

# Εργασία στα Ασαφή συστήματα , Ελεγχός ταχύτητας ενός μηχανισμού τραπεζίου εργασίας με ασαφείς ελεγκτές

Νίκος Λαδιάς

Αύγουστος 2021

## Περιεχόμενα

1	Ελεγχόμενο σύστημα και σχεδίαση γραμμικού ελεγκτή	1
2	Σχεδίαση ασαφούς ελεγκτή	3

## 1 Ελεγχόμενο σύστημα και σχεδίαση γραμμικού ελεγκτή

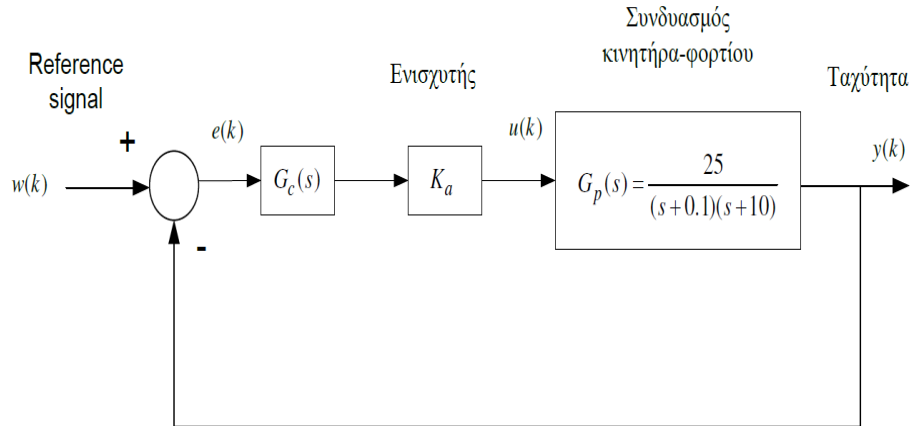
Το ελεγχόμενο δεδομένο σύστημα του οποίου επιθυμούμε μηδενικό σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση για τον έλεγχο ταχύτητας του απεικονίζεται παρακάτω. Για τον σκοπό αυτό επιλέγεται ένας PI ελεγκτής της μορφής :

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} = \frac{K_p(s + c)}{s}, c = \frac{K_p}{K_I}$$

Οι παράμετροι του γραμμικού ελεγκτή προσδιορίζονται με βάση την πληρότητα των παρακάτω δύο προδιαγραφών:

1. Υπερύψωση για βηματική είσοδο μικρότερη του 8%
2. Χρόνος ανόδου μικρότερος απο 0.6 δευτερόλεπτα.

Αφού εισαχθεί η συνάρτηση ανοιχτού βρόχου στην οποία έχει ενσωματωθεί και η επίδραση του PI ελεγκτή, με την βοήθεια της εντολής ControlSystemDesigner, στην οποία παίρνουμε την συνάρτηση συνδυασμού κινητήρα-φορτίου και την συνάρτηση  $G_c(s)$  του PI ελεγκτή , επιλέγεται απο το διάγραμμα γεωμετρικού τύπου ένα κέρδος  $K$  που να αντιστοιχεί σε θέσεις πόλων κλειστού βρόχου και συντελεστή απόσβεσης κατάλληλα για τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Στο αρχείο



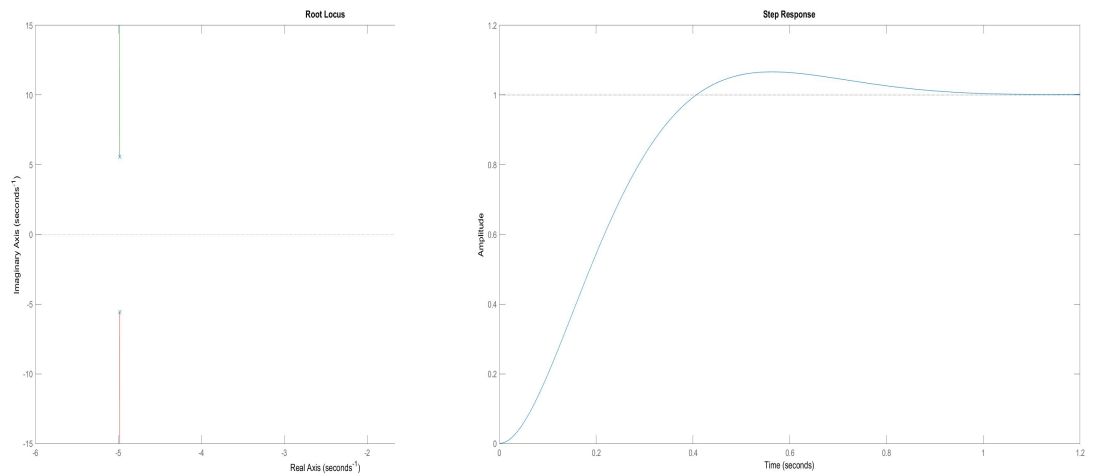
Εικόνα 1: Ελεγχόμενο σύστημα

κώδικα σε matlab mainPI.m, αφού έχουμε καταλήξει στα αντίστοιχα κέρδη του ελεγκτή PI ( $K_I$ ,  $K_P$ ) δημιουργείται το σύστημα του ανοιχτού βρόχου αλλά και της ανάδρασης αφού φυσικά μοντελοποιηθούν οι συναρτήσεις  $G_c(s)$ ,  $G_p(s)$ . Επιπλέον παράγονται οι γραφικές παραστάσεις της βηματικής απόκρισης του συστήματος κλειστού βρόχου και του γεωμετρικού τόπου των ριζών του συστήματος κλειστού βρόχου. Τέλος παράγεται και η απεικόνιση των γραφικών του controlSystemDesigner, με τις γραφικές ήδη αναφερόμενων εικόνων καθώς και διαγράμματα bode πλάτους και φάσης του PI ελεγκτή, όπου ο χρήστης έχει την δυνατότητα να κινεί τους πόλους του συστήματος πάνω στον γεωμετρικό τόπο των ριζών και να δει την αλλαγή στην βηματική απόκριση του συστήματος αλλά και στα υπόλοιπα διαγράμματα.

