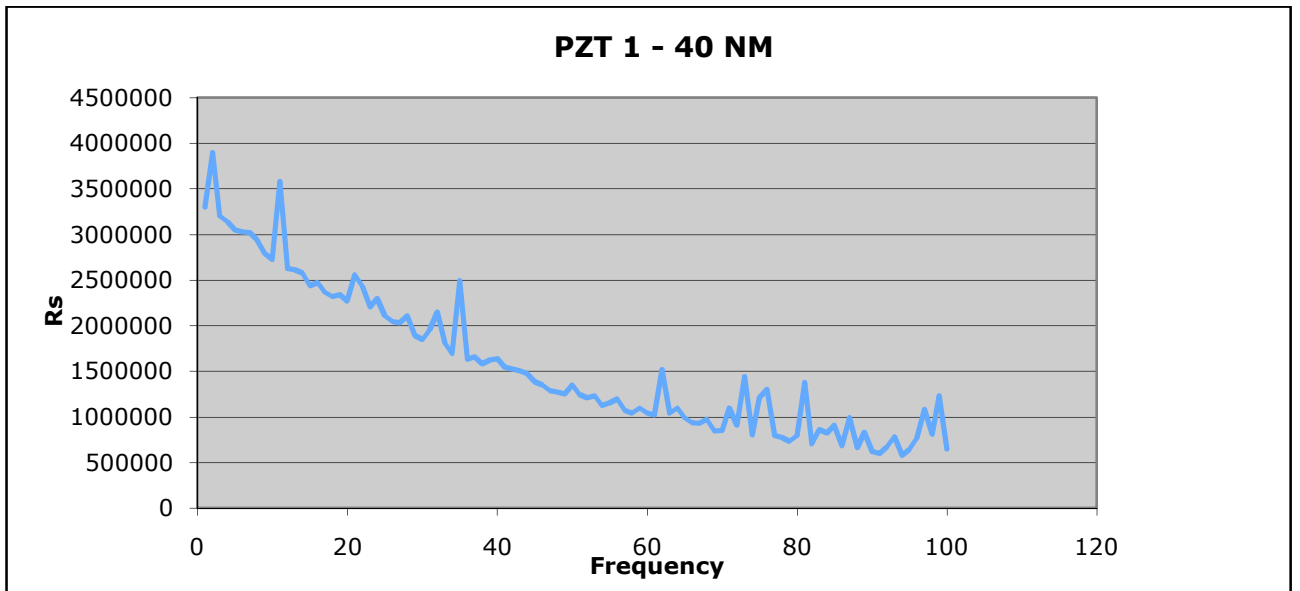
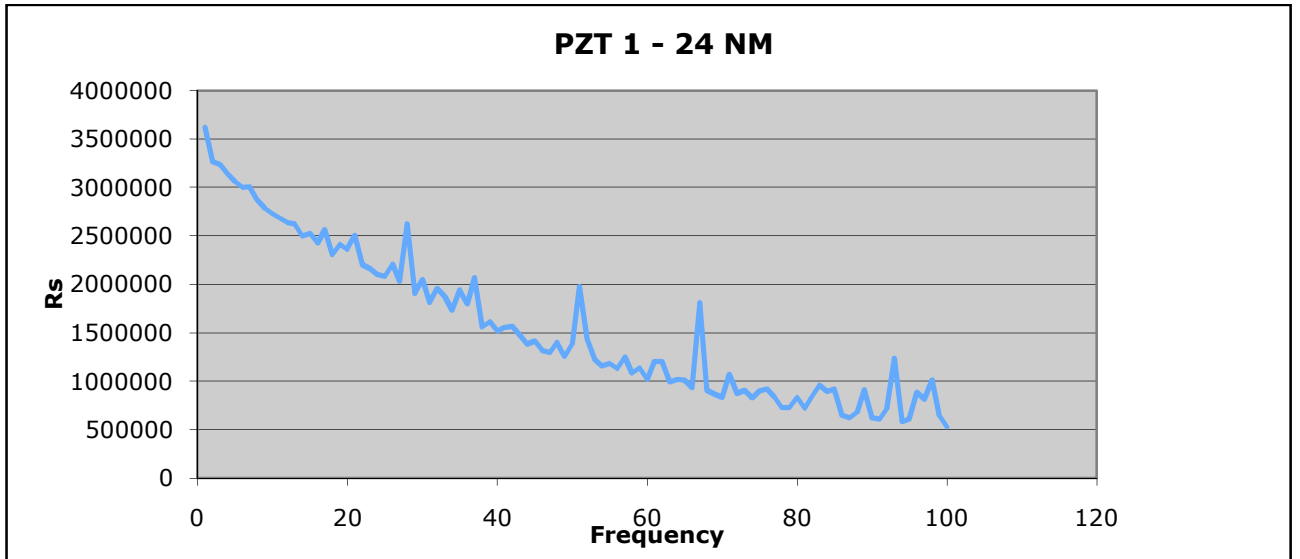


