

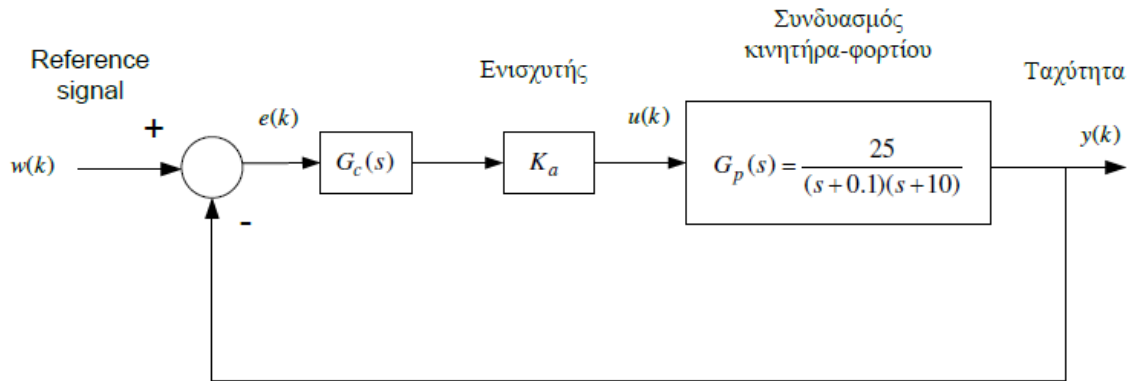
Παυλίδης
Μιχαήλ
Ιάσων
ΑΕΜ: 9015
14/10/2021

ΣΧΕΔΙΑΣΗ FLC

Ασαφή Συστήματα 2020-2021

Σκοπός Εργασίας

Ο στόχος της εργασίας μας είναι ο έλεγχος του συνδυασμού DC κινητήρα και ταχύμετρου ακριβείας που χρησιμοποιείται σε ένα τραπέζι εργασίας υψηλής ακρίβειας. Για αποτελεσματικό έλεγχο, επιθυμούμε το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση να είναι μηδενικό. Αυτή η απαίτηση μας οδηγεί στη χρήση ελεγκτών που έχουν ολοκληρωτική δράση (PI controller). Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται το σύστημα μαζί με τον ελεγκτή σε μπλόκ μορφή.



Σημειώνεται πως η μέγιστη ταχύτητα του τραπεζιού εργασίας που μας ενδιαφέρει είναι $\omega_{max} = 50 \text{ rad/s}$.

Σχεδίαση Γραμμικού Ελεγκτή

Για μηδενικό σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση επιλέγουμε ένα γραμμικό PI ελεγκτή της μορφής

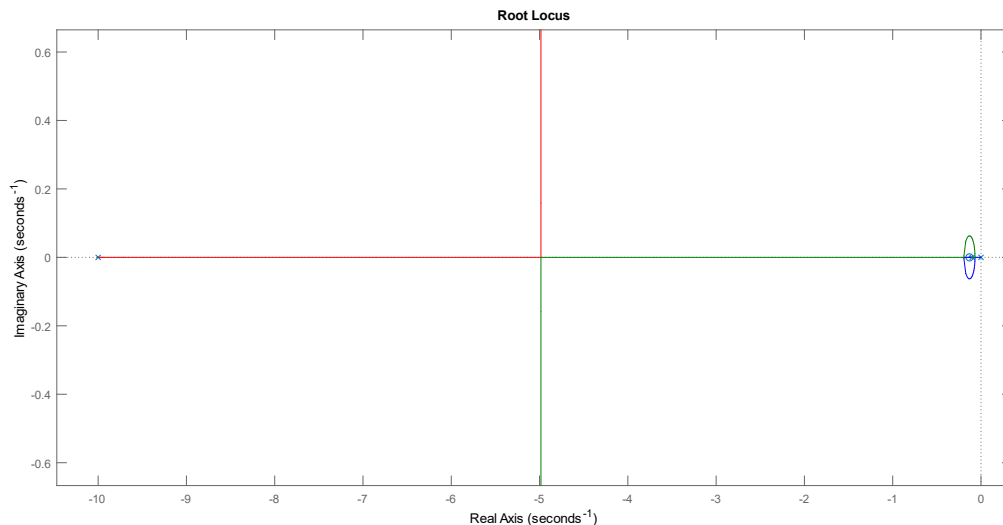
$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} = \frac{K_p(s + c)}{s}, \quad c = \frac{K_I}{K_p}$$

Η συνολική συνάρτηση ανοιχτού βρόχου συνδυάζοντας τον ελεγκτή και τον κινητήρα-φορτίο θα είναι η

$$A(s) = \frac{K(s + c)}{s(s + 0.1)(s + 10)}$$

Μπορούμε να παρατηρήσουμε πως έχει ένα μηδενικό στο $-c$. Από την εκφώνηση μας ζητείται να τοποθετήσουμε αυτό το μηδενικό κοντά στον κυρίαρχο πόλο της $G_p(s)$, δηλαδή τον -0.1

Ο γεωμετρικός τόπος των ριζών που προκύπτει χρησιμοποιώντας την εντολή *rlocus* του Matlab φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Μπορούν εύκολα να διακριθούν δύο διαφορετικά χρώματα, το κόκκινο και το πράσινο. Αυτά απεικονίζουν τη μεταβολή των πόλων -10 και -0.1 συναρτήσει της μεταβολής του κέρδους K . Η τροχιά του πόλου στο μηδέν απεικονίζεται με μπλε χρώμα αλλά δεν φαίνεται καθαρά στην εικόνα λόγω μικρού μεγέθους.

Ο γεωμετρικός τόπος των ριζών προκύπτει βάσει της συνάρτησης μεταφοράς κλειστού βρόχου. Στο παράδειγμα μας έχουμε μοναδιαία αρνητική ανάδραση οπότε θα ισχύει

$$H_k(s) = \frac{K(s + c)}{s^3 + 10.1s^2 + (1 + K)s + Kc}$$

Εφόσον επιλέγουμε μια τιμή μηδενικού κοντά στον πόλο -0.1, το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί δεύτερης τάξης και παίρνει την ακόλουθη μορφή

$$H_{k2}(s) = \frac{K}{s^2 + 10 + K}$$

Τώρα είναι πιο εύκολο να βρούμε την μέγιστη τιμή του κέρδους και την ελάχιστη τιμή του ρυθμού απόσβεσης χρησιμοποιώντας την προδιαγραφή για την μέγιστη υπερύψωση.

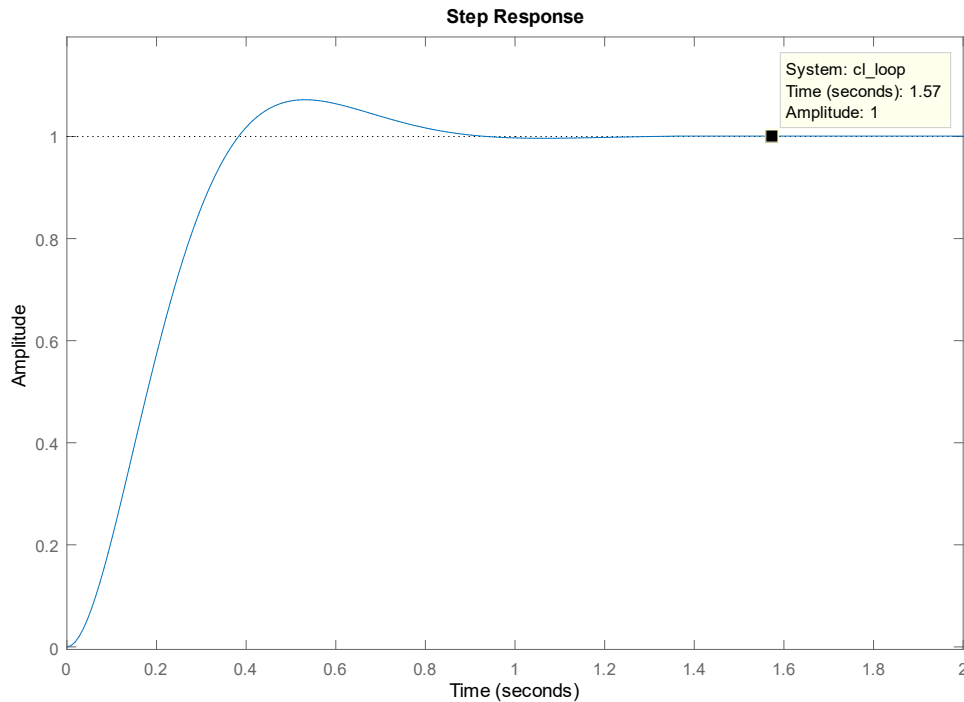
$$\begin{aligned} \zeta_{min} &= 0.63 \\ K_{max} &= 62.99 \end{aligned}$$

