

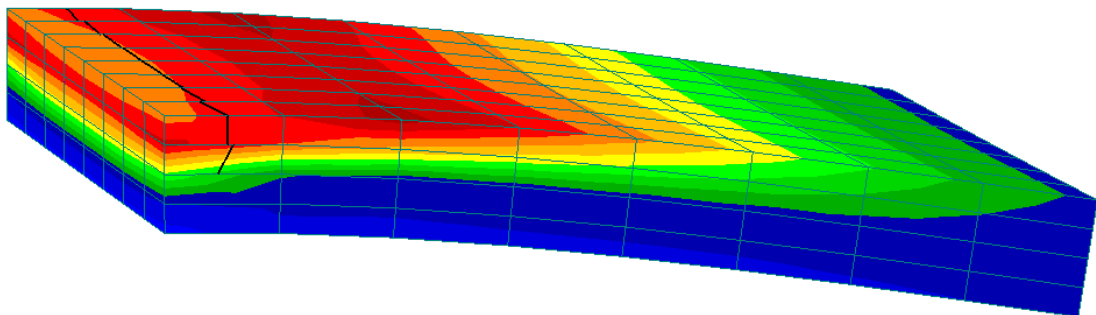


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής & Βελτιστοποίησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***«Έλεγχος σύνθετων πιεζοηλεκτρικών πλακών με χρήση
ασαφούς λογικής»***

Αντώνιος Γ. Τσαγκάρης
A.M.: 2007010050



Επιβλέπων καθηγητής: Σταυρουλάκης Γεώργιος

Χανιά, Δεκέμβριος 2013

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκε με την υποστήριξη ενός αριθμού ανθρώπων στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη χωρίς τη συνδρομή του οποίου, θα ήταν αδύνατη η διεκπεραίωση της. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Ταιρίδη υποψήφιο διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τις πολύτιμες και καθοριστικές συμβουλές του καθώς και για τον προσωπικό χρόνο που αφιέρωσε στις συναντήσεις μας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένεια μου που με βοήθησαν και με στήριξαν σε όλα τα στάδια της φοιτητικής μου καριέρας καθώς και στην διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αντώνιος Γ. Τσαγκάρης

Χανιά, Δεκέμβριος 2013

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
2. ΘΕΩΡΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ	5
2.1. Συμβατικός Έλεγχος	5
2.2. Ευφυής Έλεγχος	5
2.3. Ασαφής έλεγχος	6
2.4. Ασαφής λογική	7
3. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ	7
3.1. Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο	7
3.2. Πιεζοηλεκτρικά ελάσματα	8
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	8
4.1. Μοντέλο σύνθετης πλάκας	9
4.2. Περιγραφή προβλήματος	10
4.3. Ασαφής ελεγκτής τύπου Mamdani	11
4.4. Αριθμητική ολοκλήρωση (Μέθοδος Houbolt)	14
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	15
5.1. Φόρτιση τριών σημείων	16
5.1.1. Έλεγχος στο μέσο	16
5.1.2. Έλεγχος στο άκρο	19
5.1.3. Έλεγχος σε δύο σημεία	21
5.2. Φόρτιση πέντε σημείων	24
5.2.1. Έλεγχος στο μέσο	25
5.2.2. Έλεγχος στο άκρο	26
5.2.3. Έλεγχος σε δύο σημεία	28
5.2.4. Έλεγχος σε τρία σημεία	32
5.3. Συμπεράσματα	36
6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΡΟΒΟΛΟ ΔΟΚΟ	37
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	39
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	41
Περιγραφή αλγορίθμου αριθμητικής ολοκλήρωσης	41

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο έλεγχος των ταλαντώσεων μηχανικών κατασκευών αποτελεί εδώ και πολλά χρόνια αντικείμενο επιστημονικής μελέτης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία για το σκοπό αυτό, μελετάται η εφαρμογή ασαφών τεχνικών ελέγχου.

Το μηχανικό μοντέλο στο οποίο εφαρμόζεται ο έλεγχος αποτελείται από μία σύνθετη πλάκα, πακτωμένη στη μια της πλευρά, στην οποία έχουν προσαρμοστεί αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Η πλάκα, η οποία διακριτοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων εκτίθεται σε ημιτονοειδή φόρτιση.

Ο ασαφής ελεγκτής που χρησιμοποιείται αποτελεί δημιούργημα του κ. Γεωργίου Ταιρίδη στα πλαίσια της μεταπτυχιακής του διατριβής “Προσομοίωση σύνθετων ευφυών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Σύνδεση με ευφυείς μεθόδους ελέγχου. Χανιά Μάιος 2009”. Στην εν λόγω μεταπτυχιακή διατριβή ο έλεγχος εφαρμόστηκε σε ένα μοντέλο πακτωμένης ράβδου.

Με τις κατάλληλες αλλαγές ο ασαφής ελεγκτής προσαρμόστηκε στο μοντέλο της πλάκας, όπου σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο αριθμητικής ολοκλήρωσης σε περιβάλλον Matlab, αποσκοπεί στον όσο το δυνατό αποτελεσματικότερο έλεγχο της ταλάντωσης της σύνθετης πλάκας.

Η παρούσα εργασία έγινε υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του καθηγητή του τμήματος μηχανικών παραγωγής και διοίκησης του πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεωργίου Σταυρουλάκη.

2. ΘΕΩΡΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

2.1. Συμβατικός Έλεγχος

Στο παρελθόν η βιομηχανία δεν είχε άλλη επιλογή από το να χρησιμοποιεί Μακροσκοπικό έλεγχο. Ο Μακροσκοπικός έλεγχος έχει βάσεις στη γνώση της δυναμικής συμπεριφοράς της ελεγχόμενης διαδικασίας που απορρέει από μετρήσεις των κυρίων μεταβλητών εισόδου και εξόδου της διαδικασίας. Ο συμβατικός βιομηχανικός έλεγχος είναι το κύριο παράδειγμα του μακροσκοπικού ελέγχου και βασίζεται σε ελεγκτές τριών όρων (PID) που σήμερα ενσωματώνονται στις περισσότερες τερματικές μονάδες ελέγχου (RTU) και τους προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (PLC). Αναρίθμητοι ελεγκτές τριών όρων ρυθμίζουν σήμερα αδιάλειπτα πλήθος βιομηχανικών διαδικασιών. Ο συντονισμός τους συνήθως γίνεται εμπειρικά εντός γραμμής βάσει προσεγγιστικών προτύπων και τεχνικών συντονισμού.

2.2. Ευφυής Έλεγχος

Η ολοένα αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων βιομηχανικών διαδικασιών, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες απαιτήσεις για καλύτερο ποιοτικό έλεγχο, επιβάλλει τη χρήση προηγμένων και εκλεπτυσμένων ελεγκτών στους οποίους οι συμβατικές τεχνικές ελέγχου δεν είναι ικανές να ανταποκριθούν.

Ο ευφυής έλεγχος (intelligent control) αντιμετωπίζει το πρόβλημα του ελέγχου βιομηχανικών διαδικασιών από μια οπτική γωνία που είναι εντελώς διαφορετική από αυτή του συμβατικού αλγοριθμικού ελέγχου. Στον ευφυή (ή νοήμονα) έλεγχο, η γνώση και εμπειρία του ανθρώπου-χειριστή της ελεγχόμενης διαδικασίας αποτελεί τον πυρήνα της εξέλιξης αυτής και η νέα τεχνική παρέχει τα απαραίτητα εργαλεία για την αναπαραγωγή της ανθρώπινης γνώσης και ευφυΐας για τον έλεγχο βιομηχανικών διαδικασιών. Σημαντικό αποτέλεσμα της νέας τεχνικής είναι ότι οι διαδικασίες και διεργασίες που δεν ήταν δυνατό να ελεγχθούν χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση τώρα μπορούν να ελέγχονται αυτόματα.

Ο κυρίαρχος στόχος ενός ευφυούς ελεγκτή συνεπώς είναι να λειτουργεί όπως ο άνθρωπος-χειριστής δηλαδή με τους ίδιους κανόνες, αλλά χωρίς τις ελλείψεις και τις αδυναμίες του, αποφεύγοντας συγχρόνως τα στοιχεία της ασυνέπειας, αναξιοπιστίας, παροδικής αστάθειας και κόπωσης που είναι συνυφασμένα με τις αντίξοες συνθήκες του επαγγέλματος και του εργασιακού περιβάλλοντος.

Στην εικόνα 2.2.1 διακρίνεται ένας πίνακας όπου τα ευφυή συστήματα διατάσσονται σύμφωνα με τον τρόπο επεξεργασίας και την απαραίτητη δομή της γνώσης. Για τον έλεγχο διαδικασιών, η γνώση μπορεί να είναι δομημένη ή μη, αλλά η επεξεργασία είναι πάντοτε αριθμητική. Οι δύο μέθοδοι του ασαφούς και του νευρωνικού ελέγχου

αποτελούν τον πυρήνα του ευφυούς ελέγχου στα πλαίσια της εξελισσόμενης περιοχής της υπολογιστικής νοημοσύνης.

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ		
ΓΝΩΣΗ	ΣΥΜΒΟΛΙΚΗ	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ
	ΔΟΜΗΜΕΝΗ ΕΜΠΕΙΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	ΑΣΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
	ΜΗ-ΔΟΜΗΜΕΝΗ	ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Εικόνα 2.2.1

Διάταξη των ευφύων συστημάτων σύμφωνα με την επεξεργασία και τη δομή της γνώσης

Τα έμπειρα συστήματα ελέγχου παρά τις εξελιγμένες τεχνικές αναζήτησης που συνήθως κατέχουν όταν η απαραίτητη γνώση δεν έχει ενσωματωθεί στη βάση κανόνων τους, αδυνατούν να δώσουν συγκεκριμένη απόφαση. Συνεπώς, όταν η γνώση για τον έλεγχο μιας διαδικασίας είναι ελλιπής, τότε απαιτούνται πιο προηγμένες τεχνικές συμπερασμού και εδώ ακριβώς βρίσκεται η δύναμη της υπολογιστικής νοημοσύνης. Αντίθετα με τους απλούς γλωσσικούς ελεγκτές και τα έμπειρα συστήματα ελέγχου οι ελεγκτές που βασίζονται στις τεχνικές της υπολογιστικής νοημοσύνης έχουν την ικανότητα να συμπεραίνουν αποτελέσματα από ελλιπή στοιχεία. Οι ασαφείς ελεγκτές βασίζονται στη θεωρία της ασαφούς λογικής και οι νευρωνικοί ελεγκτές στα εκπαιδευόμενα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Και οι δύο τεχνικές παρέχουν μηχανισμούς που επιτρέπουν την εξαγωγή συμπερασμάτων έστω και αν δεν υπάρχει κανόνας για τη συγκεκριμένη κατάσταση της διαδικασίας. Τέλος ο συνδυασμός των δύο τεχνικών μπορεί να προσφέρει τα καλύτερα στοιχεία κάθε μεθόδου. Οι υβριδικοί ελεγκτές βασίζονται τόσο σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για το γρήγορο υπολογισμό των αποφάσεων ελέγχου όσο και σε ασαφή σύνολα μέσω των οποίων περιγράφονται οι γλωσσικοί κανόνες ελέγχου της ελεγχόμενης διαδικασίας.

2.3. Ασαφής έλεγχος

Πολλές βιομηχανικές διαδικασίες μπορούν να ελέγχονται ικανοποιητικά από χειριστές χωρίς προσφυγή σε μαθηματικά πρότυπα, αλγορίθμους και βαθιά αντίληψη των ενδότερων φυσικών διαδικασιών. Ο χειριστής έχει την έμφυτη ικανότητα να παρέχει

ποσοτικές αποφάσεις και δράσεις από ποιοτικές πληροφορίες, με αποτέλεσμα την “ικανοποιητική” και “αποδεκτή” συμπεριφορά της διαδικασίας. Η κυρίαρχος φράση εδώ είναι η “αποδεκτή” συμπεριφορά διότι κάτω από τις αντίξοες συνθήκες της βιομηχανίας, συχνά δεν έχει νόημα να μιλάμε για “βέλτιστες” λύσεις.

Ο ευφυής έλεγχος βασίζεται σε κάποια ποιοτική περιγραφή της διαδικασίας υπό έλεγχο και τους κανόνες λειτουργίας που εφαρμόζει ένας χειριστής για να ελέγχει τη διαδικασία. Ο Zadeh εμπνευστής της ασαφούς λογικής, παρατήρησε ότι για πολλές σύνθετες διαδικασίες υψηλά επίπεδα ακριβείας δεν είναι εφικτά ούτε καν αναγκαία για τον ικανοποιητικό τους έλεγχο.

2.4. Ασαφής λογική

Η ασαφής λογική, που κατέχει παράλληλη θέση με τη θεωρία πιθανοτήτων, την οποία όμως δεν αντικαθιστά στοχεύει να αναπαράγει τον ασαφή συμπερασμό για αβέβαιες και σύνθετες διαδικασίες καθώς και να παράσχει ένα μέσο για την παράσταση της έννοιας των ασαφών γλωσσικών προτάσεων σε μια φυσική γλωσσική δομή. Η ασαφής λογική είναι ένα ιδανικό όχημα για την περιγραφή και ανάλυση προσεγγιστικών λογικών μορφών, όπου το αληθές είναι θέμα βαθμού.

Σύμφωνα με την κλασσική λογική μια συνθήκη μπορεί να είναι αληθής ή ψευδής. Η ασαφής λογική ορίζει ότι δεν είναι απαραίτητο να υπάρχουν μόνο δύο καταστάσεις για να χαρακτηρίσουν μια συνθήκη. Μια πρόταση μπορεί να είναι αληθής με κάποιο βαθμό αλήθειας και όχι απλά αληθής ή ψευδής. Με την ασαφή λογική μπορούμε να λαμβάνουμε υπόψη μας ποιοτικές μεταβλητές όπως το χρώμα και η χρησιμότητα. Οι μεταβλητές αυτές λαμβάνουν ένα βαθμό συμμετοχής που προκύπτει από τις προκαθορισμένες συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών συνόλων. Όσο πιο μεγάλος είναι ο βαθμός συμμετοχής της μεταβλητής τόσο “πιο πολύ” ανήκει στο ασαφές σύνολο.

3. ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

3.1. Πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

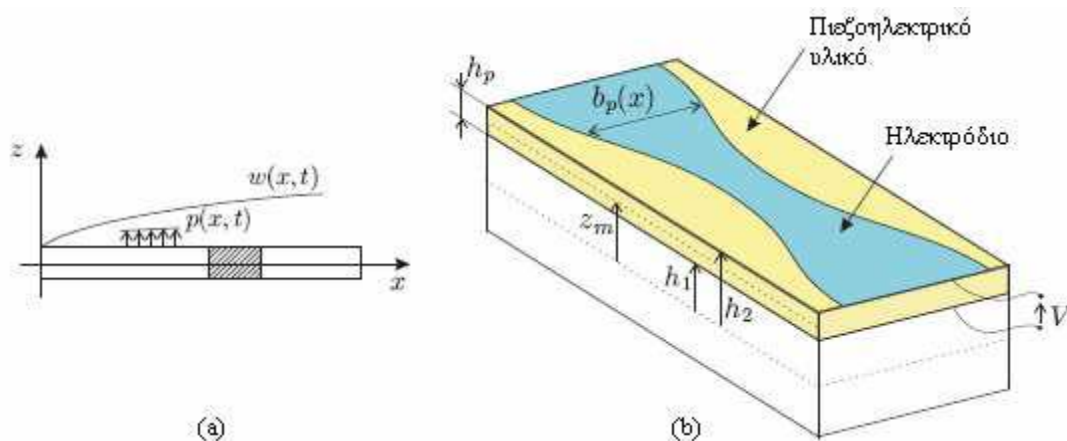
Ο πιεζοηλεκτρισμός ανακαλύφθηκε από τον Πιερ Κιουρί το 1880. Περιγράφει ουσιαστικά την ιδιότητα κάποιων υλικών να παραμορφώνονται όταν εφαρμόζεται στα άκρα τους ηλεκτρική τάση ή και το αντίθετο, δηλαδή να παράγουν ηλεκτρική τάση όταν υπόκεινται σε μηχανική φόρτιση ή ταλάντωση. Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού οφείλεται σε κρυσταλλικές ασυμμετρίες και εξηγείται πρακτικά με τη μεταφορά ελευθέρων ηλεκτρονίων στα άκρα του κρυσταλλικού πλέγματος. Παραδείγματα υλικών με

πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες είναι ο χαλαζίας (SiO_2), το ένυδρο θειικό λίθιο ($\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) και άλλα.

3.2. Πιεζοηλεκτρικά ελάσματα

Θεωρούμε την πιεζοηλεκτρική δοκό της εικόνας 3.2.1(a). Έστω ότι καλύπτεται από ένα μονό στρώμα πιεζοηλεκτρικού υλικού ομοιόμορφου πάχους h_p , πολωμένου κατά τον άξονα z . Η γραμμοσκιασμένη περιοχή φαίνεται λεπτομερώς στην εικόνα 3.2.1(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_z 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.



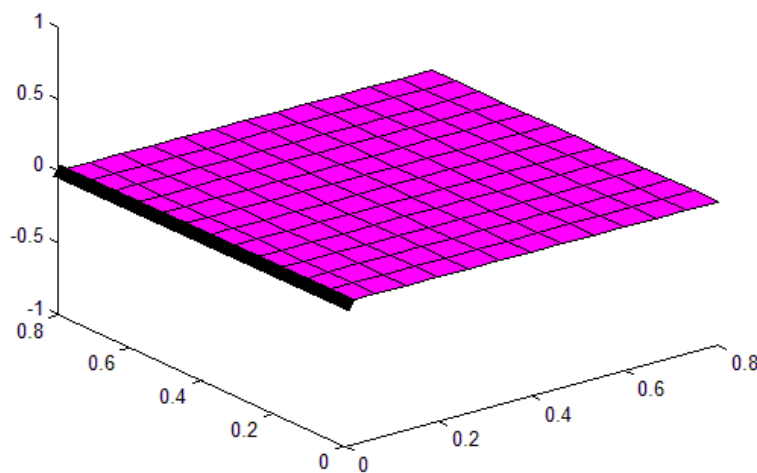
Εικόνα 3.2.1

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Πιο πάνω έγινε μια προσπάθεια αναφοράς στις βασικότερες γνώσεις που θα πρέπει να κατέχει ο αναγνώστης, ώστε να μπορέσει να παρακολουθήσει και να κατανοήσει τη διαδικασία της εφαρμογής του ασαφούς ελέγχου. Με το θεωρητικό υπόβαθρο αυτό λοιπόν, ξεκινάει η παρουσίαση του υπό μελέτη προβλήματος.

4.1. Μοντέλο σύνθετης πλάκας

Το σύστημα που μελετάμε στη παρούσα εργασία αποτελείται από μια τετράγωνη πλάκα με μήκος πλευράς 0,8 μονάδες. Στην πλάκα αυτή έχουν προσαρμοστεί πιεζοηλεκτρικά ελάσματα που έχουν ως στόχο τον έλεγχο της ταλάντωσης που προκύπτει από την επιβολή ημιτονοειδούς φόρτισης. Για την διακριτοποίηση της πλάκας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα ο φορέας διαιρέθηκε σε 144 τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία, οδηγώντας σε ένα σύστημα 169 κόμβων με 5 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. Οι βαθμοί ελευθερίας αντιστοιχούν στο πλήθος των συντεταγμένων που απαιτούνται για να καθοριστεί η θέση κάθε κόμβου στο χώρο. Από αυτούς οι τρεις πρώτοι αντιστοιχούν στις μετατοπίσεις του κόμβου στις τρεις διαστάσεις του χώρου x , z και y αντίστοιχα, ενώ οι υπόλοιποι δύο, στις στροφές ως προς τους άξονες x και y . Για την εφαρμογή του ελέγχου θα μας απασχολήσει μόνο η μετατόπιση στον y άξονα, δηλαδή μόνο ο τρίτος από τους πέντε βαθμούς ελευθερίας κάθε κόμβου. Η στήριξη της πλάκας επετεύχθη με μηδενισμό των βαθμών ελευθερίας των κόμβων 1, 14, 27, 40, 53, 66, 79, 92, 105, 118, 131, 144 και 157, δηλαδή όλων των κόμβων της μίας πλευράς της. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η πλάκα είναι πακτωμένη στην πλευρά αυτή. Η πλάκα με τη στήριξη της φαίνεται στην εικόνα 4.1.1 που ακολουθεί. Η παχιά μαύρη γραμμή προσδιορίζει το σημείο της πάκτωσης.



Εικόνα 4.1.1

Η γραφική απεικόνιση του μοντέλου (εικόνα 4.1.1), η διακριτοποίηση, η αρίθμηση των κόμβων καθώς και οι συνοριακές συνθήκες της πλάκας, προκύπτουν από την εκτέλεση του αλγορίθμου `Plate_lam` ο οποίος αποτελεί εργασία της κ. Γεωργίας Φουτσίτζη, αναπληρώτριας καθηγήτριας του ΤΕΙ Ηπείρου. Ο ίδιος αλγόριθμος, ο οποίος κάνει την

στατική ανάλυση του μοντέλου πλάκας, παράγει τα μητρώα μάζας και δυσκαμψίας τα οποία χρησιμοποιούμε για την επίλυση των εξισώσεων κίνησης.

Λαμβάνοντας επίσης υπόψη και την απόσβεση, η οποία δίνεται από τον τύπο

$$C = 0.01 * (M + K)$$

το σύστημα των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση των κόμβων, σε μητρική μορφή γράφεται ως εξής

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P + Z$$

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

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

P, Z είναι οι εξωτερικές δυνάμεις και οι δυνάμεις ελέγχου

Οι παραπάνω εξισώσεις περιγράφουν τη χρονική εξέλιξη των μετατοπίσεων. Η επίλυση τους θα γίνει για αρχικές συνθήκες μετατόπισης και ταχύτητας των κόμβων $u_0=0$ και $\dot{u}_0 = 0$ τη χρονική στιγμή $t_0=0$.

4.2. Περιγραφή προβλήματος

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, το ζητούμενο είναι ο έλεγχος της ταλάντωσης που προκαλείται από την ημιτονοειδή διέγερση της πλάκας. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε ένας αριθμός διερευνήσεων ως προς τα σημεία, δηλαδή τους κόμβους, εφαρμογής του ελέγχου και της επιβολής της φόρτισης.

Οι διερευνήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου σε περιβάλλον Matlab, ο οποίος συνδυάζει τη μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης Houbolt με έναν ασαφή ελεγκτή τύπου Mamdani.

Σε κάθε βήμα της αριθμητικής ολοκλήρωσης, ο ασαφής ελεγκτής παράγει σαν έξοδο μια δύναμη ελέγχου (z) σύμφωνα με τις δοθείσες τιμές των εισόδων, δηλαδή την μετατόπιση και την ταχύτητα. Η δύναμη ελέγχου σε συνδυασμό με την εξωτερική φόρτιση, παράγει τις τιμές της μετατόπισης και της ταχύτητας του επομένου βήματος.

Η φόρτιση η οποία εφαρμόστηκε στην πλάκα κατά τις διερευνήσεις, περιγράφεται από τον τύπο

$$P = p_0 * \sin(\omega * t)$$

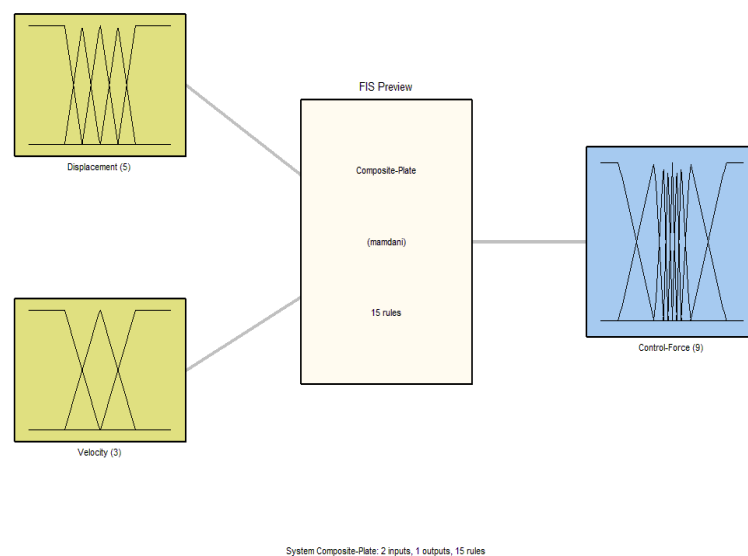
Το πλάτος έχει επιλεγεί να είναι ίσο με $p_0=1$ ενώ η συχνότητα ίση με $\omega=20$ συνεπώς ο τύπος παίρνει την εξής μορφή

$$P = 1 * \sin(20 * t)$$

4.3. Ασαφής ελεγκτής τύπου Mamdani

Ο ασαφής ελεγκτής που χρησιμοποιούμε για τον έλεγχο της πλάκας, δημιουργήθηκε από τον κ. Γεώργιο Ταιρίδη στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής του διατριβής, με σκοπό τον έλεγχο της ταλάντωσης μιας προβόλου δοκού. Ο εν λόγω ασαφής ελεγκτής είναι τύπου MISO (multiple inputs, single output) και έγινε με χρήση του πακέτου Fuzzy toolbox της Matlab.

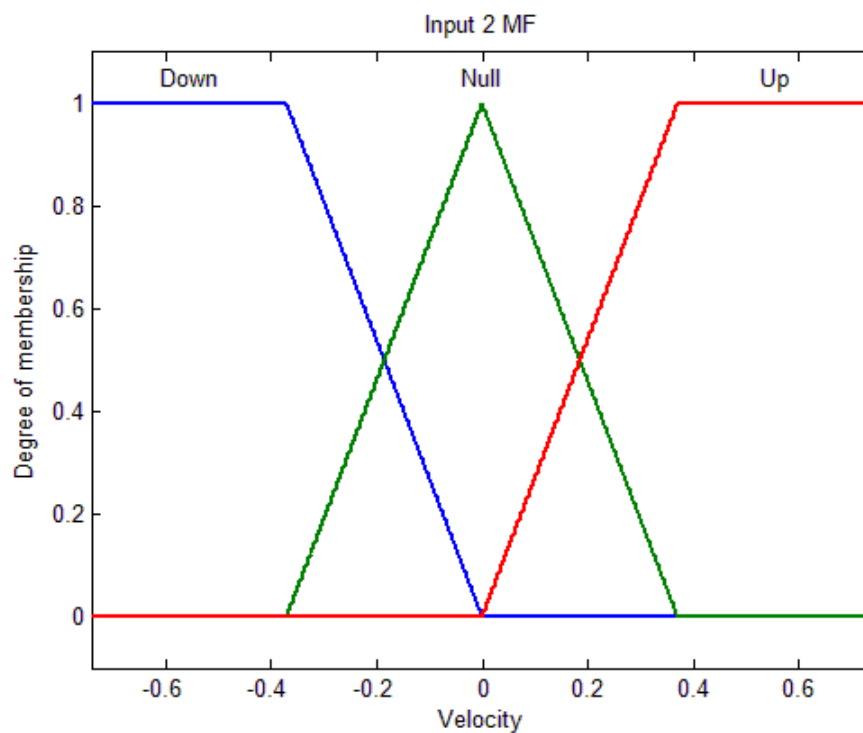
Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.2.1, δέχεται δύο εισόδους και παράγει μία έξοδο.