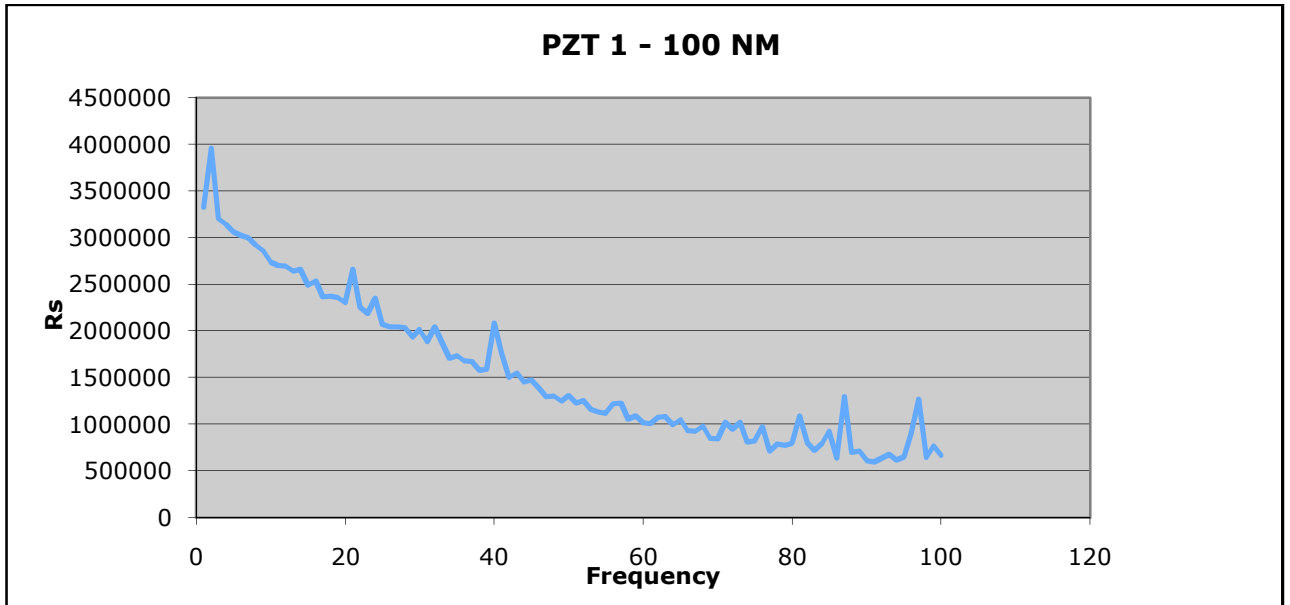




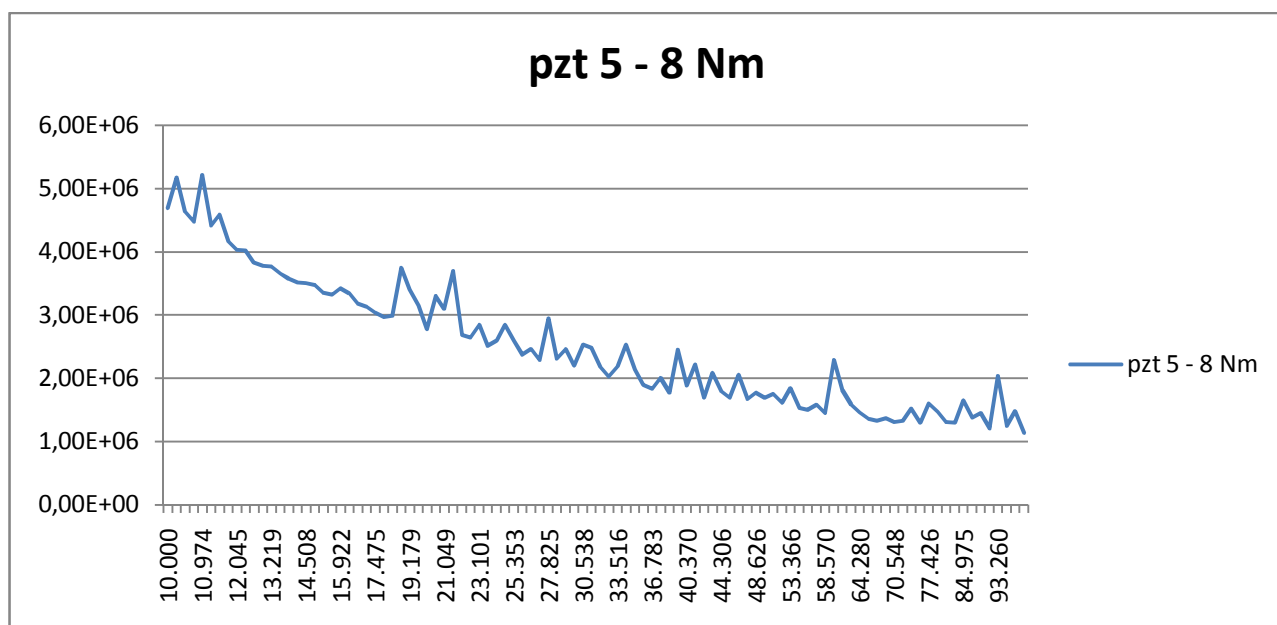
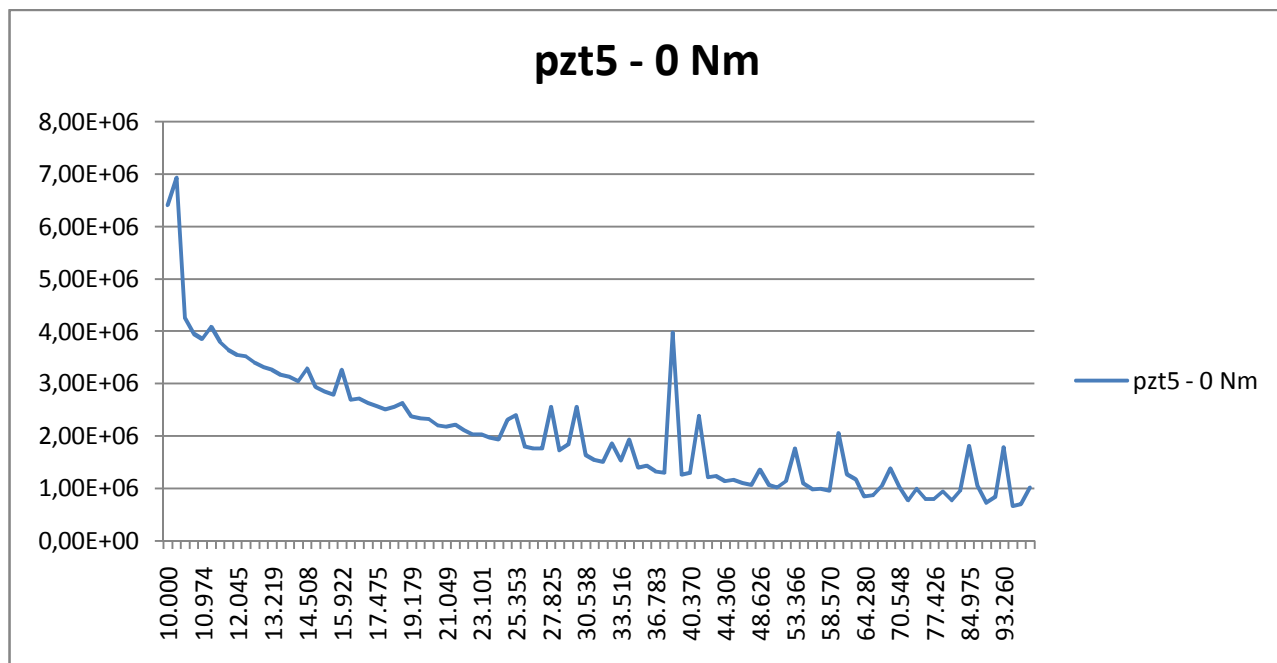
Στην συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα με την πραγματική τιμή(R_s) σε συνάρτηση με την συχνότητα(f) για το pzt1:

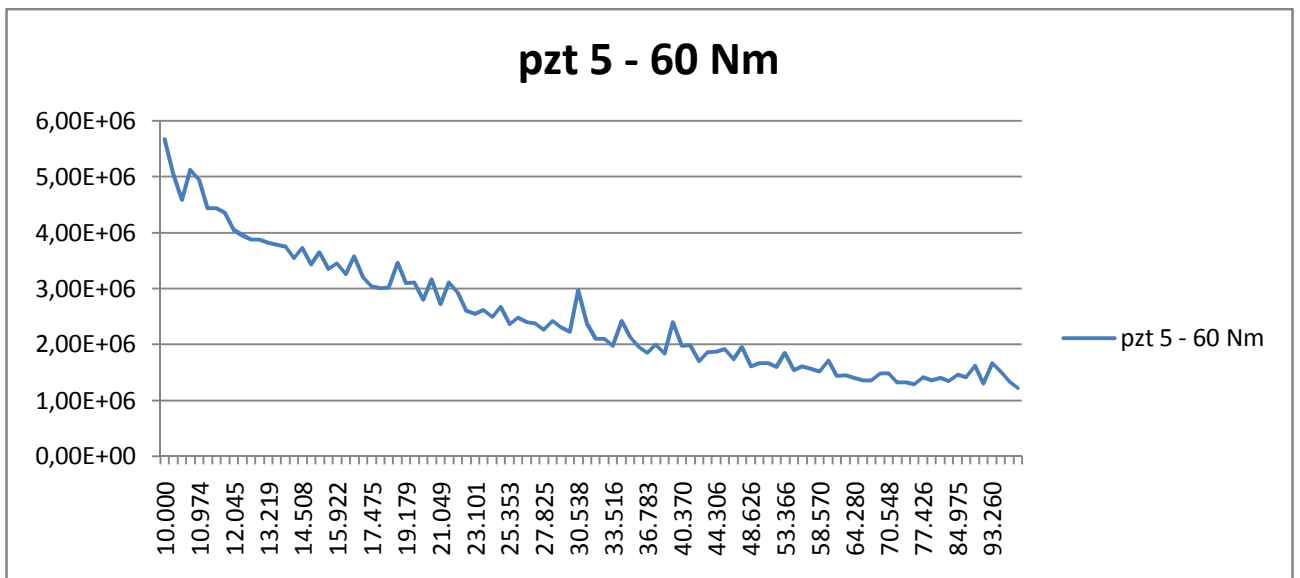
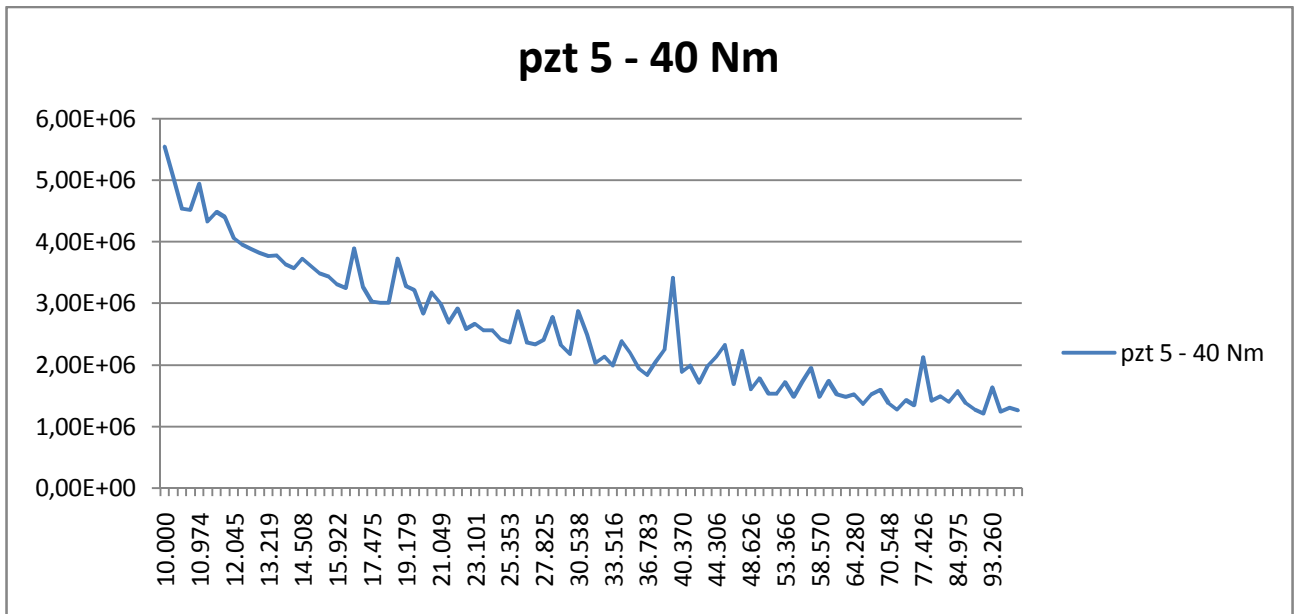
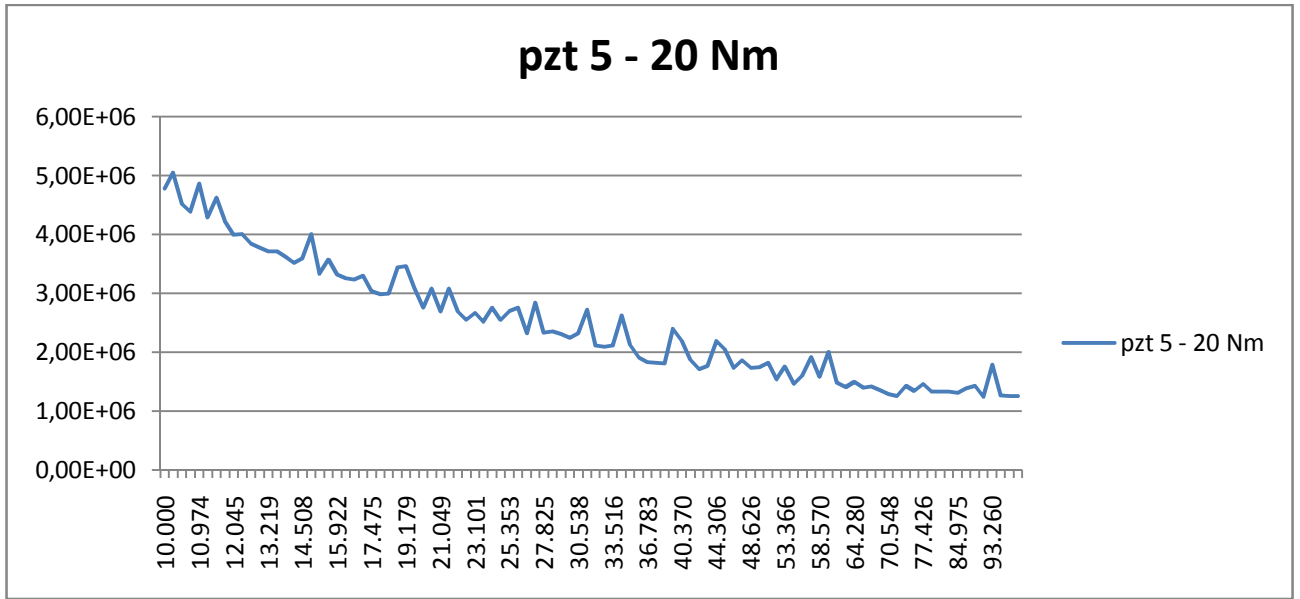