Δοκιμάζοντας διάφορες τιμές κέρδους και θέσης του μηδενικού, καταλήξαμε στις τιμές $K = 60$ και $c = 0.11$

Η συνάρτηση κλειστού βρόχου για αυτές τις τιμές προκύπτει,

$$H_k(s) = \frac{60s + 6.6}{s^3 + 10.1s^2 + 61s + 6.6}$$

Από τη βηματική απόκριση του συστήματος βλέπουμε πως οι προδιαγραφές που μας έχουν ζητηθεί ικανοποιούνται. Το διάγραμμα προέκυψε μέσω της *step()* ενώ η *stepinfo()* μας έδωσε διάφορα χαρακτηριστικά της απόκρισης όπως η υπερύψωση και ο χρόνος ανόδου.



$$t_r = 0.254 \text{ seconds}$$

$$M_p = 7.206 \%$$

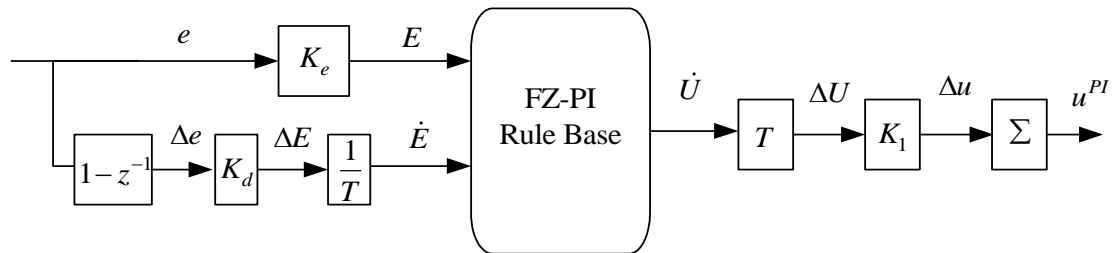
Τα κέρδη του ελεγκτή προκύπτουν χρησιμοποιώντας την τιμή του κέρδους K και του μηδενικού c .

$$K_p = \frac{60}{25} = 2.4$$

$$K_I = c * K_p = 0.264$$

Σχεδίαση Ασαφούς Ελεγκτή

Η απαίτηση για μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης μας ωθεί στην επιλογή ενός παρόμοιου ελεγκτή με τον γραμμικό PI. Τον ασαφή – Fuzzy PI ελεγκτή. Η κλασική δομή ενός τέτοιου ελεγκτή φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Ψηφιακή δομή Fuzzy - PI ελεγκτή

Από το σχήμα είναι εμφανείς οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα,

- **Μεταβλητές εισόδου:** Το σφάλμα $e(k)$ και η μεταβολή του σφάλματος $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$
- **Μεταβλητή εξόδου:** μεταβολή του σήματος ελέγχου $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$

Δηλαδή για το σύστημα ισχύει μια σχέση της μορφής,

$$\Delta u(k) = F\{e(k), \Delta e(k)\}$$

Ορισμός και Κανονικοποίηση Μεταβλητών Ελέγχου

Τα πεδία τιμών των μεταβλητών ελέγχου ενός ασαφούς ελεγκτή καθορίζουν την περιοχή λειτουργίας του. Για τον FZ-PI ελεγκτή μπορούμε να υπολογίσουμε τα αντίστοιχα πεδία μέσω των σχέσεων του κεφαλαίου 9 των σημειώσεων.

Το πεδίο ορισμού της μεταβλητής $e(k)$ καθορίζεται με βάση την Εξ. (9-31) των σημειώσεων:

$$[e_{min}, e_{max}] = [r_{min} - y_{max}, r_{max} - y_{min}]$$

Δεδομένης της μέγιστης ταχύτητας του τραπεζιού εργασίας που είναι $\omega_{max} = 50 rad/s$, έχουμε

$$[e_{min}, e_{max}] = [0 - 50, 50 - 0] = [-50, 50]$$

Για το διάστημα της μεταβολής σφάλματος Δe , ισχύει από την Εξ. (9-32)

$$[\Delta e_{min}, \Delta e_{max}] = [e_{min} - e_{max}, e_{max} - e_{min}] = [-100, 100]$$

Για λόγους απλότητας και ομοιομορφίας θεωρούμε τις τιμές των μεταβλητών εισόδου και εξόδου στο διάστημα $[-1, 1]$. Αυτό σημαίνει πώς τα διαστήματα του σφάλματος και της μεταβολής του πρέπει να κλιμακοποιηθούν. Αυτό γίνεται βάσει των Εξ. (9-34) και (9-35) των σημειώσεων,

$$\tilde{e}(k) = k_e e(k)$$

$$\Delta \tilde{e}(k) = k_d \Delta e(k)$$

Οι συντελεστές κλιμακοποίησης προκύπτουν,

$$k_e = \frac{1}{50}$$

$$k_d = \frac{1}{100}$$

Στη συνέχεια ακολουθεί ο διαμερισμός των κανονικοποιημένων μεταβλητών εισόδου. Σύμφωνα με την εκφώνηση, οι μεταβλητές του σφάλματος $e(k)$ και της μεταβολής του $\Delta e(k)$ περιγράφονται από 9 λεκτικές τιμές. Η μεταβλητή της μεταβολής του σήματος ελέγχου $\Delta u(k)$ περιγράφεται από 7 λεκτικές τιμές.

