

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

# ΑΣΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

8ο ΕΞΑΜΗΝΟ

## **ΕΡΓΑΣΙΑ #1**

*ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΘΕΟΧΑΡΗΣ Ι.*

**Όνομα : ΘΑΝΑΣΗΣ ΧΑΡΙΣΟΥΔΗΣ**  
**Α.Ε.Μ. : 9026**

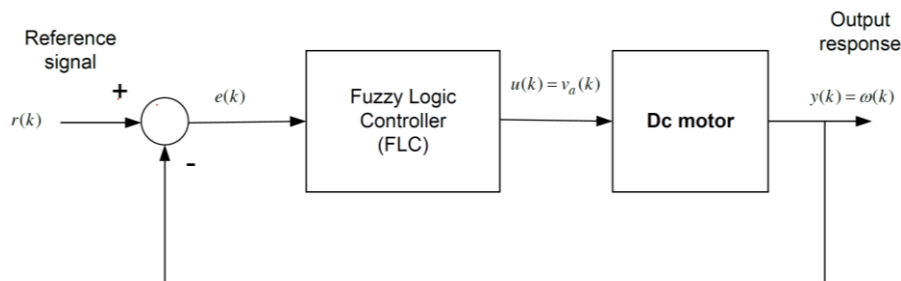
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 28 Φεβρουαρίου 2020

# ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΑΣΑΦΕΙΣ ΕΛΕΓΚΤΕΣ

"D10" - [DC-Motor-FLC\_10.pdf]

“Οι προδιαγραφές του συστήματος ελέγχου είναι:

1. Απόρριψη διαταραχών. Για κυκλική συχνότητα διαταραχές μικρότερη από 1 rad/s να υπάρχει κέρδος διαταραχής το πολύ 20dB. Επιπλέον, θέλουμε αν υπάρξει μεταβολή της  $T_i$  ή  $\omega_s$  να μεταβληθεί παροδικά και μετά να επιστρέψει στην τιμή που είχε πριν τη διαταραχή.
2. Το πολύ 5% υπερύψωση για βηματική είσοδο.
3. Μηδενικό σφάλμα θέσης ( $e_{ss} = 0$ )
4. Χρόνος ανόδου το πολύ 160 ms
5.  $V_a(t) \leq 200V$  για κάθε  $t > 0$
6.  $\omega_{max} = 150$  rad/sec



## Ασαφής Ελεγκτής:

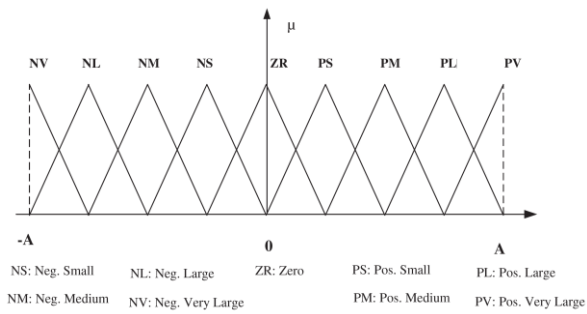
Είσοδοι: σφάλμα  $E$  (7 λεκτικές τιμές), μεταβολή του σφάλματος  $\dot{E}$  (εννέα λεκτικές τιμές)

Έξοδος: μεταβολή του σφάλματος  $\dot{U}$  (εννέα λεκτικές τιμές)

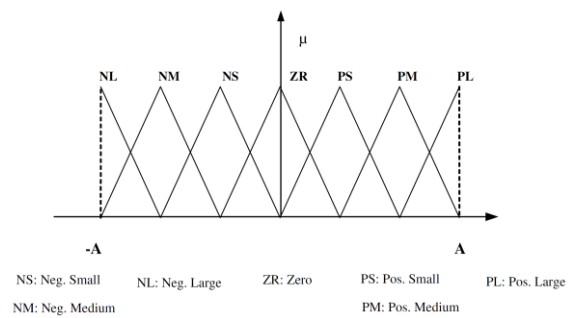
Fuzzifier: Singleton

AND  $\rightarrow$  min, ALSO  $\rightarrow$  max, Mamdani

De-Fuzzifier: Center of Sums (COS)



Εικόνα 1: Συναρτήσεις συμμετοχής εννέα (9) λεκτικών τιμών



Εικόνα 2: Συναρτήσεις συμμετοχής επτά (7) λεκτικών τιμών

Να καθοριστεί το π.ο. της μεταβλητής  $e(k)$ .

