



Πολυτεχνείο Κρήτης

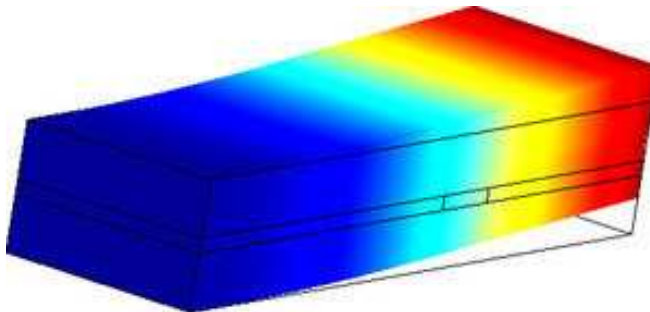
Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Σταυρουλάκης

**Προσομοίωση σύνθετων ευφών μηχανικών
συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από
πιεζοηλεκτρικά υλικά.
Σύνδεση με ευφυείς μεθόδους ελέγχου.**

Μεταπτυχιακή Διατριβή



Ταϊρίδης Γεώργιος

Χανιά, Μάιος 2009



Πολυτεχνείο Κρήτης

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

Επιβλέπων: Γεώργιος Σταυρουλάκης (καθηγητής)

Εξεταστής: Αναστάσιος Πουλιέζος (καθηγητής),

Εξεταστής: Ιωάννης Νικολός (επίκουρος καθηγητής)

Προσομοίωση σύνθετων ευφών μηχανικών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Σύνδεση με ευφυείς μεθόδους ελέγχου.

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Ταϊρίδης Γεώργιος

Η φωτογραφία του εξωφύλλου προέρχεται από τη ιστοσελίδα: <http://www.comsol.com>

Μεταπτυχιακή διατριβή η οποία υποβλήθηκε τον Μάιο του 2009
για την απόκτηση του μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης στον τομέα συστημάτων
παραγωγής του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης

στη μνήμη της μητέρας μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διατριβή δεν θα μπορούσε να εκπονηθεί χωρίς την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του κ. Γεώργιου Σταυρουλάκη, καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, ακόμη και κάτω από δύσκολες, πολλές φορές, συνθήκες. Το επιστέγασμα αυτής της συνεργασίας ήταν δύο δημοσιεύσεις αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την παρούσα ερευνητική διατριβή. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω και την κ. Daniela Marinova, καθηγήτρια του πολυτεχνείου της Σόφιας, για την συνεργασία μας στα πλαίσια αυτών των δημοσιεύσεων. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ηθική και υλική υποστήριξη που μου παρείχε κατά την διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και όλους τους φίλους και συναδέλφους που με στήριξαν τη περίοδο αυτή. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την συνάδελφο και φίλη Αντωνέλλα Βλάσση για την πολύτιμη βοήθειά της, αλλά και την καθημερινή της υποστήριξη.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή	7
2	Πιεζοηλεκτρικά συστήματα.....	8
2.1	Ευφυή υλικά.....	8
2.2	Πιεζοηλεκτρισμός (Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο).....	9
2.3	Πιεζοηλεκτρικά υλικά.....	10
2.4	Πιεζοηλεκτρικά ελάσματα	11
2.5	Ενεργός και παθητική απόσβεση με χρήση πιεζοηλεκτρικών διατάξεων ...	12
2.6	Μοντέλα ευφύων δοκών και κατασκευών	14
3	Έλεγχος	18
3.1	Θεωρίες ελέγχου	18
3.1.1	Κλασικός (ενεργός) έλεγχος	18
3.1.2	Ευφυής έλεγχος.....	20
3.2	Ασαφής λογική.....	21
3.2.1	Ασαφή σύνολα	21
3.2.2	Συναρτήσεις συμμετοχής	22
3.2.3	Ασαφοποίηση.....	23
3.2.4	Ορισμός τιμών στις συναρτήσεις συμμετοχής.....	23
3.2.5	Αποασαφοποίηση.....	24
3.2.6	Ασαφή συστήματα συνεπαγωγής	25
3.2.7	Μέθοδοι ασαφούς συνεπαγωγής.....	26
3.3	Ασαφής ελεγκτής τύπου Mamdani	27
3.4	Δυναμική κατασκευής και ασαφής έλεγχος	29
4	Αριθμητικά παραδείγματα	31
4.1	Το fis editor του πακέτου fuzzy toolbox του Matlab.....	31
4.2	Το πρόβλημα του συστήματος ελέγχου πορείας σε αυτοκίνητο.	31
4.3	Το σύστημα μάζας – ελατηρίου (μονοδιάστατος ταλαντωτής).	31
4.4	Η πρόβoλος δοκός (διδιάστατος ταλαντωτής).....	36
4.4.1	Αποτελέσματα του προβλήματος της προβόλου δοκού με έναν ελεγκτή πριν την «πύκνωση» των συναρτήσεων συμμετοχής.	39
4.4.2	Αποτελέσματα του προβλήματος της προβόλου δοκού με έναν ελεγκτή μετά την «πύκνωση» των συναρτήσεων συμμετοχής.....	42

4.4.3	Αποτελέσματα του προβλήματος της προβόλου δοκού με δύο ελεγκτές πριν την «πύκνωση» των συναρτήσεων συμμετοχής.	44
4.4.4	Αποτελέσματα του προβλήματος της προβόλου δοκού με δύο ελεγκτές μετά την «πύκνωση» των συναρτήσεων συμμετοχής.....	49
4.4.5	Αποτελέσματα κλασικού ελέγχου (LQR) για το πρόβλημα της προβόλου δοκού.....	54
5	Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	56
	Δημοσιεύσεις	57
	Βιβλιογραφία	58

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ευφυή συστήματα που περιλαμβάνουν αισθητήρες και διεγέρτες αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον μέσω κάποιου ενεργού μηχανισμού ελέγχου. Σε τέτοιου είδους προβλήματα υπάρχει πάντα κάποιος βαθμός αβεβαιότητας δεδομένου ότι το υπό εξέταση μηχανικό μοντέλο καθώς και οι αισθητήρες και οι διεγέρτες δεν είναι τέλει. Ο κλασικός έλεγχος είναι γενικά ευαίσθητος στην ύπαρξη αβεβαιότητας, η απόδοσή του ωστόσο μειώνεται δραματικά.

Η απόδοση αλγορίθμων εύρωστου ελέγχου για την μείωση των ταλαντώσεων μπορεί να ελεγχθεί με χρήση σύνθετων μηχανικών κατασκευών, όπως δοκοί και πλάκες σε κάμψη, σε συνδυασμό με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά.

Η σχεδίαση κανόνων ελέγχου μη γραμμικής ανάδρασης με χρήση κλασικών μεθόδων είναι δύσκολο εγχείρημα. Ακόμη και στον κλασικό εύρωστο έλεγχο, η επιλογή κατάλληλων αριθμητικών παραμέτρων, όπως τα βάρη στον H_∞ έλεγχο, δεν είναι απλή υπόθεση. Για όλους του ανωτέρω λόγους προτείνεται η χρήση τεχνικών ευφυούς ελέγχου, που περιλαμβάνει ασαφή, νευρωνικό και υβριδικό έλεγχο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η χρήση μηχανισμών βασισμένων σε τεχνικές ευφυούς ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα εξετάζουμε τεχνικές ασαφούς ελέγχου.

Οι τεχνικές που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία είναι κατάλληλες για επίλυση τόσο γραμμικών όσο και μη γραμμικών συστημάτων και μπορούν να εφαρμοστούν σε πλήθος διαφορετικών εφαρμογών, όπως για παράδειγμα, στον αντισεισμικό έλεγχο κατασκευών.

Στόχος της παρούσης εργασίας ήταν η ανάπτυξη αξιόπιστου συστήματος ασαφούς ελέγχου και η σύνδεσή του με αλγόριθμο αριθμητικής ολοκλήρωσης για τη μελέτη δυναμικών συστημάτων στη μηχανική με ασαφή έλεγχο. Το πρόβλημα-μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια ελαστική δοκός με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και διεγέρτες, η οποία διακριτοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Στην δοκό εφαρμόστηκαν ασαφείς ελεγκτές, με σκοπό τον έλεγχο των ταλαντώσεών της και την επιβολή δυνάμεων ελέγχου ώστε αυτή να παραμένει κατά το δυνατόν πλησιέστερα στη θέση ισορροπίας. Το σύνολο των προγραμμάτων που αναπτύχθηκαν είναι εφαρμόσιμα για τον έλεγχο οποιασδήποτε μηχανικής κατασκευής.

2 ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1 Ευφυή υλικά

Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά ανήκουν στην κατηγορία των ευφυών υλικών. Τα υλικά αυτά διακρίνονται για την ικανοποιητική τους απόκριση σε ερεθίσματα διαφορετικής φύσης. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα διάφορα φαινόμενα που παρατηρούνται στα υλικά αυτά σε σχέση με διάφορες εισόδους.

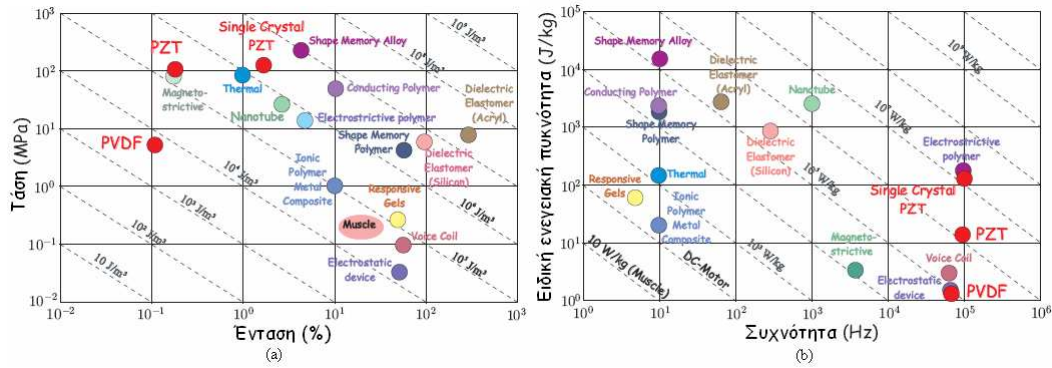
Εξόδος Είσοδος	Ένταση	Ηλεκτρική φόρτιση	Μαγνητική ροή	Θερμοκρασία	Φως
Τάση	Ελαστικότητα	Πιεζο- ηλεκτρισμός	Μαγνητο- συστολή		Φωτο- ελαστικότητα
Ηλεκτρικό πεδίο	Πιεζο- ηλεκτρισμός	Διηλεκτρική σταθερά			Ηλεκτρο- οπτικό φαινόμενο
Μαγνητικό πεδίο	Μαγνητο- συστολή	Μαγνητο- ηλεκτρικό φαινόμενο	Διαπερατότητα		
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 ευφυών υλικών, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ελέγχου, φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

Στο σχήμα 1(a) αναπαρίσταται η μέγιστη τάση σε συνάρτηση με την μέγιστη ένταση. Οι διαγώνιες γραμμές υποδεικνύουν τις διάφορες τάξεις σταθερής ενεργειακής πυκνότητας. Στο σχήμα 1(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.



Σχήμα 1: Μηχανικές ιδιότητες ευφυνών υλικών (με κόκκινο τα πιεζοηλεκτρικά υλικά)

2.2 Πιεζοηλεκτρισμός (Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο)

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τους Pierre και Jacques Curie το 1880. Συνίσταται στην ιδιότητα κάποιων υλικών (κυρίως κρυσταλλικών αλλά και μερικών κεραμικών) να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν δέχονται κάποια μηχανική τάση ή ταλάντωση. Ο πιεζοηλεκτρισμός μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά με τη μεταφορά ελεύθερων φορτίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος.

Το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιείται ευρέως για την έναυση διατάξεων μετατροπής. Κατά το αντίστροφο φαινόμενο, το υλικό υπόκειται σε μηχανική παραμόρφωση, όταν βρεθεί κάτω από ηλεκτρική τάση.

Γενικά, το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι ανισοτροπικό, παρουσιάζεται, δηλαδή, σε υλικά με κρυσταλλική δομή χωρίς κέντρο συμμετρίας, και αποτελεί φαινόμενο πρώτης τάξης. Στην περίπτωση κάποιων κεραμικών υλικών κάτω από μια κρίσιμη θερμοκρασία, γνωστή και ως θερμοκρασία Curie, δημιουργούνται μέσα στον κρύσταλλο ηλεκτρικά δίπολα τυχαίου προσανατολισμού, τα οποία μακροσκοπικά είναι μηδενικά. Κατά την διαδικασία πόλωσης, με την παρουσία ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, τα δίπολα αυτά τείνουν να ευθυγραμμιστούν οδηγώντας μακροσκοπικά σε ένα ηλεκτρικό δίπολο. Μετά την διαδικασία ψύξης και την απομάκρυνση του πεδίου πόλωσης, τα ηλεκτρικά δίπολα δεν μπορούν να επιστρέψουν στις αρχικές τους θέσεις και το υλικό γίνεται μόνιμα πιεζοηλεκτρικό, με την δυνατότητα να μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Η ιδιότητα αυτή χάνεται μόνο όταν η θερμοκρασία υπερβεί την θερμοκρασία Curie, ή όταν η διάταξη μετατροπής υποβληθεί σε πολύ ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο.

Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο εφαρμόζεται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές της ακουστικής. Στο σχήμα 2 βλέπουμε την εφαρμογή του σε ένα απλό ακουστικό.



Σχήμα 2: Εφαρμογή του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου στην ακουστική

Τα πιο σημαντικά διεθνή πρότυπα για τον πιεζοηλεκτρισμό είναι τα ακόλουθα:

- ANSI-IEEE 176 (1987) (Standard on piezoelectricity)
- IEC 302 (1969) (Standard definitions and methods of measurement for piezoelectric vibrators operating over the frequency range up to 30MHz)
- IEC 444 (1973) (Basic method for the measurement of resonance freq & equiv series resistance of quartz crystal units by zero-phase technique in a pi-network)
- IEEE 177 (1976) (Standard definitions and methods of measurement for piezoelectric vibrators)

2.3 Πιεζοηλεκτρικά υλικά

Παραδείγματα υλικών με πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες είναι ο χαλαζίας (SiO_2), το αλάτι Rochelle ή Seignette, το ADP (ammonium dihydrogen phosphate $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), το θειϊκό λίθιο (lithium sulphate Li_2SO_4), ο τουρμαλίνης, το συνθετικό πολυμερές PVDF (polyvinylidene difluoride $(\text{CH}_2\text{CF}_2)_n$) και το κεραμικό PZT (lead zirconate titanate $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ για $0 < x < 1$).

Τα πιο γνωστά από αυτά είναι το PVDF και το PZT. Για την εφαρμογή που μελετάται στην παρούσα εργασία, καταλληλότερο υλικό για την κατασκευή των διατάξεων των αισθητήρων και των διεγερτών είναι το κεραμικό υλικό PZT.

Το PZT (lead zirconate titanate) είναι ένα κεραμικό υλικό με μοριακό τύπο της μορφής $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ όπου το x λαμβάνει τιμές στο (0,1). Αναπτύχθηκε από τους φυσικούς Yutaka Takagi, Gen Shirane και Etsuro Sawaguchi στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας του Τόκιο το 1952.

Το συγκεκριμένο υλικό, όντας πιεζοηλεκτρικό, έχει την ιδιότητα να αναπτύσσει διαφορά δυναμικού όταν δέχεται μηχανικές τάσεις. Το γεγονός αυτό το καθιστά κατάλληλο για την κατασκευή αισθητήρων. Αντίστοιχα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή διεγερτών λόγω της ιδιότητάς του να αλλάζει το σχήμα του με φυσικό τρόπο σε περίπτωση που του εφαρμοστεί ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο.

Επιπρόσθετα το υλικό PZT είναι και πυροηλεκτρικό, δηλαδή αναπτύσσει διαφορά δυναμικού σε περιπτώσεις αλλαγής της θερμοκρασίας του, καθώς και φεροηλεκτρικό,

δηλαδή έχει την ιδιότητα αυτογενούς ηλεκτρικής πόλωσης (ηλεκτρικά δίπολα), η οποία μπορεί να αναστραφεί με τη παρουσία ενός ηλεκτρικού πεδίου.

Το PZT χαρακτηρίζεται από την εξαιρετικά μεγάλη διηλεκτρική σταθερά του στο όριο MPB (morphotropic phase boundary) όταν $x \approx 0.52$ δηλαδή όταν ο μοριακός του τύπος είναι της μορφής $\text{PbZr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48}\text{O}_3$. Το γεγονός αυτό το καθιστά ένα από τα σημαντικότερα και πιο χρήσιμα ηλεκτροκεραμικά υλικά.

Τα μείγματα με PZT συντίθενται από μόλυβδο, ζirkόνιο και μείγμα τιτανικού οξέος τα οποία αναμειγνύονται κάτω από πολύ υψηλές θερμοκρασίες και κατόπιν φιλτράρονται με χρήση μηχανικών φίλτρων.

Το PZT χρησιμοποιείται στην κατασκευή μετατροπέων υπερήχων και άλλων αισθητήρων και διεγερτών, καθώς και κεραμικών πυκνωτών και ολοκληρωμένων κυκλωμάτων φεροηλεκτρικής μνήμης τυχαίας προσπέλασης FRAM (Ferroelectric Random Access Memory). Χρησιμοποιείται επίσης στην κατασκευή κεραμικών διεγερτών (ceramic resonators) για τον συγχρονισμό ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Ένας τέτοιος διεγέρτης φαίνεται στο σχήμα 3.

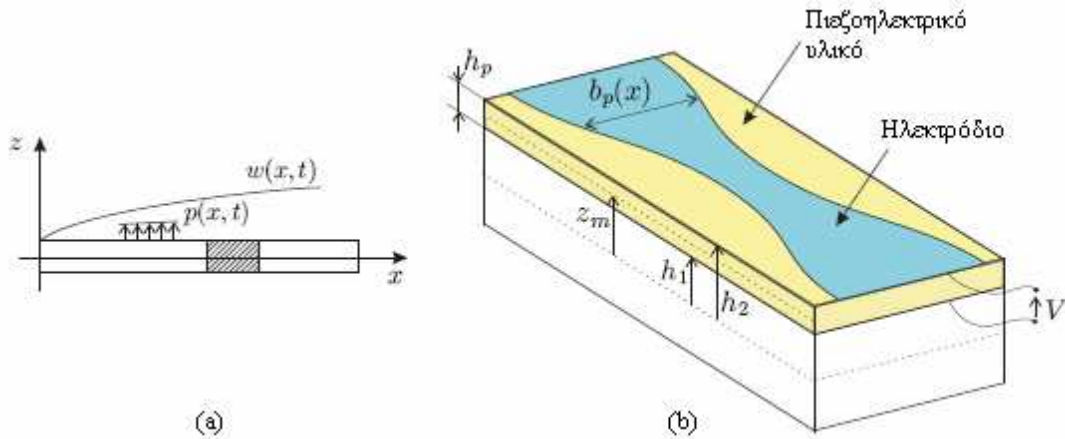


Σχήμα 3: Κεραμικός διεγέρτης από PZT

2.4 Πιεζοηλεκτρικά ελάσματα

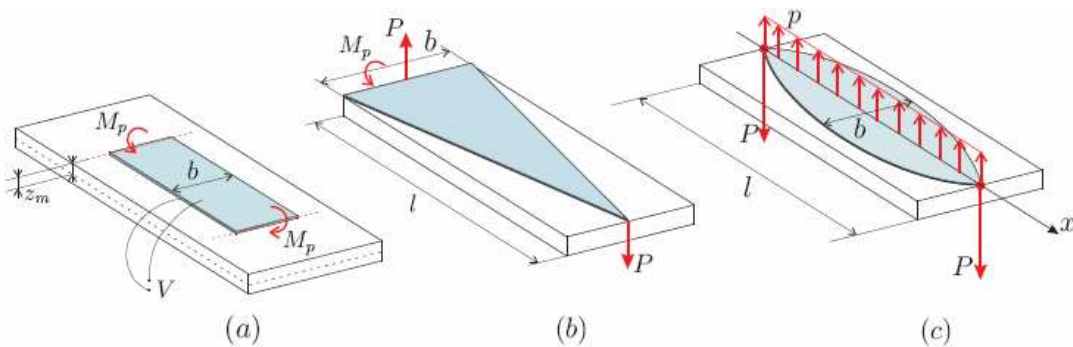
Θεωρούμε την πιεζοηλεκτρική δοκό του σχήματος 4(a). Έστω ότι καλύπτεται από ένα μονό στρώμα πιεζοηλεκτρικού υλικού ομοιόμορφου πάχους h_p , πολωμένου κατά τον άξονα z . Η γραμμοσκιασμένη περιοχή φαίνεται λεπτομερώς στο σχήμα 4(b). Η υποστηρικτική δομή ενεργεί ως ηλεκτρόδιο στην μια πλευρά, ενώ στην άλλη υπάρχει ένα ηλεκτρόδιο μεταβλητού πλάτους $b_p(x)$. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων μπορεί να ελεγχθεί, έτσι ώστε το πιεζοηλεκτρικό υλικό που βρίσκεται ανάμεσά τους να υποβληθεί σε ένα ηλεκτρικό πεδίο E_3 παράλληλο της διεύθυνσης της πόλωσης. Ως $w(x,t)$ σημειώνονται οι κάθετες μετακινήσεις της δοκού.