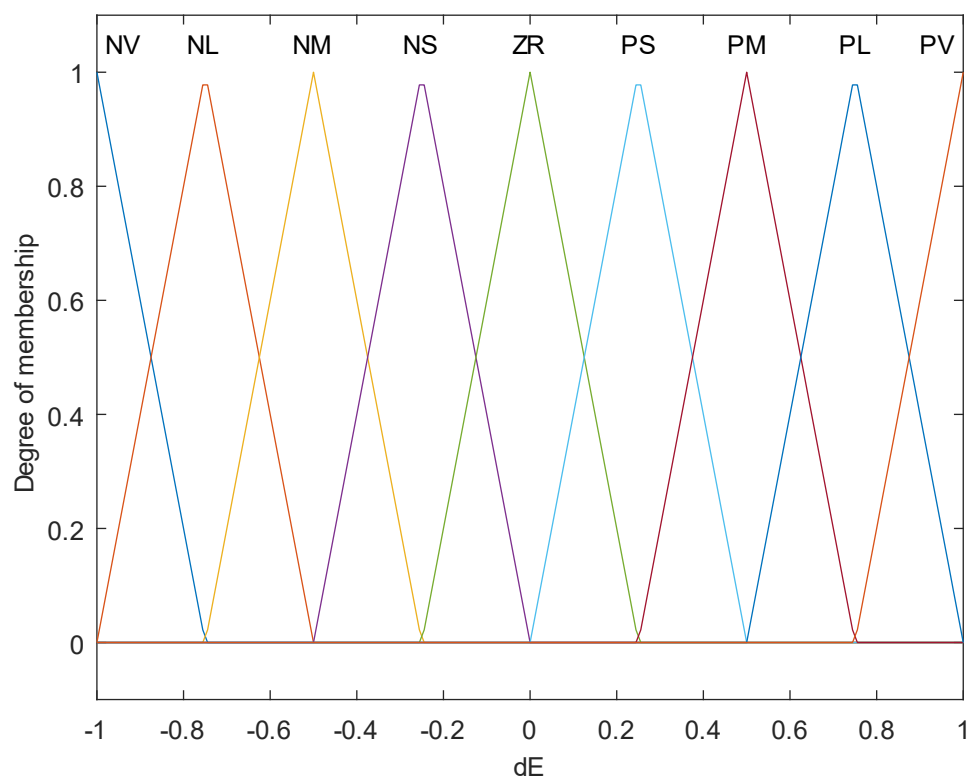
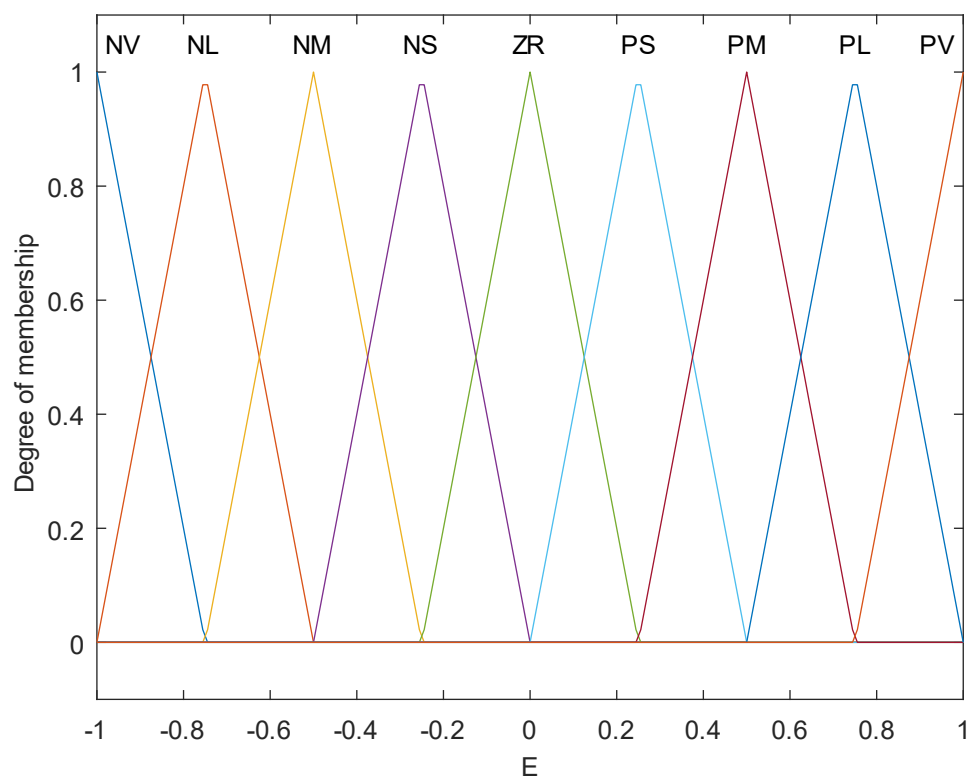
Ορισμός Ελεγκτή και Συναρτήσεων Συμμετοχής

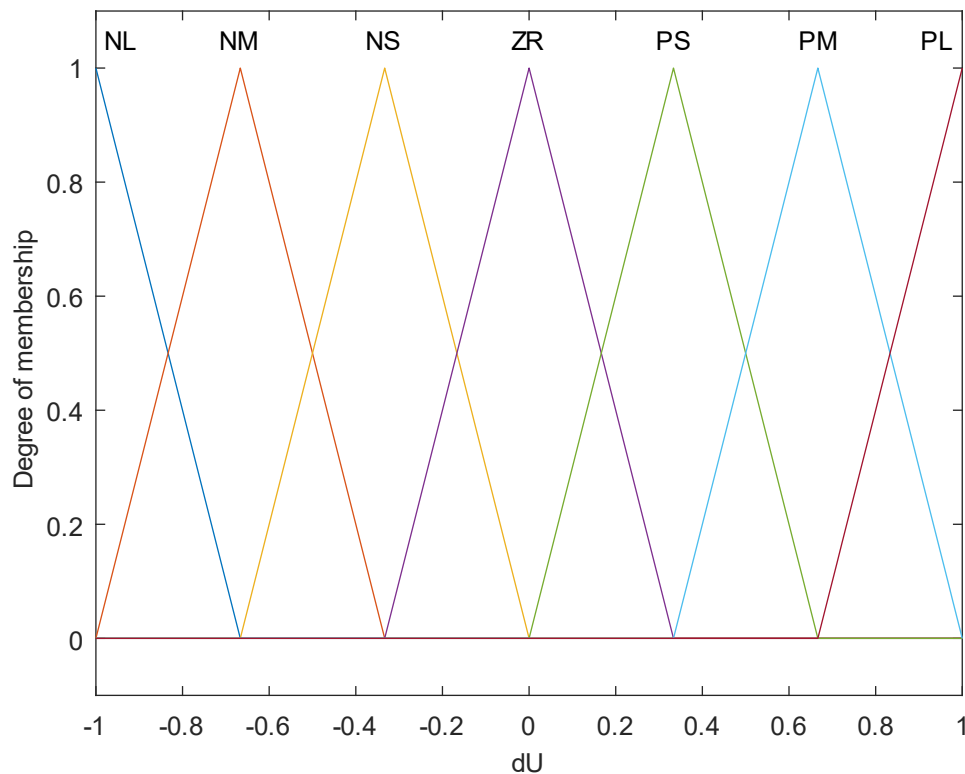
Για τη ψηφιακή υλοποίηση του ελεγκτή χρησιμοποιήσαμε το *Fuzzy Toolbox* του *Matlab*. Αρχικά, ορίσαμε τον τύπο του ασαφούς ελεγκτή και των χαρακτηριστικών του σύμφωνα με τα δεδομένα της εκφώνησης. Πιο συγκεκριμένα,

- Ασαφοποιητής **Singleton**
- Υλοποίηση του συνδετικού **AND** με τον τελεστή **min**
- Υλοποίηση της συνάρτησης συμπερασμού με τον κανόνα **Mamdani**
- Υλοποίηση του συνδετικού **ALSO** με τον τελεστή **max**
- Υλοποίηση του από-ασαφοποιητή με την τεχνική **COA**

Η πλειοψηφία των παραπάνω χαρακτηριστικών είναι οι προκαθορισμένες τιμές των ελεγκτών τύπου *Mamdani* στο *Matlab*.

Στη συνέχεια προσθέσαμε τις δύο μεταβλητές εισόδου και τη μία εξόδου χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση *addvar()*. Για την καλύτερη οργάνωση του κώδικα δημιουργήθηκε η συνάρτηση *add_trmf()* η οποία δέχεται ως είσοδο το διάστημα τιμών για τη συνάρτηση συμμετοχής και τα ονόματα των λεκτικών τιμών. Εσωτερικά, υπολογίζει τις θέσεις στις οποίες θα βρίσκονται οι κορυφές των τριγωνικών συναρτήσεων συμμετοχής καθώς και το διάστημα που θα καταλαμβάνει η κάθε μια. Χρησιμοποιώντας την, προσθέτουμε τις συναρτήσεις συμμετοχής των τριών μεταβλητών ελέγχου. Στα επόμενα σχήματα μπορούμε να δούμε τις γραφικές παραστάσεις τους όπως προέκυψαν από την *plotmf()*.





Όπως γίνεται φανερό από τα διαγράμματα, οι μεταβλητές σφάλματος και μεταβολής σφάλματος έχουν χωριστεί σε 9 λεκτικές τιμές ενώ η μεταβολή του σήματος ελέγχου σε 7 λεκτικές τιμές. Χρησιμοποιήθηκε το κανονικοποιημένο διάστημα τιμών $[-1, 1]$ ενώ η μορφή είναι τριγωνική, σύμφωνα με την εκφώνηση της εργασίας.