#### Ζητούμενα Εργασίας:

1. Να γίνει κλιμακοποίηση του  $E$  και του  $\dot{E}$  ώστε να μεταβάλλονται στο  $[-1,1]$
2. Βάση κανόνων ασαφούς ελεγκτή (στόχος ελέγχου: η έξοδος  $w$  να ακολουθεί πιστά το σήμα αναφοράς υπό τις παραπάνω προδιαγραφές)
3. Να υλοποιηθεί πρόγραμμα σε Matlab/Simulink για την υλοποίηση του κλειστού βρόχου ασαφούς ελεγκτής – κινητήρας. Να υλοποιηθούν τρία σενάρια κίνησης:
  - i. Σενάριο 1: Ορθογώνιο προφίλ κίνησης
  - ii. Σενάριο 2: Τραπεζοειδές προφίλ κίνησης
  - iii. Σενάριο 3: Απόρριψη Διαταραχών"

## Πίνακας Περιεχομένων

1.	Κλιμακοποίηση Μεταβλητών Εισόδου .....	7
2.	Ασαφής Βάση Κανόνων (Fuzzy Rule Base) .....	8
3.	Σχεδίαση Ασαφούς Ελεγκτή .....	9
3.1.	Υπολογισμός Κερδών Γραμμικού PI Ελεγκτή .....	9
3.2.	Υπολογισμός Κερδών Ασαφούς PI Ελεγκτή .....	12
3.2.1.	Αρχικά Κέρδη Ασαφούς PI Ελεγκτή.....	12
3.2.2.	Συγκριτική Μέθοδος και Τελικά Κέρδη Ασαφούς PI Ελεγκτή.....	15
4.	Σενάρια Ελέγχου – Προφίλ Κίνησης .....	18
4.1.	Σενάριο 1: Παρακολούθηση Σήματος Αναφοράς ( $T_L = 0$ ) .....	18
4.1.1.	Ασαφής Ελεγκτής με Αρχικά Κέρδη.....	19
4.1.2.	Ασαφής Ελεγκτής μετά τη Ρύθμιση των Κερδών.....	21
4.1.3.	Διέγερση Κανόνων για $(E, \dot{E}) = (PM, NS)$ .....	23
4.1.4.	Επιφάνεια Εξόδου Ασαφούς Ελεγκτή.....	26
4.2.	Σενάριο 2: Τραπεζοειδές Προφίλ Κίνησης ( $T_L = 0$ ) .....	27
4.2.1.	Ασαφής Ελεγκτής με Αρχικά Κέρδη.....	28
4.2.2.	Ασαφής Ελεγκτής μετά τη Ρύθμιση των Κερδών.....	30
4.3.	Σενάριο 3: Απόρριψη Διαταραχών $T_L$ .....	34
4.3.1.	Ασαφής Ελεγκτής με τα Τελικά Κέρδη.....	36

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Συναρτήσεις συμμετοχής εννέα (9) λεκτικών τιμών.....	3
Εικόνα 2: Συναρτήσεις συμμετοχής επτά (7) λεκτικών τιμών.....	3
Εικόνα 3: Απόδοση well-tuned γραμμικού PI ελεγκτή.....	10
Εικόνα 4: Βηματική απόκριση γραμμικού PI ελεγκτή (step input 1V @ 0.0sec)..	11
Εικόνα 5: Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου, $V_a$ (step input 150V @ 0.1sec).	11
Εικόνα 6: Μοντέλο Simulink γραμμικού PI ελεγκτή.....	11
Εικόνα 7: Μοντέλο Simulink για τον PI-FLC με τα αρχικά κέρδη.....	12
Εικόνα 8: Fuzzy PI Controller module του μοντέλου Simulink του PI FLC με τα αρχικά κέρδη.....	13
Εικόνα 9: Βηματική απόκριση PI FLC με τα αρχικά κέρδη (step input 150V @ 0.0sec) .....	13
Εικόνα 10: Βηματική απόκριση PI FLC με τα αρχικά κέρδη vs. τον γραμμικό PI ελεγκτή (step input 150V @ 0.0sec).....	14
Εικόνα 11: Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου, $V_a$ , για τον PI FLC με τα αρχικά κέρδη vs. τον γραμμικό PI ελεγκτή (step input 150V @ 0.0sec).....	14
Εικόνα 12: Βηματική απόκριση PI FLC με τα τελικά κέρδη (step input 150V @ 0.0sec).....	16

