



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Έλεγχος ταχύτητας μηχανισμού ενός τραπεζιού εργασίας με ασαφείς ελεγκτές

Μελέτη και υλοποίηση

Εργασία #1 στο μάθημα
της Υπολογιστικής Νοημοσύνης
του

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΠΟΛΥΝΟΠΟΥΛΟΥ (ΑΕΜ:9584)

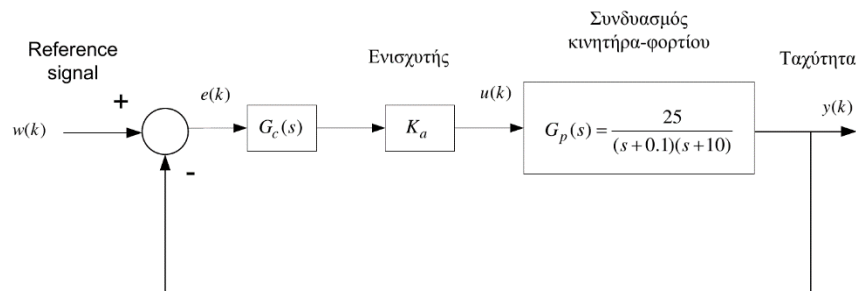
Διδάσκοντες: Θεοχάρης Ιωάννης
Χαδουλός Χρήστος

Περιεχόμενα

Περιγραφή Ελεγχόμενου Συστήματος	3
Σχεδίαση Γραμμικού Ελεγκτή.....	4
Σχεδίαση Ασαφούς Ελεγκτή (FLC)	5
Σενάριο 1.....	5
Σχεδίαση του ελεγκτή και αποκρίσεις.....	5
Λειτουργία της βάσης του ελεγκτή και συμπεράσματα.....	8
Ερμηνεία του νόμου ελέγχου του FLC.....	9
Σενάριο 2.....	9
Απόκριση του Συστήματος Κλειστού Βρόγχου για τα δυο σήματα αναφοράς.....	9
Σχολιασμός ικανότητας FLC με είσοδο συνάρτηση ράμπας.....	10

Περιγραφή Ελεγχόμενου Συστήματος

Η εργασία αυτή έχει σκοπό τον σχεδιασμό ενός ασαφούς ελεγκτή (*Fuzzy Logic Controller*) για τον έλεγχο ενός μηχανισμού τραπεζιού εργασίας. Στόχος είναι η διατήρηση της υψηλής ακρίβειας στην μόνιμη κατάσταση ισορροπίας του ελέγχου ταχύτητας. Επιλέγεται ελεγκτής με αναλογική-ολοκληρωτική δράση ώστε να έχουμε μηδενικό σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση.



Σχ.1

Χαρακτηριστικά:

- $r(k)$ είναι το σήμα αναφοράς
- $y(k)$ είναι η έξοδος του συστήματος
- $e(k)$ είναι το σφάλμα του σήματος αναφοράς με την έξοδο του συστήματος
- $e(k) = r(k) - y(k)$
- $u(k)$ είναι ο νόμος ελέγχου
- $\omega_{max} = 50 \text{ rad/sec}$ είναι η μέγιστη ταχύτητα του τραπεζιού ταχύτητας

Σχεδίαση Γραμμικού Ελεγκτή

Για να πετύχουμε μηδενικό σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση του ελέγχου ταχύτητας επιλέγουμε γραμμικό PI ελεγκτή της μορφής:

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

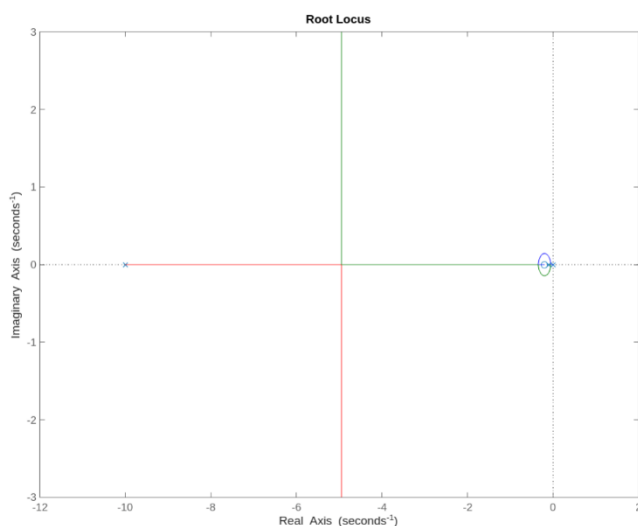
Ζητούμενο είναι να πληρούνται οι εξής προδιαγραφές:

