

Εργασία 1
Ασαφή Συστήματα
Έλεγχος γωνίας δορυφόρου με ασαφή ελεγκτή

Φοιτητής : Μπεκιάρης Θεοφάνης ΑΕΜ:8200

Σχεδίαση γραμμικού ελεγκτή PI

Το σύστημα ελέγχου που προσομοιώνει τον δορυφόρο είναι:

$$G_p(s) = \frac{10}{(s+1)(s+9)}$$

ενώ η συνάρτηση μεταφορά του PI ελεγκτή είναι

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

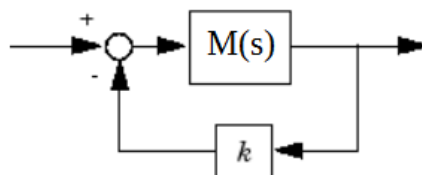
Άρα η συνολική συνάρτηση ανοιχτού βρόχου του συστήματος δορυφόρου μαζί με τον ελεγκτή είναι

$$G(s) = \frac{10K(s+c)}{s(s+1)(s+9)}$$

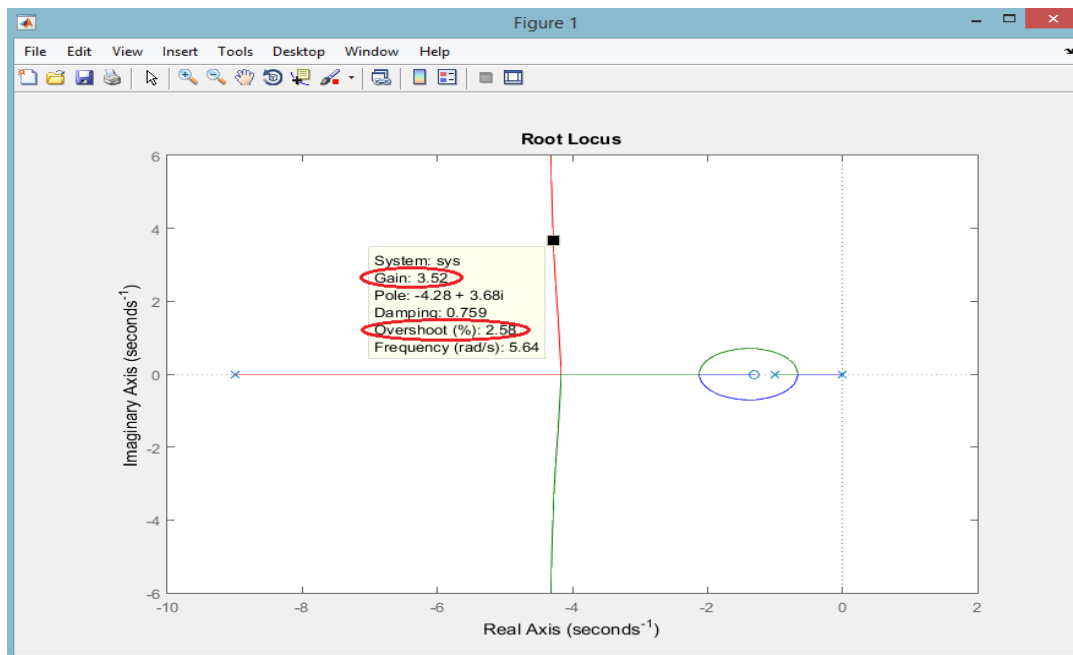
Για τον υπολογισμό των K και c θα επιλέξουμε το μηδενικό ανάμεσα στο -1 και -9 και κοντά στον κύριο πόλο που είναι το -1. Έστω ότι επιλέγουμε c = 1.3, άρα δημιουργούμε στο Matlab το σύστημα ανοιχτού βρόχου

$$M(s) = \frac{10(s+1.3)}{s(s+1)(s+9)}$$

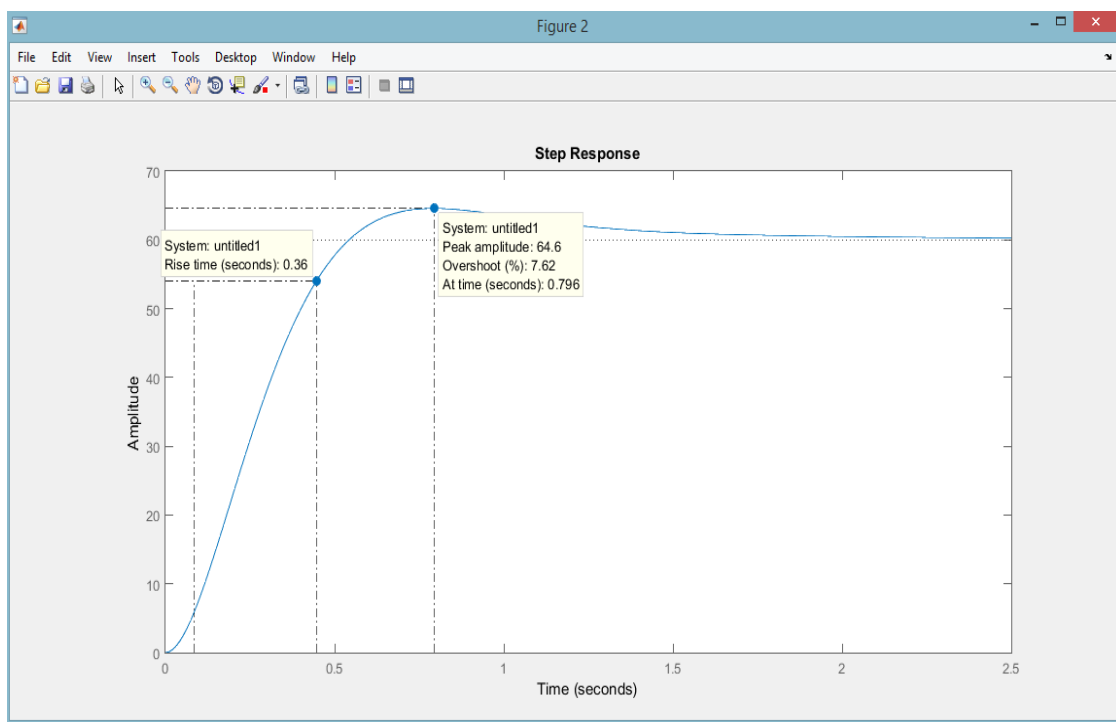
και με την συνάρτηση rlocus(M(s)) δημιουργούμε τον γεωμετρικό τόπο ριζών για τα διάφορα κέρδη K του συστήματος όπως απεικονίζεται παρακάτω



Η συνάρτηση rlocus δίνει:



Από το διάγραμμα βλέπουμε ότι για κέρδος $K = 3.5$ έχουμε υπέρψωση 2.58 %. Άρα επιλέγουμε $K = 3.5$. Με την χρήση των εντολών `opt = stepDataOptions('StepAmplitude', 60);` και `step(feedback(sys, 1, -1), opt)` ρυθμίζουμε το πλάτος της βηματικής να είναι ίσο με 60 διότι στην εκφώνηση αναφέρεται ότι το σήμα αναφοράς της γωνίας προσανατολισμού κινείται στο διάστημα $[0 \ 60]$. Η απόκριση του συστήματος κλειστού βρόχου στην βηματική συνάρτηση είναι:

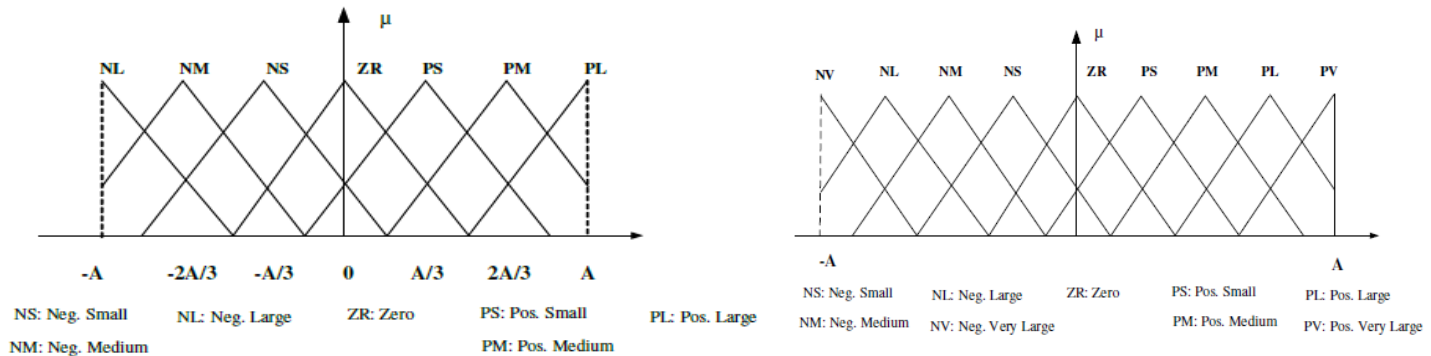


Από το σχήμα προκύπτει ότι έχουμε υπέρψωση 7.62 % και ο χρόνος ανόδου είναι 0.36 sec, άρα οι ζητούμενες προδιαγραφές ικανοποιούνται για $K_p = 3.5$, $c = 1.3$ και $K_i = K_p \cdot c \Rightarrow K_i = 4.55$.

