

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ

2004010018

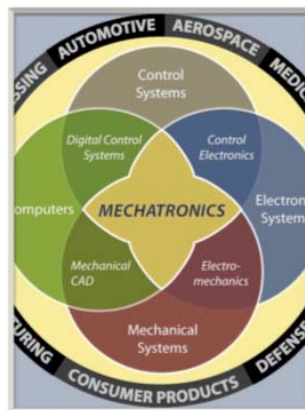
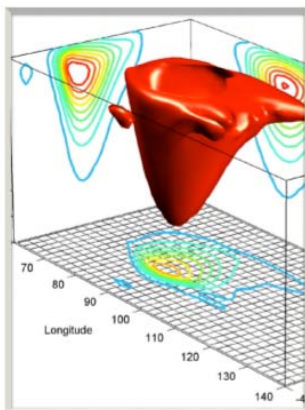
Χανιά, Σεπτέμβριος 2010

Επιβλέπων καθηγητής:
Σταυρουλάκης Γεώργιος

Εργαστήριο Υπολογιστικής
Μηχανικής και Βελτιστοποίησης

Διπλωματική εργασία

Ανάπτυξη νευροασαφούς συστήματος ελέγχου (ANFIS) για την μείωση των ταλαντώσεων σε ευφυείς μηχανικές κατασκευές σε περιβάλλον SIMULINK.



Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1ο

- | | | |
|-------------|------|---|
| 1. Εισαγωγή | σελ. | 1 |
|-------------|------|---|

Κεφάλαιο 2ο

- | | | |
|------------------------|------|---|
| 1. Ασαφής λογική | σελ. | 2 |
| 2. Ασαφής ελεγκτής | σελ. | 2 |
| 3. Ανάπτυξη αλγορίθμου | σελ. | 3 |

Κεφάλαιο 3ο

- | | | |
|------------------------------|------|----|
| 1. Ορισμός προβλήματος | σελ. | 8 |
| 2. Περιεχόμενα παραδειγμάτων | σελ. | 10 |
| 3. Παρουσίαση m files | σελ. | 11 |

Κεφάλαιο 4ο

- | | | |
|---|------|----|
| Πίνακες αποτελεσμάτων και τελικά συμπεράσματα | σελ. | 20 |
|---|------|----|

Παράρτημα

- | | | |
|--|------|----|
| Παρουσίαση γραφημάτων μετρήσεων
και μοντέλων simulink | σελ. | 23 |
|--|------|----|

Βιβλιογραφία

σελ.	53
------	----

Κεφάλαιο 1^ο

1. Εισαγωγή

Η διπλωματική εργασία έγινε με την βοήθεια και την επίβλεψη του καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεωργίου Σταυρουλάκη.

Αφορά την μελέτη ενός προκατασκευασμένου συστήματος ασαφούς ελεγκτή, τον οποίο παραμετροποιώντας, προσπαθούμε να μελετήσουμε την αποτελεσματικότητά του. Το σύστημα πάνω στο οποίο δοκιμάζουμε τον ελεγκτή έχει σχεδιαστεί και χρησιμοποιηθεί χωρίς παραμετρική διερεύνηση από τον κ. Γεώργιο Ταϊρίδη στα πλαίσια της μεταπτυχιακής του διατριβής με τίτλο “προσομοίωση σύνθετων ευφυών μηχανικών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά, Χανιά, Μάιος 2009”. Επίσης στοχεύουμε στην σύγκριση των αποτελεσμάτων του ελεγκτή που χρησιμοποίησε ο κ. Ταϊρίδης και αυτού που θα χρησιμοποιήσουμε παρακάτω.

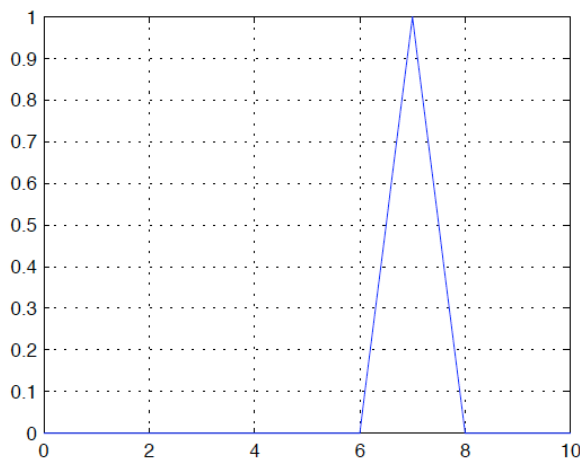
Το σύστημα που εξετάζουμε αποτελείται από μια πακτωμένη ράβδο(πρόβολο δοκού) η οποία εκτίθεται σε αρμονική ταλάντωση. Προσομοιώνουμε την μηχανική συμπεριφορά με χρήση πεπερασμένων στοιχείων με την βοήθεια του προγράμματος Simulink της Matlab και με την χρήση ενός νευροασαφούς ελεγκτή που παρέχεται στην βασική βιβλιοθήκη της matlab. Στόχος μας είναι να ελέγξουμε όσο το δυνατό περισσότερο την ταλάντωση, τόσο ως προς το εύρος της όσο και προς τις δυνάμεις, τις επιταχύνσεις και συνεπώς τις καταπονήσεις που ασκούνται στην δοκό και να παρατηρήσουμε την αποτελεσματικότητά του ελεγκτή μας μετά από ένα πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων εκπαίδευσης.

Κεφάλαιο 2ο

1. Ασαφής λογική

Σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο που ισχύει μέχρι σήμερα μια πρόταση μπορεί να είναι ή αληθής ή ψευδής. Ακολουθώντας την ασαφή λογική όμως μπορούμε να πούμε ότι μία πρόταση είναι αληθής "με κάποιο βαθμό αληθείας". Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι ένα προϊόν κοστίζει 100€, η κλασική λογική ορίζει ότι η πρόταση "το προϊόν Α είναι ακριβότερο από το Β" είναι αληθής. Η ασαφής λογική ορίζει ότι η παραπάνω πρόταση είναι αληθής, αλλά σε κάποιον βαθμό, π.χ. 20%. Με την ασαφή λογική μπορούμε να λάβουμε υπόψιν μας και ποιοτικές μεταβλητές, όπως η ποιότητα, η χρηστικότητα κ.λ.π.. Συνεπώς το βασικό πλεονέκτημα της λογικής αυτής είναι ότι μπορεί να λειτουργεί σε περιβάλλον ασάφειας και αβεβαιότητας. Μπορούμε επίσης εμπειρικά να κωδικοποιήσουμε λεκτικές μεταβλητές και να χρησιμοποιήσουμε μια αυτοματοποιημένη μεθοδολογία επίλυσης που πλησιάζει περισσότερο στην ανθρώπινη λογική και αναλύει συστήματα αρκετά πιο πολύπλοκα από την κλασική μεθοδολογία ελέγχου μιας μηχανής.

Ποιό συγκεκριμένα οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται χαρακτηρίζονται από κάποιο βαθμό συμμετοχής του στοιχείου που προκύπτει από μια καθορισμένη συνάρτηση συμμετοχής. Δηλαδή όσο μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής έχει το στοιχείο τόσο πιο πολύ ανήκει στο ασαφές σύνολο. Ένας ασαφής αριθμός αντιστοιχεί στην λογική έκφραση περίπου. Αν για παράδειγμα η συνάρτηση συμμετοχής είναι το γράφημα του επόμενου σχήματος τότε ο αριθμός 6.5 είναι σύμφωνα με αυτό κατά 50% 7.



2. Ασαφής ελεγκτής (ANFIS)

ANFIS είναι το νευροασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων στο οποίο βασίζεται ο ελεγκτής που χρησιμοποιούμε στο παράδειγμα μας (Sugeno), και εκπαιδεύεται για την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

Οι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται είναι M.I.S.O.(Multiple Inputs One Output).

Αρχικά εισάγουμε τις συναρτήσεις συμμετοχής των δεδομένων εισόδου και έπειτα τους κανόνες και το βάρος του καθενός.

Θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μας χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή mamdani και τον ελεγκτή Takagi-Sugeno (από το fuzzy toolbox του matlab). Η διαφορά των δύο ελεγκτών είναι ότι ο mamdani δέχεται ως εξισώσεις συμμετοχής εξόδου καμπύλες διαφόρων μορφών, όπως Gauss, ενώ ο Sugeno δέχεται μόνο σταθερά σημεία και συναρτήσεις της μορφής $y=a*x$. Επίσης ο Sugeno, αντίθετα με τον mamdani, έχει την δυνατότητα εκπαίδευσης με την χρήση του εκπαιδευτή ANFIS της Matlab, ο οποίος χρησιμοποιώντας δεδομένα από δοκιμές επεμβαίνει στις συναρτήσεις συμμετοχής του ελεγκτή και τις τροποποιεί ανάλογα με τις απαιτήσεις μας.

Τα βασικά δεδομένα που χρησιμοποιεί ένας ελεγκτής είναι:

- οι κανόνες ελέγχου για τον έλεγχο της διαδικασίας

- τα ασαφή σύνολα, για την μετατροπή των λεκτικών κανόνων σε μαθηματικούς τύπους

- ο ασαφοποιητής, ο οποίος μετατρέπει τις τιμές εισόδου σε ασαφή σύνολα

- και ο αποασαφοποιητής, που μετατρέπει τα αποτελέσματα σε πραγματικούς αριθμούς.

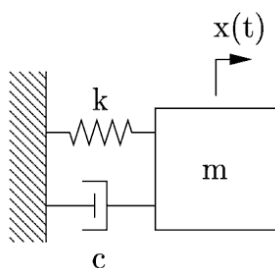
Οι κανόνες του ελεγκτή είναι της μορφής “if displacement is far left and/or velocity is null then force is min”. Η διαδικασία καθορισμού των κανόνων του ελεγκτή αλλά και των εξισώσεων συμμετοχής για το συγκεκριμένο παράδειγμα αναλύονται στην παρουσίαση των m files στο 3ο κεφάλαιο.

Για να ορίσουμε τους κανόνες σε έναν ελεγκτή πρέπει να λάβουμε υπόψιν μας κάποιους περιορισμούς. Αρχικά πρέπει να υπάρχει πληρότητα, δηλαδή για κάθε τιμή των δεδομένων εισόδου θα πρέπει να ενεργοποιείται τουλάχιστον ένας από τους κανόνες. Θα πρέπει να υπάρχει συνέπεια, να είναι οι κανόνες σχεδόν όμοιοι στις δύο πλευρές τους (στα άκρα τους), να υπάρχει κάποια συμμετρία. Για λόγους οικονομίας μνήμης αλλά και υπολογιστικής συνοχής δεν πρέπει να υπάρχει πλεονασμός, επανάληψη των κανόνων. Τέλος δεν θα πρέπει οι κανόνες να αλληλεπιδρούν, δηλαδή να δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα για τα ίδια δεδομένα εισόδου.

3. Παράδειγμα ανάπτυξης αλγόριθμου

Πριν αναλύσουμε το μοντέλο προβόλου δοκού αναλύουμε ένα ποιοτικό απλό παράδειγμα.

Το συγκεκριμένο μοντέλο αφορά ένα δευτεροβάθμιο σύστημα μάζας-ταλαντωτή- αποσβεστήρα με 1 βαθμό ελευθερίας.

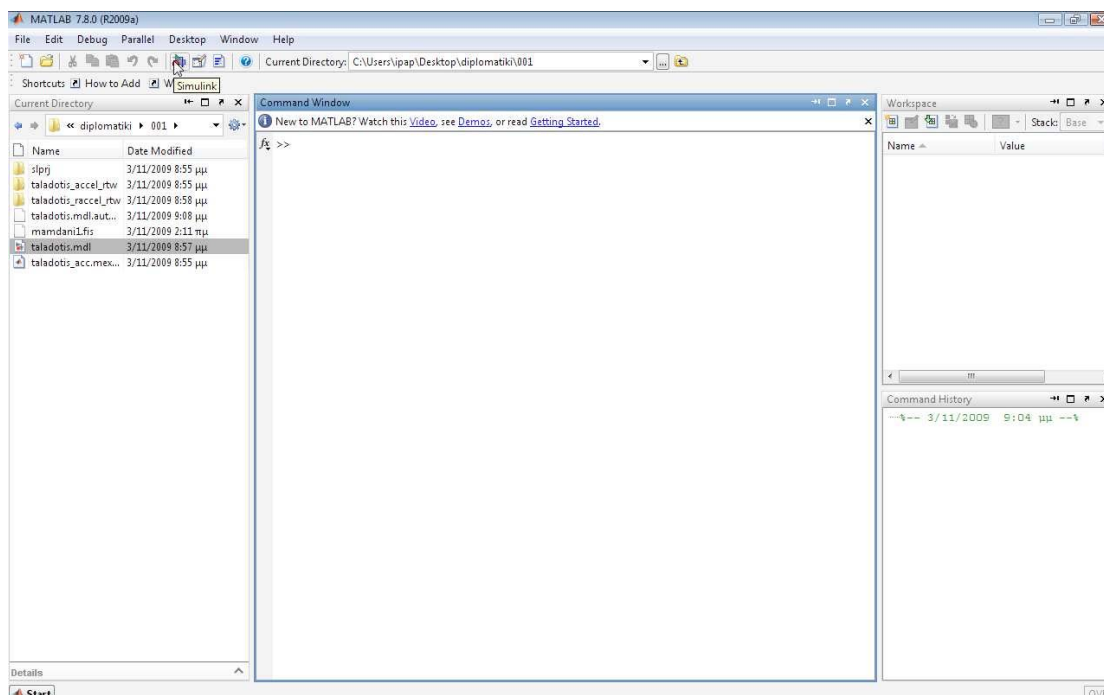


Η εξίσωση που περιγράφει το παραπάνω πρόβλημα είναι

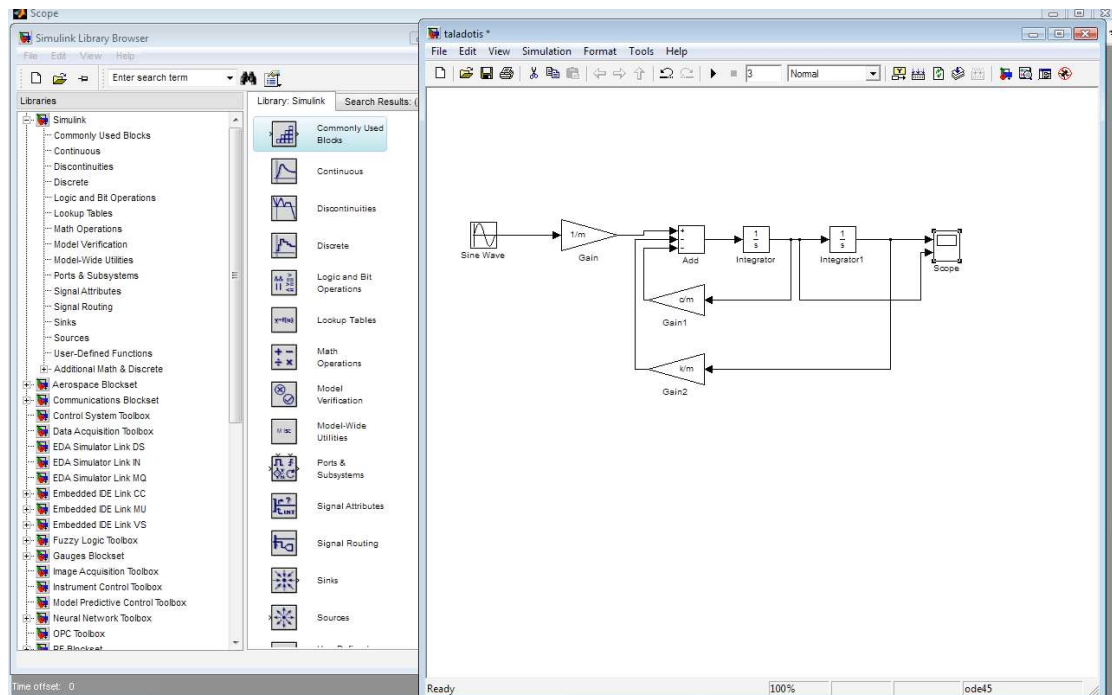
$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k \cdot u = \sum F \Rightarrow$$

$$\ddot{u} = \frac{\sum F}{m} - \frac{c}{m} \cdot \dot{u} - \frac{k}{m} u$$

Αρχικά ανοίγουμε την matlab και επιλέγουμε τον χώρο εργασίας μας(C:\..) και μετά το εικονίδιο της simulink:



Ανοίγουμε ένα καινούριο μοντέλο και χρησιμοποιώντας τα drag and drop εικονίδια της βιβλιοθήκης (simulink library browser) δημιουργούμε το μοντέλο μας.



Παρατηρούμε ότι στους πολλαπλασιαστές (gain) έχουμε βάλει μεταβλητές (π.χ. c/m). Για να κάνουμε simulate το μοντέλο μας πρέπει να αρχικοποιήσουμε τις μεταβλητές μας στο παράθυρο εντολών του προγράμματος(matlab).

Οι αρχικές τιμές είναι:

Σταθερά ελατηρίου $k=5000 \text{ N/m}$

Μάζα $m=0.002 \text{ kg}$

Απόσβεση $c=30 \text{ N*s/m}$

Η φυσική συχνότητα του συστήματος είναι $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = 50 \text{ Hz}$

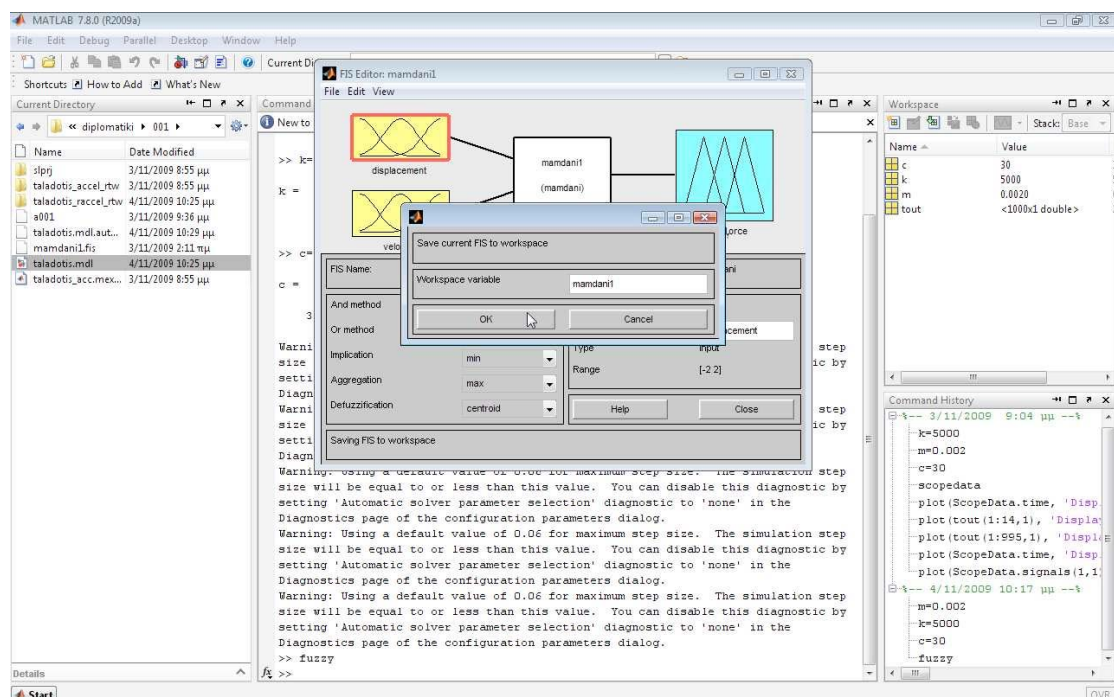
Η διέγερση είναι αρμονική, της μορφής $P = P_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$

με πλάτος $P_0 = 100 \text{ N}$ και $\omega = 20 \text{ rad/s}$.

Στα διαγράμματα βλέπουμε: στο πάνω το πεδίο μετακινήσεων και στο κάτω το πεδίο ταχυτήτων.



Έπειτα προσθέτουμε στο σύστημα τον ελεγκτή γράφοντας fuzzy στην γραμμή εντολών, εισάγουμε τα δεδομένα μας και στην συνέχεια τα εξάγουμε από το περιβάλλον εντολών της matlab, με την εντολή export στο περιβάλλον εργασίας μας στο simulink.



Κεφάλαιο 3^ο1. ορισμός προβλήματος**Μοντέλο A:**

Το βασικό μοντέλο που εξετάζουμε είναι αυτό της προβόλου δοκού. Ποιό συγκεκριμένα έχουμε μια ράβδο μήκους 0.8m την οποία χωρίζουμε σε τέσσερα στοιχεία ίδιου μήκους.

Οι εξισώσεις κίνησης ορίζονται από τον τύπο:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = \sum F$$

$$y = B m u$$

όπου οι πίνακες M,C,K είναι τα μητρώα μάζας, απόσβεσης και δυσκαμψίας, u είναι η μετατόπιση και F είναι οι δυνάμεις που ασκούνται από το περιβάλλον αλλά και από τον ελεγκτή.

Την εξίσωση αυτή την φέρνουμε στην μορφή

$$\dot{x} = A x + B u$$

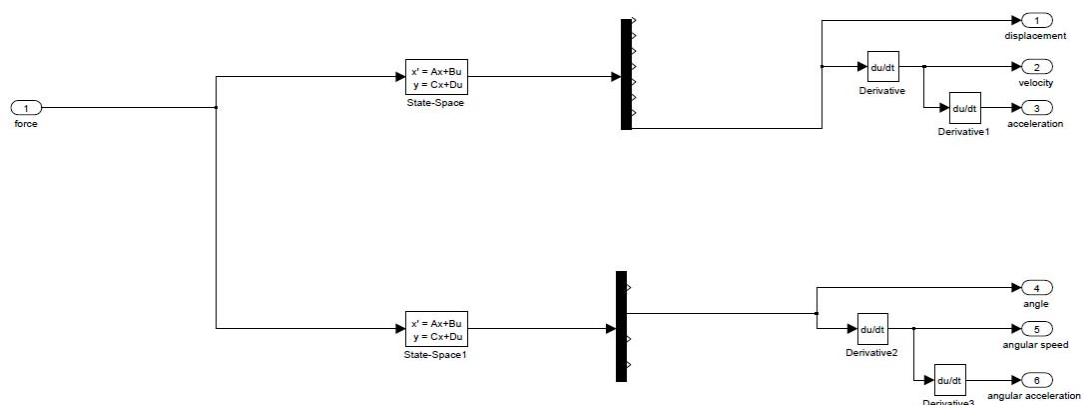
με χρήση της matlab. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε και

$$y = C x$$

αναλύθηκε από τον κ. Γεώργιο Ταϊρίδη στα πλαίσια της μεταπτυχιακής του διατριβής (Χανιά, Μάιος 2009).

από αυτό το σημείο μοντελοποιούμε με την βοήθεια του state-space block το πρόβλημα μας σε περιβάλλον simulink.

Στο μοντέλο αυτό οι μετρήσεις γίνονται με βάση την απόκλιση θέσης του σημείου ελέγχου από τον άξονα συμμετρίας της ράβδου. Οι τιμές της ταχύτητας και της επιτάχυνσης βρίσκονται παραγωγίζοντας το x το οποίο είναι η απόκλιση μας, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

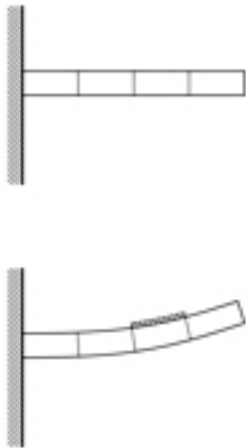


Μοντέλο A , τιμές με βάση την απόκλιση θέσης

Μοντέλο Β:

Εξετάζουμε επίσης την συμπεριφορά μίας ράβδου διαφορετικής από την προηγούμενη, στην οποία οι μετρήσεις των δεδομένων για τον έλεγχο γίνονται με βάση την ταχύτητα σε κάθε χρονική στιγμή.

Σε αυτό το παράδειγμα επίσης έχουμε χωρίσει την ράβδο σε τέσσερα τμήματα ελέγχου. Όμως ο έλεγχος δεν γίνεται με βάση την απόκλιση ενός σημείου ελέγχου από κάποιο σημείο ισορροπίας αλλά από την μέτρηση της κάμψης σε τέσσερις αισθητήρες(περιοχές ιδίων τιμών στις μεταβλητές ελέγχου).