## Επιλογή κέρδους και μηδενικού ελεγκτή PI

Ακολουθήθηκε η οδηγία της τοποθέτησης του μηδενικού του ελεγκτή ανάμεσα στους πόλους  $-0.1$  και  $-10$  και πιο συγκεκριμένα κοντά στον πόλο  $-0.1$ . Το μηδενικό που εισάγει ο ελεγκτής τοποθετήθηκε στο  $-0.1333$  μετά από διαδικασία trial and error, καθώς η συμπεριφορά του συστήματος παρατηρήθηκε η επιθυμητή σε αυτό το μηδενικό. Το κέρδος του ελεγκτή ( $= K_P$ ) ρυθμίστηκε στο 2.25, έτσι προκύπτει :  $\frac{K_P}{K_I} = 0.1333 \rightarrow K_I = 0.3$ . Για επαλήθευση των προδιαγραφών τυπώνονται στη κονσόλα με τη βοήθεια της stepinfo, οι τιμές Rise-Time και Overshoot στα  $0.2686 < 0.6s$  και  $6.6428\% < 8\%$  αν-

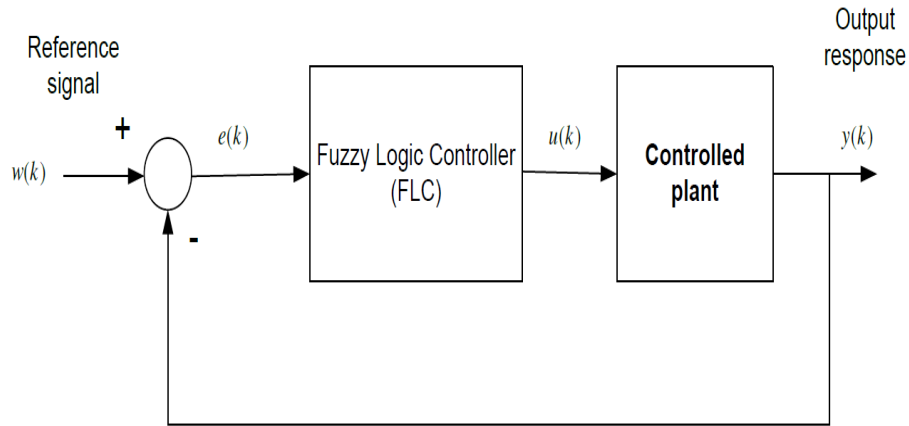
τίστοιχα . Μπορεί κανείς να γίνει επίσης η ίδια επαλήθευση με τις τιμές να είναι σχεδόν ίδιες τρέχοντας το αρχείο PI.slx και ανοίγοντας τις Bilevel measurements του scope. Στο αρχείο αυτό χτίζεται το σύστημα κλειστού βρόχου όπως αυτό μοντελοποιήθηκε και λαμβάνεται το σφάλμα μεταξύ της εξόδου  $y$  και του σήματος αναφοράς , όπου εδώ είναι η βηματική συνάρτηση.



(a) Γεωμετρικός τόπος ριζών παραγόμενου (b) Βηματική απόκριση παραγόμενου  
 συστήματος κλειστού βρόχου συστήματος κλειστού βρόχου

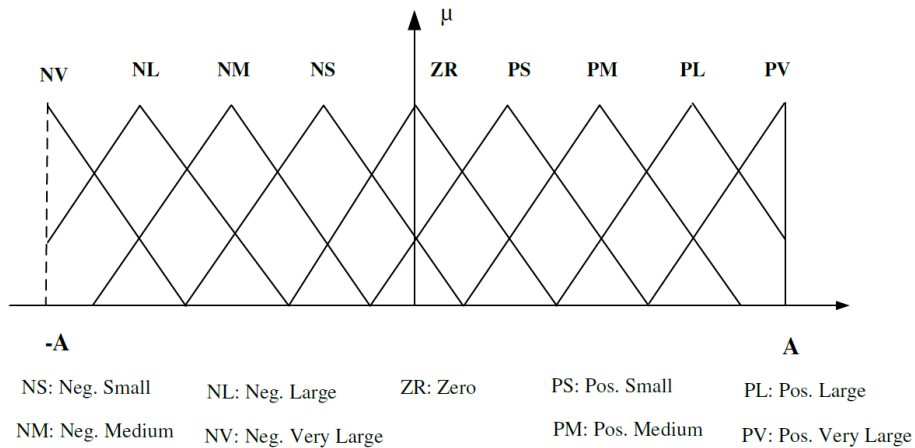
## 2 Σχεδίαση ασαφούς ελεγκτή

Προκειμένου να έχουμε μηδενικό σφάλμα ταχύτητας στη μόνιμη κατάσταση , επιλέγουμε και πάλι ένα ασαφή ελεγκτή τύπου PI. Το υλοποιημένο σύστημα ελέγχου με χρήση ασαφών ελεγκτών φαίνεται παρακάτω. Ο ασαφής ελεγκτής υλοποιείται με την βοήθεια του



Εικόνα 3: Σύστημα ασαφών ελεγκτών

fuzzyLogicDesigner . Με την βοήθεια του γραφικού αυτού περιβάλλοντος μας δίνει την δυνατότητα να δημιουργήσουμε ένα ασαφές μοντέλο , προσθέτοντας τις εισόδους  $E, \dot{E}$  ως λεκτικές μεταβλητές που περιγράφονται απο τις λεκτικές τιμές τριγωνικών συναρτήσεων συμμετοχής του σχήματος στην εικόνα 4. Καθώς και της εξόδου, της μεταβολής του σήματος ελέγχου  $\dot{U}$ . Επιπλέον το περιβάλλον μας δίνει