Στις εφαρμογές συστημάτων ελέγχου με πιεζοηλεκτρικά υλικά, στόχος είναι η μείωση φαινομένων κάμψης. Η διαδικασία είναι εξαιρετικά απλή. Η ηλεκτρική διέγερση στην οποία υποβάλλεται το υλικό, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ροπών κάμψης. Οι ροπές αυτές χρησιμοποιούνται σαν εξισορροπητικές δυνάμεις στο υπό εξέταση σύστημα.



Σχήμα 4: Πιεζοηλεκτρική δοκός μονού στρώματος με ηλεκτρόδιο μεταβλητού πάχους

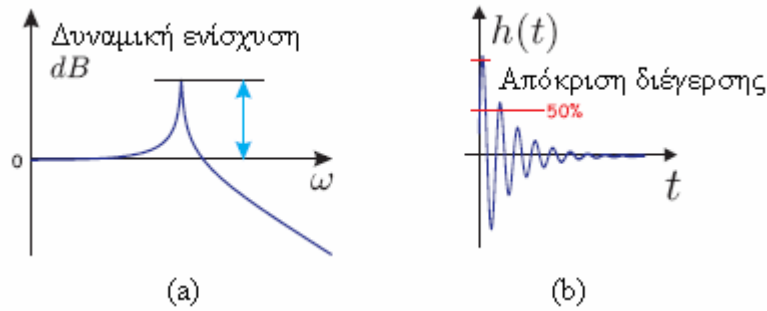
Στο σχήμα 5 φαίνονται κάποια παραδείγματα ηλεκτροδίων διαφόρων σχημάτων με τα αντίστοιχα πιεζοηλεκτρικά φορτία. Το ορθογωνικό ηλεκτρόδιο του σχήματος 5(a) είναι ισοδύναμο με ένα ζεύγος ροπών κάμψης M_p που εφαρμόζεται στα άκρα του. Το τριγωνικό ηλεκτρόδιο του σχήματος 5(b) είναι ισοδύναμο με ένα ζεύγος σημειακών δυνάμεων P και μια ροπή κάμψης M_p . Σε περίπτωση που η δοκός είναι πακτωμένη στο αριστερό της άκρο, τα φορτία προκύπτουν από την στήριξη και την μοναδική δύναμη που απομένει, δηλαδή την σημειακή φόρτιση στο δεξί άκρο. Τέλος, ένα παραβολικό ηλεκτρόδιο, όπως αυτό του σχήματος 5(c), είναι ισοδύναμο με ένα ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο p και ένα ζεύγος σημειακών δυνάμεων P στα άκρα του. Σε κάθε περίπτωση τα πιεζοηλεκτρικά φορτία είναι αυτό-εξισορροπούμενα.



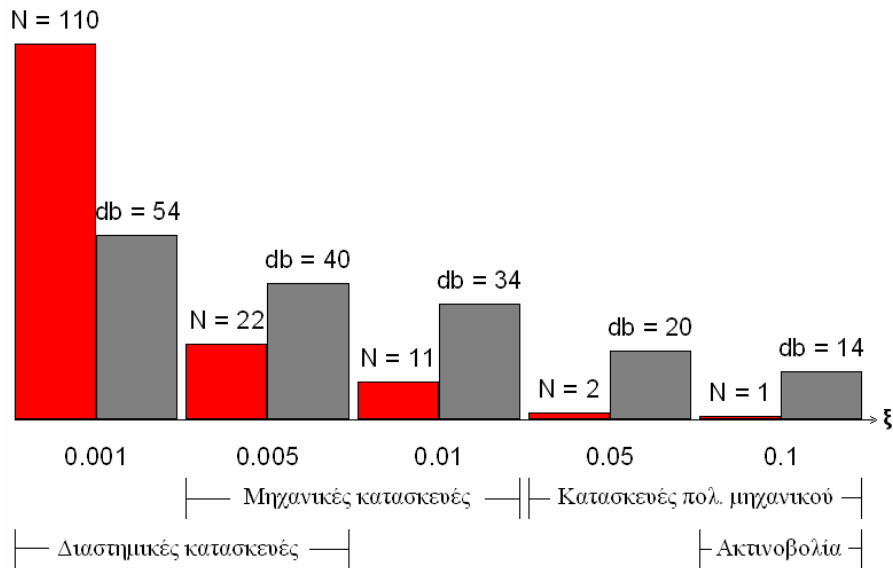
Σχήμα 5: Παραδείγματα ηλεκτροδίων (a) ορθογωνικό, (b) τριγωνικό, (c) παραβολικό

2.5 Ενεργός και παθητική απόσβεση με χρήση πιεζοηλεκτρικών διατάξεων

Η απόσβεση είναι απαραίτητη για τον περιορισμό των καταστρεπτικών επιπτώσεων του μηχανικού συντονισμού. Ας θεωρήσουμε έναν ταλαντωτή με έναν βαθμό ελευθερίας. Στο σχήμα 6(a) φαίνεται η επίδραση της κρίσιμης απόσβεσης ξ στην δυναμική ενίσχυση σε συντονισμό, εκφρασμένη σε dB. Αντίστοιχα, στο σχήμα 6(b) φαίνεται η επίδραση αυτή στον αριθμό των κύκλων N που απαιτούνται για την μείωση του πλάτους της απόκρισης διέγερσης στο 50%. Όλα τα παραπάνω, μαζί με κάποιες τυπικές τιμές απόσβεσης για διάφορους κλάδους της μηχανικής κατασκευών, φαίνονται στο σχήμα 7.



Σχήμα 6: Η επίδραση της απόσβεσης (a) στην δυναμική ενίσχυση και (b) στους κύκλους που απαιτούνται για την μείωση της απόκρισης διέγερσης στο 50%



Σχήμα 7: Τιμές απόσβεσης στους κλάδους της μηχανικής κατασκευών

Μια κατασκευή με έναν ή περισσότερους πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να εισάγουμε απόσβεση στο υπό εξέταση σύστημα είτε με ενεργητικό είτε με παθητικό τρόπο.

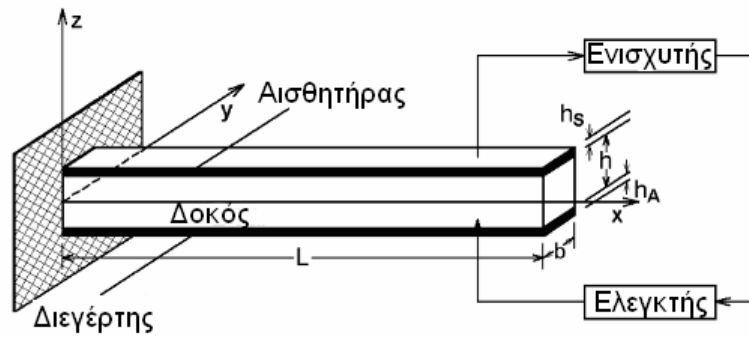
Η ενεργός απόσβεση προϋποθέτει την εισαγωγή ενός αισθητήρα και ενός βρόχου ελέγχου ανάδρασης, εγείροντας όλα τα ζητήματα του κλασικού ελέγχου όπως η σταθερότητα, η ευρωστία, κλπ. Η εφαρμογή που αναπτύσσεται στη παρούσα εργασία εμπίπτει στην κατηγορία προβλημάτων ενεργούς απόσβεσης. Τα σημεία της μέτρησης των μετακινήσεων και τα σημεία της εφαρμογής των δυνάμεων ελέγχου ταυτίζονται (collocated sensor/actuator pairs), προκειμένου να επωφεληθούμε από το εναλλασσόμενο σχήμα πόλων/μηδενικών (pole/zero pattern) της συνάρτησης μεταφοράς ανοιχτού βρόχου. Χάρη σε αυτή την ιδιότητα μπορούμε να διατυπώσουμε κανόνες ελέγχου εγγυημένης σταθερότητας, άσχετα με τις διαφοροποιήσεις των παραμέτρων της κατασκευής.

Η παθητική απόσβεση μπορεί επίσης να επιτευχθεί με πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς, εάν η ενέργεια από τις μηχανικές δονήσεις μετατραπεί σε ηλεκτρική, και κατόπιν διοχετευτεί σε ένα παθητικό ηλεκτρικό δίκτυο. Εάν οι μετατροπείς τοποθετηθούν με

τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται το ποσό της μηχανικής ενέργειας που αποθηκεύουν, και παράλληλα να μειώνονται οι απώλειες μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική στο ελάχιστο, μπορούν να επιτευχθούν ιδιαίτερα ικανοποιητικά ποσοστά απόδοσης. Επομένως, η απόδοση μιας τέτοιας κατασκευής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον σχεδιασμό της.

2.6 Μοντέλα ευφών δοκών και κατασκευών

Στην ευφή δοκό του σχήματος 8, οι διεγέρτες και οι αισθητήρες ελέγχου είναι πιεζοηλεκτρικά επιθέματα (στρώσεις), τοποθετημένα συμμετρικά στην άνω και στην κάτω επιφάνεια της δοκού. Οι πιεζοηλεκτρικές στρώσεις τοποθετούνται με τις ίδιες ακριβώς πολικές διευθύνσεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως αισθητήρες είτε ως διεγέρτες. Για την ανάλυση του συστήματος υιοθετείται η γραμμική θεωρία του πιεζοηλεκτρισμού. Επιπρόσθετα, θεωρείται ότι η κίνηση είναι οιονεί στατική, δηλαδή τα μηχανικά και τα ηλεκτρικά φορτία εξισορροπούνται σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή.



Σχήμα 8: Δοκός με πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες και διεγέρτες και το σχήμα ελέγχου

Οι γραμμικές εξισώσεις του συστήματος είναι:

$$\{\sigma\} = [Q](\{\varepsilon\} - [d]^T \{E\}) \quad (2.1)$$

$$\{D\} = [d][Q]\{\varepsilon\} + [\xi]\{E\} \quad (2.2)$$

όπου $\{\sigma\}_{6 \times 1}$ είναι το διάνυσμα των τάσεων, $\{\varepsilon\}_{6 \times 1}$ το διάνυσμα εντάσεων, $\{D\}_{3 \times 1}$ οι ηλεκτρικές μετακινήσεις, $\{E\}_{3 \times 1}$ η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δρα στην πιεζοηλεκτρική επιφάνεια, $[Q]_{6 \times 6}$ το ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας, $[d]_{3 \times 6}$ το πιεζοηλεκτρικό μητρώο και $[\xi]_{3 \times 3}$ το μητρώο της διηλεκτρικής σταθεράς. Η εξίσωση (2.1) περιγράφει το αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (σύμφωνα με το οποίο γίνεται ο σχεδιασμός των διεγερτών). Αντίστοιχα, η εξίσωση (2.2) περιγράφει το ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (το οποίο χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό των αισθητήρων).

Για την κατασκευή του απλοποιημένου μοντέλου γίνονται κάποιες περαιτέρω υποθέσεις:

- a) Τα στρώματα του αισθητήρα και του διεγέρτη είναι πολύ λεπτά σε σχέση με το πάχος της δοκού.
- b) Η κατεύθυνση των πόλων του αισθητήρα και του διεγέρτη είναι η κατεύθυνση του πάχους της δοκού (άξονας z).
- c) Το ηλεκτρικό πεδίο είναι ομοιόμορφο και ομοαξονικό στη κατεύθυνση x .
- d) Το πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι ομοιογενές, εγκάρσια ισοτροπικό και ελαστικό.

Συνεπώς, οι εξισώσεις (2.1) και (2.2) μετατρέπονται ως εξής:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 \\ 0 & Q_{55} \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} d_{31} \\ 0 \end{bmatrix} E_z \right) \quad (2.3)$$

$$D_z = Q_{11} d_{31} \varepsilon_x + \xi_{33} E_z \quad (2.4)$$

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E_z εκφράζεται ως εξής:

$$E_z = \frac{V}{h_A} \quad (2.5)$$

όπου V είναι η τάση που εφαρμόζεται κατά μήκους της διεύθυνσης του πάχους του διεγέρτη και h_A το πάχος του στρώματος του διεγέρτη.

Στο στρώμα του αισθητήρα δρουν μόνο οι εντάσεις της δοκού. Δεν εφαρμόζεται κανένα ηλεκτρικό πεδίο. Έτσι, η εξωτερική φόρτιση από τον αισθητήρα μπορεί να υπολογιστεί με χρήση της εξίσωσης (2.4) και δίδεται ως:

$$q(t) = \frac{1}{2} \left\{ \left(\int_{S_{ef}} D_z dS \right)_{z=h/2} + \left(\int_{S_{ef}} D_z dS \right)_{z=h/2+h_s} \right\} \quad (2.6)$$

όπου S_{ef} είναι η ενεργός επιφάνεια του ηλεκτροδίου που τοποθετείται στο στρώμα του αισθητήρα.

Η ένταση του ρεύματος στην επιφάνεια του αισθητήρα δίδεται ως:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Η ένταση του ρεύματος μετατρέπεται σε τάση αισθητήρα ανοιχτού κυκλώματος σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V^s = G_s i(t) \quad (2.8)$$

όπου G_s το κέρδος του ενισχυτή.

Επιπρόσθετα, υποθέτουμε ότι η ροπή κάμψης και οι αξονικές δονήσεις του κεντρικού άξονα της δοκού είναι αμελητέες καθώς και ότι τα στοιχεία του πεδίου μετακινήσεων $\{u\}$ της δοκού βασίζονται στη θεωρία του Timoshenko. Σύμφωνα με την θεωρία αυτή, οι αξονικές μετακινήσεις είναι ανάλογες του z και της περιστροφής $\psi(x,t)$ του εμβαδού διατομής της δοκού στον θετικό y -ημιάξονα, και οι κάθετες μετακινήσεις είναι ίσες με τις κάθετες μετακινήσεις $w(x,t)$ στο σημείο όπου $y = z = 0$. Η σχέση μεταξύ της έντασης και των μετακινήσεων δίδεται ως:

$$\varepsilon_x = z \frac{\partial \psi}{\partial x}, \varepsilon_{xz} = \psi + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.9)$$

Επίσης, έγιναν και κάποιες δοκιμές με την απλούστερη θεωρία των Euler-Bernoulli, η οποία θεωρεί μηδενική κάθετη παραμόρφωση γ_{xz} . Η παραγωγή των εξισώσεων κίνησης της δοκού έγινε σύμφωνα με την αρχή του Hamilton. Για περισσότερες εφαρμογές του πιεζοηλεκτρισμού σε προβλήματα ελέγχου, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στη βιβλιογραφία (Irschik 2002).

Για την διακριτοποίηση της δοκού χρησιμοποιήσαμε πεπερασμένα στοιχεία με δύο βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο, την κάθετη παραμόρφωση w_i και τη στροφή ψ_i . Τα μεγέθη αυτά συνθέτουν το διάνυσμα των βαθμών ελευθερίας $X_i = [w_i \ \psi_i]$. Μετά και την συναρμογή των μητρώων μάζας και δυσκαμψίας για όλα τα στοιχεία, προκύπτει η εξίσωση κίνησης, η οποία είναι της μορφής:

$$M\ddot{X} + \Lambda\dot{X} + KX = F_m + F_e \quad (2.10)$$

όπου M και K είναι τα γενικευμένα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας, F_e το γενικευμένο διάνυσμα ηλεκτρομηχανικών δυνάμεων, Λ το μητρώο απόσβεσης και F_m το διάνυσμα εξωτερικών φορτίσεων. Πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι και οι θεωρίες για μοντέλα πλάκας κατασκευάζονται με ανάλογο τρόπο.

Ο βασικός αντικειμενικός σκοπός είναι η σχεδίαση εύρωστων νόμων για τον έλεγχο ευφυών δοκών με πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς (αισθητήρες / διεγέρτες), οι οποίες υπόκεινται σε εξωτερικές δονήσεις. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η ακόλουθη αναπαράσταση στον χώρο καταστάσεων (state-space):

$$\dot{X} = Ax + B_1 w + B_2 u \quad (2.11)$$

όπως συνηθίζεται σε προβλήματα ελέγχου γενικών δυναμικών συστημάτων. Για το πρόβλημα που εξετάζουμε στην παρούσα εργασία, έχουμε:

$$x = [X \quad \dot{X}]^T, A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}\Lambda \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

όπου x το διάνυσμα κατάστασης, A το μητρώο καταστάσεων, B_1 και B_2 τα μητρώα κατανομής των διαταραχών w (σε σχέση με τις εξωτερικές δυνάμεις F_m) και του ελέγχου u (σε σχέση με τις ηλεκτρομηχανικές δυνάμεις F_e). Οι αρχικές συνθήκες θεωρείται ότι είναι μηδενικές. Ο μοναδιαίος πίνακας συμβολίζεται με I .

3 ΈΛΕΓΧΟΣ

3.1 Θεωρίες ελέγχου

3.1.1 Κλασικός (ενεργός) έλεγχος

a) Γενικά

Ας θεωρήσουμε ότι οι μετρήσεις είναι της ακόλουθης μορφής:

$$y = Cx + Du \quad (3.1)$$

Ο νόμος ελέγχου που χρησιμοποιείται συνήθως στην κλασική θεωρία είναι μια γραμμική ανάδραση της μορφής:

$$u = Ky \quad (3.2)$$

όπου K είναι το άγνωστο κέρδος του ελεγκτή.

Αντικειμενικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός του διανύσματος των ενεργών δυνάμεων ελέγχου $u(t)$ υπό κάποια κριτήρια απόδοσης, ικανοποιώντας, παράλληλα, τις δυναμικές εξισώσεις της κατασκευής, έτσι ώστε να μειωθούν οι εξωτερικές διεγέρσεις για να καλύψουν τις παραπάνω απαιτήσεις. Η διερεύνηση πρέπει να γίνει στο πεδίο του χρόνου καθώς και στο πεδίο των συχνοτήτων. Το πρόβλημα της καταστολής των δονήσεων επιλύεται με τη βοήθεια τόσο του γραμμικού τετραγωνικού ρυθμιστή (Linear Quadratic Regulator ή LQR) όσο και των κριτηρίων βέλτιστης απόδοσης H_2 , H_∞ . Στην πραγματικότητα, αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση του συστήματος ελέγχου χωρίς να λαμβάνουν υπόψη εξωτερικές επιδράσεις (λ.χ. φορτίσεις).

Σε κάποιες εργασίες μελετάται ο κλασικός εύρωστος έλεγχος βάσει των H_2 και H_∞ θεωριών ελέγχου. Η ανάδραση από την εφαρμογή αυτών των θεωριών παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με αυτή που προκύπτει από το κλασικό σχήμα ελέγχου LQR (Linear Quadratic Regulator). Οι ελεγκτές είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε να επιτυγχάνουν βέλτιστη απόδοση και σταθερότητα σε προβλήματα με δεδομένη τάξη αβεβαιότητας. Αυτό επιτυγχάνεται με την επίλυση δύο αλγεβρικών εξισώσεων Ricatti, έναντι μιας στον κλασικό έλεγχο.

Παρακάτω αναφερόμαστε επιγραμματικά στην μέθοδο LQR, η οποία χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων του ασαφούς ελεγκτή που υλοποιήθηκε. Για τεχνικές λεπτομέρειες καθώς και αποτελέσματα άλλων μεθόδων κλασικού ελέγχου, ο αναγνώστης παραπέμπεται σε σχετικές εργασίες (Marinova et al. 2005, Stavroulakis et al. 2007).

b) Γραμμικός τετραγωνικός ρυθμιστής (LQR)

Για το πρόβλημα της απόδοσης στο πεδίο του χρόνου, η ακόλουθη τετραγωνική συνάρτηση ελαχιστοποιείται:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \rightarrow \min \quad (3.3)$$

Οι ελεύθερες παράμετροι Q και R αναπαριστούν τα βάρη που υπεισέρχονται στις διαφορετικές καταστάσεις και στον έλεγχο. Αυτές αποτελούν και τις κύριες σχεδιαστικές παραμέτρους. Το J είναι το σταθμισμένο άθροισμα της ενέργειας κατάστασης και ελέγχου και πρόκειται αδιαμφισβήτητα για μια μορφή συμβιβασμού μεταξύ της ελάττωσης του διανύσματος κατάστασης και του κόστους της απόδοσης ελέγχου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μητρώο Q πρέπει να είναι συμμετρικό και θετικά ημιορισμένο και το μητρώο R συμμετρικό και θετικά ορισμένο ιδιαίτερα όταν πρόκειται για σημαντικά προβλήματα βελτιστοποίησης. Οι τιμές των βαρών καθορίζουν την σχετική σπουδαιότητα απόδοσης και κόστους στην «συμβιβασμένη» συνάρτηση κόστους. Το πρόβλημα που προκύπτει είναι γνωστό ως πρόβλημα LQR και αποτελεί ένα από τα ισχυρότερα και καλύτερα μελετημένα εργαλεία βέλτιστου ελέγχου.

Θεωρώντας ανάδραση πλήρους κατάστασης (με χρήση όλου του διανύσματος κατάστασης), ο νόμος ελέγχου δίδεται ως:

$$U = -K_{LQR} x \quad (3.4)$$

με σταθερό κέρδος ελέγχου:

$$K_{LQR} = R^{-1} B^T P \quad (3.5)$$

Το σταθερό μητρώο P αποτελεί ρίζα της εξίσωσης Riccati.

$$A^T P + P A + Q - P B R^{-1} B^T P = 0 \quad (3.6)$$

Κάτω από ορισμένες τεχνικές υποθέσεις, μπορεί κανείς να εγγυηθεί την ύπαρξη καθώς και την μοναδικότητα του ανωτέρω ελεγκτή. Το σύστημα κλειστού βρόχου αποτελεί την ενεργώς ελεγχόμενη κατασκευή και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\dot{x} = (A - B K_{LQR}) x + F_m \quad (3.7)$$

Ένα πλεονέκτημα της μόρφωσης του προβλήματος με χρήση ελεγκτών LQR έγκειται στην γραμμικότητα του ελέγχου, γεγονός το οποίο διευκολύνει την ανάλυση του συστήματος καθώς και την πρακτική υλοποίησή του. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα του κλασικού ελέγχου έγκειται στην πολύ ικανοποιητική μείωση των διαταραχών και

στην ιδιαίτερα ικανοποιητική παρακολούθηση του συστήματος. Το κέρδος και τα όρια φάσης (phase margins) συνεπάγονται πολύ ικανοποιητική σταθερότητα.