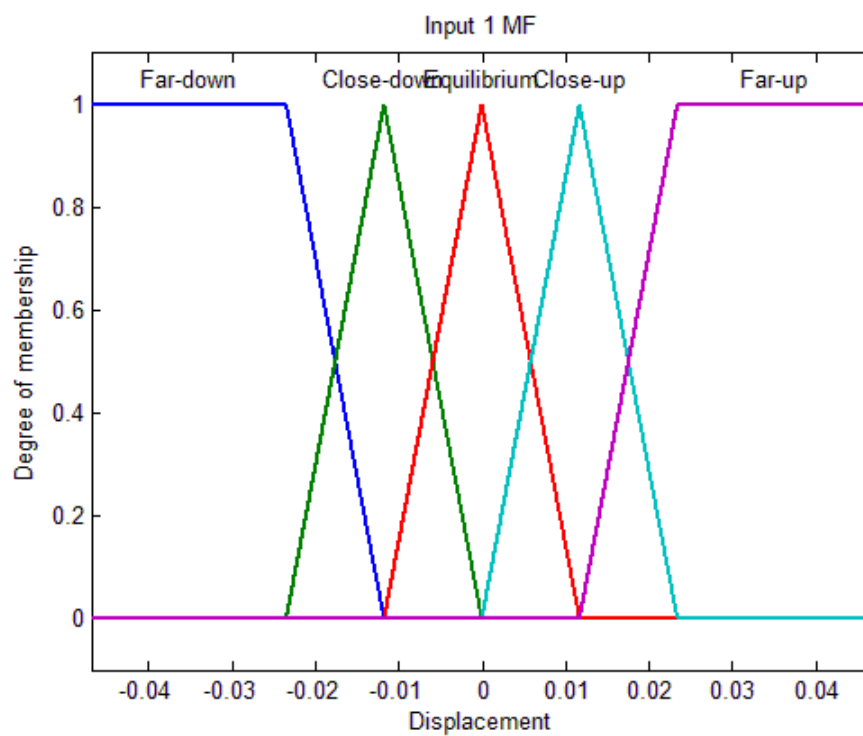
Εικόνα 4.2.1 Ασαφής ελεγκτής

Ως εισόδους δέχεται το πεδίο των μετακινήσεων (u) και την ταχύτητα ($\dot{u}$) του συστήματος ελέγχου και ως έξοδο δίνει την αύξηση της δύναμης ελέγχου.

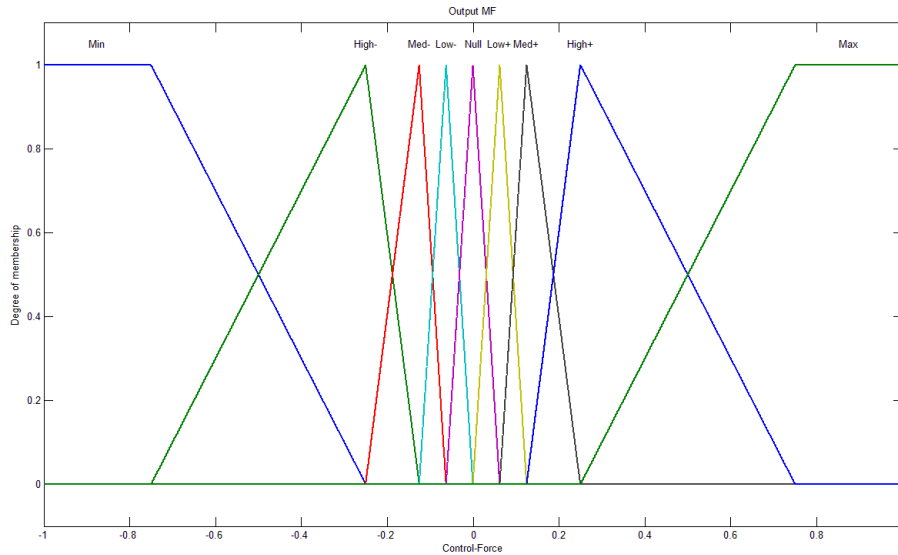
Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται οι συναρτήσεις συμμετοχής που χρησιμοποιήθηκαν για την ταχύτητα, τη μετατόπιση και τη δύναμη ελέγχου αντίστοιχα.



Εικόνα 4.2.2
Συναρτήσεις συμμετοχής για την ταχύτητα



Εικόνα 4.2.3
Συναρτήσεις συμμετοχής για την μετατόπιση



Εικόνα 4.2.4
Συναρτήσεις συμμετοχής για την δύναμη ελέγχου

Το σύστημα του ελεγκτή περιγράφεται από 15 κανόνες (fuzzy rules) που συντάχθηκαν με βάση τη λογική. Τα ενδεχόμενα συνδυάζονται με χρήση του λογικού τελεστή ΚΑΙ. Στη συνέχεια αναφέρονται ενδεικτικά τρεις από τους κανόνες.

- i. If (Displacement is Far-down) and (Velocity is Downwards) then (Control-Force is Max)
- ii. If (Displacement is Equilibrium) and (Velocity is Downwards) then (Control-Force is Low+)
- iii. If (Displacement is Close-up) and (Velocity is Downwards) then (Control-Force is Null)

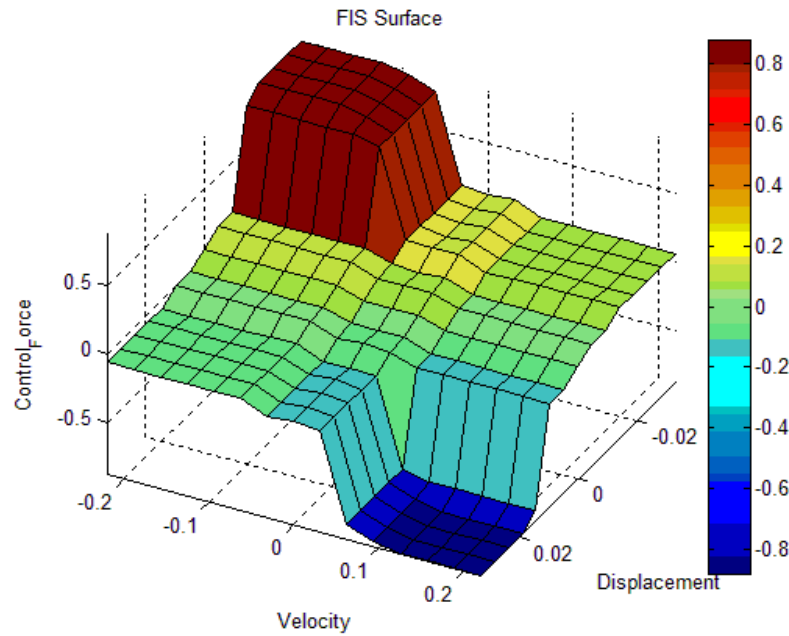
Στον πίνακα 4.2.1 παρουσιάζεται μία σύνοψη του συνόλου των 15 κανόνων.

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

Πίνακας 4.2.1

Η αποασαφοποίηση της εξόδου του ελεγκτή, δηλαδή η σαφής τιμή της δύναμης ελέγχου, προκύπτει με τη μέθοδο του μέσου μεγίστου (mean of maximum method).

Οι μετατοπίσεις και οι ταχύτητες συσχετίζονται με τη δύναμη ελέγχου όπως απεικονίζεται στην επιφάνεια της εικόνας 4.2.5



Εικόνα 4.2.5
Επιφάνεια του ασαφούς συστήματος

4.4. Αριθμητική ολοκλήρωση (Μέθοδος Houbolt)

Για την αριθμητική ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης, επιλέχθηκε η Μέθοδος **Houbolt** ως πιο σταθερή σε τέτοιου είδους προβλήματα.

Για την εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου ορίζουμε εξ αρχής δύο σταθερές τις β και γ , οι οποίες είναι γνωστές ως σταθερές Houbolt, οι τιμές των οποίων για προβλήματα σταθερής επιτάχυνσης ορίζονται στη βιβλιογραφία ίσες με 0,25 και 0,50 αντίστοιχα.

Ο Συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης (t) είναι 3 δευτερόλεπτα. Το βήμα της ολοκλήρωσης (Δt) επιλέχθηκε, έπειτα από δοκιμές στα 0,001 δευτερόλεπτα

Υπολογίζουμε τις σταθερές ολοκλήρωσης από τις ακόλουθες εξισώσεις:

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

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^*

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

Αντιστροφή του K^* : $F^* = (K^*)^T$

Έναρξη βρόχου for από t_0 έως t_f

Βήμα 3: Υπολογισμός ενδιάμεσης ποσότητας P^*

Υπολογισμός μεταβολής φορτίσεων: $dF_m = F_m(t+1) - F_m(t)$

Υπολογισμός μεταβολής δύναμης ελέγχου u

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 επομένου χρονικού βήματος $(t+\Delta t)$

Υπολογισμός επιτάχυνσης: $\ddot{X}(t+1) = \ddot{X}(t) + c_1dX - c_2\dot{X}(t) - c_3\ddot{X}(t)$

Υπολογισμός ταχύτητας: $\dot{X}(t+1) = \dot{X}(t) + c_4dX - c_5\dot{X}(t) - c_6\ddot{X}(t)$

Υπολογισμός μετατόπισης: $X(t+1) = X(t) + dX$

Τερματισμός του βρόχου for

Τέλος

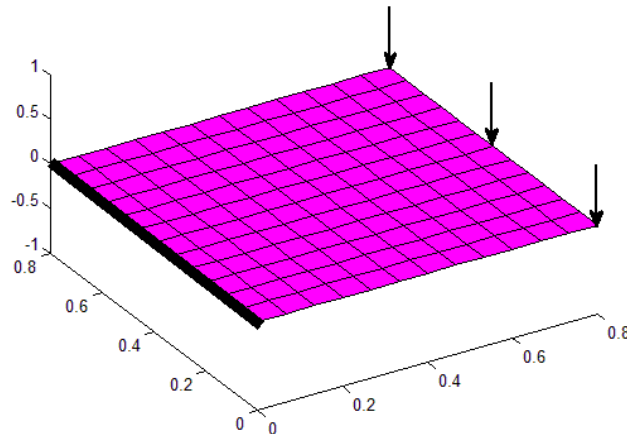
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αυτό που επιζητούμε ουσιαστικά από την επιβολή ασαφούς ελέγχου σε κάποιους κόμβους της σύνθετης πλάκας, είναι η όσο το δυνατό αποτελεσματικότερη εξομάλυνση της ταλάντωσης της. Αυτό σημαίνει ότι αρχικά μας ενδιαφέρει ένα καλό αποτέλεσμα μετά τον έλεγχο στο πεδίο των μετατοπίσεων. Καλό αποτέλεσμα μπορεί να θεωρηθεί ένα σύνολο μετρήσεων με σαφώς μειωμένες τιμές σε σχέση με τις αρχικές τιμές τη μετατόπισης, αλλά και που παρουσιάζει μια ομοιομορφία στην εξέλιξη του χρόνου της δοκιμής.

Αποτελεσματική εξομάλυνση επίσης σημαίνει ότι η ταχύτητα, η επιτάχυνση και οι δυνάμεις που ασκούνται στους κόμβους της πλάκας μετά τον έλεγχο, θα πρέπει να παρουσιάζουν αρμονικότητα στην εξέλιξη του χρόνου και όχι απότομες μεταβολές ή πολύ έντονες διαταραχές. Ο λόγος ο οποίος καθιστά σημαντικό το παραπάνω είναι η καταπόνηση που προκαλείται στην πλάκα λόγω των απότομων μεταβολών ή των υψηλών τιμών που παρουσιάζουν οι μεταβλητές που αναφέρθηκαν.

5.1. Φόρτιση τριών σημείων

Στις πρώτες διερευνήσεις η ημιτονοειδής φόρτιση επιλέχθηκε να κατανεμηθεί σε τρεις κόμβους. Οι τρεις αυτοί κόμβοι σύμφωνα με την αρίθμηση είναι οι 13, 91 και 169. Οι δύο από αυτούς (13 και 169) βρίσκονται στα δύο άκρα της ελεύθερης πλευράς της πλάκας, ενώ ο τρίτος (91) στο μέσο της.



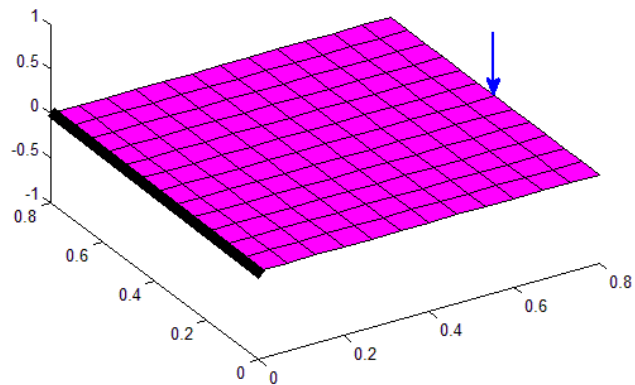
Εικόνα 5.1.1

Η φόρτιση που τελικώς ασκείται σε κάθε κόμβο όπως φαίνεται στην εικόνα 5.1.1 είναι ίση με:

$$P = \frac{1}{3} [1 * \sin(20 * t)]$$

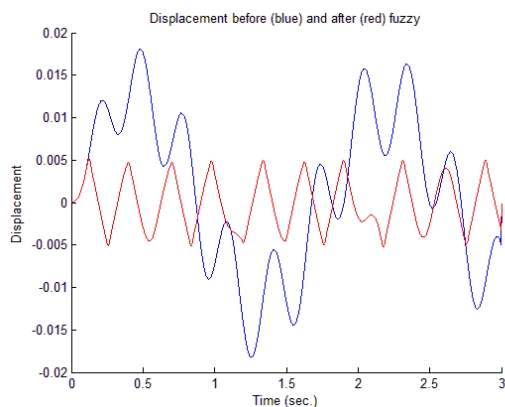
5.1.1. Έλεγχος στο μέσο

Στη διερεύνηση αυτή ο έλεγχος εφαρμόστηκε στο μέσο της ελεύθερης πλευράς της πλάκας (εικόνα 5.1.1.1) δηλαδή στον κόμβο 91.

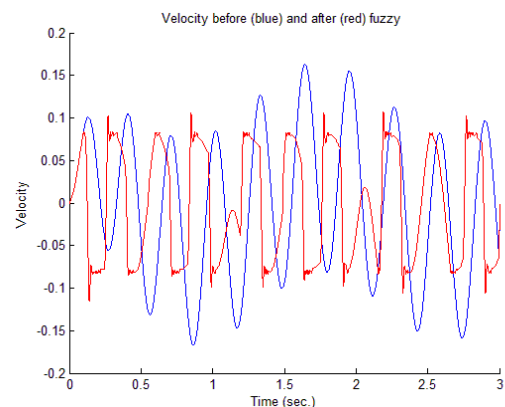


Εικόνα 5.1.1.1

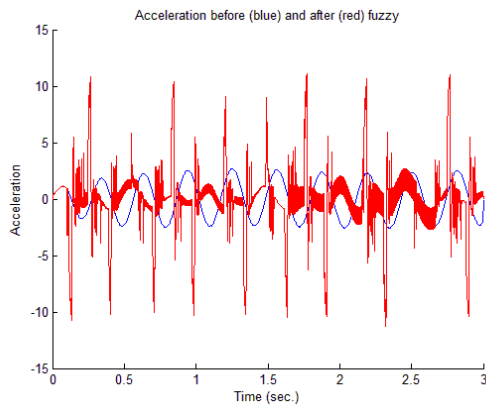
Από την εκτέλεση του αλγορίθμου αριθμητικής ολοκλήρωσης λαμβάνουμε τα γραφήματα της μετατόπισης (εικόνα 5.1.1.2), της ταχύτητας (εικόνα 5.1.1.3) και της επιτάχυνσης (εικόνα 5.1.1.4) του κόμβου ελέγχου σε συνάρτηση με το χρόνο (t) καθώς και ένα γράφημα (εικόνα 5.1.1.5) που αποτυπώνει την διέγερση από την ημιτονοειδή φόρτιση, την δύναμη ελέγχου και τον ρυθμό της δύναμης ελέγχου σε συνάρτηση με το χρόνο.