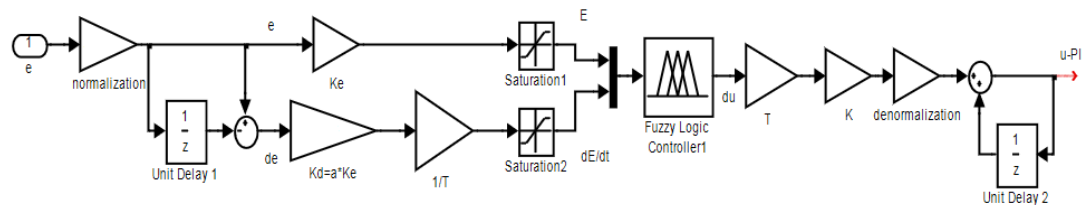
Εικόνα 4: Λεκτικές τιμές των μεταβλητών  $E, \dot{E}, \dot{U}$

την δυνατότητα να ενσωματώσουμε και τα δεδομένα χαρακτηριστικά του ασαφούς ελεγκτή:

1. Ασαφοποιητής Singleton .

2. Το συνδετικό AND υλοποιείται με τον τελεστή  $\min$  .
3. Η συνάρτηση συμπερασμού υλοποιείται με τον κανόνα του Larsen.
4. Το συνδετικό ALSO υλοποιείται με τον τελεστή  $\max$  .
5. Ο απο-ασαφοποιητής υλοποιείται με την τεχνική COA.

Τέλος η δομή του ασαφούς ελεγκτή έχει την παρακάτω μορφή, πρώτα γίνεται κανονικοποίηση του σφάλματος και της μεταβολής του σφάλματος έτσι ώστε τα κανονικοποιημένα μεγέθη να μεταβάλλονται στο διάστημα  $[-1, 1]$  ενώ έπειτα περνάει από τους κατάλληλους ενισχυτές και ολοκληρώτες για να παραχθεί μετά από την βάση κανόνων το επιθυμητό σήμα ελέγχου . Σαν αρχικές τιμές των κερδών θεωρούμε



Εικόνα 5: Δομή ασαφούς ελεγκτή

αυτές που καθορίστηκαν για τον γραμμικό ελεγκτή στην προηγούμενη φάση της εργασίας. Η βάση κανόνων επίσης υλοποιείται με την βοήθεια του περιβάλλοντος fuzzyLogicDesigner , με βάση τους μετα-κανόνες σωστής λειτουργίας του συστήματος κλειστού βρόχου.

### Ρύθμιση κερδών ασαφούς ελεγκτή

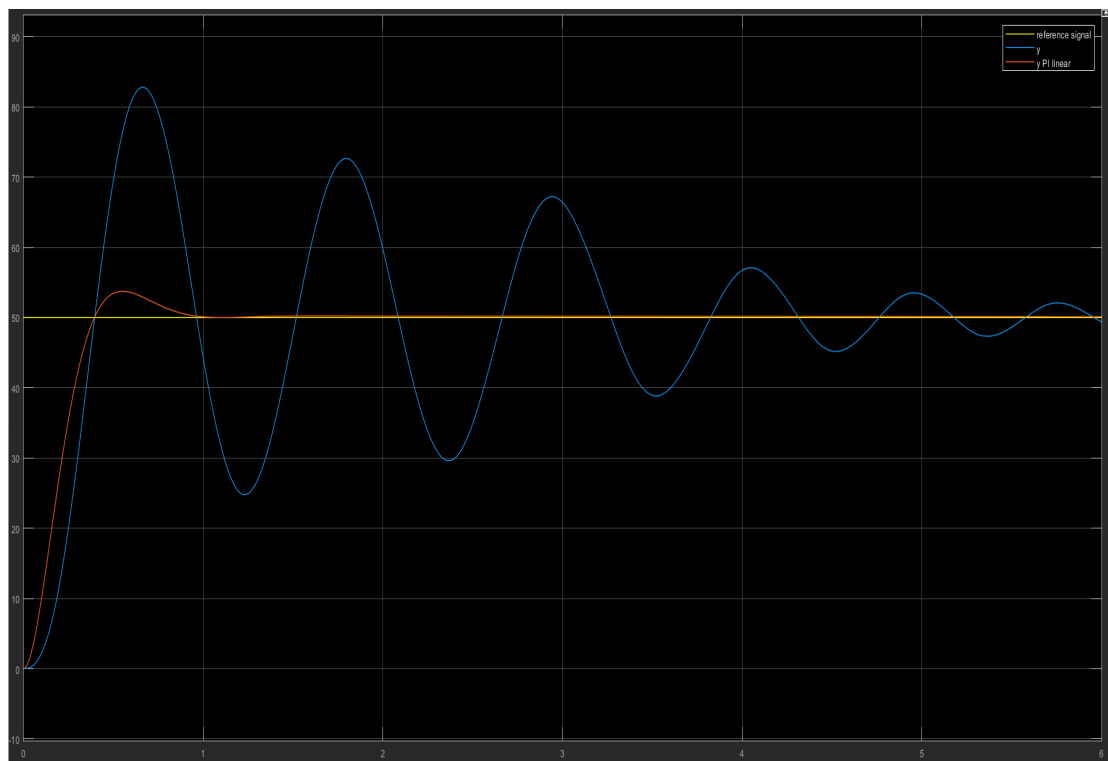
Με βάση τα κέρδη του γραμμικού ελεγκτή που βρέθηκαν ώστε να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές για τα αρχικά κέρδη του FZ-PI ελεγκτή έχουμε:

$$T_i = \frac{K_P}{K_I} = 0.1333 = a$$

$$K = \frac{K_P}{F\{aK_e\}} = \frac{2.25}{0.1333 \cdot F\{1\}} \Rightarrow K = 16.87$$