Όλα τα παραπάνω προϋποθέτουν πλήρη γνώση του συνόλου του διανύσματος κατάστασης σε κάθε χρονική στιγμή. Εάν είναι διαθέσιμος μόνο ένας περιορισμένος αριθμός μετρήσεων, οι οποίες, μάλιστα, κατακερματίζονται λόγω της ύπαρξης σφαλμάτων μέτρησης, η αποτελεσματικότητα του LQR μειώνεται δραματικά. Στην περίπτωση αυτή το σύστημα αναδομείται από τις διαθέσιμες μετρήσεις με χρήση κάποιας τεχνικής φιλτραρίσματος (π.χ. φίλτρο Kalman), και κατόπιν το πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου επιλύεται βάσει του νέου μοντέλου (εκτίμηση).

3.1.2 Ευφυής έλεγχος

a) Γενικά

Το συγκριτικό πλεονέκτημα των κλασικών θεωριών ελέγχου έγκειται στην διαθεσιμότητα μαθηματικών εργαλείων για τον σχεδιασμό των ελεγκτών και την μελέτη των ιδιοτήτων τους, όπως σταθερότητα, ευρωστία κλπ. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι οι πιο σημαντικές ιδιότητες των ελεγκτών βασίζονται στη κατανόηση του συνόλου του δυναμικού συστήματος. Σε περίπτωση που δεν ενδιαφέρει μια ολιστική θεώρηση, εισάγεται κάποιος εκτιμητής όπως λ.χ. ένα φίλτρο Kalman. Η ποιότητα και η αξιοπιστία του εκτιμητή αυτού ορίζει και την αποτελεσματικότητα ολόκληρου του συστήματος ελέγχου. Επιπρόσθετα, ένα σημαντικό μειονέκτημα του κλασικού ελέγχου έγκειται στην ύπαρξη γραμμικής ανάδρασης. Οι μη γραμμικοί κανόνες ελέγχου είναι, ασφαλώς, πιο ευέλικτοι. Επίσης, είναι και πιο κατάλληλοι για μη γραμμικά συστήματα. Τα εργαλεία κλασικού ελέγχου για τον σχεδιασμό μη γραμμικών ελεγκτών είναι λιγότερο ανεπτυγμένα και απαιτούν βαθύτερη θεωρητική διερεύνηση από τους μηχανικούς σχεδιασμού. Για το λόγο αυτό, οι μη γραμμικοί ελεγκτές βασίζονται κυρίως σε εργαλεία ευφυούς ελέγχου.

b) Τεχνικές ευφυούς ελέγχου

Οι πιο σημαντικές τεχνικές ευφυούς ελέγχου συνοψίζονται ως ακολούθως:

1. Νευρωνικά δίκτυα

Τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να εκπαιδευτούν προκειμένου να προσεγγίσουν κάθε μη γραμμική σχεδίαση. Επομένως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την προσέγγιση της αντίστροφης δυναμικής σχεδίασης ενός συστήματος, καθώς και για την εύρεση ανάδρασης. Το σύστημα κλειστού βρόχου που προκύπτει έχει τη δυνατότητα καταστολής των δονήσεων. Ωστόσο, για την εφαρμογή της τεχνικής αυτής απαιτείται μεγάλος αριθμός αντιπροσωπευτικών μετρήσεων ή δεδομένων μοντελοποίησης για την εκπαίδευση και την αξιολόγηση του συστήματος.

2. Ασαφή συστήματα συνεπαγωγής

Οι ασαφείς κανόνες συστηματοποιούν την υπάρχουσα εμπειρία και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μαθηματική μοντελοποίηση μη γραμμικών ελεγκτών. Η ανάδραση βασίζεται σε ασαφή συνεπαγωγή και μπορεί να είναι μη γραμμική και περίπλοκη. Για την εφαρμογή αυτής της τεχνικής απαιτείται γνώση ή εμπειρία σε συστήματα ελέγχου. Δεδομένου ότι οι λεκτικοί κανόνες παρουσιάζουν δυσκολίες στην κατανόηση αλλά και στη διατύπωσή τους για συστήματα πολλαπλών εισόδων - πολλαπλών εξόδων (multi-input, multi-output, MIMO), οι περισσότερες εφαρμογές βασίζονται σε ελεγκτές πολλαπλών εισόδων - μονής εξόδου (multi-input, single-output, MISO).

3. Υβριδικές και προσαρμοστικές τεχνικές

Οι τεχνικές αυτές συνδυάζουν στοιχεία από όλες τις παραπάνω μεθόδους. Για παράδειγμα, οι απαιτούμενες λεπτομέρειες ενός ασαφούς συστήματος μπορούν να ρυθμιστούν με χρήση νευρωνικών δικτύων ή γενετικής βελτιστοποίησης.

Περαιτέρω λεπτομέρειες σχετικά με τον ασαφή έλεγχο μπορούν να βρεθούν σε κλασικές μονογραφίες (Driankov et al. 1996). Στην περιοχή των ευφών συστημάτων, πολλοί συγγραφείς υιοθετούν την εφαρμογή νευρω-ασαφών τεχνικών ελέγχου. Ειδικότερα, οι τεχνικές αυτές μοιάζουν καταλληλότερες για τον έλεγχο κατασκευών με περίπλοκα ή μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως είναι τα συστήματα αρμονικών αποσβεστήρων στον σεισμικό σχεδιασμό (Pourzeynali et al. 2007, Wang & Lin 2007) ή τα συστήματα ημι - ενεργού ελέγχου με χρήση ενεργών τριβών ή αποσβεστήρων ρευστών (Reigles & Symans 2006).

Στην παρούσα εργασία δοκιμάζεται ένας ασαφής ελεγκτής δύο εισόδων - μιας εξόδου. Η ανάδραση του συστήματος που αναλύεται είναι μια δύναμη ελέγχου, βασισμένη στη μετατόπιση και την ταχύτητα σε ένα δεδομένο σημείο (σημείο μέτρησης και εφαρμογής του ελέγχου). Η διάταξη MISO είναι κατάλληλη για τέτοιου είδους συστήματα. Σε μια μεγαλύτερη κατασκευή υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης, εάν κριθεί απαραίτητο, επιπλέον ανεξάρτητων και αποκεντρωμένων (τοπικών) ασαφών ελεγκτών με τα ίδια ή με διαφορετικά χαρακτηριστικά.

3.2 Ασαφής λογική

3.2.1 Ασαφή σύνολα

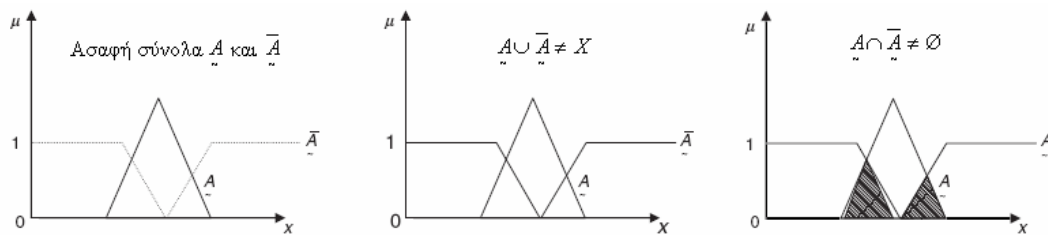
Στα κλασικά σύνολα, ένα στοιχείο του χώρου ανήκει στο υπό εξέταση σύνολο όταν λαμβάνει την τιμή 1. Σε αντίθετη περίπτωση, το στοιχείο λαμβάνει την τιμή 0 και δεν ανήκει στο σύνολο. Στα ασαφή σύνολα κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Κάθε στοιχείο του χώρου μπορεί να λάβει τιμή από ένα εύρος τιμών και να ανήκει στο υπό εξέταση σύνολο με αυτή την τιμή η οποία δείχνει το ποσοστό συμμετοχής του στοιχείου στο σύνολο. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τιμή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η συμμετοχή

του στοιχείου στο σύνολο. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής ενώ το σύνολο ονομάζεται ασαφές σύνολο.

Συνεπώς για να ανήκει ένα στοιχείο σε ένα ασαφές σύνολο δεν απαιτείται πλήρης συμμετοχή όπως στα κλασικά σύνολα. Το δίπολο 0 ή 1 των κλασικών συνόλων αντικαθίσταται από ένα διάστημα τιμών [0,1]. Επιπρόσθετα κάθε στοιχείο του χώρου δύναται να συμμετέχει ταυτόχρονα σε περισσότερα του ενός ασαφή σύνολα με διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής.

Στα ασαφή σύνολα ισχύουν όλοι οι τελεστές (ένωση, τομή, συμπλήρωμα) και οι όλες οι ιδιότητες (μεταβατική, προσεταιριστική, αντιμεταθετική) των κλασικών συνόλων. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η αρχή του αποκλειόμενου μέσου. Λόγω της επικάλυψης που μπορεί να υπάρξει στα ασαφή σύνολα, η αρχή αυτή διαφοροποιείται από αυτή των κλασικών συνόλων ως εξής:

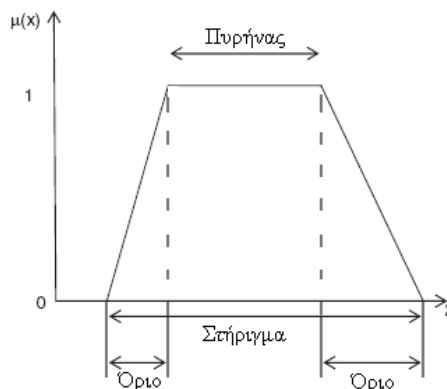
$$\underset{\sim}{A} \cup \underset{\sim}{\bar{A}} \neq X \text{ και } \underset{\sim}{A} \cap \underset{\sim}{\bar{A}} \neq \emptyset$$



Σχήμα 9: Αρχή αποκλειόμενου μέσου

3.2.2 Συναρτήσεις συμμετοχής

Ο βαθμός ασάφειας ενός ασαφούς συνόλου ορίζεται από τις συναρτήσεις συμμετοχής του. Η αναπαράσταση των συναρτήσεων αυτών μπορεί να γίνει είτε αριθμητικά, είτε γραφικά. Οι γραφικές αναπαραστάσεις περιλαμβάνουν διάφορες σχηματικές μορφές, κάθε μια με τους δικούς της περιορισμούς. Οι συναρτήσεις συμμετοχής μπορεί να είναι συμμετρικές ή ασύμμετρες. Τα βασικά χαρακτηριστικά των συναρτήσεων συμμετοχής είναι ο πυρήνας, το στήριγμα και τα όρια όπως φαίνονται στο σχήμα 10.



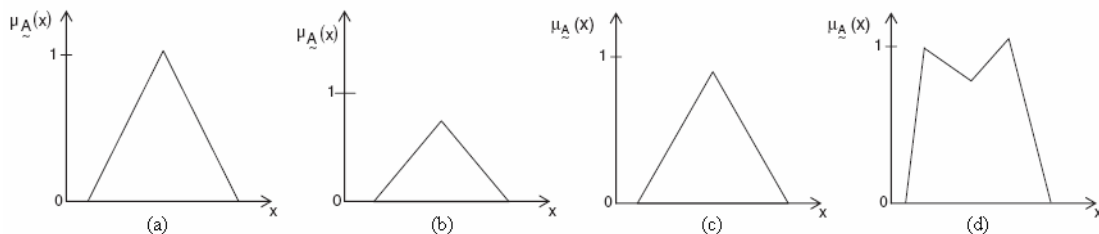
Σχήμα 10: Χαρακτηριστικά συναρτήσεων συμμετοχής

Οι συναρτήσεις συμμετοχής μπορεί να είναι οποιασδήποτε παραμετροποιημένης μορφής. Οι πιο δημοφιλείς μορφές περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων:

- Τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής
- Τραπεζοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής
- Κωδωνοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής
- Γκαουσιανές (Gauss) συναρτήσεις συμμετοχής
- Σιγμοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής

Τα ασαφή σύνολα μπορούν να ταξινομηθούν βάσει των συναρτήσεων συμμετοχής όπως φαίνεται και στο σχήμα 11 ως εξής:

- Κανονικά ασαφή σύνολα (μια τουλάχιστον συνάρτηση συμμετοχής αγγίζει το 1)
- Υποκανονικά ασαφή σύνολα (καμία συνάρτηση συμμετοχής δεν αγγίζει το 1)
- Κυρτά ασαφή σύνολα
- Μη – κυρτά ασαφή σύνολα



Σχήμα 11: Είδη ασαφών συνόλων

3.2.3 Ασαφοποίηση

Η ασαφοποίηση είναι από τις πλέον σημαντικές διαδικασίες για την ασαφή θεωρία. Συγκεκριμένα πρόκειται για την διαδικασία μετατροπής μιας ακριβούς αριθμητικής ποσότητας σε ασαφή η οποία αναπαρίσταται με τις συναρτήσεις συμμετοχής. Η διαδικασία βασίζεται στην αναγνώριση της αβεβαιότητας που υπάρχει στις ακριβείς ποσότητες.

Σε πρακτικές εφαρμογές είναι πιθανή η ύπαρξη σφαλμάτων με συνακόλουθη μείωση της ακρίβειας των δεδομένων. Αυτή η μείωση της ακρίβειας μπορεί επίσης να αναπαρασταθεί με τις συναρτήσεις συμμετοχής.

3.2.4 Ορισμός τιμών στις συναρτήσεις συμμετοχής

Ο ορισμός των τιμών των συναρτήσεων συμμετοχής μπορεί να γίνει είτε διαισθητικά είτε με χρήση αλγορίθμων και λογικών διαδικασιών. Οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων:

- Διαίσθηση (Intuition)
- Συνεπαγωγή (Inference)
- Κατάταξη (Rank ordering)

- Γωνιακά ασαφή σύνολα (Angular fuzzy sets)
- Νευρωνικά δίκτυα (Neural networks)
- Γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic algorithms)
- Επαγωγική προσαρμογή (Inductive seasoning)

Στην εφαρμογή της δοκού που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία βασιστήκαμε στη «διαίσθηση του μηχανικού» για να δώσουμε τιμές στις συναρτήσεις συμμετοχής. Αν, για παράδειγμα, οι τιμές του πεδίου μετακινήσεων της δοκού που εξετάζαμε ήταν τάξης μεγέθους χιλιοστού (mm), δεν θα ήταν δυνατόν οι συναρτήσεις συμμετοχής να εξέταζαν μετακινήσεις χιλιομέτρων (km).

3.2.5 Αποασαφοποίηση

Με τον όρο αποασαφοποίηση εννοούμε την διαδικασία μετατροπής των ασαφών εξόδων σε ακριβείς. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη δεδομένου ότι οι τιμές των εξόδων πρέπει να είναι ακριβείς ειδικά όταν το ασαφές σύστημα χρησιμοποιείται σαν ελεγκτής, όπου οι ασαφείς έξοδοι δεν είναι χρήσιμες για περαιτέρω επεξεργασία. Για την αποασαφοποίηση των ασαφών συναρτήσεων εξόδου χρησιμοποιούνται οι παρακάτω επτά μέθοδοι:

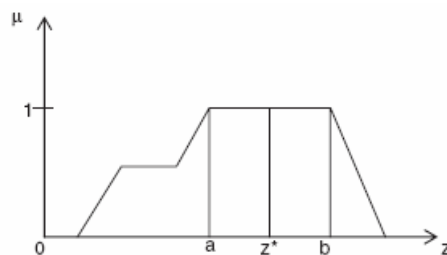
1. Αρχή μεγίστου (Max – membership principle)
2. Κεντροειδής μέθοδος (Centroid method)
3. Μέθοδος σταθμισμένου μέσου (Weighted average method)
4. Μέθοδος μέσου – μεγίστου (Mean of Maximum)
5. Κέντρο βάρους αθροισμάτων (Centre of sums)
6. Κέντρο βάρους μέγιστης επιφάνειας (Centre of largest area)
7. Πρώτη ή τελευταία τιμή μεγίστου (First or last of maxima)

Στην εφαρμογή που υλοποιήσαμε, χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο μέσου – μεγίστου για την αποασαφοποίηση της εξόδου του ασαφούς ελεγκτή.

Στη μέθοδο αυτή δεν απαιτείται ένα μοναδικό μέγιστο, όπως στην αρχή του μεγίστου, αλλά ένα εύρος μεγίστων. Η αποασαφοποιημένη τιμή z^* προκύπτει ως:

$$z^* = \frac{a + b}{2}$$

όπου a και b είναι τα άκρα του εύρους των μεγίστων όπως φαίνεται και στο σχήμα 12.



Σχήμα 12: Μέθοδος μέσου – μεγίστου

3.2.6 Ασαφή συστήματα συνεπαγωγής

Τα ασαφή συστήματα συνεπαγωγής (fuzzy inference systems ή FIS) είναι γνωστά και ως ασαφή συστήματα κανόνων (fuzzy rule – based systems) ή ασαφή μοντέλα (fuzzy models). Ο ελεγκτής που υλοποιείται στην εργασία αυτή είναι ένα τέτοιο σύστημα.

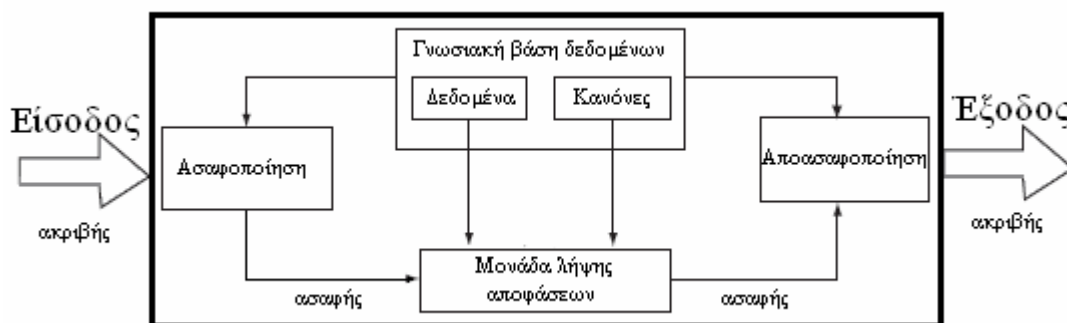
Οι κανόνες των λεκτικών μεταβλητών μπορούν να σχηματιστούν με προσδιοριστικές δηλώσεις (λ.χ. ταχύτητα = υψηλή), δηλώσεις συνθήκης (λ.χ. IF βαθμολογία ≥ 8.5 THEN άριστα) ή δηλώσεις χωρίς συνθήκη. (λ.χ. GO TO). Οι ιδιότητες του συνόλου των κανόνων είναι η πληρότητα, η συνέπεια, η συνέχεια και η αλληλεπίδραση.

Ένα ασαφές σύστημα συνήθως περιγράφεται με περισσότερους του ενός κανόνες. Η διαδικασία σύνοψης των κανόνων για τη λήψη ενός συνολικού συμπεράσματος ονομάζεται συνάθροιση (aggregation). Στην περίπτωση όπου οι επιμέρους κανόνες συνδέονται με τον τελεστή AND, ο προσδιορισμός της συνάθροισης γίνεται με σύζευξη του συστήματος των κανόνων λαμβάνοντας την τομή των επιμέρους κανόνων. Εάν οι επιμέρους κανόνες συνδέονται με τον τελεστή OR, ο προσδιορισμός της συνάθροισης γίνεται με διάζευξη του συστήματος των κανόνων υπολογίζοντας την ένωση των επιμέρους κανόνων. Οι μέθοδοι σύζευξης και διάζευξης είναι γνωστές και ως μέθοδοι ελαχίστου (min) και μεγίστου (max), αντίστοιχα.

Ένα ασαφές σύστημα συνεπαγωγής αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- Βάση κανόνων (σύνολο IF – THEN κανόνων)
- Βάση δεδομένων (σύνολο συναρτήσεων συμμετοχής)
- Μονάδα λήψης αποφάσεων (διαδικασία συνεπαγωγής)
- Διεπαφή ασαφοποίησης
- Διεπαφή αποασαφοποίησης

Η λειτουργία του συστήματος συνεπαγωγής έχει ως ακολούθως. Η ακριβής είσοδος μετατρέπεται σε ασαφή μέσω της ασαφοποίησης. Κατόπιν συντάσσεται το σύνολο των κανόνων, το οποίο συνθέτει μαζί με τα δεδομένα, την γνωσιακή βάση δεδομένων. Στη συνέχεια λαμβάνεται η απόφαση με συνεπαγωγή και προκύπτει η ασαφής έξοδος. Τέλος η τιμή αυτή αποασαφοποιείται. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο σχήμα 13.



Σχήμα 13: Ασαφές σύστημα συνεπαγωγής (F.I.S.)