πακτωμένη ράβδος ελέγχου(γραμμοσκιασμένη)

Αυτή η μέθοδος ελέγχου είναι πιο ρεαλιστική αφού τα πιεζοηλεκτρικά υλικά αλλάζουν τις ιδιότητες τους ανάλογα με τις δυνάμεις, είτε θλιπτικές είτε καμπτικές, που ασκούνται σε αυτά. Οπότε οι μετρήσεις και η δύναμη ελέγχου θα μπορούσαν να γίνουν μέσω μίας ή περισσότερων πακτωμένων πιεζοηλεκτρικών ράβδων στο σύστημα. Στο παράδειγμα μας χρησιμοποιούμε στην περίπτωση του final 10 ένα ζευγάρι ελεγκτών mamdani. Το ANFIS δεν μας δίνει την δυνατότητα να εκπαιδεύσουμε δύο ελεγκτές ταυτόχρονα και δουλεύει μόνο με single output ελεγκτές για αυτό τον λόγο στο final 11 χρησιμοποιούμε στον εσωτερικό μας κόμβο έναν ελεγκτή τύπου mamdani και στον εξωτερικό έναν εκπαιδευμένο ελεγκτή τύπου sugeno.

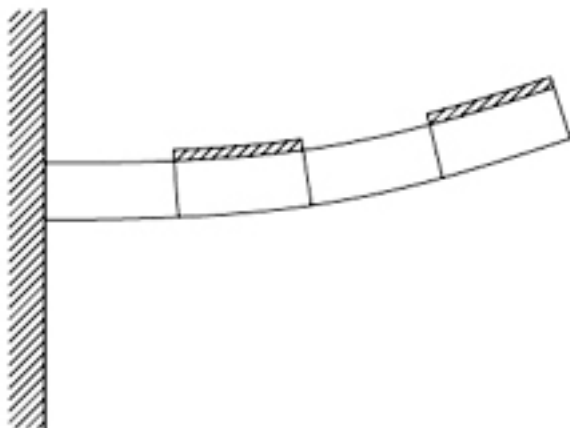
Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η δομή των μοντέλων που βασίζονται σε μετρήσεις ταχύτητας και όχι θέσης. Η τιμή της απόκλισης θέσης δίνεται με ολοκλήρωση της ταχύτητας και αυτή της επιτάχυνσης με παραγωγή της.



2. Περιεχόμενα παραδειγμάτων

Αρχείο	μοντέλο	σημεία ελέγχου	ελεγκτής	εκπαίδευση ελεγκτή
final 1	A	1	-	-
final 2	A	1	mamdani	-
final 3	A	1	sugeno	-
final 4	A	1	sugeno	ναι
final 5	B	1	-	-
final 6	B	1	mamdani	-
final 7	B	1	sugeno	-
final 8	B	1	sugeno	ναι
final 9	B	2	-	-
final 10	B	2	mamdani	-
final 11	B	2	sugeno	ναι

Επισημαίνουμε ότι στο δεύτερο μοντέλο στην περίπτωση του ενός ελεγκτή αναφερόμαστε σε μία ράβδο μεταξύ του 3ου και 4ου σημείου ελέγχου(κοντά στο ελεύθερο άκρο της ράβδου Ενώ ο δεύτερος ελεγκτής που προστίθεται μετά είναι μεταξύ 1ου και 2ου σημείου ελέγχου όπως φαίνεται και στο σχήμα:

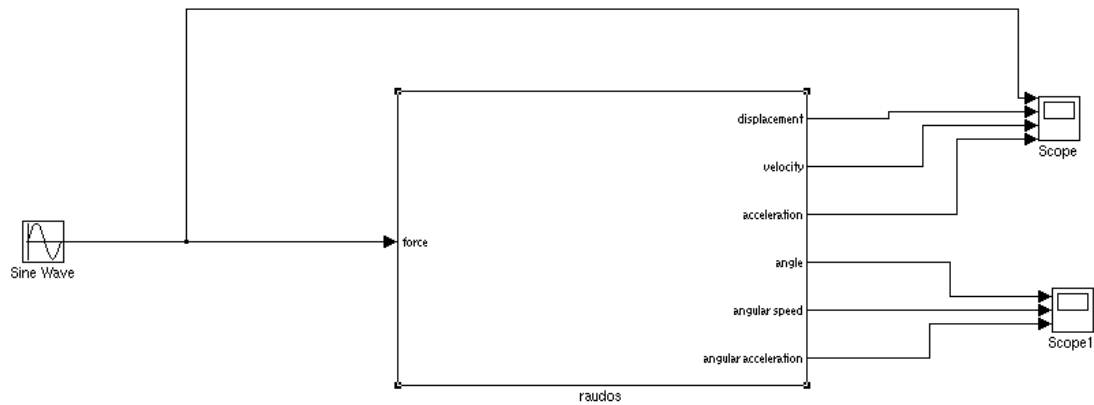


2. Παρουσίαση m files

Τα final αρχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του προβλήματος μας είναι τα εξής:

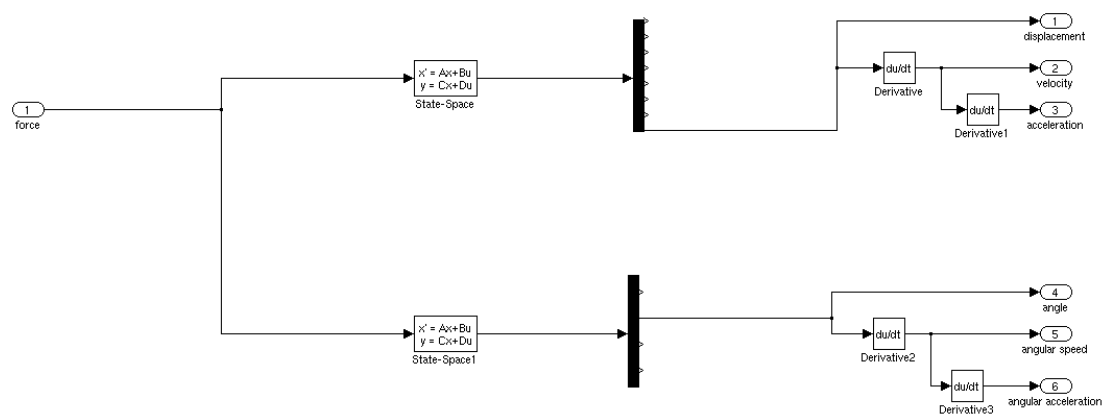
Final1:

Το βασικό σύστημα αποτελείται από την δύναμη εισόδου, η οποία είναι ημιτονοειδούς μορφής, το υποσύστημα *raudos* που μας δίνει τις μετρήσεις της προσομοίωσης και των *scope*, τα οποία καταγράφουν τα αποτελέσματά μας.



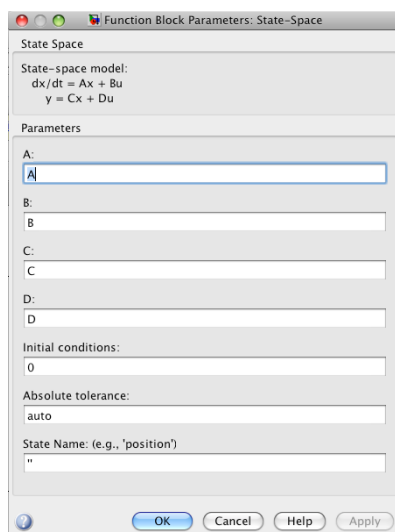
βασικό μοντέλο final 1

Το υποσύστημα *raudos*, όπως αναφέραμε και στην αρχή του κεφαλαίου μας, κάνει την προσομοίωση της ράβδου και μας δίνει τις τιμές των ζητούμενων μεταβλητών.



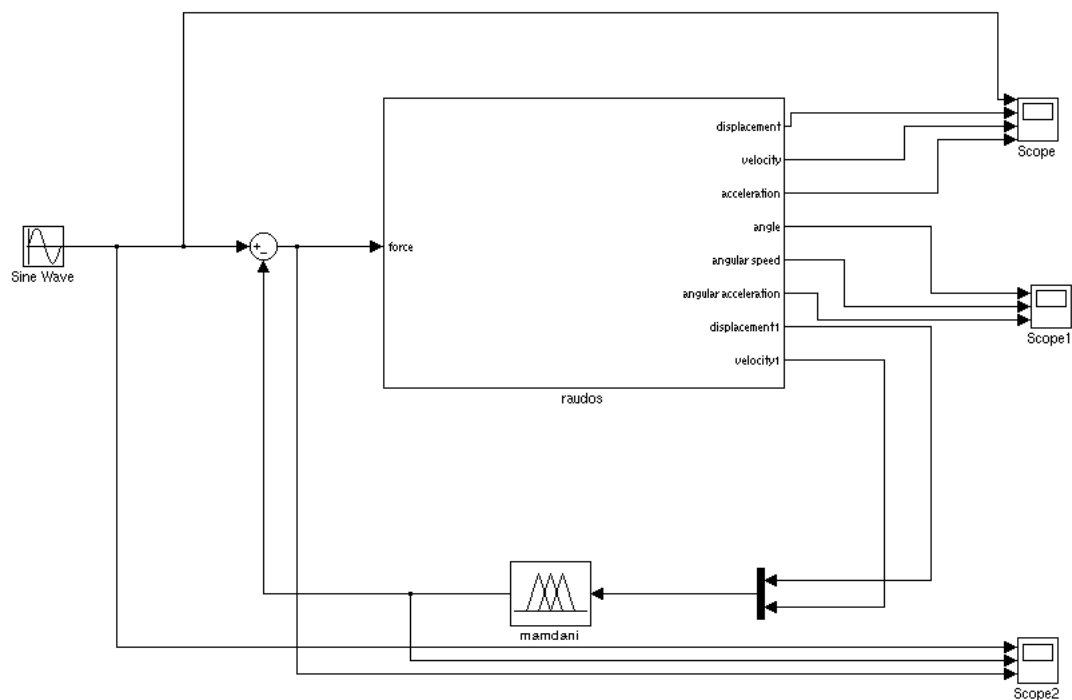
υποσύστημα ράβδου από final1

οι ρυθμίσεις του state-space block:

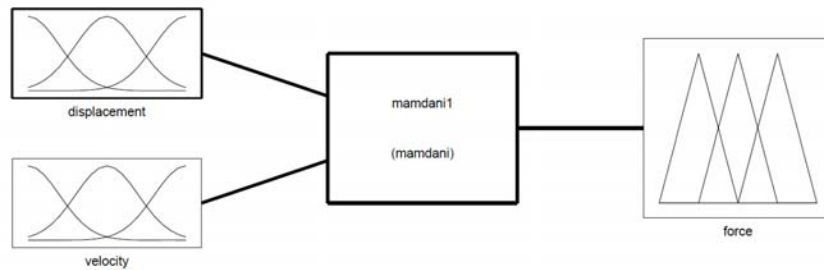


Το block αυτό δίνεται έτοιμο από το πρόγραμμα που χρησιμοποιούμε και εισάγοντας του τους πίνακες ιδιοτήτων της ράβδου και την δύναμη εισόδου μας επιστρέφει σε πίνακα τις αντίστοιχες μεταβλητές.

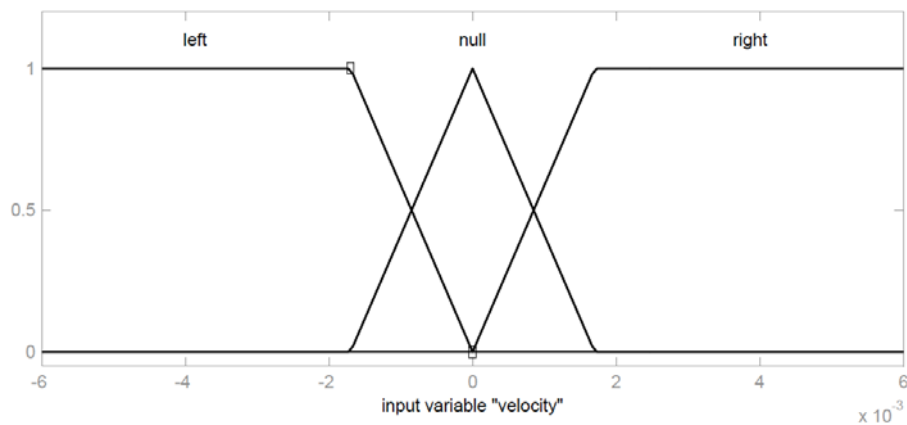
Final2:



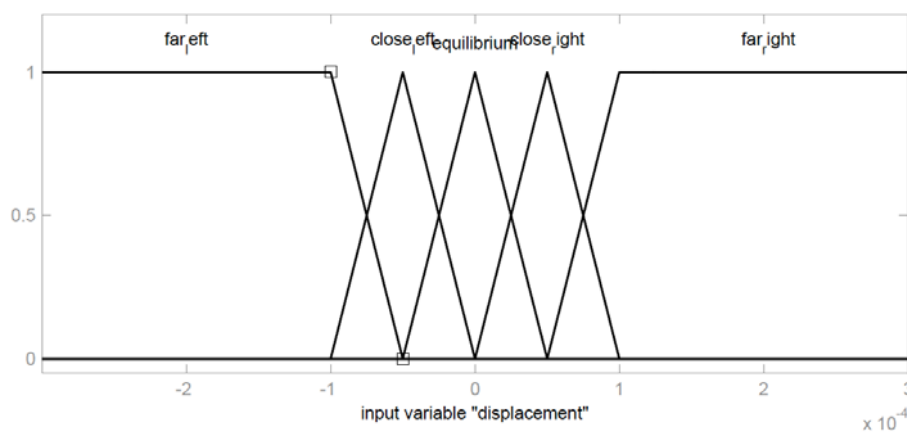
οι κανόνες του ελεγκτή mamdani είναι:



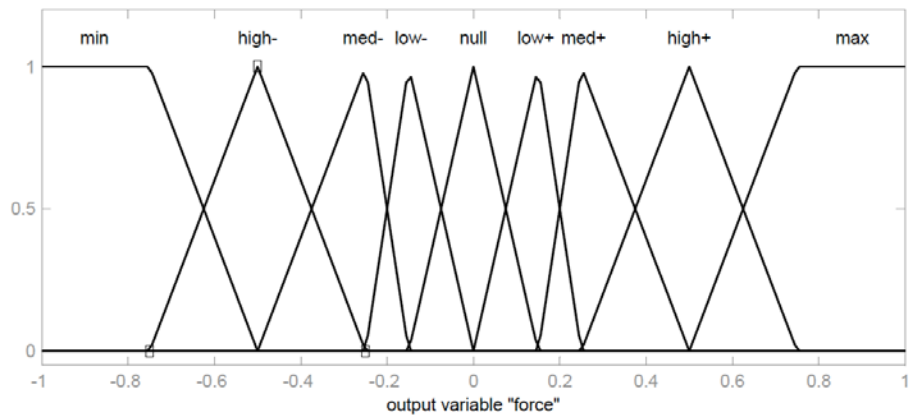
Παρατηρούμε ότι δίνουμε μεγαλύτερη σημασία στην μετατόπιση της ράβδου από τον κεντρικό άξονα παρά στην ταχύτητα που αναπτύσσει κατά την ταλάντωση. Αυτό συμβαίνει γιατί οι κανόνες της μετατόπισης ορίζονται πιο εύκολα σε αυτό το σημείο αφού είναι πιο εύκολα κατανοητή και υπολογίσιμη.



συναρτήσεις συμμετοχής για ταχύτητα



συναρτήσεις συμμετοχής για μετατόπιση



συναρτήσεις συμμετοχής δύναμης απόσβεσης

αφού ορίσουμε τα διαγράμματα ελέγχου ορίζουμε και την απαιτούμενη αντίδραση του ελεγκτή στις πιθανές καταστάσεις.

1. If (displacement is far_left) and (velocity is left) then (force is min) (1)
 2. If (displacement is close_left) and (velocity is left) then (force is med-) (1)
 3. If (displacement is equilibrium) and (velocity is left) then (force is low-) (1)
 4. If (displacement is close_right) and (velocity is left) then (force is null) (1)
 5. If (displacement is far_right) and (velocity is left) then (force is high+) (1)
 6. If (displacement is far_left) and (velocity is null) then (force is high-) (1)
 7. If (displacement is close_left) and (velocity is null) then (force is low-) (1)
 8. If (displacement is equilibrium) and (velocity is null) then (force is null) (1)
 9. If (displacement is close_right) and (velocity is null) then (force is low+) (1)
 10. If (displacement is far_right) and (velocity is null) then (force is med+) (1)
 11. If (displacement is far_left) and (velocity is right) then (force is med-) (1)
 12. If (displacement is close_left) and (velocity is right) then (force is null) (1)
 13. If (displacement is equilibrium) and (velocity is right) then (force is low+) (1)
 14. If (displacement is close_right) and (velocity is right) then (force is med+) (1)
 15. If (displacement is far_right) and (velocity is right) then (force is max) (1)

If displacement is and velocity is Then force is

far_left left high-
 close_left null med-
 equilibrium right low-
 close_right none null
 far_right min
 none max
 none none

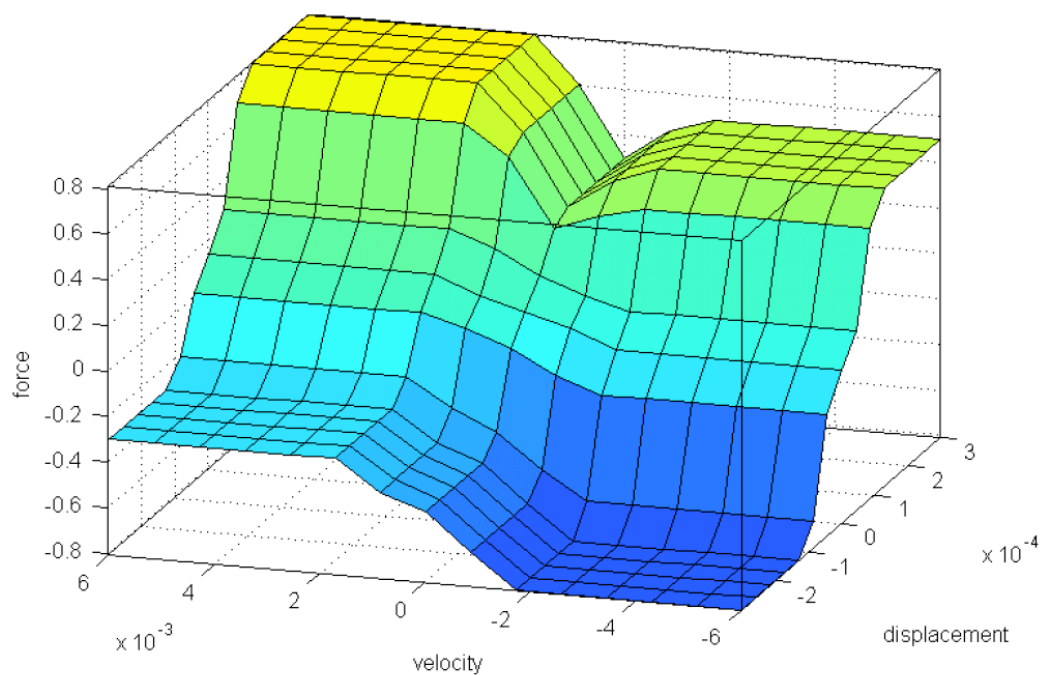
☐ not ☐ not ☐ not

Connection: ☐ or ☒ and Weight: 1

Delete rule Add rule Change rule << >>

FIS Name: mamdani1 Help Close

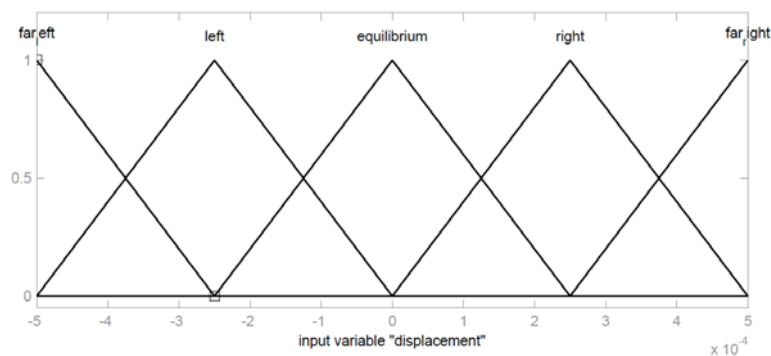
και καταλήγουμε σε μια 3D απεικόνιση των κανόνων μέσα από τον ελεγκτή του simulink.



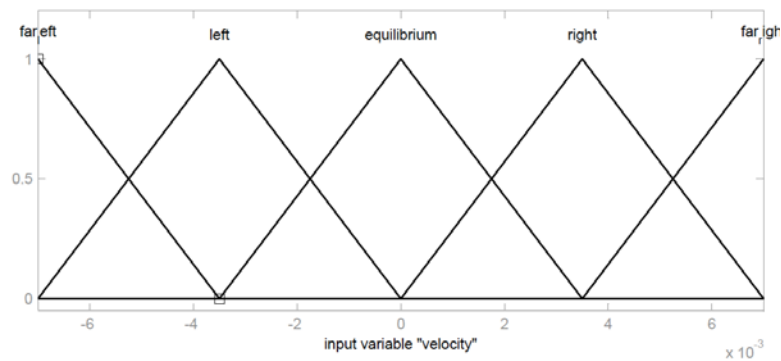
τρισδιάστατη απεικόνιση κανόνων ελέγχου

Final3:

Σε αυτό το σύστημα το σχέδιο μας στο πρόγραμμα είναι ίδιο με το προηγούμενο με την χρήση διαφορετικού ελεγκτή. Για την ανάλυση των κανόνων του sugeno πριν την εκπαίδευση του ακολουθούμε την ίδια μεθοδολογία.



συναρτήσεις συμμετοχής για μετατόπιση

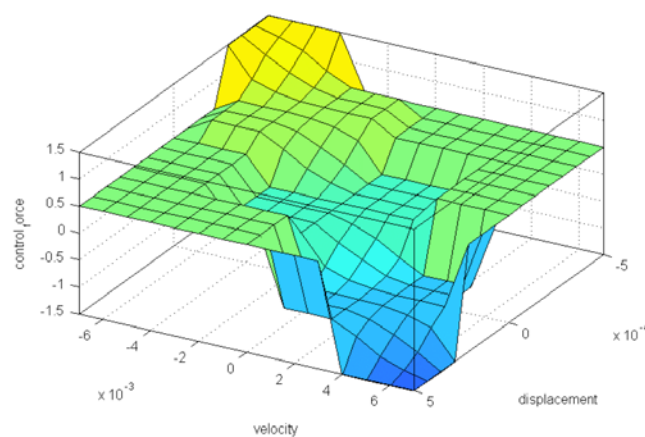


συναρτήσεις συμμετοχής για ταχύτητα

1. If (displacement is far_left) and (velocity is far_left) then (control_force is mf5) (1)
 2. If (displacement is left) and (velocity is left) then (control_force is mf4) (1)
 3. If (displacement is equilibrium) and (velocity is equilibrium) then (control_force is mf3) (1)
 4. If (displacement is right) and (velocity is right) then (control_force is mf2) (1)
 5. If (displacement is far_right) and (velocity is far_right) then (control_force is mf1) (1)

If	and	Then
displacement is	velocity is	control_force is
far_left left equilibrium right far_right none	far_left left equilibrium right far_right none	mf1 mf2 mf3 mf4 mf5 none
☐ not	☐ not	☐ not
Connection: ☐ or ☒ and		
Weight: 1		
Delete rule Add rule Change rule Previous Next		
FIS Name: sugeno1		
Help Close		

κανόνες ελέγχου



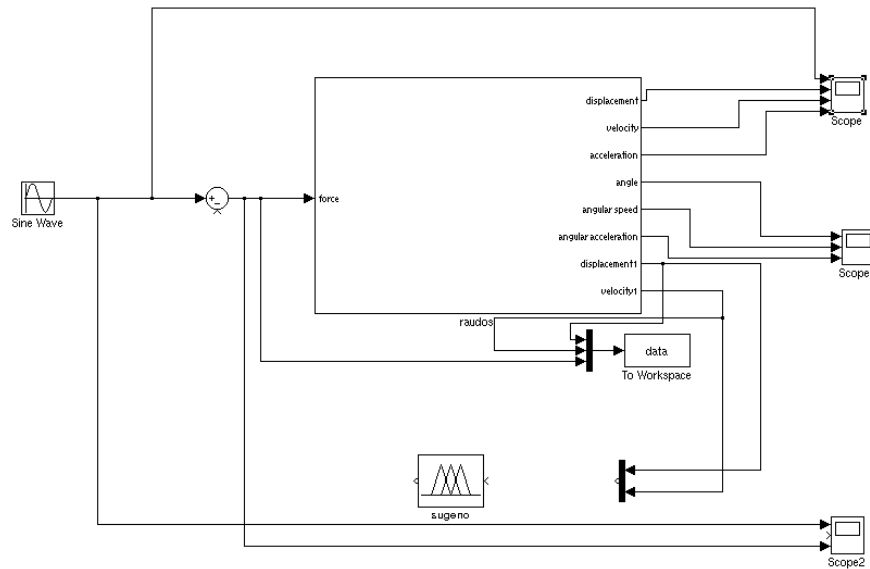
τρισδιάστατη απεικόνιση κανόνων ελέγχου

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα οι κανόνες για τις δυνάμεις ελέγχου είναι σταθερές.