Εικόνα 5.1.1.2
Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



Εικόνα 5.1.1.3
Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

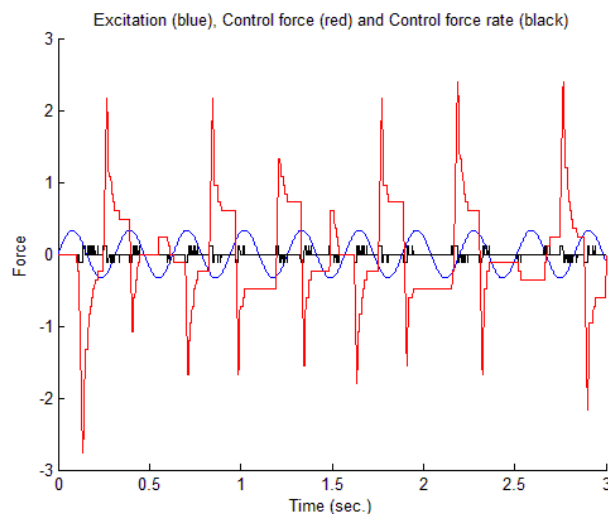


	Μέγιστη Μετατόπιση	Μέγιστη Ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0,0182	0,1668
Με έλεγχο	0,0052	0,115
Μεταβολή %	71%	31%

Πίνακας 5.1.1.1

Εικόνα 5.1.1.4 Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

Εύκολα μπορεί να διακρίνει κανείς στο διάγραμμα των μετατοπίσεων (εικόνα 5.1.1.2) ότι ο έλεγχος που εφαρμόστηκε στον κόμβο 91 είναι αρκετά αποτελεσματικός καθώς μειώνει σημαντικά τις μετατοπίσεις του κόμβου διατηρώντας μια ομοιομορφία σε όλη τη διάρκεια των 3 sec που διαρκεί η δοκιμή. Η ταχύτητα του κόμβου μετά τον έλεγχο διατηρεί επίσης μια ομοιομορφία με κάποιες μικρές αμελητέες διαταραχές στις ακραίες θετικές και αρνητικές τιμές. Όσον αφορά την επιτάχυνση του κόμβου (εικόνα 5.1.1.4) παρατηρούμε ότι ο έλεγχος προκαλεί κάποιες έντονες διαταραχές οι οποίες αν και όπως θα δούμε παρακάτω είναι μικρότερες σε σχέση με τις υπόλοιπες διερευνήσεις, δεν παύουν να αποτελούν πρόβλημα διότι καταπονούν σημαντικά τόσο το υπό εξέταση μοντέλο όσο και τις μετρητικές διατάξεις. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι στις περισσότερες εργασίες συνηθίζεται είτε να μην παρουσιάζονται τέτοια στοιχεία είτε να υποβαθμίζονται ως ήσσονος σημασίας.



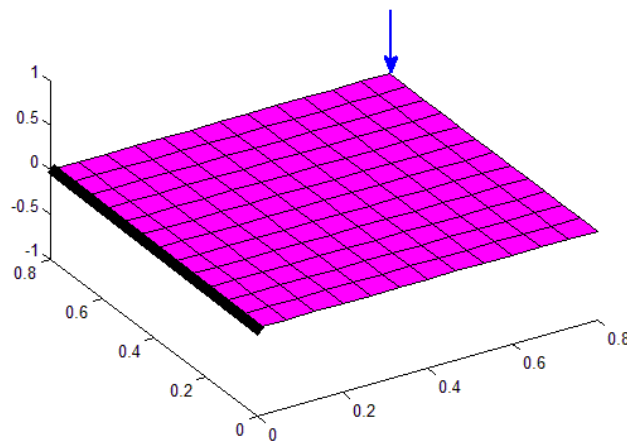
Εικόνα 5.1.1.5

Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

Η μεταβολή της δύναμης ελέγχου με την πρόοδο του χρόνου αποτυπώνεται στο γράφημα της εικόνας 5.1.1.5. Παρατηρούμε ότι η δύναμη ελέγχου τείνει να είναι αντίθετη και πολύ μεγαλύτερη από τη διέγερση, κάτι απόλυτα φυσιολογικό εφόσον επιδιώκουμε την εξισορρόπηση της ταλάντωσης. Ο ρυθμός της δύναμης ελέγχου λαμβάνει μηδενικές ή πολύ χαμηλές τιμές σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

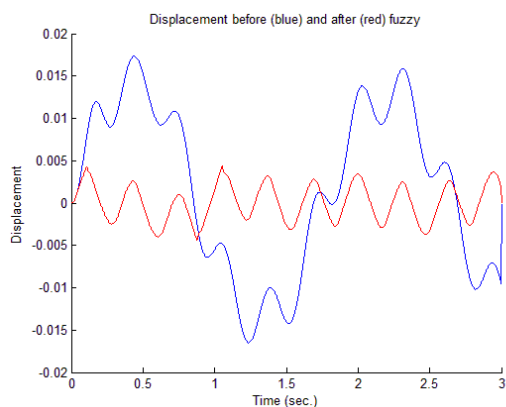
5.1.2. Έλεγχος στο άκρο

Σε αυτή τη διερεύνηση ο έλεγχος επιλέχθηκε να εφαρμοστεί σε ένα άκρο της ελεύθερης πλευράς της πλάκας και συγκεκριμένα στον κόμβο 169 (εικόνα 5.1.2.1)

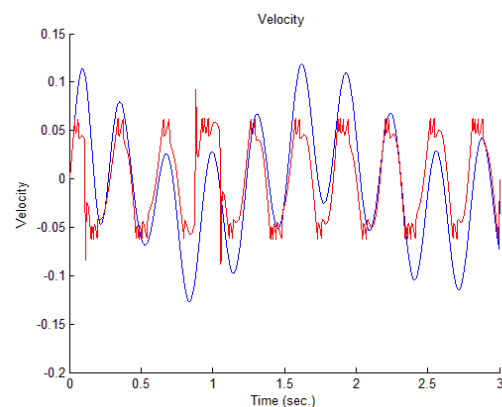


Εικόνα 5.1.2.1

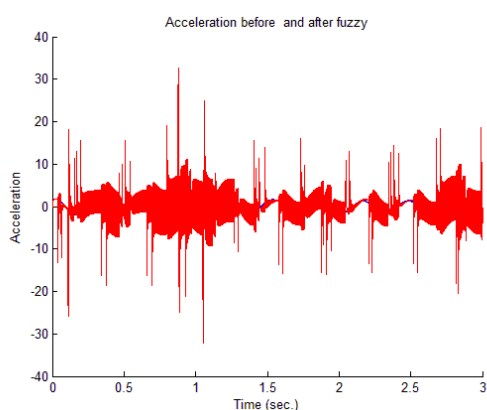
Σύμφωνα με το γράφημα της εικόνας 5.1.2.2 η μετατόπιση του κόμβου 169 μετά τον έλεγχο, αν και ελαφρώς χειρότερη από την προηγούμενη διερεύνηση κυμαίνεται σε ανεκτά επίπεδα και εξομαλύνει ικανοποιητικά την ταλάντωση. Η ταχύτητα (εικόνα 5.1.2.3) αν και παρουσιάζει κάποιες διαταραχές γύρω στο 1sec σε σχέση με την προηγούμενη διερεύνηση είναι ικανοποιητική επίσης.



Εικόνα 5.1.2.2
Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



Εικόνα 5.1.2.3
Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

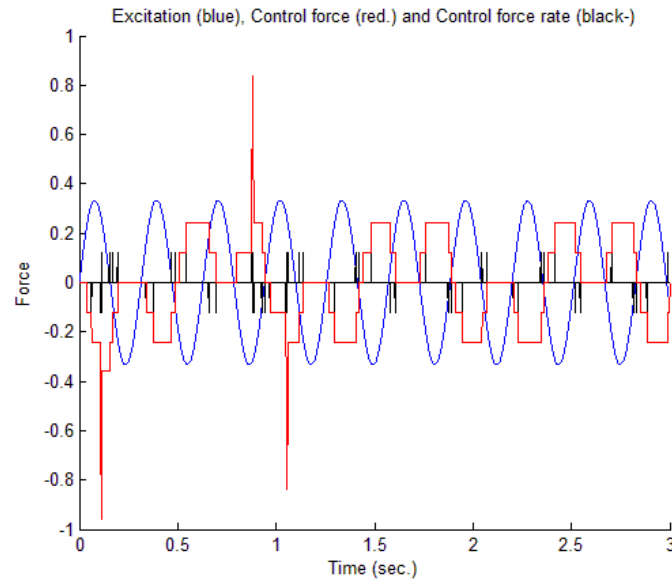


Εικόνα 5.1.2.4 Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

	Μέγιστη Μετατόπιση	Μέγιστη Ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0,0174	0,1269
Με έλεγχο	0,0043	0,0924
Μεταβολή %	75%	27%

Πίνακας 5.1.2.1

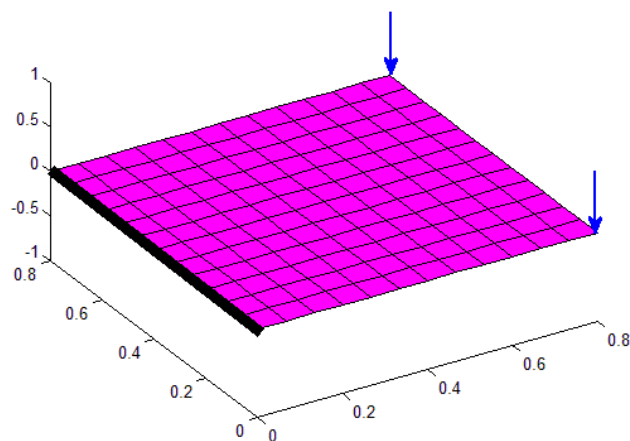
Σε σχέση με τον έλεγχο στο μέσο της ελεύθερης πλευράς η επιτάχυνση του κόμβου 169 παρουσιάζει εντονότερες διαταραχές και πολύ μεγαλύτερες τιμές(εικόνα 5.1.2.4). Αντίθετα η δύναμη ελέγχου (εικόνα 5.1.2.5) εξακολουθεί μεν να είναι αντίθετη αλλά γίνεται μικρότερη από τη διέγερση στη συντριπτική πλειοψηφία του χρόνου της δοκιμής. Ο ρυθμός της δύναμης ελέγχου εξακολουθεί να είναι μηδενικός ή να λαμβάνει χαμηλές τιμές.



Εικόνα 5.1.2.5
Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

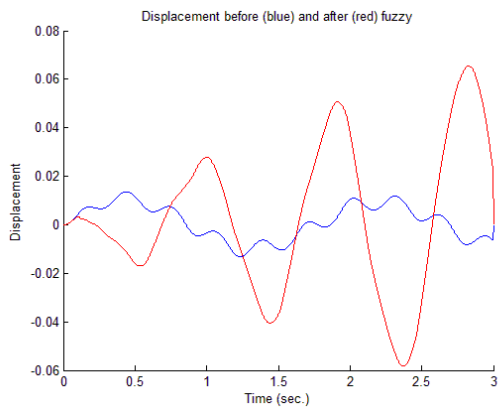
5.1.3. Έλεγχος σε δύο σημεία

Μέχρι τώρα διερευνήσαμε την επιβολή ελέγχου σε ένα σημείο του ελεύθερου άκρου. Σειρά έχει η επιβολή ελέγχου σε δύο σημεία. Οι κόμβοι που επιλέχθηκαν για να εφαρμοστεί ο έλεγχος είναι οι 13 και 169. Οι δύο αυτοί κόμβοι βρίσκονται στα δύο άκρα της ελεύθερης πλευράς του μοντέλου μας (εικόνα 5.1.3.1).

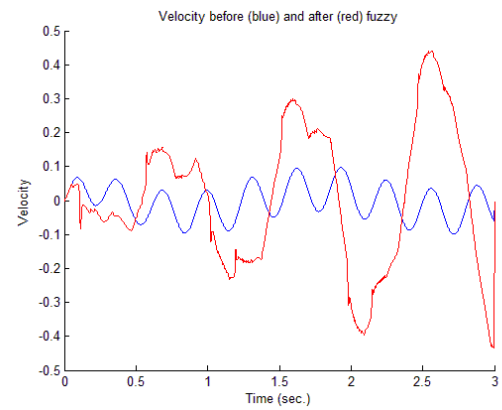


Εικόνα 5.1.3.1

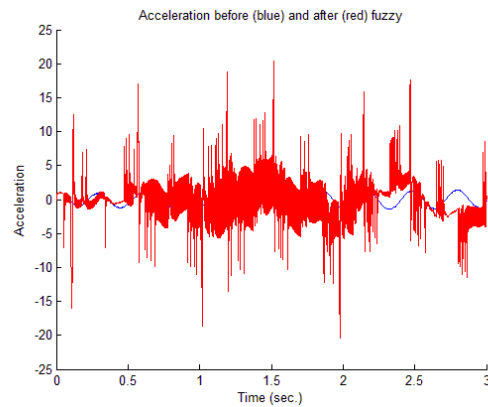
Όσον αφορά τον κόμβο 13, τις μετρήσεις του οποίου βλέπουμε στις εικόνες 5.1.3.2 έως 5.1.3.5, παρατηρούμε ότι μετά την επιβολή ελέγχου δεν προκαλείται καμία εξομάλυνση της ταλάντωσης αφού η μετατόπιση λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές που συνεχώς αυξάνονται με την πρόοδο του χρόνου. Η ταχύτητα επίσης δεν παρουσιάζει καμία ομοιομορφία και η επιτάχυνση εμφανίζει μεγάλες τιμές και έντονες διαταραχές.



