

**ΕΡΓΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ
ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ - ΑΣΑΦΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΑΣΑΦΕΙΣ
ΕΛΕΓΚΤΕΣ**



**Μπούζιος Κωνσταντίνος
ΑΕΜ: 8957**

**Αναφορά πρώτης εργασίας FLC_07
email: kmpouzio@ece.auth.gr
Εαρινό Εξάμηνο 2023**

Περιεχόμενα

1. Ασαφής ελεγκτής.....	3
2. Ανάλυση προδιαγραφών.....	6
3. Σύστημα κλειστού βρόχου.....	10
4. Σενάριο πρώτο.....	15
5. Σενάριο δεύτερο.....	22
6. Σενάριο τρίτο.....	24

1. Ασαφής Ελεγκτής

Αρχικά δημιουργήθηκε ο ασαφής ελεγκτής με βάση τους κανόνες για την εργασία FLC_07. Για την δημιουργία του ελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν τα σχήματα 2(α) και 2(β) που βρίσκονται στο pdf της περιγραφής της εργασίας. Οι λεκτικές μεταβλητές του σφάλματος e και της μεταβολής του σφάλματος De βρίσκονται στην εικόνα 2(α) ενώ για τις λεκτικές μεταβλητές της μεταβολής του σήματος ελέγχου Du περιγράφονται στην εικόνα 2(β). Η δημιουργία του ασαφούς ελεγκτή έγινε μέσω ενός script που χρησιμοποίησε τις εντολές `memfis`, `addvar`, `addmf` και `parsrule`. Το script αυτό ονομάζεται `createflc.m` και παράγει ένα αρχείο `.fis` το οποίο ονομάζεται `FLC07.fis` στο οποίο βρίσκονται όλοι οι παράμετροι και οι κανόνες του ασαφούς ελεγκτή. Οι κανόνες είναι εξής:

If (e is NL) and (De is NL) then (Du is NL)

If (e is NL) and (De is NM) then (Du is NL)

If (e is NL) and (De is NS) then (Du is NL)
If (e is NL) and (De is ZR) then (Du is NL)
If (e is NL) and (De is PS) then (Du is NM)
If (e is NL) and (De is PM) then (Du is NS)
If (e is NL) and (De is PL) then (Du is ZR)
If (e is NM) and (De is NL) then (Du is NL)
If (e is NM) and (De is NM) then (Du is NL)
If (e is NM) and (De is NS) then (Du is NL)
If (e is NM) and (De is ZR) then (Du is NM)
If (e is NM) and (De is PS) then (Du is NS)
If (e is NM) and (De is PM) then (Du is ZR)
If (e is NM) and (De is PL) then (Du is PS)
If (e is NS) and (De is NL) then (Du is NL)
If (e is NS) and (De is NM) then (Du is NL)
If (e is NS) and (De is NS) then (Du is NM)
If (e is NS) and (De is ZR) then (Du is NS)
If (e is NS) and (De is PS) then (Du is ZR)
If (e is NS) and (De is PM) then (Du is PS)
If (e is NS) and (De is PL) then (Du is PM)
If (e is ZR) and (De is NL) then (Du is NL)
If (e is ZR) and (De is NM) then (Du is NM)
If (e is ZR) and (De is NS) then (Du is NS)
If (e is ZR) and (De is ZR) then (Du is ZR)
If (e is ZR) and (De is PS) then (Du is PS)
If (e is ZR) and (De is PM) then (Du is PM)

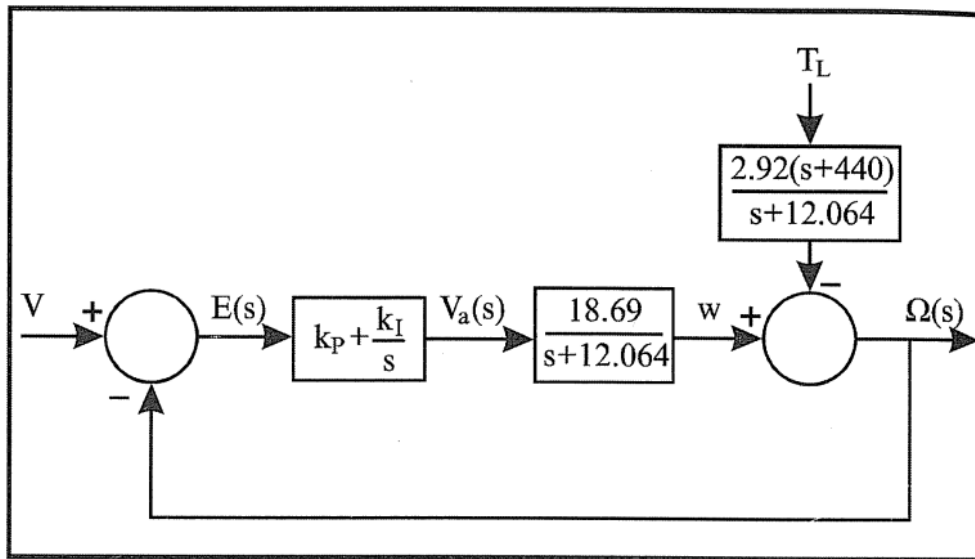
If (e is ZR) and (De is PL) then (Du is PL)
If (e is PS) and (De is NL) then (Du is NM)
If (e is PS) and (De is NM) then (Du is NS)
If (e is PS) and (De is NS) then (Du is ZR)
If (e is PS) and (De is ZR) then (Du is PS)
If (e is PS) and (De is PS) then (Du is PM)
If (e is PS) and (De is PM) then (Du is PL)
If (e is PS) and (De is PL) then (Du is PL)
If (e is PM) and (De is NL) then (Du is NS)
If (e is PM) and (De is NM) then (Du is ZR)
If (e is PM) and (De is NS) then (Du is PS)
If (e is PM) and (De is ZR) then (Du is PM)
If (e is PM) and (De is PS) then (Du is PL)
If (e is PM) and (De is PM) then (Du is PL)
If (e is PM) and (De is PL) then (Du is PL)
If (e is PL) and (De is NL) then (Du is ZR)
If (e is PL) and (De is NM) then (Du is PS)
If (e is PL) and (De is NS) then (Du is PM)
If (e is PL) and (De is ZR) then (Du is PL)
If (e is PL) and (De is PS) then (Du is PL)
If (e is PL) and (De is PM) then (Du is PL)
If (e is PL) and (De is PL) then (Du is PL)

Με την εφαρμογή των κανόνων αυτών δημιουργήθηκε ο
ασαφής ελεγκτής. Σημειώνεται πως για να υλοποιηθεί η

συνάρτηση συμπερασμού με τον κανόνα Larsen η παράμετρος ImplicationMethod τέθηκε ίση με 'prod'. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι τέθηκαν όπως ακριβώς λέει η εκφώνηση της εργασίας.

2. Ανάλυση προδιαγραφών

Μετά την σχεδίαση του ασαφούς ελεγκτή, προσδιορίστηκε στο σύστημα του προβλήματος μέσω των προδιαγραφών που έχουν τεθεί. Από το βιβλίο του Πετρίδη Α' Τόμος, βρέθηκε παρόμοια ανάλυση προβλήματος στην σελίδα 272 στο κεφάλαιο 6.4 στο σχήμα 6.4.1. Παρακάτω στην εικόνα 1 απεικονίζεται το σύστημα.



Σχήμα 6.4.1

Εικόνα 1

Η σχεδίαση όπως αναφέρεται στο βιβλίο του Πετρίδη, συνίσταται στον υπολογισμό του k_P και του k_I . Η συνάρτηση μεταφοράς γράφεται ως:

$$k_P + \frac{k_I}{s} = \frac{k_P(s + \mu)}{s} \quad \text{όπου} \quad \mu = \frac{k_I}{k_P}$$

Επομένως σύμφωνα με την ανάλυση που υπάρχει στο βιβλίο του Πετρίδη έχουμε τον παρακάτω τύπο:

$$\begin{aligned}\Omega(s) &= \frac{18.69k_p(s+\mu)}{s(s+12.064)+18.69k_p(s+\mu)}V(s) \\ &\quad - \frac{2.92s(s+440)}{s(s+12.064)+18.69k_p(s+\mu)}T_L(s) \\ &= H_k(s)V(s) + H_{TL}(s)T_L(s)\end{aligned}\tag{6.4.1}$$

Έπειτα, μελετώνται οι προδιαγραφές με την σειρά που μελετώνται στο βιβλίο του Πετρίδη.

Προδιαγραφή 5

Η προδιαγραφή απαιτεί είσοδο αναφοράς τα 200V άρα μετά τις πράξεις παίρνουμε ότι $k_p=4/3$.

Προδιαγραφή 3

Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος ανοιχτού βρόχου είναι:

$$A(s) = \frac{18.69k_p(s+\mu)}{s(s+12.064)}$$

Επειδή η συνάρτηση είναι τύπου 1 έχει μηδενικό σφάλμα θέσης.