- Υπερύψωση για βηματική είσοδο $< 8\%$
- Χρόνος ανόδου $> 0.6 \text{ sec}$

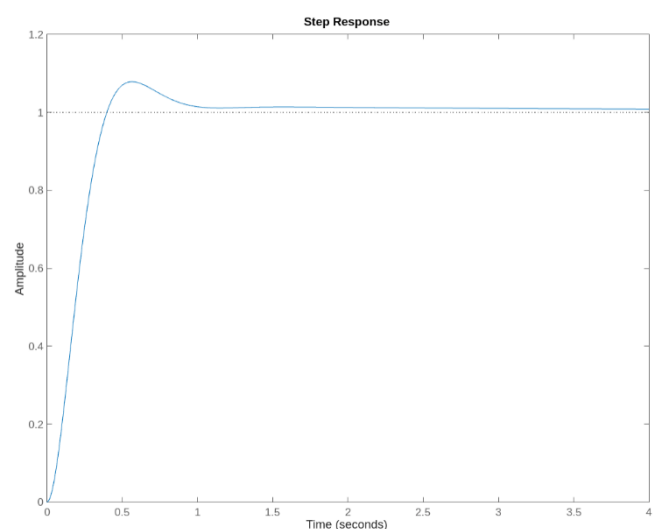
Ακολουθώντας τις αρχές του κλασικού αυτομάτου ελέγχου με χρήση του control toolbox του Matlab και έπειτα από διαδικασία δοκιμής - λάθους βρίσκουμε τις τιμές παραμέτρων:

- $c = 0.2$
- $K = 56.25$
- $K_P = \frac{K}{25} = \frac{56.25}{25} = 2.25$
- $K_I = c * K_P = 0.2 * 2.25 = 0.45$

Η παραπάνω προσομοίωση δίνει το διάγραμμα του γεωμετρικού τόπου ριζών του συστήματος ανοιχτού βρόγχου και την βηματική απόκριση του συστήματος κλειστού βρόγχου όπως φαίνονται στις Εικ.1 και Εικ.2 αντίστοιχα.



Εικ. 1: Γεωμετρικός Τόπος Ριζών



Εικ. 2: Βηματική απόκριση κλειστού βρόγχου

Οι ζητούμενες προϋποθέσεις πληρούνται, λαμβάνοντας τα εξής χαρακτηριστικά μέσω της συνάρτησης `stepinfo`.

- Χρόνος Ανόδου = 0.2647 sec
- Υπερύψωση = 7.88%

```
ans =  
    struct with fields:  
  
    RiseTime:      0.2647  
    TransientTime: 0.9260  
    SettlingTime:  0.9260  
    SettlingMin:   0.9068  
    SettlingMax:   1.0787  
    Overshoot:     7.8750  
    Undershoot:    0  
    Peak:          1.0787  
    PeakTime:      0.5677
```

Η σχεδίαση του γραμμικού ελεγκτή υλοποιήθηκε στο αρχείο `pi_ctrl1.m` με τη συνάρτηση `controlSystemDesigner` του Matlab.

Σχεδίαση Ασαφούς Ελεγκτή

Σενάριο 1

A) Σχεδίαση ελεγκτή και αποκρίσεις

Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιούμε έναν ασαφή ελεγκτή FZ-PI, προκειμένου να πετύχουμε μηδενικό σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση του συστήματος. Λαμβάνουμε υπόψιν το διάστημα δειγματοληψίας $T = 0.01 \text{ sec}$ καθώς και το σήμα αναφοράς r που μπορεί να κινείται σε διάστημα $[-1, 1]$ μετά από κανονικοποίηση των εισόδων, και έχουμε τα παρακάτω χαρακτηριστικά για τον ασαφή ελεγκτή.