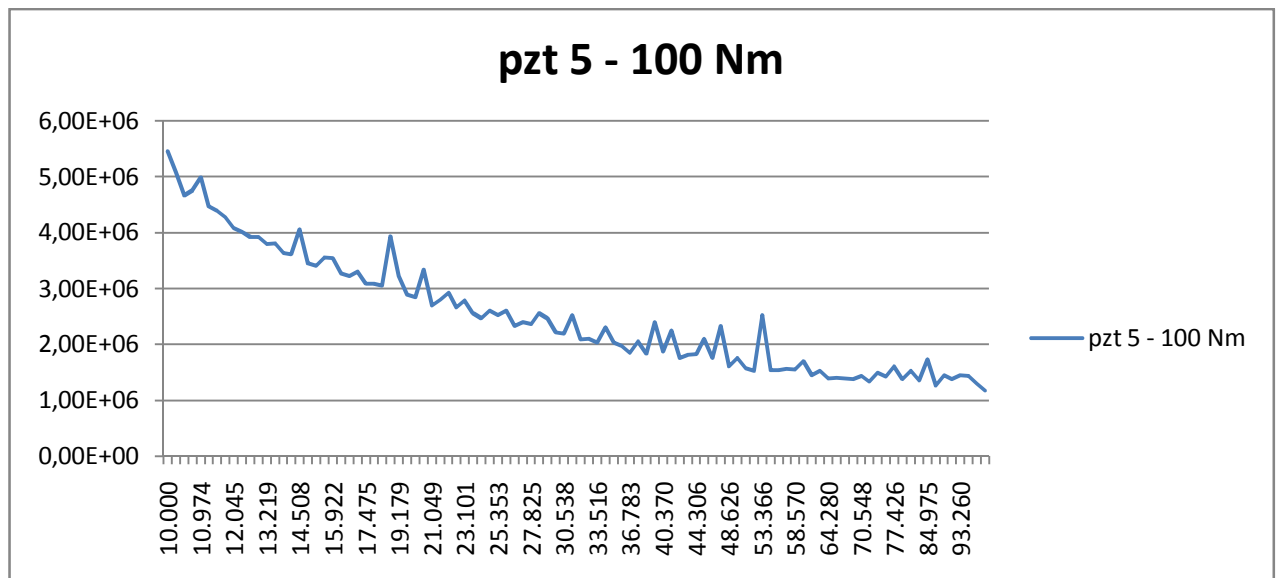
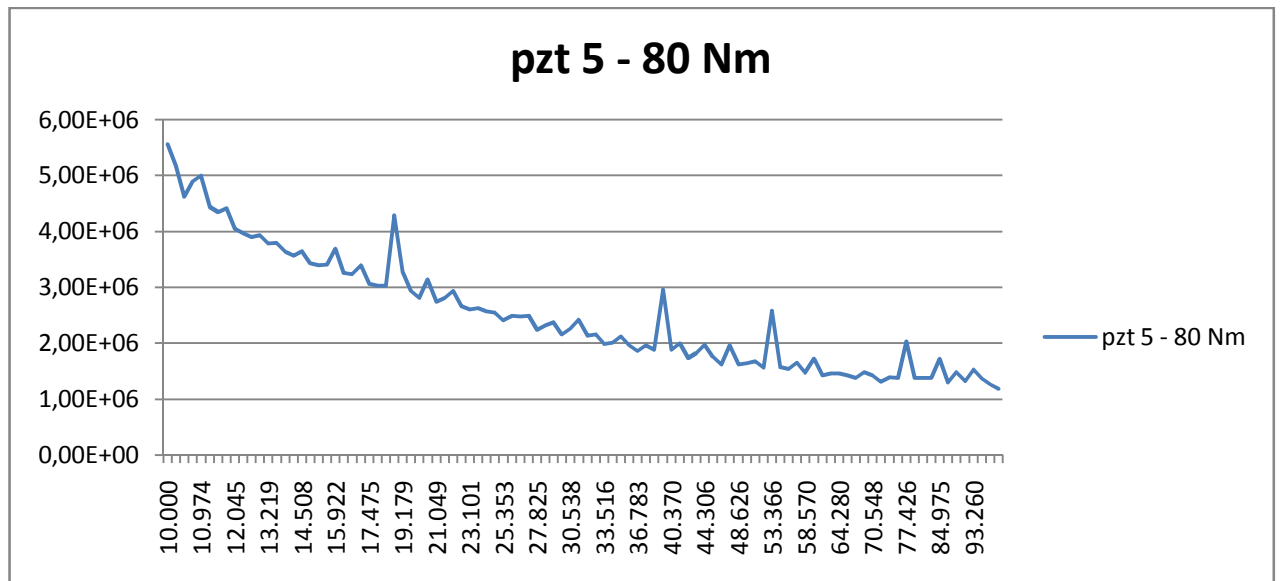




Για το pzt 5 αλλάξαμε τον τρόπο στήριξης. Βγάλαμε το πλαίσιο στο οποίο είχαμε αιωρήσει την κατασκευή μας και πακτώσαμε την μια άκρη της σε ένα σταθερό σημείο. Στην συνέχεια παραθέτουμε τα διαγράμματα με την πραγματική τιμή(R_s) σε συνάρτηση με την συχνότητα(f) για το pzt 5 για τιμές ροπής 0 , 8 , 20 , 40 , 60 , 80 , 100 Nm :







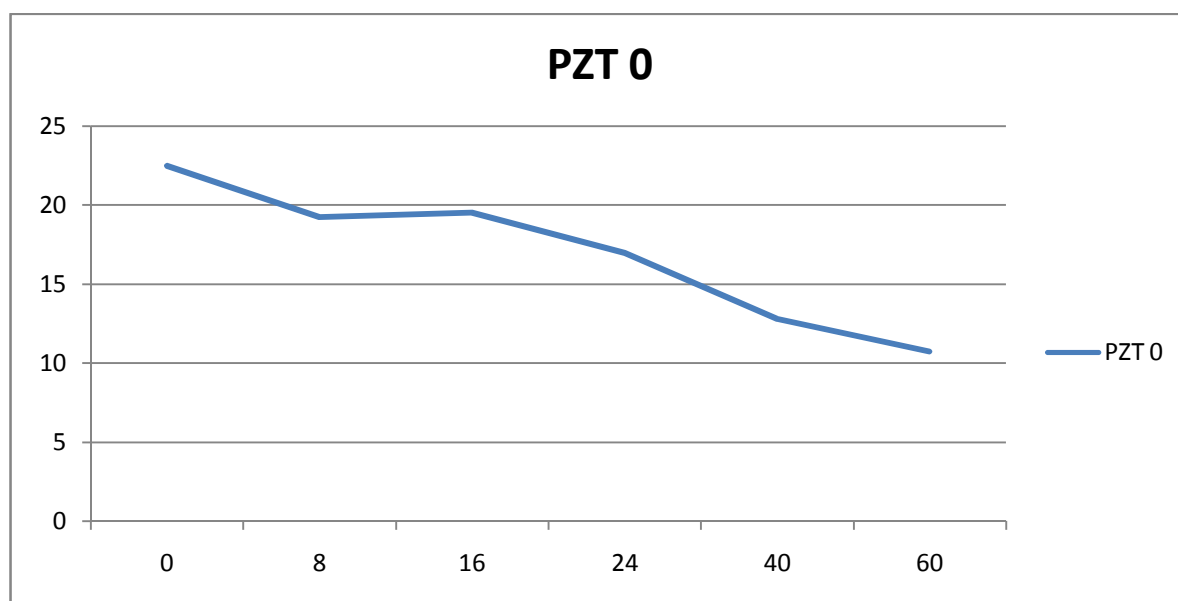
Για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήσαμε τον τύπο του RMSD. Για κάθε pzt χρησιμοποιήσαμε ως υγιή κατάσταση (reference στον τύπο του RMSD) την φασματική πυκνότητα για 100Nm. Παρακάτω παραθέτουμε τα διαγράμματα με τις τιμές του RMSD για τις διάφορες τιμές ροπών στην κοχλιοσύνδεση.