Καθορισμός της βάσης κανόνων

Το σημαντικότερο κομμάτι για τη σωστή λειτουργία και την τήρηση των προδιαγραφών ενός ασαφούς ελεγκτή είναι η βάση των κανόνων του. Όπως έχουμε αναφέρει, για τον Fuzzy PI ελεγκτή ισχύει μια σχέση της μορφής,

$$\Delta u(k) = F\{e(k), \Delta e(k)\}$$

Η παραπάνω εξίσωση βέβαια είναι πολύ γενική και δεν προσδίδει αρκετές πληροφορίες για την υλοποίηση της βάσης. Μια εμπειρική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του μεγέθους των κανόνων ενός FZ-PI είναι η,

$$\Delta u = e + \Delta e$$

όπου το σύμβολο «+» υποδηλώνει λεκτική και όχι αλγεβρική πρόσθεση. Αυτό σημαίνει πως τα αποτελέσματα έχουν επίσης λεκτικές τιμές. Για παράδειγμα, $PL + NS = PM$.

Εφαρμόζοντας τον παραπάνω τύπο στις 9 λεκτικές τιμές του σφάλματος ελέγχου και της μεταβολής του, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας που περιέχει τις τιμές του σήματος εξόδου. Επειδή η μεταβλητή εξόδου χωρίζεται σε 7 λεκτικές τιμές, τις τιμές *NV* και *PV* τις αντιστοιχίζουμε στις *NL* και *PL* αντίστοιχα.

Δe \ e	NV	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV
PV	ZR	PS	PM	PL	PV -PL	PV -PL	PV -PL	PV -PL	PV -PL
PL	NS	ZR	PS	PM	PL	PV -PL	PV -PL	PV -PL	PV -PL
PM	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV -PL	PV -PL	PV -PL
PS	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV -PL	PV -PL
ZR	NV NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV -PL
NS	NV NL	NV NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NM	NV NL	NV NL	NV NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM
NL	NV NL	NV NL	NV NL	NV NL	NL	NM	NS	ZR	PS
NV	NV NL	NV NL	NV NL	NV NL	NV NL	NL	NM	NS	ZR

Για την υλοποίηση της βάσης των κανόνων στο *Matlab* χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση *addrule()*. Αυτή δέχεται ως όρισμα έναν πίνακα, του οποίου κάθε γραμμή είναι και ένας κανόνας. Επιλέξαμε να τη χρησιμοποιήσουμε με όρισμα έναν πίνακα αριθμών και όχι χαρακτήρων, το οποίο επίσης υποστηρίζεται. Για κάθε κανόνα ορίζουμε τα *indices* των λεκτικών τιμών των υποθέσεων και του συμπεράσματος, όπως ορίστηκαν στις συναρτήσεις συμμετοχής. Για τον υπολογισμό του συμπεράσματος αντιστοιχίσαμε τις λεκτικές τιμές με αριθμητικές ούτως ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε το άθροισμα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν οι συναρτήσεις *min* και *max* για να είμαστε σίγουροι πως δεν θα προκύψει τιμή του ΔU εκτός των ορίων.

Πιο συγκεκριμένα,

$$in_values = [-4 \ -3 \ -2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4]$$

$$out_values = [-3 \ -2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3]$$

Υπολογισμός Κερδών Ασαφούς Ελεγκτή

Τα αρχικά κέρδη κλιμακοποίησης του ασαφούς ελεγκτή προκύπτουν από τα αντίστοιχα κέρδη του γραμμικού PI ελεγκτή,

$$K_e = 1$$

$$\alpha = F\left\{\frac{K_p}{K_i}\right\} = F\left\{\frac{2.4}{0.264}\right\} = 1$$

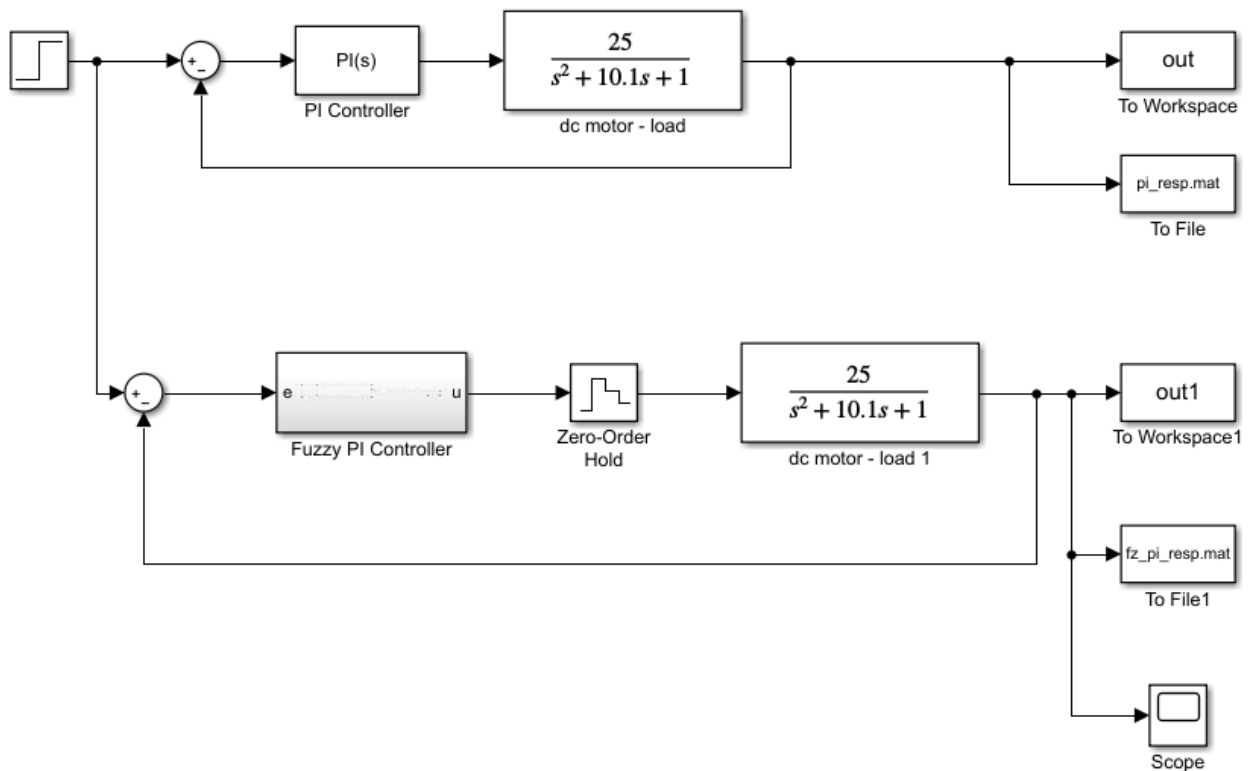
$$K_d = \alpha K_e = 1$$

$$K_1 = \frac{K_p}{F\{\alpha K_e\}} = 2.4$$

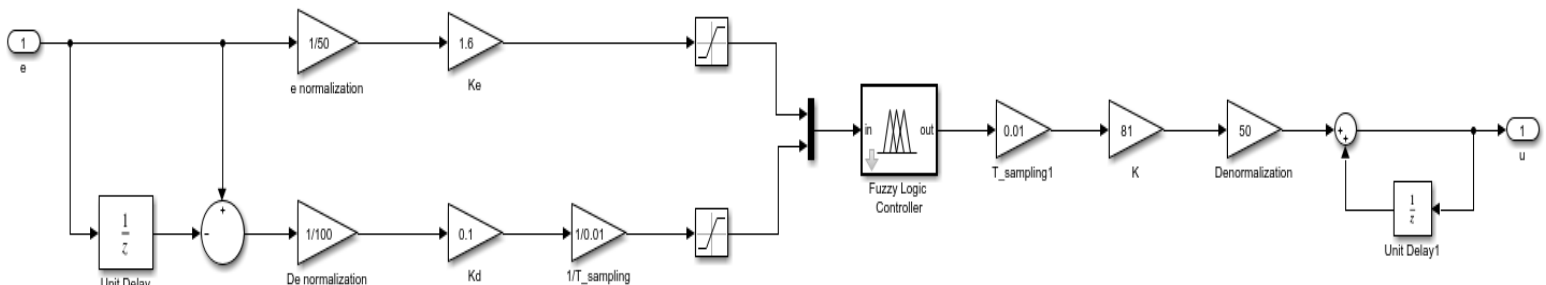
όπου F είναι η ασαφής συνάρτηση μεταφοράς του κεφαλαίου 9.6 των σημειώσεων.