Προδιαγραφή 2

Η συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου προκύπτει ότι είναι η ακόλουθη:

$$H_k(s) = \frac{18.69k_p(s + \mu)}{s(s + 12.064) + 18.69k_p(s + \mu)} \quad (6.4.6)$$

Υπάρχει ένα μηδενικό στην θέση $-\mu$. Για να μην έχουμε υπερύψωση απαιτείται το $-\mu$ να μην είναι κοντά στην αρχή των αξόνων. Επιλέγω το $\mu=15$ ώστε να είναι αρκετά μακριά.

Προδιαγραφή 1

Μετά από κατάλληλες πράξεις χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση παρατηρείται ότι η προδιαγραφή αυτή τηρείται.

$$H_{TL}(s) = \frac{\Omega(s)}{T_L(s)} = \frac{-2.92s(s + 440)}{s(s + 12.064) + 18.69k_p(s + \mu)} \quad (6.4.8)$$

Προδιαγραφή 4

Το script main.m που δημιουργήθηκε υπολογίζει τον χρόνο ανόδου μέσω της συνάρτησης `stepinfo` και το βρίσκει ίσο με $73,6\text{msec} < 160\text{msec}$. Επομένως κι αυτή η προδιαγραφή του προβλήματος λήφθηκε επιτυχώς υπόψη.

Επιπρόσθετα. Ζητούμενο της άσκησης είναι να προσδιοριστεί το πεδίο ορισμού της μεταβλητής $e(k)$. Το σφάλμα όπως λέει η εκφώνηση της άσκησης είναι:

$e(k) = r(k) - y(k)$. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το σφάλμα είναι αν μηδενιστεί το $y(k)$. Η μέγιστη τιμή του $r(k)$ ισούται με την μέγιστη τιμή της γωνιακής συχνότητας του κινητήρα επομένως είναι 150rad/s. Άρα το πεδίο ορισμού της μεταβλητής $e(k)$ είναι το διάστημα $[-150, 150]$.

Από τις σημειώσεις του μαθήματος, έχουμε τις παρακάτω σχέσεις για τις παραμέτρους του ασαφούς ελεγκτή:

$$K_e = 1$$

$$\alpha = 1/\mu = 0.067$$

$$K_1 = k_p/\alpha = 1.33/0.067 \approx 20$$

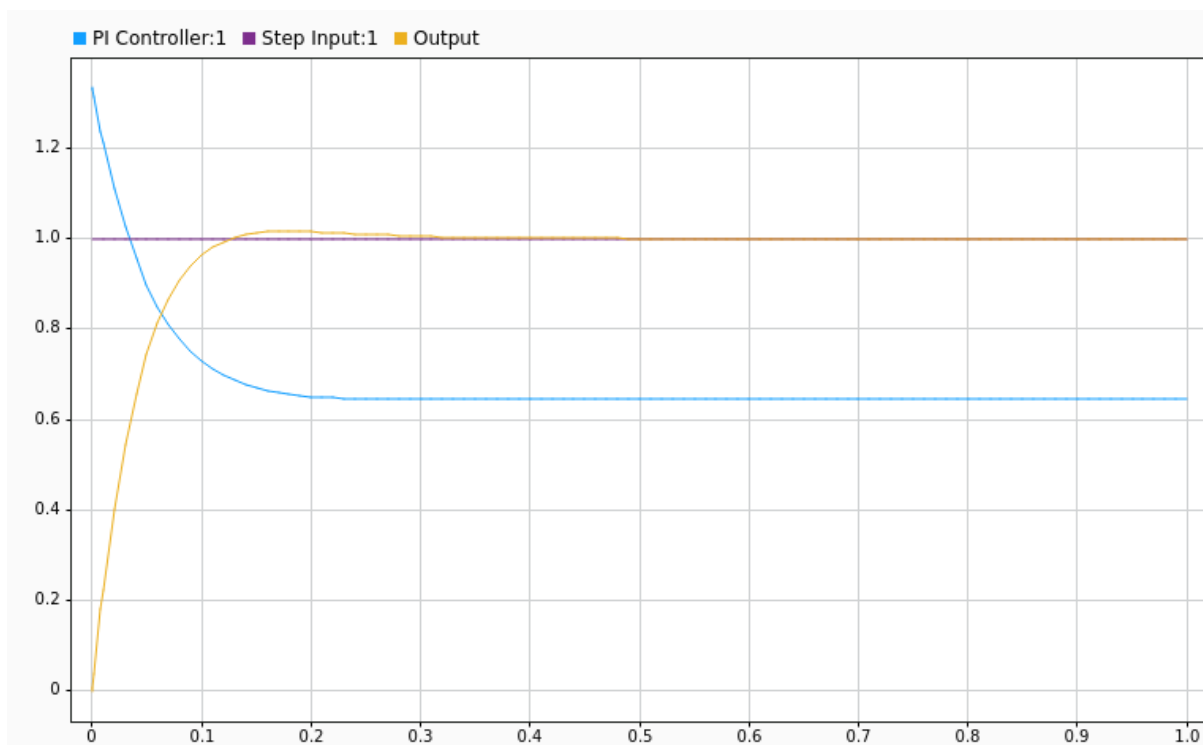
$$K_d = \alpha * K_e = 0.067$$

(Εξισώσεις 1)

Μετά την ανάλυση προδιαγραφών, τρέχει το script main.m που δημιουργήθηκε για να δώσει στις μεταβλητές του simulink τιμές.

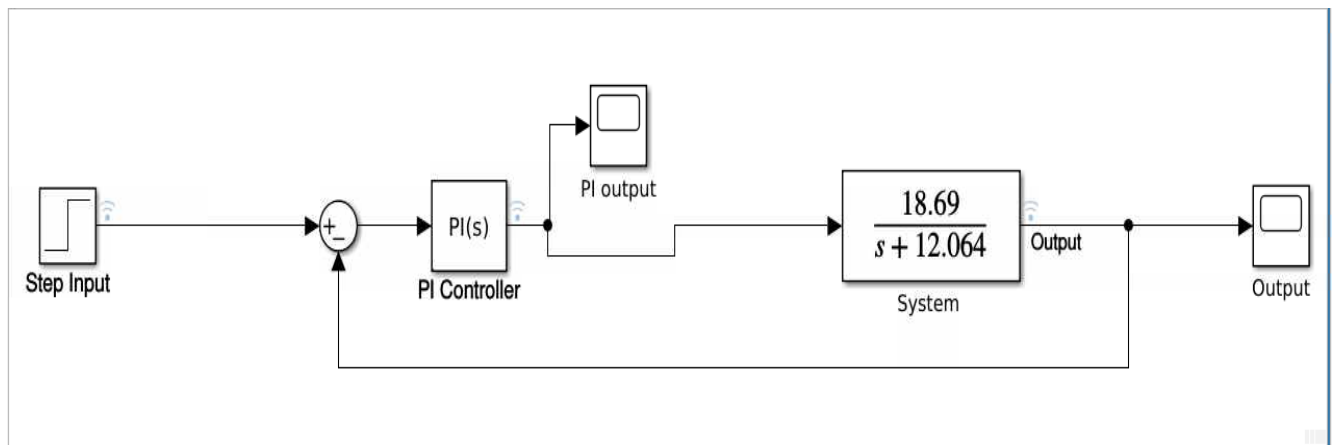
3. Σύστημα κλειστού βρόχου

Το σύστημα κλειστού βρόχου - κινητήρα για $k_p=4/3$ και $k_i=20$ PI ελεγκτή υλοποιήθηκε στο αρχείο του simulink ονόματι closedloop.slx. Παρακάτω στην εικόνα 2 παρατίθενται τα αποτελέσματα για βηματική είσοδο στο σύστημα του κλειστού βρόχου.