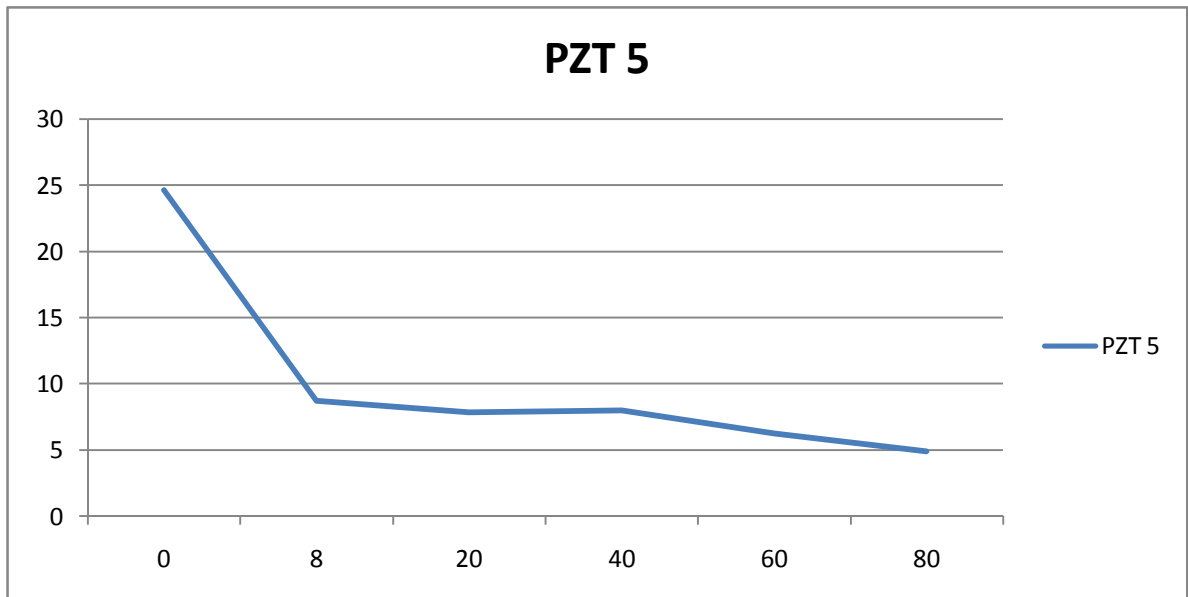
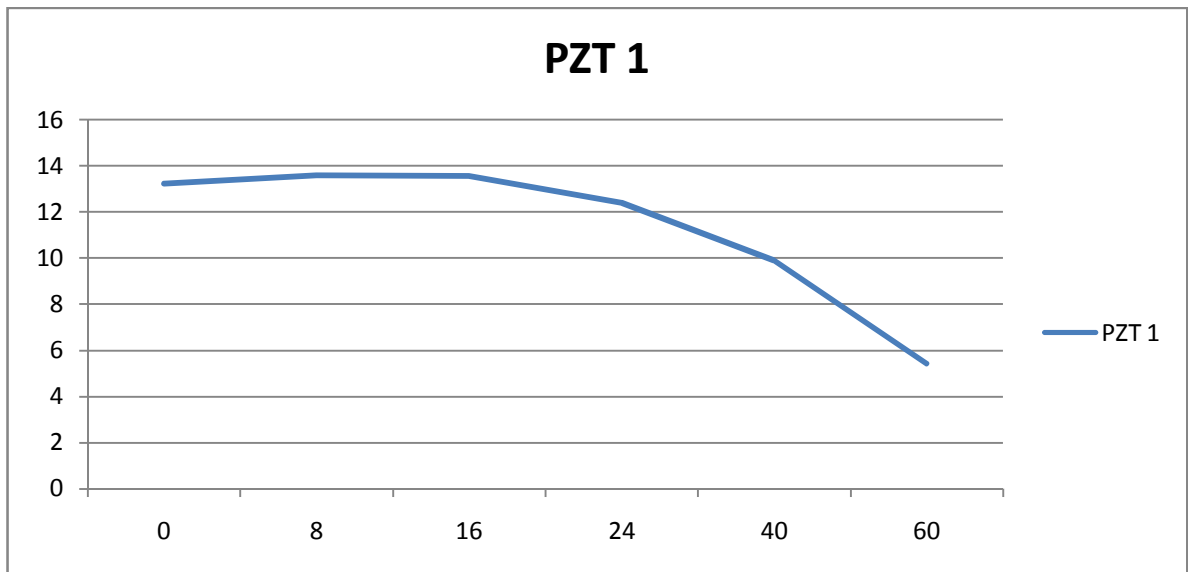
Όσο μειώνεται η ροπή στην κοχλιοσύνδεση μειώνεται η ακαμψία(K) της κατασκευής με αποτέλεσμα της μείωσης της έντασης των ιδιοσυχνοτήτων αλλά

και ταυτόχρονα, λόγω χαμηλού K, την μεγάλη αύξηση των peak στο φάσμα πυκνότητας. Άρα αυτά που αναμέναμε και που αποδείξαμε πειραματικά μέσω του RMSD είναι ότι όσο μειώνεται η ροπή στην κοχλιοσύνδεση τείνει να αυξάνεται το RMSD αφού καταρχάς το RMSD πρόκειται για μια ποσοτική διαφορά μεταξύ του φάσματος για 100Nm ροπής με το φάσμα για την εκάστοτε ροπή(του ίδιου pzt) και κατά δεύτερο σε χαμηλές ροπές αυξάνονται τα peak(αν και μειώνεται η ένταση για τις κύριες ιδιοσυχνότητες της κατασκευής).

Διαπιστώνουμε ότι οι τιμές του RMSD μικραίνουν αρμονικά όσο αυξάνεται η ροπή. Με την βοήθεια των παρακάτω πινάκων ως πίνακες αναφοράς μπορούμε κάθε στιγμή ανιχνεύοντας την φασματική πυκνότητα της κατασκευής να βρίσκουμε την ροπή της κοχλιοσύνδεσης. Είμαστε δηλαδή στη πλεονεκτική θέση να γνωρίζουμε την κατάσταση της κατασκευής.

Στον πίνακα PZT 5 που η κατασκευή είναι πακτωμένη η πάνω πλάκα αλουμινίου έχει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας από ότι στον πρώτο τρόπο στήριξης κάτι που φαίνεται και στο RMSD καθώς μόλις για μηδενική ροπή στην κοχλιοσύνδεση αλλάζει δραματικά η μορφή της φασματικής πυκνότητας.





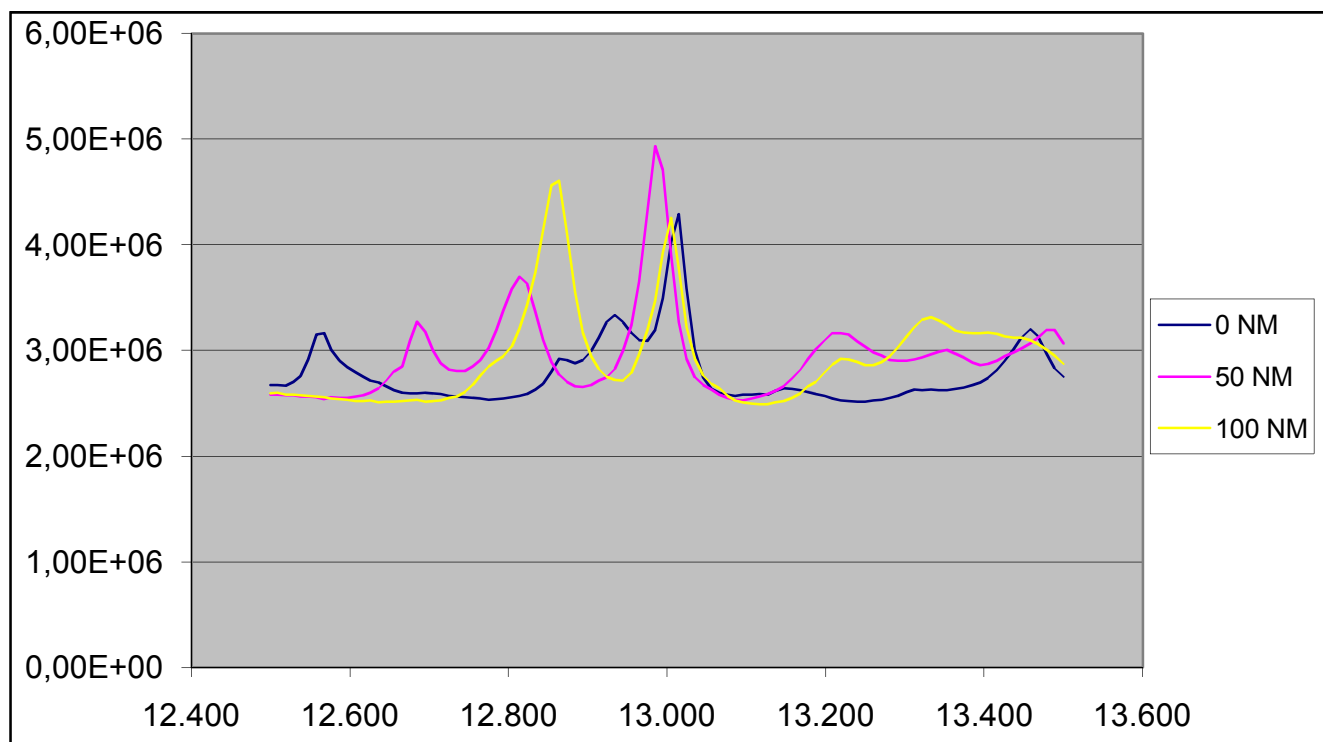
Στη συνέχεια στο πείραμά μας, χρησιμοποιώντας το pzt 0 και την πακτωμένη στήριξη της κατασκευής (που χρησιμοποιήσαμε και για τις μετρήσεις με το pzt 5), σαρώσαμε περιοχές φάσματος από 2KHz έως 20KHz και αφού βρήκαμε τις χαρακτηριστικότερες ιδιοσυχνότητες της κατασκευής κάναμε εμπέδηση σε τιμές συχνοτήτων κοντά σε αυτές.

Η λογική αυτού του πειράματος είναι να εντοπίσουμε τις κύριες ιδιοσυχνότητες της κατασκευής και να βρούμε ποια από αυτές σχετίζεται με την φόρτιση της κοχλιοσύνδεσης. Το peak-ιδιοσυχνότητα που θα βρούμε αναμένουμε όσο αυξάνουμε την ροπή στην κοχλιοσύνδεση να τείνει να μετακινηθεί προς τα δεξιά. Για την κατανόηση αυτού παραθέτουμε τους παρακάτω τύπους.