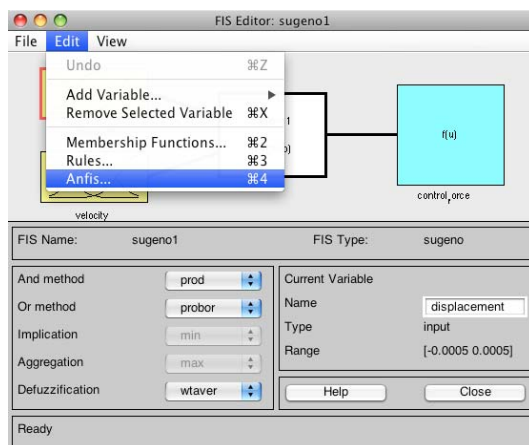
mf1=1 , mf2=0.5 , mf3=0 , mf4=-0.5 , mf5=-1

Final 4:

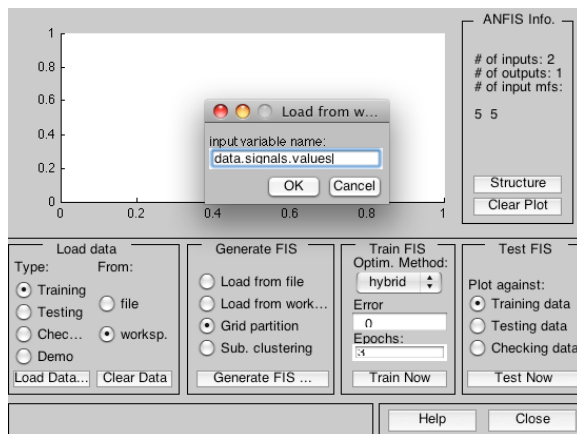
Αρχικά τρέχουμε το σύστημα χωρίς ελεγκτή εξάγοντας τα δεδομένα στον χώρο εργασίας. Προφανώς και τα αποτελέσματα μας θα είναι ίδια με αυτά του final1.



Ανοίγουμε το ANFIS

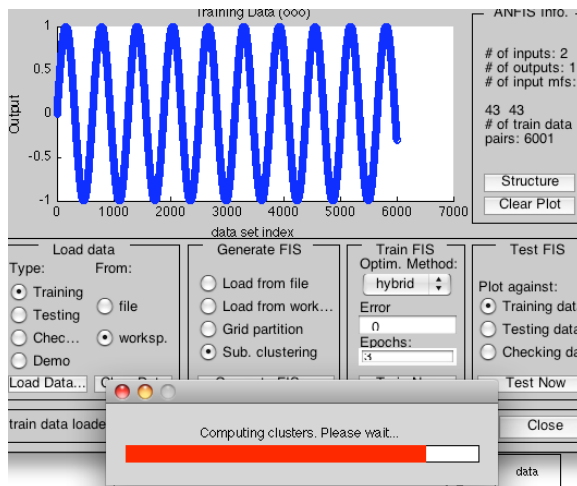


και κάνουμε load τα δεδομένα τα οποία καταγράψαμε στο workspace με το data block:



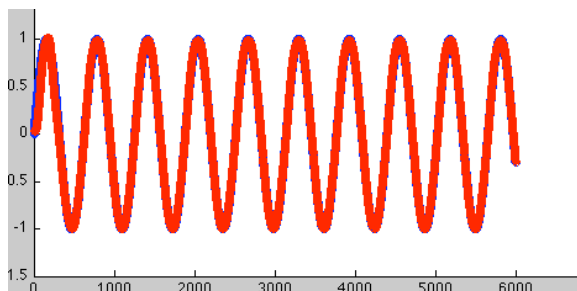
Τα δεδομένα εισόδου στον ANFIS εισέρχονται με την μορφή πίνακα, συνεπώς οι μεταβλητές δεν είναι συνεχούς μορφής.

με την εντολή generate FIS το ANFIS δημιουργεί τους κανόνες για το sugeno:

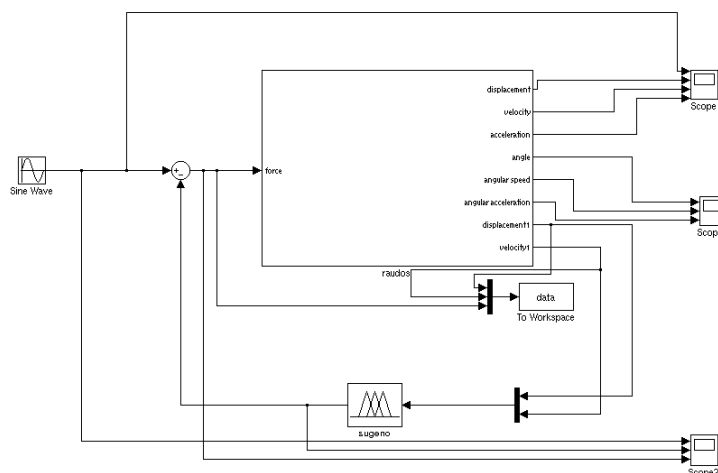


Στην συνέχεια με την εκπαίδευση τους προσαρμόζει βάση των δεδομένων που εισάγουμε (επαναλήψεις εκπαίδευσης και σφάλματος).

Έπειτα κάνουμε test για να δούμε και γραφικά την απόκλιση του ελέγχου από τα δεδομένα που εισάγαμε:



Τέλος συνδέουμε τον ελεγκτή στο σύστημα και κάνουμε το simulation.



Με τον ίδιο τρόπο δημιουργούμε και τα υπόλοιπα συστήματα του μοντέλου B. Με την μόνη διαφορά ότι στα final 9 μέχρι 11 όπου έχουμε δύο σημεία ελέγχου βάζουμε δύο εξωτερικές δυνάμεις, όπως και δύο ελεγκτές. Κρατάμε την εξωτερική δύναμη στον πρώτο κόμβο μηδενική με στόχο να κάνουμε σύγκριση με το προηγούμενο μοντέλο αφήνοντας έτσι μόνο την δύναμη ελέγχου

Κατά την διαδικασία της εκπαίδευσης που ακολουθήσαμε ουσιαστικά εκπαιδεύουμε τον ελεγκτή μας πάνω στο σύστημα ταλάντωσης. Ο ελεγκτής μαθαίνει της αντιδράσεις της ράβδου (ταχύτητα και μετατόπιση) για συγκεκριμένες τιμές εξωτερικών φορτίσεων. Δημιουργεί τους κανόνες ελέγχου ώστε με εισόδους την ταχύτητα και την μετατόπιση να μας δώσει τις τιμές της απαιτούμενης δύναμης που χρειάζεται το μοντέλο για να έρθει σε αυτήν την κατάσταση. Στην συνέχεια τοποθετούμε τον ήδη εκπαιδευμένο ελεγκτή στο σύστημα αφαιρώντας την δύναμη απόσβεσης από την εξωτερική.

Σαν πρώτο στάδιο μελέτης του ελεγκτή, όπως θα δούμε και στην συνέχεια κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων, επιτυγχάνουμε εξομάλυνση της ταλάντωσης σε σχέση με έναν ασαφή ελεγκτή χωρίς εκπαίδευση. Εναλλακτικά θα μπορούσαμε να εκπαιδεύσουμε τον ελεγκτή μας για διάφορες μορφές και τιμές εξωτερικών δυνάμεων ή ακόμα και να χρησιμοποιήσουμε έναν ελεγκτή τεσσάρων εισόδων, δύο μετατοπίσεων και δύο ταχυτήτων.

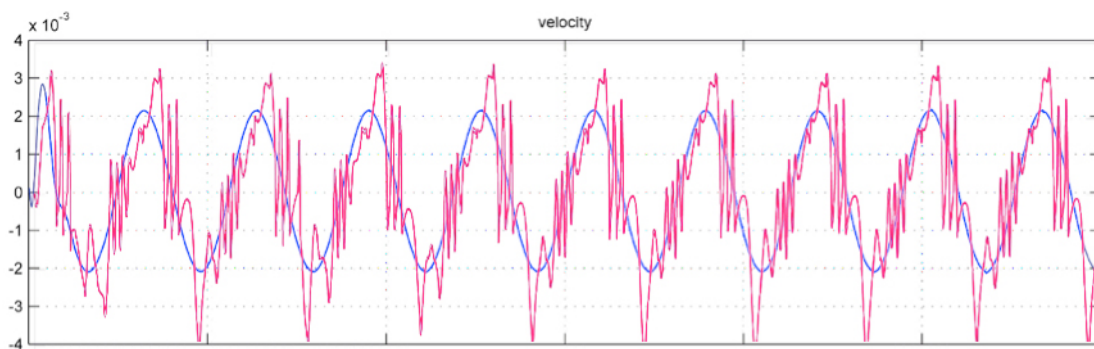
Κεφάλαιο 4ο

Πίνακες αποτελεσμάτων και τελικά συμπεράσματα

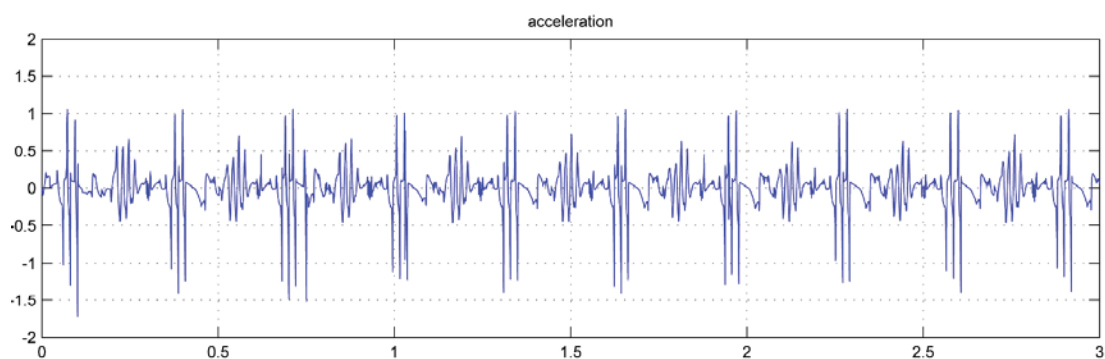
Για το μοντέλο A:

	final 1	final 2	final 4	από final 1 σε 2	από final 1 σε 4	από final 2 σε 4
displacement	2.50E-04	1.00E-04	1.00E-04	-60%	-60%	0%
velocity	4.50E-03	4.00E-03	2.00E-03	-11%	-55%	-50%
acceleration	0.1	1.5	4.00E-02	+1,400%	-60%	-97%
angle	3.80E-04	1.70E-04	1.50E-04	-55%	-60%	-12%
angular velocity	7.50E-03	4.30E-03	3.20E-03	-42%	-57%	-26%
angular acceleration	0.15	1.5	6.50E-02	+900%	-56%	-96%
outside force	1	1	1			
control force		0.8	0.6			
total force		0.7	0.4			

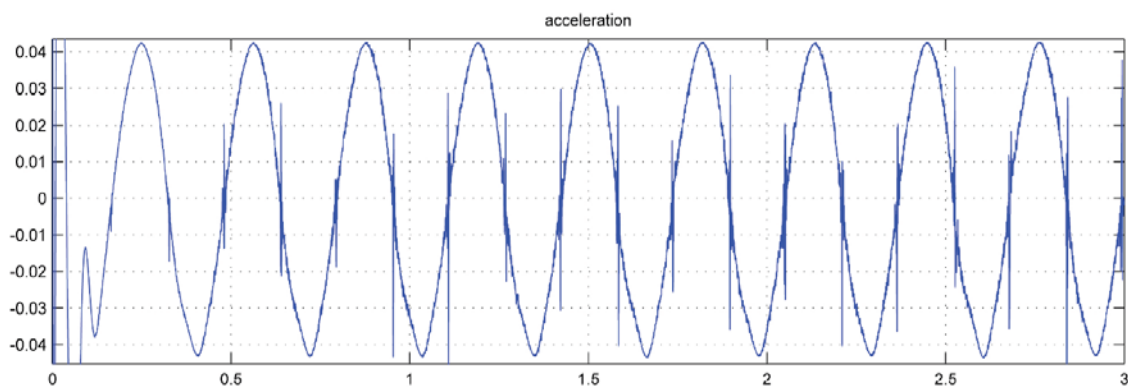
Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του πρώτου μοντέλου παρατηρούμε ότι με την χρήση ενός ασαφούς ελεγκτή του οποίου την παραμετροποίηση κάνουμε εμπειρικά(Mamdani) μπορούμε να μειώσουμε αισθητά την ταλάντωση. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση η μείωση της ταλάντωσης που επιτύχαμε αγγίζει το 60% και οι μέγιστες δυνάμεις που ασκούνται στο δοκίμιο μας είναι στο 70% των αρχικών. Επίσης μειώσαμε την μέγιστη τιμή της ταχύτητας κατά 11%. Οι επιταχύνσεις όμως που καταγράψαμε είναι 15 φορές μεγαλύτερες από αυτές που αναπτύχθηκαν κατά την εξαναγκασμένη ταλάντωση χωρίς παρέμβαση ελεγκτή. Παράλληλα με την χρήση του ελεγκτή Sugeno για τις ίδιες μειώσεις μετατόπισης οι ακραίες τιμές της ταχύτητας μειώνονται κατά 55% και οι επιταχύνσεις κατά 60%, μειωμένες κατά 97% σε σχέση με τον προηγούμενο ελεγκτή. Το ίδιο ισχύει και όσον αφορά την γωνία του δοκιμίου, την γωνιακή ταχύτητα και επιτάχυνση.



Γράφημα 4.1: μετρήσεις ταχύτητας με χρήση ασαφή ελεγκτή(κόκκινο) και νευροασαφή(μπλέ)



Γράφημα 4.2



Γράφημα 4.3

Το γράφημα 4.1 αφορά τις μεταβολές της ταχύτητας και της επιτάχυνσης της προσομοίωσης με την χρήση του ελεγκτή Mamdani, και τα 4.2 και 4.3 με τον Sugeno. Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις ο έλεγχος του Sugeno επιδρά πολύ πιο ομαλά στην ταλάντωση με συνέπεια την αποφυγή των επαναλαμβανόμενων άσκοπων καταπονήσεων, χτυπημάτων του δοκιμίου μας.

Για το μοντέλο B με ένα σημείο ελέγχου:

	final 5	final 6	final 8	από final 5 σε 6	από final 5 σε 8	από final 6 σε 8
displacement	1.50E-05	8.00E-06	7.50E-06	-47%	-50%	-6%
velocity	3.00E-04	1.80E-04	1.50E-04	-40%	-50%	-17%
acceleration	7.00E-03	5.00E-03	3.00E-03	-29%	-57%	-40%

Προχωρώντας στο δεύτερο μοντέλο ελέγχου παρατηρούμε ότι η μείωση της ταλάντωσης είναι μικρότερη σε σχέση με το προηγούμενο. Τα final 5, 6, 8 ακολουθούν την ίδια φιλοσοφία επίλυσης του προβλήματος της δοκού με άλλα δεδομένα και άλλο τρόπο μέτρησης, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3. Όμως τα αποτελέσματα είναι πιο ρεαλιστικά. Και οι δύο ελεγκτές πέτυχαν μείωση της ταλάντωσης περίπου στο 50%. Παρά το γεγονός ότι οι τιμές της επιτάχυνσης και της ταχύτητας παραμένουν αισθητά μικρότερες στον ελεγκτή Sugeno, της τάξης του -17% για την ταχύτητα και του -40% για την επιτάχυνση, στα γραφήματα δεν παρατηρείται μεγάλη απόκλιση στην μορφή. Και στις δύο μορφές ελέγχου η εφαρμογή των δυνάμεων εξισορρόπησης έγινε ομαλά.

Για το μοντέλο B με δύο σημεία ελέγχου:

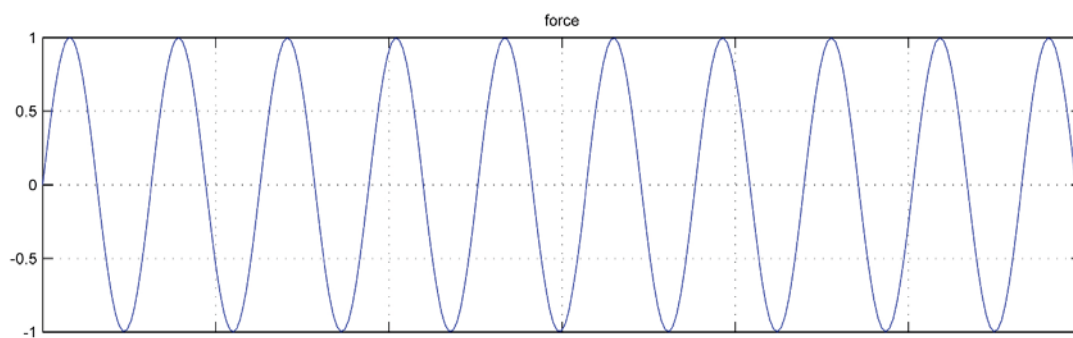
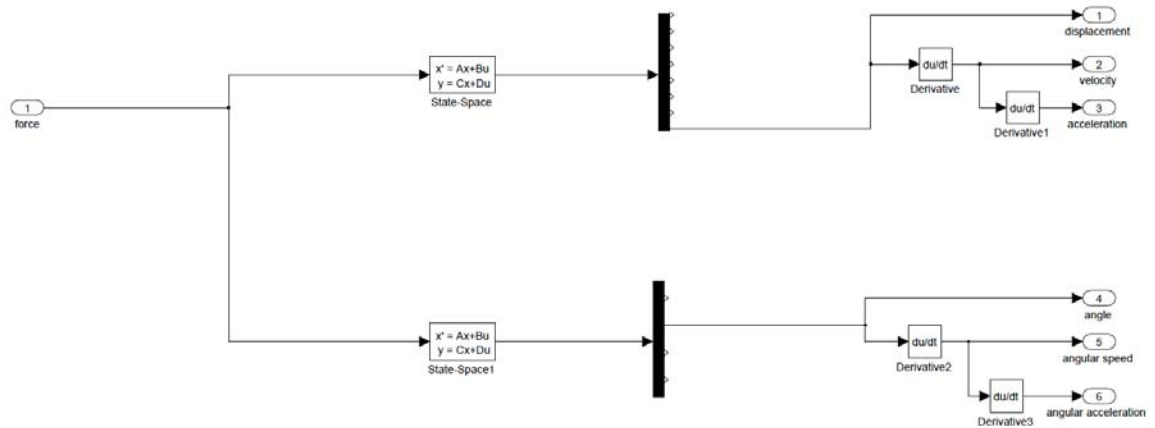
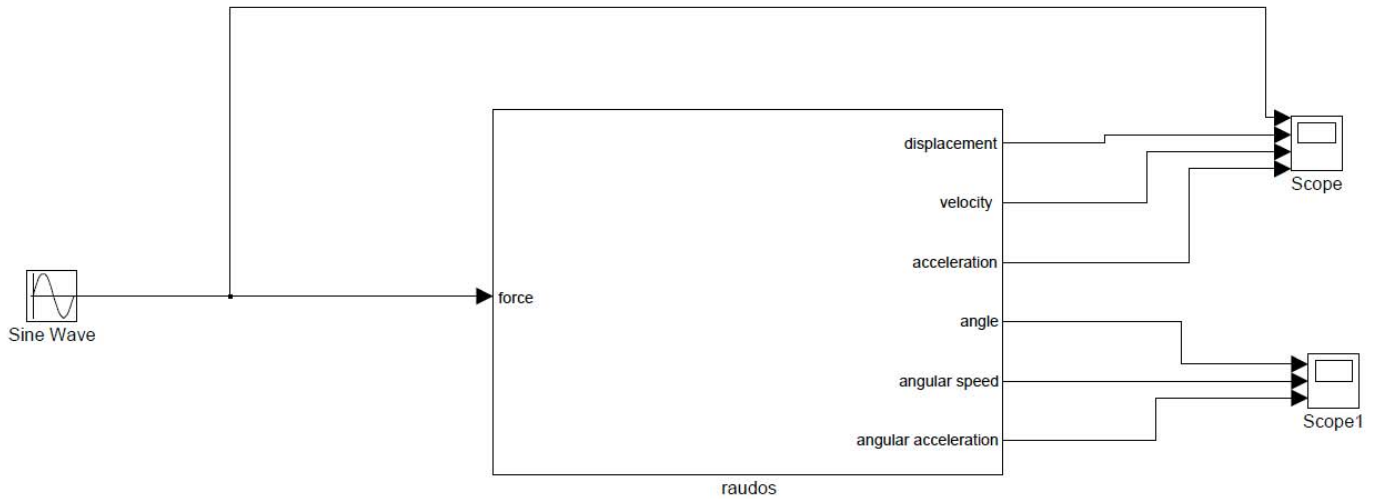
δεύτερο σημείο ελέγχου					
displacement	5.00E-06	3.00E-06	2.00E-06	-40%	-60%
velocity	1.00E-04	7.00E-05	8.00E-05	-30%	-20%
acceleration	2.00E-03	2.00E-03	1.00E-02	0%	+400%

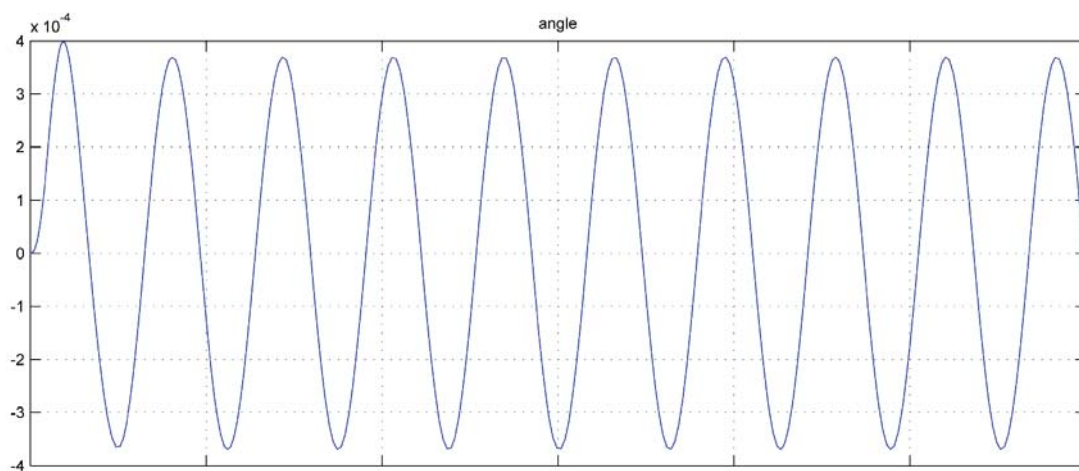
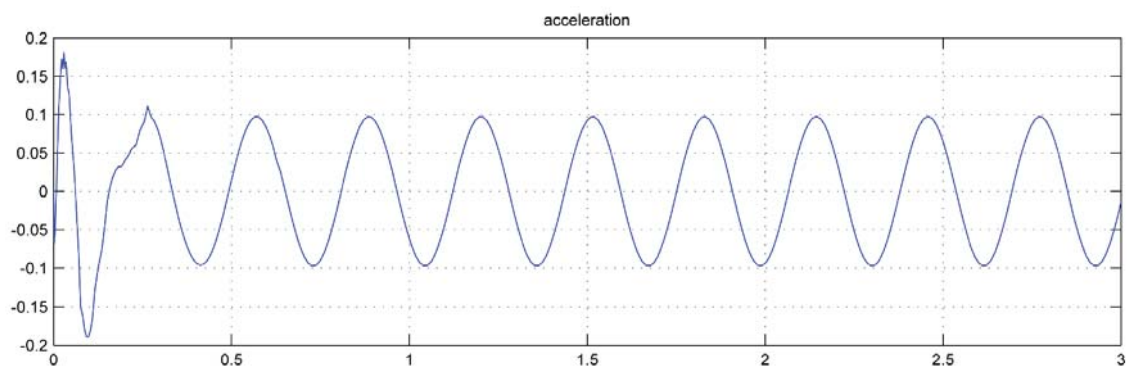
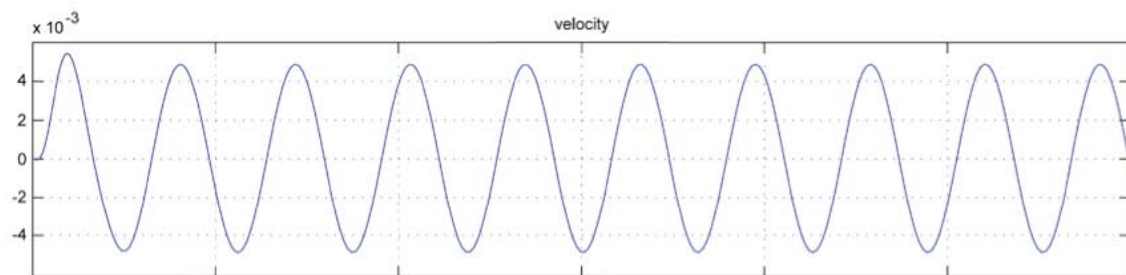
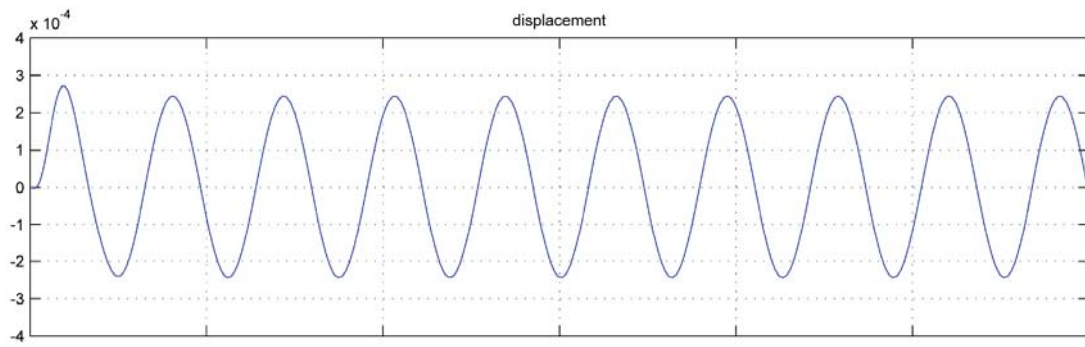
Στο συγκεκριμένο μοντέλο από τον έλεγχο επιτυγχάνουμε διαφορετικά αποτελέσματα από τα προηγούμενα μοντέλα. Στην εναλλακτική όπου χρησιμοποιούμε δυο ασαφείς ελεγκτές μειώνουμε την ταλάντωση κατά 40% ενώ σε αυτήν με την χρήση ενός ασαφούς ελεγκτή και ενός εκπαιδευμένου νευροασαφούς κατά 60%. δηλαδή επιτυγχάνουμε 33% μεγαλύτερη μείωση της ταλάντωσης. Αν και στο μοντέλο με τους δυο ασαφείς ελεγκτές η ταχύτητες μειώνονται κατά 14% περισσότερο λαμβάνοντας υπόψιν την μικρότερη μείωση της ταλάντωσης που προκαλεί στην ράβδο, οι μετρήσεις μας μπορούν να θεωρηθούν ανάλογες. Τέλος, στο μοντέλο ελέγχου με χρήση δύο ελεγκτών Mamdani δεν παρατηρούμε αύξηση των τιμών των επιταχύνσεων, ενώ σε αυτό