Εικόνα 2

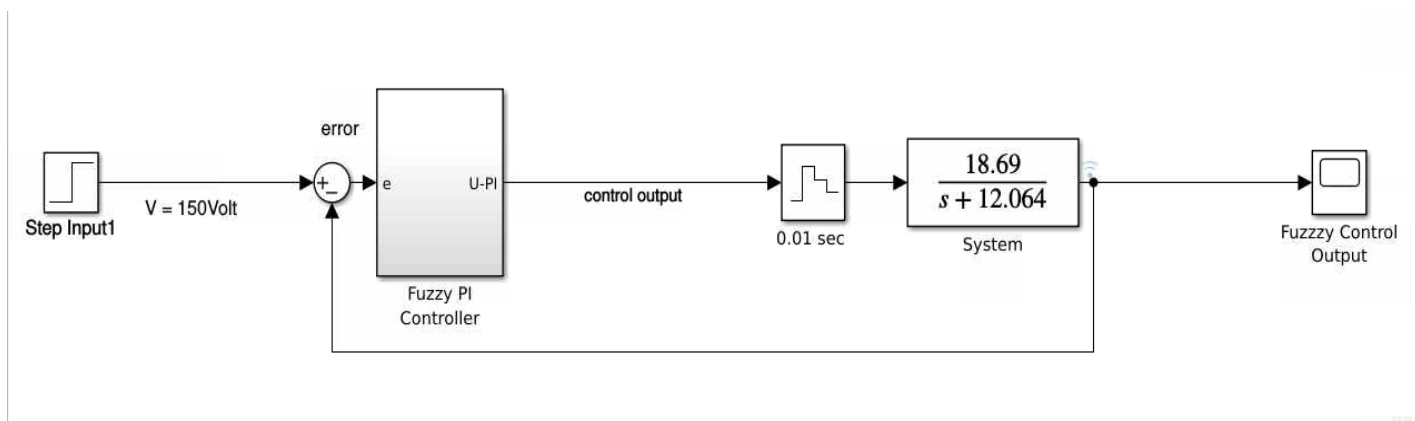
Στην εικόνα 3 φαίνεται το σύστημα υλοποιημένο στο simulink το οποίο έδωσε και τις αποκρίσεις της εικόνας 2.



Εικόνα 3

Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα της εικόνας 2 έγιναν για βηματική είσοδο 1 Volt.

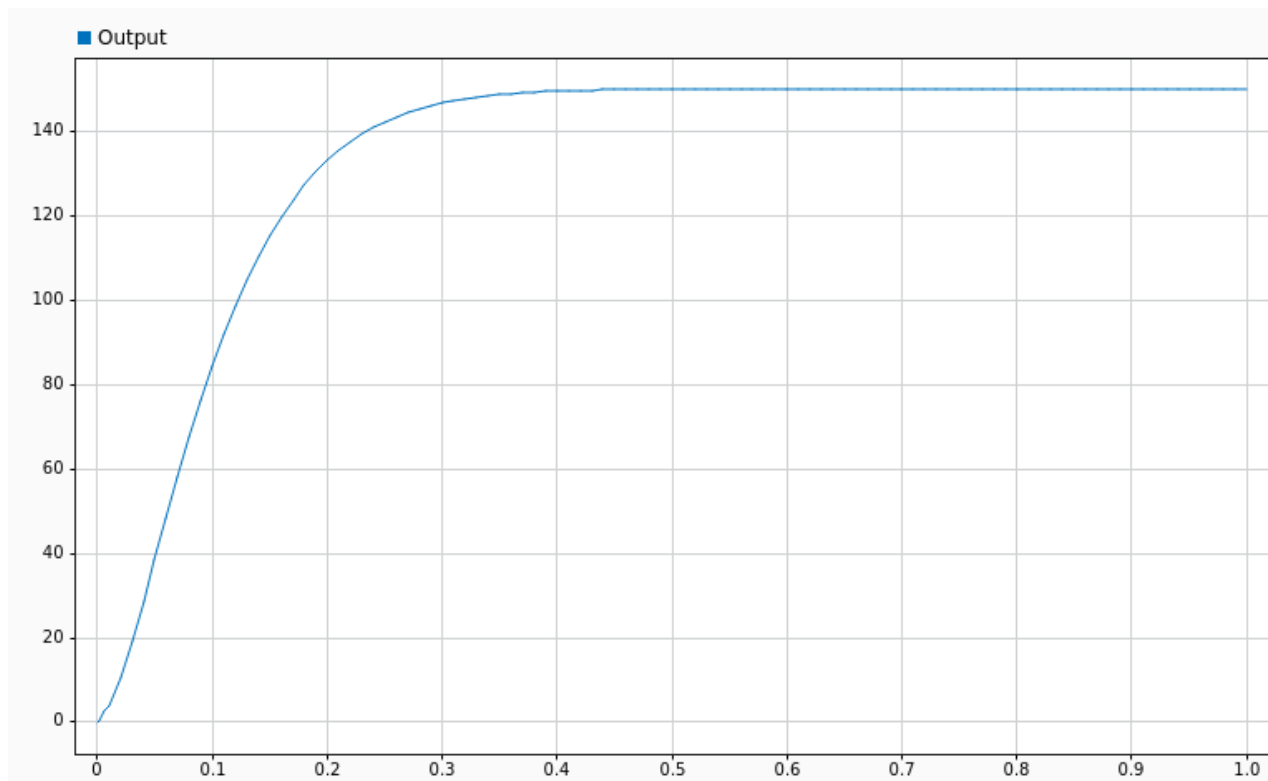
Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ο ασαφής ελεγκτής στο σύστημα ελέγχου, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.



Εικόνα 4

Για τον ασαφή ελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν προδιαγραφές που περιγράφονται στις εξισώσεις 1 που βρίσκονται στην σελίδα 9 του παρόν βιβλίου. Η έξοδος του ασαφούς ελεγκτή για βηματική είσοδο 150 Volt απεικονίζεται στην εικόνα 5. Το

σύστημα που δημιουργήθηκε στο simulink βρίσκεται στο αρχείο fzpi1.slx.



Εικόνα 5

Από την εικόνα 5 παρατηρούμε ότι για να φτάσει στην επιθυμητή έξοδο των 150V χρειάζεται αρκετά msec πράγμα που σημαίνει ότι δεν πληρείται η προδιαγραφή του συστήματος. Ο χρόνος ανόδου, ο χρόνος υπερύψωσης καθώς και ο χρόνος αποκατάστασης είναι λίγο μεγαλύτεροι από τις προδιαγραφές. Συγκεκριμένα, το ο χρόνος που φτάνει η έξοδος στο peak αγγίζει τα 400msec ενώ ο χρόνος ανόδου είναι 175msec πράγμα που παραβιάζει το όριο των 160msec. Οπότε χρειάζεται μια κατάλληλη τροποποίηση των παραμέτρων. Χρειάζεται να βρεθεί η σωστή ισορροπία έτσι ώστε ο χρόνος απόκρισης να είναι αρκετά γρηγορότερος όμως ταυτόχρονα να

μην υπάρχει τεράστια υπερύψωση. Μετά από μερικές δοκιμές επιλέγονται οι παρακάτω τιμές για τις παραμέτρους.