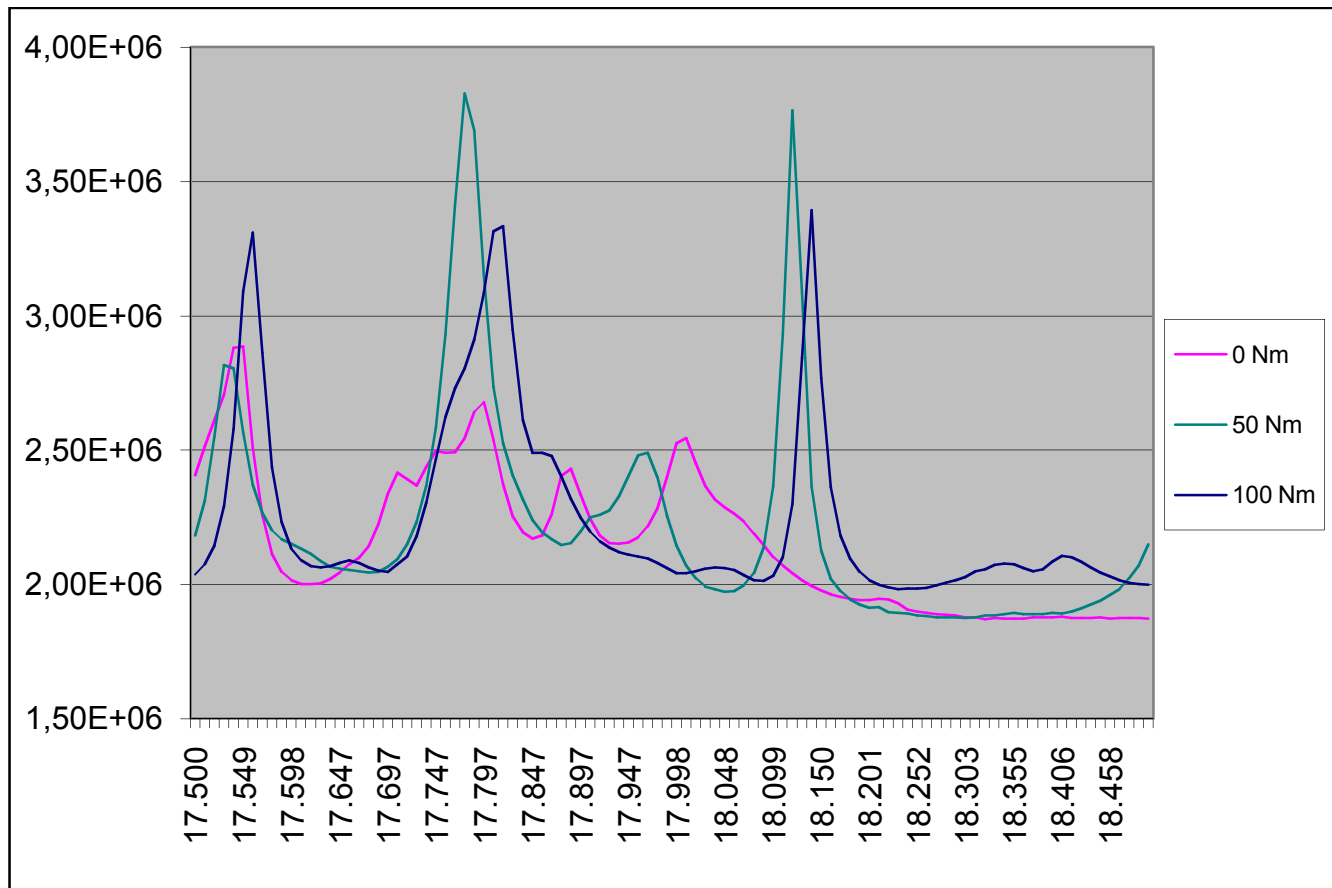
$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad , \quad \omega = 2\pi f$$

Από τους παραπάνω τύπους παρατηρούμε πως δείκτης ακαμψίας είναι ανάλογος με την συχνότητα. Άρα όσο αυξάνεται ο δείκτης ακαμψίας (αυξάνοντας την ροπή στην κοχλιοσύνδεση) τόσο αναμένουμε οι ιδιοσυχνότητες να αυξηθούν(να κινηθούν προς τα δεξιά).

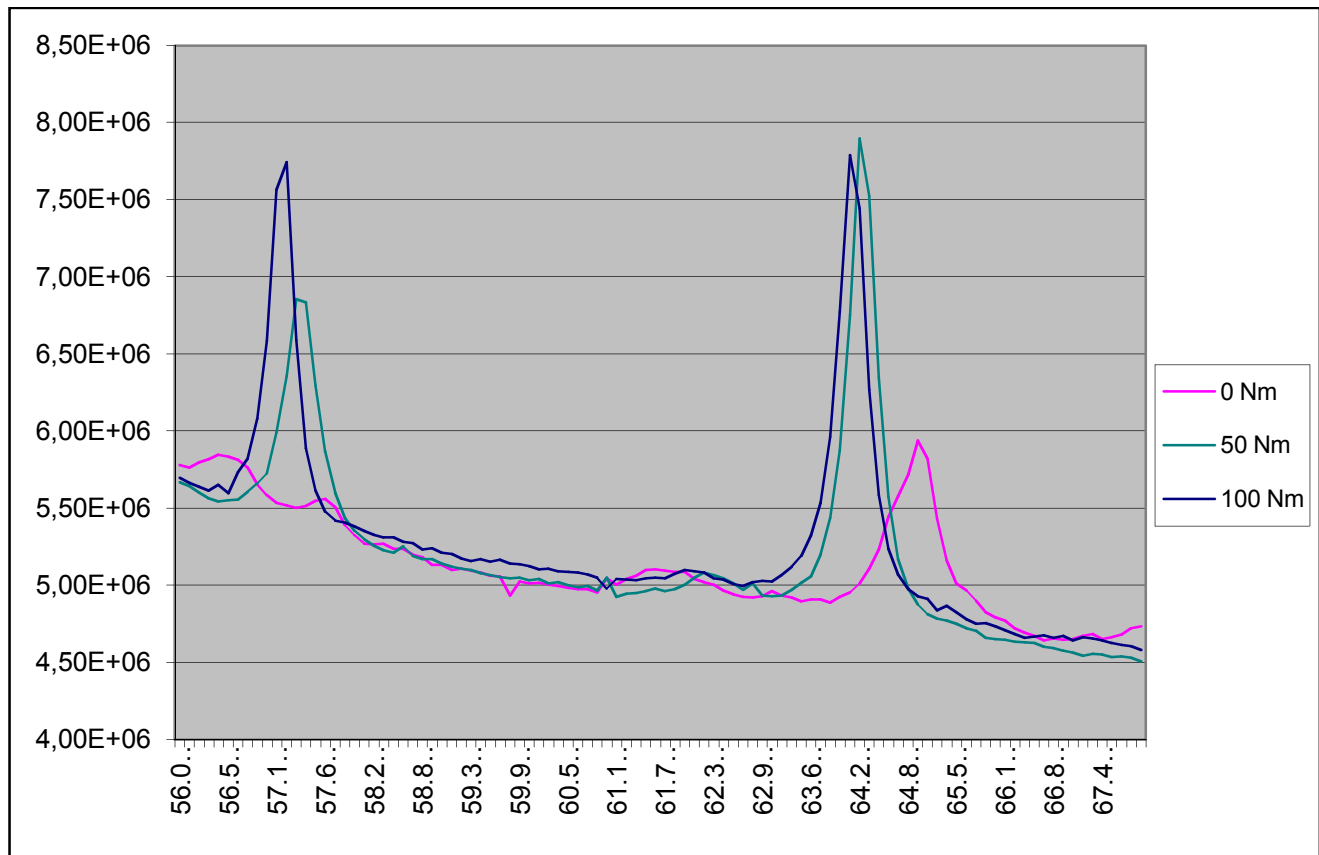
Παρακάτω παραθέτουμε γραφήματα με τις κυριότερες ιδιοσυχνότητες που βρήκαμε και ψάχνουμε ποιες από αυτές σχετίζονται με την κοχλιοσύνδεση.



Στο παραπάνω φάσμα πυκνότητας για εύρος συχνοτήτων μεταξύ 12,5-13,5 KHz όσο μεγαλύτερη ροπή δίνουμε στην βίδα τόσο οι κορυφές(ιδιοσυχνότητες) μετακινούνται προς τα δεξιά. Άρα για τις συγκεκριμένες συχνότητες το φάσμα πυκνότητας παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στις αλλαγές της ροπής της κοχλιοσύνδεσης. Στην ουσία πρόκειται για τις ιδιοσυχνότητες-κορυφές που εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στις αλλαγές της ροπής. Όσο μεγαλώνουμε την ροπή φαίνεται ξεκάθαρα η μετακίνηση των κορυφών προς τα δεξιά.



Στο παραπάνω γράφημα πήραμε φάσμα από 17,5KHz μέχρι 18,5KHz στο οποίο παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο όπως και στα παραπάνω, απλά οι μετακινήσεις είναι μικρότερες.



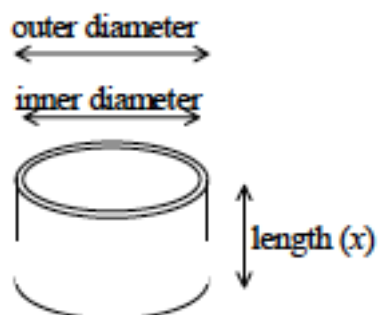
Από 5600 Hz μέχρι 67500 Hz παρατηρούμε ότι τα δύο χαρακτηριστικά peak ,εν αντιθέσει με τα peak στα δύο προηγούμενα διαγράμματα, μετακινούνται προς τα αριστερά όσο αυξάνεται η ροπή και όχι δεξιά όπως αναμέναμε από την θεωρία. Αντίθετα όσο αυξάνεται η ροπή τα peak μεγάλωσαν κάτι που ήταν αναμενόμενο από τη θεωρία. Άρα τα συγκεκριμένα peak δεν εξαρτώνται από τις αλλαγές στην κοχλιοσύνδεση και η μετακίνηση τους προς τα αριστερά μπορεί να σχετίζεται με άλλους παράγοντες.