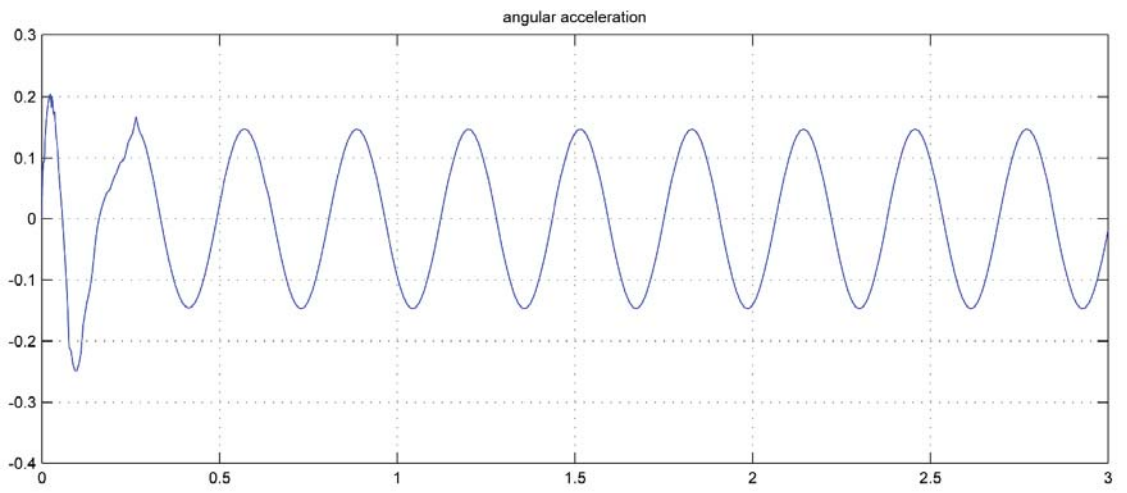
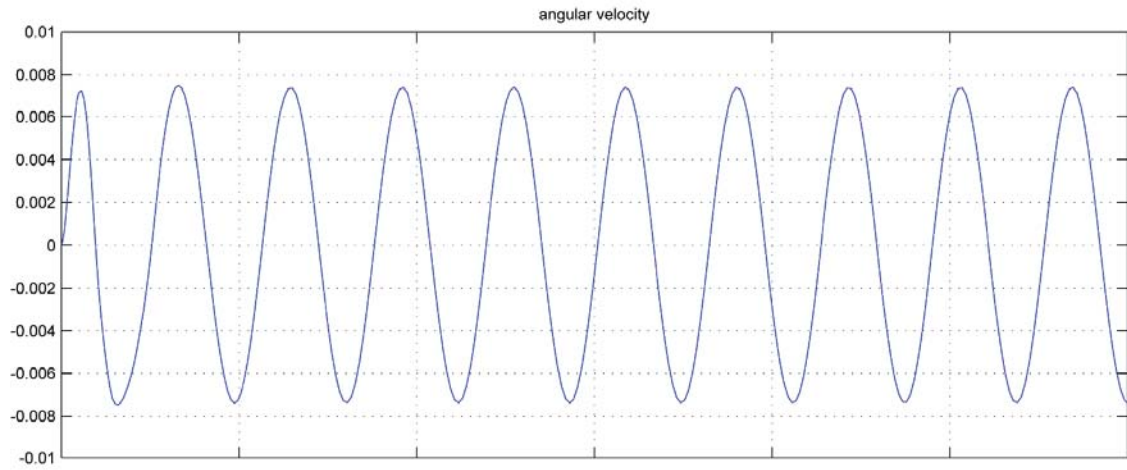
Παράρτημα

Παρουσίαση αποτελεσμάτων και μοντέλων simulink

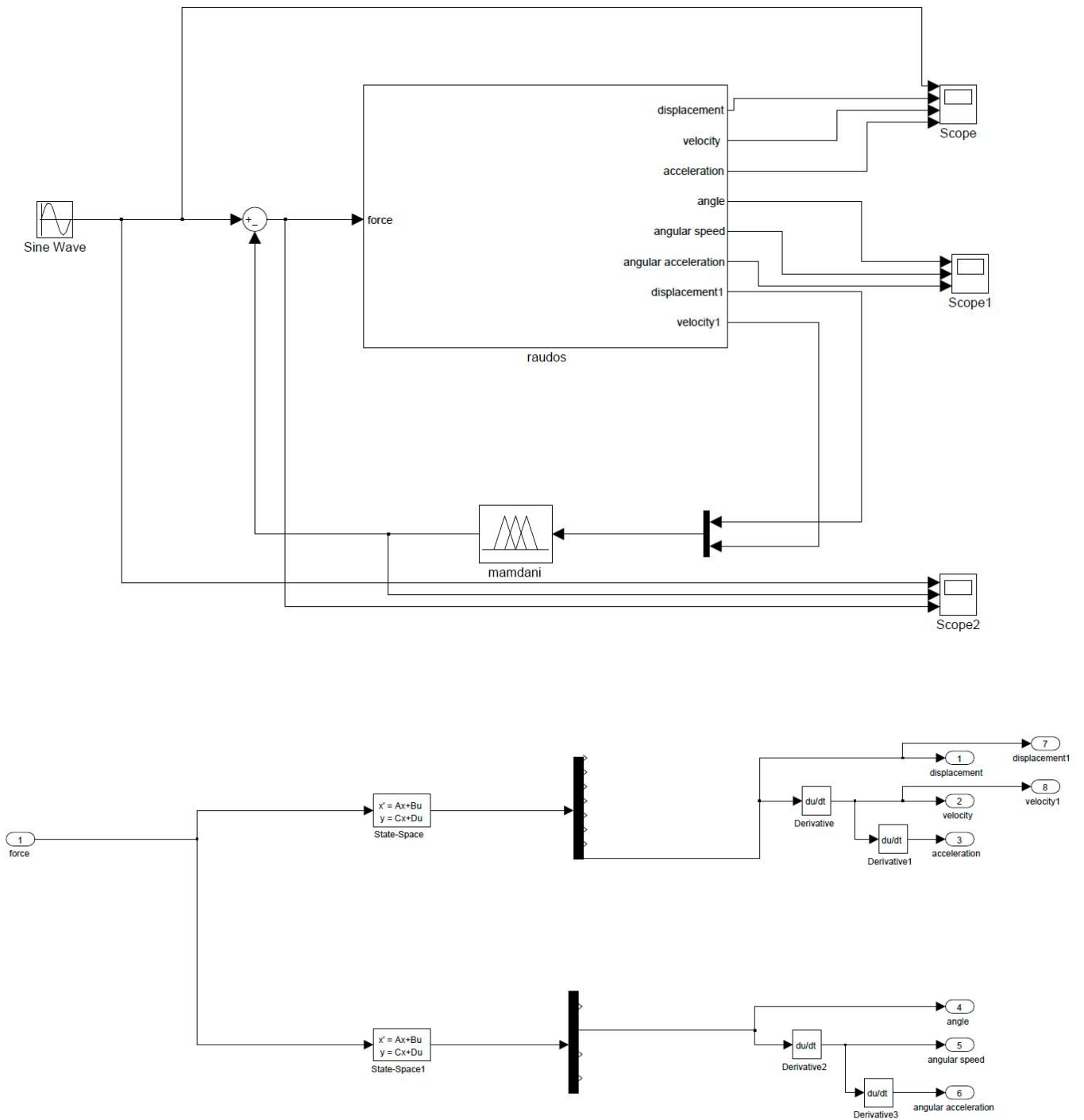
Final1 ανάλυση μοντέλου A (με βάση απόκλιση θέσης) χωρίς έλεγχο:

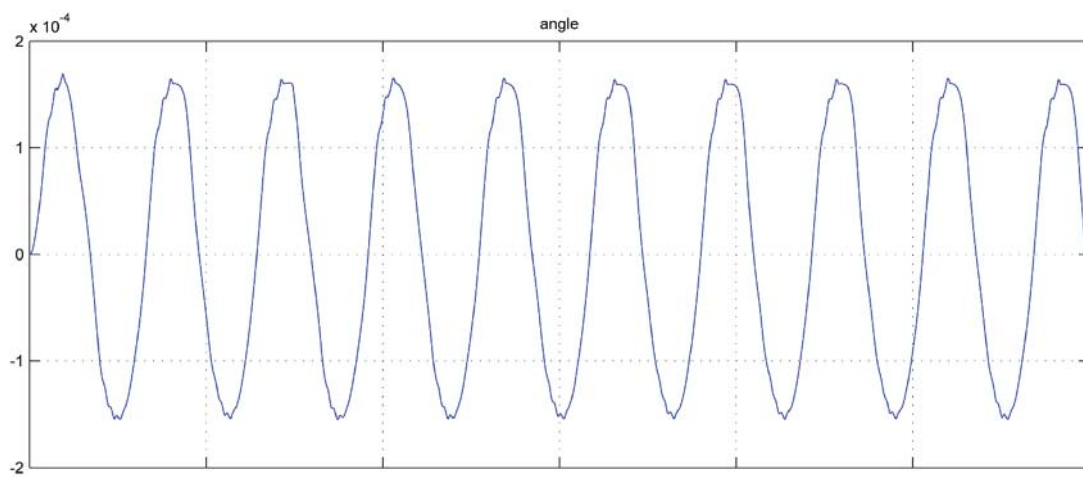
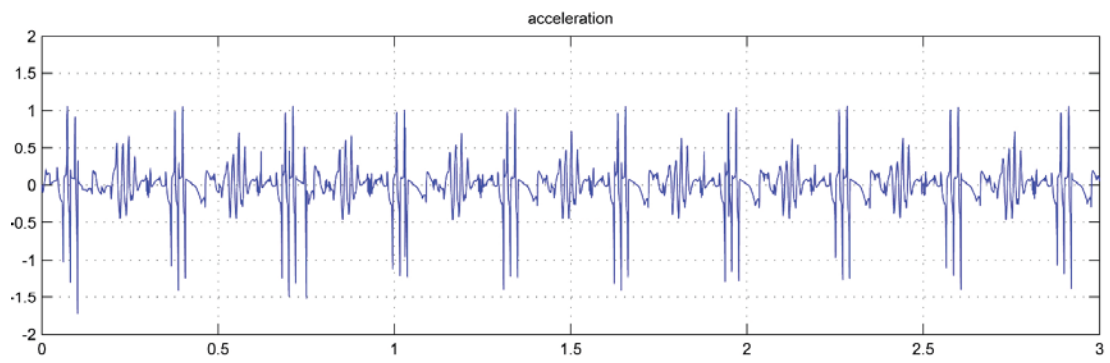
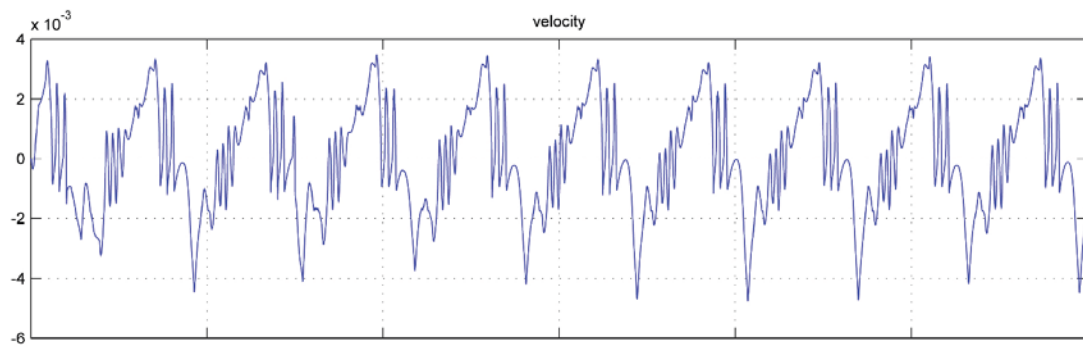
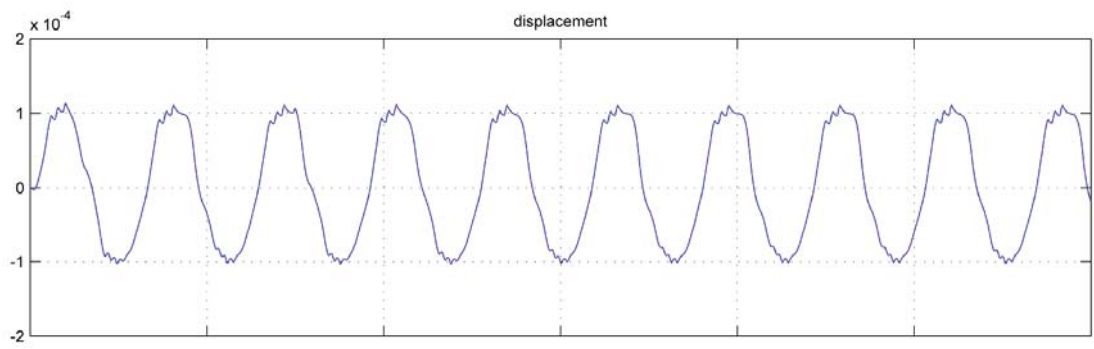


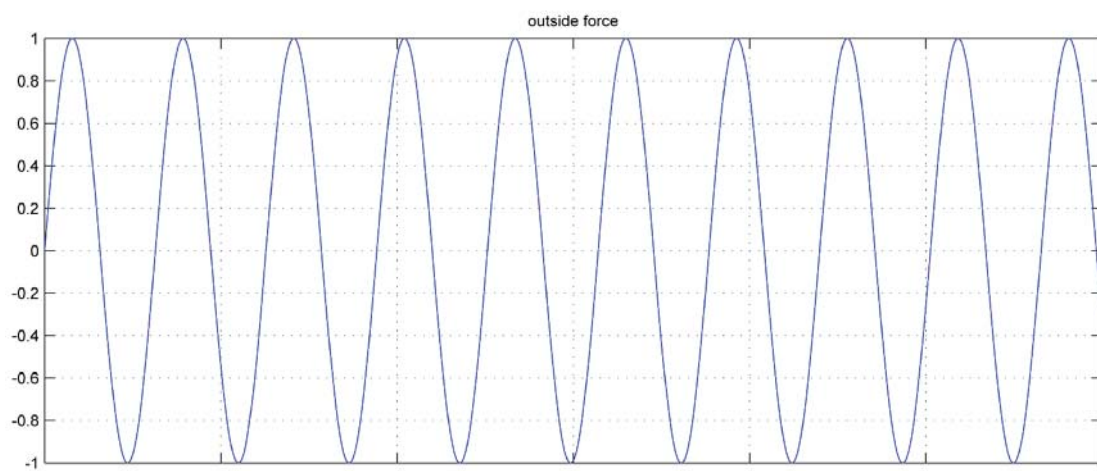
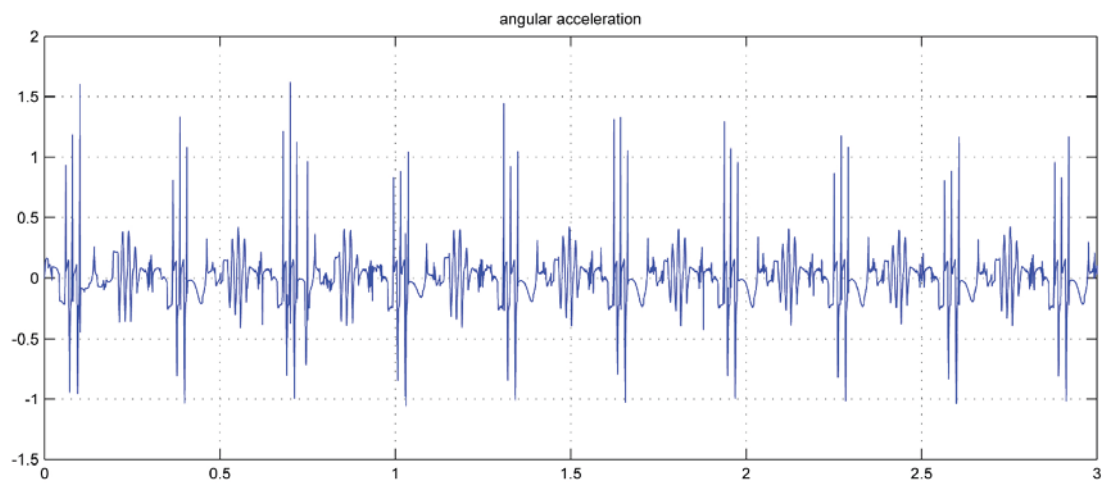
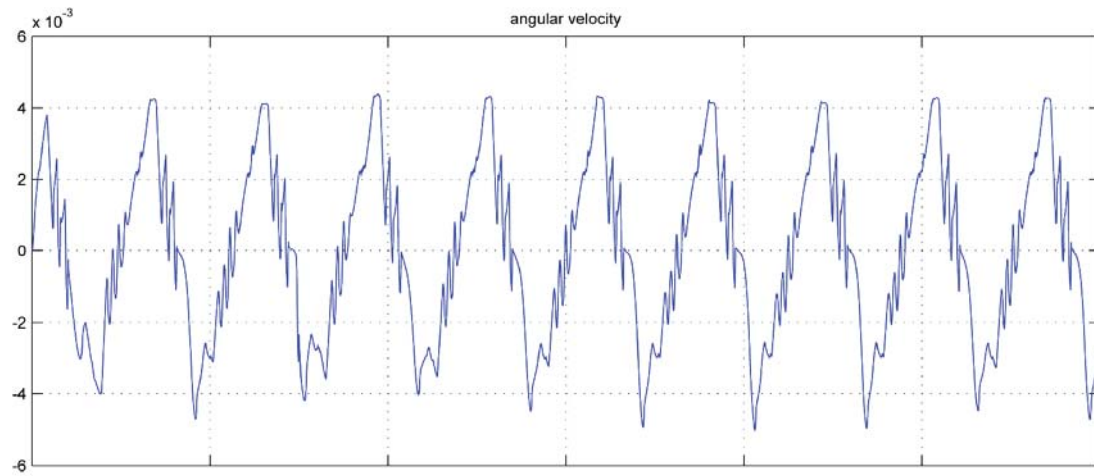


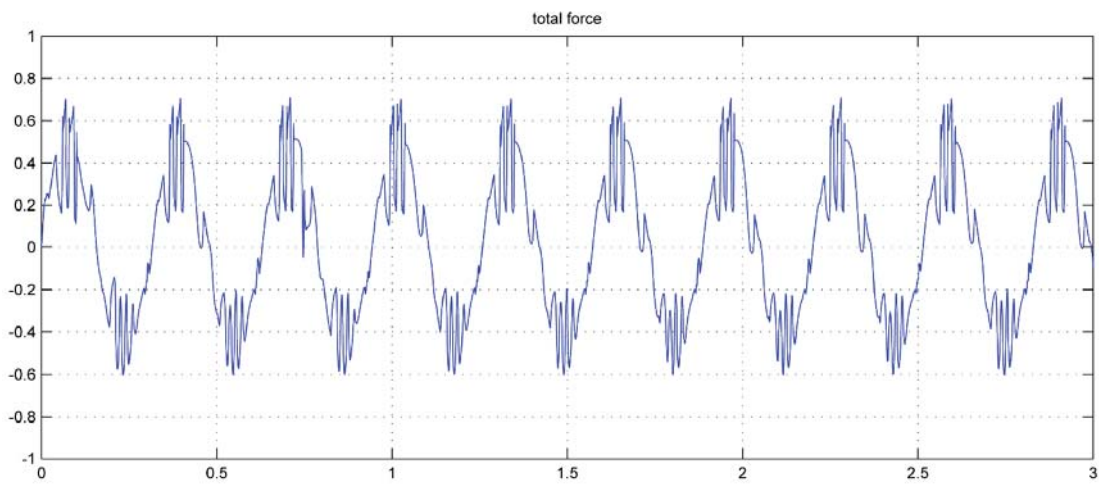
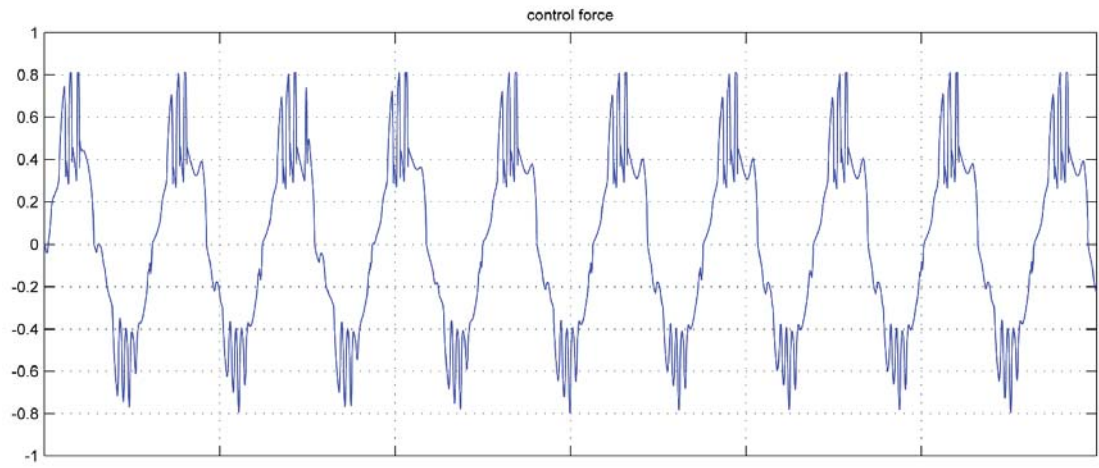


Final2 ανάλυση μοντέλου A (με βάση απόκλιση θέσης) με έναν ασαφή ελεγκτή:

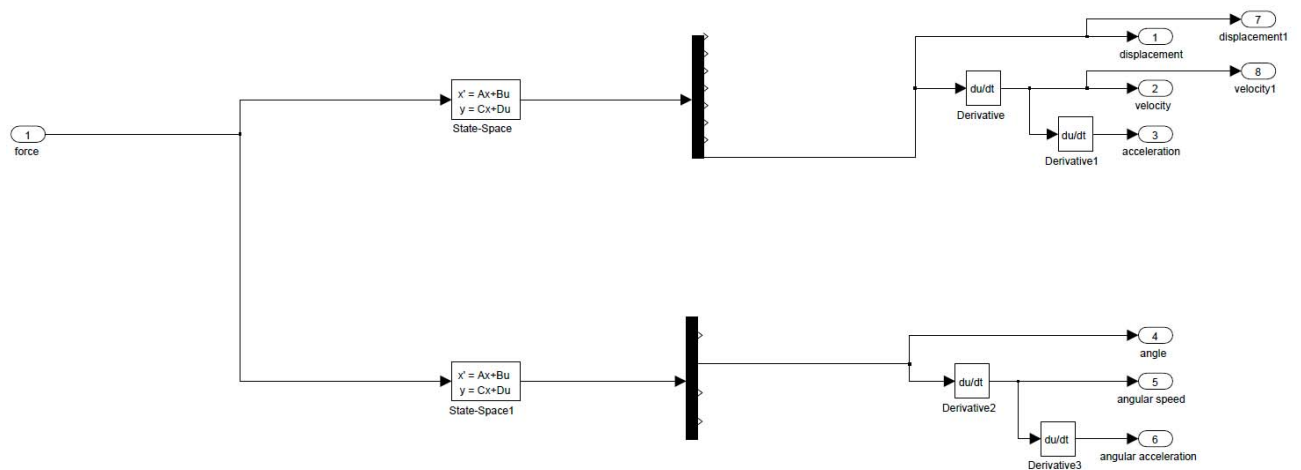
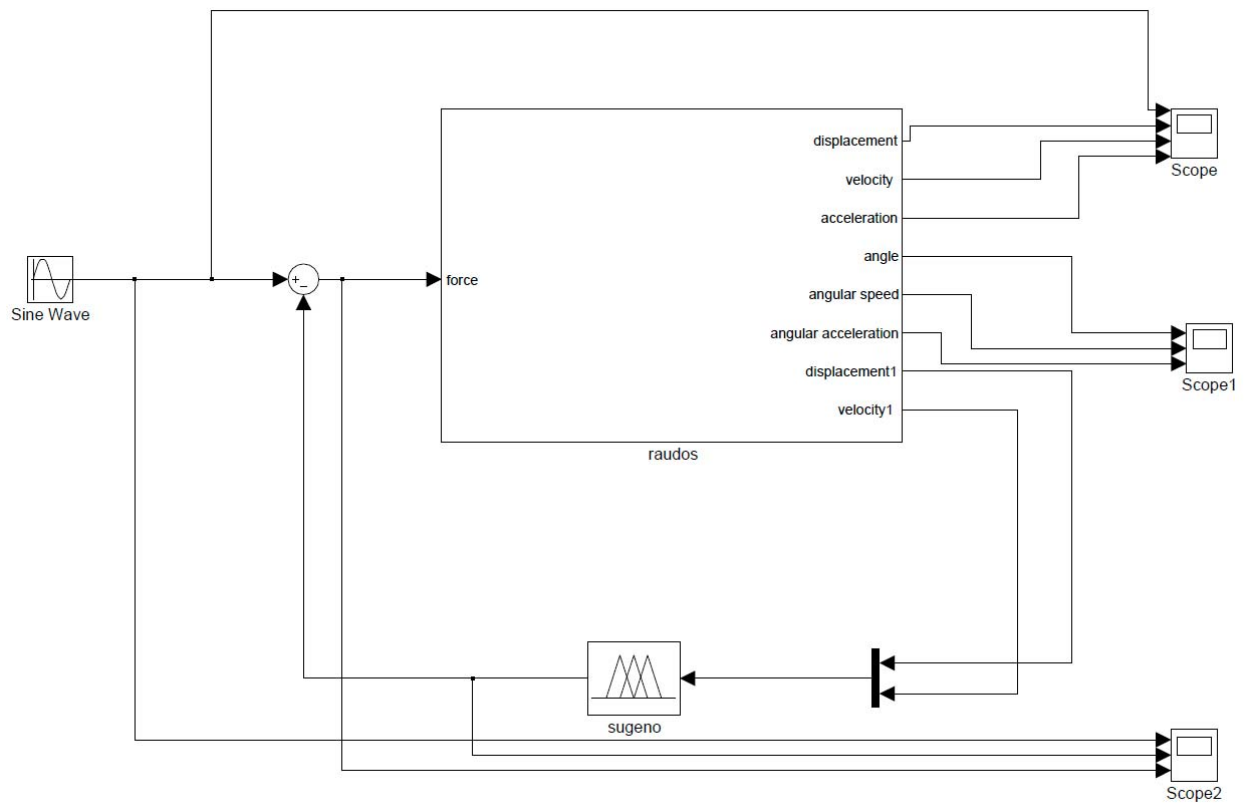


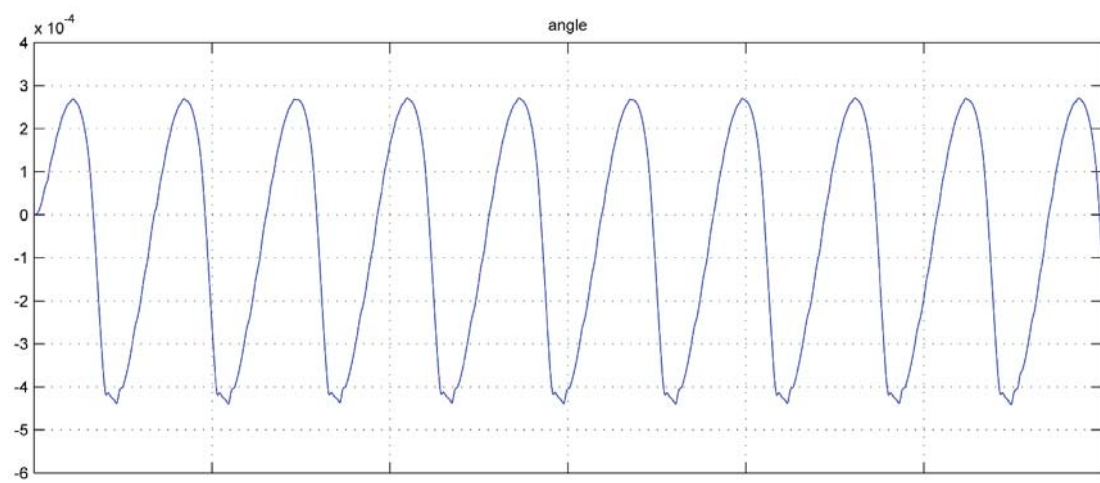
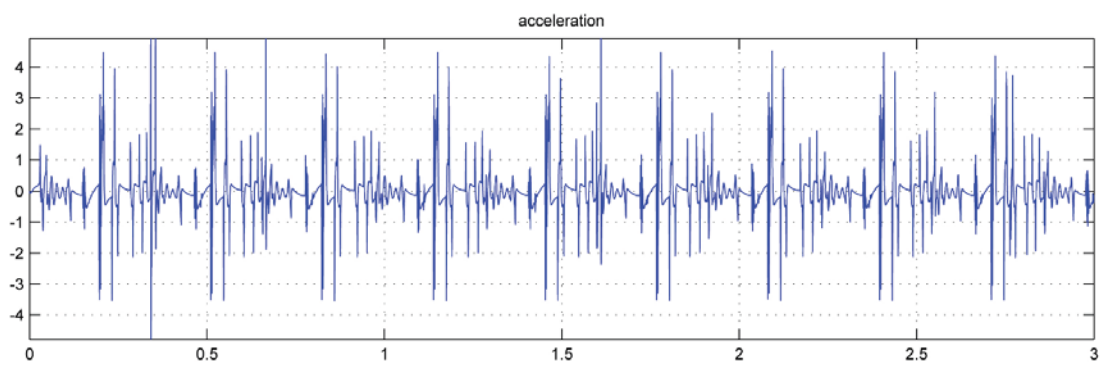
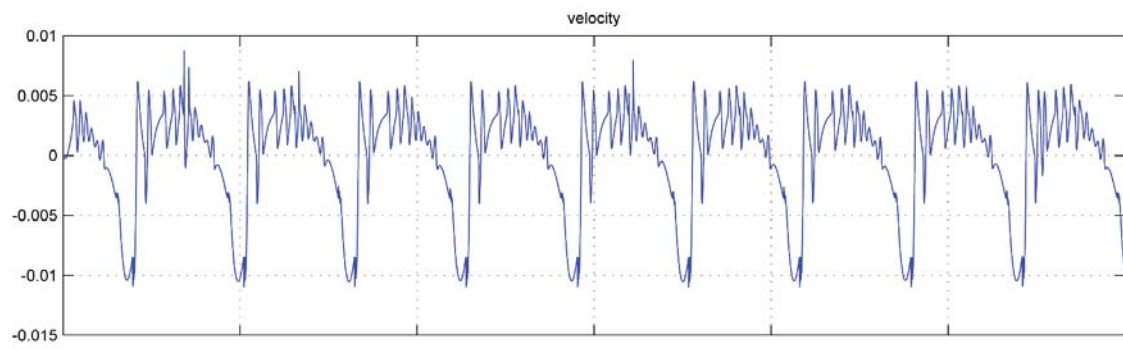
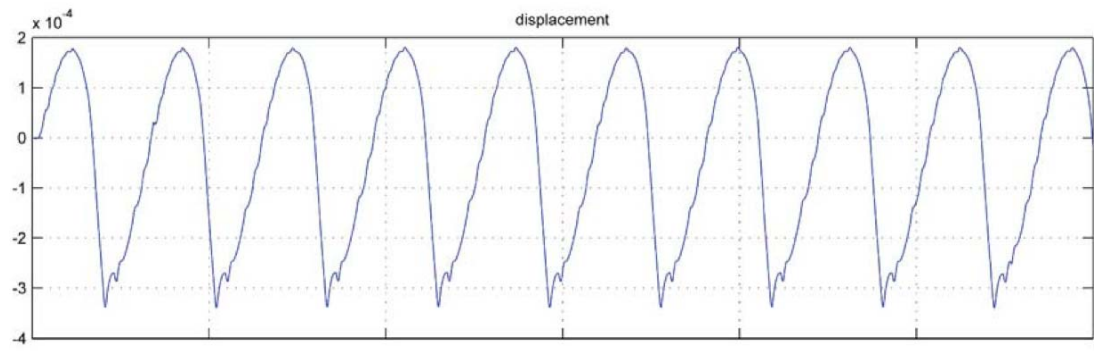


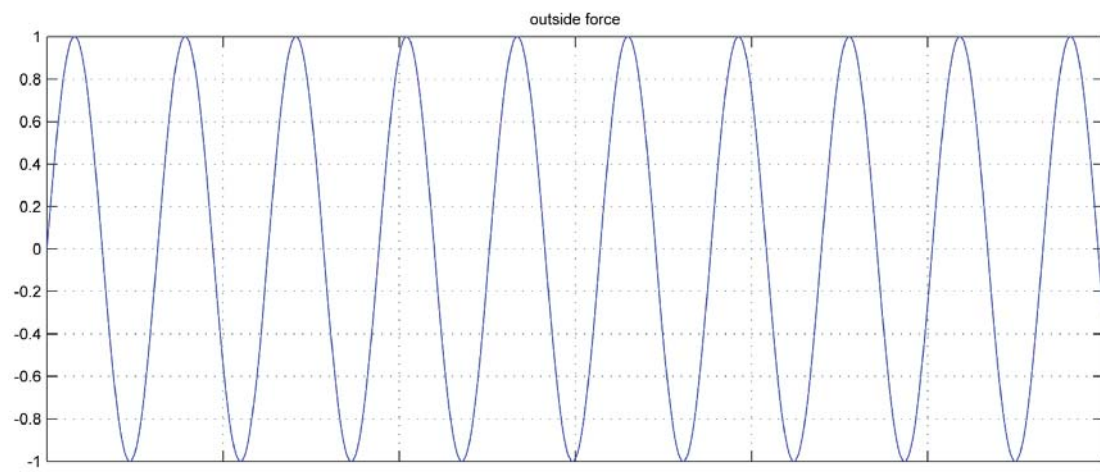
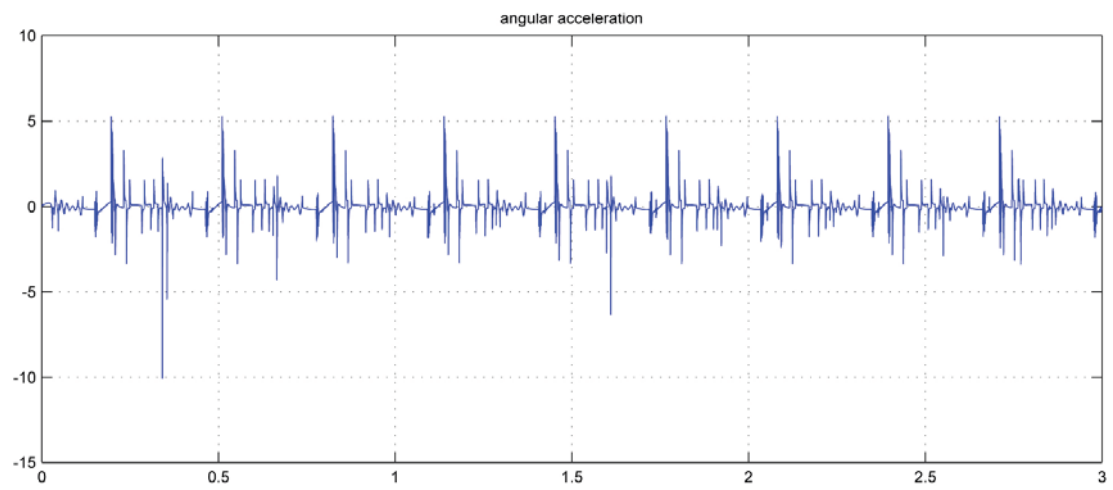
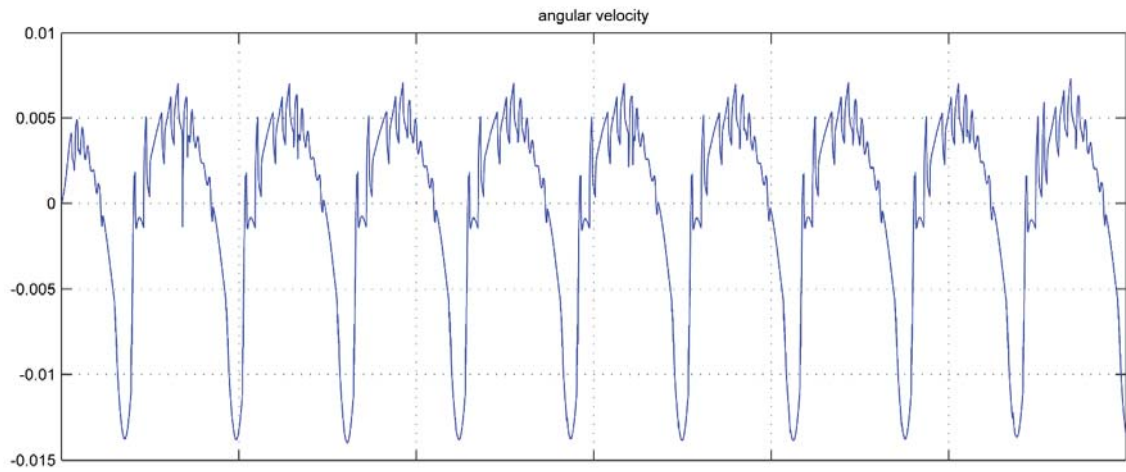


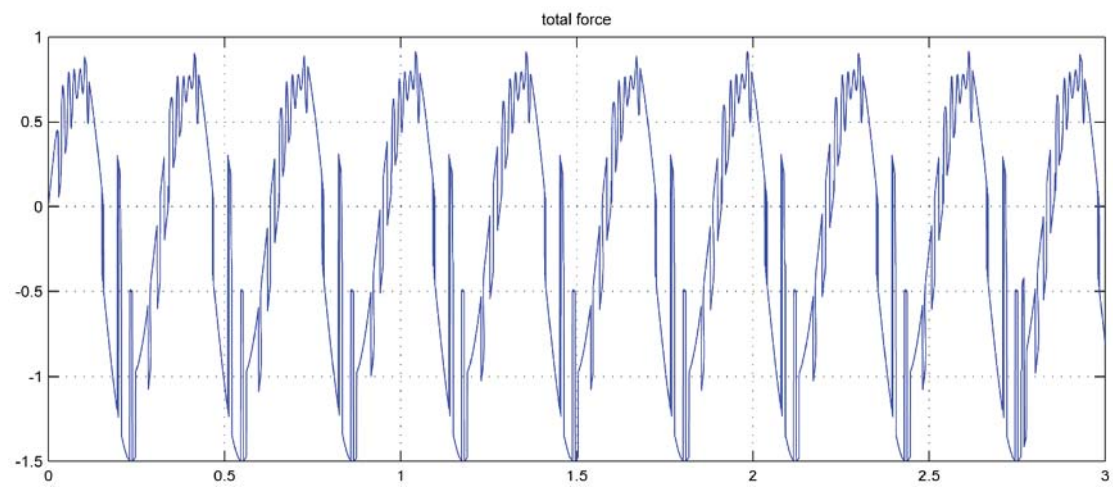
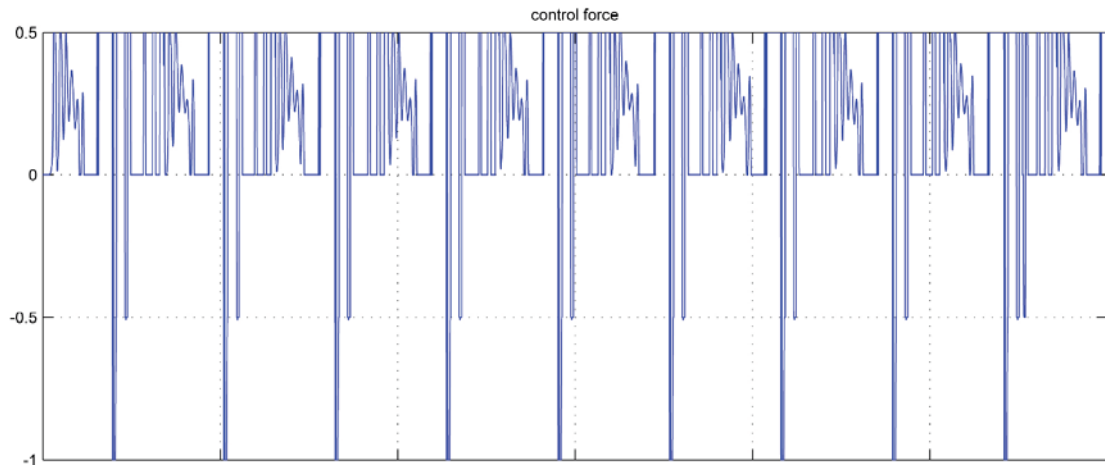


Final 3 ανάλυση μοντέλου A (με βάση απόκλιση θέσης) με έναν νευροασαφή ελεγκτή πριν την εκπαίδευση:

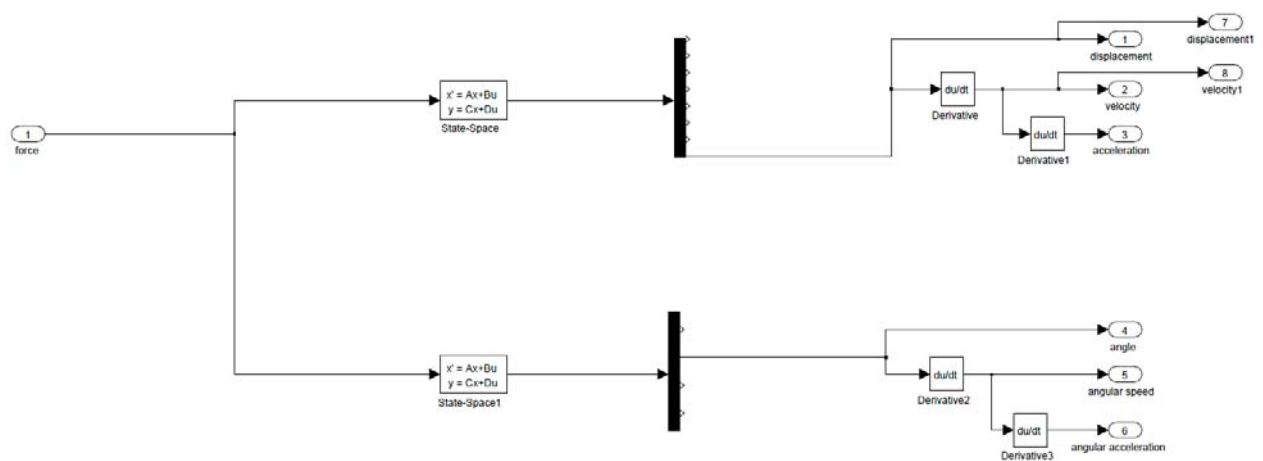
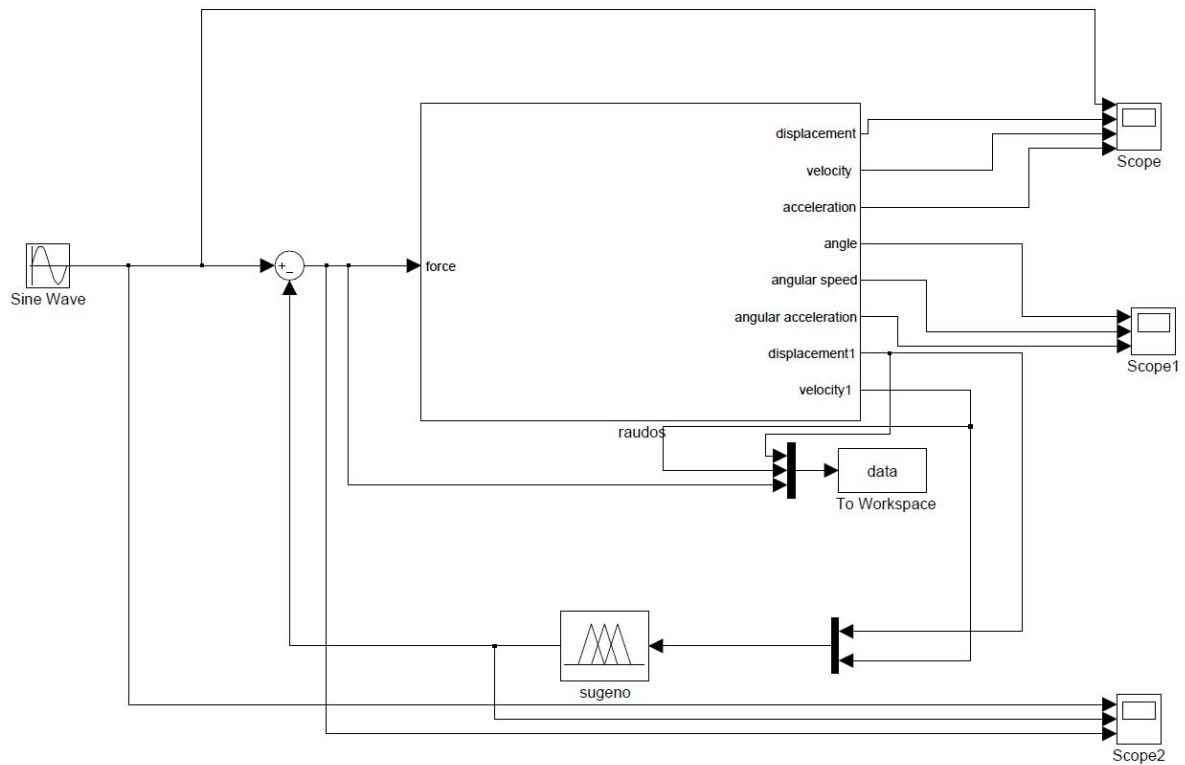