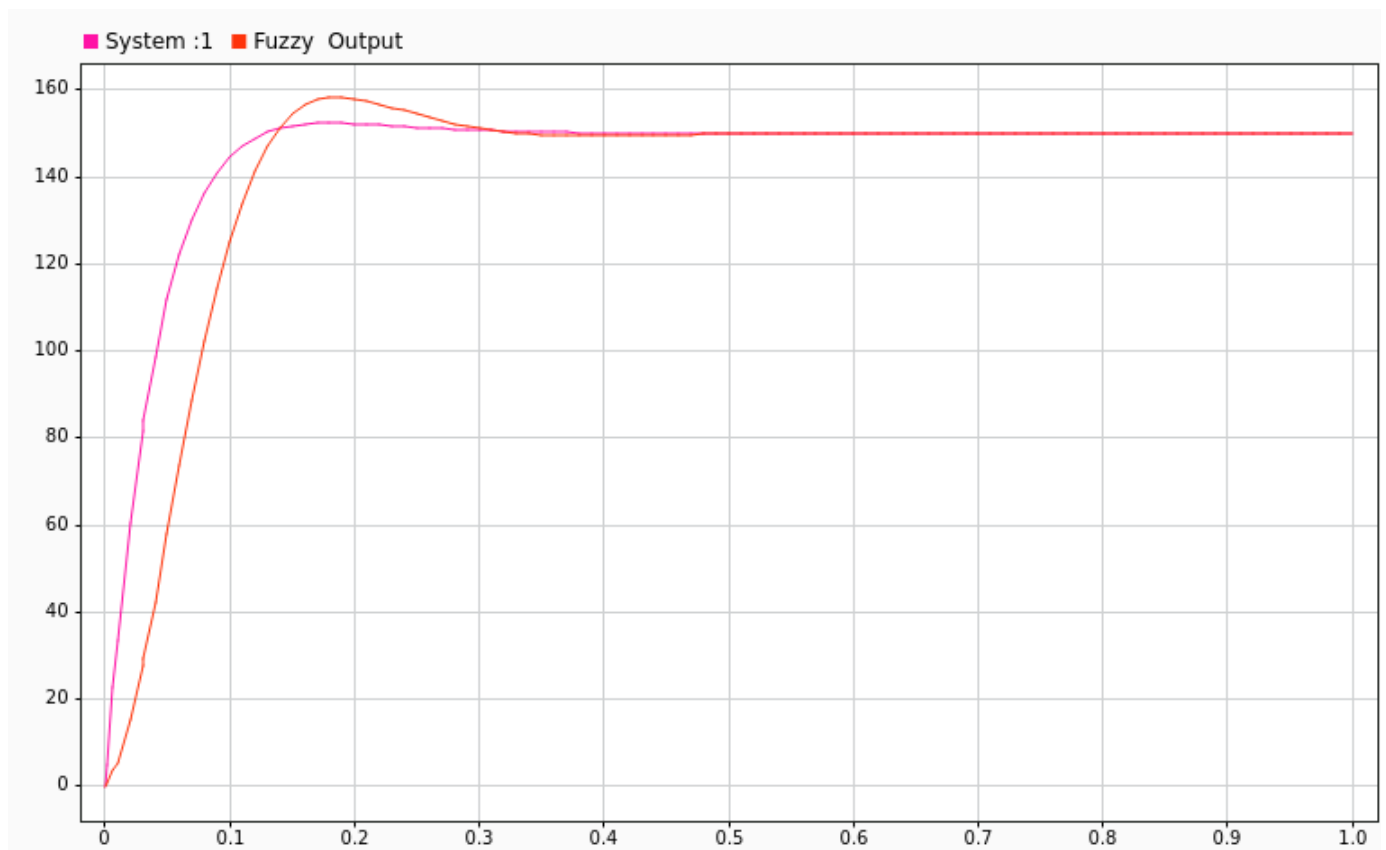
$$K_e = 1,237$$

$$K_I = 26,7$$

$$\alpha = 0,0352$$

$$K_d = 0,0435$$

Στην εικόνα 6 απεικονίζεται η έξοδος του συστήματος αφότου τροποποιήθηκαν κατάλληλα οι παράμετροί του. Μάλιστα συγκρίνεται με την έξοδο ενός συμβατικού ελεγκτή (με ροζ χρώμα) για καλύτερη κατανόηση.



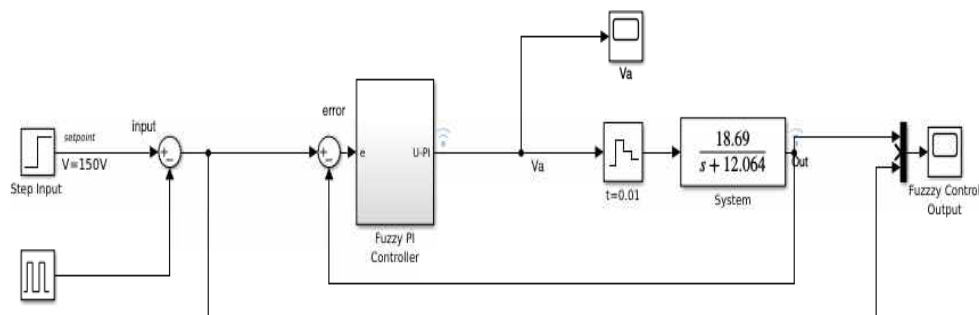
Εικόνα 6

Με κόκκινο χρώμα είναι η έξοδος του συστήματος για τον ασαφή ελεγκτή. Παρατηρείται ότι υπάρχει μια μικρή υπερύψωση σε σχέση με τον προηγούμενο ασαφή ελεγκτή της εικόνας 5. Η υπερύψωση είναι της τάξης του 4,5% οπότε η προδιαγραφή καλύπτει το όριο του 5%. Ο χρόνος ανόδου μειώνεται κατά πολύ, φτάνει τα 100msec περίπου, πράγμα που καλύπτει και με το παραπάνω την προδιαγραφή των 160 msec. Επίσης ο χρόνος μέχρι να φτάσει στο peak είναι 165msec οπότε βελτιώνεται κατά πολύ σε σχέση με τον προηγούμενο χρόνο των 400msec. Σημειώνεται ότι το δεύτερο σύστημα το οποίο δημιουργήθηκε στο simulink που πληροί τις προδιαγραφές του προβλήματος βρίσκεται στο αρχείο fzpi2.slx.

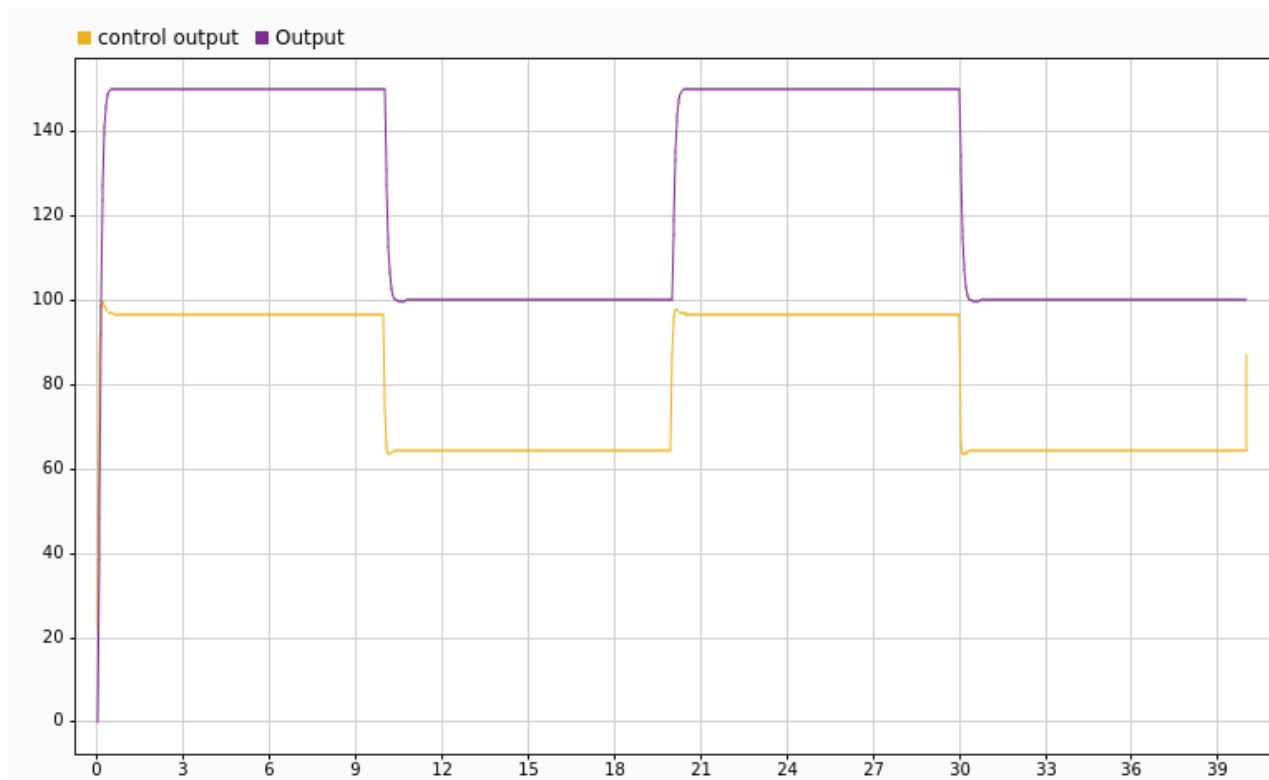
4. Σενάριο πρώτο

Ερωτήματα 1, 2, 3

Αρχικά για το σενάριο ένα ζητήθηκε οι αρχικές τιμές των κερδών K να είναι αυτές που καθορίστηκαν από την ανάλυση κλασικού ελέγχου. Έπειτα αν χρειαστεί να αλλάξουν κατάλληλα έτσι ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές του προβλήματος. Στην εικόνα 7 απεικονίζεται το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για το σενάριο 1. Στην εικόνα 8 απεικονίζεται η έξοδος του συστήματος (με μοβ) για τα αρχικά κέρδη και η έξοδος του Fuzzy controller με κίτρινο χρώμα.