Σχεδίαση συστήματος στο Simulink

Για ευκολότερη προσομοίωση της λειτουργίας του ασαφούς ελεγκτή, το ελεγχόμενο σύστημα σχεδιάστηκε στο περιβάλλον Simulink του Matlab. Παρακάτω φαίνονται οι υλοποιήσεις του συνολικού συστήματος και του ελεγκτή.

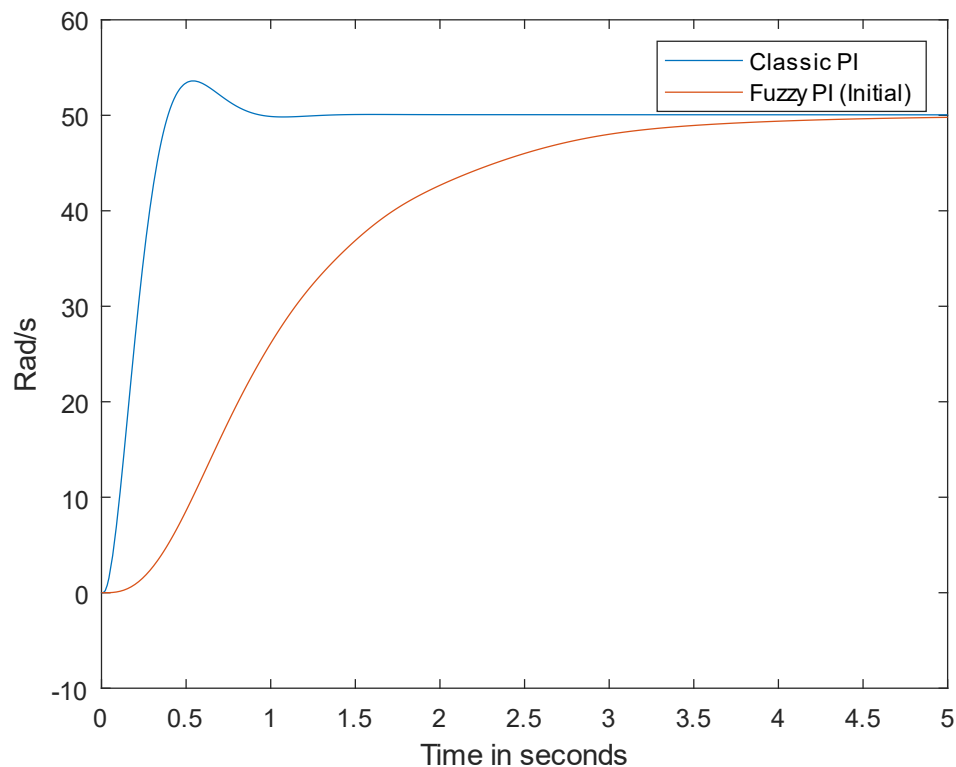


Ο PI ελεγκτής έχει τα κέρδη που υπολογίστηκαν στο πρώτο κομμάτι αυτής της εργασίας. Αυτά τα κέρδη τοποθετήθηκαν αρχικά και στον FZ-PI αλλά η απόκριση του όπως θα φανεί και αργότερα απείχε πολύ από την επιθυμητή.



Στην εικόνα από πάνω βλέπουμε την υλοποίηση του FZ-PI ελεγκτή. Το σφάλμα και η μεταβολή του σφάλματος αρχικά κανονικοποιούνται στο διάστημα $[-1,1]$ ενώ στη συνέχεια πολλαπλασιάζονται με τα κέρδη του ελεγκτή. Η διαίρεση με την περίοδο δειγματοληψίας συμβαίνει για να υπολογιστεί ψηφιακά η παράγωγος του σήματος. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται δύο saturation μπλοκ για να περιορίσουν τις τιμές στο διάστημα $[-1,1]$. Αυτές οι μονάδες χρειάζονται κυρίως στην αρχή της λειτουργίας όπου παρατηρείται και το μέγιστο σφάλμα. Η έξοδος από-κανονικοποιείται στο κανονικό διάστημα τιμών της και προστίθεται με την παρελθοντική τιμή της για να δώσει το νέο σήμα ελέγχου. Επίσης, αναφέρουμε πως χρησιμοποιήθηκαν τα μπλόκ “to_file” και “to_workspace” ούτως ώστε να αποθηκεύσουμε την απόκριση σε μορφή σήματος και να χρησιμοποιήσουμε την συνάρτηση *stepinfo* για να μελετήσουμε την κάλυψη των προδιαγραφών.

Οι σημαντικοί παράμετροι της σχεδίασης που αφορούν τη συμπεριφορά του ελεγκτή είναι τα κέρδη K_e, K_d και K . Τα πρώτα δύο συνδέονται με τη σχέση $K_d = \alpha K_e$. Σε αυτά χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα της εργασίας και βασίστηκαν στη σχεδίαση του κλασικού PI ελεγκτή. Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται η βηματική απόκριση του απλού και του αρχικού FZ-PI ελεγκτή.



Όπως είναι φανερό, η απόκριση του είναι υποδεέστερη από αυτή του κλασικού PI ελεγκτή ενώ δεν πληροί και τις προδιαγραφές που έχουμε θέσει.

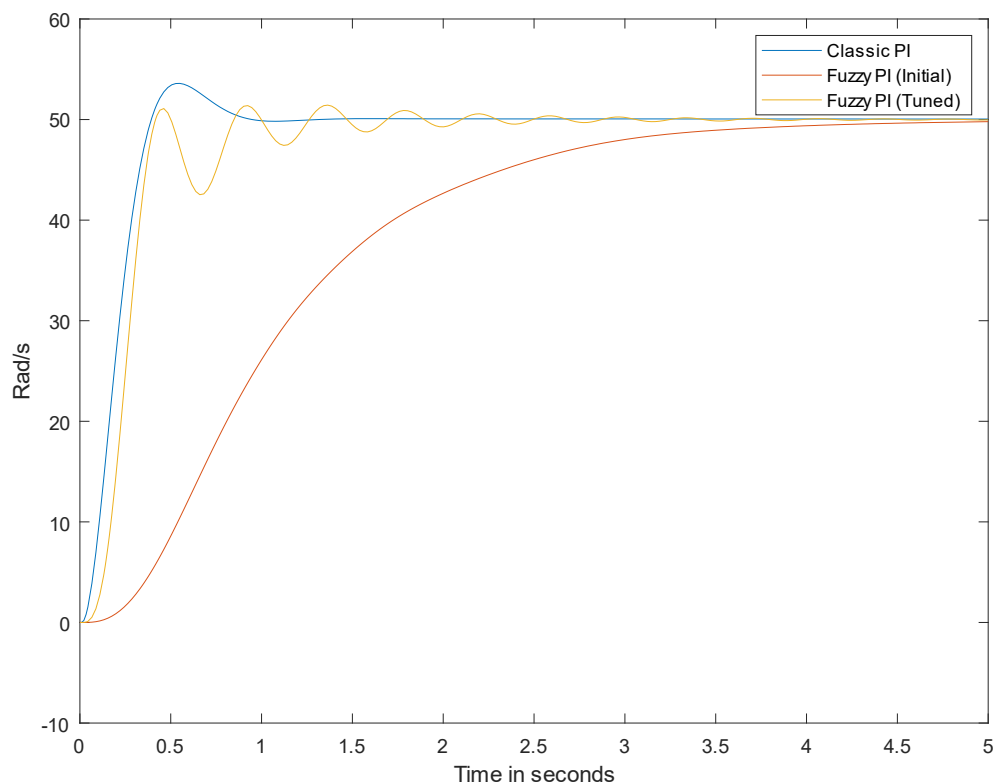
Για τη βελτίωση της απόκρισης του ακολουθούμε μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος. Στην εκφώνηση αναφέρεται πως η απόκριση του ασαφή ελεγκτή πρέπει να είναι καλύτερη από την αντίστοιχη του κλασικού. Χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες τιμές κερδών,