Δημιουργείται ένα σύστημα στο simulink εργαλείο του matlab με ένα αρχείο FLC.slx στο οποίο έχει μοντελοποιηθεί το σύστημα της

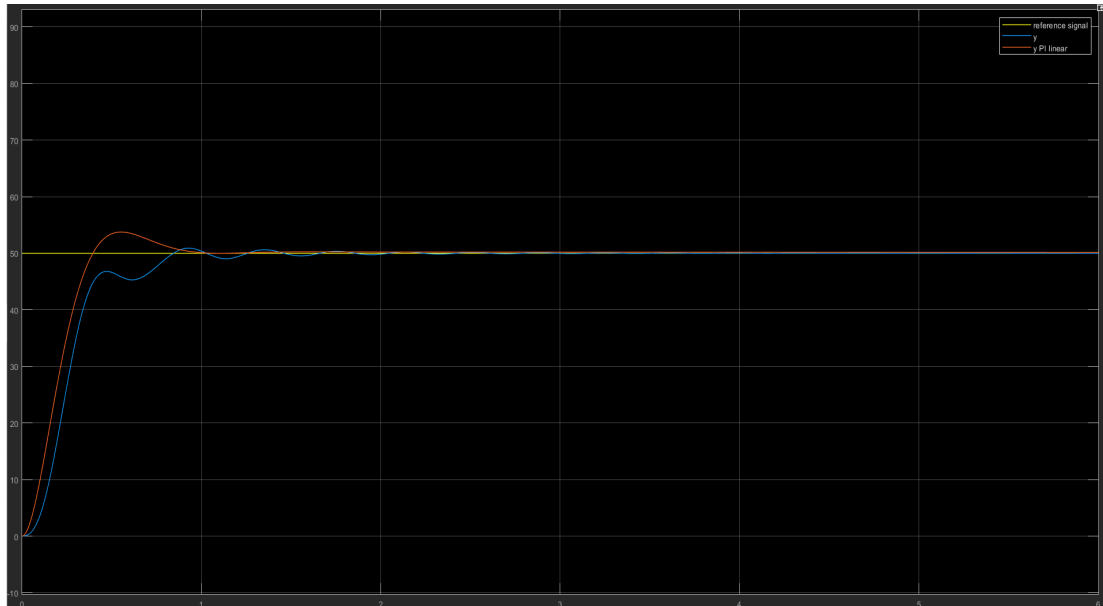
εικόνας 3 μαζί με τον ασαφή ελεγκτή . Γίνεται και μια τροφοδότηση της εξόδου του γραμμικού PI ελεγκτή συστήματος κλειστού βρόχου, για να συγκριθεί η απόκριση του με αυτήν του ασαφούς ελεγκτή στον οποίο όμως δίνουμε τις αρχικές τιμές των κέρδων όπως αυτές υπολογίστηκαν :  $a = 0.1333, K_e = 1, K = 16.87$  . Η απόκριση για μια διέγερση  $50 \cdot \text{stepfun}$  ( όπου  $\text{stepfun}$ =βηματική απόκριση) των δύο συστημάτων φαίνεται παρακάτω .



Εικόνα 6:  $y \Rightarrow$  Έξοδος ασαφούς ελεγκτή,  $y \text{ PI linear} \Rightarrow$  Έξοδος γραμμικού ελεγκτή ,  $\text{reference signal} \Rightarrow$  Σήμα αναφοράς

Έτσι με μια πρώτη ματιά γίνεται απευθείας προφανές πως ο ασαφής ελεγκτής μας χρειάζεται ρύθμιση και ως προς τον χρόνο ανόδου του αλλά και ως προς την υπερήψωση του. Αυξάνοντας αρχικά το κέρδος  $K$  του FZ-PI ελεγκτή παρατηρούμε ότι απλά μειώνεται λίγο το πλάτος των ταλαντώσεων χωρίς καμία ιδιαίτερη βελτίωση στην απόκριση μας. Η βασική μας ρύθμιση για καλύτερη απόκριση θα έρθει ρυθμίζοντας τα  $K_e, a$  αφού μπορούμε να μεγαλώσουμε το  $a$  στη τιμή 0.3

παρατηρούμε πως αμέσως έχουν εξαλειφθεί οι μεγάλες ταλαντώσεις και άρα οι μεγάλες υποερυψώσεις που ήταν ανεπιθύμητες. Η αύξηση του  $K_e$  παρατηρήθηκε πως οδηγεί σε επανεμφάνιση των μεγάλων ταλαντώσεων γύρω από το σήμα αναφοράς και άρα παραμένει η τιμή του όπως είχε στο 1. Τώρα αυξάνοντας περισσότερο το κέρδος  $K$  του FZ-PI, από την αρχική τιμή του 16.87 αρχικά παρατηρείται μια βελτίωση και στον χρόνο ανόδου αλλά και στην υπερύψωση για την τιμή του 20. Αυτή η βελτίωση συνεχίζει να προκύπτει στην απόκριση του συστήματος για αύξηση του  $K$  μέχρι και για μια τιμή κοντά στο 30, έπειτα παρατηρείται χειρότερη συμπεριφορά κυρίως στο χρόνο ανόδου στην απόκριση και χάνεται η προδιαγραφή στον χρόνο ανόδου του συστήματος. Καταλήγουμε στην τιμή 30 για το κέρδος αυτό, αφού τότε παρουσιάζεται  $0.285 < 0.6s$  χρόνος ανόδου και μόλις μόνο  $1.531\% < 5\%$  υπερύψωση, άρα οι προδιαγραφές καλύπτονται άνετα. Τέλος για περαιτέρω αυξήσεις στην τιμή του  $a$  παρατηρείται δραματική αύξηση του χρόνου ανόδου καθώς το σύστημα καθυστερεί πολύ και άρα η τιμή του παραμένει στο 0.3.