Ασαφής Ελεγκτής:

Είσοδοι: - σφάλμα $E \in [-1, 1]\mathbf{m}$ (9 λεκτικές τιμές)

- μεταβολή σφάλματος $\dot{E} \in [-1, 1]\mathbf{m}$ (9 λεκτικές τιμές)

Έξοδοι: - μεταβολή σήματος ελέγχου $\dot{U} \in [-1, 1]\mathbf{m}$ (7 λεκτικές τιμές)

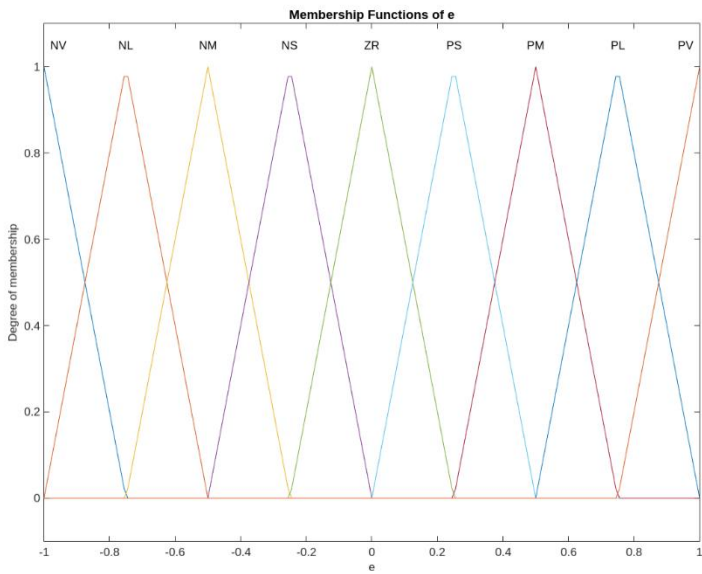
Ασαφοποιητής: Singleton

Απο-ασαφοποιητής: Center of Area (COA)

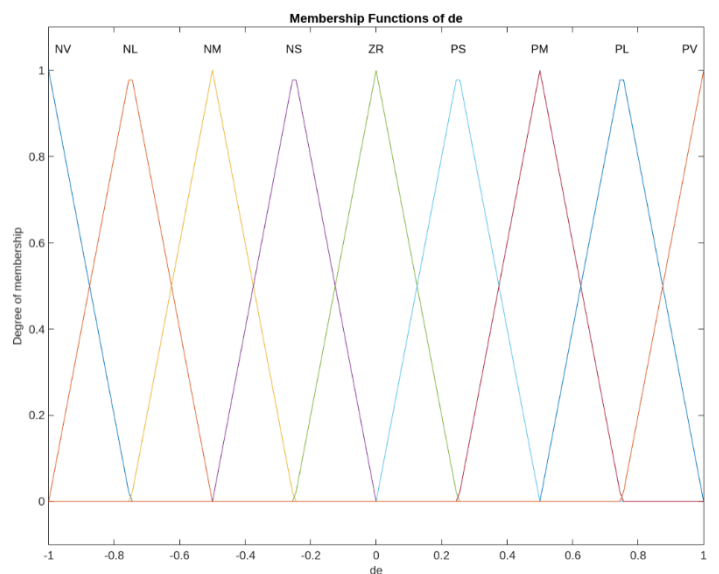
AND \rightarrow min, ALSO \rightarrow max