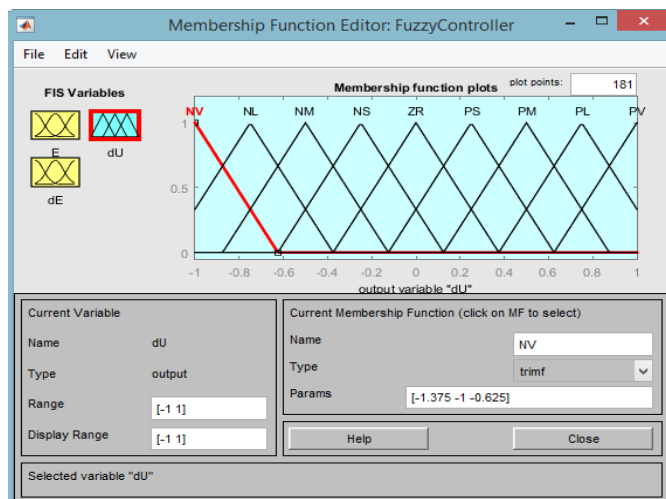
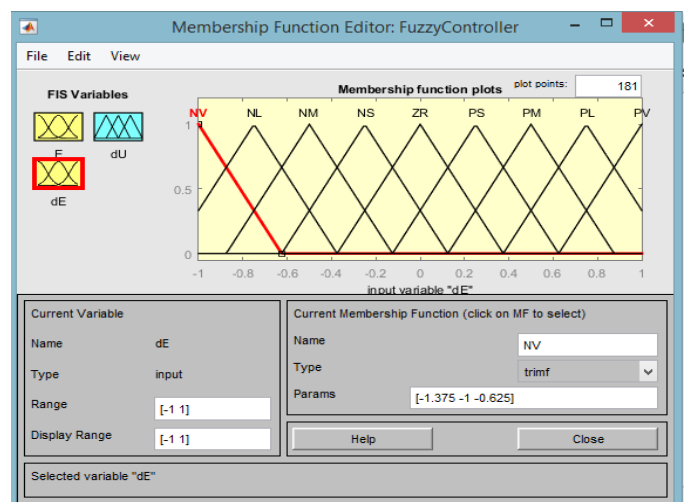
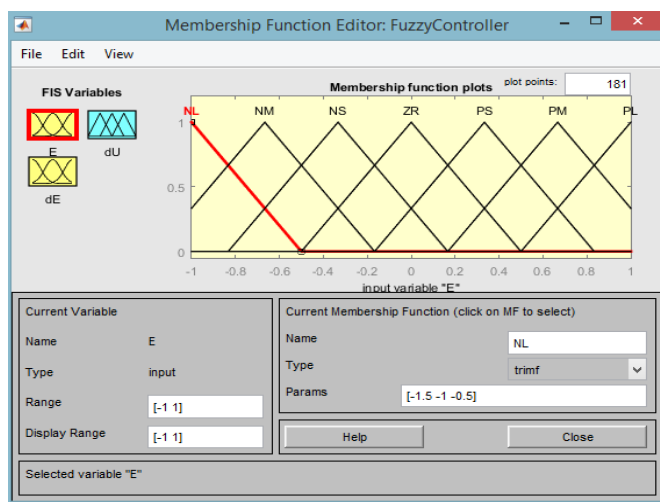
Σχεδίαση ασαφούς ελεγκτή PI (FLC)

Οι είσοδοι ασαφούς ελεγκτή είναι το σφάλμα E και ο ρυθμός μεταβολής του σφάλματος ΔE και η έξοδός του είναι η μεταβολή του σήματος ελέγχου ΔU , από την εκφώνηση της εργασίας για τις λεκτικές μεταβλητές εισόδων-εξόδου δίνεται ότι

- Για το σφάλμα E έχουμε 7 λεκτικές μεταβλητές
- Για την μεταβολή του σφάλματος ΔE και την έξοδο ΔU έχουμε 9 λεκτικές μεταβλητές



Με βάση τα παραπάνω σχεδιάζουμε με την βοήθεια του Fuzzy Logic Designer του Matlab τις συναρτήσεις συμμετοχής στο κανονικοποιημένο διάστημα $[-1 \ 1]$.



Σχεδίαση βάση κανόνων

Για την βάση κανόνων του συστήματος του PI ελεγκτή επειδή ο πίνακας κανόνων βάσης δεν είναι συμμετρικός αλλά είναι 9x7 πίνακας δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έτοιμο τον πίνακα των σημειώσεων. Για την δημιουργία επομένων του πίνακα κανόνων θα χρησιμοποιήσουμε την θεωρία που αναπτύσσετε στις σημειώσεις στην σελίδες 2 ως 10 σημειώσεις 09-part2. Από την θεωρία συμπεραίνουμε ότι για τον καθορισμό του μεγέθους των κανόνων της εξόδου μπορούμε να χρησιμοποιήσου την εμπειρική σχέση

$$\Delta U = \Delta E + E$$

όπου το + έχει την έννοια της λεκτικής πρόσθεσης. Για την εξαγωγή επομένων των κανόνων μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξής μεθοδολογία,αντιστοιχούμε σε κάθε σύνολο τιμές όπως φαίνεται παρακάτω

$$\{ NV \ NL \ NM \ NS \ ZR \ PS \ PM \ PL \ PV \} = \{ -4 \ -3 \ -2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \}$$

και έστω ότι έχουμε $\Delta E = PL$ και $E = NS$ τότε

$$\Delta U = \Delta E + E = PL + NS = 3 - 1 = 2 = PM$$

Δηλαδή αντικαθιστούμε τις τιμές που αντιστοιχήσαμε στα σύνολα,εκτελούμε την λεκτική πρόσθεση η οποία μας οδηγεί στο επιθυμητό σύνολο με βάση την αντιστοίχιση που έγινε.

Με βάση τα παραπάνω τελικά ο πίνακας κανόνων βάσης προκύπτει όπως φαίνεται παρακάτω. Παρατηρούμε ότι ο πίνακας καλύπτει όλες τις προδιαγραφές (SPI-1 ως και SPI-5) που αναφέρονται στην παράγραφο των σημειώσεων που σχετίζονται με τα πρόσημα αλλά και με το μέγεθος των κανόνων της εξόδου.

Πίνακας βάσης κανόνων FZ-PI ελεγκτή

ΔE	E	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PV	PS	PM	PL	PV	PV	PV	PV	PV
PL	ZR	PS	PM	PL	PV	PV	PV	PV
PM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV	PV	PV
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV	PV
ZR	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL
NS	NV	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PM
NM	NV	NV	NL	NM	NS	ZR	PS	PS
NL	NV	NV	NV	NL	NM	NS	ZR	ZR
NV	NV	NV	NV	NV	NL	NM	NS	NS

Εισάγουμε τους παραπάνω κανόνες στην βάση κανόνων του fuzzy controller με την χρήση του Fuzzy editor. Έχουμε συνολικά $7 \times 9 = 63$ κανόνες. Το αρχείο με τις σχεδιασμένες συναρτήσεις συμμετοχής και την βάση κανόνων αποθηκεύεται στο αρχείο **FuzzyController.fis** .

Σύστημα κλειστού βρόχου του ασαφή ελεγκτή

Σενάριο 1 α)

Σχεδίαση του ελεγκτή

Από τον γραμμικό ελεγκτή που κατασκευάσαμε αρχικά, έχουμε $K_p = 3.5$, $c = 1.3$, $K_i = 4.55$ τα οποία θα χρησιμοποιήσουν για την κατασκευή του ασαφούς ελεγκτή, έτσι σύμφωνα με την θεωρία των σημειώσεων

• FZ – PI:

$$K_1 = \frac{K_p}{F\{aK_e\}} \geq K_p, \quad a \approx T_i \quad (9-74)$$

$$K_e = 1$$

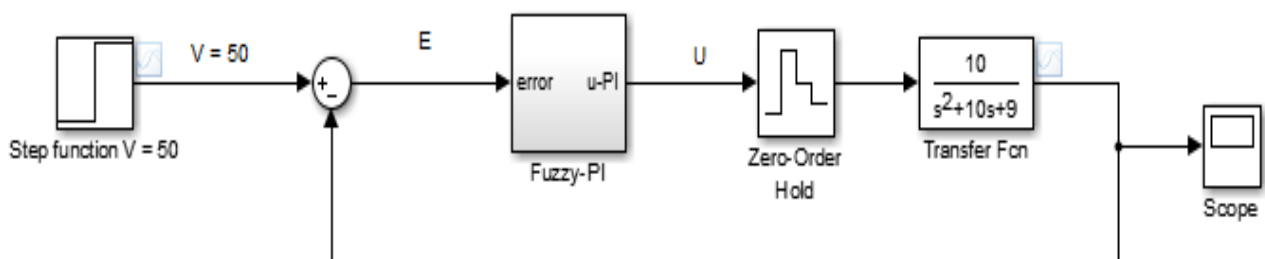
οι αρχικές τιμές του ασαφούς ελεγκτή είναι

$$\alpha = T_i = K_p/K_i = 1/c = 1/1.3 \Rightarrow a = 0.769$$

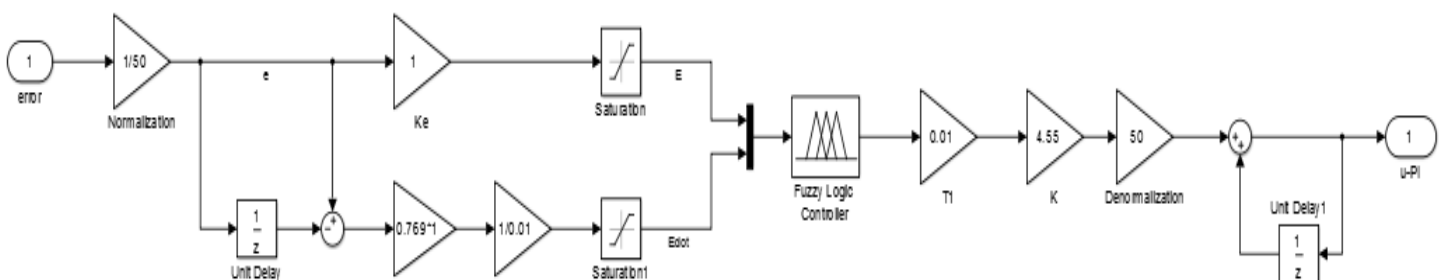
$$K_e = 1$$

$$K = 3.5 / F\{0.769 \cdot 1\} = 3.5 / 0.769 \Rightarrow K = 4.55$$

Το κύκλωμα του συστήματος που σχεδιάζεται στο Simulink είναι:

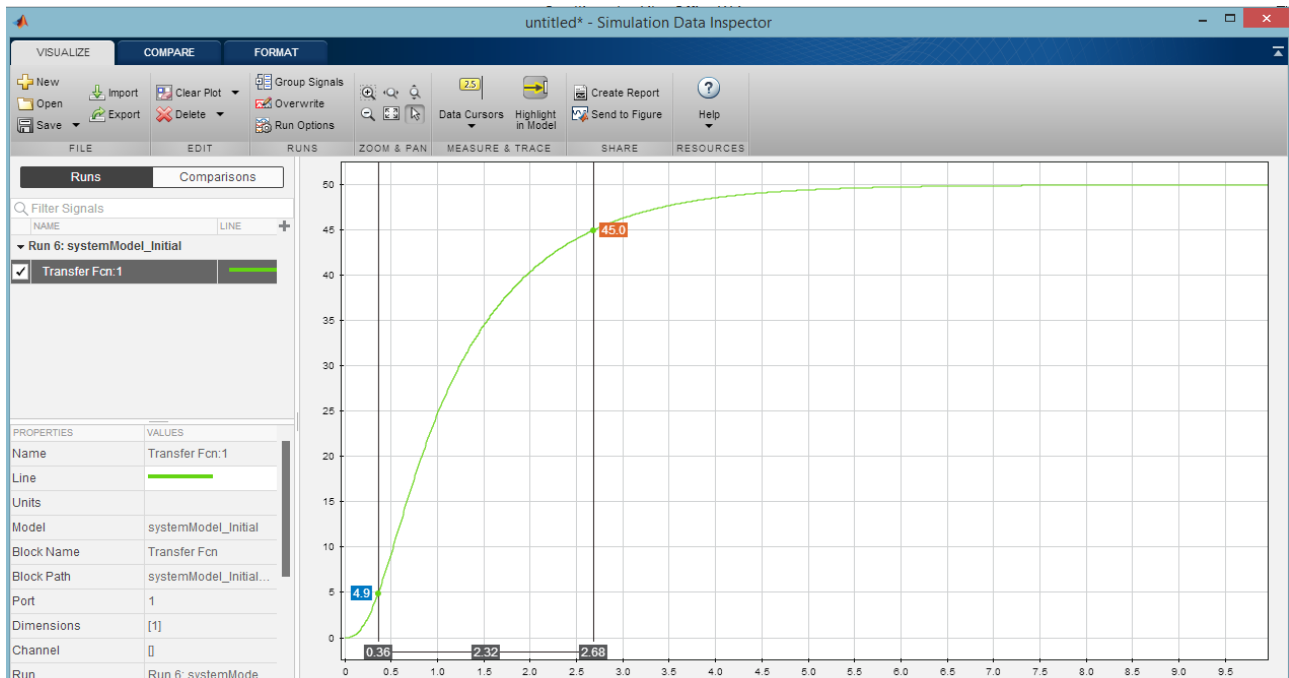


ενώ ο Fuzzy PI ελεγκτής παρουσιάζεται παρακάτω. Η κανονικοποίηση έχει γίνει με το 50 διότι στην εκφώνηση αναφέρεται ότι η είσοδος r παίρνει τιμές στο διάστημα $[0 \ 50]$.



Η απόκριση που παίρνουμε από το σύστημα με τις τιμές που υπολογίσαμε παραπάνω

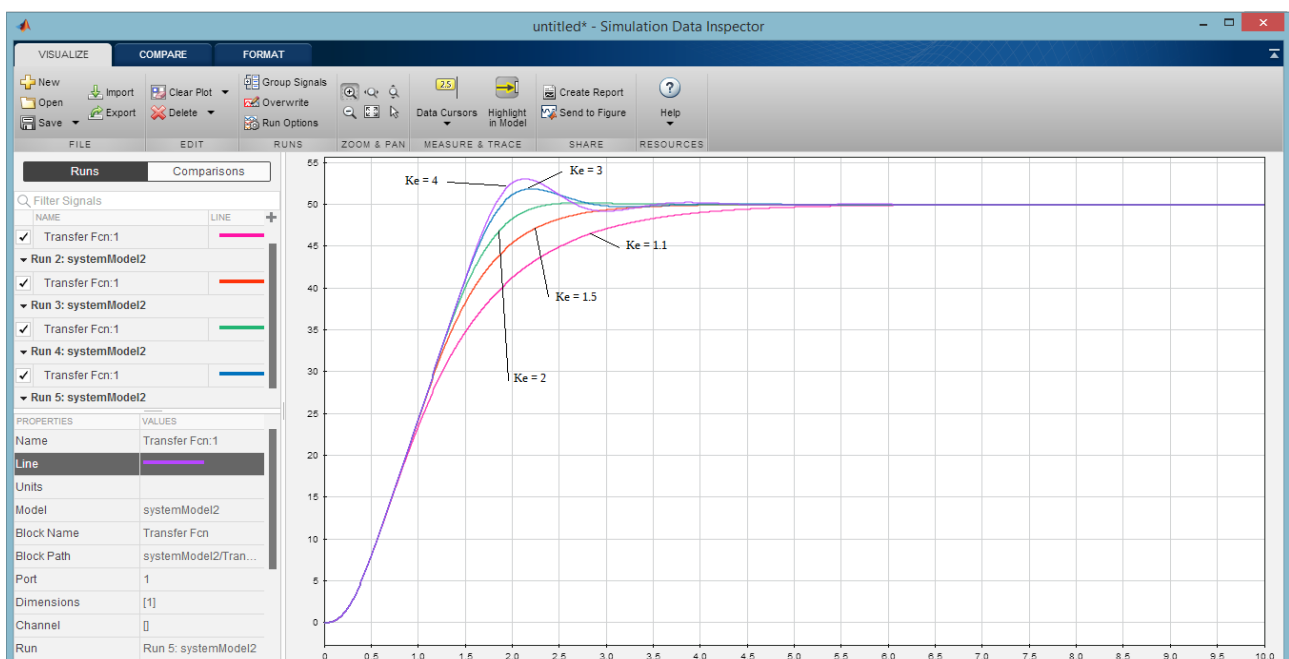
φαινόνται στο παρακάτω σχήμα το οποίο πήραμε με το εργαλείο Simulation Data Inspector του Simulink.



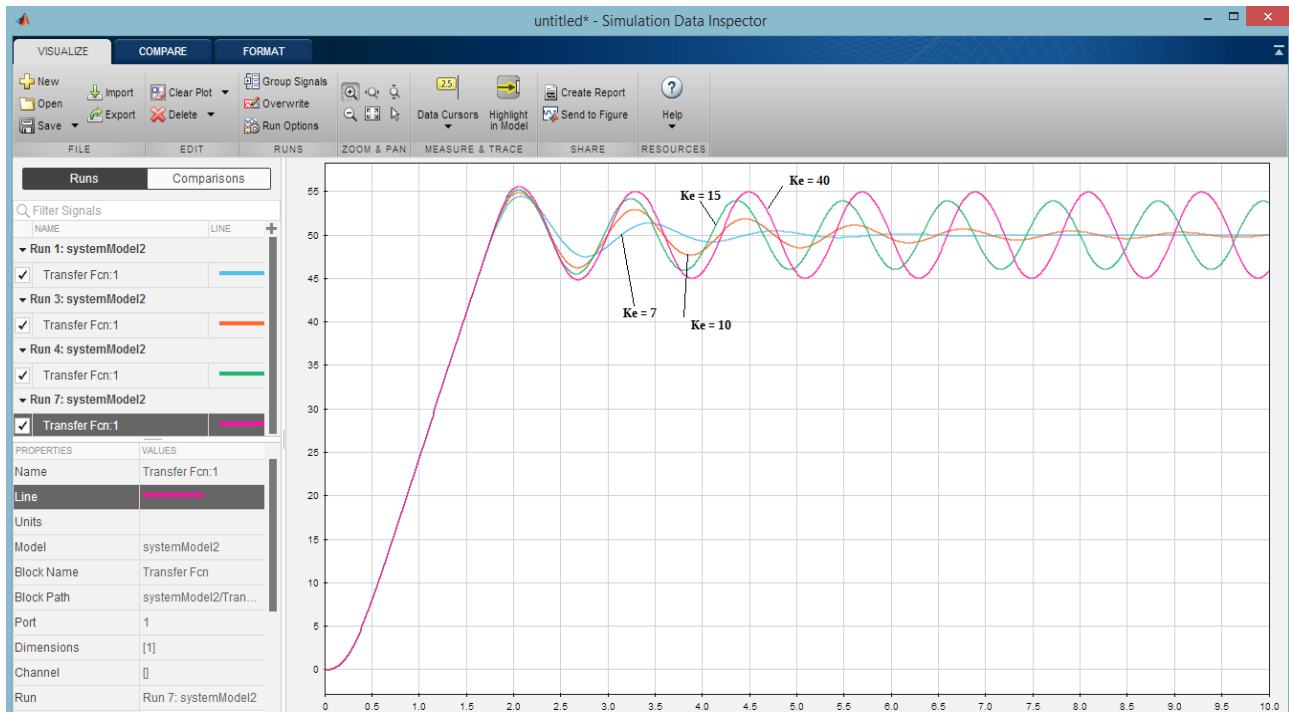
Βλέπουμε ότι το σήμα εξόδου του συστήματος δεν έχει υπερύψωση αλλά ο **χρόνος ανόδου** είναι **2.32sec**, επομένως πρέπει να κάνουμε επιπλέον ρύθμιση. Θα εφαρμόσουμε την συγκριτική μέθοδο ρύθμισης των κερδών.