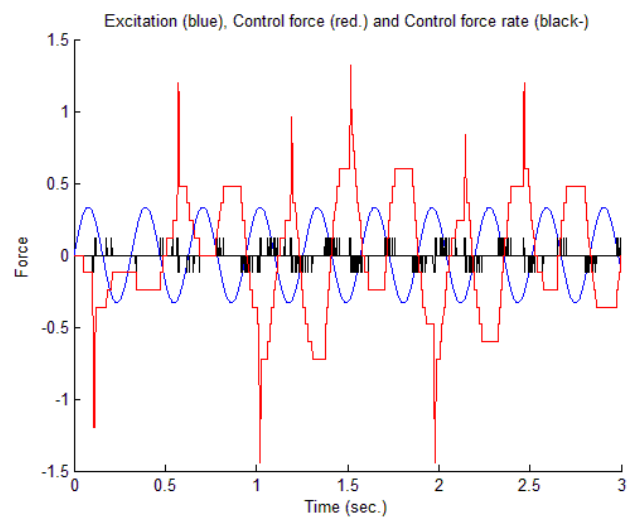
Εικόνα 5.1.3.2
Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



Εικόνα 5.1.3.3
Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

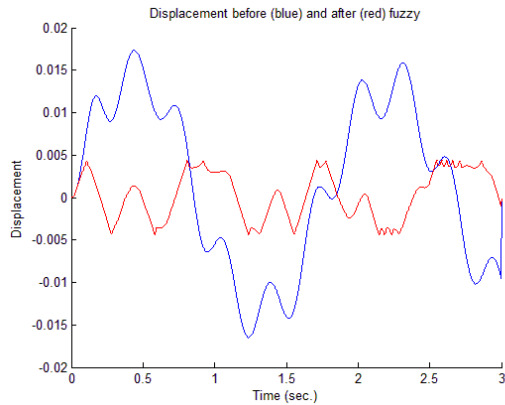


Εικόνα 5.1.3.4
Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

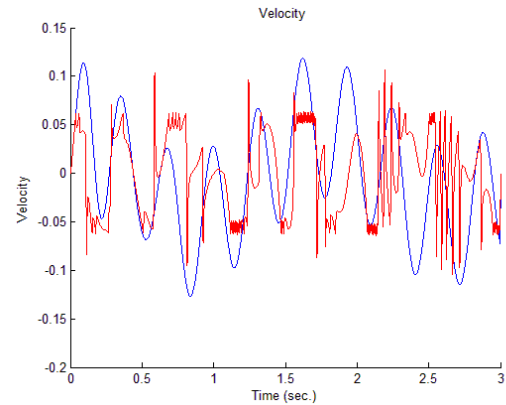


Εικόνα 5.1.3.5
Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

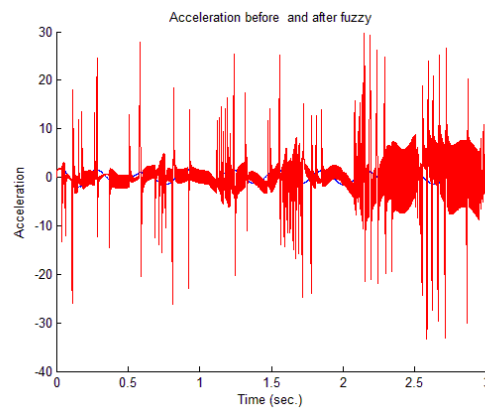
Οι μετρήσεις του κόμβου 169 εικόνα 5.1.3.6 έως 5.1.3.9 αν και καλύτερες από αυτές του κόμβου 13 δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ικανοποιητικές. Η μετατόπιση μετά τον έλεγχο ίσως μπορεί να χαρακτηριστεί ανεκτή αν και παρουσιάζει διαταραχές και ανομοιομορφία. Αντίθετα η ταχύτητα και η επιτάχυνση παρουσιάζουν έντονες μη ανεκτές διαταραχές. Η δύναμη ελέγχου παρουσιάζει αυξητικές τάσεις με την πρόοδο του χρόνου.



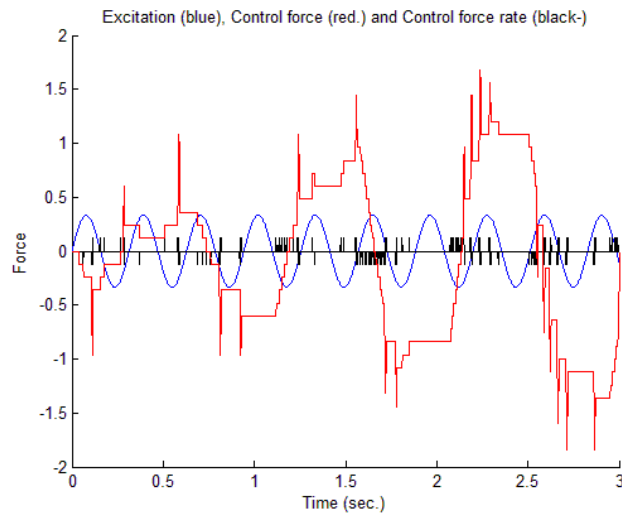
Εικόνα 5.1.3.6
Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



Εικόνα 5.1.3.7
Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



Εικόνα 5.1.3.8
Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



Εικόνα 5.1.3.9

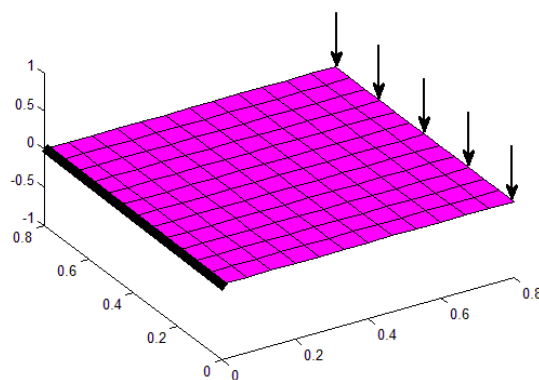
Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

5.2. Φόρτιση πέντε σημείων

Στις διερευνήσεις που ακολουθούν προστέθηκαν άλλοι δύο κόμβοι που διεγείρονται από την ημιτονοειδή φόρτιση. Οι δύο επιπλέον κόμβοι είναι οι 52 και 130. Συνεπώς το ημιτονοειδές φορτίο κατανέμεται πλέον σε πέντε κόμβους της ελεύθερης πλευράς της πλάκας (εικόνα 5.2.1).

Η νέα φόρτιση που τελικώς ασκείται σε κάθε κόμβο είναι ίση με

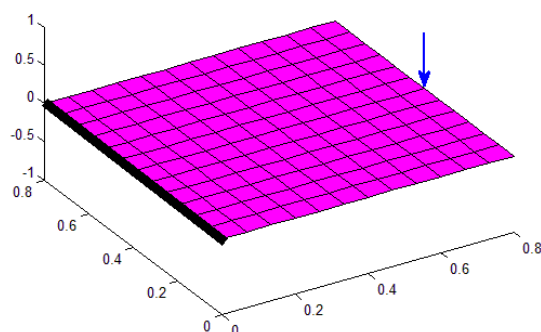
$$P = \frac{1}{5} [1 * \sin(20 * t)]$$



Εικόνα 5.2.1

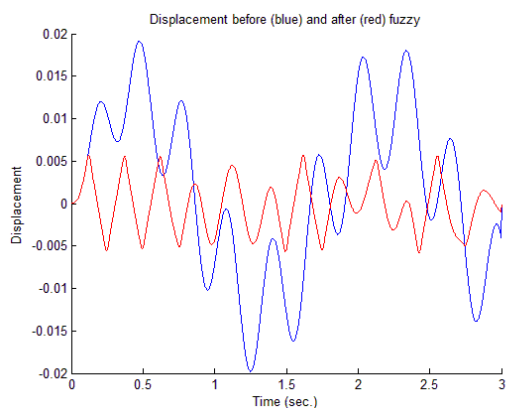
5.2.1. Έλεγχος στο μέσο

Στη διερεύνηση αυτή όπως και στην υποενότητα 5.1.1 ο ασαφής έλεγχος εφαρμόζεται στο μέσο της ελεύθερης πλευράς δηλαδή στον κόμβο 91 (εικόνα 5.2.1.1).

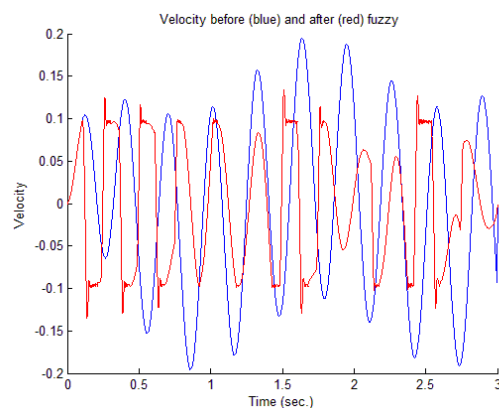


Εικόνα 5.2.1.1

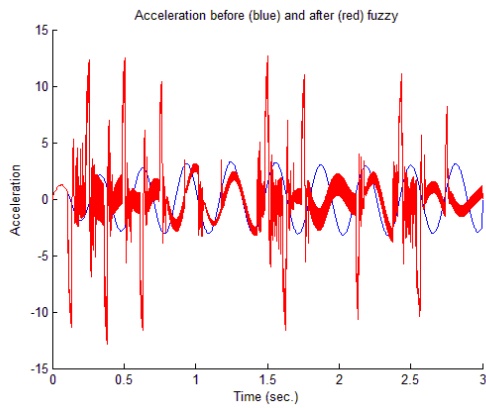
Σύμφωνα με τις μετρήσεις του κόμβου 91 που παρουσιάζονται στα γραφήματα των εικόνων 5.2.1.2 έως 5.2.1.5, ο έλεγχος όπως και στην περίπτωση της υποενότητας 5.1.1 είναι πολύ αποτελεσματικός. Τόσο η μετατόπιση και η ταχύτητα όσο και η επιτάχυνση παρουσιάζουν σχετική ομοιομορφία στην πάροδο του χρόνου ενώ δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα μεγάλες διαταραχές με εξαίρεση την επιτάχυνση. Η δύναμη ελέγχου αν και όχι τόσο ομοιόμορφη λαμβάνει κατά κύριο λόγο μεγάλες τιμές και αντίθετες ως προς την ημιτονοειδή διέγερση. Τέλος ο ρυθμός της δύναμης ελέγχου κυμαίνεται σε πολύ χαμηλά ή ακόμη και σε μηδενικά επίπεδα.



Εικόνα 5.2.1.2
Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο
(κόκκινο)



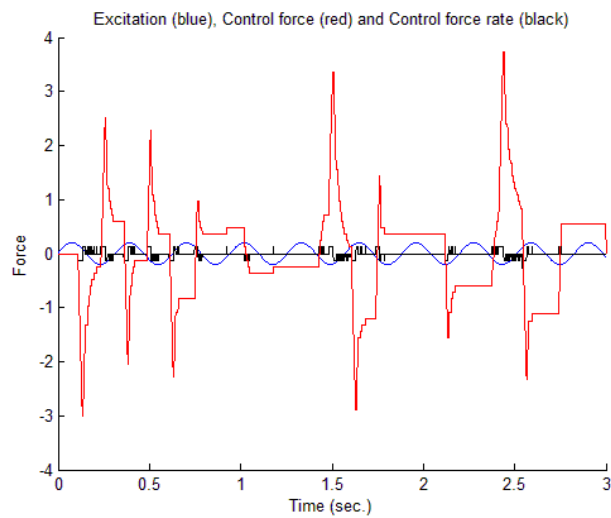
Εικόνα 5.2.1.3
Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



	Μέγιστη Μετατόπιση	Μέγιστη Ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0,0198	0,1957
Με έλεγχο	0,0058	0,1347
Μεταβολή %	71%	31%

Πίνακας 5.2.1.1

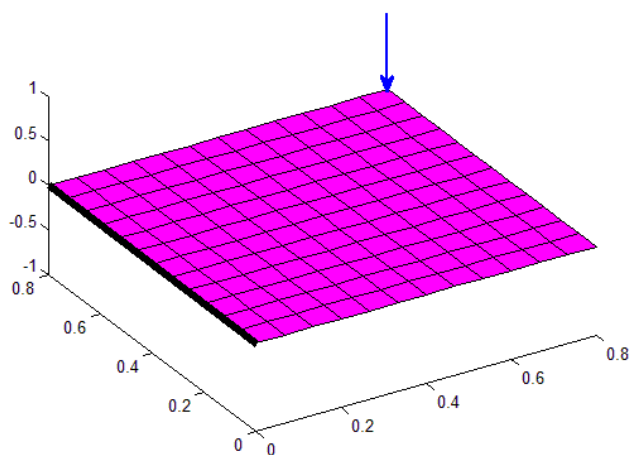
Εικόνα 5.2.1.4
Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο
(κόκκινο)



Εικόνα 5.2.1.5
Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

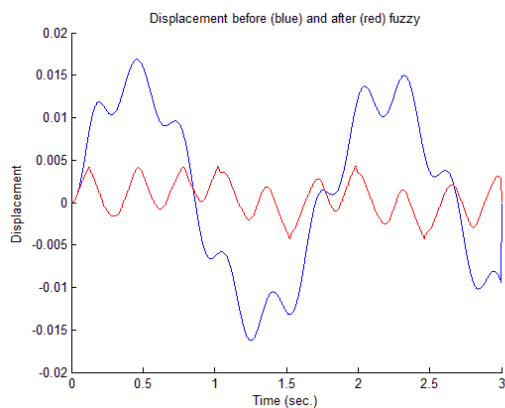
5.2.2. Έλεγχος στο άκρο

Ο ασαφής έλεγχος εφαρμόζεται στον κόμβο 169 δηλαδή στο άνω άκρο της ελεύθερης πλευράς της πλάκας (εικόνα 5.2.2.1).