Τελεστής Συμπερασμού: Mamdani, R_c

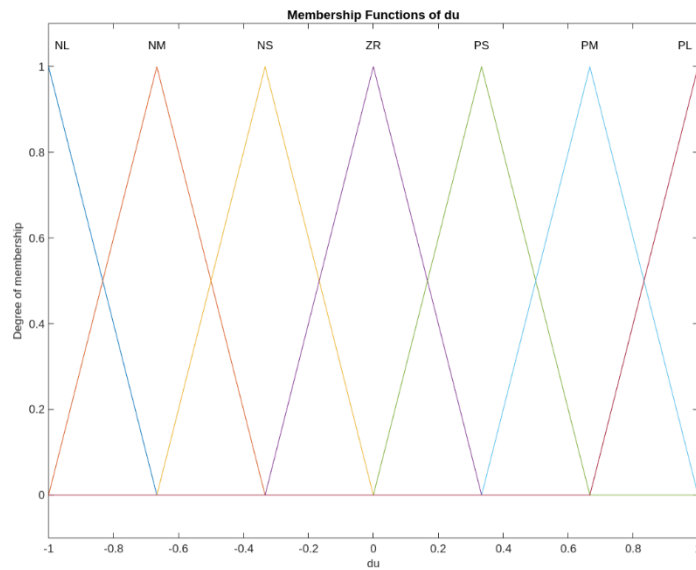
Οι συναρτήσεις συμμετοχής φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



Εικ. 3: Συναρτήσεις συμμετοχής σφάλματος E



Εικ.4: Συναρτήσεις συμμετοχής μεταβολής σφάλματος \dot{E}



Εικ. 5 Συναρτήσεις συμμετοχής σφάλματος \ddot{U}

Η πλήρης ασαφής βάση κανόνων θα περιλαμβάνει ένα κανόνα για κάθε πιθανό συνδυασμό των εισόδων και δεδομένου ότι κάθε μια από τις δύο (2) εισόδους περιγράφεται από εννέα (9) λεκτικές τιμές θα χρειαστούν $9 \times 9 = 81$ κανόνες για τη βάση.

Αυτοί οι κανόνες είναι της μορφής:

$$IF \ e \text{ is } A \text{ and } de \text{ is } B \text{ then } du \text{ is } C$$

Η παραγωγή των κανόνων απεικονίζεται στον πίνακα παρακάτω.

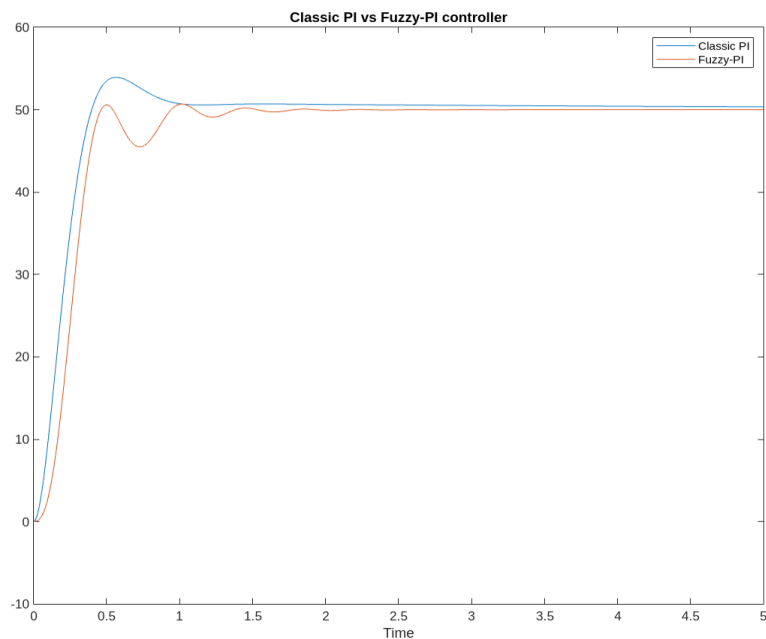
$\begin{matrix} dE \\ E \end{matrix}$	NV	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV
PV	ZR	PS	PS	PM	PM	PL	PL	PL	PL
PL	NS	ZR	PS	PS	PM	PM	PL	PL	PL
PM	NS	NS	ZR	PS	PS	PM	PM	PL	PL
PS	NM	NS	NS	ZR	PS	PS	PM	PM	PL
ZR	NM	NM	NS	NS	ZR	PS	PS	PM	PM
NS	NL	NM	NM	NS	NS	ZR	PS	PS	PM
NM	NL	NL	NM	NM	NS	NS	ZR	PS	PS
NL	NL	NL	NL	NM	NM	NS	NS	ZR	PS
NV	NL	NL	NL	NL	NM	NM	NS	NS	ZR

Η ασαφής βάση κανόνων μαζί με τις αρχικές συναρτήσεις συμμετοχής βρίσκονται στο αρχείο table.fis και προσομοιώνονται μέσω του FIS Editor του Matlab.