Εικόνα 7:  $y \Rightarrow$  Έξοδος ασafούς ελεγκτή,  $y$  PI linear  $\Rightarrow$  Έξοδος γραμμικού ελεγκτή, reference signal  $\Rightarrow$  Σήμα αναφοράς

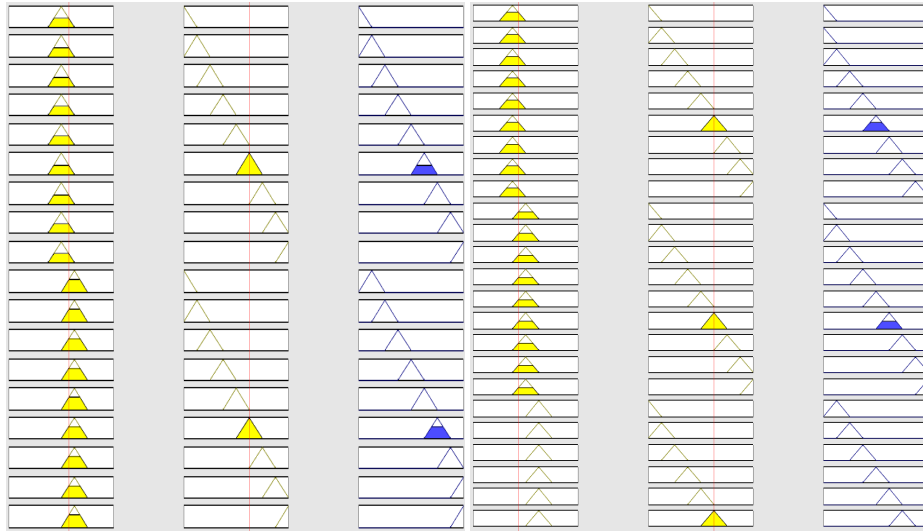
## Λειτουργία της βάσης του ελεγκτή και συμπεράσματα

Απο την βάση που διαμορφώθηκε και θεωρώντας μια διέγερση όπου  $e$  είναι ZR και  $\Delta e$  είναι PS . Με την βοήθεια του ruleViewer , το περιβάλλον που ενεργοποιείται κατά την διάκριση εκτέλεση της προσομοίωσης , η οποία τρέχει για 6 δευτερόλεπτα, μπορεί ο χρήστης αφού τερματίσει η προσομοίωση αλλά και κατά την διάρκεια της, να δει γραφικά ποιοί κανόνες ενεργοποιούνται με βάση τις εισόδους και ποιά έξοδος παράγεται. Για κάθε δυνατή λεκτική τιμή του σφάλματος  $e$  το περιβάλλον μας δίνει την δυνατότητα να μεταβάλλουμε τόσο τις τιμές του σφάλματος  $e$  όσο και τις τιμές της μεταβολής του σφάλματος  $\Delta E$  και να συμπεράνουμε με βάση τους κανόνες που ορίστηκαν ποιά είναι η έξοδος του συστήματος για το σήμα ελέγχου. Αρχικά ο κανόνας της βάσης μας θέτει PS στο σήμα ελέγχου  $\Delta U$  για την δεδομένη διέγερση, η οποία επιτυγχάνεται στο κέντρο κάθε τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής αφού χρησιμοποιούμε την τεχνική από-ασαφοποίησης center of area.

### 1η περίπτωση

Για τιμές του σφάλματος  $E$  αριστερά του κέντρου της ZE συνάρτησης και σταθερή τιμή στο κέντρο της PS για την μεταβολή του σφάλματος  $\Delta E$  , έχουμε αντίστοιχα διέγερση του κανόνα : Αν  $E=NS$  και  $\Delta E=PS$  , τότε  $\Delta U=ZE$ . Έτσι όσο αριστερότερα βρισκόμαστε του κέντρου τόσο περισσότερο διεγείρεται ο κανόνας και βλέπουμε στην έξοδο  $\Delta U$  και την συνάρτηση ZE. Όμοια θα έχουμε και διέγερση της εξόδου σε τιμές PM δεξιότερα του κέντρου της ZE της μεταβλητής  $e$  και σταθερή τιμή στο κέντρο της PS για την μεταβλητή  $\Delta E$ . Αυτό φαίνεται παρακάτω και στην εικόνα 8 γραφικά.





(a) Εμφάνιση τιμών PM στην έξοδο για την διέγερση του αντίστοιχου κανόνα (b) Εμφάνιση τιμών ZE στην έξοδο για την διέγερση του αντίστοιχου κανόνα