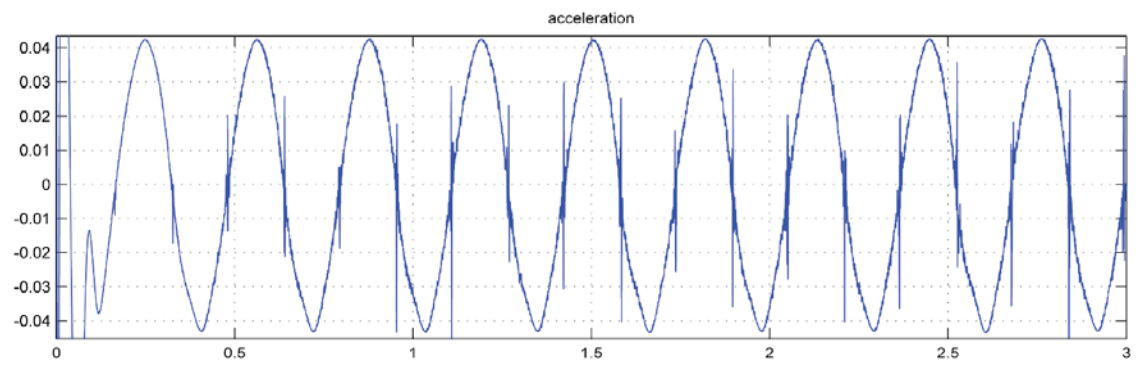
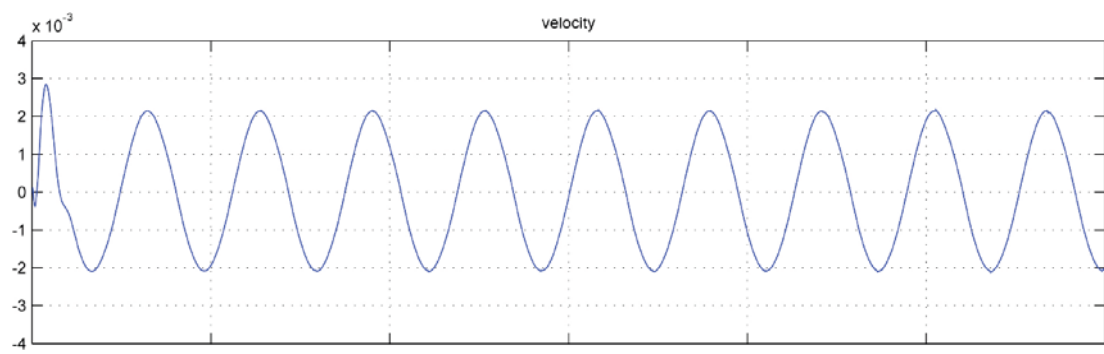
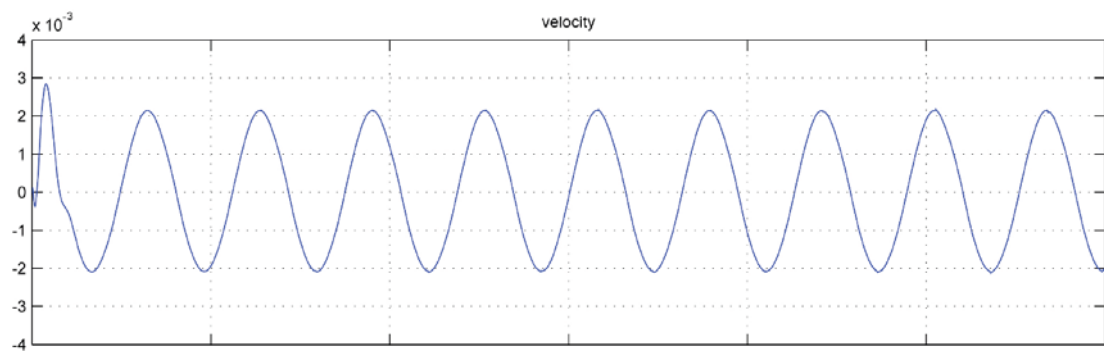
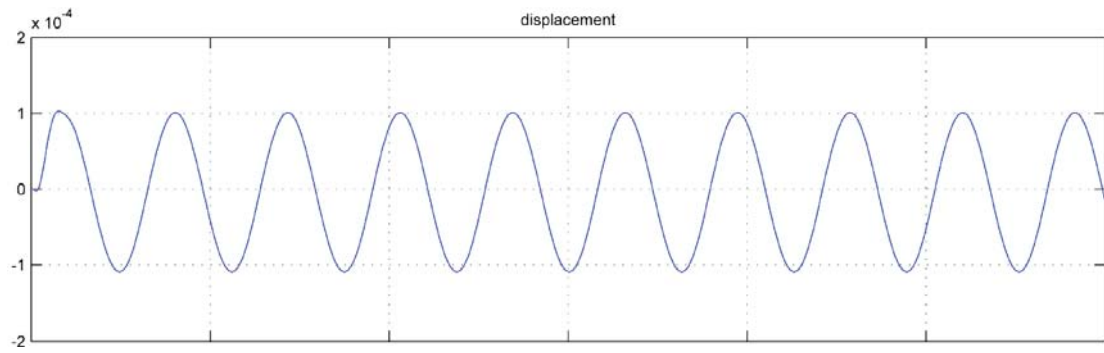


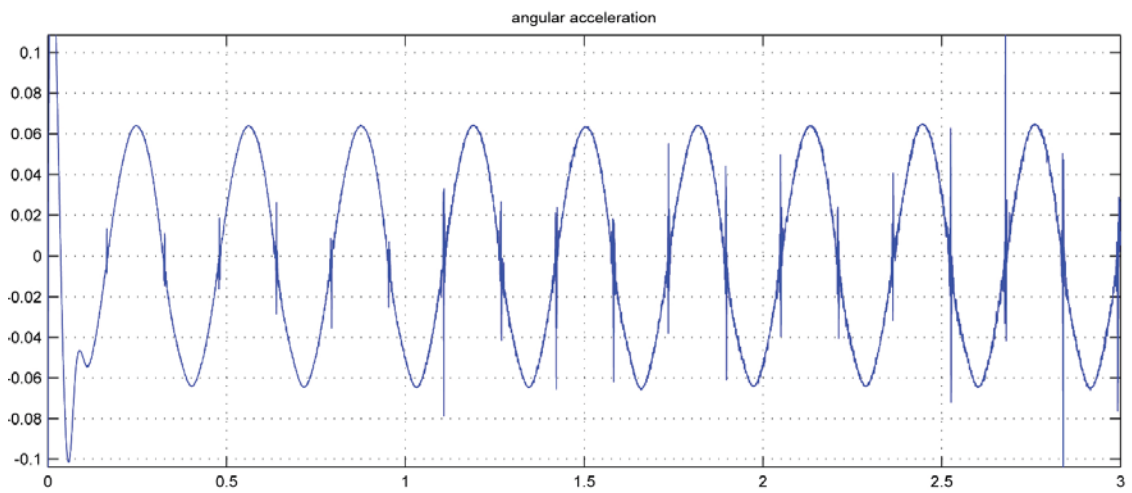
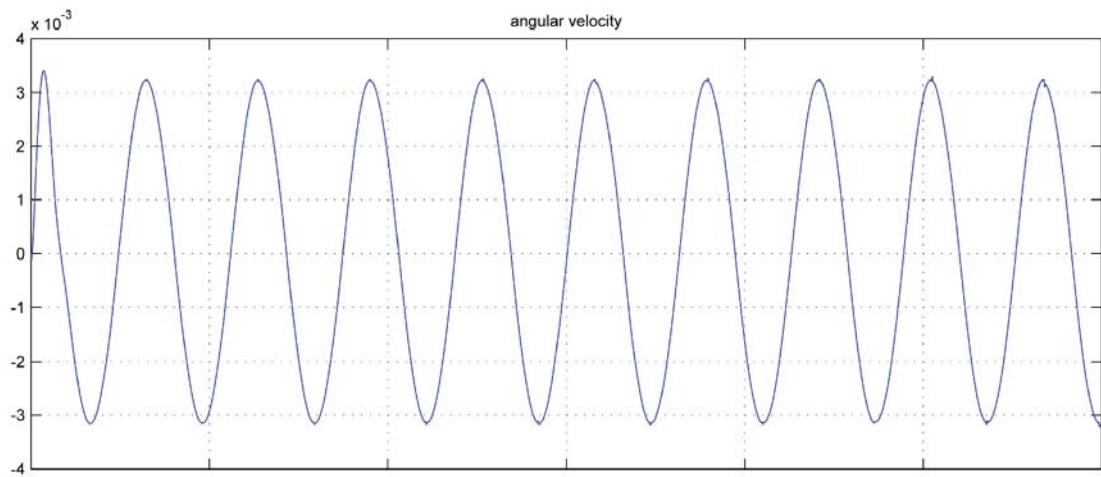
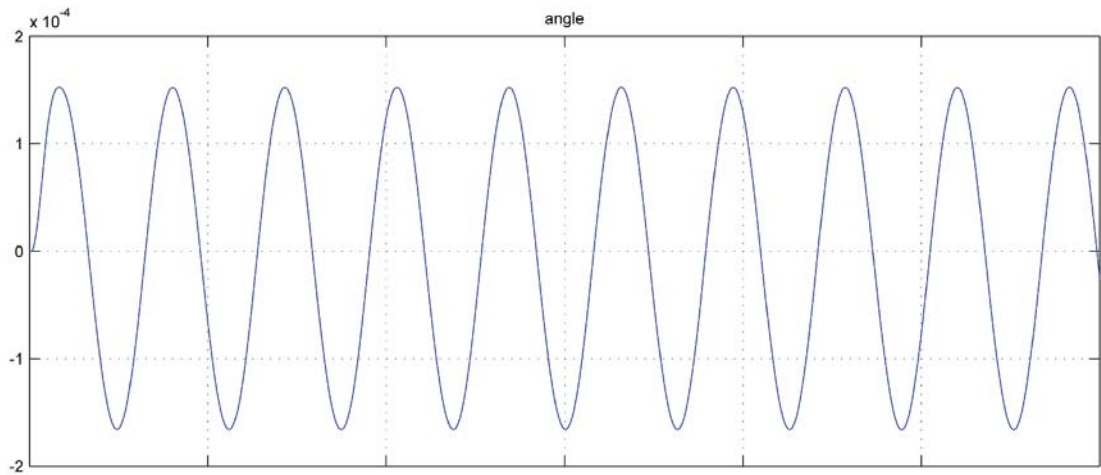


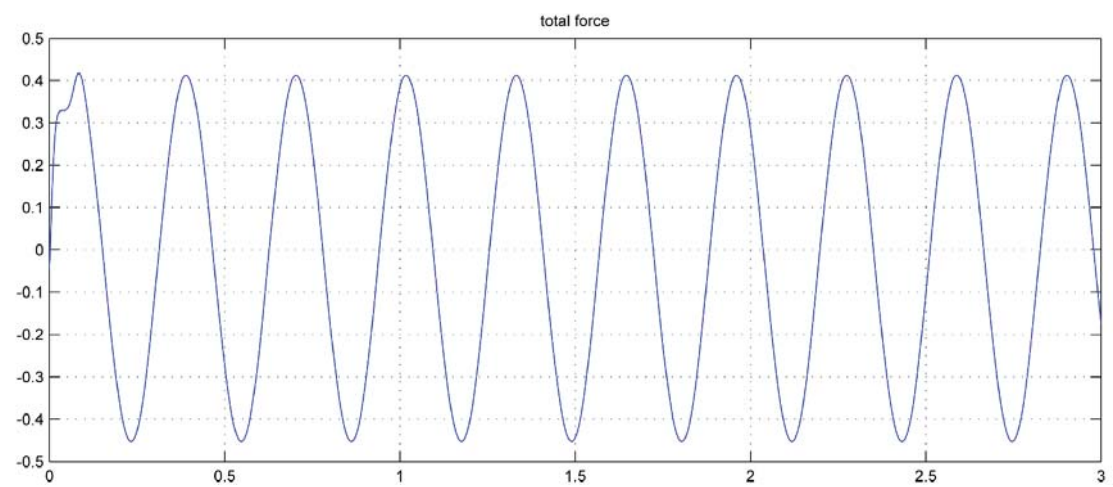
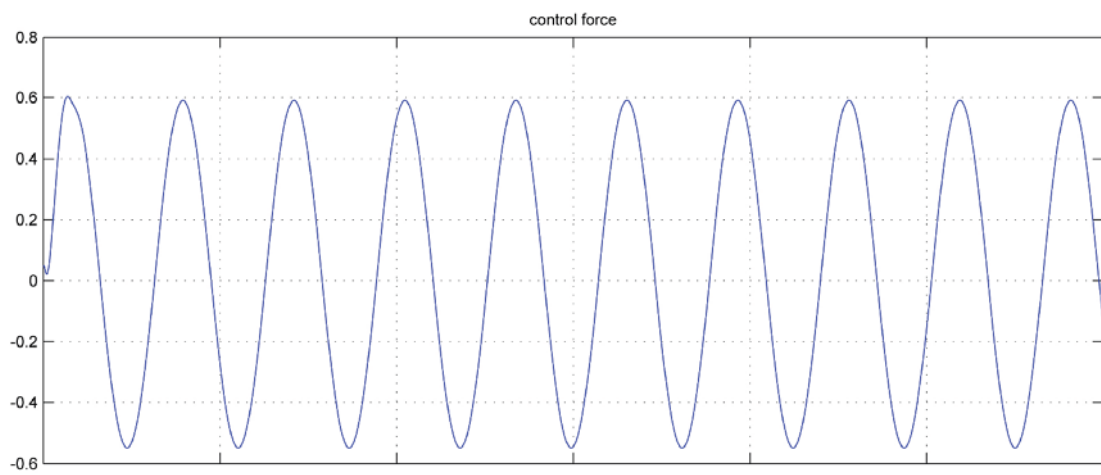
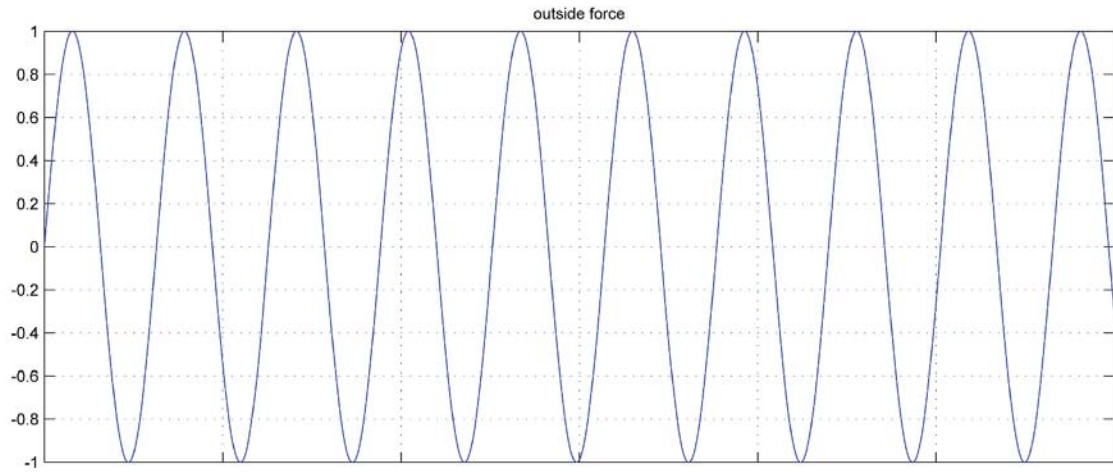


Final 4 ανάλυση μοντέλου A (με βάση απόκλιση θέσης) με έναν εκπαιδευμένο νευροασαφή ελεγκτή:

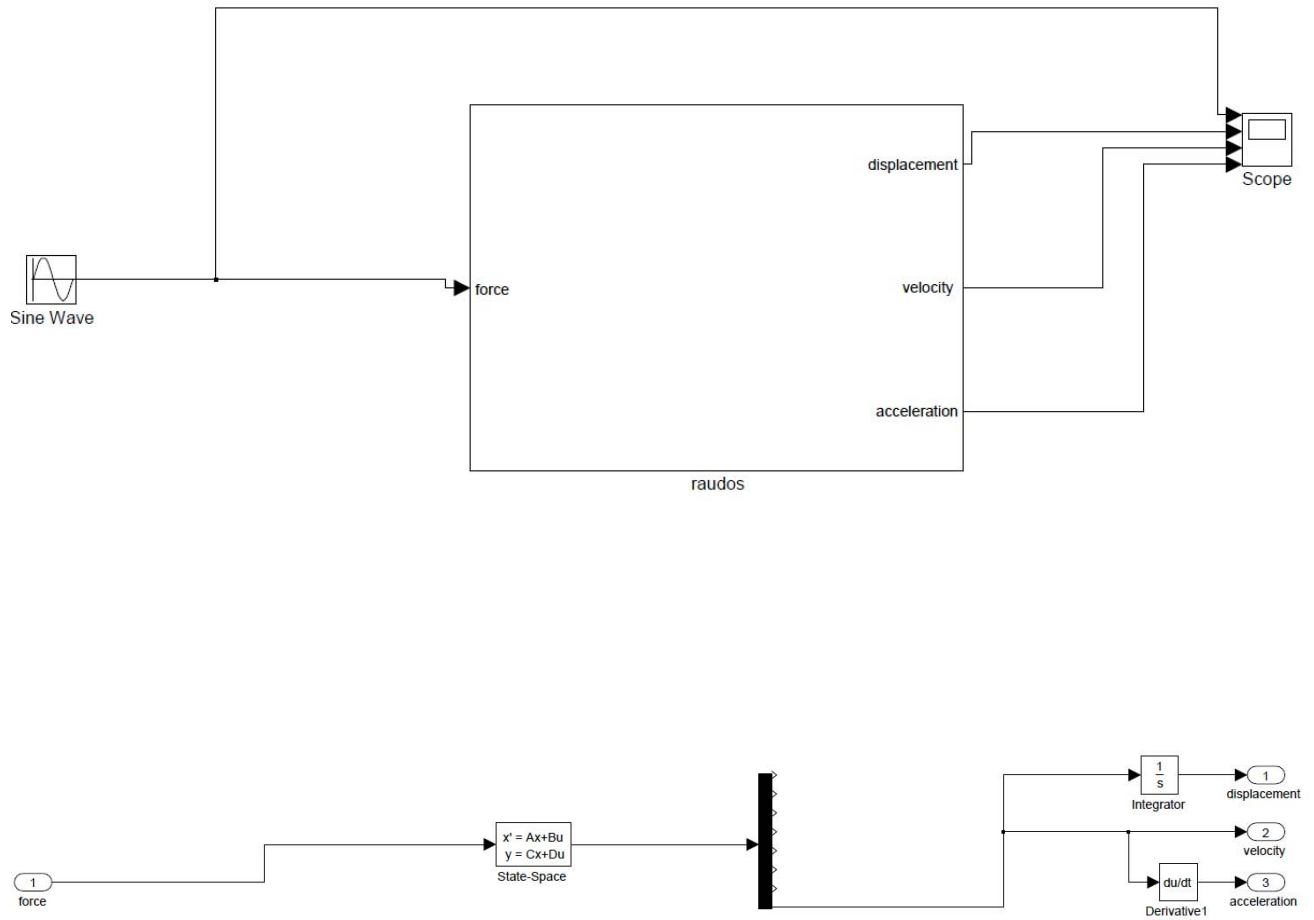


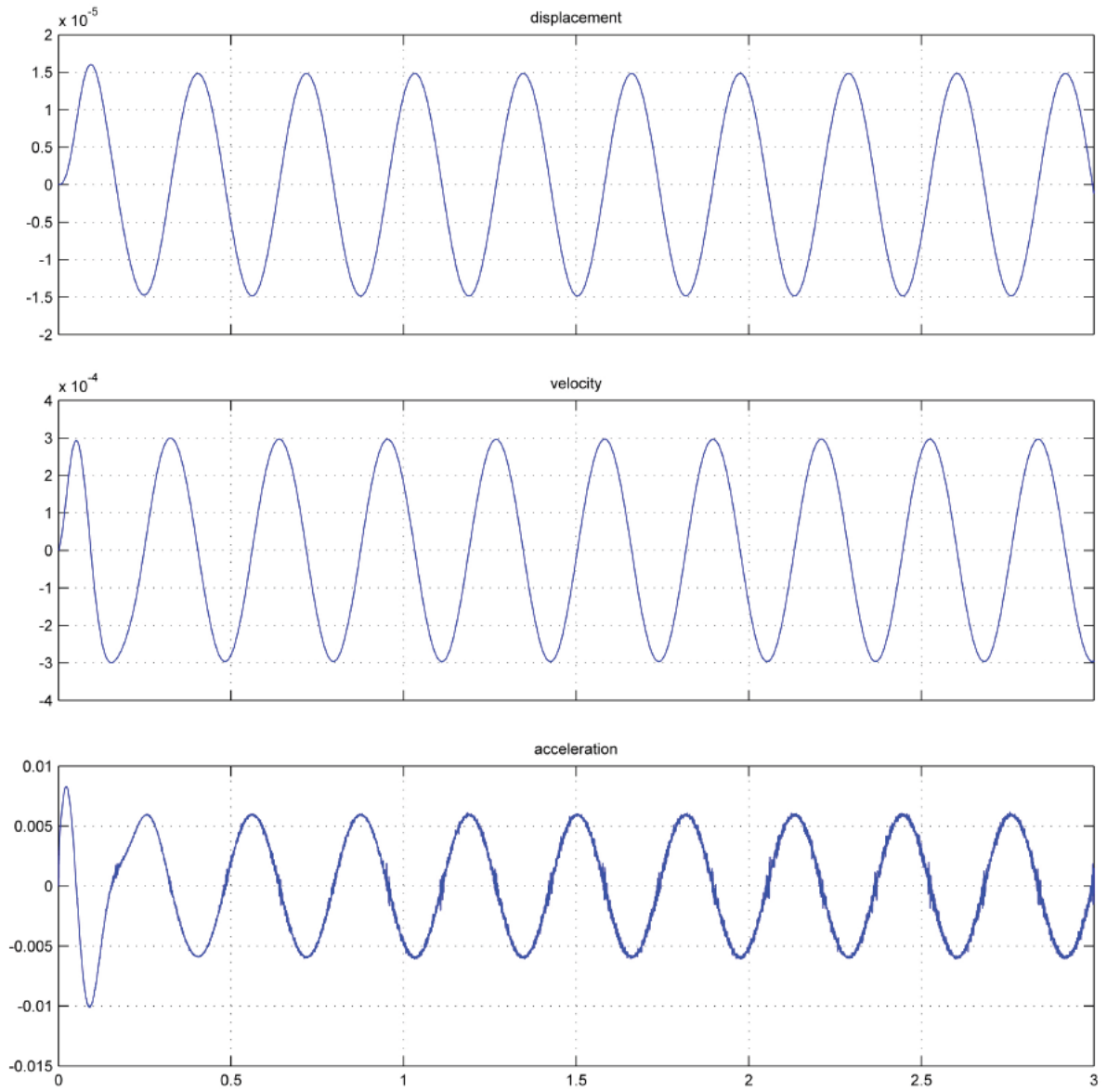




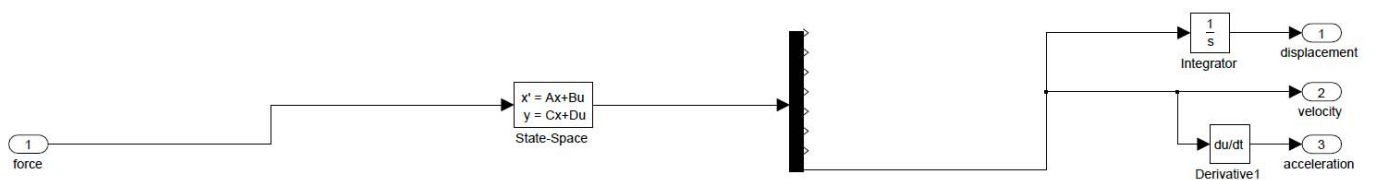
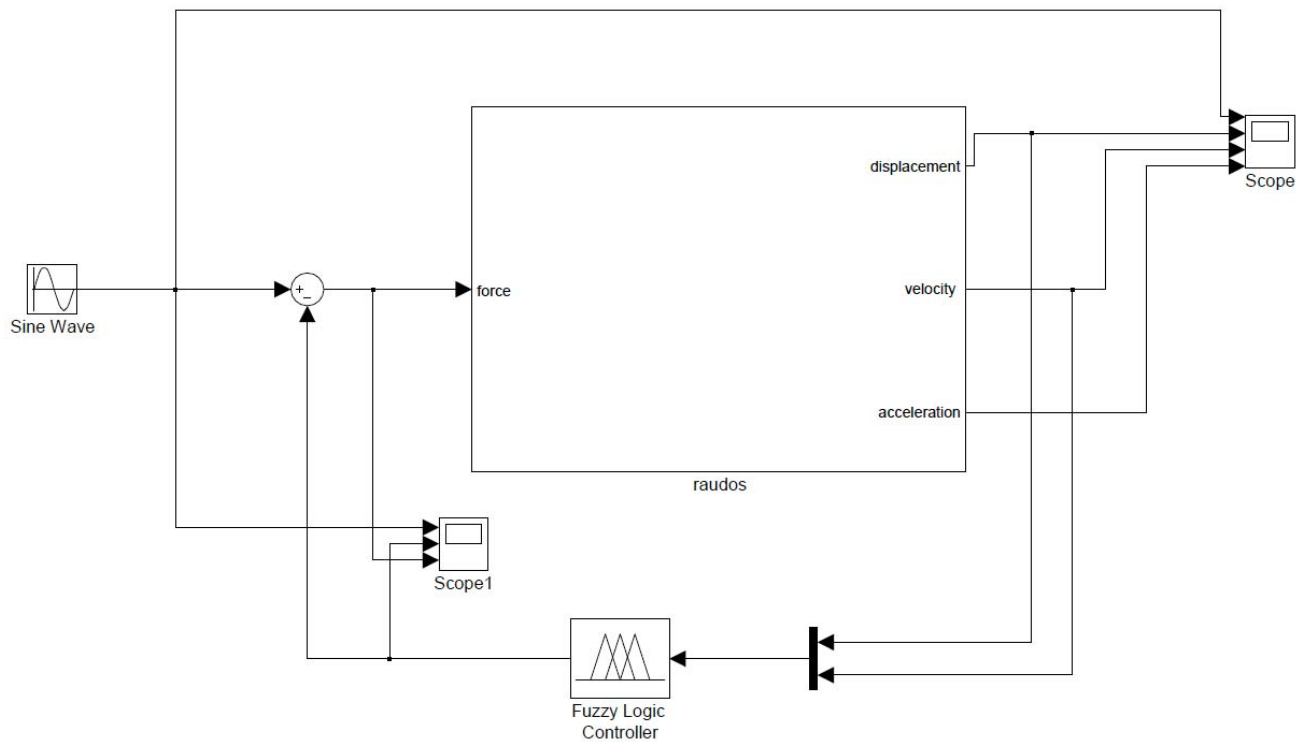