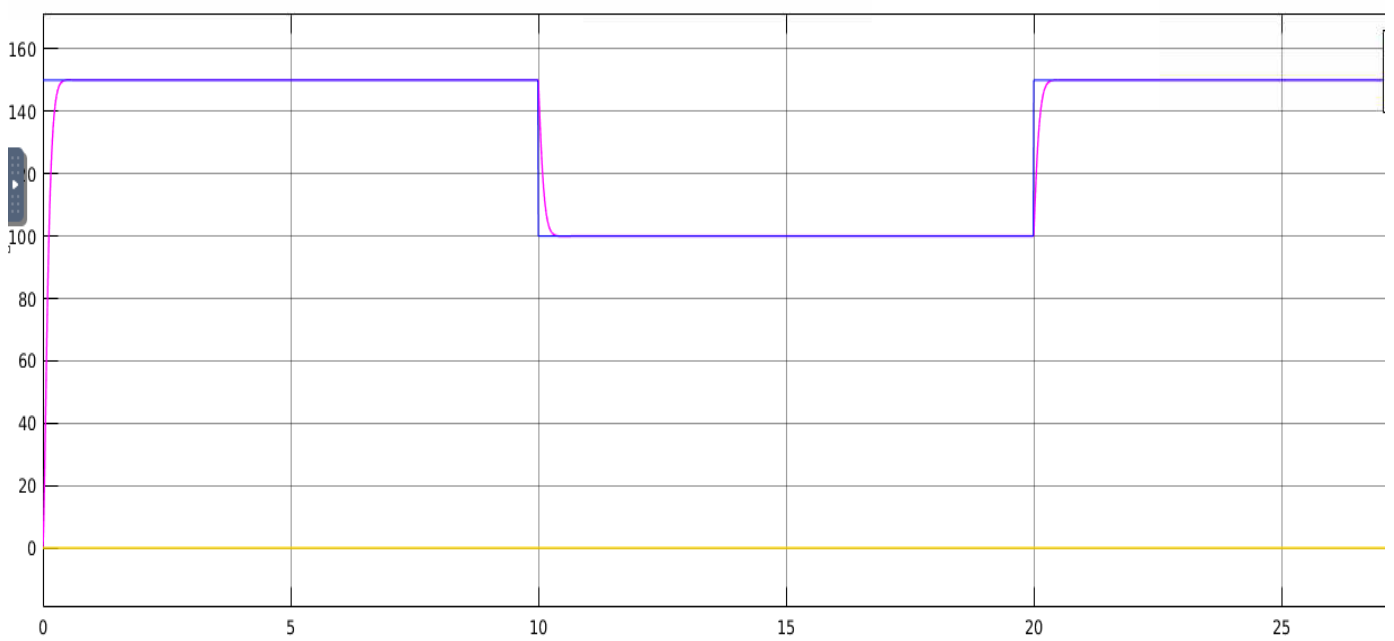


Εικόνα 7



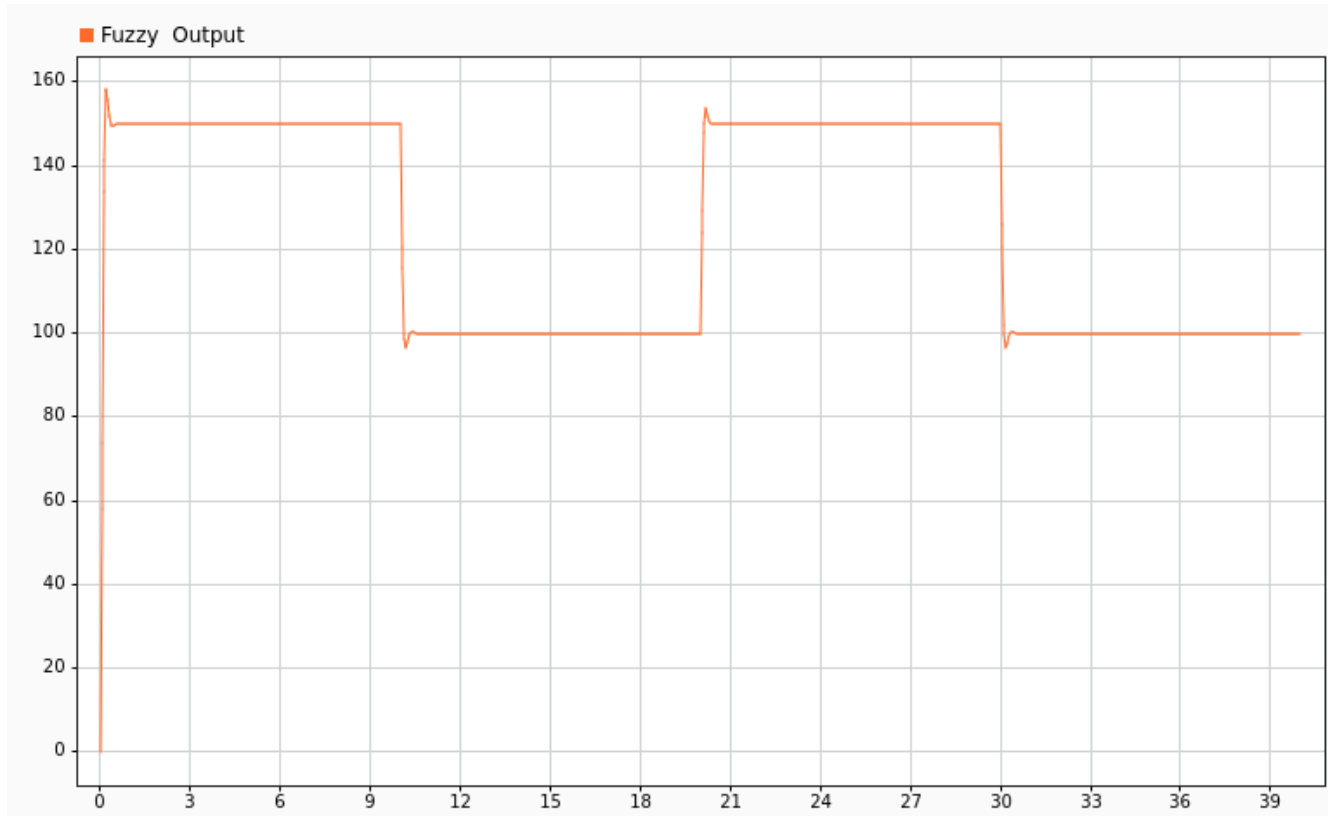
Εικόνα 8

Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται για τα αρχικά κέρδη K με κόκκινο η έξοδος και με μπλε η εισοδος. Σημειώνεται ότι το αρχείο simulink είναι το case1_1.slx.



Εικόνα 9

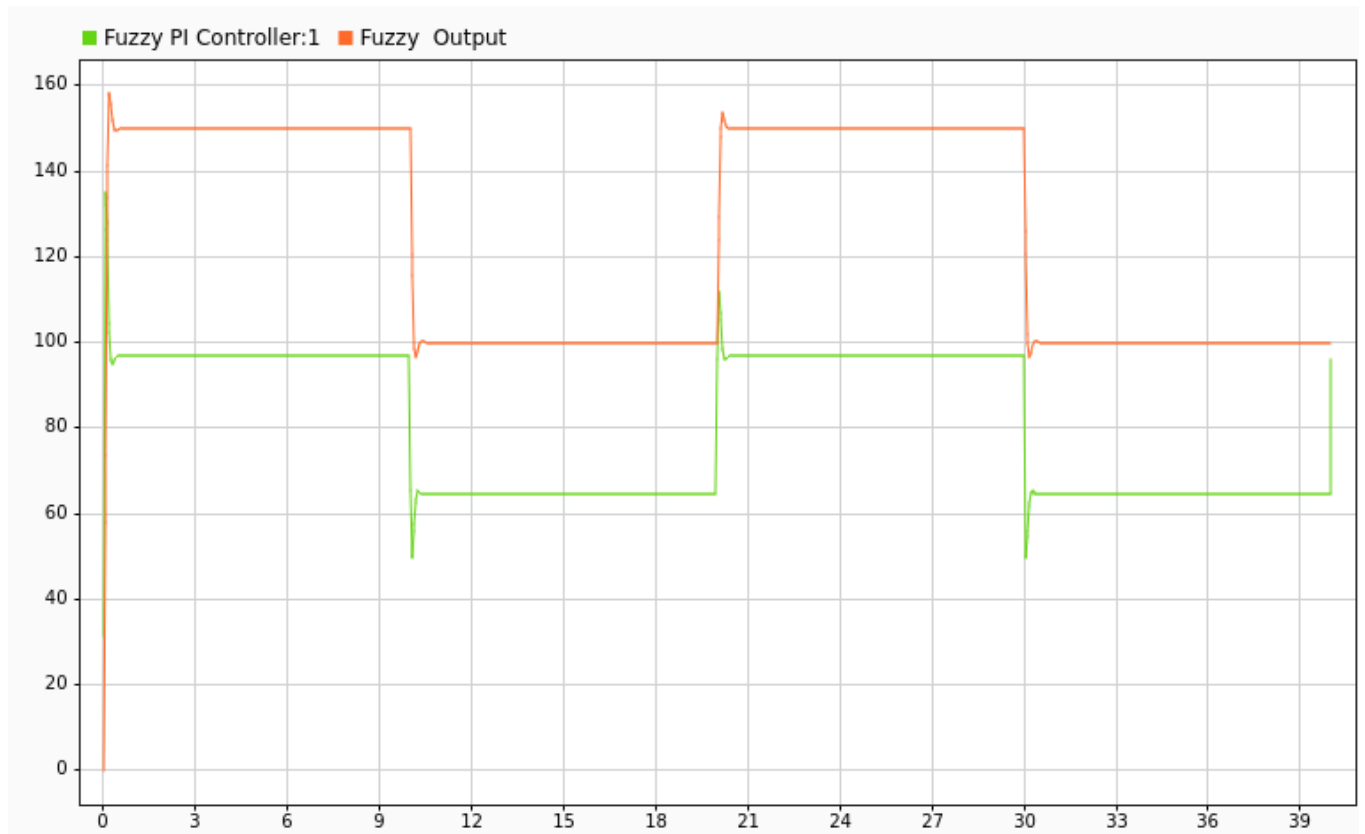
Αφότου ρυθμίστηκαν τα κέρδη ώστε η απόκριση κλειστού βρόχου να τηρεί τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί, έχουμε την έξοδο του συστήματος παρακάτω στην εικόνα 10.