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ

HEALING - ADAPTIVE BOLTED JOINTS

3.0 Εισαγωγή

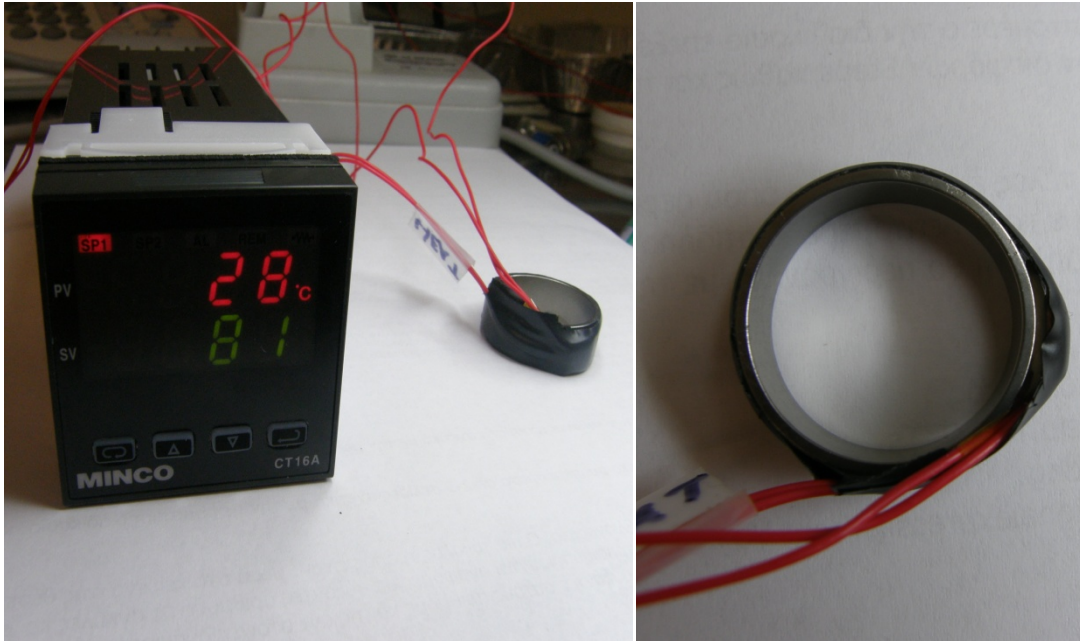
Αρχικά πρέπει να αναφέρουμε ότι πολλά πρακτικά θέματα πρέπει πρώτα να αντιμετωπιστούν προτού μπορέσει να περάσει η αυτόματη επιδιόρθωση κοχλιωτών συνδέσεων από το πειραματικό στάδιο στην χρησιμοποίηση του σε κατασκευές στην καθημερινή ζωή. Ένα από τα πιο σημαντικά θέματα που προκύπτουν είναι η μέθοδος θέρμανσης των SMA. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν οι ροδέλες SMA θερμάνθηκαν με αντίσταση που επικολλήθηκε πάνω στο SMA και σε αυτή την περίπτωση θέρμανσης του κράματος μνήμης μορφής απαιτούνται μικρά ποσά ενέργειας. Παρόλα αυτά τα δυο μεγάλα αλουμινένια τμήματα της κατασκευής στα οποία ανάμεσα είναι τοποθετημένο το SMA απορροφούν αρκετή από την θερμότητα που δίνεται σε αυτό εξαιτίας της μεγάλης μάζας τους επιβραδύνοντας της διαδικασία θέρμανσής του. Κρίνεται επομένως απαραίτητη η ανάπτυξη ενός τρόπου τοποθέτησης των κραμάτων αυτών έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν μονωμένα θερμικά από την υπόλοιπη κατασκευή και να ελαχιστοποιείται με αυτόν τον τρόπο το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για να ενεργοποιηθεί το κράμα μνήμης μορφής. Η διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το πείραμα είναι η ίδια που χρησιμοποιήθηκε και στα προηγούμενα πειράματα της εργασίας. Οι ροδέλες από κράματα μνήμης μορφής που χρησιμοποιήθηκαν είναι της εταιρίας Intrinsic Devices Inc(model AHE0957-0049-0382). Τα δαχτυλίδια είναι επικαλυμμένα σε συγκεκριμένα σημεία με μια μπογιά ευαίσθητη στην θερμοκρασία η οποία κατά την θέρμανση θα πρέπει να αλλοιωθεί.



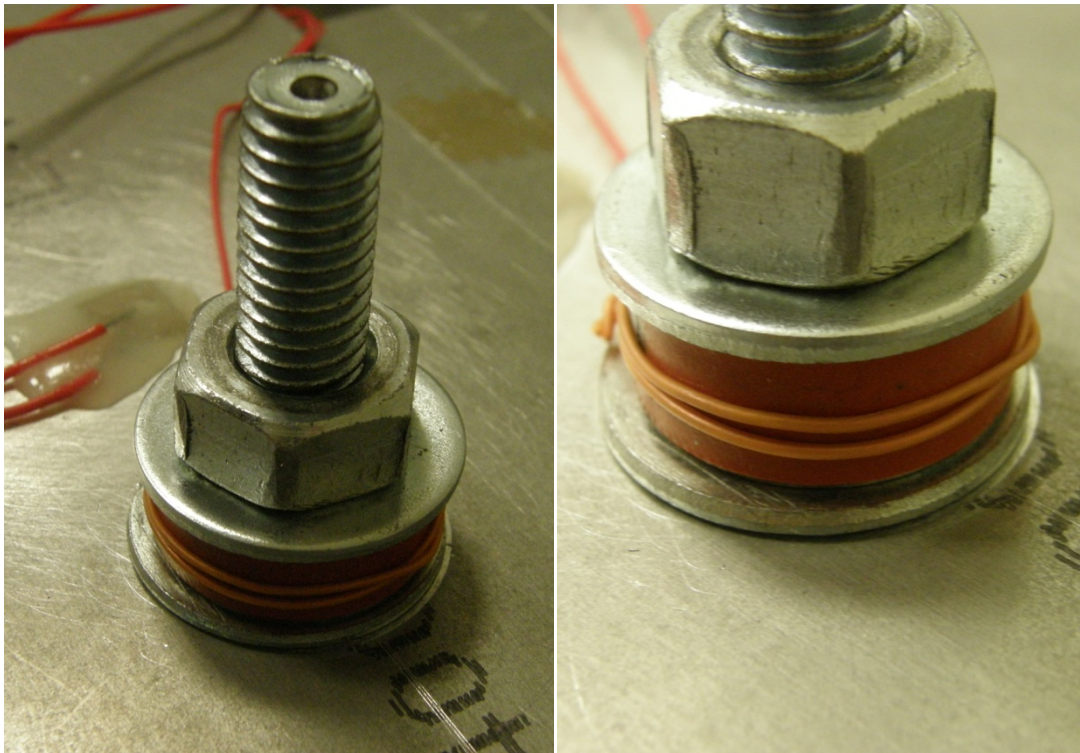
Resistance	0.0018 ohms
Mass	6.778 g
Length	0.969 cm
Inner Diameter	2.44 cm
Outer Diameter	2.68 cm
Thermal Conductivity (k)	18 W/m K
Heat Capacity (C_p)	837 J/m K

3.1 ΠΕΙΡΑΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Αρχικά ένας thermofoil θερμαντήρας από την εταιρία Minco Products και μοντέλο HR5208R6.4L12B επικολλήθηκε στο δαχτυλίδι και δοκιμάστηκε η ικανότητα που έχει να ζεστάνει το δαχτυλίδι στην επιθυμητή θερμοκρασία για να του αλλάξει το σχήμα. Αυτό έγινε στο εργαστήριο χωρίς όμως το SMA δαχτυλίδι να έχει εγκατασταθεί στην σύνδεση της κατασκευής. Ο εύκαμπτος θερμαντήρας από σιλικόνη έχει διαστάσεις 5,8x0,7. Ενεργοποιήθηκε από ένα μετασχηματιστή τάσης 18 V και δυνατότητα παροχής έντασης 2,23 Ampere. Το δαχτυλίδι θερμάνθηκε εύκολα σε θερμοκρασία άνω των 120° C μετά από αρκετά λεπτά θέρμανσης.

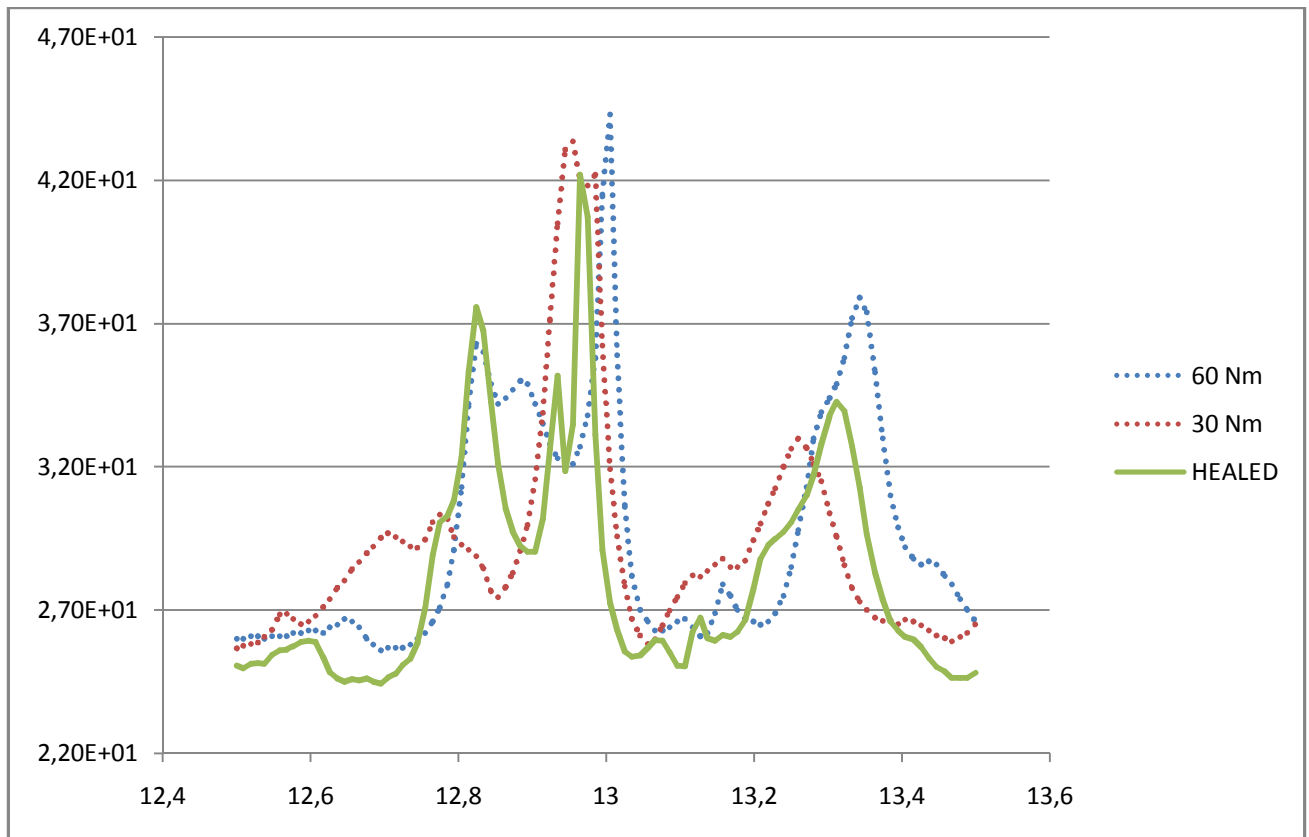


Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε άλλο ένα δαχτυλίδι κράματος μνήμης μορφής στο οποίο επικολλήθηκε με την ίδια διαδικασία ο ίδιος θερμαντήρας. Επιπλέον ανάμεσα στο δαχτυλίδι επικολλήθηκε ένα thermocouple τύπου J(αισθητήρας θερμοκρασίας).