$$K_e = 1.2, K_d = 0.3, \alpha = 0.25, K = 43$$

πετυχαίνουμε,

- Χρόνο ανόδου: 0.23 δευτερόλεπτα
- Υπερύψωση: 2.9%

Αυτό σημαίνει πως έχουμε χαμηλότερο ποσοστό υπερύψωσης και μικρότερο χρόνο ανόδου σε σχέση με τον κλασικό ελεγκτή. Στην ακόλουθη εικόνα μπορούμε να δούμε τις 3 διαφορετικές βηματικές αποκρίσεις στο ίδιο διάγραμμα.



Στην περίπτωση του FZ-PI με τα ρυθμισμένα κέρδη μπορούμε να παρατηρήσουμε πως υπάρχει μια αποσβεννύμενη ταλάντωση, γεγονός που αυξάνει το χρόνο αποκατάστασης. Δεν έχουμε όμως κάποιον περιορισμό από την εκφώνηση.

Η αύξηση του κέρδους εξόδου K είχε ως αποτέλεσμα πιο γρήγορη απόκριση και χαμηλότερο σφάλμα μόνιμης κατάστασης αλλά συγχρόνως δημιούργησε και την ταλάντωση που παρατηρείται. Για να

βελτιωθεί ακόμη περισσότερο η απόκριση, μειώθηκε και ο λόγος α ρυθμίζοντας κατάλληλα τα κέρδη των δύο μεταβλητών εισόδου.

Λειτουργία της Βάσης Κανόνων

Για να μελετήσουμε τη λειτουργία της βάσης των κανόνων που δημιουργήσαμε για τον ελεγκτή μας πρέπει να δώσουμε ως είσοδο ένα ζευγάρι λεκτικών τιμών. Έστω ότι η είσοδος αυτή είναι η ζητούμενη της εργασίας, δηλαδή,

“e is PS and Δe is ZR”

Σύμφωνα με τον πίνακα της βάσης κανόνων, θα ενεργοποιηθεί ο κανόνας

“IF e is PS AND Δe is ZR THEN Δu is PS ”

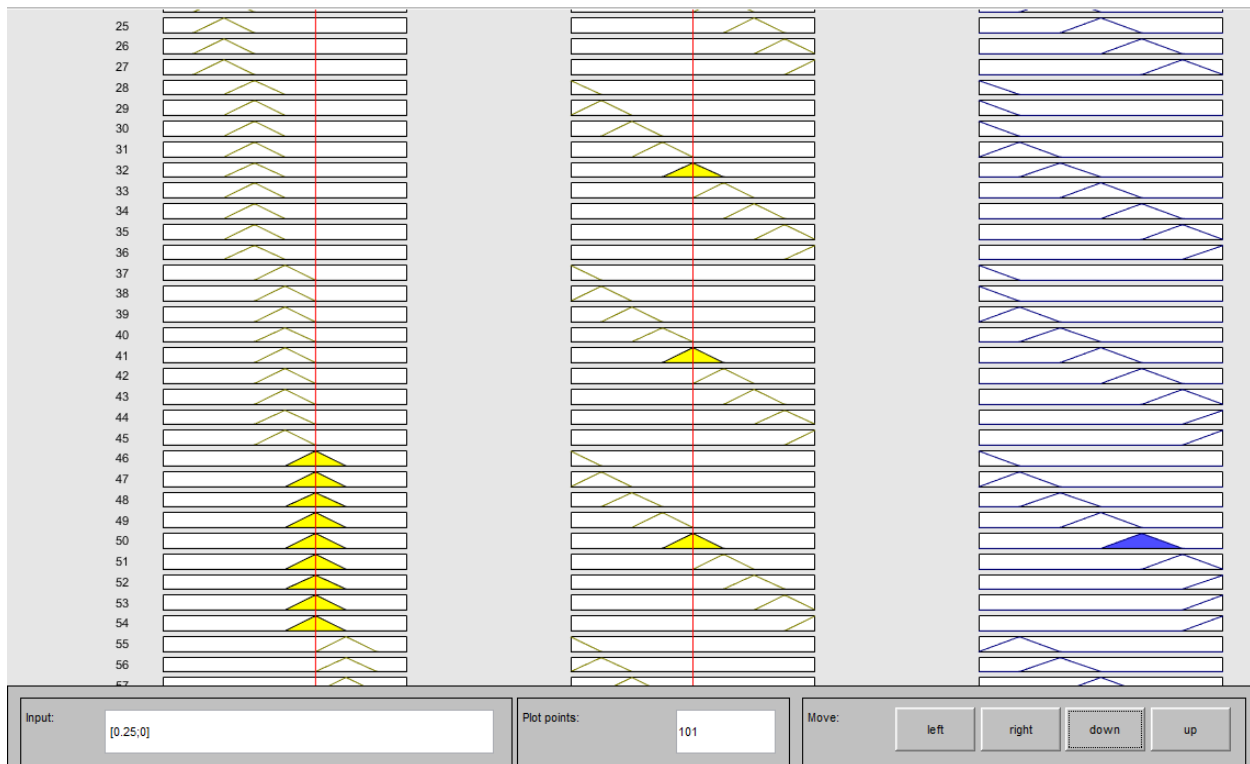
Για να εισάγουμε τις κατάλληλες αριθμητικές τιμές του σφάλματος και της μεταβολής του στο σύστημα, χρειαζόμαστε το διαχωρισμό του πεδίου τιμών με τις συναρτήσεις συμμετοχής. Από τα σχήματα ΑΝΑΦΟΡΑ και για διευκόλυνση των πράξεων, επιλέγουμε τιμές που έχουν βαθμό συμμετοχής 1. Άρα η είσοδος του συστήματος θα είναι το ζευγάρι (0.25,0). Εφόσον ο ελεγκτής μας είναι τύπου Mamdani και με συνάρτηση συμπερασμού που υλοποιείται με κανόνα Mamdani, ο κανόνας θα διεγερθεί με βαθμό εκπλήρωσης,

$$w_i = \max(\mu_e(0.25), \mu_{\Delta e}(0)) = \max(1,1) = 1$$

$$\mu_c = \min(w_i, \mu_{\Delta u})$$

Χρησιμοποιείται ο τελεστής σύνθεσης max-min για τον υπολογισμό των βαθμών εκπλήρωσης των δύο μεταβλητών. Έπειτα με τον τελεστή OR (max) επιλέγουμε τη μέγιστη από τις δύο τιμές και με τον τελεστή συμπερασμού (min) υπολογίζουμε τη συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος. Μετά την απο-ασαφοποίηση COA και εφόσον ο παραπάνω κανόνας είναι ο μοναδικός που ενεργοποιείται, περιμένουμε την τιμή του Δu που αντιστοιχεί στο PS με το μέγιστο βαθμό εκπλήρωσης. Δηλαδή Δu = 0.33 εφόσον η μεταβλητή εξόδου χωρίζεται σε 7 λεκτικές τιμές.

Χρησιμοποιώντας την εντολή *ruleviewer* του *Matlab* μπορούμε να δούμε ποιοι κανόνες ενεργοποιήθηκαν με την είσοδο μας. Στην ακόλουθη εικόνα μπορούμε να παρατηρήσουμε πως τα αποτελέσματα που περιμέναμε είναι όντως αυτά που πήραμε.