3.2.7 Μέθοδοι ασαφούς συνεπαγωγής

Οι δύο κυριότερες μέθοδοι ασαφούς συνεπαγωγής είναι η μέθοδος Mamdani και η μέθοδος Sugeno. Η πρώτη μέθοδος, η οποία είναι και η πιο διαδομένη, εισήχθη από τους Mamdani και Assilian το 1975. Δέκα χρόνια αργότερα ο Sugeno εισήγαγε την δεύτερη μέθοδο, η οποία είναι γνωστή και ως Takagi – Sugeno method. Οι δύο αυτές μέθοδοι έχουν αρκετά κοινά χαρακτηριστικά. Η κυριότερη διαφορά τους εντοπίζεται στο είδος των συναρτήσεων συμμετοχής των εξόδων τους. Στη μέθοδο Mamdani οι συναρτήσεις συμμετοχής είναι ασαφή σύνολα. Αντίθετα, στη μέθοδο Sugeno οι συναρτήσεις αυτές είναι γραμμικές ή σταθερές.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα καθεμιάς από τις δύο μεθόδους ασαφούς συνεπαγωγής συνοψίζονται ως εξής:

Η μέθοδος Mamdani:

- Είναι διαισθητική μέθοδος
- Χαίρει ευρείας αποδοχής
- Προσαρμόζεται καλά σε πραγματικά προβλήματα
- Είναι σχετικά απλή μέθοδος
- Αποδίδει ικανοποιητικά σε σύνθετα μοντέλα, χωρίς απώλεια ακρίβειας

Η μέθοδος Sugeno:

- Είναι υπολογιστικά ακριβής
- Λειτουργεί αποτελεσματικά σε συνδυασμό με γραμμικές τεχνικές
- Λειτουργεί αποτελεσματικά σε συνδυασμό με τεχνικές βελτιστοποίησης
- Έχει επιφάνειας εξόδου εγγυημένα συνεχή
- Επιδέχεται μαθηματικής ανάλυσης

Η μέθοδος Mamdani κρίθηκε ότι ικανοποιεί περισσότερο τις απαιτήσεις της εφαρμογής που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία. Για τον λόγο αυτό η σύνθεση του συστήματος συνεπαγωγής που αναπτύξαμε βασίστηκε στη μέθοδο αυτή. Τα βασικά στάδια της διαδικασίας εφαρμογής της μεθόδου Mamdani είναι τα ακόλουθα:

1. Καθορισμός των κανόνων του ασαφούς συστήματος
2. Ασαφοποίηση των εισόδων με χρήση των συναρτήσεων συμμετοχής
3. Σύγκριση μεταξύ ασαφών εισόδων και κανόνων
4. Σύνθεση των εξόδων του συστήματος
5. Αποασαφοποίηση των εξόδων

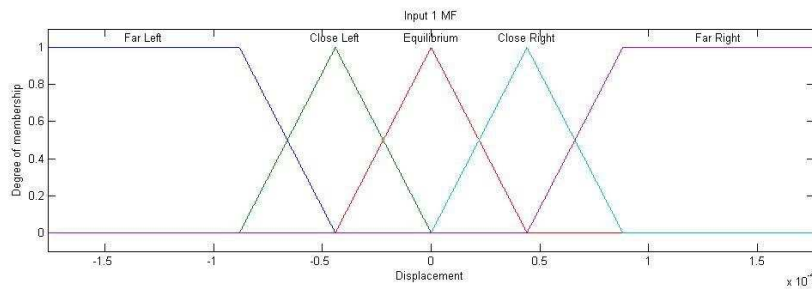
Τα στάδια αυτά αναλύονται λεπτομερώς στη επόμενη παράγραφο.

3.3 Ασαφής ελεγκτής τύπου Mamdani

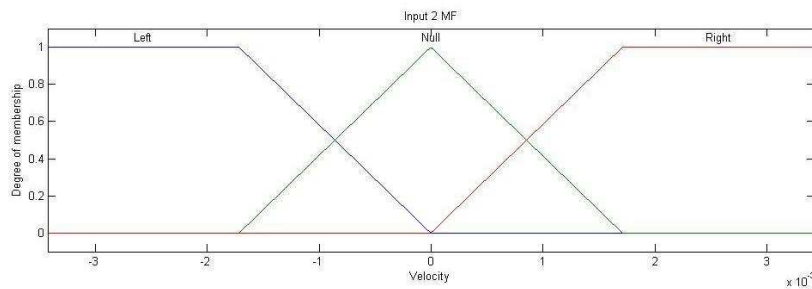
Προκειμένου να μειώσουμε το πεδίο μετακινήσεων την προβόλου δοκού που εξετάζουμε στην παρούσα διπλωματική εργασία κατασκευάσαμε έναν ασαφή ελεγκτή MISO (multiple inputs, single output) δύο εισόδων και μιας εξόδου με χρήση του πακέτου Fuzzy Toolbox του Matlab.

Ο ελεγκτής είναι τύπου Mamdani και λαμβάνει ως εισόδους το πεδίο μετακινήσεων (u) και την ταχύτητα ($\dot{u}$) του συστήματος ελέγχου (ελατήριο, δοκός, πλάκα, κλπ.) στην περίπτωση μας της προβόλου δοκού. Ως έξοδο δίνει την αύξηση της δύναμης ελέγχου.

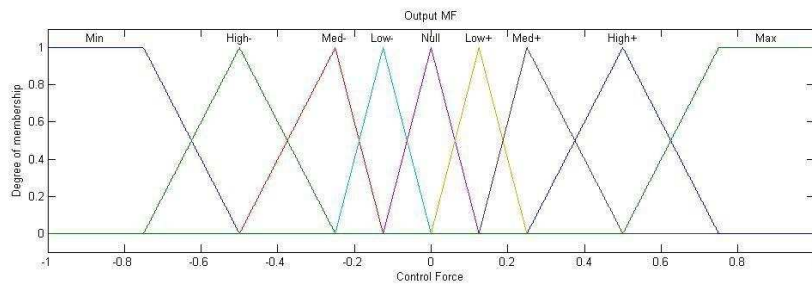
Οι συναρτήσεις συμμετοχής που επιλέχθηκαν για την περιγραφή των εισόδων και της εξόδου του ελεγκτή είναι τριγωνικής μορφής (triangular membership functions), όπως φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχήμα 14: Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της πρώτης εισόδου



Σχήμα 15: Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της δεύτερης εισόδου



Σχήμα 16: Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου

Για την περιγραφή του συστήματος του ελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν δεκαπέντε (15) κανόνες (fuzzy rules), οι οποίοι συντάχτηκαν με βάση τη λογική. Τα βάρη (weights) των κανόνων αυτών τέθηκαν ίσα με την μονάδα (1). Για την κατάρτιση των κανόνων έγινε χρήση του λογικού τελεστή ΚΑΙ (AND operator). Το σύνολο των κανόνων αυτών φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Μετατόπιση Ταχύτητα	Πολύ επάνω	Λίγο επάνω	Ισορροπία	Λίγο κάτω	Πολύ κάτω
Προς τα επάνω	Max*	Med+	Low+	Null	Med–
Μηδενική	Med+	Low+	Null	Low–	High–
Προς τα κάτω	High+	Null	Low–	Med–	Min

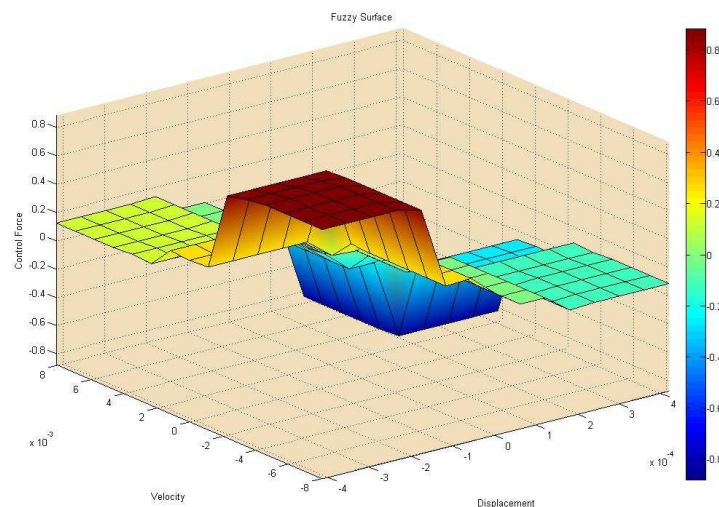
Πίνακας 2: Κανόνες του ασαφούς συστήματος συνεπαγωγής

* Εάν η μετατόπιση είναι πολύ πάνω και η ταχύτητα είναι προς τα πάνω τότε η δύναμη ελέγχου είναι max

Η μέθοδος εμπλοκής (implication method) ορίστηκε στο ελάχιστο (min), ενώ η μέθοδος συσσώρευσης (aggregation method) ορίστηκε στο μέγιστο (max).

Ως μέθοδος αποασαφοποίησης (defuzzification method) επιλέχθηκε η μέθοδος μέσου μεγίστου (mean of maximum method).

Η συσχέτιση των εισόδων (μετακινήσεις και ταχύτητες) με την έξοδο (δύναμη ελέγχου) του ασαφούς ελεγκτή φαίνεται στη επιφάνεια του συστήματος, η οποία παράγεται από το ίδιο το σύστημα. Να σημειωθεί ότι με μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές των παραμέτρων του προβλήματος παράγεται μια εντελώς διαφορετική επιφάνεια. Μια τυπική επιφάνεια έχει την μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 17: Επιφάνεια του ασαφούς συστήματος

3.4 Δυναμική κατασκευής και ασαφής έλεγχος

Στο πρόβλημα της προβόλου δοκού, το οποίο μελετήθηκε εκτενώς στην παρούσα εργασία, αλλά και στα μικρότερα προβλήματα όπως αυτό της μάζας – ελατηρίου δοκιμάσαμε αρκετές μεθόδους για την ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P + Z \quad (3.8)$$

όπου: M, C, K είναι τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας

$u, \dot{u}, \ddot{u}$ είναι τα πεδία μετακινήσεων, ταχυτήτων και επιταχύνσεων και τέλος

P, Z είναι οι εξωτερικές δυνάμεις και οι δυνάμεις ελέγχου αντίστοιχα.

Κάποιες από τις πιο γνωστές μεθόδους ολοκλήρωσης οι οποίες απαντώνται στη βιβλιογραφία είναι οι ακόλουθες:

- Μέθοδος Runge – Kutta 4^{ης} τάξης
- Μέθοδος Houbolt
- Μέθοδος Wilson – θ
- Μέθοδος Newmark
- Μέθοδος Gauss – Jacobi
- Μέθοδος Euler-Heun
- Επιλυτές αρχικών τιμών συνήθων διαφορικών εξισώσεων (ODE solvers)

Η εκτενής παρουσίαση όλων των ανωτέρω μεθόδων ολοκλήρωσης ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλέχθηκε η μέθοδος Houbolt (μια από τις πιο παραδοσιακές μεθόδους αριθμητικής ολοκλήρωσης) ως πιο σταθερή σε τέτοιου είδους προβλήματα.

Η μέθοδος αυτή έχει δυο σταθερές β και γ , γνωστές και ως σταθερές Houbolt. Για προβλήματα σταθερής επιτάχυνσης, οι σταθερές αυτές λαμβάνουν τις τιμές 0.25 και 0.50 αντίστοιχα.

Ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης (t) είναι 3 δευτερόλεπτα. Το βήμα της ολοκλήρωσης (Δt) επιλέχθηκε, μετά από δοκιμές, στα 0.001 δευτερόλεπτα, δημιουργώντας έτσι ένα βρόχο (loop) με 3000 επαναλήψεις.

Οι σταθερές ολοκλήρωσης (c_i) δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$c_1 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2}, c_2 = \frac{1}{\beta\Delta t}, c_3 = \frac{1}{2\beta}, c_4 = \frac{\gamma}{\beta\Delta t}, c_5 = \frac{\gamma}{\beta}, c_6 = \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \quad (3.9)$$

Σε κάθε βήμα της αριθμητικής ολοκλήρωσης (t), ο ασαφής ελεγκτής παρέχει μια δύναμη ελέγχου (z), σύμφωνα με τις δοθείσες τιμές των εισόδων, δηλαδή της μετατόπισης (u) και της ταχύτητας ($\dot{u}$). Η δύναμη ελέγχου σε συνδυασμό με τις εξωτερικές φορτίσεις παρέχουν τις τιμές για την μετατόπιση και την ταχύτητα του επόμενου βήματος ($t + \Delta t$).

Ο αλγόριθμος Houbolt, όπως υλοποιήθηκε με τον ασαφή έλεγχο, συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα.

Βήμα 1: Αρχικοποίηση μεταβλητών

$$X, \dot{X}, \ddot{X}, F_m, M, \Lambda, K, \beta, \gamma, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$$

Βήμα 2: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας F^*

$$K^* = K + c_1 M + c_4 \Lambda$$

$$\text{Αντιστροφή του } K^*: F^* = (K^*)^T$$

Έναρξη βρόχου **for** από t_0 έως t_f

Βήμα 3: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας P^*

$$\text{Υπολογισμός μεταβολής φορτίσεων: } dF_m = F_m(t+1) - F_m(t)$$

$$\text{Υπολογισμός μεταβολής δύναμης ελέγχου } u$$

$$\text{Προσθήκη στην ποσότητα } dF_m: dF_m = dF_m + u$$

Υπολογισμός της ποσότητας P^* με χρήση των μητρώων μάζας (M) και απόσβεσης (Λ) του συστήματος:

$$P^* = dF_m + M(c_2 \dot{X}(t) + c_3 \ddot{X}(t)) + \Lambda(c_5 \dot{X}(t) + c_6 \ddot{X}(t))$$

Βήμα 4: Υπολογισμός του βήματος απόκρισης dX

$$dX = F^* P^*$$

Βήμα 5: Επίλυση του επόμενου χρονικού βήματος ($t + \Delta t$)

$$\text{Υπολογισμός επιτάχυνσης: } \ddot{X}(t+1) = \ddot{X}(t) + c_1 dX - c_2 \dot{X}(t) - c_3 \ddot{X}(t)$$

$$\text{Υπολογισμός ταχύτητας: } \dot{X}(t+1) = \dot{X}(t) + c_4 dX - c_5 \dot{X}(t) - c_6 \ddot{X}(t)$$

$$\text{Υπολογισμός μετατόπισης: } X(t+1) = X(t) + dX$$

Τερματισμός του βρόχου **for**

Τέλος

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

4.1 Το *fis* editor του πακέτου *fuzzy toolbox* του *Matlab*

Στο έτοιμο γραφικό περιβάλλον (GUI) του *Matlab* μπορεί κάποιος, με κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων, να δημιουργήσει ασαφή συστήματα – ελεγκτές, ορίζοντας εισόδους, εξόδους, συναρτήσεις συμμετοχής, κανόνες κλπ. Οι πληροφορίες αυτές αποθηκεύονται σε ένα αρχείο ασαφούς συνεπαγωγής (*fuzzy inference system* ή *fis* file), το οποίο μπορεί να προσπελαστεί από διάφορα προγράμματα στη συνέχεια.

Η συγκεκριμένη ιδέα, όμως, κρίθηκε ότι δεν ήταν ιδιαίτερα ευέλικτη. Έτσι, εγκαταλείφθηκε γρήγορα, και ο ελεγκτής δημιουργήθηκε με κλασσική μορφή προγραμματισμού (σειρά εντολών) και αποθηκεύτηκε σε αρχείο *Matlab* (*mfile*). Σε κάθε περίπτωση, το αρχείο *fis* μπορεί να δημιουργηθεί με μια απλή εντολή, παρέχοντας πλήρη γραφική απεικόνιση του ασαφούς ελεγκτή.

4.2 Το πρόβλημα του συστήματος ελέγχου πορείας σε αυτοκίνητο.

Δανειστήκαμε ένα απλό πρόβλημα από τον χώρο της μηχανικής, ως εισαγωγή στα ασαφή σύνολα. Έτσι, δημιουργήσαμε έναν απλό ελεγκτή δύο εισόδων και μιας εξόδου, με μικρές συναρτήσεις συμμετοχής και λίγους κανόνες. Οι μεταβλητές εισόδου ήταν η ταχύτητα του οχήματος και η κλίση της οδού και έξοδος η ροπή στρέψης. Με τα στοιχεία αυτά και με τη χρήση λογικών κανόνων, η ασαφής λογική μπορεί να υποστηρίξει σύστημα ελέγχου το οποίο για παράδειγμα διατηρεί σταθερή την ταχύτητα πορείας του οχήματος.

Η εκτενής παρουσίαση του εν λόγω προβλήματος ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Για το λόγο αυτό δεν θα παρουσιάσουμε κάποια αποτελέσματα. Η αναφορά αυτή έχει στόχο να καταδείξει το μεγάλο εύρος χρήσης των ασαφών ελεγκτών σε εντελώς διαφορετικές εφαρμογές. Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό, ότι ο συγκεκριμένος ελεγκτής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε χρηματοοικονομικά προβλήματα (όπως λ.χ. σε προβλήματα ελέγχου πορείας μετοχών κλπ.).

4.3 Το σύστημα μάζας – ελατηρίου (μονοδιάστατος ταλαντωτής).

Πριν αναλύσουμε το κύριο (διδιάστατο) πρόβλημα της προβόλου δοκού, μελετήσαμε ένα απλό σύστημα με μια μάζα και ένα ελατήριο, το οποίο απαντάται πολύ συχνά στη βιβλιογραφία.

Τα εργαλεία (είδη ελέγχου) που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του συστήματος αυτού, ήταν τα εξής δύο: ο ασαφής έλεγχος (με χρήση του ασαφούς ελεγκτή που κατασκευάσαμε) και ο κλασικός έλεγχος (με χρήση του LQR).

Το μεγάλο πλεονέκτημα του ασαφούς ελέγχου σε σχέση με τον κλασσικό έγκειται στο γεγονός ότι απαιτεί πολύ μικρότερη πληροφορία. Πιο συγκεκριμένα, για το κομμάτι του ασαφούς ελέγχου, αρκεί να γνωρίζουμε τις τιμές των εισόδων του ελεγκτή (για έναν ελεγκτή δύο εισόδων αρκούν δύο μετρήσεις) σε αντίθεση με τον LQR που απαιτεί αριθμό μετρήσεων ίσο με το σύνολο των μεταβλητών κατάστασης (state space) το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο.

Στο πρόβλημα μάζας – ελατηρίου που εξετάσαμε, επιλέξαμε τη μέθοδο Houbolt για την ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης. Παράλληλα, έγιναν και κάποιες δοκιμές με διάφορους επιτυτές αρχικών τιμών συνήθων διαφορικών εξισώσεων (ODE solvers) του Matlab (στο συγκεκριμένο πρόβλημα έγινε χρήση του ODE45).

Οι παράμετροι του συστήματος εκλέχτηκαν έπειτα από διάφορες δοκιμές και αναδρομή στη βιβλιογραφία.

Συγκεκριμένα, η σταθερά του ελατηρίου τέθηκε ίση με 5000 N/m , η μάζα ίση με 0.02 kg και η απόσβεση ίση με $30\text{ N}\cdot\text{s/m}$. Η φυσική συχνότητα του συστήματος είναι $\omega_n = \sqrt{K/M} = 50\text{ Hz}$ και οι εξωτερικές φορτίσεις είναι ημιτονοειδείς, δηλαδή της μορφής $P = P_0 \sin(\omega \cdot t)$, για $P_0 = 100\text{ N}$ και $\omega = 20\text{ Hz}$. Η ολοκλήρωση στο χρόνο έγινε από $t_0 = 0$ έως $t_f = 3\text{ s}$, με βήμα που επιλέχτηκε μετά από δοκιμές να είναι $\Delta t = 0.01\text{ s}$, λόγω του ότι δεν χρειάστηκε μεγαλύτερη διακριτοποίηση.

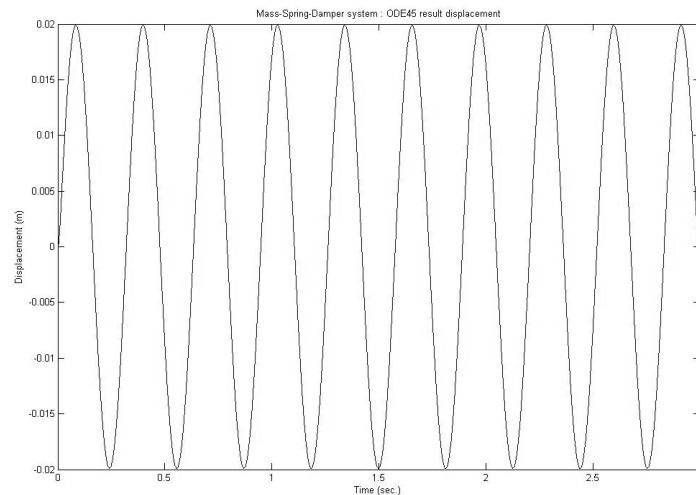
Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι οι επιτυτές ODE του Matlab ορίζουν με αυτόματο τρόπο ένα πολύ μικρό βήμα ολοκλήρωσης, χωρίς να υπάρχει δυνατότητα παρέμβασης από τον χρήστη.

Το μειονέκτημα αυτό των επιτυτών ODE καθιστά την μέθοδο Houbolt ιδιαίτερα ευέλικτη καθώς δίνει στο χρήστη την δυνατότητα να επιλέξει όποιο βήμα ολοκλήρωσης επιθυμεί, ή ακόμη και μεταβλητό βήμα εάν κριθεί αναγκαίο από κάποιες εφαρμογές, όπως λ.χ. σε προβλήματα ρύθμισης παραμέτρων (fine tuning).