Επίδραση στην έξοδο του συστήματος από την ρύθμιση των κερδών

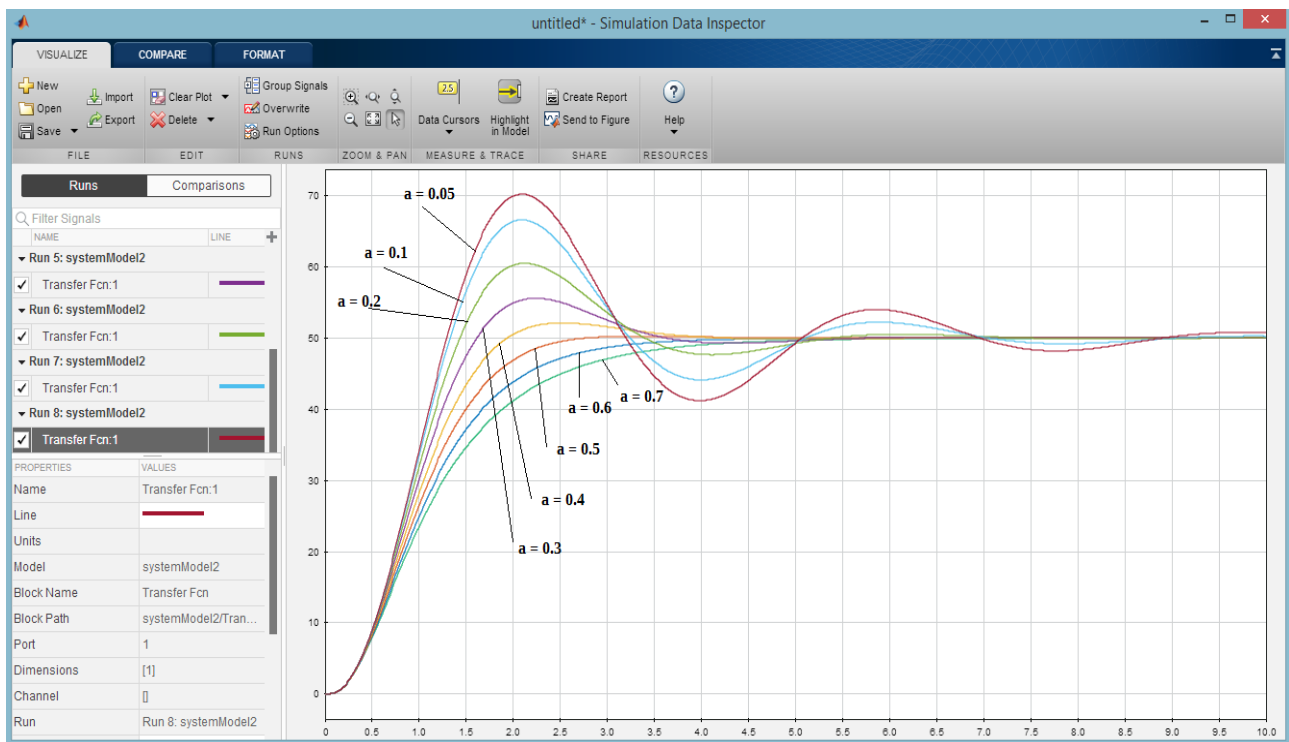
Αρχικά θα κρατήσουμε σταθερά τα $\alpha = 0.769$ και $K = 4.55$ και θα χρησιμοποιήσουμε διάφορες τιμές για το K_e από 1.1 μέχρι και 4.



Είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται η τιμή του K_e ο χρόνος ανόδου μειώνεται και επίσης εμφανίζεται υπερύψωση η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται και το K_e . Αν τώρα το K_e αυξηθεί ακόμα περισσότερο τότε το σύστημα εκτελεί ταλάντωση όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

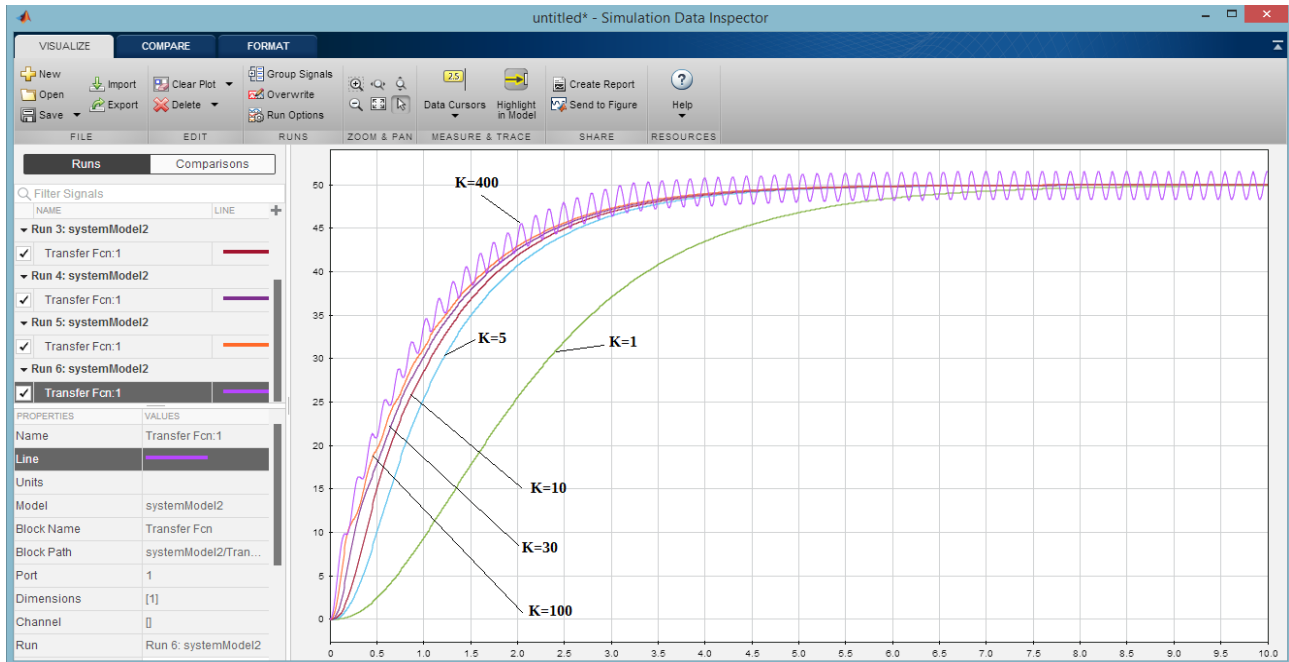


Στην συνέχεια μεταβάλλουμε το a από 0.7 μέχρι 0.05 κρατώντας σταθερά τα $K_e = 1$ και $K = 4.55$



Συμπερασματικά μειώνοντας το a μειώνουμε το χρόνο ανόδου και επίσης εμφανίζεται υπερύψωση η οποία αυξάνεται όσο μειώνεται το a δημιουργώντας ταλαντώσεις.

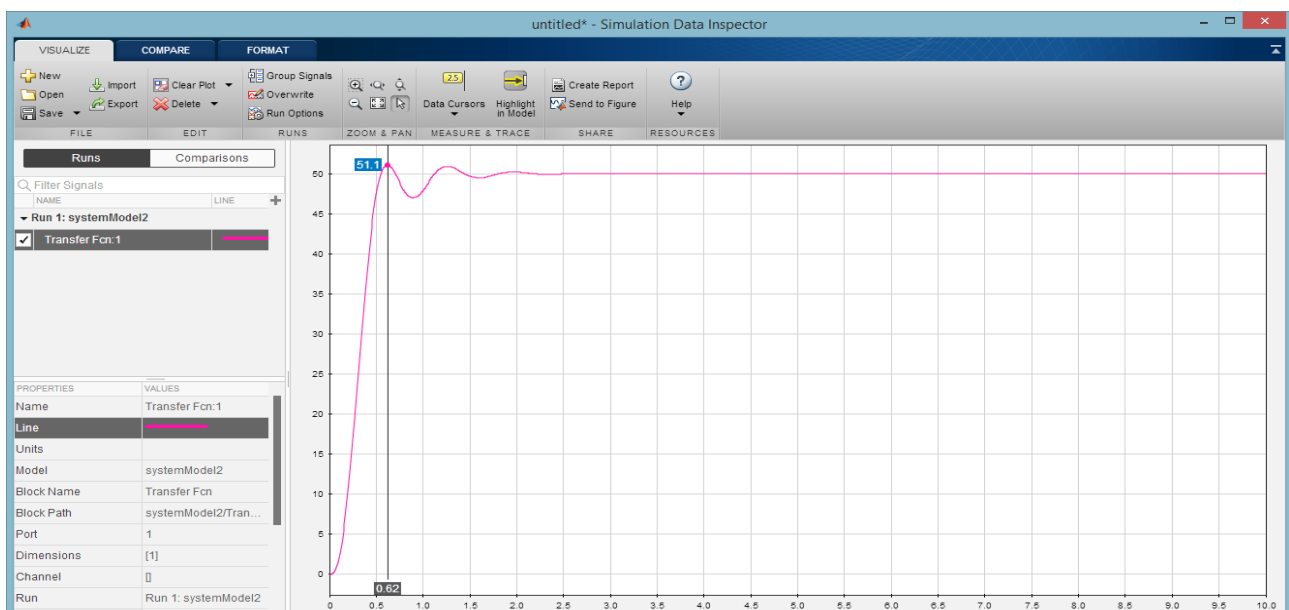
Τέλος θα μεταβάλουμε το K κρατώντας σταθερά τα $a = 0.769$ και $K_e = 1$.