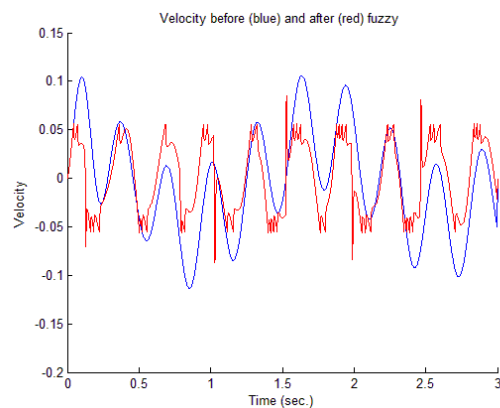
Εικόνα 5.2.2.1 Κόμβος ελέγχου 169

Οι μετρήσεις για τον κόμβο 169 παρουσιάζονται στα γραφήματα των εικόνων 5.2.2.2 έως 5.2.2.5. Η εξομάλυνση της ταλάντωσης όπως προκύπτει από το γράφημα της μετατόπισης μπορεί να χαρακτηριστεί ικανοποιητική, όπως και η ταχύτητα του κόμβου μετά την επιβολή ελέγχου παρόλο που στην τελευταία παρατηρούνται κάποιες μικρές διαταραχές στις ακραίες τιμές. Αντίθετα η επιτάχυνση για άλλη μια φορά παρουσιάζει ιδιαίτερα έντονες διαταραχές.



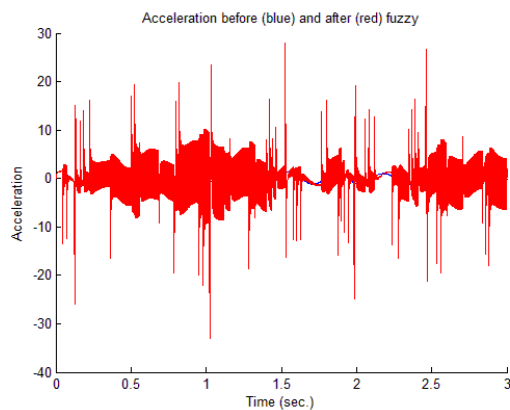
Εικόνα 5.2.2.2

Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



Εικόνα 5.2.2.3

Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

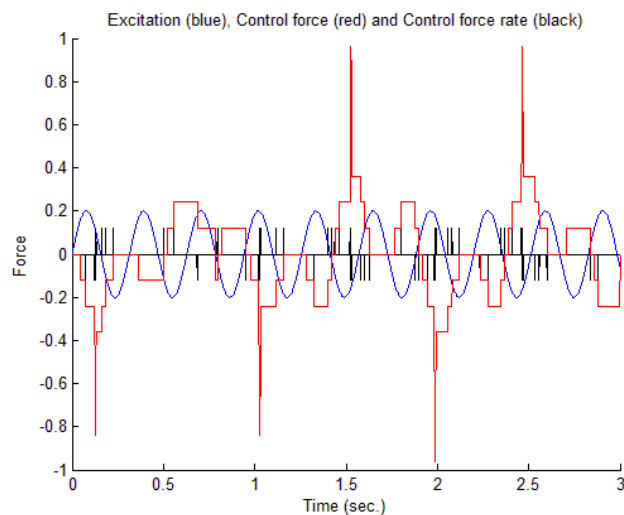


	Μέγιστη Μετατόπιση	Μέγιστη Ταχύτητα
Χωρίς έλεγχο	0,0169	0,1136
Με έλεγχο	0,0043	0,0865
Μεταβολή %	75%	24%

Πίνακας 5.2.2.1

Εικόνα 5.2.2.4
Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο
(κόκκινο)

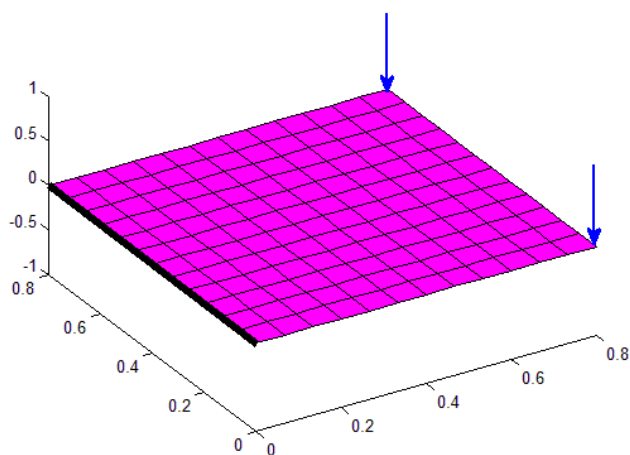
Η δύναμη ελέγχου (εικόνα 5.2.2.5) όπως και στην υποενότητα 5.1.2 καταγράφει μείωση των τιμών της σε σχέση με τον έλεγχο στο μέσο της ελεύθερης πλευράς, στα επίπεδα της ημιτονοειδούς διέγερσης. Επίσης παρουσιάζει τη μορφή ενός αντίθετου ημιτόνου με τετραγωνικά τμήματα και αρκετές διαταραχές.



Εικόνα 5.2.2.5
Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

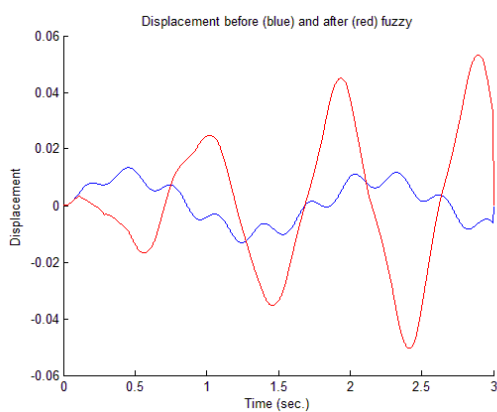
5.2.3. Έλεγχος σε δύο σημεία

Όπως και στην υποενότητα 5.1.3 ο έλεγχος εφαρμόζεται στα δύο άκρα της ελεύθερης πλευράς της πλάκας, δηλαδή στους κόμβους 13 και 169 (εικόνα 5.2.3.1)

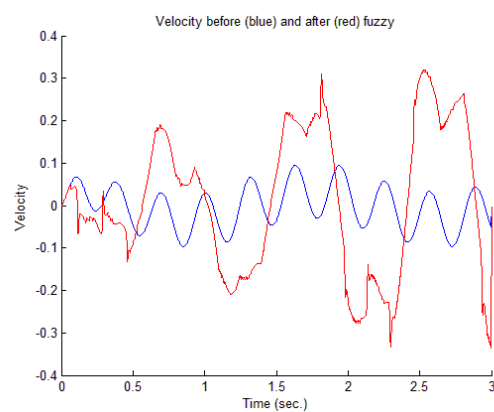


Εικόνα 5.2.3.1
Έλεγχος στους κόμβους 13 και 169

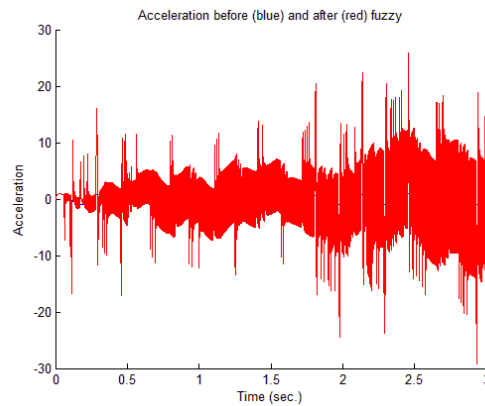
Οι μετρήσεις του κόμβου 13 παρουσιάζονται στα γραφήματα των 5.2.3.2 έως 5.2.3.5. Από το γράφημα της μετατόπισης είναι προφανές ότι δεν υπάρχει καμία εξομάλυνση της ταλάντωσης του κόμβου. Η ταχύτητα επίσης φαίνεται να αυξάνει συνεχώς το πλάτος της με την πάροδο του χρόνου και η επιτάχυνση εμφανίζει πολύ έντονες διαταραχές.



Εικόνα 5.2.3.2
Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

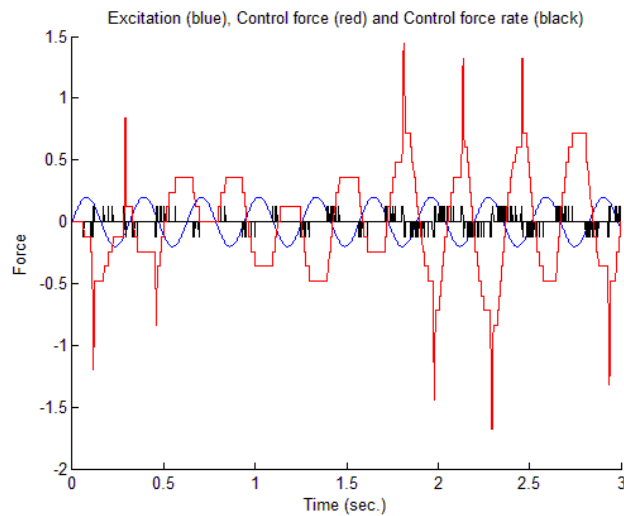


Εικόνα 5.2.3.3
Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



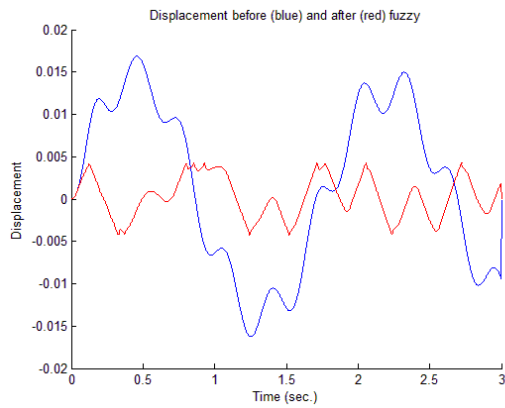
Εικόνα 5.2.3.4
Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

Η δύναμη ελέγχου παρουσιάζει ανομοιομορφίες με την πάροδο του χρόνου ενώ ο ρυθμός της είναι μηδενικός ή λαμβάνει χαμηλές τιμές.

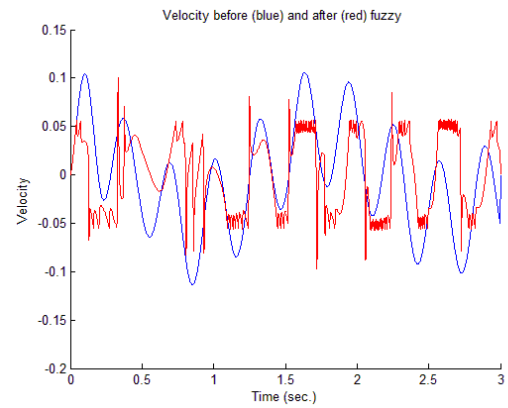


Εικόνα 5.2.3.5
Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

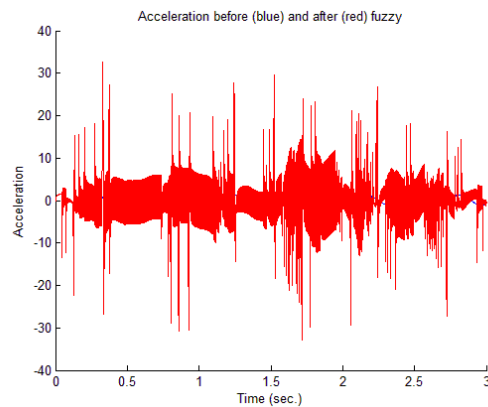
Στις εικόνες 5.2.3.6 έως 5.2.3.9 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που αφορούν τον δεύτερο κόμβο στον οποίο ασκείται έλεγχος δηλαδή τον κόμβο 169. Σύμφωνα με το γράφημα της μετατόπισης παρουσιάζεται κάποια εξομάλυνση της ταλάντωσης του κόμβου δεν συμβαίνει όμως το ίδιο και με την ταχύτητα η οποία παρουσιάζει έντονες διαταραχές. Η επιτάχυνση του κόμβο στην πάροδο του χρόνου παρουσιάζει επίσης έντονες διαταραχές.



Εικόνα 5.2.3.6
Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

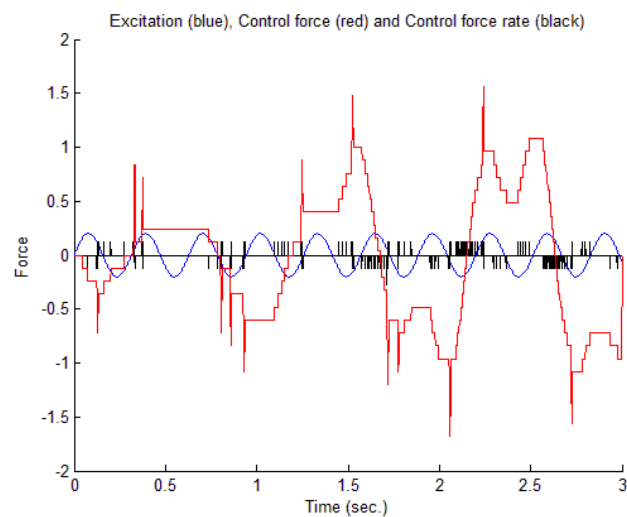


Εικόνα 5.2.3.7
Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



Εικόνα 5.2.3.8
Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

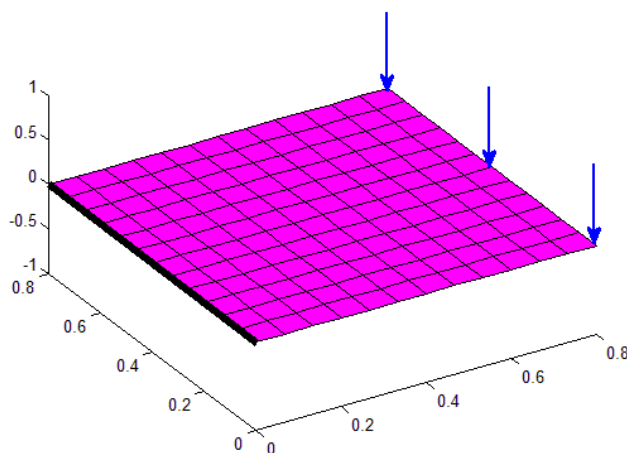
Στο γράφημα των δυνάμεων (εικόνα 5.2.3.9) παρατηρούμε ότι η δύναμη ελέγχου αυξάνει το πλάτος της με την πάροδο του χρόνου.