Εφαρμόζοντας την συγκριτική μέθοδο ρύθμισης κερδών για FZ-PI ελεγκτή (comparative tuning method) και έπειτα από διαδικασία δοκιμής-λάθους βρήκαμε τις εξής παραμέτρους.

- $k_e = 1.1$
- $k_1 = 20$
- $a = 0.28$
- $k_d = a * k_e$

Στην Εικ.6 παρουσιάζεται η βηματική απόκριση του συστήματος κλειστού βρόγχου για τον κλασσικό PI (μπλε χρώμα) και για τον ασαφή FZ-PI (κόκκινο χρώμα) ελεγκτή αντίστοιχα.



Εικ. 6 : Αποκρίσεις για PI και FZ-PI ελεγκτή.

Οι ζητούμενες προϋποθέσεις πληρούνται, λαμβάνοντας τα εξής χαρακτηριστικά μέσω της συνάρτησης `stepinfo`.

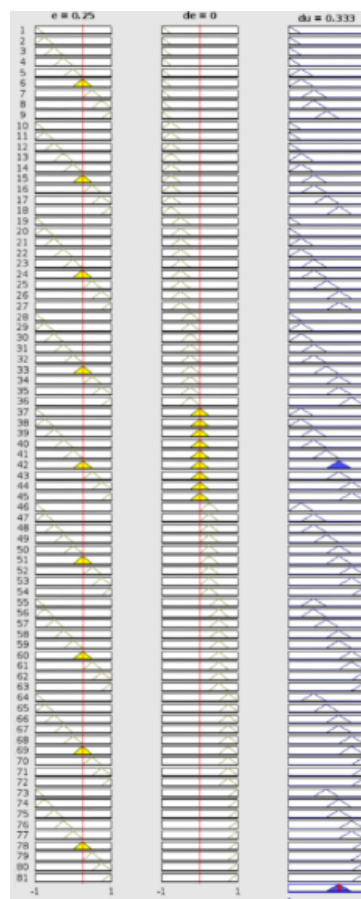
- Χρόνος Ανόδου = 0.2644 sec
- Υπερύψωση = 1.35%

```
ans =  
  
    struct with fields:  
  
    RiseTime:      0.2644  
    TransientTime: 0.8985  
    SettlingTime:  0.8985  
    SettlingMin:   45.2225  
    SettlingMax:   50.6777  
    Overshoot:     1.3555  
    Undershoot:    0  
    Peak:          50.6777  
    PeakTime:      1.0100
```

Η υπερύψωση λαμβάνει αρκετά μικρότερη τιμή συγκριτικά με τον κλασσικό PI ελεγκτή ενώ ο χρόνος ανόδου παραμένει ίδιος.

B) Λειτουργία της βάσης του ελεγκτή και συμπεράσματα

Από την βάση που διαμορφώθηκε, θεωρούμε μια διέγερση όπου E is PS και \dot{E} is ZR . Παρακάτω δείχνουμε γραφικά τους κανόνες που διεγείρονται μέσω της συνάρτησης `ruleview`.

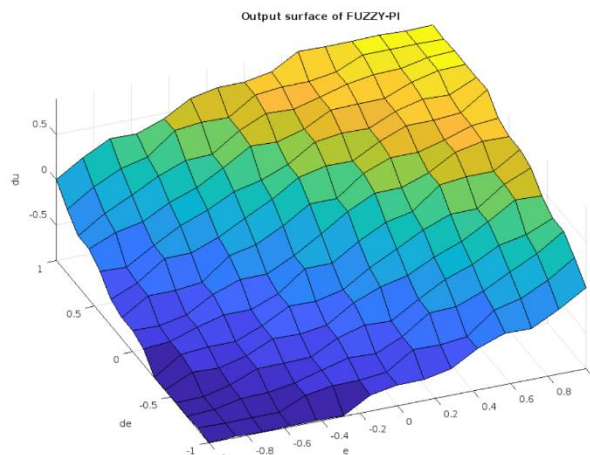


Εικ. 7: Γραφική απεικόνιση διέγερσης κανόνων.