Εικόνα 8: 1η περίπτωση

### 2η περίπτωση

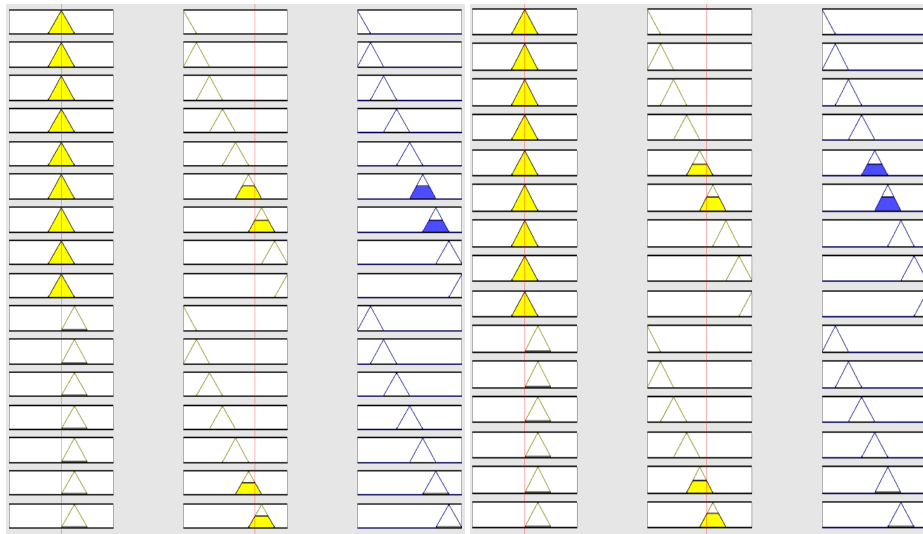
Για τιμές του σφάλματος  $\Delta E$  αριστερά του κέντρου της PS συνάρτησης και σταθερή τιμή στο κέντρο της ZE για το σφάλμα  $E$ , έχουμε αντίστοιχα διέγερση του κανόνα : Αν  $E=ZE$  και  $\Delta E=ZE$ , τότε  $\Delta U=ZE$ . Έτσι όσο αριστερότερα βρισκόμαστε του κέντρου τόσο περισσότερο διεγείρεται ο κανόνας και βλέπουμε στην έξοδο  $\Delta U$  και την συνάρτηση ZE. Όμοια θα έχουμε και διέγερση της εξόδου σε τιμές PM δεξιότερα του κέντρου της ZE της μεταβλητής  $\Delta E$  και σταθερή τιμή στο κέντρο της ZE για την μεταβλητή  $E$ . Αυτό φαίνεται παρακάτω και στην εικόνα 9 γραφικά.

### 3η περίπτωση

Συνδυάζοντας τις μεταβολές της μεταβλητής του σφάλματος  $e$  και της μεταβλητής της μεταβολής του σφάλματος  $\Delta e$ , στην ουσία ενεργοποιείται ο εκάστοτε συνδυασμός κανόνων των παραπάνω δύο περιπτώσεων. Έτσι πχ για τιμές αριστερότερα του κέντρου της συνάρτησης ZE για την μεταβλητή  $e$  και δεξιότερα του κέντρου της PS για την μεταβλητή  $\Delta e$ , θα παρατηρήσουμε πλέον τις διεγέρσεις συναρτήσεων όπου όταν ενεργοποιείται πχ η  $e = NS$  και για την  $\Delta e$  έχουμε τιμές ανάμεσα σε PS και PM, τότε για την έξοδο έχουμε εμφάνιση τιμών

σε ZE και PS (με βάση τους αντίστοιχους κανόνες που ορίστηκαν) σε αναλογία που καθορίζεται προφανώς από τον βαθμό συμμετοχής της κάθε συνάρτησης. Με όμοιο τρόπο βρίσκουμε και ποιές συναρτήσεις ενεργοποιούνται στην έξοδο όταν  $e=ZE$  και για την  $\Delta e$  έχουμε τιμές ανάμεσα σε PS και PM. Παραθέτουμε στην εικόνα 10 την εικόνα για το παράδειγμα αυτό. Προφανώς οι συνδυασμοί είναι και άλλοι αλλά λειτουργούν με ακριβώς τον ίδιο τρόπο παράγοντας κάθε φορά την αντίστοιχη έξοδο με βάση τους κανόνες που ορίστηκαν.

Στην εικόνα 11 φαίνεται η τρισδιάστατη επιφάνεια του ασαφούς

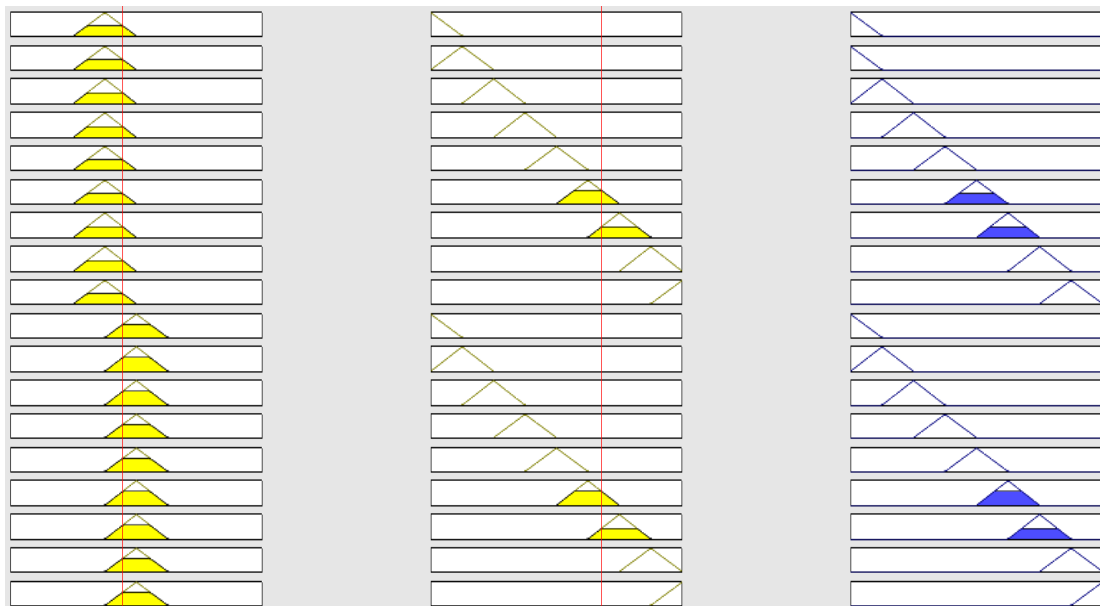


(a) Εμφάνιση τιμών ZE στην έξοδο για την (b) Εμφάνιση τιμών PM στην έξοδο για την διεγέρση του αντίστοιχου κανόνα διεγέρση του αντίστοιχου κανόνα