Κατά την διάρκεια της θέρμανσης λαμβάναμε σε τακτά χρονικά διαστήματα φασματική πυκνότητα με εμπέδηση.

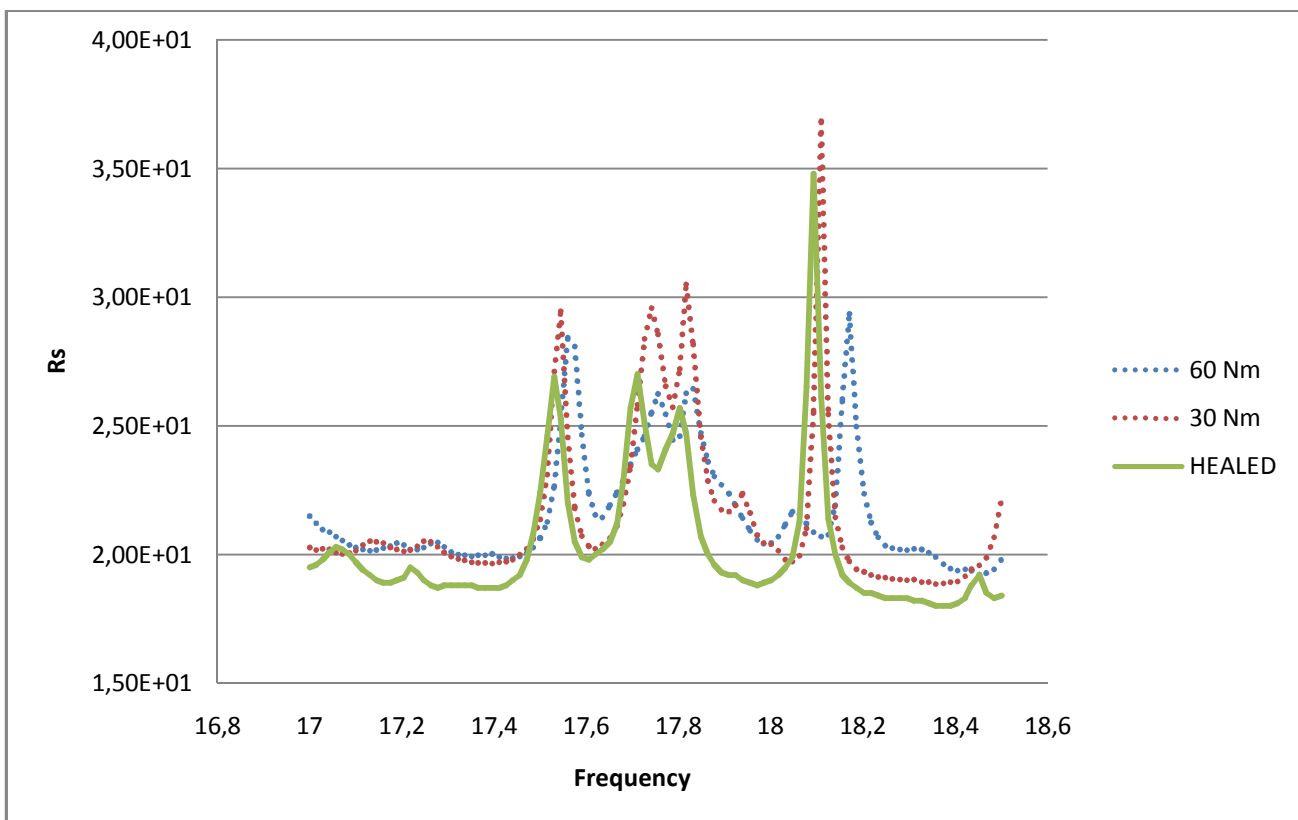
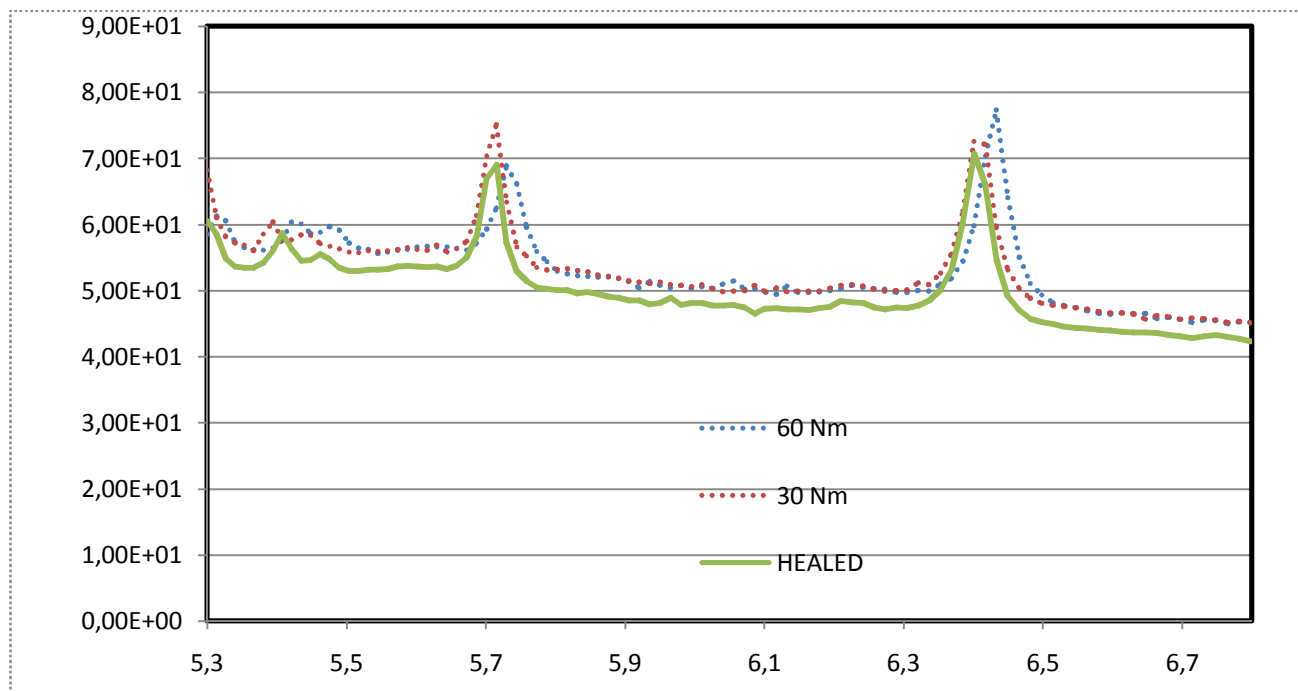
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πείραμα είναι η εξής. Η βίδα συμπεριλαμβανομένου και του δαχτυλιδιού μνήμης-μορφής το οποίο τοποθετήθηκε ανάμεσα σε δύο μεταλλικές ροδέλες σφίχτηκαν με το ροπόκλειδο σε ροπή 60 Nm και στην συνέχεια πραγματοποιήσαμε εμπέδηση για αυτήν την τιμή της ροπής σκανάροντας τμήματα συχνοτήτων για ένα φάσμα μεταξύ 5.6-18.5 KHz. Στο επόμενο στάδιο χαλαρώσαμε σε τιμή ροπής 30 Nm. Για αυτή την τιμή πραγματοποιήσαμε εκ' νέου εμπέδηση για το ίδιο φάσμα συχνοτήτων όπως και παραπάνω. Ενεργοποιήσαμε τον θερμοαστή και ζεστάναμε το SMA για πάνω από 20 λεπτά, σε αυτή την διάρκεια πραγματοποιούσαμε διαδοχικές εμπεδήσεις. Μετά την ενεργοποίηση του SMA αναμένουμε ότι αφού αυτό μεγαλώνει αξονικά θα ασκεί κάποια δύναμη στα δυο τμήματα του αλουμινίου της κατασκευής, δηλαδή θα ασκεί ελκυστική δύναμη στην βίδα η οποία μεταφράζεται σε ροπή σύσφιξης αντίστοιχα. Επομένως αναμένουμε να επανέλθει όσο αυτό είναι δυνατόν σε τιμές ροπής 60 Nm. Για να το διαπιστώσουμε αυτό παρατηρούμε την φασματική πυκνότητα της κατασκευής. Αναμένουμε αφού θερμανθεί για αρκετά λεπτά το κράμα και φτάσει μια σχετική υψηλή θερμοκρασία η φασματική πυκνότητα που έχουμε καταγράψει για 30 Nm να τείνει να προσεγγίσει την φασματική πυκνότητα 60 Nm. Παρακάτω παραθέτονται τα αποτελέσματα του πειράματος.



Τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια και με το προηγούμενο μέρος του πειράματος εμπέδησης της εργασίας. Οι κορυφές-ιδιοσυχνότητες στο φάσμα συχνοτήτων μεταξύ 12,5-13,5 KHz έχουν την αναμενόμενη συμπεριφορά καθώς μετακινούνται στα αριστερά όταν χαλαρώνει η βίδα, υποδεικνύοντας έτσι μείωση στην ακαμψία της κατασκευής, και στην συνέχεια επιστρέφουν δεξιά στην υγιή κατάσταση αφού ενεργοποιήθηκε το κράμα μνήμης μορφής. Όπως βλέπουμε οι κορυφές μετακινήθηκαν ξανά δεξιά προς την υγιή κατάσταση αλλά όχι ακριβώς όπως ήταν το φάσμα αρχικά και αυτό υποδεικνύει ότι η ενεργοποίηση του δαχτυλιδιού ήταν μερικώς επιτυχημένη στην προσπάθεια να επαναφέρει τελείως την αρχική φόρτιση στην σύνδεση. Με τη χρήση του ροπόκλειδου υπολογίσαμε προσεγγιστικά ότι η νέα ροπή στην κοχλιοσύνδεση μετά την χρήση του SMA είναι περίπου 50 Nm. Επιπλέον το πλάτος της κορυφής δηλαδή η ένταση μειώθηκε όταν η σύνδεση χαλάρωσε και αυξήθηκε εκ' νέου μετά την ενεργοποίηση δείχνοντας ότι η απόσβεση στην χαλαρή κατάσταση αυξάνεται.

Στις συχνότητες κοντά στα 13300 Hz η διαφορά μεταξύ των δύο κορυφών είναι 31 Hz δηλαδή η κορυφή μετά την ενεργοποίηση είναι 31 Hz δεξιότερα από την κορυφή στα 60 Nm. Επιπλέον στις συχνότητες κοντά στα 13000 Hz η κορυφή μετά την ενεργοποίηση είναι 35 Hz δεξιότερα από την κορυφή στην κατάσταση 60 Nm ενώ η κορυφή της κατάστασης 30 Nm είναι 55 Hz δεξιότερα. Βλέπουμε ότι η συμπεριφορά αυτή επιβεβαιώνει την θεωρία.

Παρακάτω παραθέτουμε φάσμα εμπέδησης για εύρος συχνοτήτων 5,3-6,8KHz και 17-18,5KHz.



Όπως παρατηρήσαμε και στα προηγούμενα πειράματα της εμπέδησης οι ιδιοσυχνότητες στα συγκεκριμένα φάσματα δεν σχετίζονται με τη φόρτιση της κοχλιοσύνδεσης .

Αφού ολοκληρώθηκε το πείραμα το SMA ενεργοποιήθηκε ξανά για μεγάλο χρονικό διάστημα για να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά του σε πλήρη έκταση του φαινομένου. Δεν παρατηρήθηκε περεταίρω επιμήκυνση του. Επίσης παρατηρήθηκε ότι μίκρυνε η διάμετρος του δαχτυλιδιού. Παρόλα αυτά η ροδέλα διατήρησε το κυκλικό σχήμα της όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί:



Σύγκριση μεγέθους SMA μετά από θέρμανση και SMA που δεν έχει θερμανθεί.

Παρακάτω παραθέτουμε τα μεγέθη των SMA για την αρχική τους κατάσταση, για μετά την θέρμανσή τους εκτός κοχλιοσύνδεσης και για μετά την θέρμανση εντός κοχλιοσύνδεσης. Οι μετρήσεις έγιναν με ηλεκτρονικό παχύμετρο ακριβείας εκατοστού του χιλιοστού μάρκας MITUTOYO.

	NEW	HEATED	BOLTED HEATED
THICKNESS	1.22 mm	1.3 mm	1.38 mm
EXT. DIAMETER	26.82 mm	25.64 mm	26.12 mm
WIDTH	9.66 mm	9.88 mm	9.74 mm

Ο θερμαστής είναι πολύ σημαντικό να είναι σε πλήρη επαφή με όλη την περιμέτρο του δαχτυλιδιού για να ζεσταίνεται ομοιόμορφα.

Τα αποτελέσματα την μεθόδου εμπέδησης δείχνουν ότι η αρχική φόρτιση στην βίδα επαναφέρθηκε σε μεγάλο βαθμό μετά την ενεργοποίηση του δαχτυλιδιού.

3.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πείραμα έδειξε ότι είναι εφικτή η διαδικασία θέρμανσης με ηλεκτρική αντίσταση ενός δαχτυλιδιού το οποίο είναι εγκατεστημένο σε μια κοχλιοσύνδεση. Αλλαγές στην φάσμα πυκνότητας της κατασκευής από 60 στα 30 και μετά ξανά επιστροφή κοντά στα 60 όταν το SMA ενεργοποιήθηκε δείχνουν ότι η προένταση της βίδας επαναφέρθηκε σε μεγάλο βαθμό. Επίσης καταλήξαμε ότι το SMA δεν χρειάζεται συνεχώς παροχή ρεύματος για να παραμένει ενεργοποιημένο, παρόλα αυτά το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για να θερμάνει ένα SMA είναι ακόμα υπό διερεύνηση. Είναι σίγουρο όμως ότι εάν θέλουμε να μειώσουμε την ισχύ του ρεύματος που απαιτείται για να ζεστάνουμε το δαχτυλίδι θα πρέπει να το μονώσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα από την υπόλοιπη κατασκευή.

ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ

4.0 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πείραμα αναπτύξαμε μια κοχλιωτή σύνδεση με την δυνατότητα αυτο-ανίχνευσης βλαβών αλλά και αυτόματης επιδιόρθωσης. Η ιδέα αυτή συμπεριλαμβάνει την χρησιμοποίηση έξυπνων υλικών αλλά και την ανάπτυξη ενός έξυπνου συστήματος για την διαρκή παρακολούθηση της υγείας της κατασκευής. Τα κύρια συμπεράσματα της έρευνάς μας συνοψίζονται παρακάτω.

- Μια νέα μέθοδος για την τέλεση μετρήσεων δημιουργήθηκε και δοκιμάστηκε η αποτελεσματικότητα της. Αυτή περιλαμβάνει την σύγκριση του σήματος που λαμβάνουν δύο αισθητήρες ένας κοντά στο διεγέρτη και στο ίδιο τμήμα της κατασκευής και ο άλλος στο άλλο τμήμα της κατασκευής που ενώνονται με κοχλιοσύνδεση. Η σύγκριση αυτών των σημάτων μας επιτρέπει να κρίνουμε πότε στην κατασκευή υφίσταται βλάβη.
- Επιπλέον δείξαμε πειραματικά ότι η εμπέδηση είναι αντικειμενική και βιώσιμη μέθοδος για μέτρηση της ροπής φόρτισης κοχλιωτών συνδέσεων και είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί για να ανιχνεύσουμε βλάβες σε κατασκευές. Επιπλέον είμαστε σε θέση να διαπιστώνουμε ανά πάσα στιγμή από τις ιδιοσυχνότητες που σχετίζονται με την ροπή της κοχλιοσύνδεσης την ροπή με την οποία είναι σφισμένη η βίδα.
- Πειράματα έδειξαν ότι είναι εφικτή η θέρμανση με ηλεκτρική αντίσταση SMA δαχτυλιδιών τα οποία είναι εγκατεστημένα σε μια κοχλιοσύνδεση. Αλλαγές στην φασματική πυκνότητα της εμπέδησης της κατασκευής από τα 60 Nm στα 30 και στην συνέχεια με την ενεργοποίηση του δαχτυλιδιού κράματος μνήμης-μορφής δείχνουν ότι η ένταση της σύνδεση επαναφέρθηκε σε μεγάλο βαθμό.

REFERENCES

- [1] Peairs D M, Park G and Inman D J 2001 Self-monitoring and self-healing bolted joint, structural health monitoring: the demands and challenges *Proc. 3rd Int. Workshop on Structural Health Monitoring (Stanford, CA, Sept. 2001)* (Boca Raton, FL: CRC Press) pp 430–9
- [2] Park, G., Cudney, H., Inman, D.J., "Impedance-based Health Monitoring of Civil Structural Components," *ASCE Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 6, No. 4, pp. 153-160, 2000.
- [3] Tseng K.K., Wang L., 2005, 'Impedance-based method for nondestructive damage identification', *Journal of Engineering Mechanics*, vol.131, 58-64.
- [4] Park, G., Cudney, H., Inman, D.J., 2001. "An Integrated Health Monitoring Technique Using Structural Impedance Sensors, " *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, in press.
- [5] Bhalla S., Soh, C. K., 2003, 'Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers', *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 32, No. 12, 1897-1916.
- [6] M. V. Gandhi , B. S. Thompson, *Smart Materials and Structures*, Chapman & Hall, 1992.[8]G. C. Psarras, J. Parthenios, C. Galiotos, *Journal of Material Science*, 36(3), 2001, 535.
- [7] H. Funakubo, *Shape Memory alloys*, University of Tokyo, 1978.
- [8] Bhalla, S., Soh, C.K., 2004b, 'Structural Health Monitoring by Piezo-impedance Transducers I: modelling, *Journal of Aerospace Engineering*', ASCE, 17, 4,
- [9] Cheng C.C., Lin C.C., 2005, 'An impedance approach for vibration response synthesis using multiple PZT actuators', *Sensors and Actuators, A*, 118, 116-126.
- [10] Doebling S. W., Farrar C. R., Prime M. B., Shevitz D. W., 1996, 'Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics', A Literature Review.
- [11] Liang, C., Sun, F., and Rogers, C. A., 1996, 'Electro-mechanical impedance modeling of active material systems, *Smart Mater. Struct.*, 5, 171-186.
- [12] Development of a Self-Sensing and Self-Healing Bolted Joint Daniel M. Peairs

Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University

[13] Ntotsios E., Papadimitriou C., Panetsos P., Karaiskos G., Perros K., Perdikaris P., 2009, 'Bridge health monitoring system based on vibration measurements', *Bull Earthquake Eng.*, Vol. 7, No. 2, 469–483.

[14] Lim Y.Y., Bhalla S., Soh C.K., 2006, 'Structural identification and damage diagnosis using self-sensing piezo-impedance transducers', *Smart Mater. Struct.* 15, 987-995.

[15] Peairs, D.M., Park, G., Inman, D.J., 2004, 'Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 15, 129-139