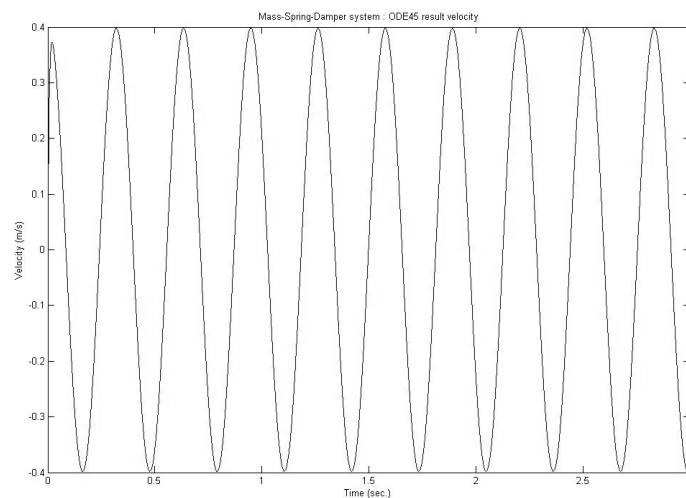
Για την επίλυση του μονοβάθμιου ταλαντωτή (SPM system) αρχικά δοκιμάσαμε κάποιους επιτυτές του Matlab και συγκεκριμένα τον ODE45 για την ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης. Κατά την ανάλυση προέκυψαν δύο βασικά προβλήματα. Αφενός δεν μπορούσαμε να έχουμε καμιά πληροφορία σχετικά με την επιτάχυνση του συστήματος και αφετέρου δεν μπορούσαμε να επιλέξουμε χειροκίνητα το βήμα της ολοκλήρωσης (όπως αναφέραμε και πιο πάνω). Ορίσαμε τον συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης στα 3 δευτερόλεπτα (έπειτα από δοκιμές) και το βήμα επιλέχθηκε αυτόματα από τον επιλυτή. Αυτή ακριβώς η αδυναμία ήταν που μας οδήγησε στον

προγραμματισμό μιας κλασσικής μεθόδου ολοκλήρωσης (της μεθόδου Houbolt), με τον τρόπο που παρουσιάστηκε παραπάνω.

Στα δύο σχήματα που ακολουθούν βλέπουμε τις μετακινήσεις και τις ταχύτητες του συστήματος σε κάθε θέση που προέκυψαν από την επίλυση με τον ODE45 solver.



Σχήμα 18: Πεδίο μετακινήσεων SPM (ολοκλήρωση με ODE45)



Σχήμα 19: Πεδίο ταχυτήτων SPM (ολοκλήρωση με ODE45)

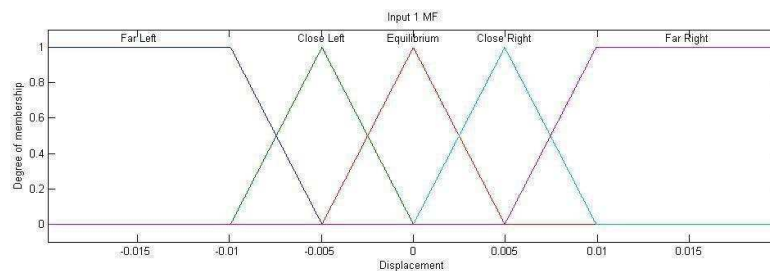
Για την επίλυση του προβλήματος μάζας – ελατηρίου (SPM) με ασαφή έλεγχο, χρησιμοποιήσαμε έναν απλό ελεγκτή δύο εισόδων και μιας εξόδου της μορφής που περιγράψαμε πιο πάνω. Για την περιγραφή του συστήματος συντάξαμε 15 κανόνες. Οι κανόνες αυτοί παρουσιάζονται στον πίνακα 3.

Οι συναρτήσεις συμμετοχής των εισόδων και της εξόδου του ασαφούς ελεγκτή για το πρόβλημα του μονοδιάστατου ταλαντωτή φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:

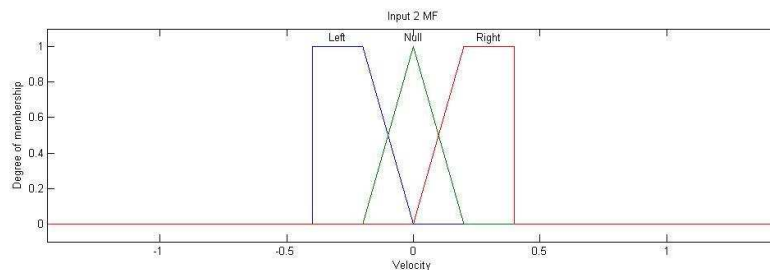
Μετατόπιση Ταχύτητα	Πολύ αριστερά	Λίγο αριστερά	Ισορροπία	Λίγο δεξιά	Πολύ δεξιά
Προς τα αριστερά	Max [*]	Med+	Low+	Null	Med-
Μηδενική	Med+	Low+	Null	Low-	High-
Προς τα δεξιά	High+	Null	Low-	Med-	Min

Πίνακας 3: Κανόνες του ασαφούς συστήματος για το μονοδιάστατο πρόβλημα μάζας ελατηρίου

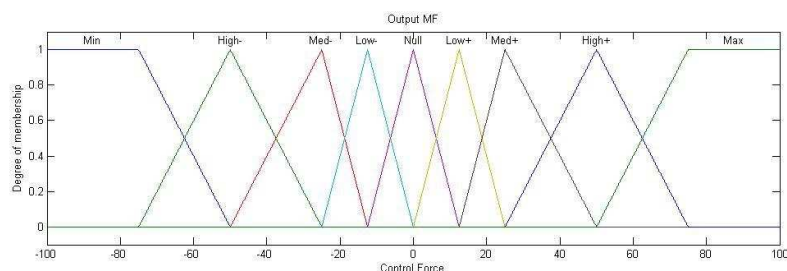
* Εάν η μετατόπιση είναι πολύ αριστερά και η ταχύτητα είναι προς τα αριστερά τότε η δύναμη ελέγχου είναι max



Σχήμα 20: Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της πρώτης εισόδου (πεδίο μετακινήσεων)



Σχήμα 21: Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της δεύτερης εισόδου (πεδίο ταχυτήτων)



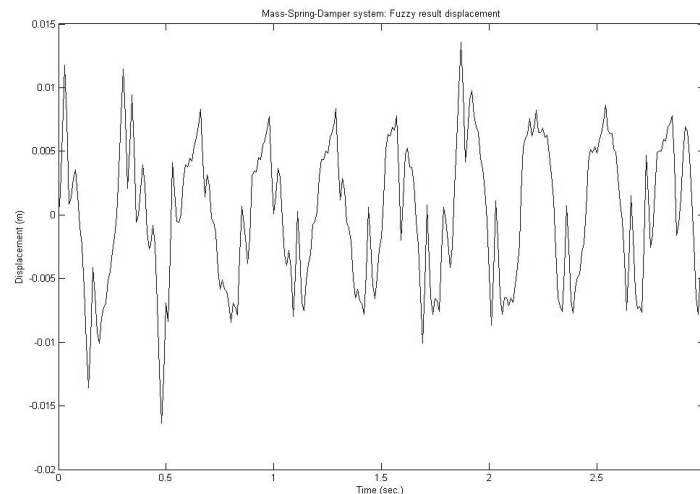
Σχήμα 22: Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου (δυνάμεις ελέγχου)

Η επίλυση του προβλήματος με ασαφή έλεγχο και ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης με τη μέθοδο Houbolt έδωσε σαφώς καλύτερα αποτελέσματα από όλες τις άλλες μεθόδους για τις μετακινήσεις, σε αντίθεση με τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις όπου τα πράγματα δεν είναι και τόσο καλά. Παρουσιάζονται έντονα χτυπήματα, τα οποία μπορεί φαινομενικά να μην αποτελούν πρόβλημα, στην πραγματικότητα, όμως, μπορεί να ευθύνονται για την καταπόνηση μηχανημάτων και εξοπλισμού και οδηγούν σε προβλήματα κόπωσης.

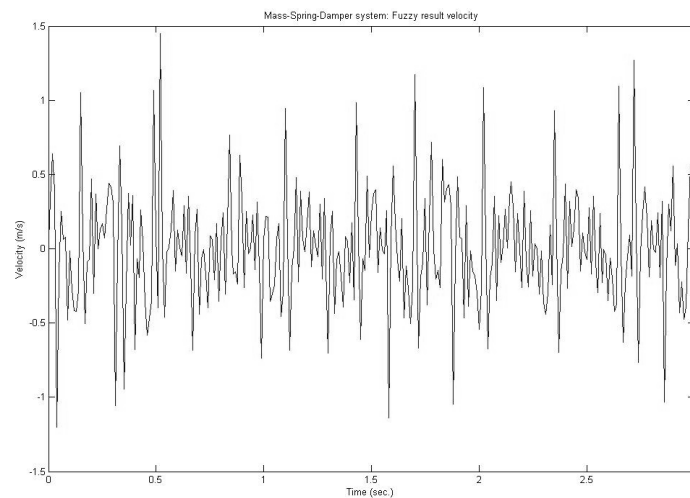
Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι στη βιβλιογραφία δεν παρουσιάζονται συχνά αποτελέσματα για τις ταχύτητες, ενώ για τις επιταχύνσεις (όπου το φαινόμενο των χτυπημάτων είναι ακόμα πιο έντονο) τέτοιου είδους γραφήματα είναι πολύ σπάνια.

Εντούτοις, τα αποτελέσματα αυτά είναι αρκετά σημαντικά. Για παράδειγμα μια μεγάλη αύξηση των επιταχύνσεων έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω καταπόνηση των υλικών των μετρητικών διατάξεων. Δυστυχώς, όμως, πολλές φορές παρατηρείται το φαινόμενο της απόκρυψης των στοιχείων αυτών όταν δεν είναι αρκούντως ικανοποιητικά, ενώ γενικά παρουσιάζονται ως ήσσονος σημασίας.

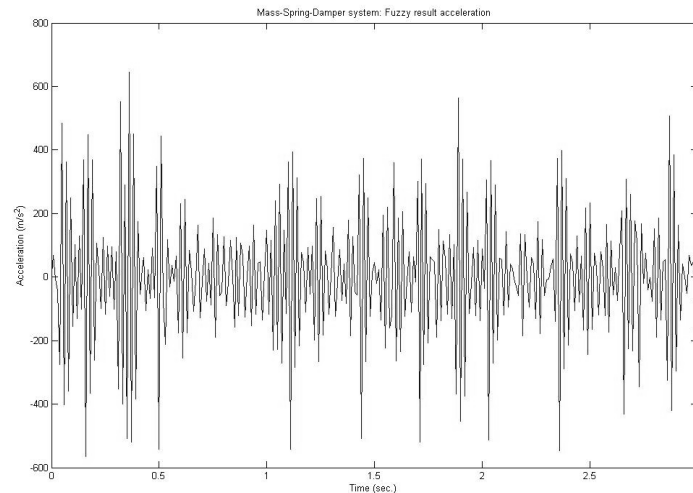
Στα ακόλουθα σχήματα παρατίθενται τα αποτελέσματα για τις μετακινήσεις, τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις που εξήχθησαν με επίλυση με ασαφή έλεγχο και ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης με την μέθοδο Houbolt, καθώς και η παρεχόμενη επιφάνεια.



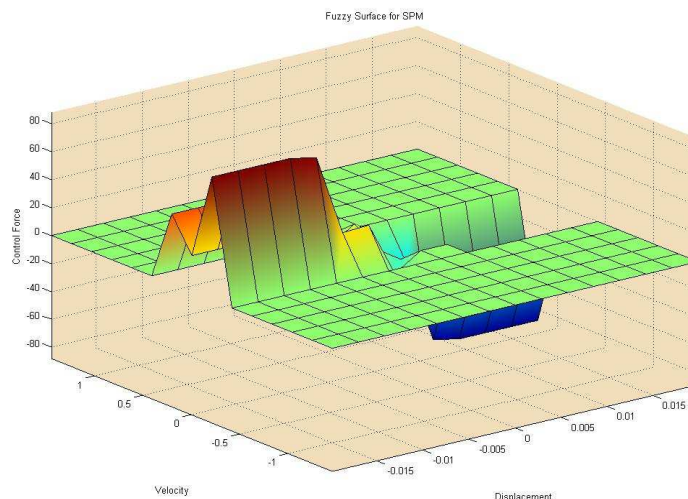
Σχήμα 23: Μετατόπιση SPM (ολοκλήρωση με Houbolt)



Σχήμα 24: Ταχύτητα SPM (ολοκλήρωση με Houbolt)



Σχήμα 25: Επιτάχυνση SPM (ολοκλήρωση με Houbolt)



Σχήμα 26: Επιφάνεια SPM (ολοκλήρωση με Houbolt)

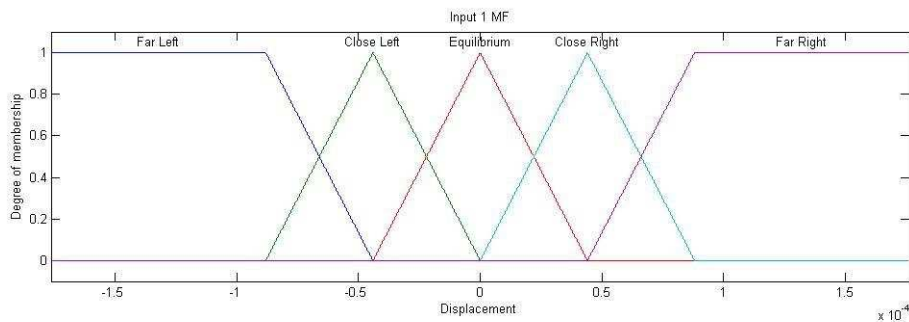
4.4 Η πρόβλεψη δοκός (διδιάστατος ταλαντωτής).

Το πρόβλημα της προβολής δοκού, το οποίο ήταν και το κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι αυτό που θα αναλύσουμε και πιο εκτενώς.

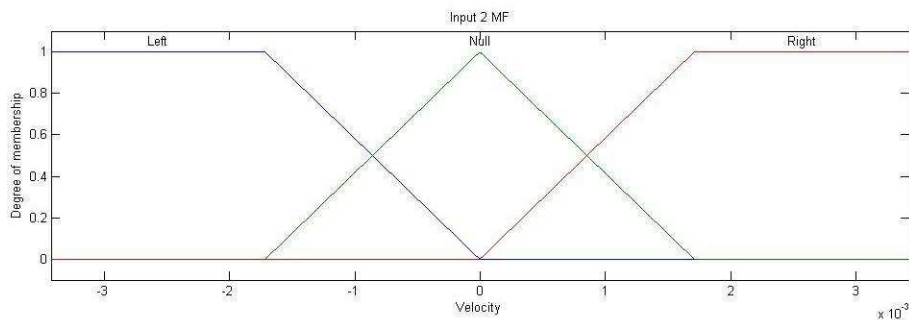
Η δοκός που εξετάζουμε είναι συνολικού μήκους 0.8 m με εμβαδό διατομής 0.02×0.02 m. Το μέτρο ελαστικότητας της είναι ίσο με 73×10^9 N/m² και το μέτρο διάτμησης της με 40×10^9 N/m². Η πυκνότητα μάζας της δοκού είναι 2700 Kg/m³. Οι εξωτερικές φορτίσεις είναι ημιτονοειδείς με σημείο εφαρμογής το ελεύθερο άκρο της δοκού. Το σύστημα διακριτοποιήθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε τέσσερα στοιχεία καταλήγοντας έτσι σε ένα μοντέλο με οκτώ βαθμούς ελευθερίας. Σκοπός των ασαφών ελεγκτών που κατασκευάσαμε είναι η μείωση των ταλαντώσεων. Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων από την επίλυση με χρήση τόσο ενός όσο και δύο (ίδιων) ελεγκτών χρησιμοποιήσαμε εργαλεία κλασικού ελέγχου (LQR).

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω το συγκριτικό πλεονέκτημα του ασαφούς ελέγχου σε σχέση με τον κλασικό έγκειται στο γεγονός ότι απαιτεί πολύ μικρότερη πληροφορία. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα με έναν ελεγκτή δύο εισόδων, αρκεί να γνωρίζουμε τις τιμές των δύο εισόδων (δηλαδή αρκούν δύο μετρήσεις). Αντίστοιχα, στο πρόβλημα με τους δύο ελεγκτές χρειαζόμαστε τέσσερις μετρήσεις. Αντίθετα, ο κλασικός έλεγχος (LQR) απαιτεί αριθμό μετρήσεων ίσο με το σύνολο των μεταβλητών κατάστασης (state space) το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο. Στην περίπτωση της προβόλου δοκού που μελετάμε απαιτούνται δεκαέξι (16) μετρήσεις, ενώ ο αριθμός αυτός μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω, εάν αυξήσουμε διακριτοποίηση της δοκού (πεπερασμένα στοιχεία).

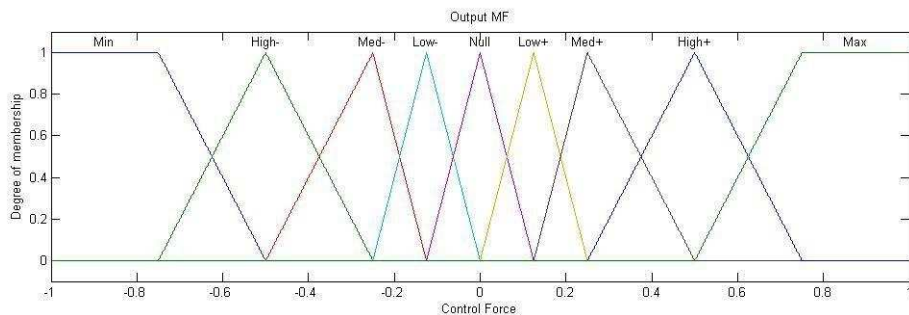
Οι συναρτήσεις συμμετοχής που επιλέχθηκαν για την περιγραφή των εισόδων και της εξόδου του ελεγκτή είναι τριγωνικής μορφής (triangular membership functions), όπως φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα.



Σχήμα 27: Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της πρώτης εισόδου



Σχήμα 28: Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της δεύτερης εισόδου



Σχήμα 29: Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου

Το σύνολο των δεκαπέντε κανόνων φαίνεται στον πίνακα 3. Τα βάρη (weights) των κανόνων αυτών ετέθησαν ίσα με την μονάδα (1). Για την κατάρτιση των κανόνων έγινε χρήση του λογικού τελεστή ΚΑΙ (AND operator).

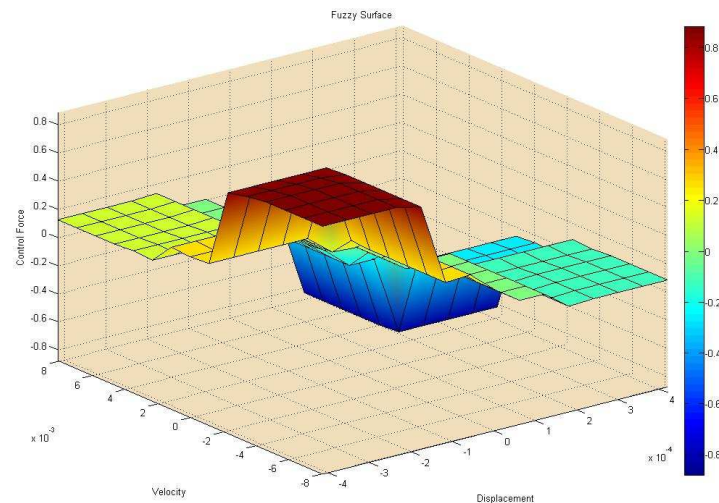
Μετατόπιση Ταχύτητα	Πολύ επάνω	Λίγο επάνω	Ισορροπία	Λίγο κάτω	Πολύ κάτω
Προς τα επάνω	Max	Med+	Low+	Null	Med-
Μηδενική	Med+	Low+	Null	Low-	High-
Προς τα κάτω	High+	Null	Low-	Med-	Min

Πίνακας4: Κανόνες του ασαφούς συστήματος για το διδιάστατο πρόβλημα της προβόλου δοκού

* Εάν η μετατόπιση είναι πολύ πάνω και η ταχύτητα είναι προς τα πάνω τότε η δύναμη ελέγχου είναι max

Η μέθοδος εμπλοκής (implication method) ορίστηκε στο ελάχιστο (min), ενώ η μέθοδος συσσώρευσης (aggregation method) ορίστηκε στο μέγιστο (max), ενώ ως μέθοδος αποασαφοποίησης (defuzzification method) επιλέχθηκε η μέθοδος μέσου μεγίστου (mean of maximum method).

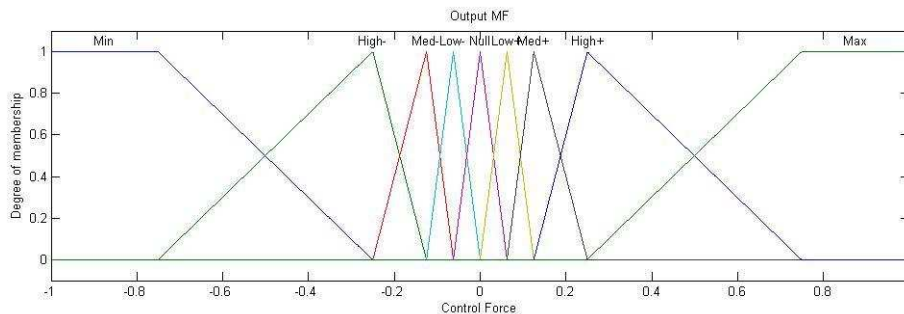
Η συσχέτιση των εισόδων (μετακινήσεις και ταχύτητες) με την έξοδο (δύναμη ελέγχου) του ασαφούς ελεγκτή φαίνεται στη επιφάνεια του συστήματος (fuzzy surface), η οποία παράγεται από το ίδιο το σύστημα και για το πρόβλημα της προβόλου δοκού έχει την μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 30: Επιφάνεια του ασαφούς συστήματος

Προκειμένου να επιτύχουμε καλύτερα αποτελέσματα διαφοροποιήσαμε τα σημεία ελέγχου στην συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου, τα οποία αρχικά επιλέχθηκαν ισοκαταναμημένα, παράγοντας εκ νέου συναρτήσεις συμμετοχής στις οποίες εστίασαμε στα σημεία όπου παρουσιάζονταν και οι περισσότερες μετρήσεις.