Εικόνα 13: Βηματική απόκριση PI FLC με τα αρχικά κέρδη vs. τον γραμμικό PI ελεγκτή (step input 150V @ 0.0sec).....	16
Εικόνα 14: Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου, $V_a$ , για τον PI FLC με τα τελικά κέρδη vs. τον γραμμικό PI ελεγκτή (step input 150V @ 0.0sec).....	17
Εικόνα 15: Σήμα αναφοράς 1 <sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης του ελεγκτή .....	18
Εικόνα 16: Κύκλωμα Simulink για σχηματισμό του σήματος αναφοράς του 1 <sup>ου</sup> σεναρίου .....	18
Εικόνα 17: Σήμα Αναφοράς (από Simulink) 1 <sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης .....	19
Εικόνα 18: Κύκλωμα Simulink για την προσομοίωση του 1ου σεναρίου.....	19
Εικόνα 19: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με αρχικά κέρδη ως προς Σήμα Αναφοράς.....	20
Εικόνα 20: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με αρχικά κέρδη vs Έξοδος του συστήματος με το Γραμμικού PI ελεγκτή.....	20
Εικόνα 21: Διάγραμμα $V_a$ του FLC με αρχικά κέρδη vs $V_a$ του Γραμμικού PI .....	21
Εικόνα 22: Έξοδος FLC με τελικά κέρδη ως προς Σήμα Αναφοράς .....	22
Εικόνα 23: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με τα τελικά κέρδη vs Έξοδος του συστήματος με το Γραμμικού PI ελεγκτή .....	22
Εικόνα 24: Διάγραμμα $V_a$ του FLC με τελικά κέρδη vs $V_a$ του Γραμμικού PI ελεγκτή .....	23
Εικόνα 25: Προβολή διέγερσης και συμπερασμάτων κανόνων καθώς και τελικού συμπεράσματος της ασαφούς βάσης για είσοδο $(E, \dot{E}) = (0.667, -0.25)$ .....	25
Εικόνα 26: Τριςδιάστατη επιφάνεια της εξόδου ( $U$ ) του ασαφούς ελεγκτή .....	26
Εικόνα 27: Σήμα αναφοράς (προφίλ κίνησης) 2ου σεναρίου χρήσης του ελεγκτή..	27
Εικόνα 28: Κύκλωμα Simulink για σχηματισμό του σήματος αναφοράς του 2 <sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης.....	27
Εικόνα 29: Κύκλωμα Simulink για την προσομοίωση του 2ου σεναρίου χρήσης....	28
Εικόνα 30: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με αρχικά κέρδη ως προς Σήμα Αναφοράς.....	28
Εικόνα 31: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με αρχικά κέρδη vs Έξοδος του συστήματος με το Γραμμικού PI ελεγκτή.....	29
Εικόνα 32: Διάγραμμα $V_a$ του FLC με αρχικά κέρδη vs $V_a$ του Γραμμικού PI ελεγκτή .....	29
Εικόνα 33: Βηματική απόκριση PI FLC με τα ρυθμισμένα κέρδη του 2 <sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης(step input 150V @ 0.0sec).....	31
Εικόνα 34: Βηματική απόκριση PI FLC με τα ρυθμισμένα κέρδη του 2 <sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης vs. τον γραμμικό PI ελεγκτή (step input 150V @ 0.0sec).....	31
Εικόνα 35: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με τελικά κέρδη ως προς Σήμα Αναφοράς.....	32
Εικόνα 36: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με τελικά κέρδη vs Έξοδος συστήματος με το Γραμμικού PI Ελεγκτή.....	33
Εικόνα 37: Διάγραμμα $V_a$ του FLC με τελικά κέρδη vs $V_a$ του Γραμμικού PI ελεγκτή .....	33
Εικόνα 38: Σήμα αναφοράς και σήμα διαταραχών 3ου σεναρίου χρήσης του ελεγκτή .....	34
Εικόνα 39: Προς-έλεγχο σύστημα με διαταραχές (διαγραμματική μορφή).....	34