Με την αύξηση του K παρατηρούμε μείωση του χρόνου ανόδου μέχρι κάποιο βαθμό, συγκεκριμένα για τιμές μεγαλύτερες από $K = 5$ η διαφορά στο χρόνο ανόδου δεν είναι αισθητή και για πολύ μεγάλες τιμές του K το σύστημα εκτελεί ταλάντωση. Παρόλα αυτά βλέπουμε το K δεν δημιουργεί κάποιο φαινόμενο υπερύψωσης εκτός φυσικά από τις ταλαντώσεις για μεγάλη τιμή K .

Αρά σύμφωνα με τα παραπάνω για την μείωση του χρόνου ανόδου θα πρέπει να μειώσουμε το a και τα αυξήσουμε τα K_e και K . Μετά από δοκιμές καταλήγουμε στο εξής αποτέλεσμα **$a = 0.26$, $K = 40$, $K_e = 1.5$**

Η απόκριση του συστήματος είναι

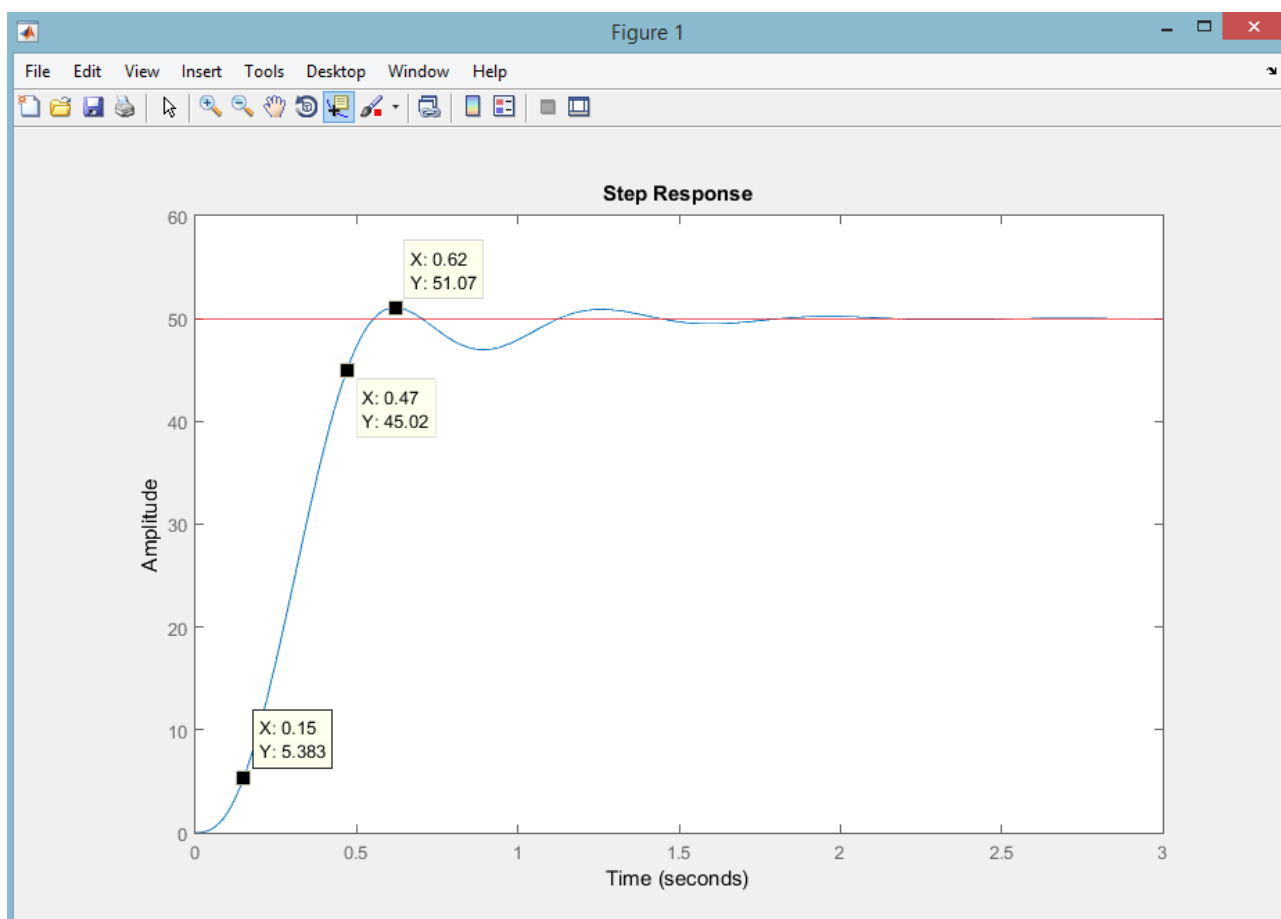


Έχουμε χρόνο ανόδου μικρότερο από 0.6 sec και υπερύψωση $(51.1 - 50) / 50 = 0.022$ ή 2.2 %, αυτό θα φανεί καλύτερα στο παρακάτω διάγραμμα.

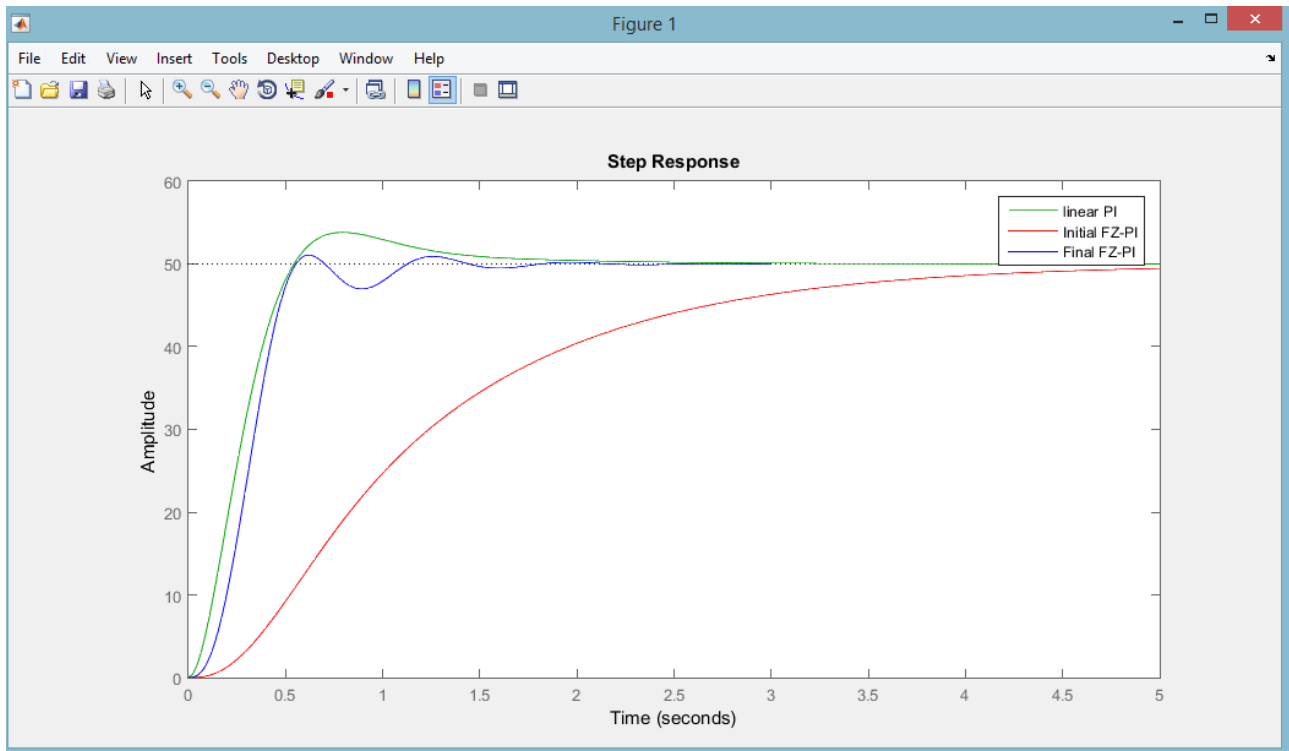
Σύγκριση γραμμικού PI και Fuzzy PI controller

Για τον σχεδιασμό και την σύγκριση των γραφικών παραστάσεων θα εξάγουμε τα δεδομένα του σήματος απόκρισης του Fuzzy controller στο workspace με χρήση του Block “To workspace” που υπάρχει μέσα στο περιβάλλον του simulink και το οποίο παράγει ένα αντικείμενο timeseries και για τον σχεδιασμό της απόκρισης καλούμε την plot ως εξής `plot(OutFinal.Time,OutFinal.Data)` όπου το OutFinal το εξαγόμενο αντικείμενο του Block. Με αυτό το τρόπο θα σχεδιάσουμε στην ίδια γραφική παράσταση τις αποκρίσεις του αναλογικού PI ελεγκτή, του αρχικού και τελικού Fuzzy ελεγκτή.

Παρακάτω φαίνεται η τελική απόκριση του συστήματος η οποία παρουσιάστηκε και προηγουμένως στην οποία όμως τώρα έχουμε μαρκαρισμένα τα σημεία της υπερύψωσης και τα σημεία που έχουμε 10% και 90% του σήματος εξόδου για τον υπολογισμό του χρόνου ανόδου ,δηλαδή τα σημεία 5 και 45. Από την παρακάτω γραφική βλέπουμε **υπερύψωση ίση με $(51.07-50)/50=0.0214$ ή 2.14 %** και **χρόνο ανόδου ίσο με $0.47\text{sec} - 0.15\text{sec} = 0.32 \text{ sec}$** .