Η νέα συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου μετά και την πύκνωση των τιμών της φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



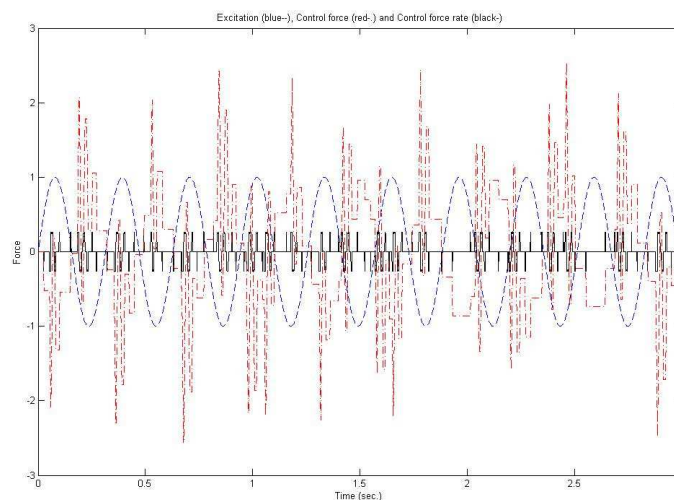
Σχήμα 31: Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου μετά την πύκνωση

Στη συνέχεια παραθέτουμε όλα τα αποτελέσματα και για τους δύο τύπους ελέγχου (κλασσικό και ασαφής) για το πρόβλημα της προβόλου δοκού με έναν αλλά και με δύο ελεγκτές.

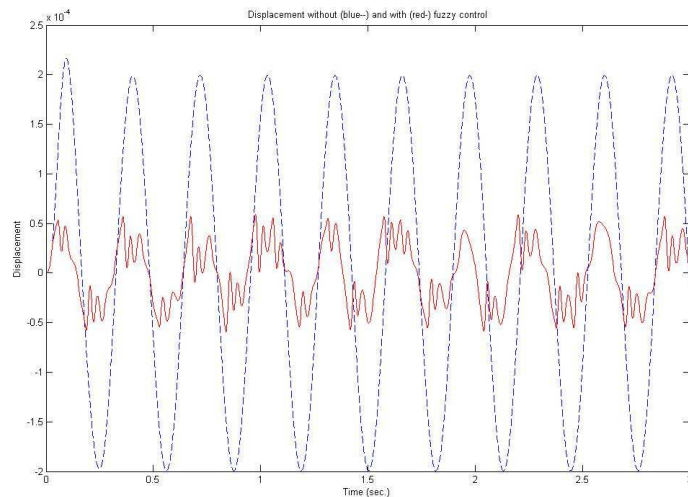
Αρχικά παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα του ασαφούς ελέγχου με έναν ελεγκτή πριν από την «πύκνωση» των σημείων ελέγχου της συνάρτησης συμμετοχής της εξόδου και κατόπιν αυτά που προέκυψαν μετά την «πύκνωση». Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης με δύο ελεγκτές και τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κλασσικού ελέγχου (LQR).

4.4.1 Αποτελέσματα του προβλήματος της προβόλου δοκού με έναν ελεγκτή πριν την «πύκνωση» των συναρτήσεων συμμετοχής.

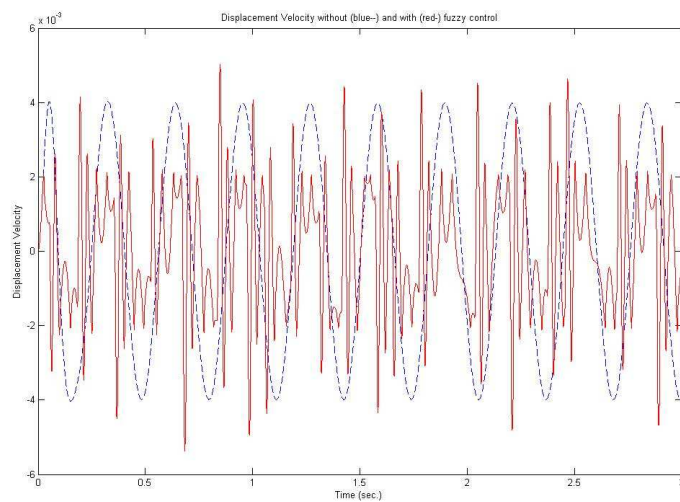
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα αποτελέσματα για το πρόβλημα της προβόλου δοκού με έναν ελεγκτή, πριν την «πύκνωση» των σημείων ελέγχου της συνάρτησης συμμετοχής της εξόδου του ασαφούς ελεγκτή.



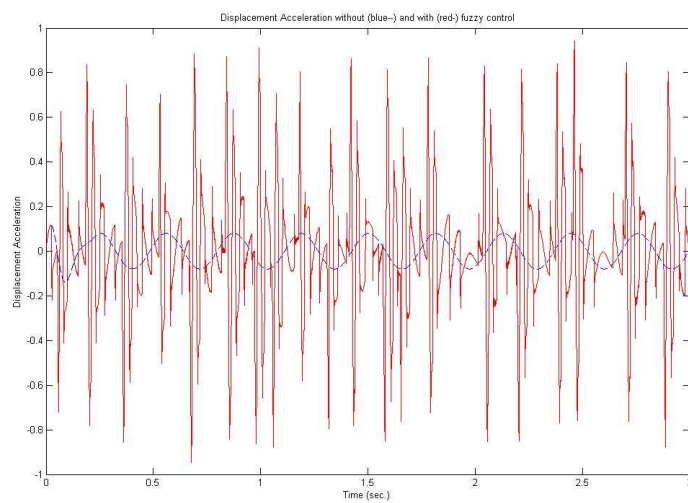
Σχήμα 38: Φορτίσεις



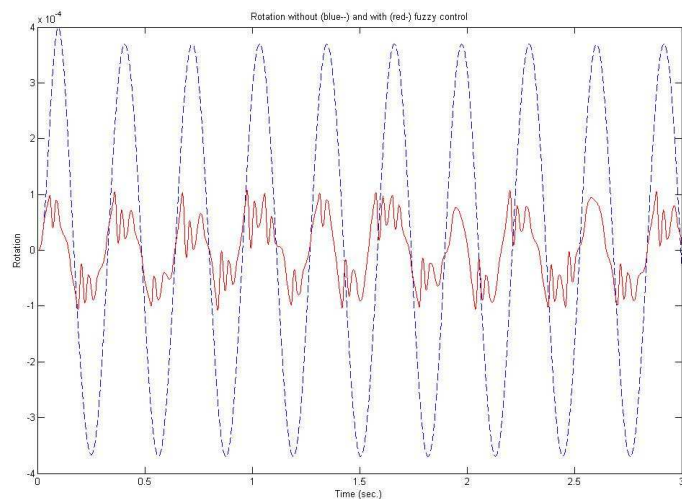
Σχήμα 32: Μετατόπιση



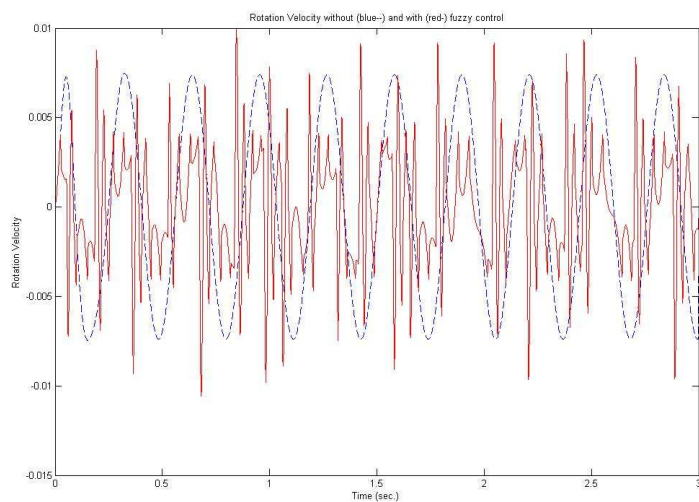
Σχήμα 33: Ταχύτητα



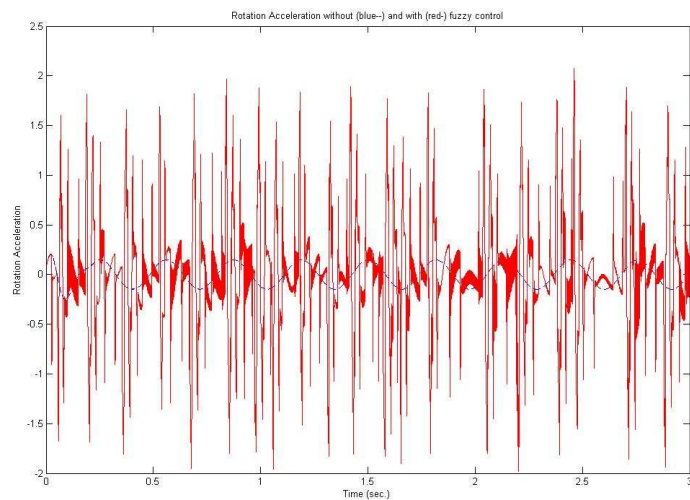
Σχήμα 34: Επιτάχυνση



Σχήμα 35: Στροφή

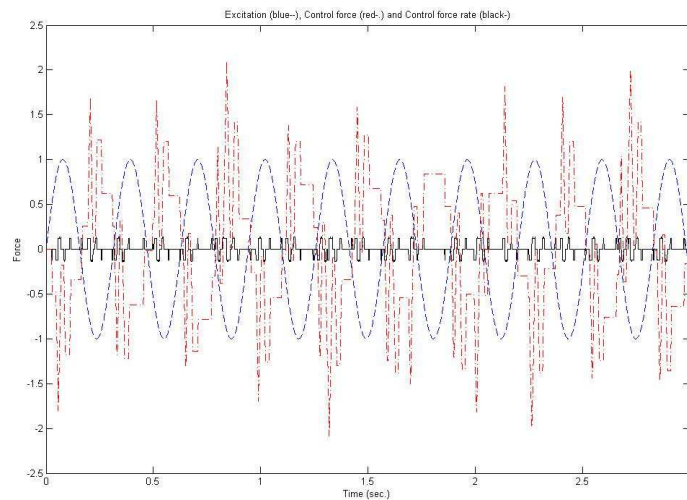


Σχήμα 36: Γωνιακή ταχύτητα

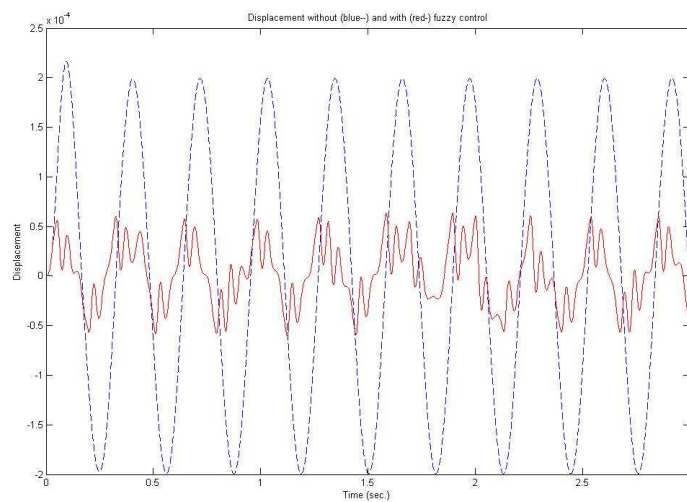


Σχήμα 37: Γωνιακή επιτάχυνση

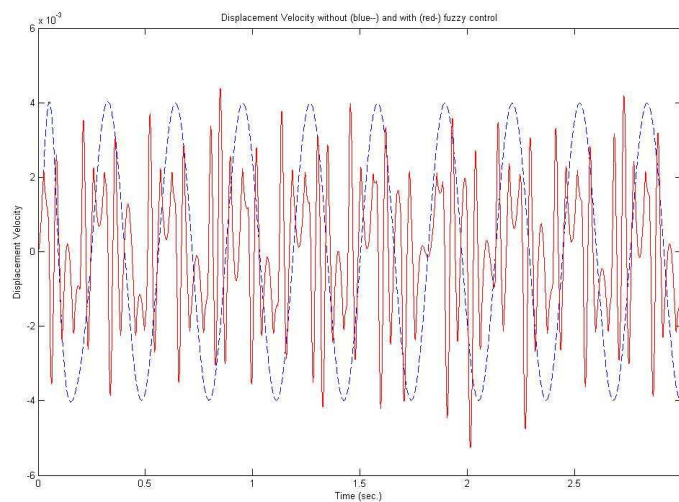
4.4.2 Αποτελέσματα του προβλήματος της προβόλου δοκού με έναν ελεγκτή μετά την «πύκνωση» των συναρτήσεων συμμετοχής.



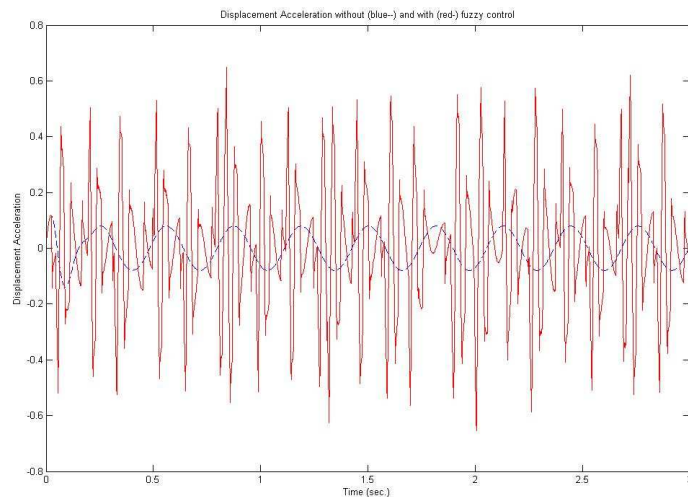
Σχήμα 38: Φορτίσεις



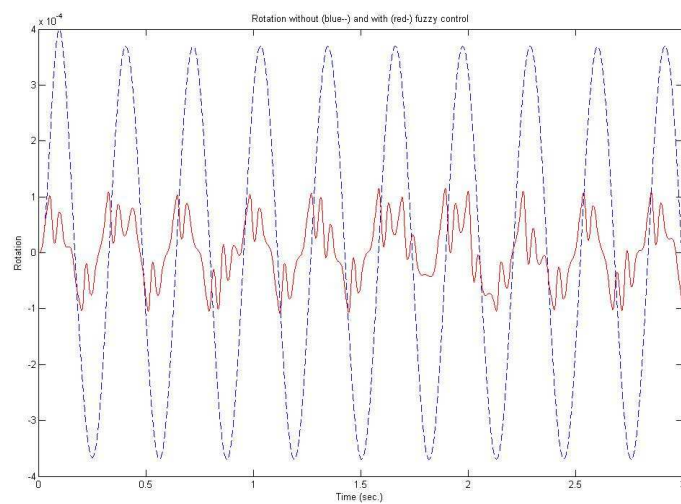
Σχήμα 39: Μετατόπιση



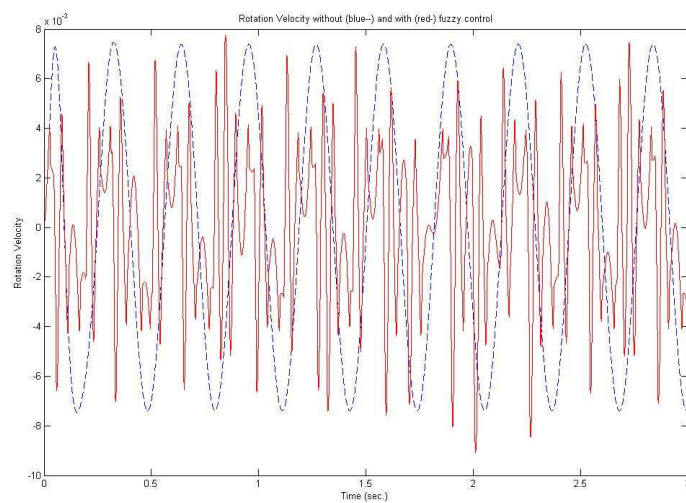
Σχήμα 40: Ταχύτητα



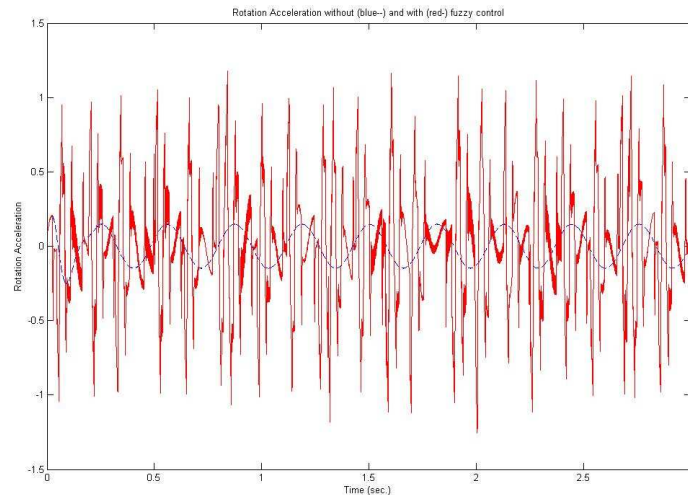
Σχήμα 41: Επιτάχυνση



Σχήμα 42: Στροφή



Σχήμα 43: Γωνιακή ταχύτητα

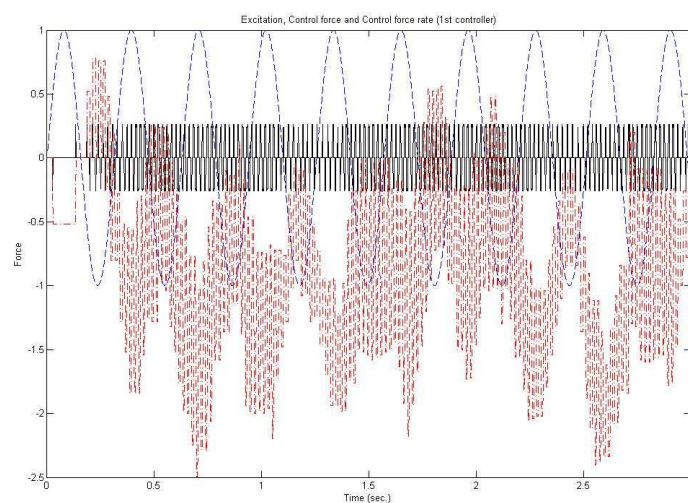


Σχήμα 44: Γωνιακή επιτάχυνση

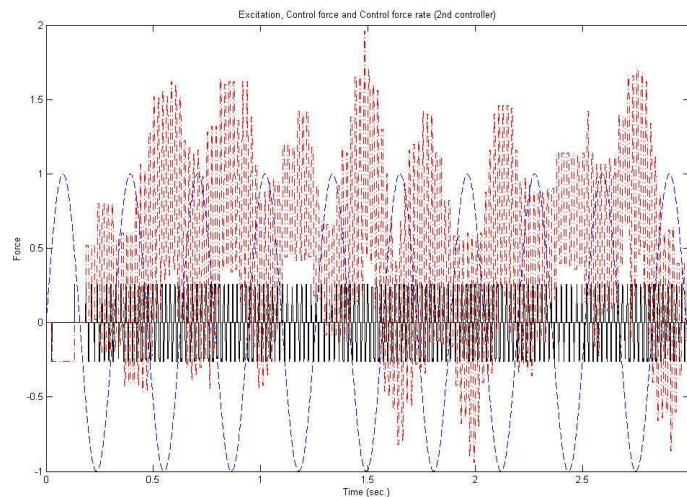
4.4.3 Αποτελέσματα του προβλήματος της προβόλου δοκού με δύο ελεγκτές πριν την «πύκνωση» των συναρτήσεων συμμετοχής.

Προκειμένου να επιτύχουμε καλύτερα αποτελέσματα δοκιμάσαμε να τοποθετήσουμε έναν δεύτερο ελεγκτή σε έναν διαφορετικό κόμβο του συστήματος. Οι δύο ελεγκτές έχουν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά (συναρτήσεις συμμετοχής, κανόνες κλπ). Να σημειωθεί επίσης ότι τα σημεία μέτρησης των μετακινήσεων και εφαρμογής των δυνάμεων ελέγχου ταυτίζονται και στην περίπτωση του ενός, αλλά και σε αυτή των δύο ελεγκτών (collocated sensors).

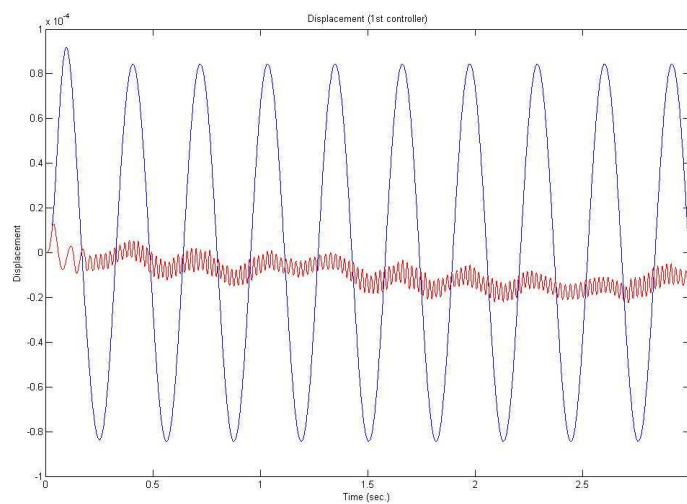
Για εποπτικούς λόγους τα αποτελέσματα των δύο ελεγκτών παρουσιάζονται εναλλάξ. Δηλαδή για κάθε γράφημα του πρώτου ελεγκτή ακολουθεί το αντίστοιχο για τον δεύτερο ελεγκτή.