Εικόνα 40: Κύκλωμα Simulink για σχηματισμό του εισόδου διαταραχών του 3 <sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης.....	35
Εικόνα 41: Είσοδος διαταραχής για το 3ο σενάριο χρήσης.....	35
Εικόνα 42: Κύκλωμα Simulink για την προσομοίωση του 3ου σεναρίου χρήσης....	36
Εικόνα 43: Έξοδος του συστήματος με τον ρυθμισμένο ασαφή ελεγκτή ως προς Είσοδο Αναφοράς.....	37
Εικόνα 44: Έξοδος του συστήματος με τον ρυθμισμένο ασαφή ελεγκτή vs Έξοδος του συστήματος με τον Γραμμικό PI ελεγκτή.....	38
Εικόνα 45: Έξοδος του συστήματος (στροφές του κινητήρα, $\omega(t)$ ) με τον ρυθμισμένο FLC με τα τελικά κέρδη ως προς είσοδο διαταραχών $T_L$ (σε Nm) και $\Omega_{T\_L}$ .....	38
Εικόνα 46: Διάγραμμα $V_a$ του FLC με τελικά κέρδη ως προς είσοδο διαταραχών $T_L$ (σε Nm) και $\Omega_{T\_L}$ .....	39

## Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1: Οι 63 ασαφείς κανόνες που συνθέτουν τη βάση κανόνων του ασαφούς ελεγκτή.....	8
Πίνακας 2: Τα κέρδη του γραμμικού PI ελεγκτή.....	10
Πίνακας 3: Δείκτες απόδοσης γραμμικού PI ελεγκτή.....	10
Πίνακας 4: Τα αρχικά κέρδη του ασαφούς PI ελεγκτή.....	12
Πίνακας 5: Δείκτες απόδοσης PI ελεγκτή με τα αρχικά κέρδη.....	13
Πίνακας 6: Τα τελικά κέρδη του ασαφούς PI ελεγκτή.....	15
Πίνακας 7: Δείκτες απόδοσης PI ελεγκτή με τα τελικά κέρδη.....	15
Πίνακας 8: Τα ρυθμισμένα κέρδη του ασαφούς PI ελεγκτή για το 2 <sup>ο</sup> σενάριο χρήσης .....	30
Πίνακας 9: Δείκτες απόδοσης ρυθμισμένου PI ελεγκτή για το 2 <sup>ο</sup> σενάριο χρήσης	

# 1. Κλιμακοποίηση Μεταβλητών Εισόδου

Δεδομένου ότι

$$e(k) = r(k) - y(k)$$

το μέγιστο σφάλμα στην είσοδο του ελεγκτή θα είναι

$$e_{\max} = r_{\max} - y_{\min} = r_{\max} - 0 = r_{\max}$$

Για την εύρεση του  $r_{\max}$  θεωρούμε ότι αυτή θα ισούται με τη μέγιστη γωνιακή ταχύτητα που μπορεί να επιτύχει ο κινητήρας, δηλ:

$$r_{\max} = \omega_{\max} = 150 \text{ rad/sec}$$

Άρα,  $e_{\max} = 150 \text{ rad/sec}$  και άρα

$$e(k) \in [-150, 150]$$

Για τη μεταβολή του σφάλματος δίνεται ότι

$$\Delta e(k) \in [-50, 50]$$

Για την κανονικοποίηση των μεταβλητών εισόδου πολλαπλασιάζω την  $e(k)$  με  $1/150$  και την  $\Delta e(k)$  με  $1/50$  και τότε:

$$\Delta e_n(k), e_n(k) \in [-1, 1]$$

## 2. Ασαφής Βάση Κανόνων (Fuzzy Rule Base)

Ο ελεγκτής που θα χρησιμοποιηθεί είναι τύπου fuzzy PI (FZ-PI). Η βάση κανόνων του ελεγκτή εξάγεται με βάση τη σχέση (κεφ. 9, Σημειώσεις κ. Θεοχάρη Ι.):

$$\ddot{U} = e + \Delta e$$

Επειδή η μία είσοδος χωρίζεται σε επτά (7) λεκτικές τιμές ενώ η άλλη σε εννέα (9), η ασαφής βάση κανόνων θα αποτελείται συνολικά από  $7 \times 9 = 63$  ασαφείς κανόνες. Έτσι, η ασαφής βάση κανόνων του ελεγκτή προκύπτει ως εξής:

$e_n \rightarrow$ $\downarrow \Delta e_n$	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PV	PS	PM	PL	PV	PV	PV	PV
PL	ZR	PS	PM	PL	PV	PV	PV
PM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV	PV
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PV
ZR	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NS	NV	NL	NM	NS	ZR	PS	PM
NM	NV	NV	NL	NM	NS	ZR	PS
NL	NV	NV	NV	NL	NM	NS	ZR
NV	NV	NV	NV	NV	NL	NM	NS

Πίνακας 1: Οι 63 ασαφείς κανόνες που συνθέτουν τη βάση κανόνων του ασαφούς ελεγκτή

Για την εισαγωγή της παραπάνω βάσης κανόνων στον ελεγκτή αρχικά, δημιουργούμε τους κανόνες χρησιμοποιώντας το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής Fuzzy Logic Designer της Matlab (παράγεται έτσι το αρχείο *fuzzy\_rule\_base.fis* που περιέχει αποθηκευμένη τη βάση κανόνων) ενώ στη συνέχεια επιλέγουμε το αρχείο που παράχθηκε από τον ελεγκτή που έχουμε σχεδιάσει στο Simulink.



### 3. Σχεδίαση Ασαφούς Ελεγκτή

#### 3.1. Υπολογισμός Κερδών Γραμμικού PI Ελεγκτή

Για την εύρεση ενός well-tuned PI ελεγκτή για τις προδιαγραφές που δίνονται ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά θέτουμε

$$\mu = \frac{K_I}{K_P}$$

Για τον υπολογισμό των επιμέρους κερδών ανατρέχουμε στις προδιαγραφές σχεδίασης. Έτσι, έχουμε:

**Προδιαγραφή No.5:  $V_a(t) \leq 200V \ \forall t \geq 0$**

Έστω  $R(s) = R_{\max}(s) = \frac{150}{s}$ , θέλω  $V_a(t) \leq 200$ .

Η  $V_a(t) \rightarrow \max$  όταν  $\omega_\delta = 0$  και έστω  $r(t) \rightarrow \max$  για  $t = 0$ . Τότε ( $t=0$ ):

$$V_a(0) = \lim_{t \rightarrow 0} V_a(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} s * V_a(s) \leq 200 \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} V_a(s) &= \frac{K_P * (s + \mu)}{s} * E(s) \\ E(s) &= R(s) - \Omega_\delta(s) \\ \Omega_\delta(s) &= \frac{18.69}{s + 12.064} * V_a(s) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} V_a(s) &= \frac{K_P(s+\mu)(s+12.064)}{s(s+12.064)+18.69 \cdot K_P(s+\mu)} * R(s) = H_a(s) * R(s) \quad (2) \\ &(\text{βλ. σελίδα 274 του βιβλίου «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου» Τόμος Α του κ. Πετρίδη}) \end{aligned}$$

$$\text{Για } R(s) = R_{\max}(s) = \frac{150}{s}, \text{ από τη (2): } V_{a,\max}(s) = \frac{150 * H_a(s)}{s} \quad (3)$$

$$(1) \stackrel{(3)}{\Rightarrow} 150 * \lim_{s \rightarrow \infty} H_a(s) \leq 200 \Rightarrow 150 * K_P \leq 200 \Rightarrow K_P \leq 4/3$$

Επιλέγω  $K_P = 4/3$  κάτι που ικανοποιεί την παραπάνω προδιαγραφή για την  $V_a$ .