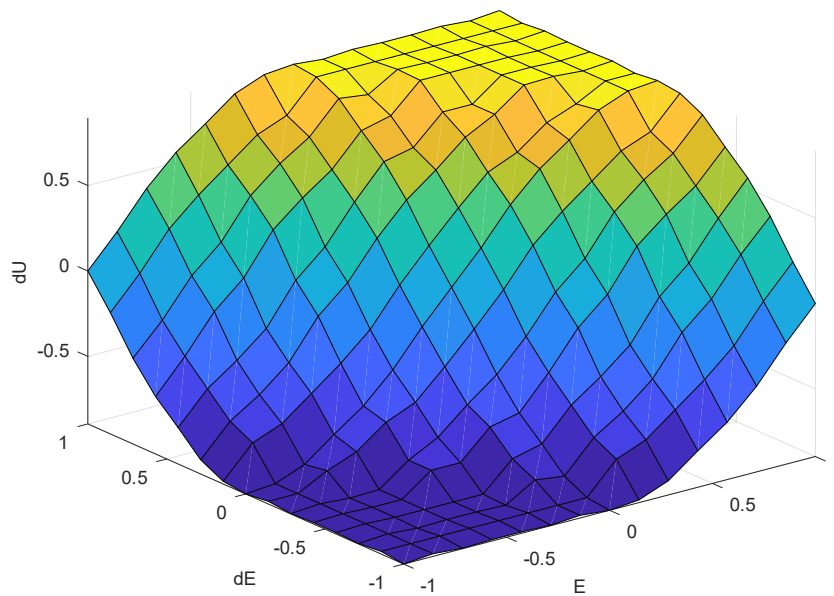


Μόνο ένας κανόνας ενεργοποιείται και έχει βαθμό εκπλήρωσης 1. Η τιμή στην έξοδο του συστήματος χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση *evalfis* προέκυψε 0.333

Η απόκριση του ελεγκτή είναι η επιθυμητή καθώς συμφωνεί με τους κανόνες λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, μηδενική μεταβολή στο σφάλμα υποδεικνύει πως βρισκόμαστε σε σημείο «κοιλάδα» στην απόκριση του συστήματος. Σε αυτήν την περίπτωση, θα πρέπει να επιταχυνθεί η απόκριση. Το πρόσημο του σήματος ελέγχου θα πρέπει να είναι ίδιο με αυτό του σφάλματος, εφόσον η μεταβολή του είναι μηδενική. Θετικό σφάλμα στην περίπτωση μας σημαίνει πως βρισκόμαστε κάτω από την επιθυμητή τιμή της εξόδου άρα θέλουμε θετικό σήμα ελέγχου για να αυξήσουμε την έξοδο μας. Το μέγεθος του σήματος εξόδου προκύπτει σύμφωνα με τον κανόνα για τις κορυφές και τις κοιλάδες. Η τιμή της εξόδου πρέπει να είναι ίδια με την τιμή του σφάλματος.

Τρισδιάστατη Επιφάνεια Ελέγχου του FLC

Η τρισδιάστατη επιφάνεια της εξόδου του ασαφούς ελεγκτή συναρτήσει των δύο εισόδων του παρουσιάζεται παρακάτω και προέκυψε με χρήση της εντολής *gensurf*.

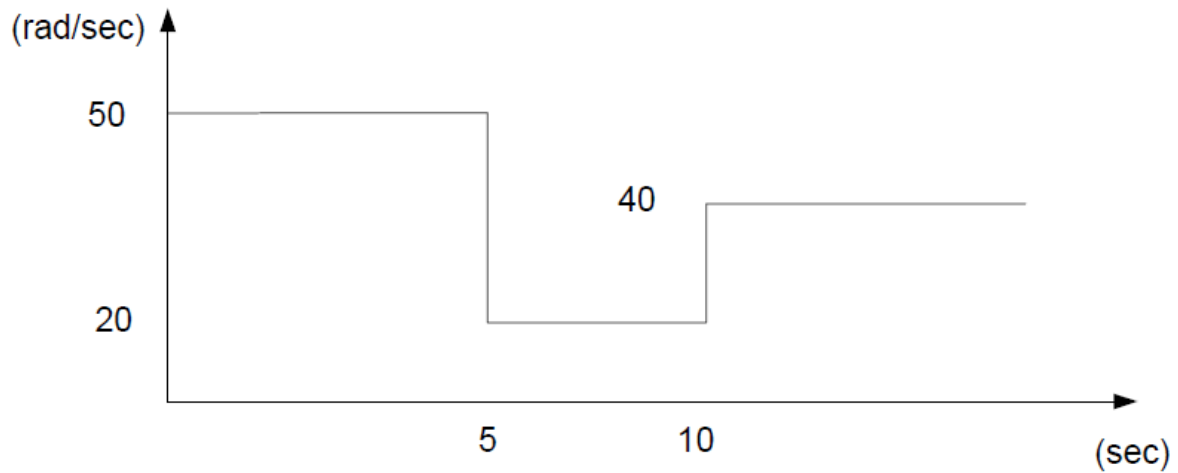


Η μορφή της συμβαδίζει με τους κανόνες και τους μετα-κανόνες σχεδίασης των ασαφών ελεγκτών που αναφέρονται στο κεφάλαιο 9 των σημειώσεων. Για παράδειγμα,

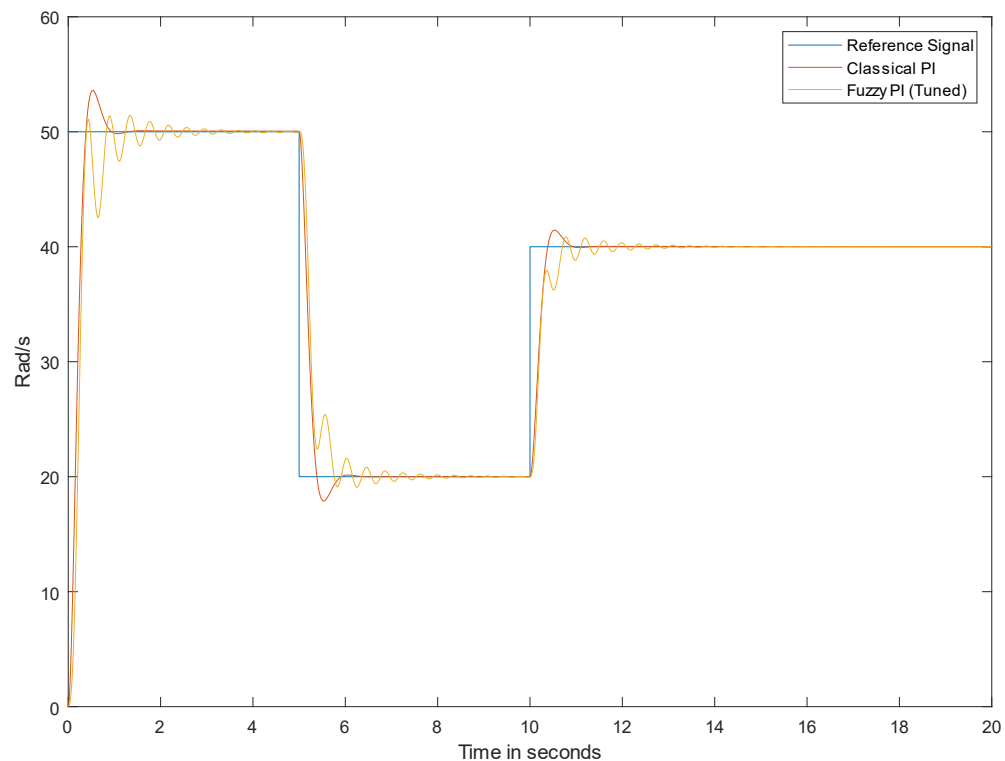
- Αν τα σήματα e και Δe είναι μηδενικά, το σήμα εξόδου παραμένει αναλλοίωτο.
- Μεγάλες τιμές σφάλματος και μεταβολής του σφάλματος οδηγούν σε μεγάλες τιμές στην έξοδο, του ίδιου πρόσημου. Αν για παράδειγμα η είσοδος είναι (PL,PV), η έξοδος θα είναι PV. Έτσι γίνεται πιο γρήγορη η διόρθωση του σήματος u .
- Στις κορυφές και τις κοιλάδες ($\Delta e=0$), η έξοδος έχει το μέγεθος και το πρόσημο του σφάλματος.
- Στα σημεία τομής ($e=0$), η έξοδος έχει το μέγεθος και το πρόσημο της μεταβολής του σφάλματος.