Στην συνέχεια παρουσιάζονται και οι τρεις αποκρίσεις στο ίδιο διάγραμμα με σκοπό την σύγκριση τους , παρακάτω βλέπου με πράσινο την απόκριση του γραμμικού ελεγκτή , με κόκκινο την απόκριση του αρχικού Fuzzy ελεγκτή με αρχικές τιμές που προέκυψαν από το γραμμικό ελεγκτή και τέλος με μπλε είναι η απόκριση του τελικού Fuzzy ελεγκτή μετά από την διαδικασία της ρύθμισης του.



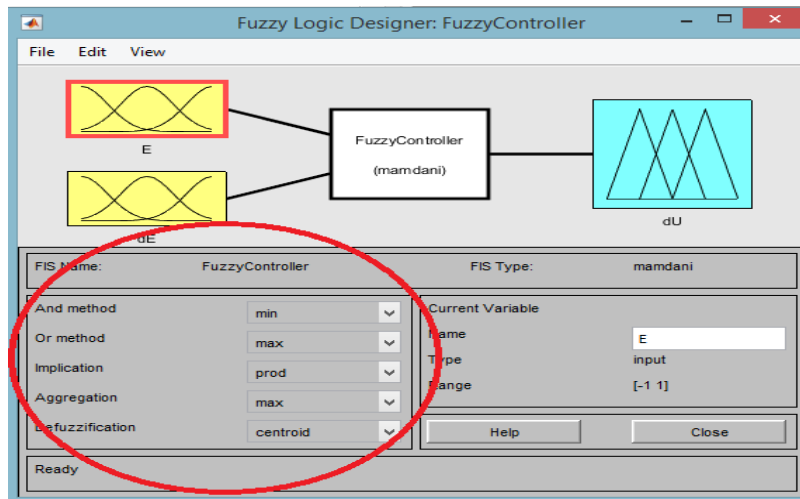
Τα χαρακτηριστικά του αρχικού Fuzzy ελεγκτή είναι πολύ χειρότερα από του γραμμικού, όπως βλέπουμε ο χρόνος ανόδου είναι αρκετά μεγάλος, αυτό σημαίνει ότι το σύστημα δεν ανταποκρίνεται γρήγορα σε μεταβολές. Μετά την ρύθμιση όμως ο τελικός Fuzzy ελεγκτής είναι πολύ καλύτερος από τον αρχικό Fuzzy και επίσης είναι καλύτερος και από τον γραμμικό και ως προς το χρόνο ανόδου και ως προς την υπερύψωση. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένα πίνακας με τις τιμές της υπερύψωσης και του χρόνου ανόδου για την εύκολη σύγκριση τους.

	Χρόνος Ανόδου(sec)	Υπερύψωση
Γραμμικός PI	0.36	7.62 %
Αρχικός Fuzzy PI	2.32	0 %
Ρυθμισμένος Fuzzy PI	0.32	2.14 %

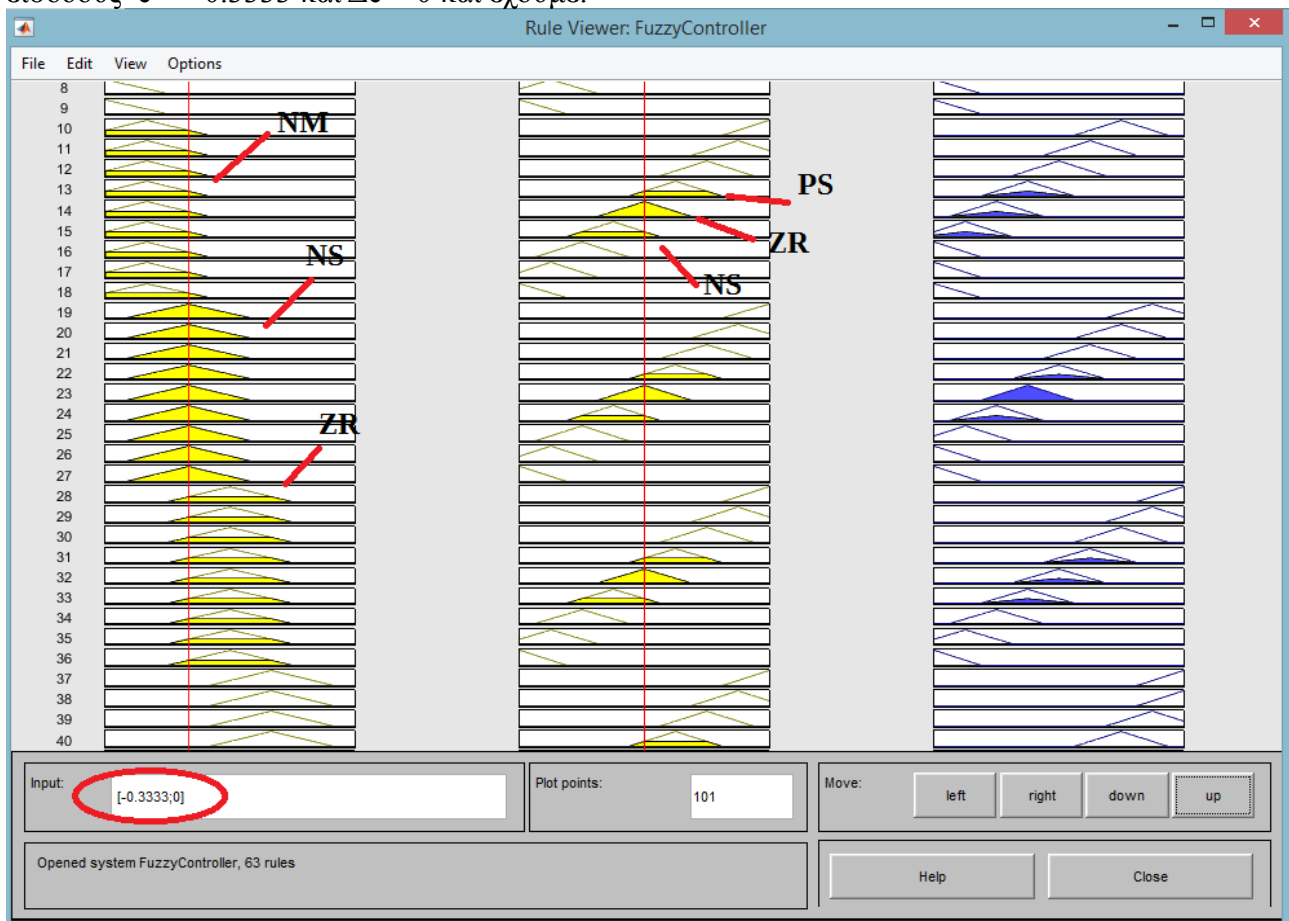
	K_p	K_i	K_e	a	K
Γραμμικός PI	3.5	4.55	-	-	-
Αρχικός Fuzzy PI	-	-	1	0.769	4.55
Ρυθμισμένος Fuzzy PI	-	-	1.5	0.26	40

Σενάριο 1 β)

Αρχικά ανοίγουμε το GUI του Fuzzy Logic Designer στο οποίο φαίνεται η ρύθμιση των προδιαγραφών για του τελεστές σύνθεσης, συμπερασμού και αποσαφοποίησης που ζητούνται στην εκφώνηση.



Για ασαφοποιητή Singleton η διέγερση $e = NS$ και $\Delta e = ZR$ αντιστοιχεί στα κέντρα των συναρτήσεων συμμετοχής NS και ZR , δηλαδή σημαίνει ότι έχουμε $e = -0.3333$ και $\Delta e = 0$, άρα με την view \rightarrow rules στο GUI του Editor ανοίγει το γραφικό περιβάλλον που φαίνονται οι κανόνες και οι διέγερση τους καθώς και η διέγερση των συνόλων εξόδου. Εισάγουμε στο αντίστοιχο πεδίο τις εισόδους $e = -0.3333$ και $\Delta e = 0$ και έχουμε:

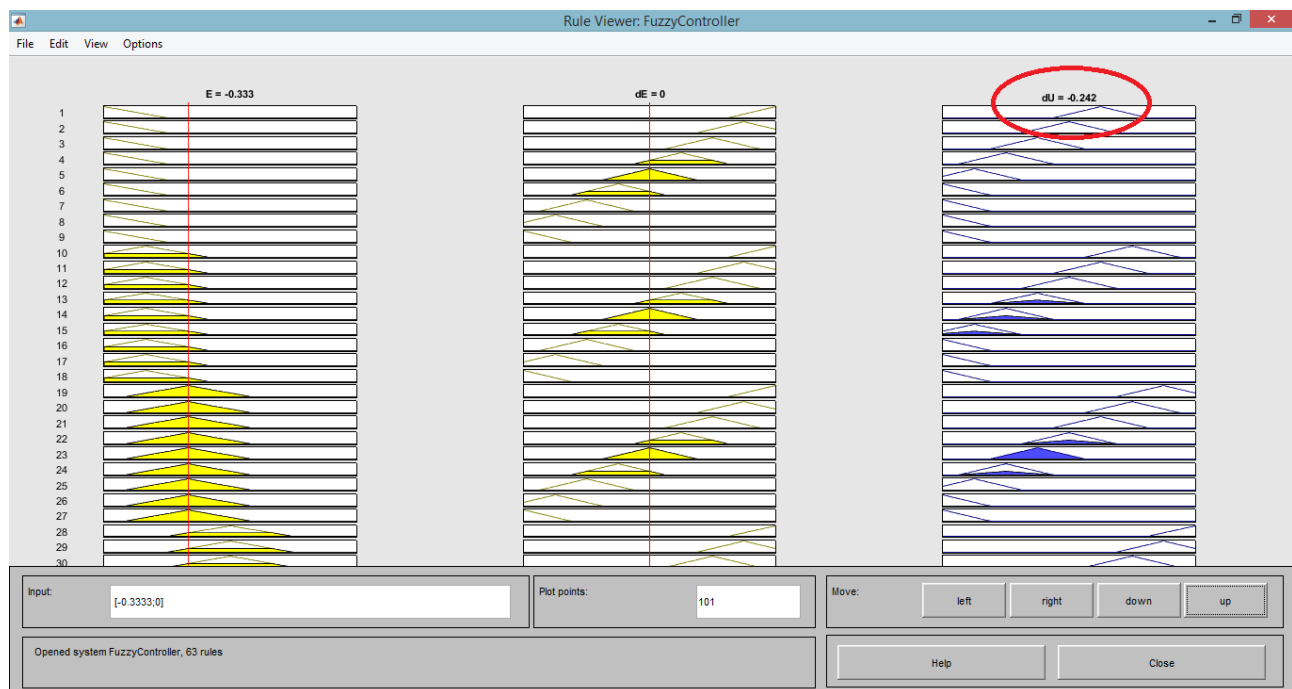


Οι εισόδος $e = -0.3333$ διεγείρει τα σύνολα **NM,NS** και **ZR** ενώ η είσοδος $\Delta e = 0$ τα σύνολα **NS,ZR,PS**, επομένως οι κανόνες που συμπεριλαμβάνουν των συνδυασμό αυτών των συνόλων στο τμήμα υπόθεσης τους είναι αυτοί που τελικά ενεργοποιούνται και τα σύνολα συμπερασμού τους όπως είναι εμφανές από το παραπάνω σχήμα,δηλαδή τα σύνολα εξόδου που τελικά ενεργοποιούνται προκύπτουν από τους κανόνες 13,14,15,22,23,24,31,32,33.

Το συνολικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι.



Η έξοδος τελικά με την χρήση του αποσαφοποιητή COA είναι $\Delta E = -0.242$ όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.



Σχόλια και συμπέρασμα

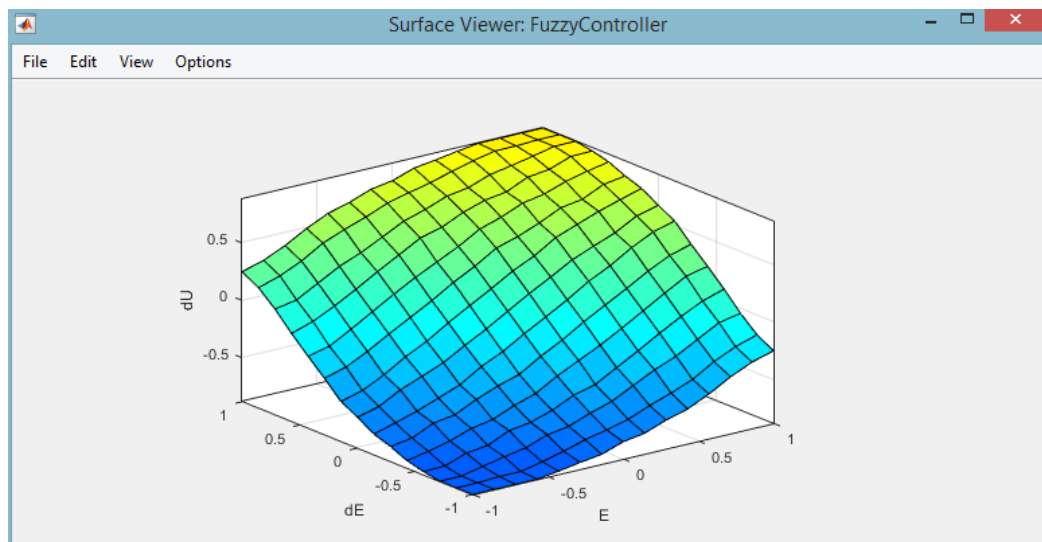
Με βάση τα παραπάνω για τις εισόδους που δόθηκαν συμπεραίνουμε ότι

1. Το σφάλμα είναι “λίγο” αρνητικό (NS), αυτό σημαίνει ότι το σύστημα βρίσκεται στην περιοχή A2 ή A3, δηλαδή το σήμα εξόδου έχει “λίγο” μεγαλύτερη τιμή από το σήμα ελέγχου $e < 0 \rightarrow$ σήμα ελέγχου $<$ σήμα εξόδου.
2. Η μεταβολή του σφάλματος είναι μηδέν $\Delta e = 0$ (ZR) και επομένως το σύστημα δεν μεταβάλλει το σφάλμα του.
3. Επομένως θα πρέπει να μειώσουμε “λίγο” το σήμα ελέγχου ώστε το σύστημα να επανέλθει στην θέση μηδενικού σφάλματος και η έξοδος να γίνει ίση με το σήμα ελέγχου. Επομένως η έξοδος του ελεγκτή βγαίνει αρνητική που σημαίνει ότι το σήμα μας θα είναι μικρότερο από το προηγούμενο αφού $\Delta U < 0 \rightarrow u(k) - u(k-1) < 0 \rightarrow u(k) < u(k-1)$ και έτσι το σύστημα θα κατευθύνει το σφάλμα πιο κοντά στο μηδέν.

Σενάριο 1 γ)

Ερμηνεία νόμου ελέγχου

Για την κατασκευή την τρισδιάστατης επιφάνειας επιλέγουμε μέσω του GUI view→ surface και προκύπτει η επιφάνεια του ασαφούς ελεγκτή.



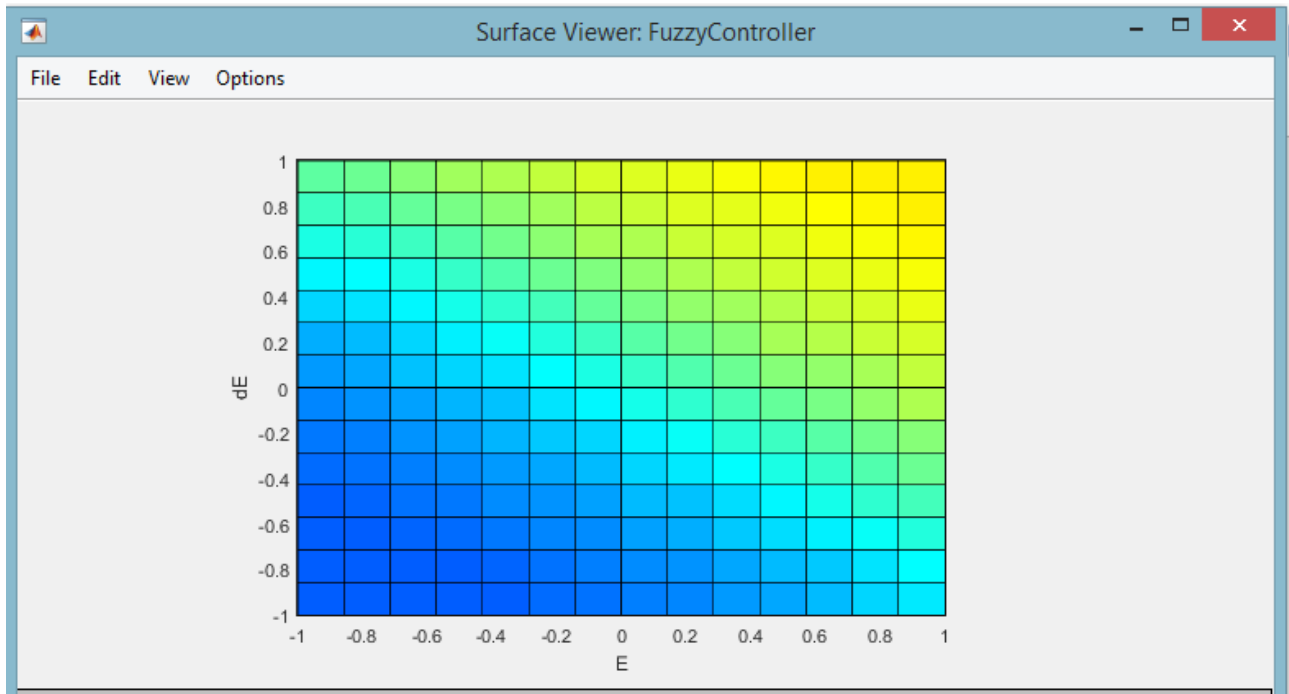
Από το σχήμα της επιφάνειας φαίνεται ξεκάθαρα ότι όταν το σφάλμα και η μεταβολή του αυξάνονται και τείνουν προς το 1 τότε και η έξοδος αυξάνεται και τείνει προς το 1. Επίσης όταν μειώνονται και κατευθύνονται προς το -1 τότε κατευθύνεται και η έξοδος στο -1. Στην ουσία η μορφή της γραφικής έρχεται σε συμφωνία με τον πίνακα της βάσης κανόνων που σχεδιάσαμε,για ευκολία παρατίθεται ξανά παρακάτω.