Εικόνα 5.2.3.9
Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

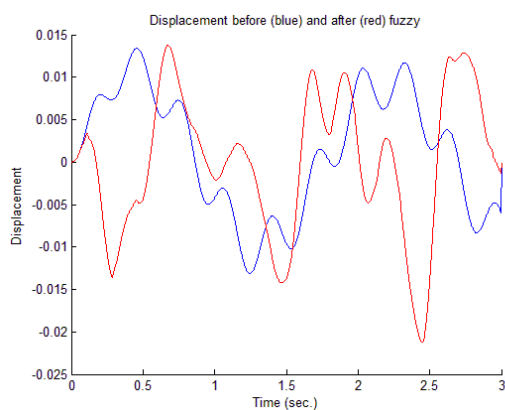
5.2.4. Έλεγχος σε τρία σημεία

Σε αυτή τη διερεύνηση η διαδικασία του ελέγχου εφαρμόζεται σε τρία σημεία της ελεύθερης πλευράς της πλάκας. Συγκεκριμένα στους κόμβους 13 και 69, δηλαδή στα άκρα, αλλά και στον 91 που βρίσκεται στο μέσο (εικόνα 5.2.4.1).

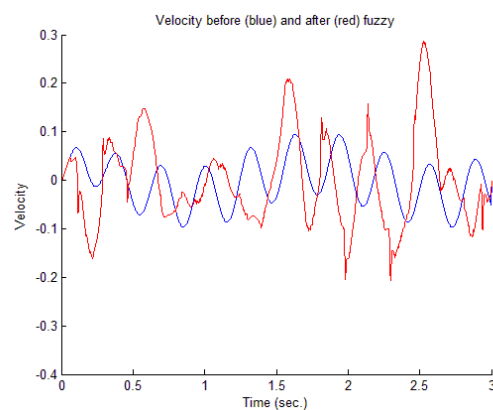


Εικόνα 5.2.4.1
Έλεγχος στους κόμβους 13, 91 και 169

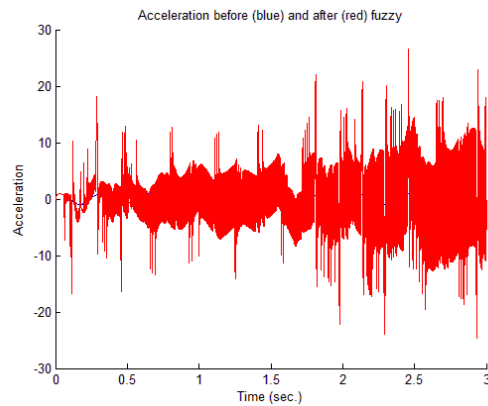
Στα γραφήματα των εικόνων που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις των κόμβων ελέγχου. Όσον αφορά τον κόμβο 13 (εικόνες 5.2.4.2 έως 5.2.4.5) παρατηρούμε ότι η μετατόπιση μετά τον έλεγχο δεν παρουσιάζει καμία εξομάλυνση αφού το πλάτος της κυμαίνεται σε παρεμφερείς ή και μεγαλύτερες τιμές με αυτής πριν την εφαρμογή του ελέγχου. Το πλάτος της ταχύτητας επίσης αυξάνεται σε σχέση με τα επίπεδά του πριν τον έλεγχο ενώ η επιτάχυνση παρουσιάζει πολλές και έντονες διαταραχές.



Εικόνα 5.2.4.2
Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο
(κόκκινο)

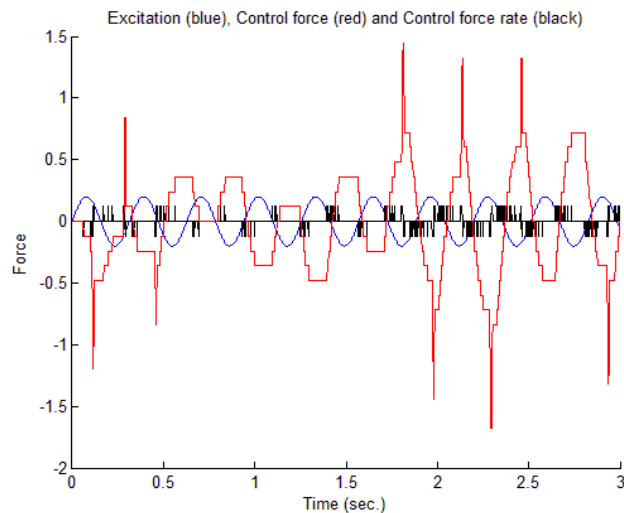


Εικόνα 5.2.4.3
Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



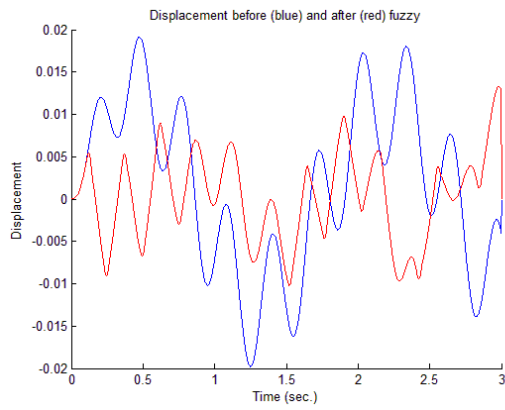
Εικόνα 5.2.4.4
Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

Η δύναμη ελέγχου όπως φαίνεται στο γράφημα της εικόνας 5.2.4.5 παρουσιάζει επίσης ανομοιομορφία και πολύ υψηλές τιμές σε σχέση με την εξωτερική φόρτιση.

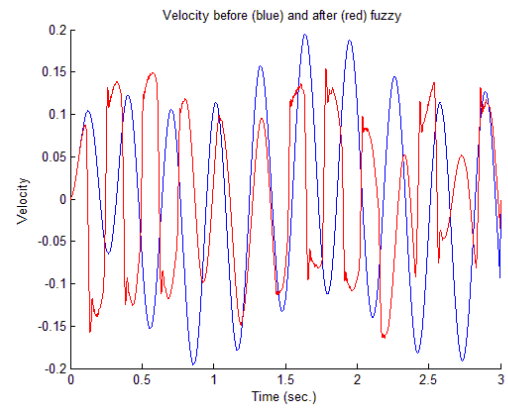


Εικόνα 5.2.4.5
Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

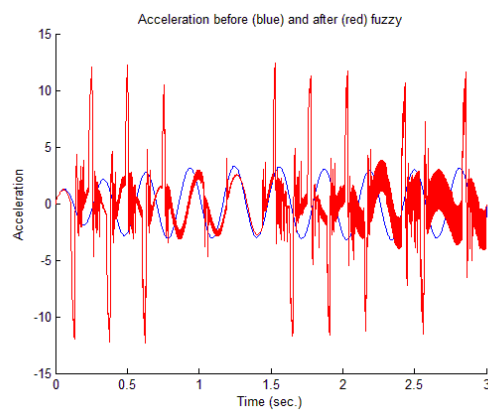
Στις εικόνες 5.2.4.6 έως 5.2.4.9 παρατηρούμε τα γραφήματα που αφορούν τα δεδομένα του κόμβου 91. Η μετατόπιση παρουσιάζει μια σαφή βελτίωση σε σχέση με αυτή του κόμβου 13. Σε γενικές γραμμές μπορεί να χαρακτηριστεί ανεκτή όπως και η ταχύτητα. Η επιτάχυνση αν και έχει βελτιωθεί αισθητά εξακολουθεί να κινείται εκτός των αποδεκτών ορίων. Τέλος στο γράφημα της εικόνας 5.2.4.9 παρατηρούμε ότι η δύναμη ελέγχου λαμβάνει αρκετά μεγαλύτερες τιμές από ότι η ημιτονοειδής διέγερση ενώ παρουσιάζεται ομοιόμορφη στο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα της δοκιμής.



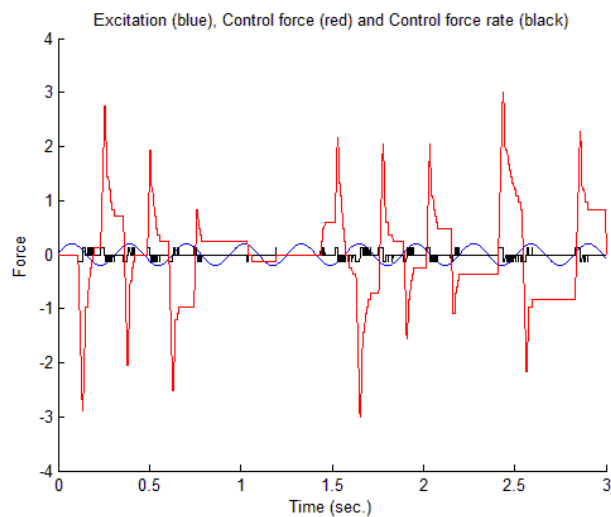
Εικόνα 5.2.4.6
Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



Εικόνα 5.2.4.7
Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

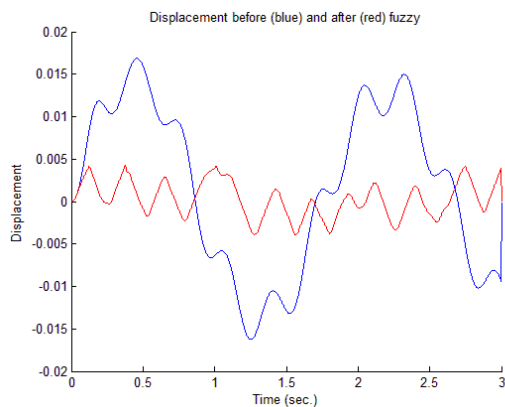


Εικόνα 5.2.4.8
Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

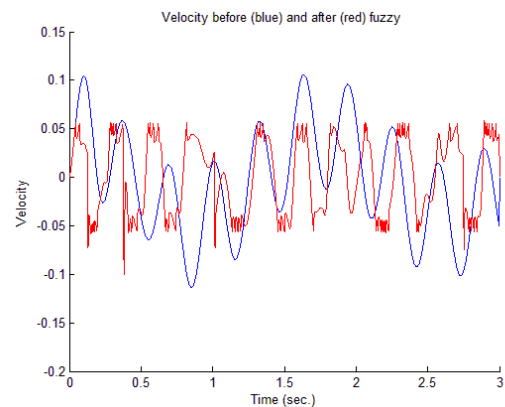


Εικόνα 5.2.4.9
Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

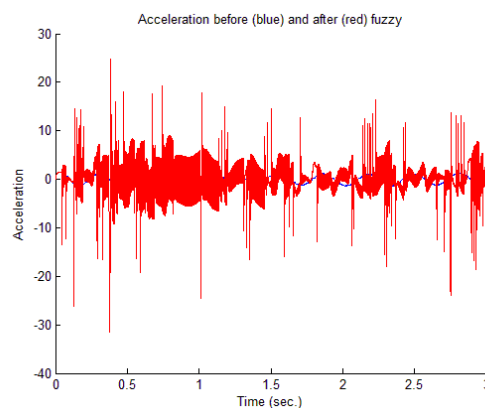
Τελευταίος κόμβος ελέγχου για αυτή τη διερεύνηση είναι ο 169. Τα γραφήματα στα οποία καταγράφονται οι μετρήσεις που αφορούν τον εν λόγω κόμβο παρουσιάζονται στις εικόνες 5.2.4.10 έως 5.2.4.13 που ακολουθούν. Είναι προφανές ότι ο έλεγχος σε αυτό τον κόμβο είναι πολύ πιο αποτελεσματικός από τους προηγούμενους. Η μετατόπιση άρα και η ταλάντωση έχουν εξομαλυνθεί σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό όπως και η ταχύτητα παρόλο που παρουσιάζει κάποιες μικρές διαταραχές στις ακραίες τιμές της. Η επιτάχυνση εμφανίζει έντονες διαταραχές αλλά είναι και αυτή σαφώς βελτιωμένη σε σχέση με τους υπόλοιπους κόμβους.



Εικόνα 5.2.4.10
Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

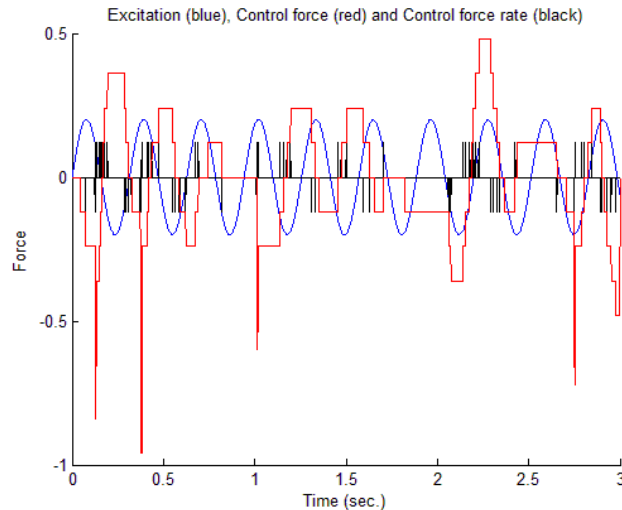


Εικόνα 5.2.4.11
Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)



Εικόνα 5.2.4.12
Επιτάχυνση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)

Η δύναμη ελέγχου για τον κόμβο 169 (εικόνα 5.2.4.13) λαμβάνει πολύ χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τους προηγούμενους κόμβους ενώ δείχνει μία ανομοιομορφία στην πρόοδο του χρόνου της δοκιμής.



Εικόνα 5.2.4.13
Διέγερση (μπλε) Δύναμη ελέγχου (κόκκινο) Ρυθμός δύναμης ελέγχου (μαύρο)

5.3. Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν στις υποενότητες 5.1 και 5.2 εξάγουμε κάποια συμπεράσματα που έχουν να κάνουν με το πώς μεταβάλλονται τα αποτελέσματα του ελέγχου σε σχέση με το σημείο που αυτός εφαρμόζεται, αλλά και με τον τρόπο που έχει κατανεμηθεί η ημιτονοειδής φόρτιση στην πλάκα.

Πιο συγκριμένα στις διερευνήσεις όπου ο έλεγχος εφαρμόστηκε σε δύο σημεία και στις δυο περιπτώσεις της κατανομής της ημιτονοειδούς φόρτισης σε τρία και πέντε σημεία, τα αποτελέσματα δε μπορούν να χαρακτηριστούν ικανοποιητικά. Πάντως και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα από τον έλεγχο του κόμβου 169 είναι σαφώς καλύτερα από αυτά του 13.

Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση ελέγχου τριών κόμβων. Και πάλι ο κόμβος 169 εμφανίζεται να ελέγχεται αποτελεσματικότερα δε συμβαίνει όμως το ίδιο όσο προχωράμε στους κόμβους 91 και 13.