Γενική Απόκριση FLC

Στο τελευταίο κομμάτι της ανάλυσης μας θέλουμε να δούμε πόσο καλά μπορεί ένας ασαφής ελεγκτής να ακολουθήσει το σήμα αναφοράς όταν αυτό είναι στην πρώτη περίπτωση μεταβαλλόμενο με βηματικές αλλαγές ενώ στη δεύτερη συνάρτηση ράμπα. Στα επόμενο σχήμα δίνεται το πρώτο σήμα αναφοράς που ζητείται,

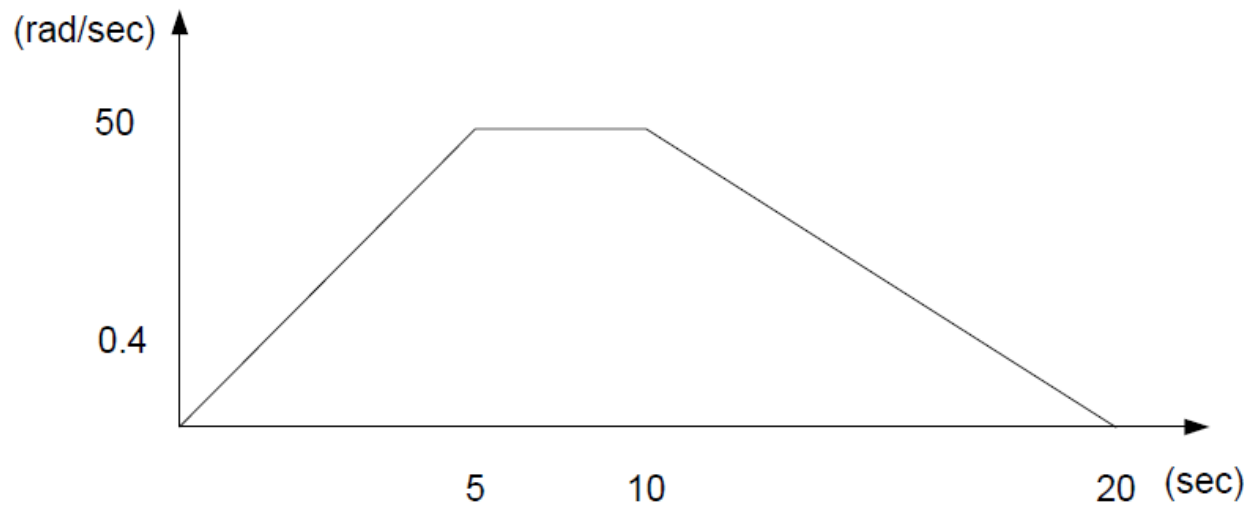


Η απόκριση του ελεγκτή προέκυψε μέσω του Simulink και φαίνεται στην επόμενη εικόνα.

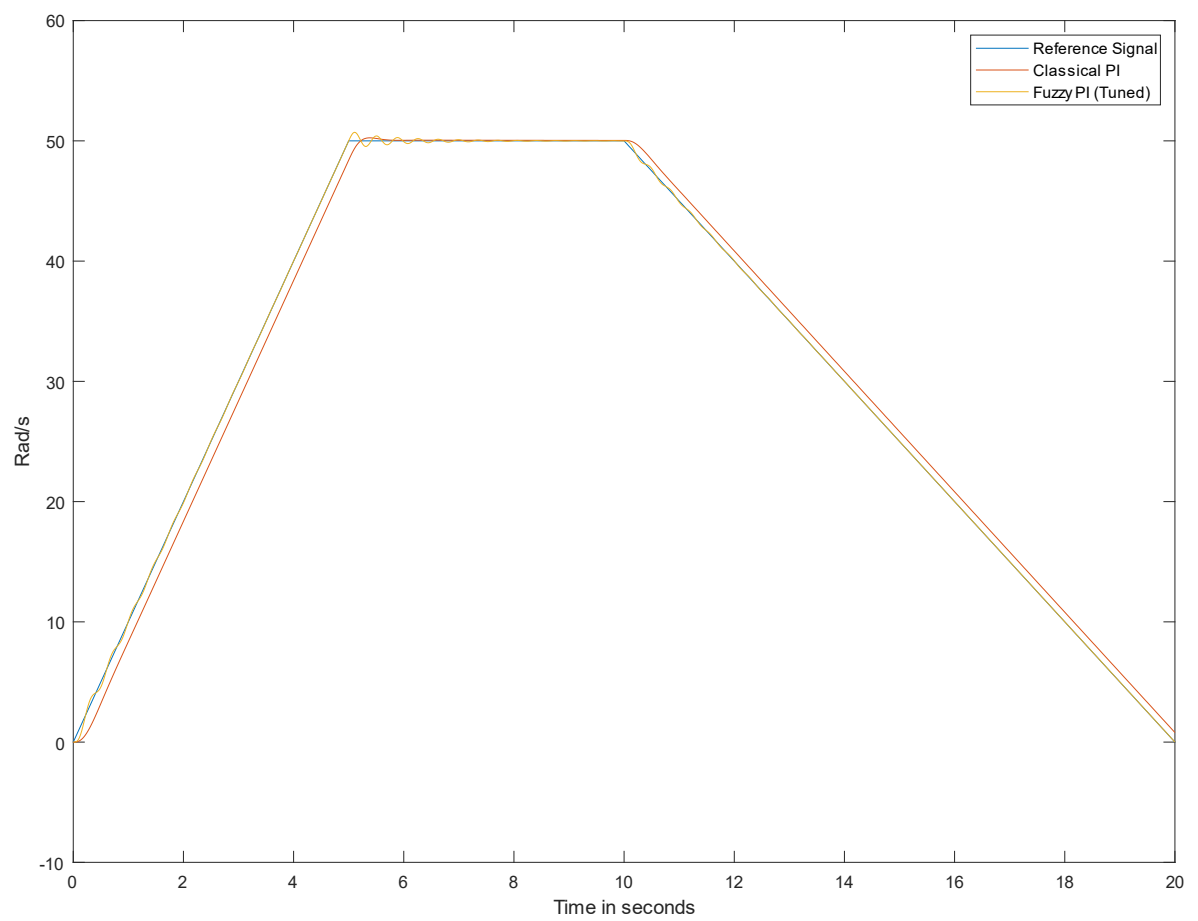


Όπως βλέπουμε, ο υψηλός χρόνος αποκατάστασης του ασαφή ελεγκτή κάνει σχετικά δύσκολη την απόκριση στις επιμέρους βηματικές αλλαγές. Το σφάλμα μόνιμης κατάστασης όμως είναι μηδενικό. Επίσης, έχει χαμηλότερη υπερύψωση από ότι ο κλασικός PI.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένας συνδυασμός συναρτήσεων ράμπας.



Η απόκριση του συστήματος ακολουθεί,



Είναι εμφανές πως σε αυτήν την περίπτωση ο ασαφής ελεγκτής δεν έχει κανένα πρόβλημα να ακολουθήσει το σήμα αναφοράς. Από την άλλη, ο κλασικός ελεγκτής αντιμετωπίζει αρκετές δυσκολίες.