Εικόνα 10

Στην εικόνα 11 απεικονίζεται με κόκκινο η έξοδος του συστήματος ενώ με πράσινο η έξοδος του ασαφούς ελεγκτή μετά την ρύθμιση των κερδών. Παρατηρείται (έπειτα από σύγκριση της εικόνας 11 και εικόνας 8) ότι η επίδραση των παραμέτρων (K_e , a , K_i) του ασαφούς ελεγκτή μετά την ρύθμιση ώστε να τηρούνται οι συνθήκες που έχουν τεθεί είναι πως φτάνει πιο γρήγορα στην ανώτερη τιμή. Επομένως ο χρόνος ανόδου και υπερύψωσης είναι μικρότερος, όμως αυτό έχει ένα μικρό κόστος στην υπερύψωση. Αυτό το καταλαβαίνουμε επίσης κι από πράσινη γραμμή της εικόνας 11 και την αντίστοιχη της κίτρινη γραμμή της εικόνας 8. Η πρασινή

γραμμή έχει πολύ πιο έντονη καθοδική πορεία από την αντίστοιχη κίτρινη, πράγμα που σημαίνει ότι ο ασαφής ελεγκτής μειώνει πιο γρήγορα και αισθητά την είσοδο. Σημειώνεται πως το αρχείο simulink είναι το case1_2.slx.



Εικόνα 11

Ερώτημα 4

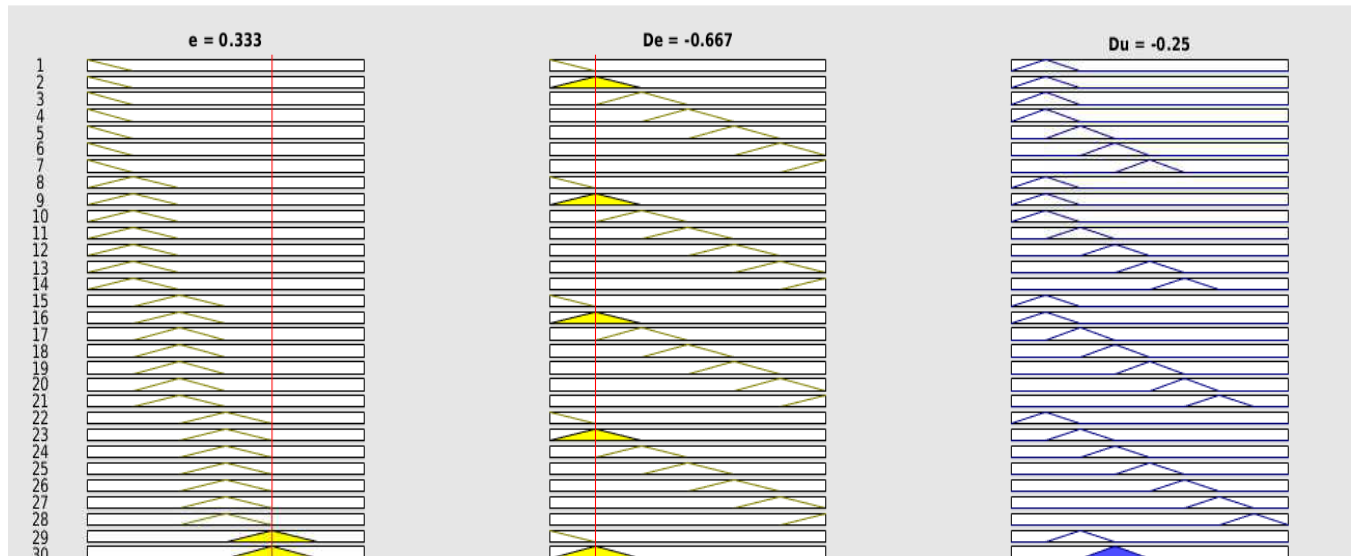
Όπως αναφέρει η εκφώνηση του ερωτήματος 4, θεωρούμε μια διέγερση όπου e is PS και De is NM. Ο κανόνας που επηρεάζεται είναι ο:

If (e is PS) and (De is NM) then (Du is NS)

Σε αυτόν τον κανόνα σύμφωνα με τα σχήματα της εικόνας 2(α) από την εκφώνηση, οι τιμές θα είναι:

$$e = 0.3334 \text{ και } De = -0.6667$$

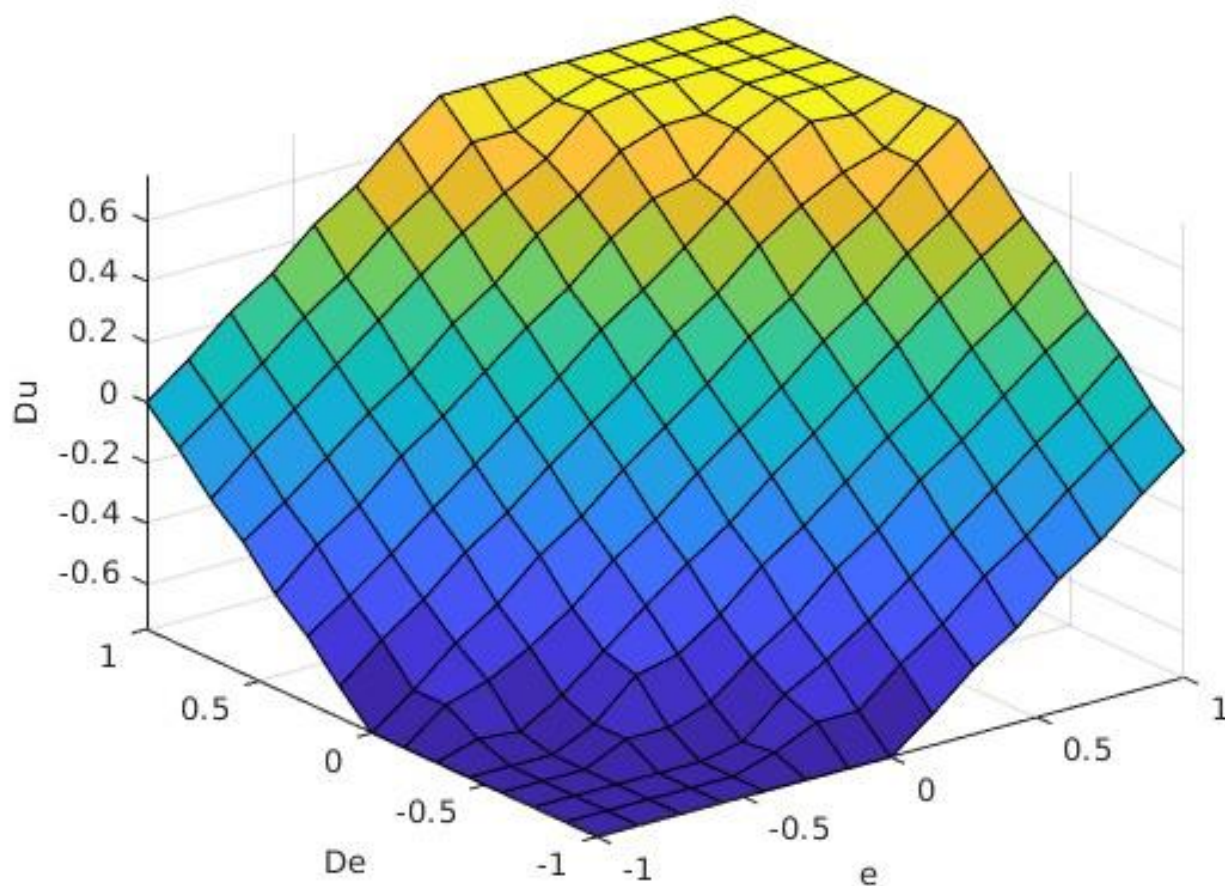
Στην εικόνα 12 παρατίθεται το αποτέλεσμα για αυτές τις τιμές.



Εικόνα 12

Το De είναι αρνητικό και ίσο με -0.6667 . Εφόσον η μεταβολή του σφάλματος είναι αρνητική, σημαίνει ότι το σφάλμα μειώνεται. Ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται είναι μεσαίος προς γρήγορος εφόσον το -0.6667 είναι ψηλότερα από το -0.5 . Η τιμή του σφάλματος e είναι μικρή και θετική πράγμα που σημαίνει ότι χρειάζεται λίγο ακόμα ώστε να μειωθεί το σφάλμα, εξού και η De αυξάνεται αρνητικά για να μειώσει το ήδη μικρό σχετικά σφάλμα e .