Όσον αφορά τις διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν με ένα κόμβο ελέγχου παρατηρούμε ότι αποτελεσματικότερος έλεγχος πραγματοποιήθηκε όταν εφαρμόστηκε στο μέσο της ελεύθερης πλευράς και όχι στο άκρο. Η μετατόπιση μπορεί να είχε μεγαλύτερο πλάτος αλλά ήταν συμμετρική ως προς το σημείο ισορροπίας κάτι που δε συνέβη στη δεύτερη περίπτωση. Επίσης η ταχύτητα στην περίπτωση ελέγχου στο άκρο παρουσιάζει μικρότερο πλάτος σε σχέση με τον έλεγχο στο μέσο, όμως το ίδιο συμβαίνει και πριν την επιβολή ελέγχου. Η επιτάχυνση τέλος στην περίπτωση ελέγχου στο άκρο παρουσιάζει διαταραχές και υψηλές τιμές σε σχέση με την περίπτωση ελέγχου στο μέσο.

Επιχειρώντας μια σύγκριση των δύο διερευνήσεων που παρήγαγαν τα καλύτερα αποτελέσματα δηλαδή επιβολή ελέγχου στο μέσο της ελεύθερης πλευράς και κατανομή της ημιτονοειδούς φορτίσεως σε τρία και πέντε σημεία, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν στη διερεύνηση κατά την οποία η φόρτιση κατανεμήθηκε σε τρία σημεία και ο έλεγχος επιβλήθηκε στο μέσο της ελεύθερης πλευράς.

Στη διερεύνηση αυτή η μετατόπιση μετά τον έλεγχο είναι αρμονική με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ -0,005 και 0,005. Η ταχύτητα παρουσιάζει κάποιες αμελητέες διαταραχές στις ακραίες τιμές και η επιτάχυνση είναι η καλύτερη που προέκυψε με μέγιστη τιμή 10.

6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΡΟΒΟΛΟ ΔΟΚΟ

Ο ασαφής έλεγχος που εφαρμόστηκε στη σύνθετη πλάκα της παρούσας εργασίας έχει εφαρμοστεί κατά το παρελθόν σε ένα μοντέλο προβόλου δοκού, στα πλαίσια της μεταπτυχιακής διατριβής του κ. Γεωργίου Ταϊρίδη “Προσομοίωση σύνθετων ευφύων μηχανικών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Σύνδεση με ευφυείς μεθόδους ελέγχου”.

Το σύστημα που μελετάται στην εργασία του κ. Ταϊρίδη αποτελείται από μία πρόβολο δοκό τετραγωνικής διατομής 0,2 x 0,2 m και μήκους 0,8m. Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού κατασκευής είναι ίσο με $73 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ και η πυκνότητα της μάζας 2700 kg/m^3 .

Για τη διευκόλυνση της μελέτης η δοκός διακριτοποιήθηκε, όπως και η πλάκα, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα διαιρέθηκε σε τέσσερα όμοια μεταξύ τους πεπερασμένα στοιχεία που οδήγησαν σε ένα σύστημα 8 βαθμών ελευθερίας.

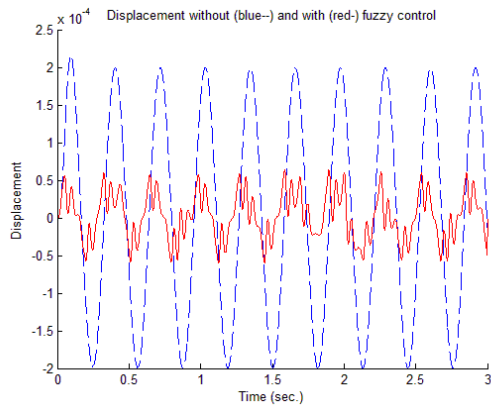
Ο έλεγχος και η ημιτονοειδής διέγερση εφαρμόστηκαν στον κόμβο που βρίσκεται στο ελεύθερο άκρο της ράβδου. Όσον αφορά τη διέγερση δίδεται από τον τύπο

$$P = 1 * \sin(20 * t)$$

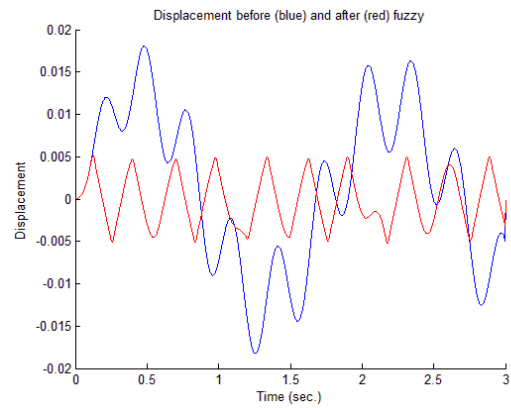
Ο έλεγχος πραγματοποιείται από τον ίδιο ασαφή ελεγκτή τύπου Mamdani που χρησιμοποιήθηκε και στον έλεγχο της πλάκας.

Αυτό που γίνεται στη συνέχεια είναι η σύγκριση των μετρήσεων που προέκυψαν από τη διερεύνηση της υποενότητας 5.1.1 δηλαδή την εφαρμογή ελέγχου στο μέσο της ελεύθερης πλευράς όταν η ημιτονοειδής φόρτιση έχει κατανεμηθεί σε τρία σημεία αυτής, με αυτά της προβόλου δοκού.

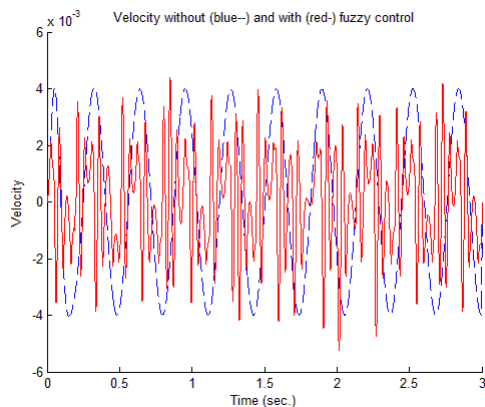
Τα αποτελέσματα του ελέγχου είναι άμεσα συγκρίσιμα εφόσον το μήκος η διέγερση και ο ελεγκτής που επενεργεί στο ελεύθερο άκρο είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Στις εικόνες που ακολουθούν βλέπουμε σε παράθεση τα γραφήματα που απεικονίζουν την μετατόπιση και την ταχύτητα στον κόμβο ελέγχου σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής.



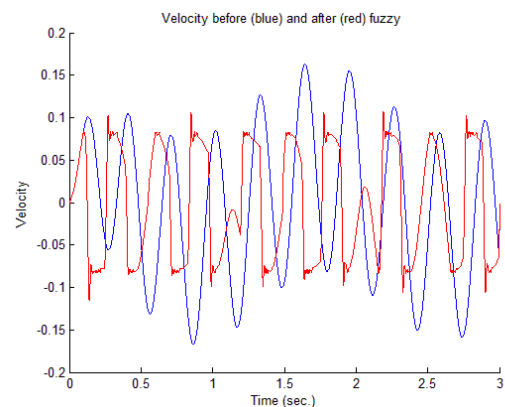
Εικόνα 6.1
Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο
(κόκκινο) για δοκό



Εικόνα 6.3
Μετατόπιση πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο
(κόκκινο) για πλάκα



Εικόνα 6.2
Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)
για δοκό



Εικόνα 6.4
Ταχύτητα πριν (μπλε) και μετά τον έλεγχο (κόκκινο)
για πλάκα

Αρχικά παρατηρούμε ότι η διέγερση που εφαρμόζεται αν και είναι η ίδια επηρεάζει διαφορετικά την κίνηση του κόμβου στην περίπτωση που είναι συγκεντρωμένη σε ένα σημείο (δοκός) και στην περίπτωση που είναι κατανεμημένη σε περισσότερα. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι το πλάτος της ταλάντωσης της δοκού πριν τον έλεγχο έχει μέγιστη τιμή 2.165×10^{-4} ενώ στην πλάκα η αντίστοιχη τιμή είναι 0.0182. Μετά την εφαρμογή ελέγχου το πλάτος της μετατόπισης για τη δοκό μειώθηκε σε 0.6×10^{-4} παρουσίασε δηλαδή μια μείωση της τάξεως του 72%. Για την πλάκα το πλάτος της μετατόπισης μειώθηκε σε 0.0052 δηλαδή 71%.

Όσον αφορά τις ταχύτητες πριν και μετά τον έλεγχο παρατηρούμε ότι αν και απέχουν πολύ σε τάξη μεγέθους κυμαίνονται σε τιμές παρόμοιες με αυτές που είχαν πριν την εφαρμογή του. Γίνεται επίσης αντιληπτό από τα γραφήματα ότι η μεταβολή της ταχύτητας του κόμβου ελέγχου της πλάκας είναι σαφώς πιο ομαλή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ταϊρίδης Γεώργιος, Προσομοίωση σύνθετων ευφυών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά. Σύνδεση με ευφυείς μεθόδους ελέγχου. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2009
- [2] Ροβέρτος- Ε. Κινγκ, Υπολογιστική νοημοσύνη στον έλεγχο συστημάτων, Εκδόσεις Τραυλός 1998
- [3] Παπαχρήστου Ιωάννης, Ανάπτυξη νευροασαφούς συστήματος ελέγχου (ANFIS) για την μείωση των ταλαντώσεων σε ευφυείς μηχανικές κατασκευές σε περιβάλλον SIMULINC, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2010
- [4] Δρ. Βολογιαννίδης Σταύρος, Ευφυής Έλεγχος, Θεωρία και Εφαρμογές διδακτικές Σημειώσεις Τμήματος Πληροφορικής και Επικοινωνιών, ΤΕΙ Σερρών
- [5] Σαλονικίδης Σαλόνικος, Μελέτη για την απόδοση ενός ασαφούς συστήματος ελέγχου για την μείωση των ταλαντώσεων σε μηχανικές κατασκευές, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2010
- [6] 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
- [7] G.E. Stavroulakis, I. Papachristou, S. Salonikidis, I. Papalaios and G. K. Tairidis: Neurofuzzy control for smart structures, CSC2011, The Second International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering, Chania, Greece, 6-9 September 2011, invited lecture
- [8] G.K. Tairidis, G.E. Stavroulakis, D.G. Marinova, E.C. Zacharenakis: Classical and soft robust active control of smart beams. Ch. 11, pp. 165-178, In: Computational Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Eds. M. Papadrakaikis, D.C. Charmpis, Y. Tsompanakis, Nikos D. Lagaros, CRC Press – Taylor & Francis Group, London, 2009.
- [9] Ioannis Papachristou, Salonikos Salonikidis, Georgios K. Tairidis and Georgios E. Stavroulakis, Adaptive fuzzy control of smart structures - ANFIS, 7th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Athens, 30 June – 2 July 2011
- [10] H. Irschik, A review of static and dynamic shape control of structures using piezoelectric actuation. Engineering Structures, 24(1), 5-11, 2002

- [11] 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.
- [12] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrak, An introduction to fuzzy control. 2nd edition, Springer Verlag, 1996
- [13] 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
- [14] 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
- [15] G.K. Tairidis, G.E. Stavroulakis, D.G. Marinova, E.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 et al. Eds, Rethymno, Crete, Greece, 13-16 June 2007

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Περιγραφή αλγορίθμου αριθμητικής ολοκλήρωσης

Ο αλγόριθμος της αριθμητικής ολοκλήρωσης συντάχθηκε στο περιβάλλον της Matlab. Η φιλοσοφία της λειτουργίας του έχει ως εξής:

Αρχικά ορίζονται οι σταθερές β και γ της μεθόδου Houbolt με τις τιμές 0.25 και 0.5 αντίστοιχα. Επίσης ορίζονται παραμετρικά, δηλαδή συναρτήσει των δυο προηγούμενων σταθερών, οι μεταβλητές $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ σύμφωνα με τους τύπους που παρατίθενται στην υποενότητα 4.4.

Στη συνέχεια ορίζεται το χρονικό διάστημα της ολοκλήρωσης t (0 έως 3 sec) και το βήμα dt (0,001 sec). Προκύπτει έτσι ένα πλήθος υποδιαστημάτων που αριθμεί τα 3000.

Φορτώνονται τα μητρώα μάζας, δυσκαμψίας και απόσβεσης όπως προέκυψαν από τον αλγόριθμο που προσομοιώνει τη σύνθετη πλάκα.

Ορίζονται η συχνότητα, το πλάτος της φόρτισης, οι κόμβοι επιβολής του και οι κόμβοι ελέγχου.

Δημιουργείται το διάνυσμα φόρτισης και ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων.

Αρχικοποιούνται τα διανύσματα της μετατόπισης της ταχύτητας και της επιτάχυνσης για πριν και μετά τον έλεγχο καθώς και αυτό της δύναμης ελέγχου.

Ορίζονται οι αρχικές συνθήκες δηλαδή μηδενίζονται οι τιμές της μετατόπισης της ταχύτητας και της επιτάχυνσης για $t=0$.

Υπολογίζονται οι ενδιάμεσοι πίνακες K^* και F^* και ξεκινάει ένας βρόχος σε κάθε επανάληψη του οποίου υπολογίζεται η μετατόπιση, η ταχύτητα και η επιτάχυνση του επόμενου βήματος.

Στη συνέχεια ορίζουμε τον κόμβο ή τους κόμβους που πρόκειται να εφαρμοσθεί ο έλεγχος και υπολογίζουμε τη μέγιστη μετατόπιση και ταχύτητα του. Τα δεδομένα αυτά μαζί με το πλάτος της φόρτισης δίνονται στον fuzzy ελεγκτή που περιγράφηκε στην υποενότητα 4.3, ο οποίος με τη σειρά του τα χρησιμοποιεί για να δημιουργήσει τις παραμετρικά ορισμένες συναρτήσεις συμμετοχής των εισόδων και της εξόδου.

Ακολουθεί ένας βρόχος που υπολογίζει τη μετατόπιση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση του κόμβου που ασκείται ο έλεγχος σε κάθε βήμα, συνυπολογίζοντας τη δύναμη ελέγχου που παράχθηκε από τον ελεγκτή και τις εξωτερικές φορτίσεις που ασκούνται σε αυτόν.

Τέλος τυπώνονται οι γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων όπως παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.