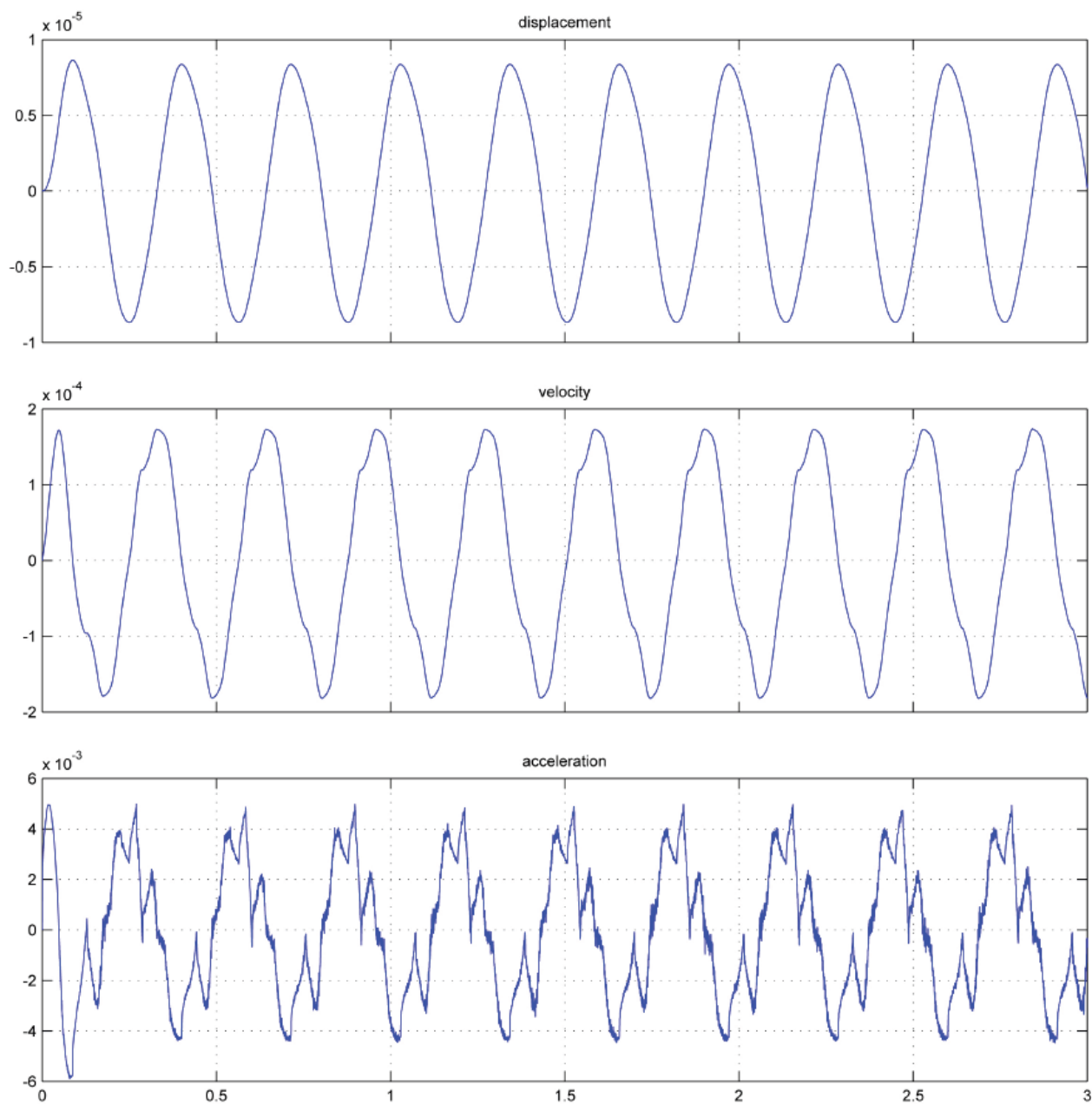
Final 5 ανάλυση μοντέλου B (με βάση την ταχύτητα) χωρίς ελεγκτή:



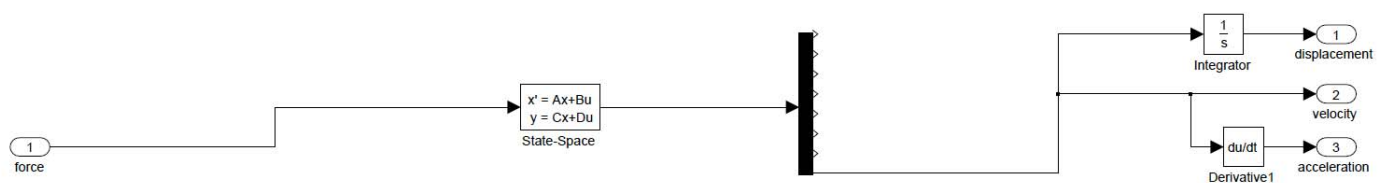
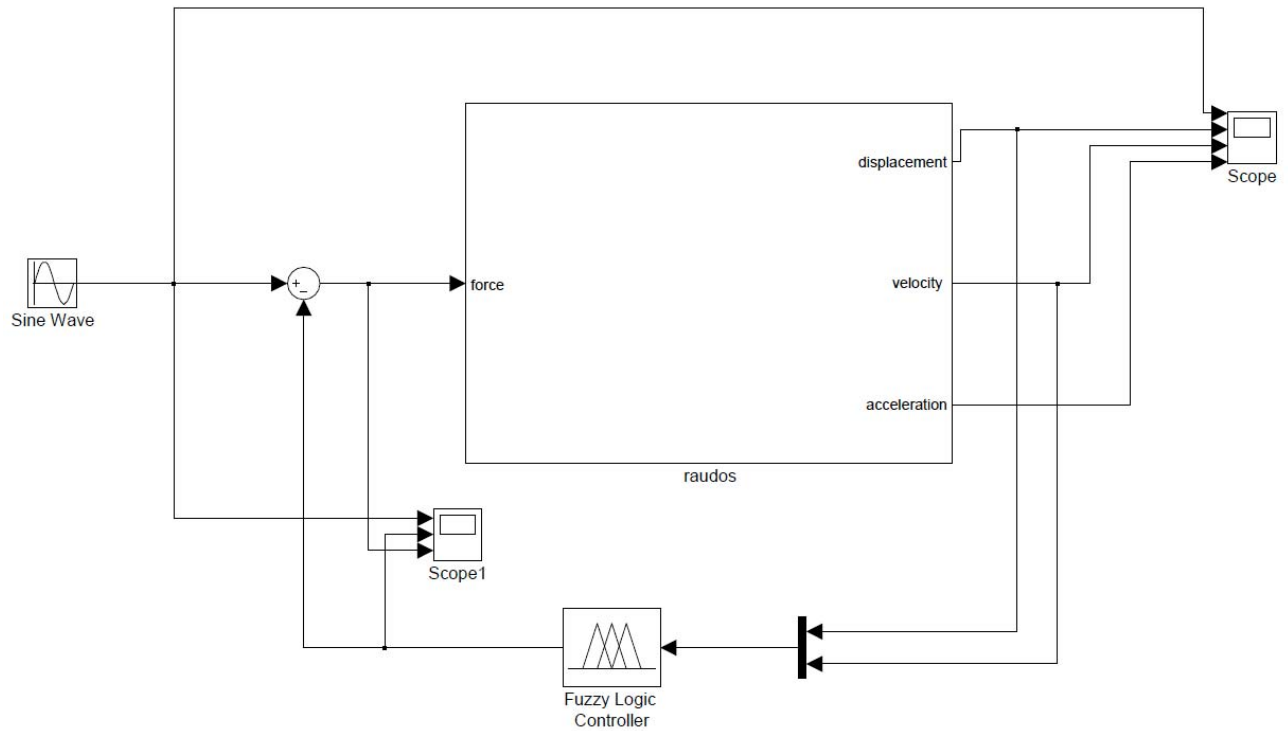


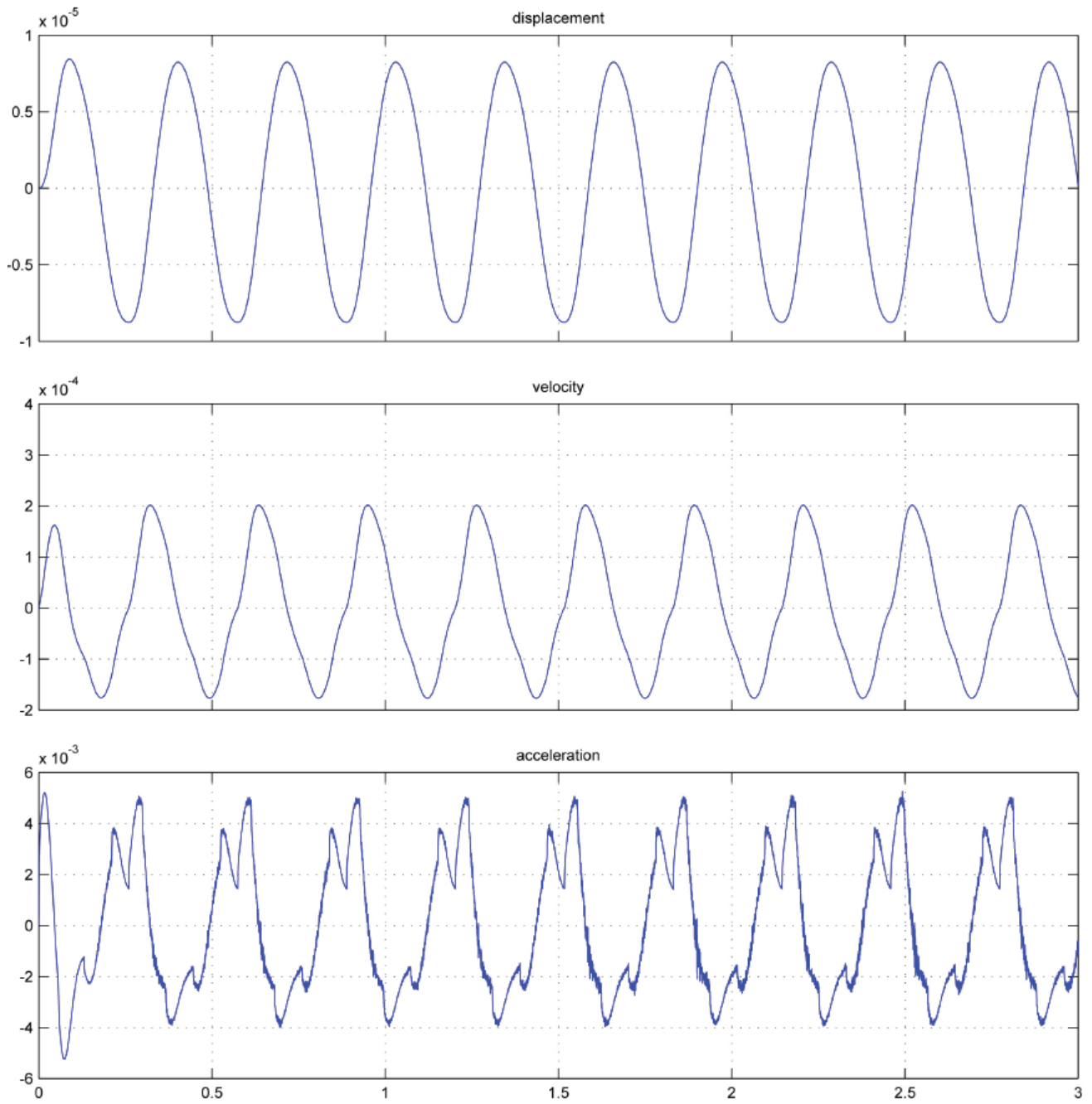
Final 6 ανάλυση μοντέλου B (με βάση την ταχύτητα) με χρήση ενός ασαφούς ελεγκτή:



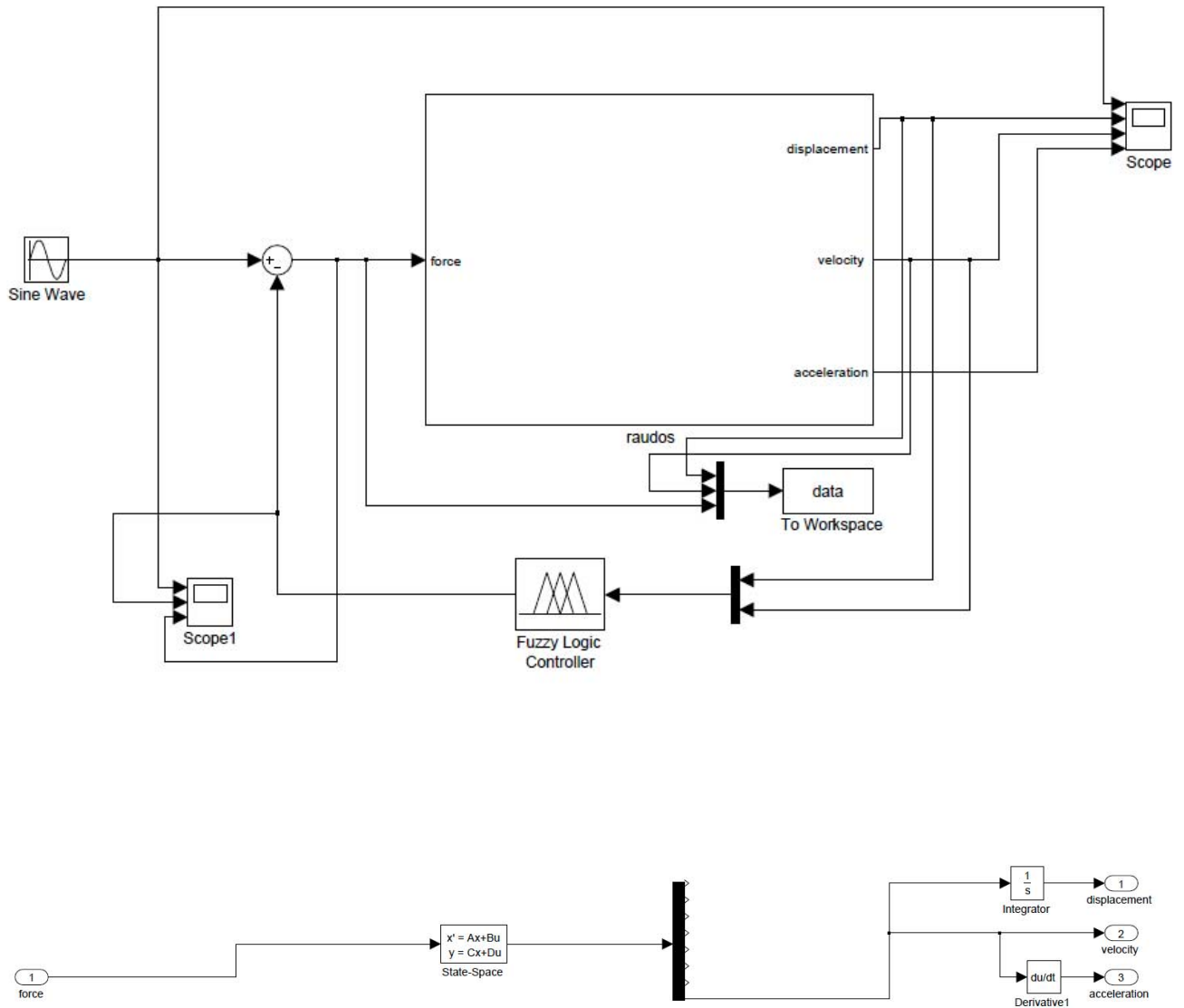


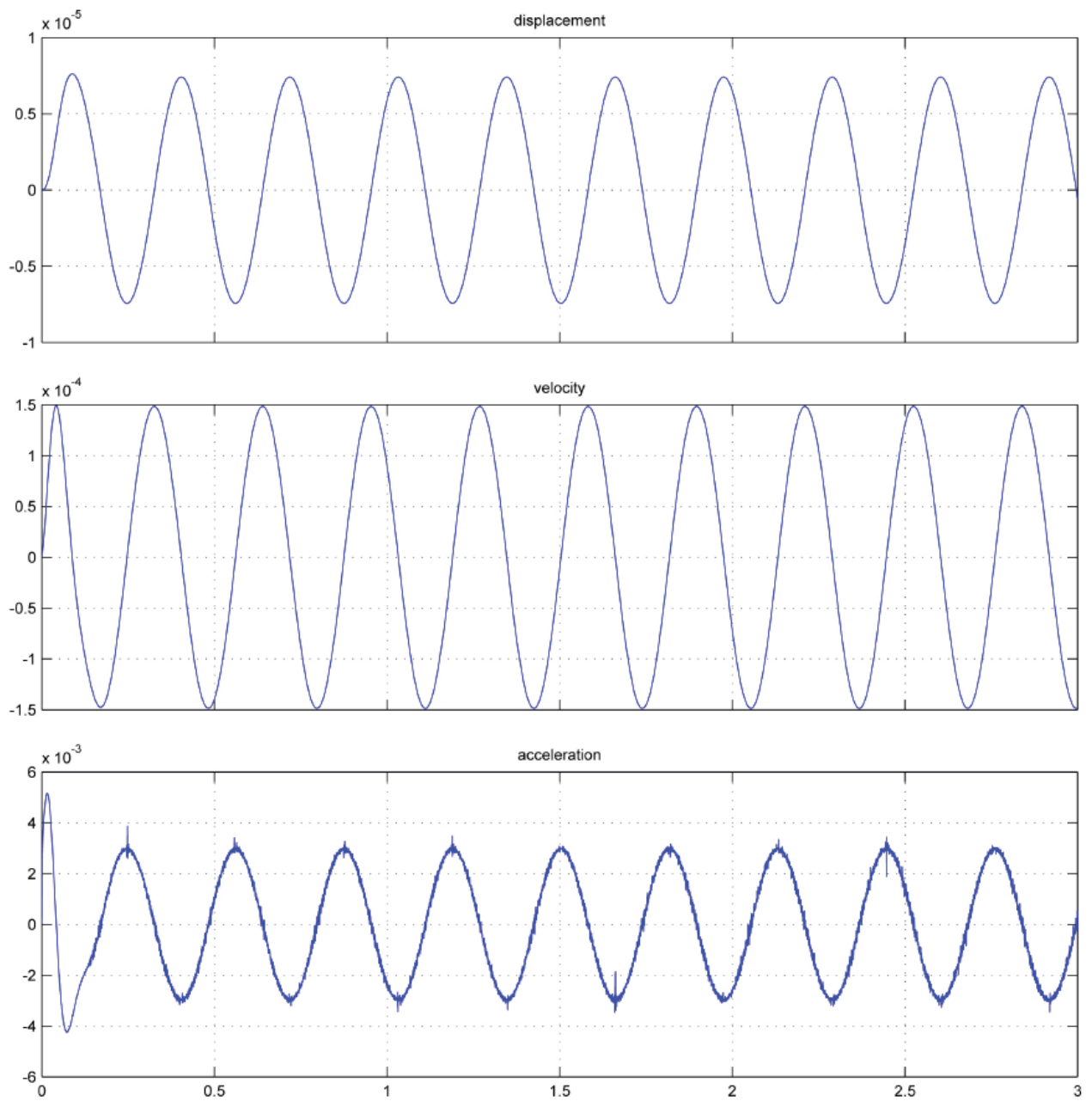
Final 7 ανάλυση μοντέλου B (με βάση την ταχύτητα) με έναν νευροασαφή ελεγκτή πριν την εκπαίδευση:



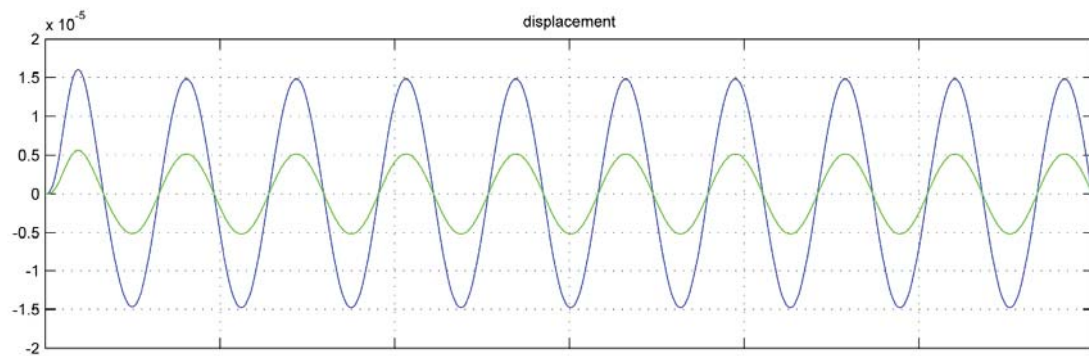
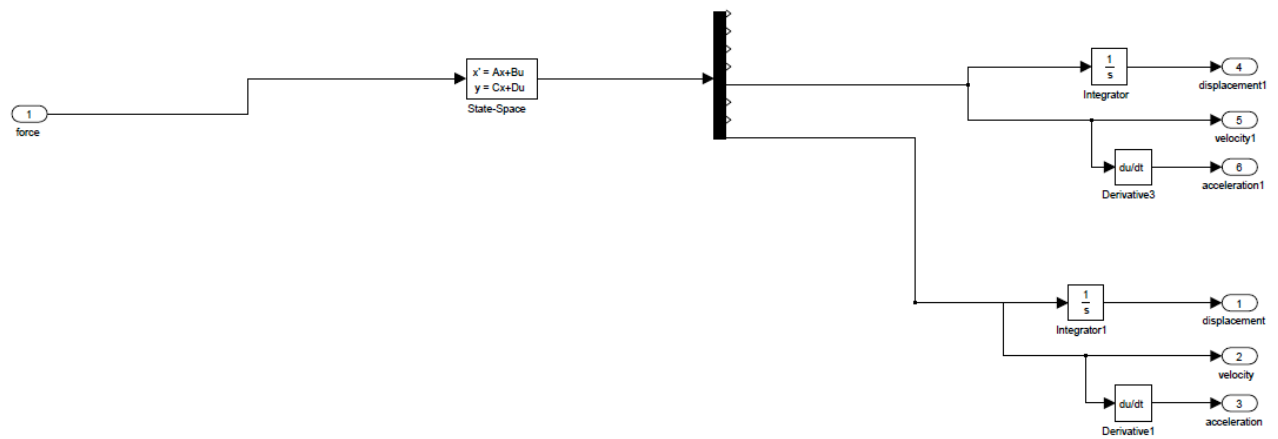
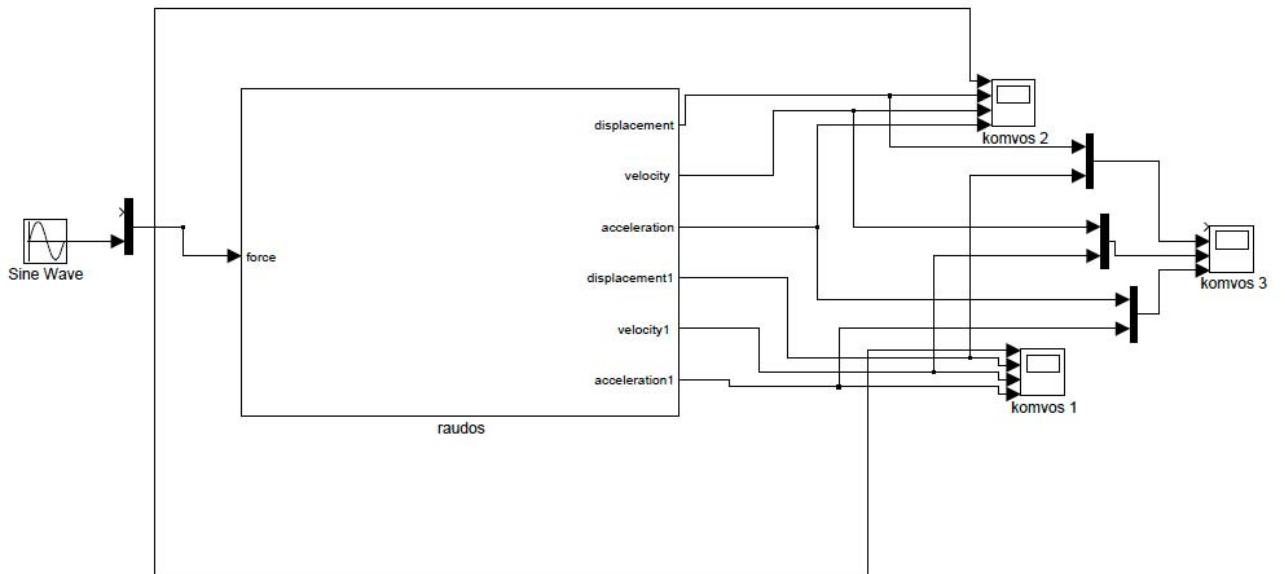