Εικόνα 9: 2η περίπτωση

ελεγκτή  $\Delta u(k)$  σε σχέση με τις εισόδους του  $e(k)$ ,  $\Delta e(k)$  που παράγεται με την χρήση της εντολής  $\text{View} \Rightarrow \text{Surface}$  στο περιβάλλον του Rule Viewer. Με τις δύο μεταβλητές εισόδου στο επίπεδο και την έξοδο να αναπαρίσταται στον κάθετο σε αυτό άξονα, το έντονο μπλέ χρώμα αντιστοιχεί σε αρνητικότερες τιμές ενώ κινούμενοι σε θετικότερες τιμές το χρώμα χάνει το μπλέ του και κιτρινίζει. Αρνητικότερες τιμές βλέπουμε όταν μια από τις δύο εισόδους έχει μεγαλύτερη τιμή από την άλλη κατά απόλυτη τιμή και αρνητικό πρόσημο ή και προφανώς όταν έχουμε και στις δύο εισόδους αρνητικές τιμές, το ίδιο ισχύει αντίστοιχα και για τις θετικές τιμές.

Η συμμετρία στο σχήμα παρατηρείται ως απόρροια της μορφής της

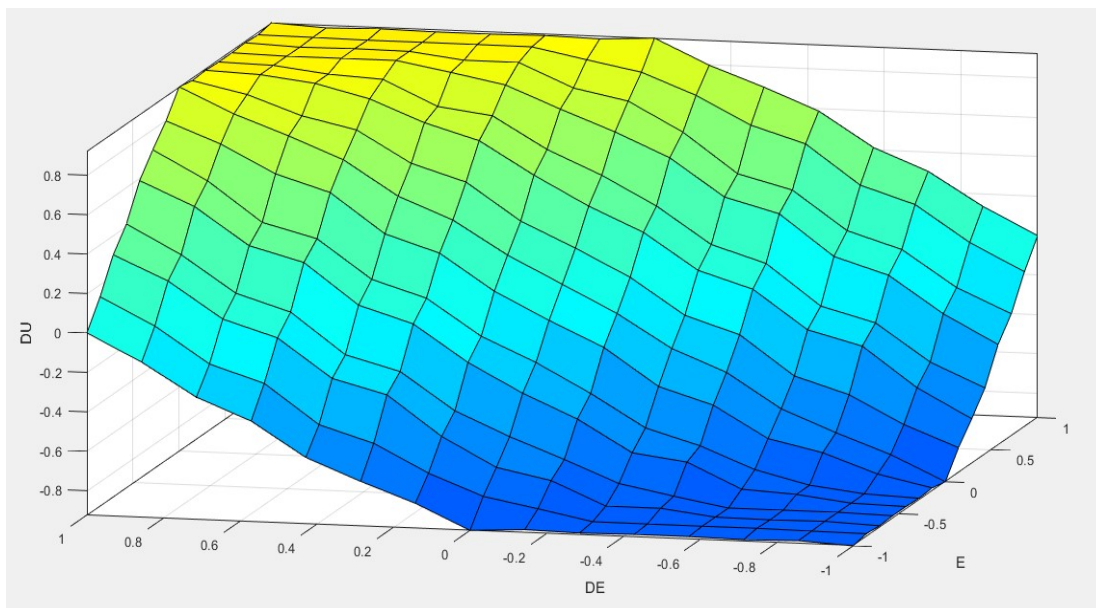


Εικόνα 10: Συνδυασμός περιπτώσεων. Οι διεγειρόμενες συναρτήσεις της εξόδου φαίνονται στην εικόνα για τον συνδυασμό  $e \rightarrow NS$ , ( $\Delta e \rightarrow PS$  και  $\Delta e \rightarrow PM$ ) και  $e \rightarrow ZE$ , ( $\Delta e \rightarrow PS$  και  $\Delta e \rightarrow PM$ )

βάσης κανόνων του ελεγκτή. Όταν μια από τις δύο μεταβλητές εισόδου έχει μια τιμή και η άλλη την αντίστοιχη τιμή αλλά στα αρνητικά, τότε το σήμα ελέγχου δεν επιβάλλει κάποια αλλαγή γιατί η έξοδος μπορεί να προσεγγίσει το σήμα αναφοράς σε αυτή την κατάσταση μόνο του. Έτσι αν δημιουργηθεί ένας πίνακας που απεικονίζει την βάση κανόνων στον οποίο η κύρια διαγώνιος εκφράζει ακριβώς αυτό, τότε κάτω από αυτήν την διαγώνιο αναπαρίστανται οι καταστάσεις όπου επιβάλλουν αρνητικό πρόσημο στο σήμα ελέγχου ενώ πάνω από αυτήν θετικό. Κοντά στην κύρια διαγώνιο οι μεταβολές στο σήμα αναφοράς είναι μικρές (NS, PS) και απομακρυνόμενοι από την κύρια διαγώνιο οι μεταβολές γίνονται μεγαλύτερες (NL, PL, NV, PV) πάντα με βάση τους κανόνες που ορίστηκαν. Όλα αυτά αποτυπώνονται στην γραφική αναπαράσταση της επιφάνειας του ασαφούς ελεγκτή όπως στην εικόνα 11.