Σύμφωνα με την εικόνα για τις εισόδους $E = 0.25$ και $\dot{E} = 0$ διεγείρεται μόνο ένας κανόνας με απόκριση $\dot{U} = 0.333$ κάτι το οποίο έχει λογική σημασία. Ουσιαστικά, ένα θετικά μικρό σφάλμα ταχύτητας σε συνδυασμό με ένα μηδενικό σφάλμα στη μεταβολή της ταχύτητας θα πρέπει να οδηγήσει τον ελεγκτή να δώσει μια θετικά μικρή μεταβολή του σήματος ελέγχου ώστε να πετύχουμε το σύστημα μας να έρθει ξανά σε κατάσταση ισορροπίας. Όπως και πράγματι συμβαίνει σύμφωνα με το διάγραμμα διέγερσης των κανόνων.

Γ) Ερμηνεία του νόμου ελέγχου

Χρησιμοποιώντας την εντολή `gensurf` παράγεται η τρισδιάστατη επιφάνεια της εξόδου \dot{U} σε σχέση με τις εισόδους E, \dot{E} .



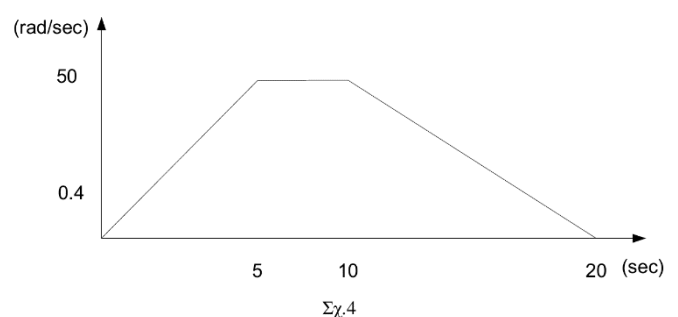
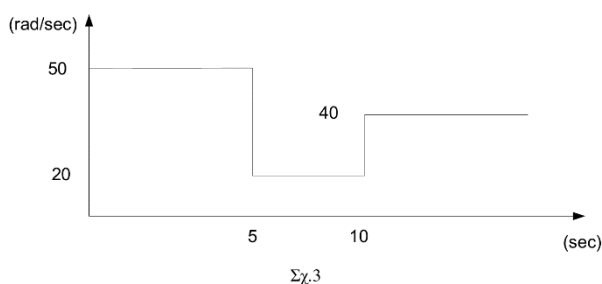
Εικ. 8 : Τρισδιάστατη απεικόνιση επιφάνειας εξόδου \dot{U} για τον ασαφή ελεγκτή.

Παρατηρούμε ότι η έξοδος του ελεγκτή διαμορφώνεται ανάλογα με το πρόσημο των εισόδων του και γύρω από τη διαγώνιο. Δηλαδή, για τιμές E, \dot{E} κοντά στο -1 θα λάβουμε \dot{U} επίσης κοντά στο -1 ώστε να διορθωθεί το σφάλμα που απομακρύνεται. Αντίστοιχα για τιμές E, \dot{E} κοντά στο 1 λαμβάνουμε \dot{U} επίσης κοντά στο 1 για τον ίδιο λόγο που περιγράφηκε παραπάνω. Επομένως η τρισδιάστατη αναπαράσταση λαμβάνει αναμενόμενες αποκρίσεις για το σύστημα που θέλουμε να ελέγξουμε.