Ερώτημα 5



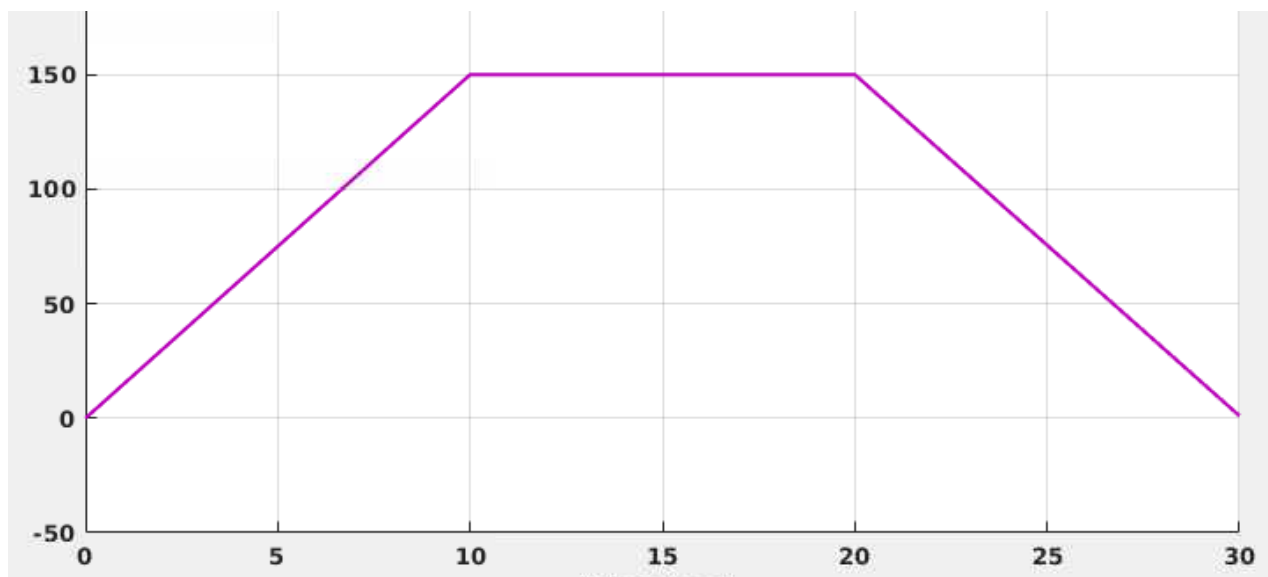
Εικόνα 13

Μέσω της εντολής `gensurf` του `MATLAB` δημιουργήθηκε η τρισδιάστατη απεικόνιση της εξόδου του ασαφούς ελεγκτή, όπως φαίνεται στην εικόνα 13. Από το σχήμα είναι προφανές ότι όταν οι τιμές e και De είναι μικρές, δηλαδή κοντά στο 0, τότε και η μεταβολή της εξόδου Du θα είναι μικρή. Αν για παράδειγμα το $e=0$ και το $De=0$ τότε και το $Du=0$. Αυτό είναι λογικό γιατί αν το σφάλμα είναι μικρό και το σφάλμα δεν

μεταβάλλεται αλλά είναι κι αυτό μικρό, τότε και η μεταβολή της εξόδου θα έχει μικρή τιμή, δεν θα χρειάζεται διόρθωση το σήμα εξόδου. Από την άλλη μεριά, αν το σφάλμα είναι μεγάλο ή η μεταβολή του σφάλματος είναι κι αυτή μεγάλη, τότε προφανώς το Du (μεταβολή της εξόδου) θα είναι μεγάλο έτσι ώστε η έξοδος u να προσεγγίσει την επιθυμητή για το σύστημα τιμή.

5. Σενάριο δεύτερο

Για το δεύτερο σενάριο έχουμε στην εικόνα 14 την είσοδο που δίνεται στο σύστημα. Το αρχείο simulink για το δεύτερο σενάριο είναι το case2.slx.



Εικόνα 14

Επειδή στο σενάριο 2 είναι απαραίτητο η υπερύψωση να είναι σχεδόν μηδενική, χρειάστηκε τα κέρδη που επιλέχθηκαν στην εξίσωση 1 στην σελίδα 9 να αλλάξουν οι τιμές τους, γιατί έδωσαν υπερύψωση αρκετά υψηλή (4,5%). Μετά από αρκετές δοκιμές επιλέχθηκαν τα παρακάτω:

$$K_e = 1.45$$

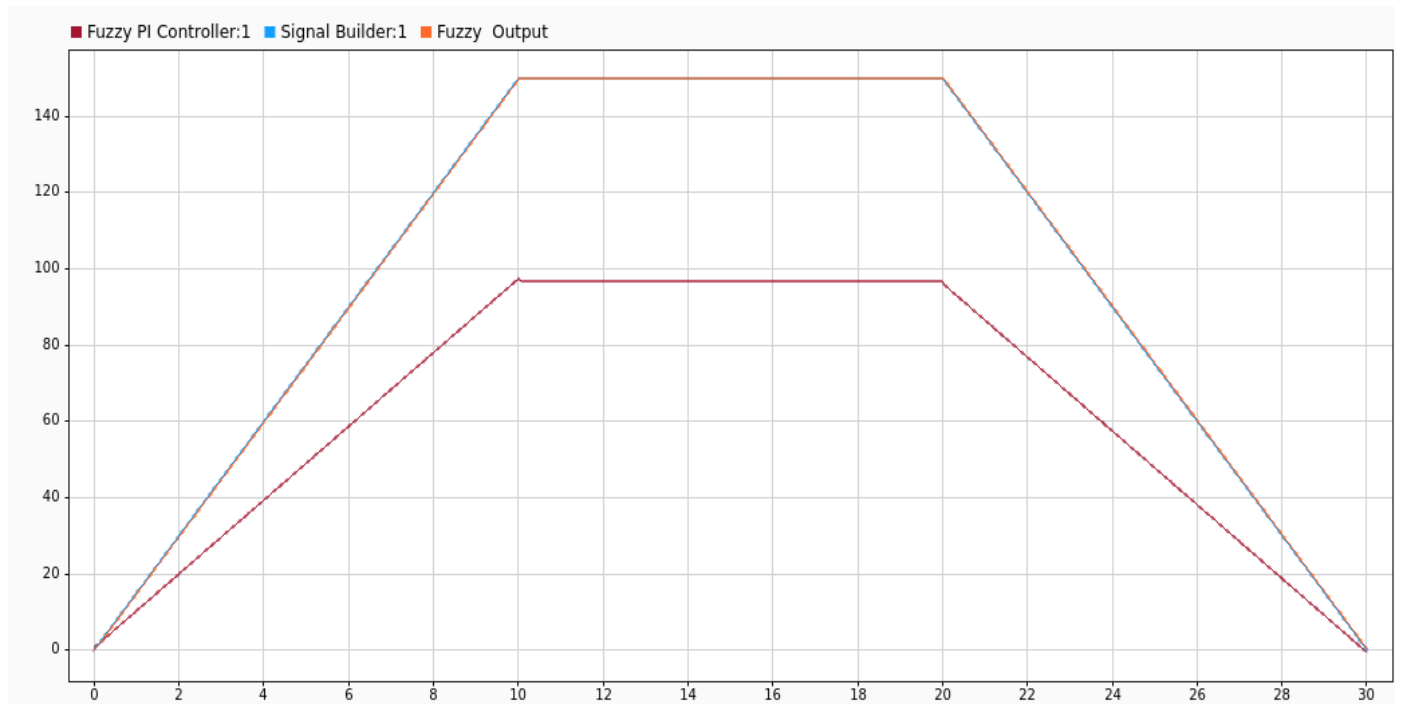
$$a = 0,046$$

$$K_d = 0,07$$

$$K_i = 31$$

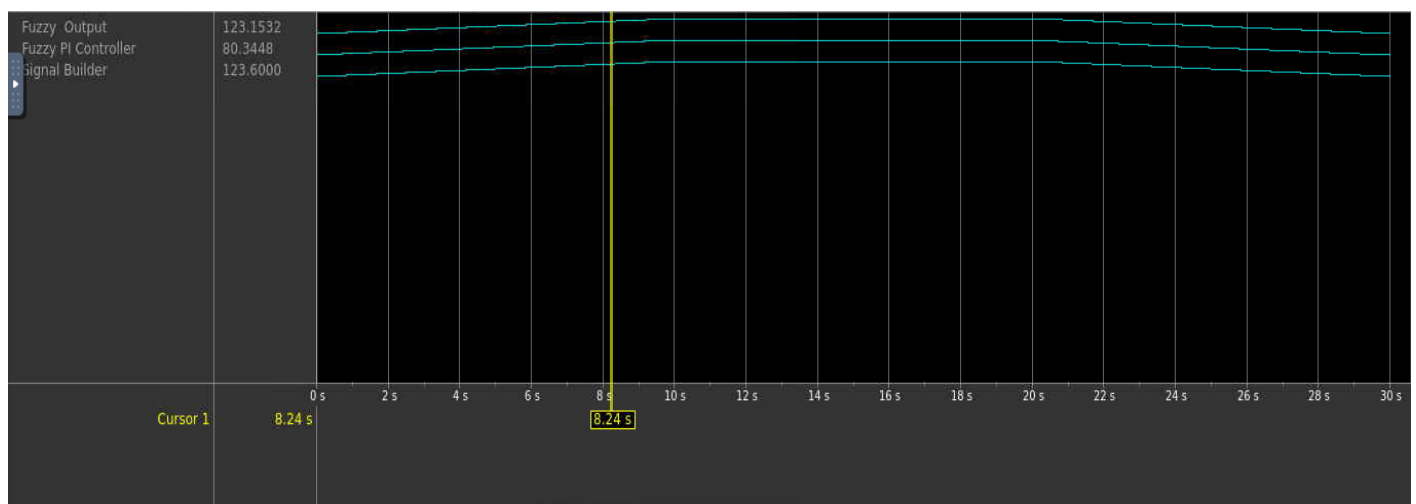
Μετά από αυτές τις προδιαγραφές, παρουσιάζεται στην εικόνα 15 με πορτοκαλί η έξοδος, με μπλε που επικαλύπτεται από το

πορτοκαλί η είσοδος και με καφέ η έξοδος του ασαφούς ελεγκτή.