Πίνακας βάσης κανόνων FZ-PI ελεγκτή

ΔE	E	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PV	PS	PM	PL	PV	PV	PV	PV	PV
PL	ZR	PS	PM	PL	PV	PV	PV	PV
PM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV	PV	PV
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV	PV
ZR	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL
NS	NV	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PM
NM	NV	NV	NL	NM	NS	ZR	PS	PS
NL	NV	NV	NV	NL	NM	NS	ZR	ZR
NV	NV	NV	NV	NV	NL	NM	NS	NS

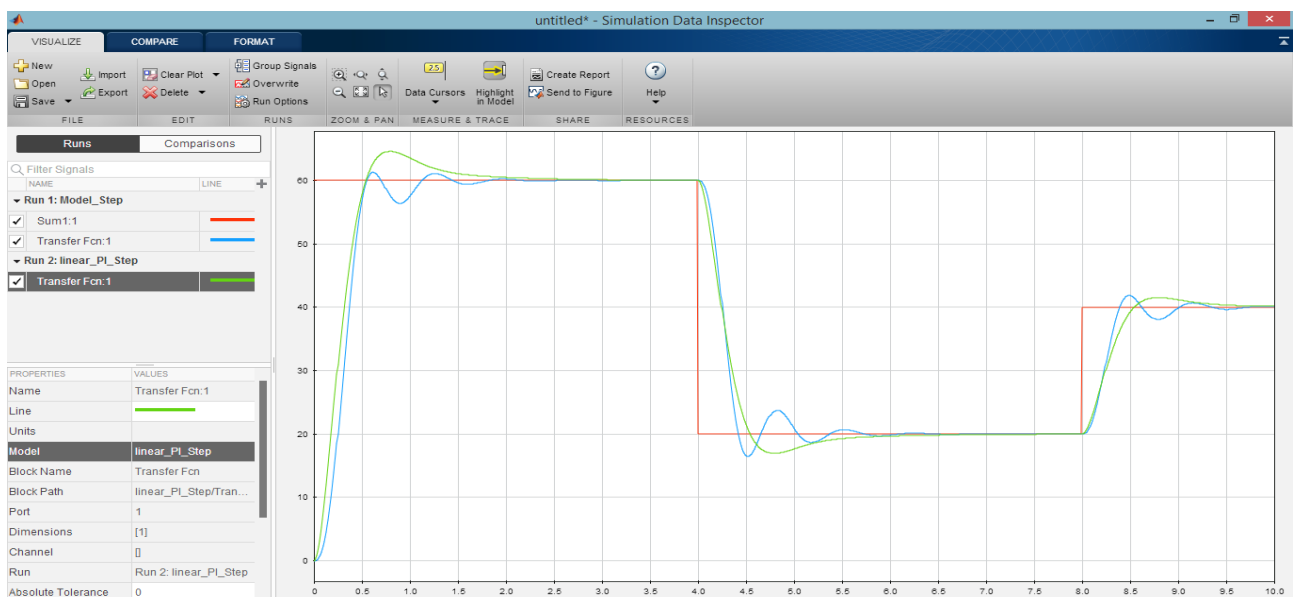
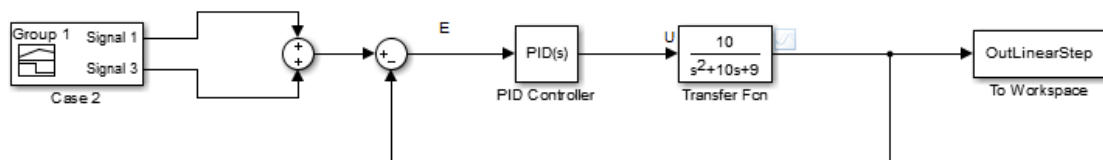
Στον πίνακα βλέπουμε δηλαδή αυτό που αναφέραμε και προηγουμένως ότι όσο αυξάνονται τα E και ΔE τόσο αυξάνεται και η έξοδος,επίσης όσο μειώνονται τα E και ΔE τόσο μειώνεται και η έξοδος .

Για καλύτερη παρατήρηση αυτών που αναφέραμε, παρακάτω έχουμε μια δισδιάστατη απεικόνιση της παραπάνω επιφάνειας όπου ο χρωματισμός δείχνει το μέγεθος της εξόδου. Τα αποτελέσματα είναι ίδια με τον πίνακα της βάσης κανόνων.



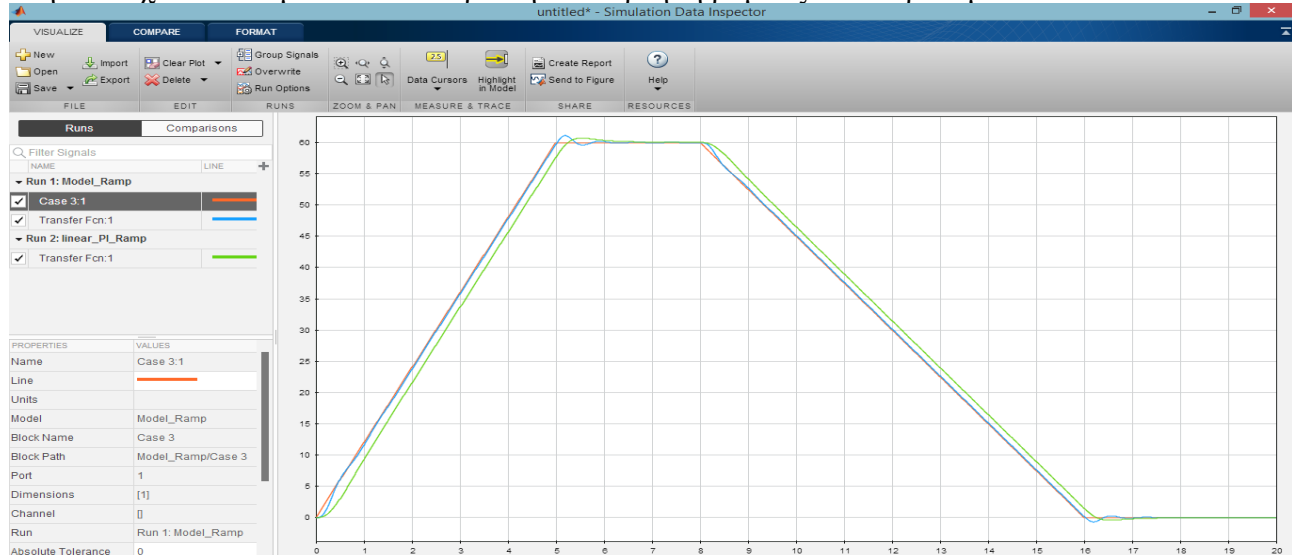
Σενάριο 2

Για την σύγκριση των αποκρίσεων του γραμμικού και του Fuzzy ελεγκτή στις εισόδους που δίνονται σχεδιάστηκε στο Simulink το γραμμικό σύστημα PI. Στο PID block του σχήματος θέσαμε $P = 3.5$, $I = 4.55$ και $D = 0$.



Να σημειωθεί ότι επειδή πλέον το σήμα εισόδου παίρνει μέγιστη τιμή 60,ο κλιμακοποίηση του Fuzzy Controller άλλαξε και έγινε με βάση το 60.Στο παραπάνω σχήμα η μπλε γραφική παράσταση αντιστοιχεί στον Fuzzy ελεγκτή ενώ η πράσινη στον γραμμικό. Οι γραφικές παραστάσεις έγιναν με την βοήθεια του Simulation Data Inspector,κάθε μοντέλο,γραμμικό και Fuzzy,έτρεξε ξεχωριστά και οι γραφικές τους παραστάσεις προβάλλονται στον ίδιο άξονα με το εργαλείο Simulation Data Inspector.

Στην συνέχεια κάνουμε το ίδιο και για την συνάρτηση ράμπας και παίρνουμε



Η μπλε γραφική παράσταση αντιστοιχεί στον Fuzzy ελεγκτή ενώ η πράσινη στον γραμμικό. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του Fuzzy PI ελεγκτή που όπως φαίνεται μπορεί και παρακολουθεί ακριβώς την συνάρτηση ράμπας,με κάποια μικρή ταλάντωση στις κορυφές που έχουμε απότομη μετάβαση. Από την άλλη πλευρά ο γραμμικός PI δείχνει αδυναμία στο να παρακολουθεί ακριβώς την είσοδο ράμπας αφού όπως φαίνεται υπάρχει μικρή απόκλιση στις γραφικές παραστάσεις εισόδου και γραμμικού PI ελεγκτή. Συμπερασματικά ο Fuzzy PI είναι αρκετά πιο αποτελεσματικός από τον γραμμικό PI ελεγκτή στην παρακολούθηση συναρτήσεων ράμπας.

Δομή αρχείων εργασίας

FuzzyController.fis : Το μοντέλο του Fuzzy ελεγκτή,περιέχει την βάση κανόνων και τις συναρτήσεις συμμετοχής.

PIControl.m : Script που δημιουργήθηκε στην αρχή της εργασίας για τον καθορισμό των κερδών του γραμμικού PI ελεγκτή. Σχεδιάζει το γεωμετρικό τόπο ριζών από τον οποίο επιλέγετε το κέρδος K.

plotControllers.m : Το script σχεδιάζει στο ίδιο διάγραμμα τον γραμμικό ελεγκτή,το αρχικό Fuzzy και τον τελικό Fuzzy ελεγκτή.

systemModel_Final.slx και sytemModel_Final.slx : Τα μοντέλα του αρχικού και τελικού Fuzzy ελεγκτή με τα αντίστοιχα κέρδη που αντιστοιχούν στον κάθε ελεγκτή.

Model_Step.slx : Μοντέλο του τελικού ελεγκτή με είσοδο την συνάρτηση του σχήματος 3.

Model_Ramp.slx : Μοντέλο του τελικού ελεγκτή με είσοδο την συνάρτηση ράμπας του σχήματος 4.

linear_PI_Step.slx : Μοντέλο του γραμμικού ελεγκτή με είσοδο την συνάρτηση του σχήματος 3.

linear_PI_Ramp.slx : Μοντέλο του γραμμικού ελεγκτή με είσοδο την συνάρτηση ράμπας του σχήματος 4.