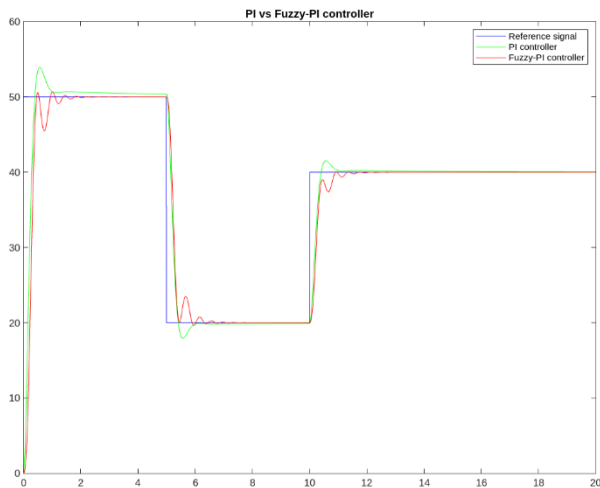
Σενάριο 2

Α) Απόκριση του Συστήματος Κλειστού Βρόγχου για τα δυο σήματα αναφοράς

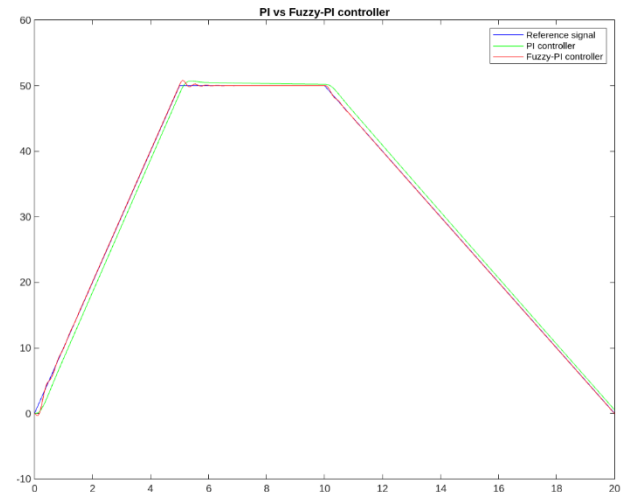
Σε αυτό το σενάριο μας δίνονται δυο διαφορετικά σήματα αναφοράς όπως φαίνονται στα Σχ.3, Σχ.4 και μας ζητείται να γίνει η γραφική παράσταση της απόκρισης των στροφών του συστήματος κλειστού βρόγχου.



Οι αποκρίσεις του κλασικού (πράσινο χρώμα) και του ασαφούς ελεγκτή (κόκκινο χρώμα) παρουσιάζονται στις παρακάτω Εικ.1. - Σχ.2 για τις αντίστοιχα προφίλ του σήματος αναφοράς όπως μας τη δίνει το Matlab.



Εικ. 9: Αποκρίσεις ελεγκτών για είσοδο την βηματική συνάρτηση



Εικ. 10: Αποκρίσεις ελεγκτών για είσοδο την συνάρτηση ράμπας.

Η πρώτη εικόνα αφορά την απόκριση των στροφών με είσοδο την βηματική συνάρτηση του Σχ.3. Εδώ παρατηρούμε ότι ο κλασικός ελεγκτής προσαρμόζεται στη μόνιμη κατάσταση πιο γρήγορα από τον ασαφή ελεγκτή αλλά η ανταπόκριση των δύο ελεγκτών είναι εξίσου επιτυχής.

Β) Σχολιασμός ικανότητας FLC με είσοδο συνάρτηση ράμπας

Στη δεύτερη εικόνα παρουσιάζεται η απόκριση κλειστού βρόγχου για είσοδο την συνάρτηση ράμπας του Σχ.4. Σε αυτή την περίπτωση η ικανότητα του FLC να παρακολουθεί το σήμα της εισόδου είναι πιο αυστηρό ενώ ακολουθεί γρηγορότερα και χωρίς πρόβλημα τις μεταβολές συγκριτικά με τον κλασικό PI.

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στο περιβάλλον του Matlab και το πρόγραμμα εκτελείται μέσω του αρχείου `sys.m`

Επιπλέον στο παραδοτέο, περιλαμβάνονται τα αρχεία `createFis.m`, `compute.m` και `pi_cntrl.m`

Το πρώτο είναι υπεύθυνο για δημιουργία του ασαφούς συστήματος και το δεύτερο για τον υπολογισμό της εξόδου του συστήματος δεχόμενη ορίσματα τις παραμέτρους του FLC. Το αρχείο (*.fis) δηλ. `table.fis` χρησιμοποιείται για να φορτώσουμε το ασαφές σύστημα συμπερασμάτων και περιλαμβάνει πληροφορίες για τη βάση κανόνων και τις συναρτήσεις συμμετοχής.

Ο κώδικας είναι αναρτημένος σε αποθετήριο στο [Github](https://github.com).