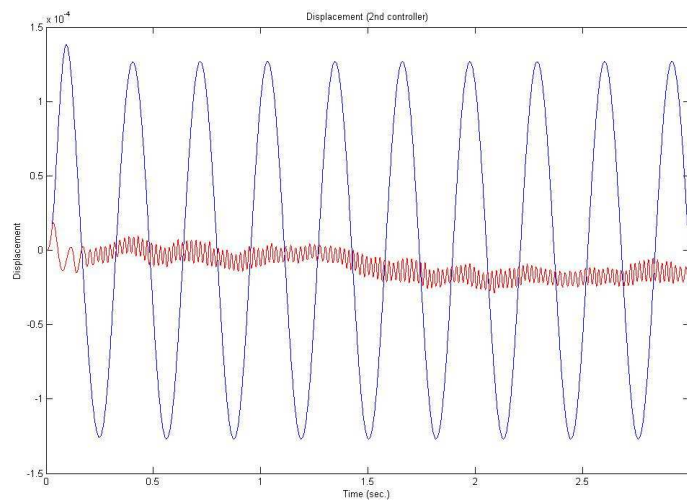
Σχήμα 45: Φορτίσεις (1^{ος} ελεγκτής)



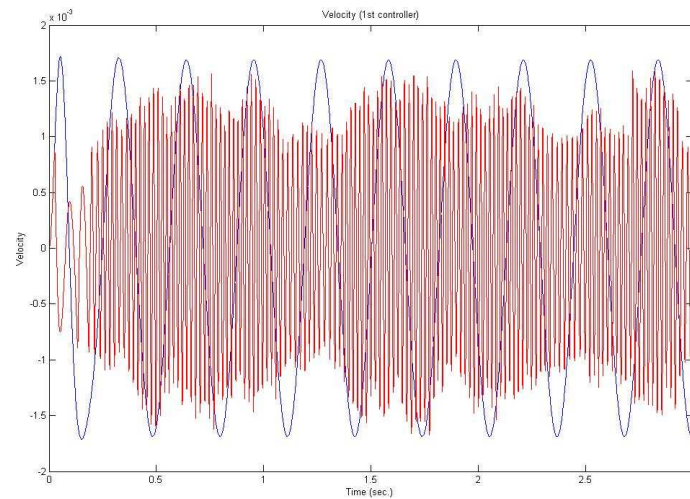
Σχήμα 46: Φορτίσεις (2^{ος} ελεγκτής)



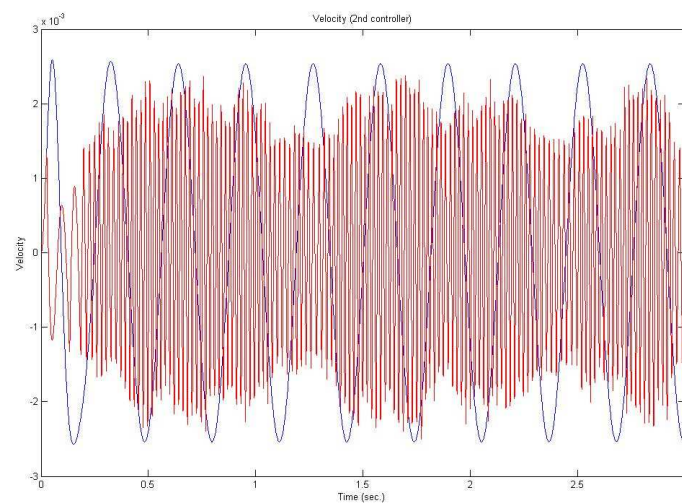
Σχήμα 47: Μετατόπιση (1^{ος} ελεγκτής)



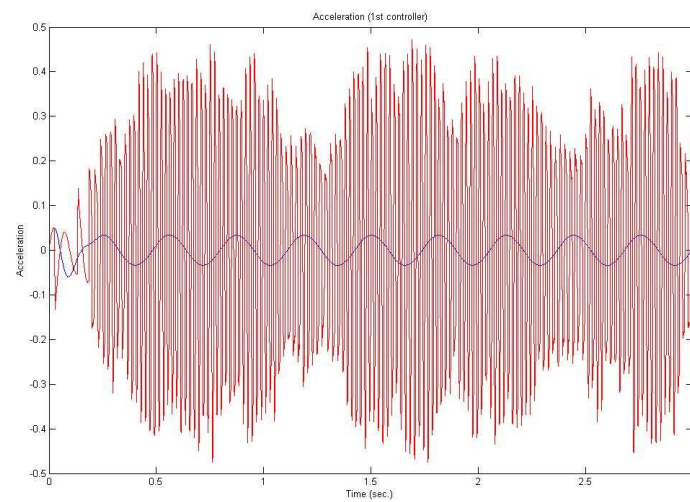
Σχήμα 48: Μετατόπιση (2^{ος} ελεγκτής)



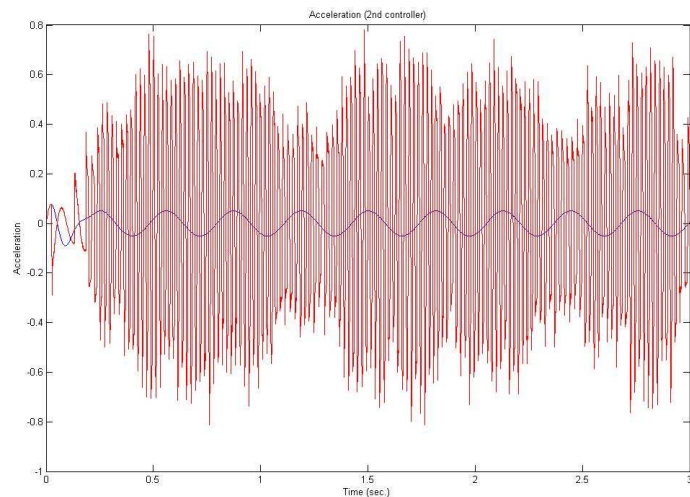
Σχήμα 49: Ταχύτητα (1^{ος} ελεγκτής)



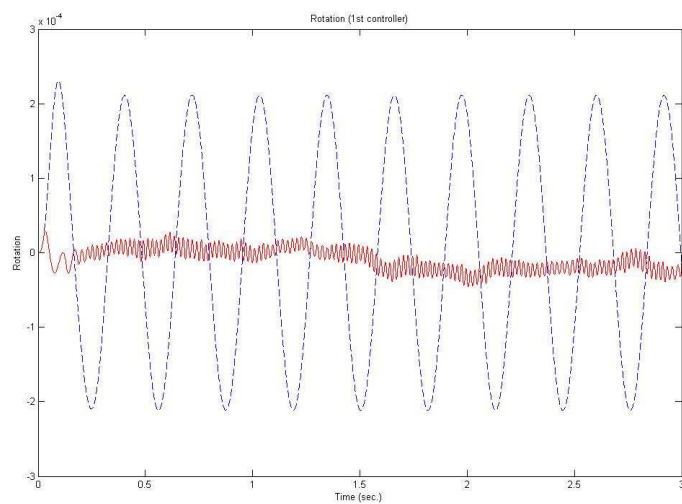
Σχήμα 50: Ταχύτητα (2^{ος} ελεγκτής)



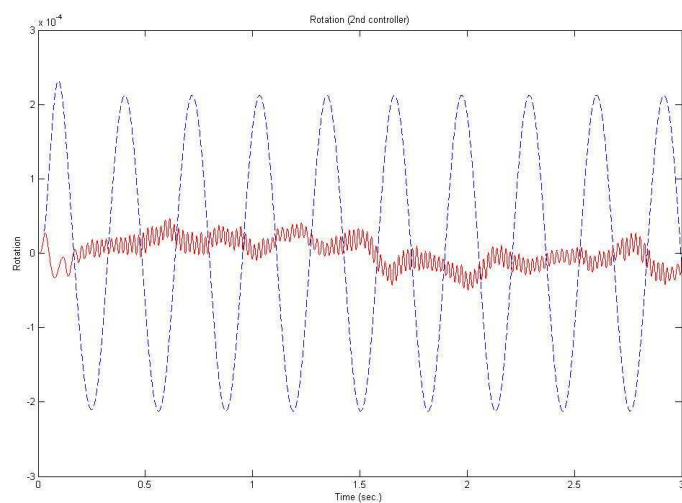
Σχήμα 51: Επιτάχυνση (1^{ος} ελεγκτής)



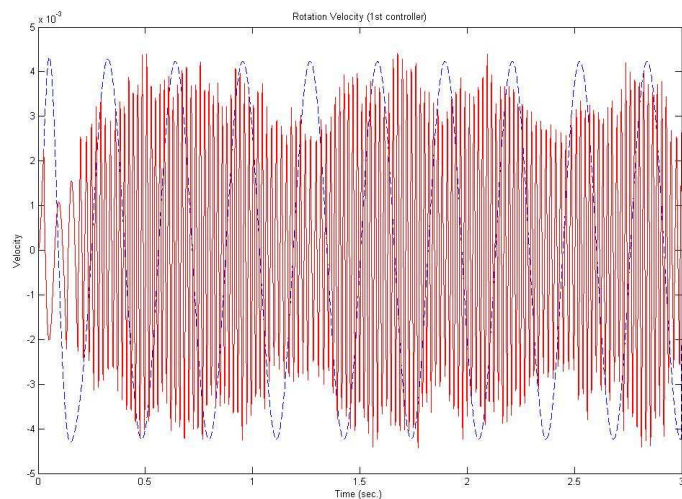
Σχήμα 52: Επιτάχυνση (2^{ος} ελεγκτής)



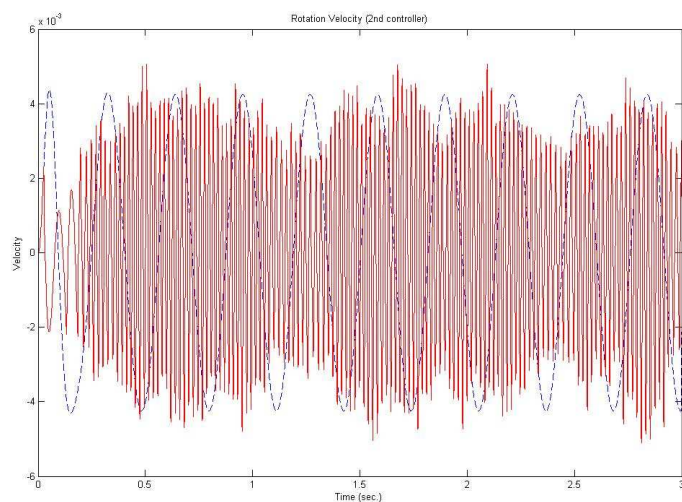
Σχήμα 53: Στροφή (1^{ος} ελεγκτής)



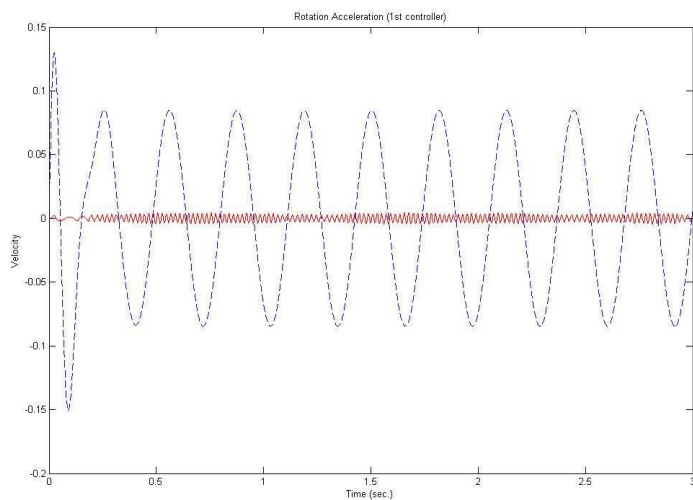
Σχήμα 54: Στροφή (2^{ος} ελεγκτής)



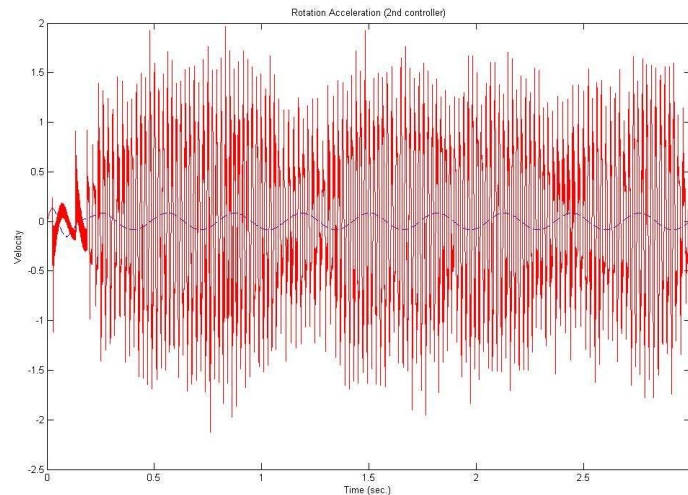
Σχήμα 55: Γωνιακή ταχύτητα (1^{ος} ελεγκτής)



Σχήμα 56: Γωνιακή ταχύτητα (2^{ος} ελεγκτής)



Σχήμα 57: Γωνιακή επιτάχυνση (1^{ος} ελεγκτής)



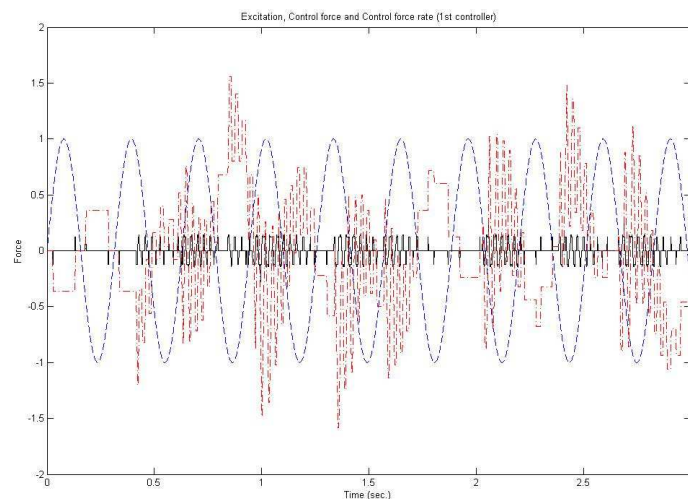
Σχήμα 58: Γωνιακή επιτάχυνση (2^{ος} ελεγκτής)

4.4.4 Αποτελέσματα του προβλήματος της προβόλου δοκού με δύο ελεγκτές μετά την «πύκνωση» των συναρτήσεων συμμετοχής.

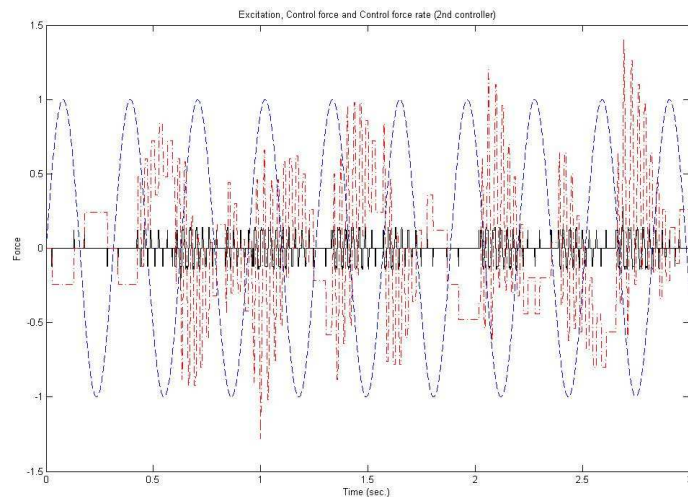
Και στην μοντελοποίηση με δύο ελεγκτές δοκιμάσαμε την πύκνωση των σημείων ελέγχου της συνάρτησης συμμετοχής της εξόδου του ασαφούς ελεγκτή.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα αποτελέσματα για το πρόβλημα της προβόλου δοκού με δύο ελεγκτές, μετά από αυτή την «πύκνωση».

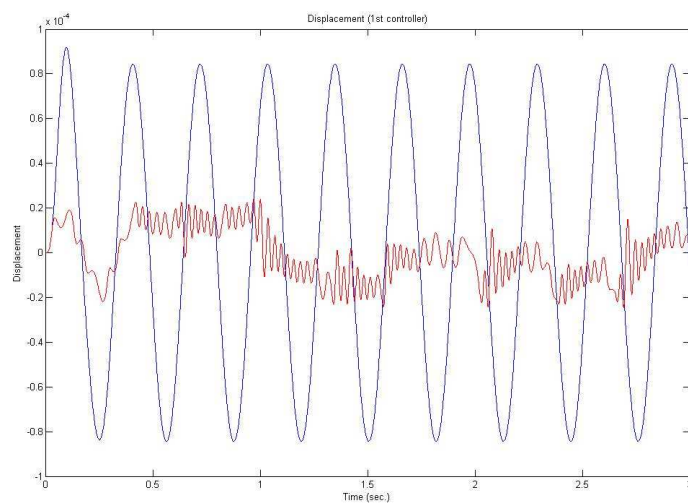
Στα σχήματα 59 και 60 φαίνονται οι φορτίσεις για τον πρώτο και τον δεύτερο ελεγκτή αντίστοιχα... Ακολουθούν οι μετακινήσεις, οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις.



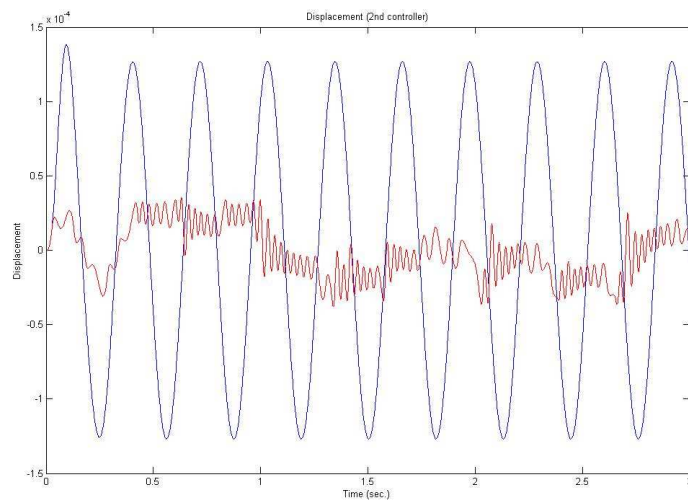
Σχήμα 59: Φορτίσεις (1^{ος} ελεγκτής)



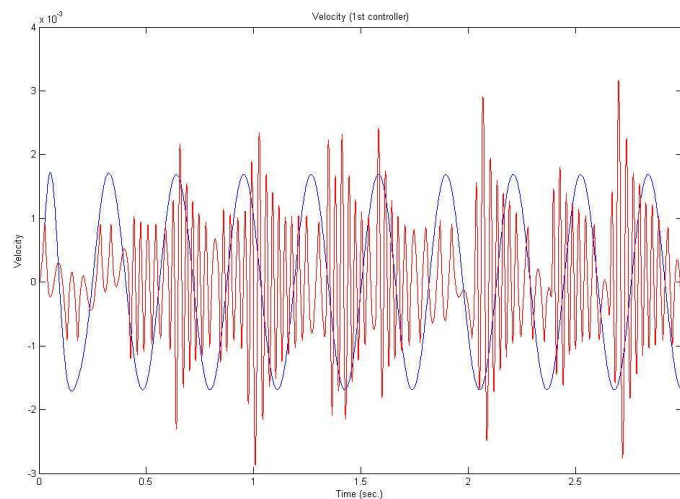
Σχήμα 60: Φορτίσεις (2^{ος} ελεγκτής)



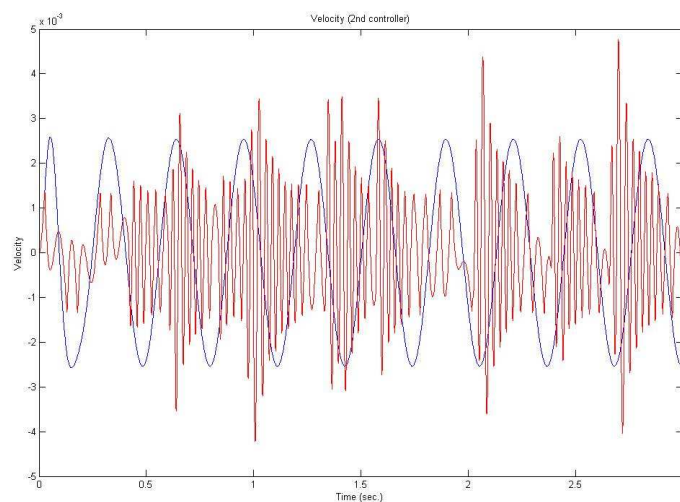
Σχήμα 61: Μετατόπιση (1^{ος} ελεγκτής)