Εικόνα 15

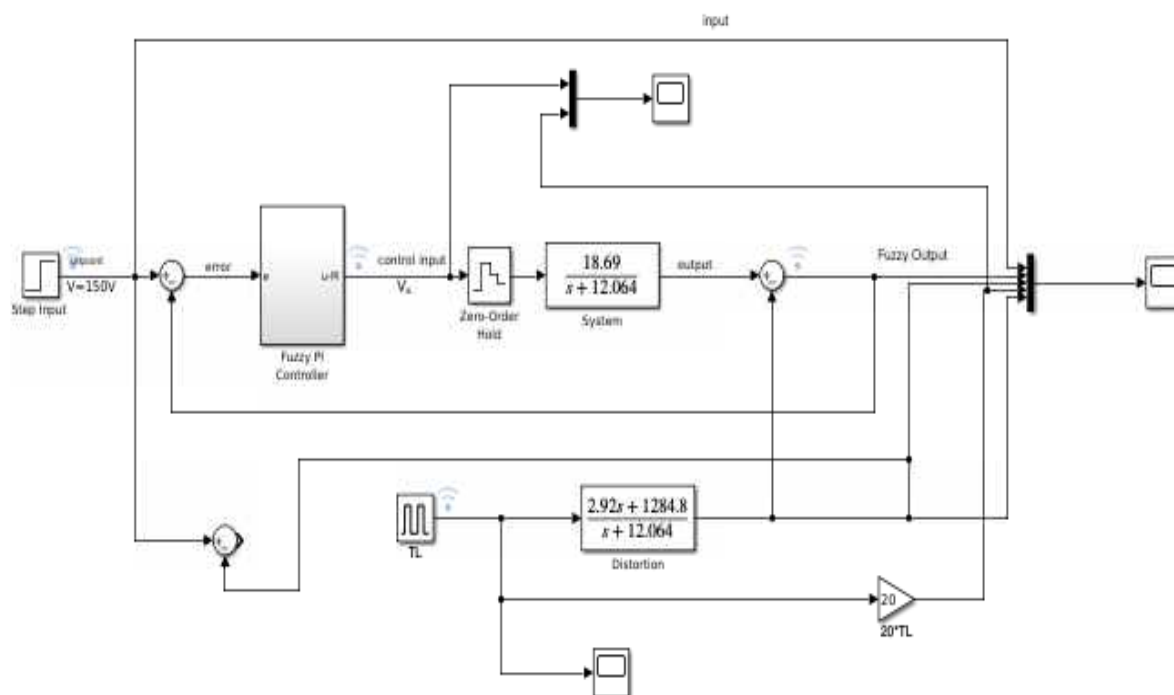
Στην εικόνα 16 παρατίθεται ένα στιγμιότυπο ανάμεσα στην είσοδο, στην έξοδο και στην έξοδο του ασαφούς ελεγκτή. Παρατηρούμε πως κάθε χρονική στιγμή η έξοδος συμβαδίζει με την είσοδο, επακριβώς. Για κάθε τιμή της εισόδου η έξοδος είναι πάρα πολύ κοντά.



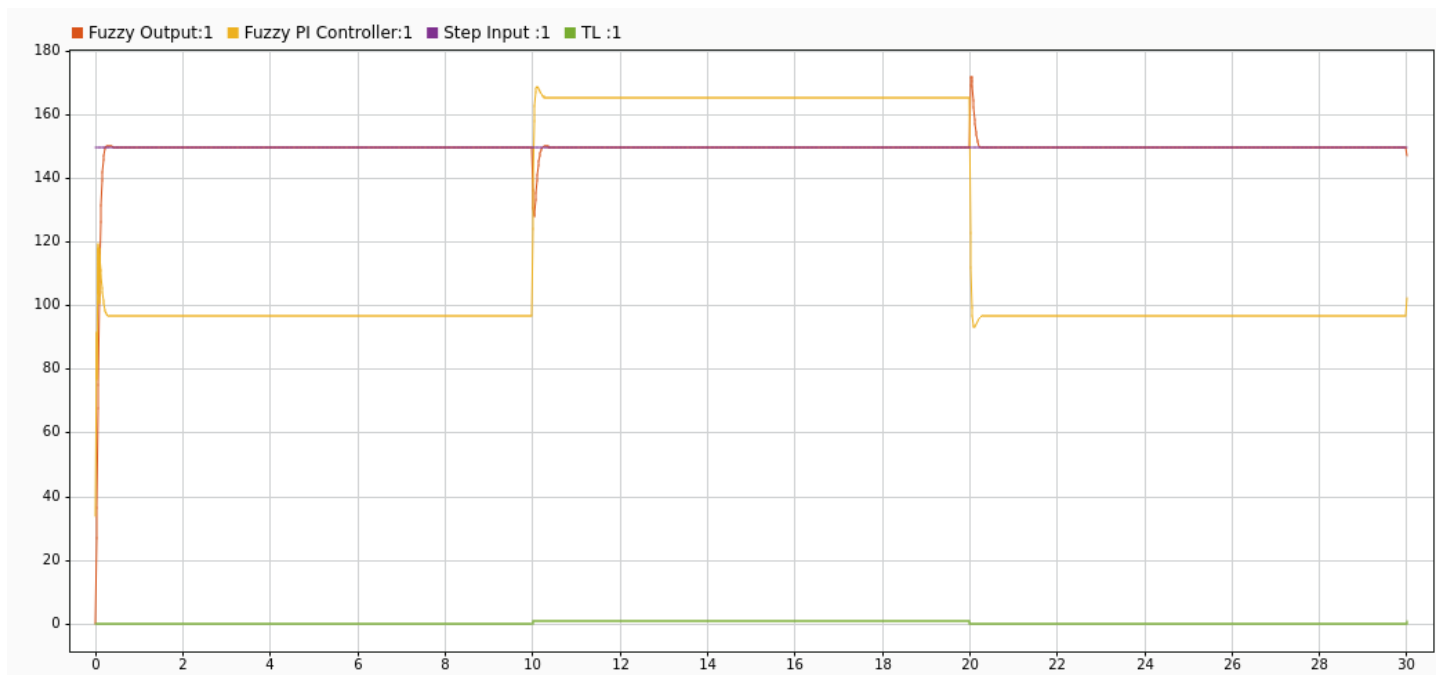
Εικόνα 16

6. Σενάριο τρίτο

Στο τρίτο σενάριο παίρνουμε το κανονικό σύστημα με τα διορθωμένα κέρδη ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές του συστήματος που δημιουργήθηκε και εφαρμόζεται βηματική είσοδος σε αυτό. Το σύστημα φαίνεται στην εικόνα 17 όπως δημιουργήθηκε στο simulink στο αρχείο case3.slx.



Εικόνα 17



Εικόνα 18

Στην εικόνα 18 απεικονίζονται οι έξοδοι και οι είσοδοι του συστήματος. Με μπλε χρώμα φαίνεται η βηματική είσοδος του συστήματος που επικαλύπτεται στο σχήμα. Με πράσινο χρώμα φαίνεται η διαταραχή που προσβάλλει το σύστημα στο 10ο δευτερολεπτο. Με κεραμιδί χρώμα φαίνεται η έξοδος του συστήματος, ενώ με πορτοκαλί χρώμα φαίνεται η έξοδος του ασαφούς ελεγκτή. Παρατηρούμε ότι μόλις η διαταραχή κάνει την εμφάνισή της, η έξοδος του συστήματος διαταράσσεται και πέφτει ακαριαία, αλλά το ίδιο ακαριαία η έξοδος του ασαφούς ελεγκτή ανεβαίνει κατακόρυφα ώστε να επαναφέρει την έξοδο στην τάση 150Volt.