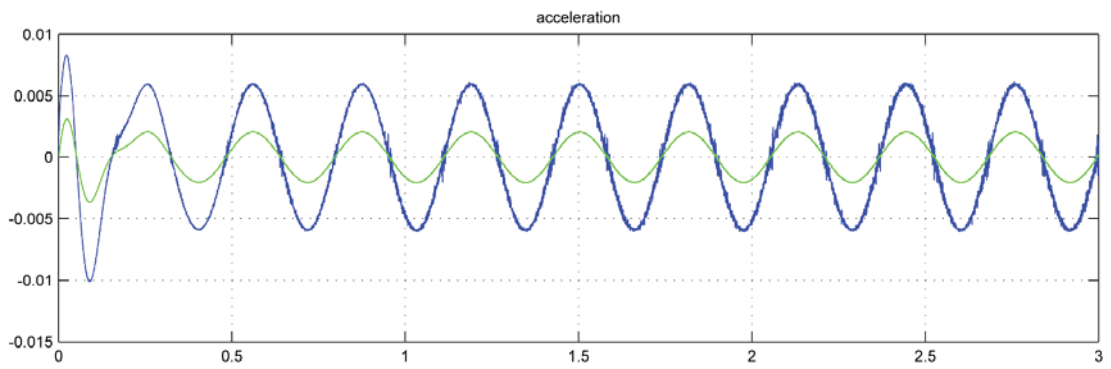
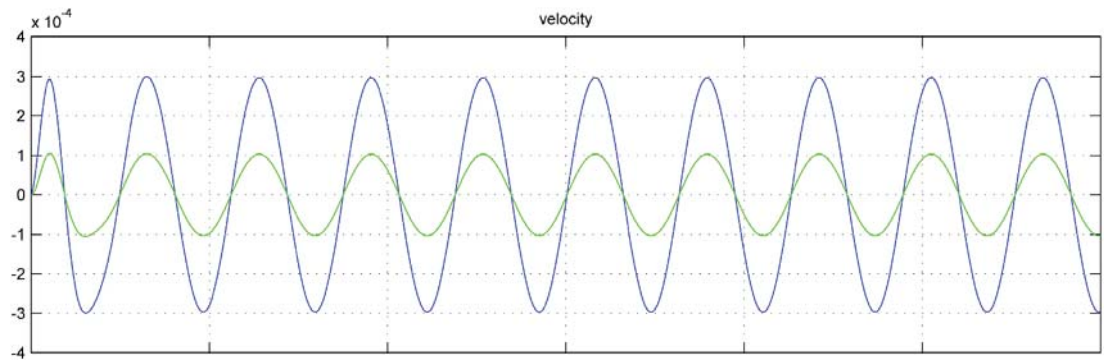
Final 8 ανάλυση μοντέλου B (με βάση την ταχύτητα) με έναν εκπαιδευμένο νευροασαφή ελεγκτή:



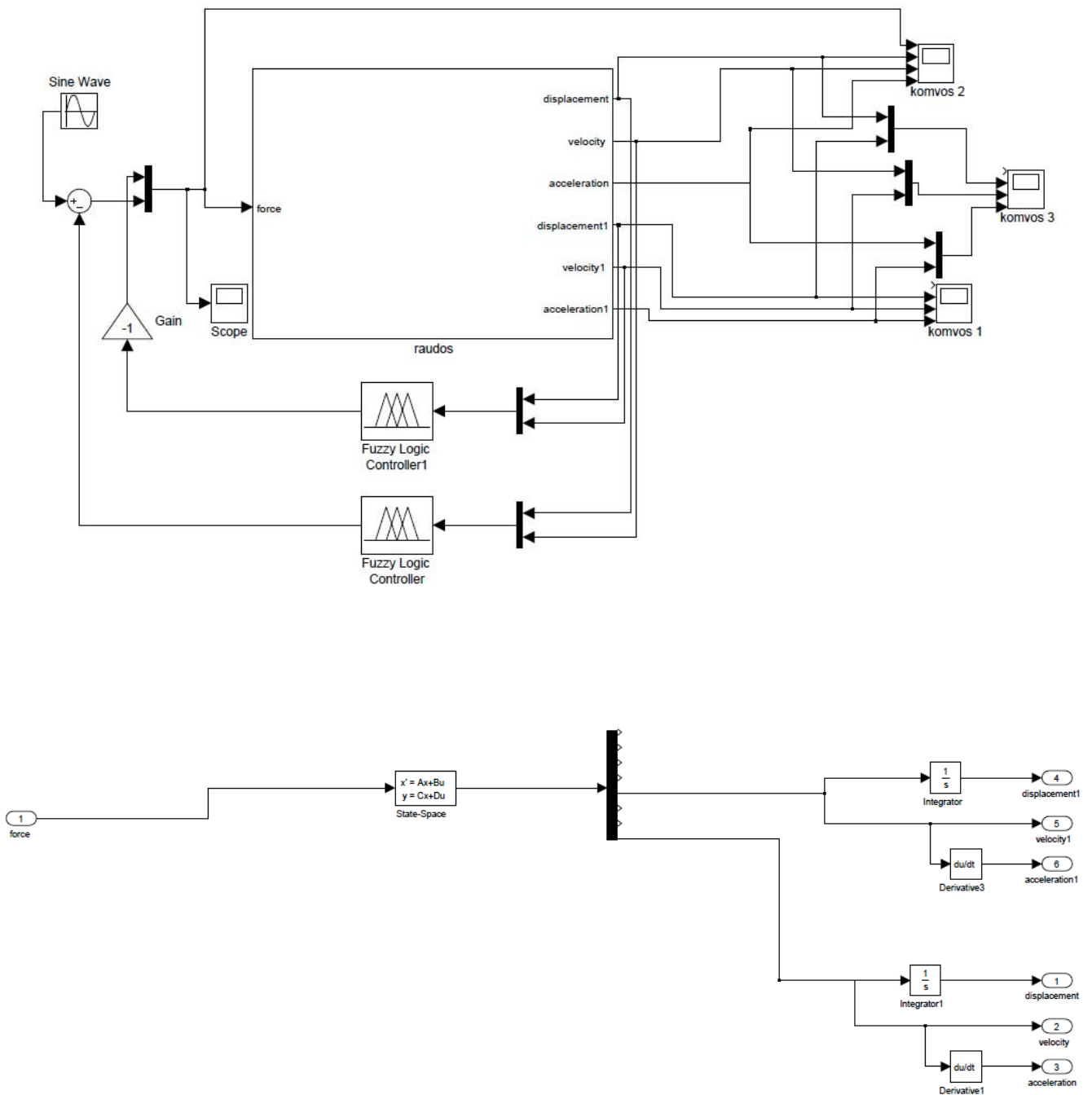


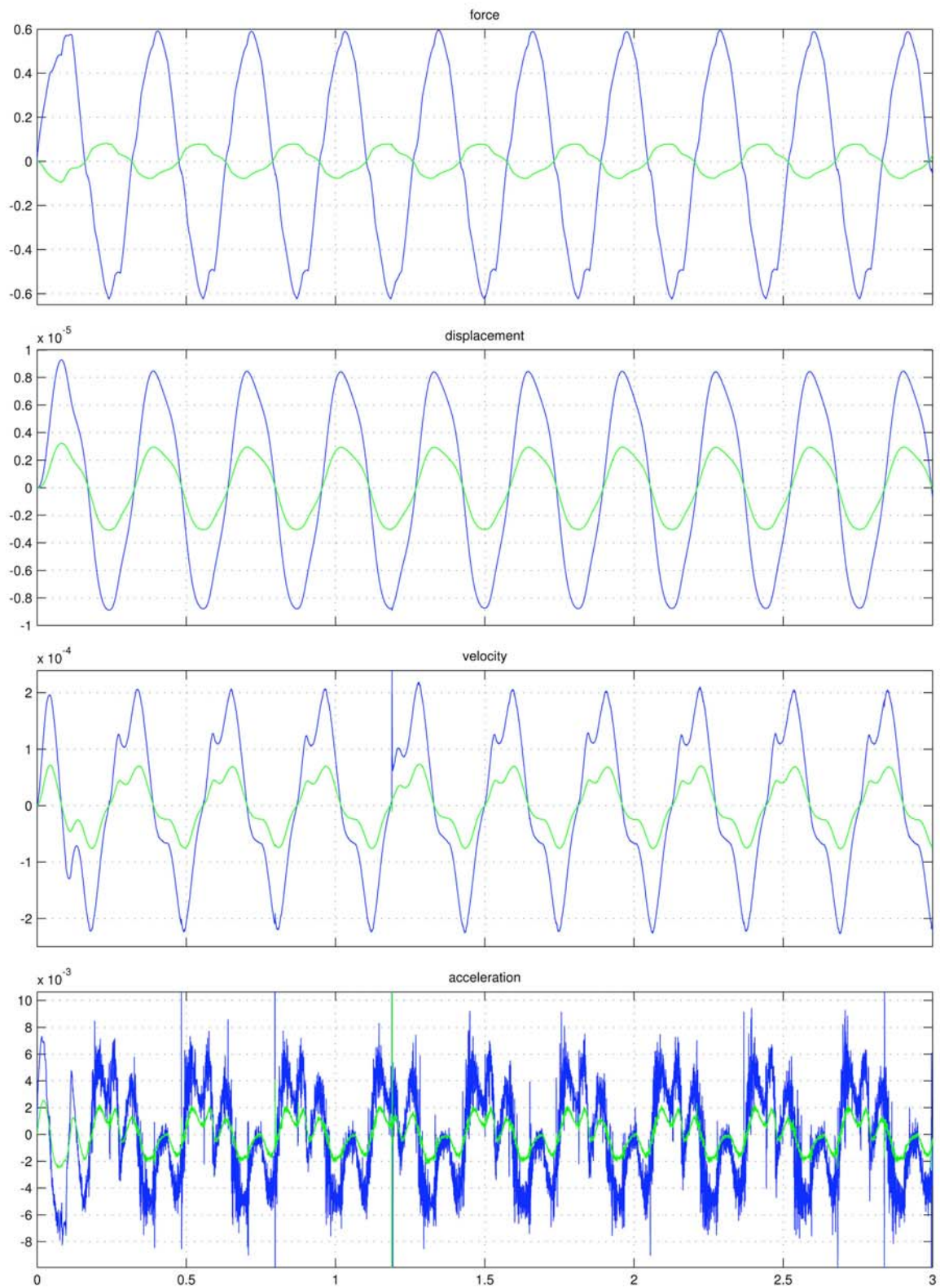
Final 9 ανάλυση μοντέλου B (με βάση την ταχύτητα) με δύο σημεία ελέγχου χωρίς έλεγχο:



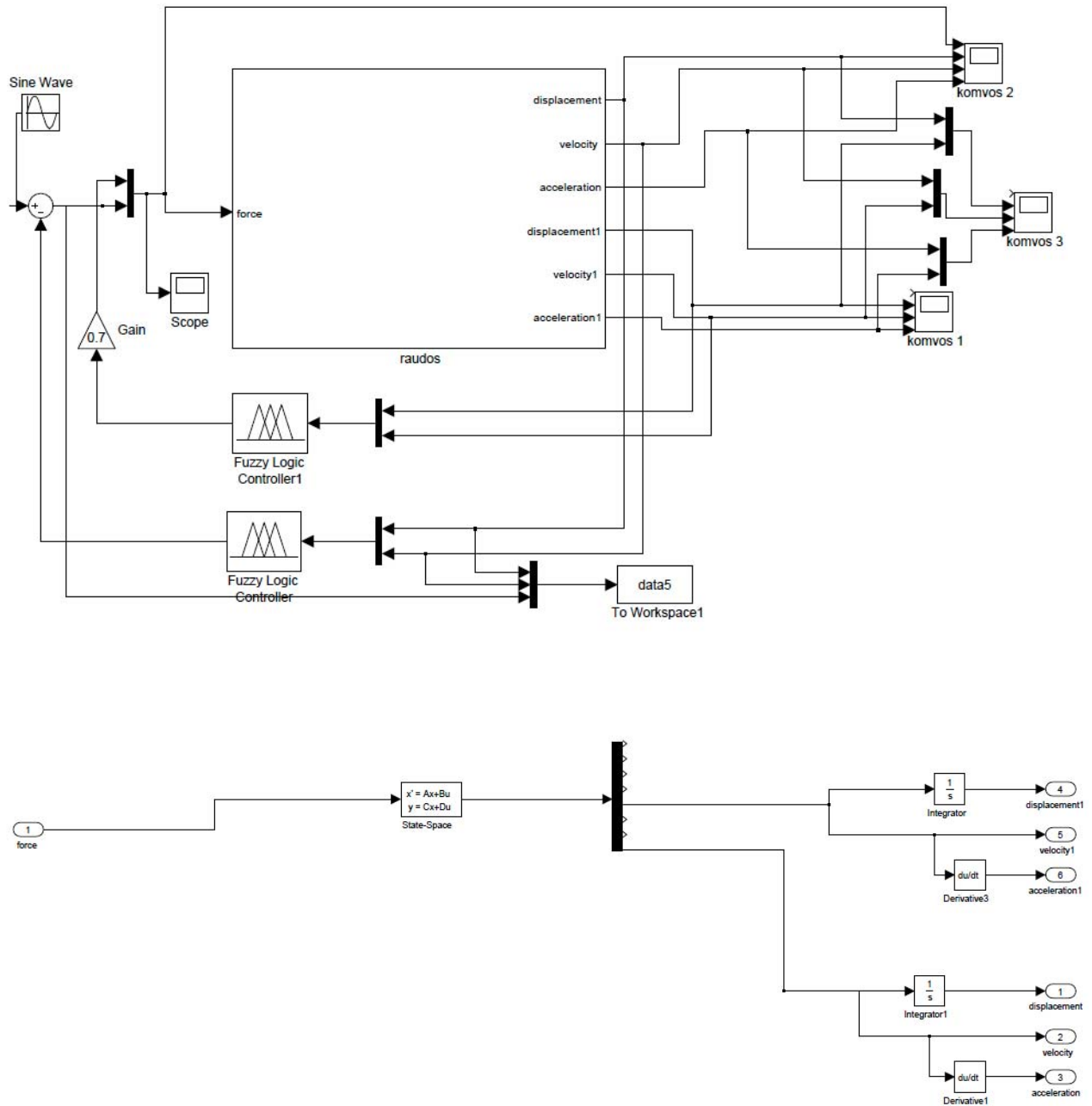


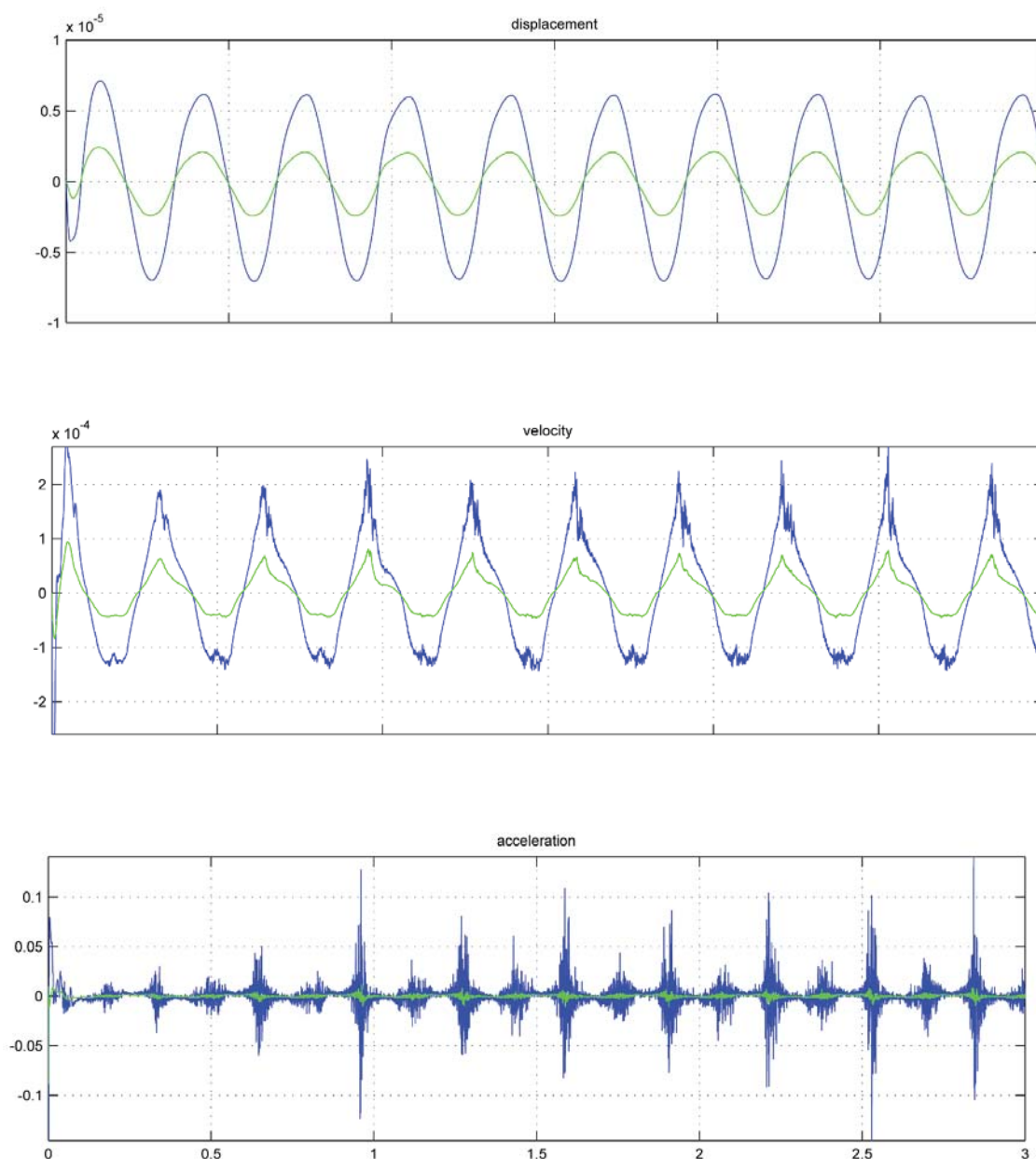
final 10 ανάλυση μοντέλου B (με βάση την ταχύτητα) με δύο σημεία ελέγχου και χρήση δύο ελεγκτών mamdani(ασαφείς):





final 11 ανάλυση μοντέλου B (με βάση την ταχύτητα) με δύο σημεία ελέγχου και χρήση δύο ελεγκτών, έναν mamdani(ασαφείς) στον εσωτερικό κομβο και έναν sugeno(εκπαιδευμένο νευροασαφή) στον εξωτερικό κόμβο:





Πίνακας εύρους τιμών:

final	είδος γραφήματος	εύρος τιμών	
final 1	displacement	$\pm 2.5\text{E-}4$	
	velocity	$\pm 4.5\text{E-}3$	
	acceleration	± 0.1	
	angle	$\pm 3.8\text{E-}4$	
	angular velocity	$\pm 7.5\text{E-}3$	
	angular acceleration	± 0.15	
final 2	outside force	± 1	
	displacement	$\pm 1\text{E-}4$	
	velocity	$\pm 4\text{E-}3$	
	acceleration	± 1.5	

	angle	$\pm 1.7E-4$	
	angular velocity	$\pm 4.3E-3$	
	angular acceleration	± 1.5	
	outside force	± 1	
	control force	± 0.8	
	total force	± 0.7	
final 3	displacement	$\pm 3E-4$	
	velocity	$\pm 1E-2$	
	acceleration	± 4.5	
	angle	$\pm 2.7E-4$	
	angular velocity	$\pm 1.3E-2$	
	angular acceleration	± 5	
	outside force	± 1	
	control force	± 1	
	total force	± 1.5	
final 4	displacement	$\pm 1E-4$	
	velocity	$\pm 2E-3$	
	acceleration	$\pm 4E-2$	
	angle	$\pm 1.5E-4$	
	angular velocity	$\pm 3.2E-3$	
	angular acceleration	$\pm 6.5E-2$	
	outside force	± 1	
	control force	± 0.6	
	total force	± 0.4	
final 5	displacement	$\pm 1.5E-5$	
	velocity	$\pm 3E-4$	
	acceleration	$\pm 7E-3$	
final 6	displacement	$\pm 0.8E-5$	
	velocity	$\pm 1.8E-4$	
	acceleration	$\pm 5E-3$	
final 7	displacement	$\pm 0.8E-5$	
	velocity	$\pm 2E-4$	
	acceleration	$\pm 5E-3$	
final 8	displacement	$\pm 7.5E-6$	
	velocity	$\pm 1.5E-4$	
	acceleration	$\pm 3E-3$	
final 9	displacement	$\pm 1.5E-5$	$\pm 0.5E-5$
	velocity	$\pm 3E-4$	$\pm 1E-4$
	acceleration	$\pm 6E-3$	$\pm 2E-3$
final 10	displacement	$\pm 0.9E-5$	$\pm 0.3E-5$
	velocity	$\pm 2E-4$	$\pm 0.7E-4$
	acceleration	$\pm 9E-3$	$\pm 2E-3$
final 11	displacement	$\pm 0.7E-5$	$\pm 0.2E-5$
	velocity	$\pm 2.3E-4$	$\pm 0.8E-4$
	acceleration	± 0.1	$\pm 1E-2$

Βιβλιογραφία

[1] Δρ. Σ. Βαλογιαννίδης, Ευφυής έλεγχος, θεωρία και εφαρμογές, ΤΕΙ Σερρών. Σημειώσεις μαθήματος “Εισαγωγή στην Μηχατρονική”, διατίθεται μέσω της ιστοσελίδας του μαθήματος, eclass.ergasya.tuc.gr, διδάσκων καθηγητής Γ. Σταυρουλάκης.

[2] Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich, Fuzzy Control, Department of Electrical Engineering, The Ohio State University, 1998.

[3] Γ. Ταϊρίδης, “προσομοίωση σύνθετων ευφυών μηχανικών συστημάτων με αισθητήρες και διεγέρτες από πιεζοηλεκτρικά υλικά”, Διατριβή για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά 2009.

[4] Ροβέρτος-Ε Κινγκ, Ευφυής Έλεγχος, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004

[5] A. Preumont, Vibration Control, Kluwer Academic Publishers, 2002.

[6] Χ. Κιλιμπέρης, “Παραμετρική διερεύνηση συστήματος ασαφούς ελέγχου με εφαρμογή σε πιεζοηλεκτρική ευφυή δοκό”, διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Χανιά, 2008

[7] 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*

Διευθύνσεις από site τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως πηγές για την παρακάτω εργασία

<http://www.pages.drexel.edu/~kws23/tutorials/MRAC/MRAC.html>

http://www.mathworks.com/help/toolbox/nnet/nnet_product_page.html

<http://www.livepedia.gr>

<http://www.wikipedia.org/>

<http://www.ijee.dit.ie/articles/Vol13-6/ijee971.pdf>

<http://www.eng.buffalo.edu/~abani/fem/dyn/dyn.html>

http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol4/cs11/report.html