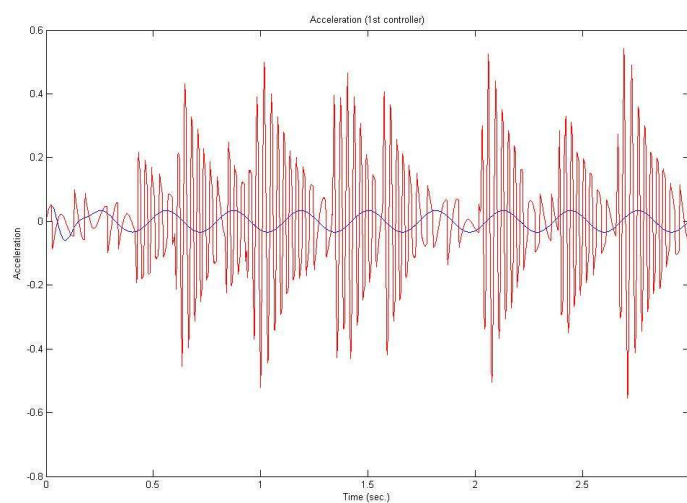
Σχήμα 62: Μετατόπιση (2^{ος} ελεγκτής)



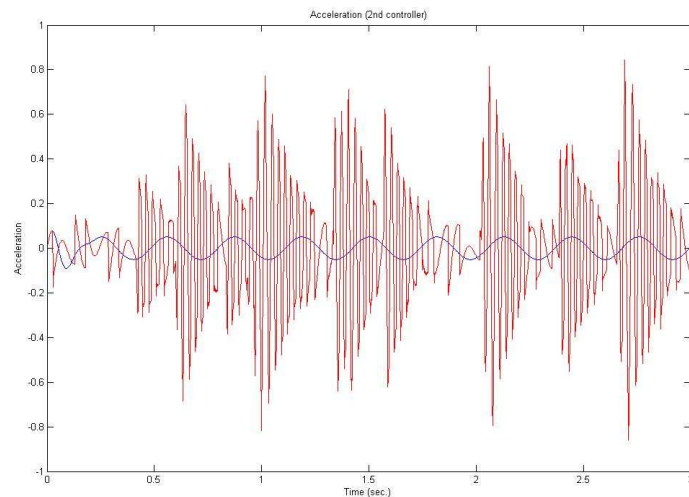
Σχήμα 63: Ταχύτητα (1^{ος} ελεγκτής)



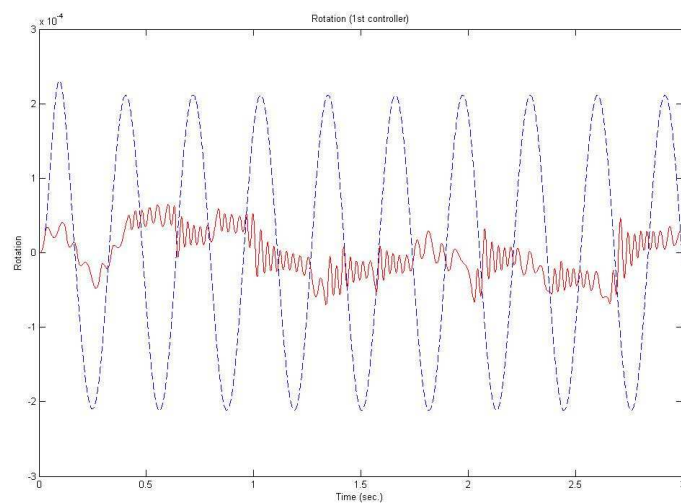
Σχήμα 64: Ταχύτητα (2^{ος} ελεγκτής)



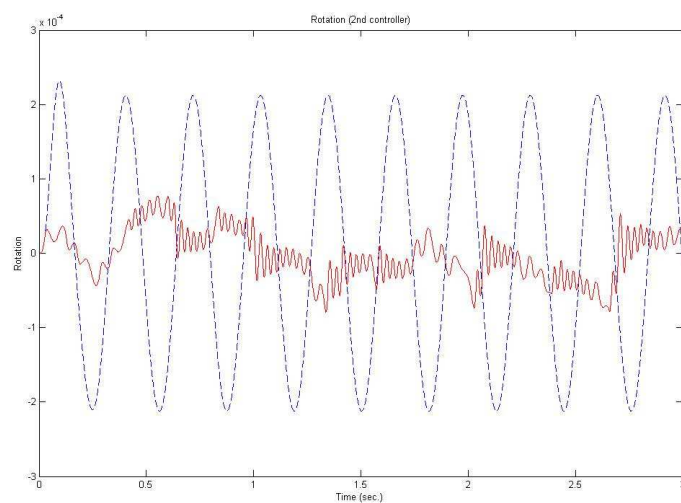
Σχήμα 65: Επιτάχυνση (1^{ος} ελεγκτής)



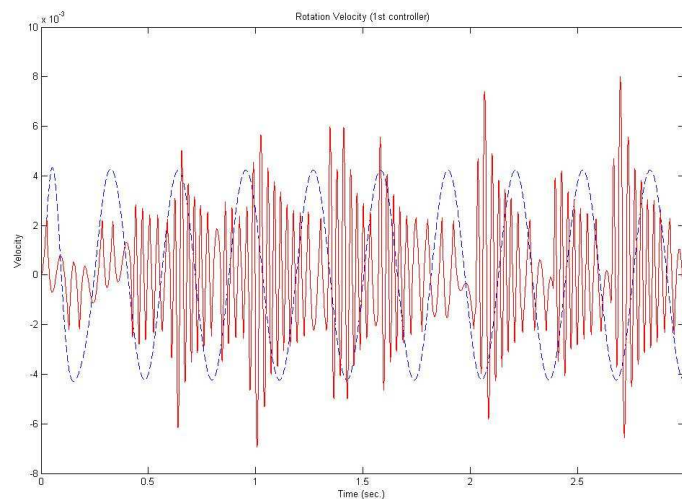
Σχήμα 66: Επιτάχυνση (2^{ος} ελεγκτής)



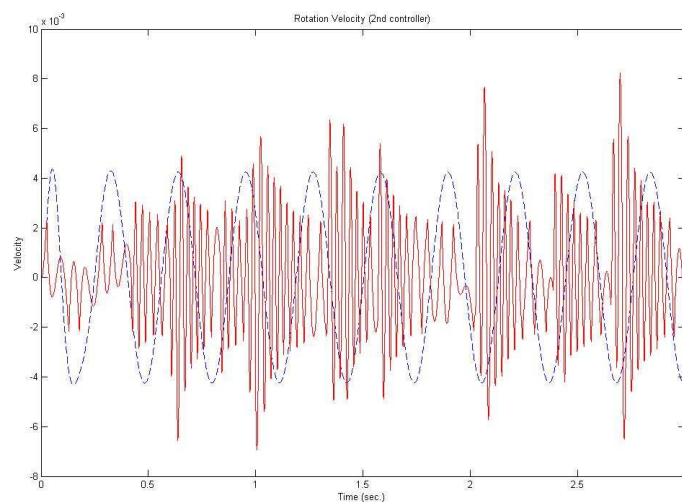
Σχήμα 67: Στροφή (1^{ος} ελεγκτής)



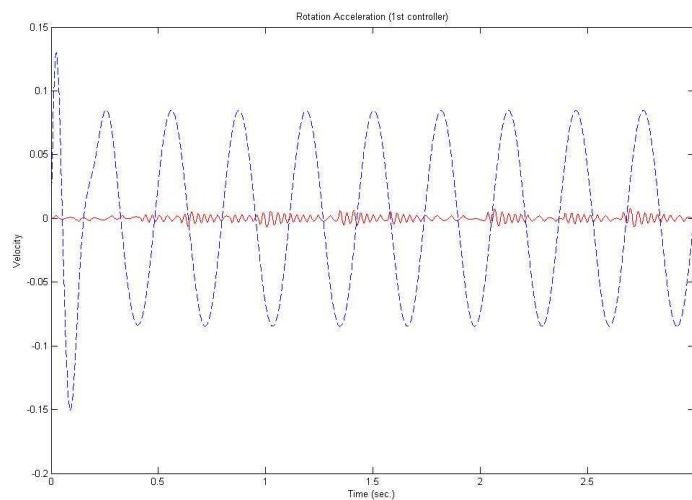
Σχήμα 68: Στροφή (2^{ος} ελεγκτής)



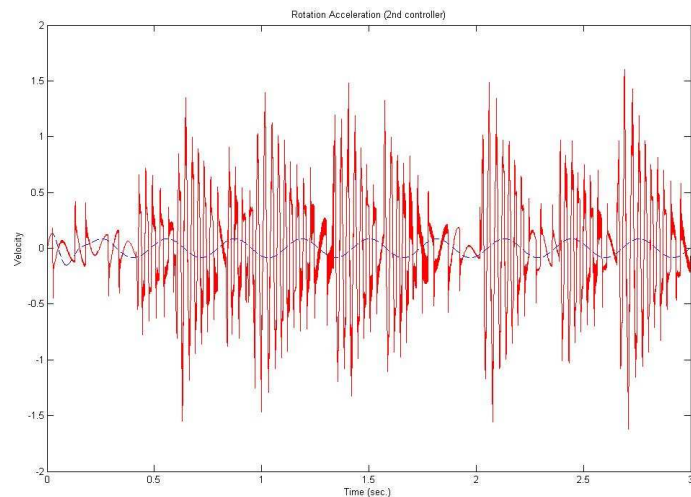
Σχήμα 69: Γωνιακή ταχύτητα (1^{ος} ελεγκτής)



Σχήμα 70: Γωνιακή ταχύτητα (2^{ος} ελεγκτής)

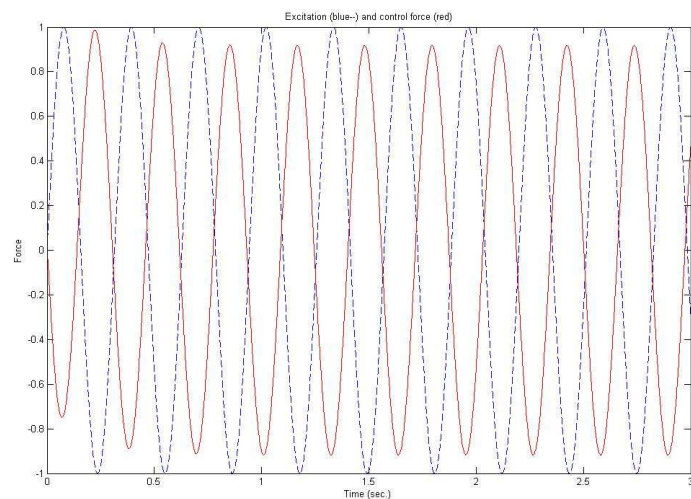


Σχήμα 71: Γωνιακή επιτάχυνση (1^{ος} ελεγκτής)

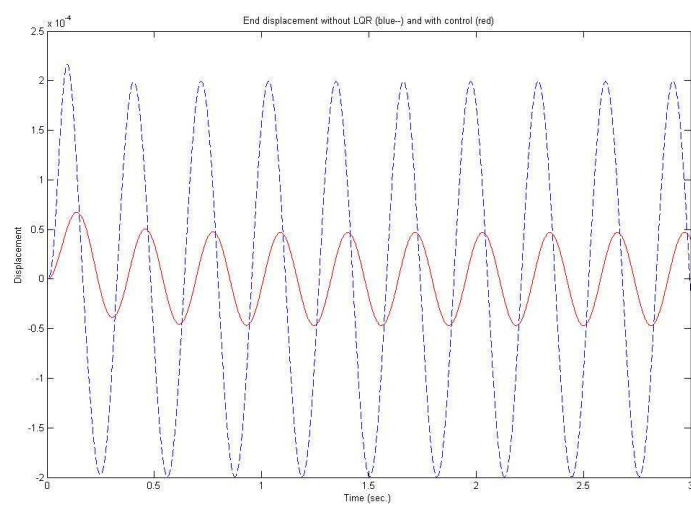


Σχήμα 72: Γωνιακή επιτάχυνση (2^{ος} ελεγκτής)

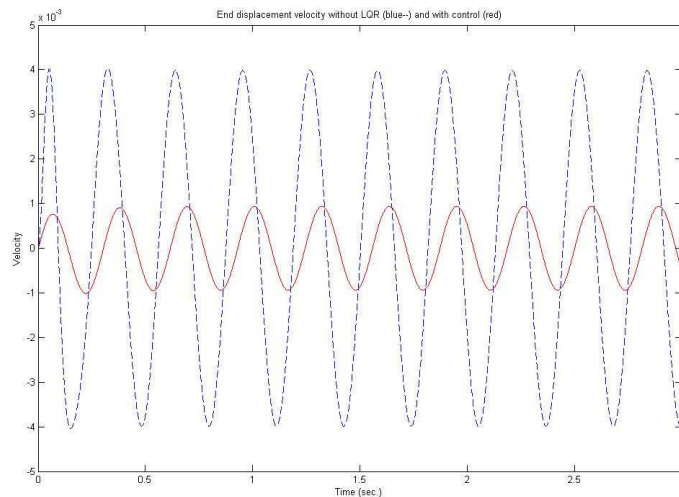
4.4.5 Αποτελέσματα κλασικού ελέγχου (LQR) για το πρόβλημα της προβόλου δοκού.



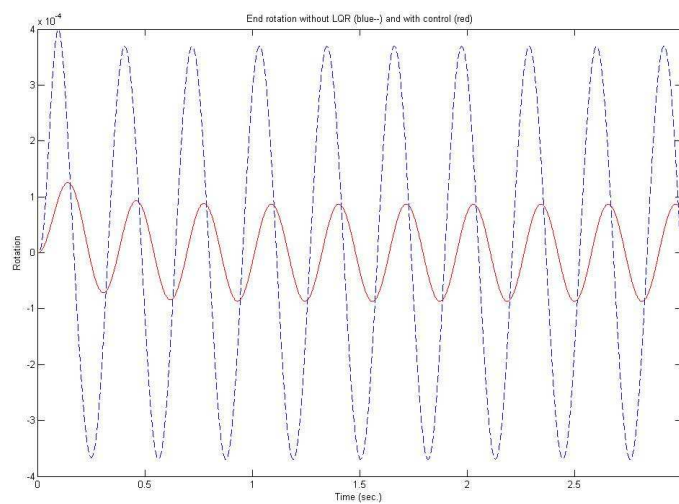
Σχήμα 73: Φορτίσεις (LQR)



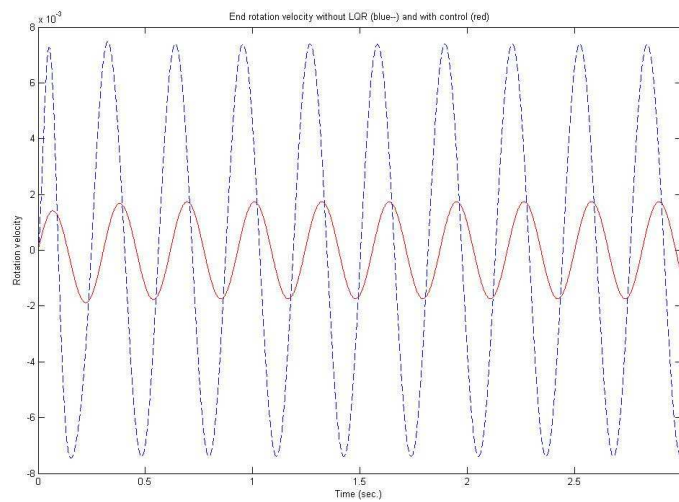
Σχήμα 74: Μετατόπιση (LQR)



Σχήμα 75: Ταχύτητα (LQR)



Σχήμα 76: Στροφή (LQR)



Σχήμα 77: Γωνιακή ταχύτητα (LQR)

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Από τα αριθμητικά αποτελέσματα παρατηρούμε ότι με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων, ένας ασαφής ελεγκτής επιτυγχάνει συγκρίσιμη μείωση των ταλαντώσεων με αυτή του κλασικού ελέγχου (LQR) με χρήση λιγότερων μετρήσεων (δύο αντί δεκαέξι στο παράδειγμα αυτό). Παρόλα αυτά η μείωση των ταχυτήτων δεν ήταν πολύ αποτελεσματική. Επιπρόσθετα οι επιταχύνσεις αυξάνονται δραματικά.

Στην περίπτωση της προσέγγισης με δύο ελεγκτές παρατηρούμε περαιτέρω μείωση των ταλαντώσεων. Αυτό είναι λογικό, αφού το νέο σύστημα χρησιμοποιεί τέσσερις μετρήσεις, αντί για τις δύο του προηγούμενου. Παρόλα αυτά τα γνωστά προβλήματα με τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις παραμένουν.

Όσον αφορά στον κλασικό έλεγχο (LQR) τα αποτελέσματα που προέκυψαν, όπως είδαμε παραπάνω, είναι σαφώς καλύτερα. Ωστόσο, μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί το γεγονός ότι απαιτεί πολύ μεγαλύτερη πληροφορία (περισσότερες μετρήσεις). Για το συγκεκριμένο πρόβλημα απαιτούνται δεκαέξι μετρήσεις ενώ στην περίπτωση των ασαφών ελεγκτών μόλις δύο για κάθε ελεγκτή.

Στη διάρκεια εκπονήσεως της παρούσης διατριβής διεξήχθη επίσης παραμετρική διερεύνηση του μοντέλου που μελετήθηκε, με στόχο την κατανόηση της επιρροής των διαφόρων παραμέτρων και ιδιαίτερα τη βελτίωση της απόκρισης σε επίπεδο ταχυτήτων και επιταχύνσεων. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάστηκαν στην διπλωματική εργασία του κ. Κιλιμπέρη (2008). Η βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων του ασαφούς συστήματος μπορεί να γίνει και με τη χρήση αλγορίθμων ολικής βελτιστοποίησης. Μια πρώτη προσπάθεια σε αυτή την κατεύθυνση αποτελεί η πρόσφατη εργασία των κκ. Γ. Μαρινάκη, Μ. Μαρινάκη και Γ. Σταυρουλάκη (2008), στην οποία γίνεται χρήση αλγορίθμων σμήνους σωματιδίων.

Η παραπέρα διερεύνηση και εφαρμογή σε διδιάστατες και τρισδιάστατες κατασκευές καθώς και η επέκταση σε μη γραμμικές κατασκευές θα αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής προέκυψαν οι ακόλουθες δημοσιεύσεις:

[1] Georgios K. Tairidis, Georgios E. Stavroulakis, Daniela G. Marinova, Emmanuel C. Zacharenakis, Classical and soft robust active control of smart beams, *ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* M. Papadrakakis, D.C. Charmpis, N.D. Lagaros, Y. Tsompanakis (eds.) Rethymno, Crete, Greece, 13–16 June 2007

[2] Georgios K. Tairidis, Georgios E. Stavroulakis, Daniela G. Marinova, Emmanuel C. Zacharenakis, Classical and soft robust active control of smart beams, *Chapter 11*, pp. 165-177, M. Papadrakakis, D.C. Charmpis, N.D. Lagaros, Y. Tsompanakis Volume Editors, *Computational Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Taylor and Francis, December 2008

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] H. Irschik, A review of static and dynamic shape control of structures using piezoelectric actuation. *Engineering Structures*, **24(1)**, 5-11, 2002
- [2] D.G. Marinova, G.E. Stavroulakis, E.C. Zacharenakis, Robust control of smart beams in the presence of damage-induced structural uncertainties. *International Conference PhysCon 2005* August 24-26, 2005, Saint Petersburg, Russia
- [3] G.E. Stavroulakis, G.A. Foutsitzi, E.P. Hadjigeorgiou, D.G. Marinova, E.C. Zacharenakis, C.C. Baniotopoulos, Numerical experiments on smart beams and plates.
- [4] B. Miara, G.E. Stavroulakis, V. Valente, eds. *Topics on Mathematics for Smart Systems, European Conference, Roma, 26-28 October 2006, 218-236, World Scientific Publishers, 2007*
- [5] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrak, *An introduction to fuzzy control*. 2nd edition, Springer Verlag, 1996
- [6] S. Pourzeynali, H.H. Lavasani, A.H. Modarayi, Active control of high rise building structures using fuzzy logic and genetic algorithms. *Engineering Structures*, **29**, 346-357, 2007
- [7] A.-P. Wang, Y.-H. Lin, Vibration control of a tall building subjected to earthquake excitation. *Journal of Sound and Vibration*, **299**, 757-773, 2007
- [8] D.G. Reigles, M.D. Symans, Supervisory fuzzy control of a base isolated benchmark building utilizing a neuro-fuzzy model of controllable fluid viscous dampers. *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, **13**, 724-747, 2006
- [9] Y. Marinakis, M. Marinaki, G.E. Stavroulakis, Particle Swarm Optimization Approach for Structural Control. *6th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Thessaloniki, 19-21 June 2008*
- [10] G. Foutsitzi, E. Hadjigeorgiou, D. Marinova, G. Stavroulakis, Analysis and control of smart viscoelastic beams, *5th GRACM International Congress on Computational Mechanics Limassol, 29 June – 1 July 2005*
- [11] G. Foutsitzi, D. Marinova, G. Stavroulakis, E. Hadjigeorgiou, Vibration control analysis of smart piezoelectric composite plates, *2nd International Conference "From Scientific Computing to Computational Engineering" 2nd IC-SCCE, Athens, 5-8 July, 2006*
- [12] A. Preumont, Mechatronics. Dynamics of electromechanical and piezoelectric systems, *ULB Active Structures Laboratory, Brussels, Belgium, Springer 2006*

- [13] J. Jantzen, Foundations of fuzzy control, *Willey*, 2007
- [14] S. Sivanandam, S. Sumathi and S. Deepa, Introduction to fuzzy logic using MATLAB, *Springer* 2007
- [15] X. Κιλιμπέρης, Παραμετρική διερεύνηση συστήματος ασαφούς ελέγχου με εφαρμογή σε πιεζοηλεκτρική ευφυή δοκό, *Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά, 2008*