### Απόκριση του συστήματος για διαφορετικά σήματα αναφοράς

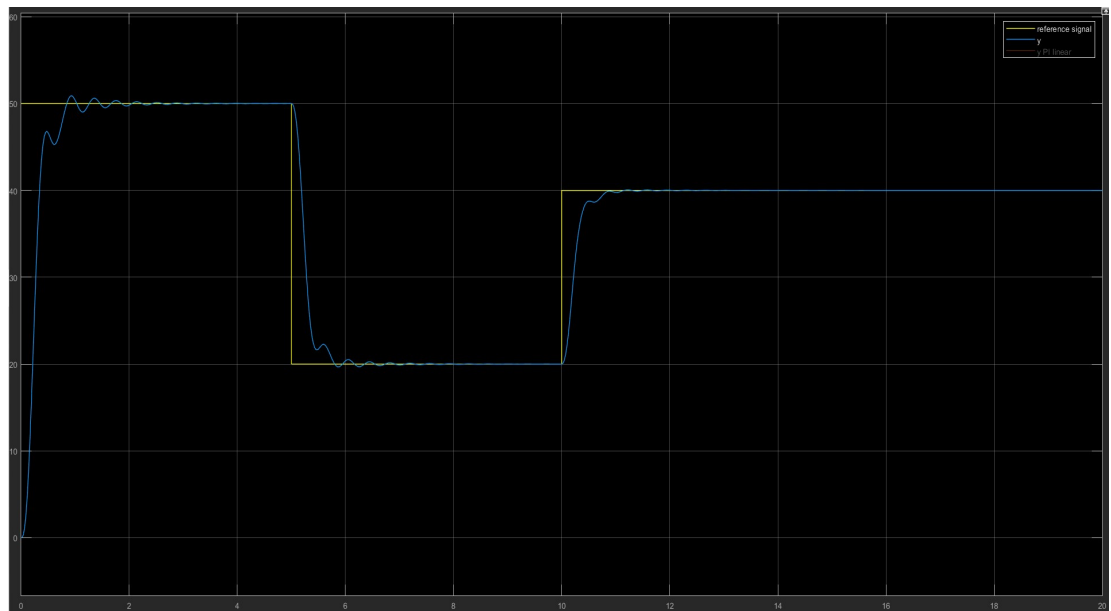
Στις εικόνες 12 και 13 παρουσιάζεται η απόκριση του συστήματος για



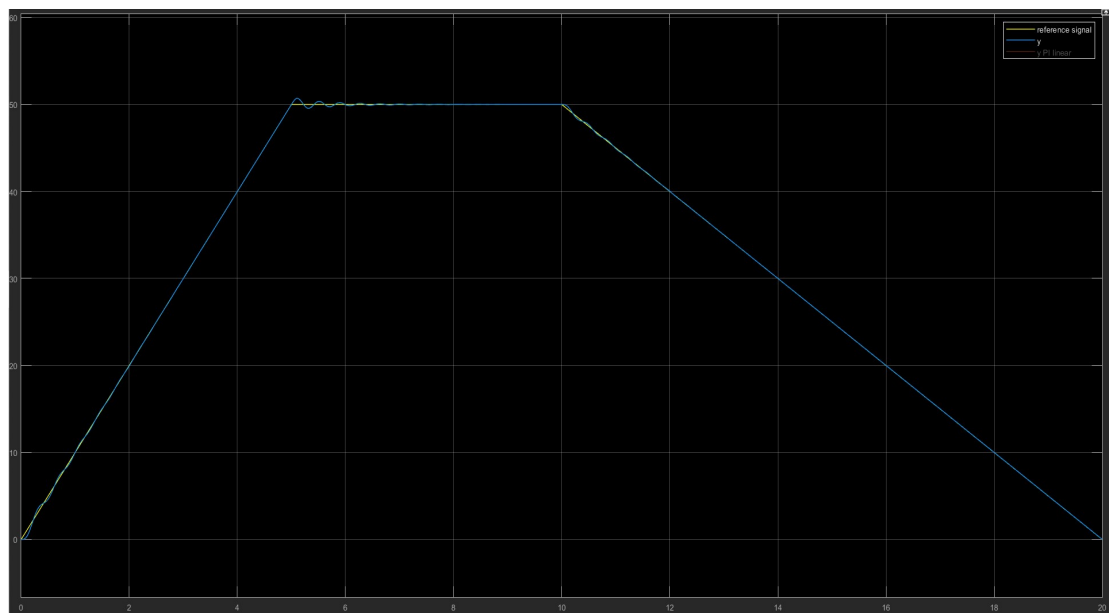
Εικόνα 11: Τρισδιάστατη επιφάνεια ασαφούς ελεγκτή

τα δύο σήματα αναφοράς, για τις παραμέτρους του ασαφούς ελεγκτή που επιλέχτηκαν προηγουμένως.

Αμέσως γίνεται αντιληπτό πως η απόκριση του συστήματος είναι πολύ καλή και σχεδόν ακριβώς ίδια με το σήμα αναφοράς κάθε στιγμή. Η ικανότητα του συστήματος να παρακολουθεί εισόδους ράμπας αποδυναμώνεται εξαιρετικά, αφού η είσοδος δεν αλλάζει την μορφή μεταβολής της, έχουμε απότομη δηλαδή αλλαγής μιας τιμής αναφοράς σε κάποια άλλη για το πρώτο σήμα. Ίδια μορφή εισόδου είχαμε και προηγουμένως απλώς για μια μόνο μεταβολή, εδώ απλά αυτό το βλέπουμε επαναλαμβανόμενα για διάφορες τιμές. Επαληθεύουμε έτσι απλά τις γρήγορες αποκρίσεις που έχει το σύστημα μας σε τέτοιοι είδους σήματα. Όσο αφορά το δεύτερο σήμα αναφοράς, η απόκριση εκεί φαίνεται ακόμα καλύτερη καθώς ταλαντώνεται πολύ λιγότερο γύρω από σταθερή τιμή αφού την προσεγγίζει πιο αργά με την βοήθεια της αρχικής ευθείας αλλά και της τελικής στίς οποίες κινείται ακριβώς πάνω τους. Άρα έχει μεγάλη ακρίβεια σε τέτοιου είδους σήματα.



Εικόνα 12: Απόκριση συστήματος για το σήμα 1



Εικόνα 13: Απόκριση συστήματος για το σήμα 2