**Προδιαγραφή No.2: Υπερύψωση  $\leq 5\%$**

Για την ικανοποίηση της προδιαγραφής για την υπερύψωση αποδεικνύεται (κεφ. 6, από το παραπάνω βιβλίο του κ. Πετρίδη) ότι πρέπει

$$\mu \geq 3$$

Μετά από δοκιμές (χρησιμοποιώντας το συνημμένο script σε Matlab, *main\_1.m*) βρέθηκε η κατάλληλη τιμή για το  $\mu$ ,  $\mu = 19$  (υπερύψωση  $\sim 4.5\%$ ). Επομένως, το κέρδος για τον ολοκληρωτή, θα είναι  $K_I = 25.333$ .

Παρακάτω φαίνεται η έξοδος της *stepinfo* της Matlab για τον PI ελεγκτή με τα παραπάνω κέρδη:

```
Command Window

linearStepInfo =

    struct with fields:

        RiseTime: 0.0620
        SettlingTime: 0.2185
        SettlingMin: 0.9058
        SettlingMax: 1.0447
        Overshoot: 4.4676
        Undershoot: 0
        Peak: 1.0447
        PeakTime: 0.1420

fx K>>
```

Εικόνα 3: Απόδοση *well-tuned* γραμμικού PI ελεγκτή

### Προδιαγραφή No.3: $e_{ss} = 0$

Ικανοποιείται (από τον τύπο του ελεγκτή)

### Προδιαγραφή No.4: $t_r \leq 160ms$

Ικανοποιείται, 62ms (όπως φαίνεται στην έξοδο της *stepinfo* – βλ. παραπάνω εικόνα)

Έχουμε καταλήξει, επομένως, σε έναν «*well-tuned*» γραμμικό PI ελεγκτή με τα ακόλουθα κέρδη:

$K_I$	25.333
$K_P$	1.333

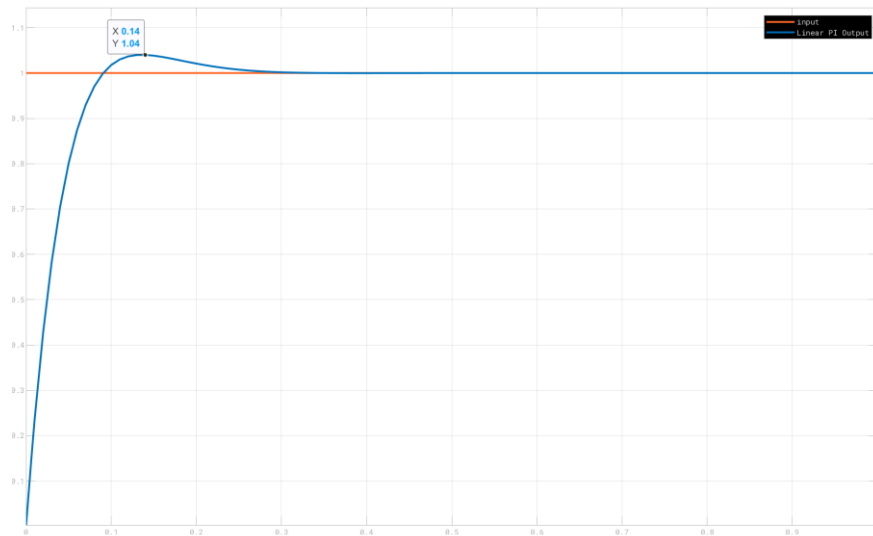
Πίνακας 2: Τα κέρδη του γραμμικού PI ελεγκτή

Ο γραμμικός PI ελεγκτής αποδίδει ως εξής (βάσει της *stepinfo* – βλ. Εικόνα 3):

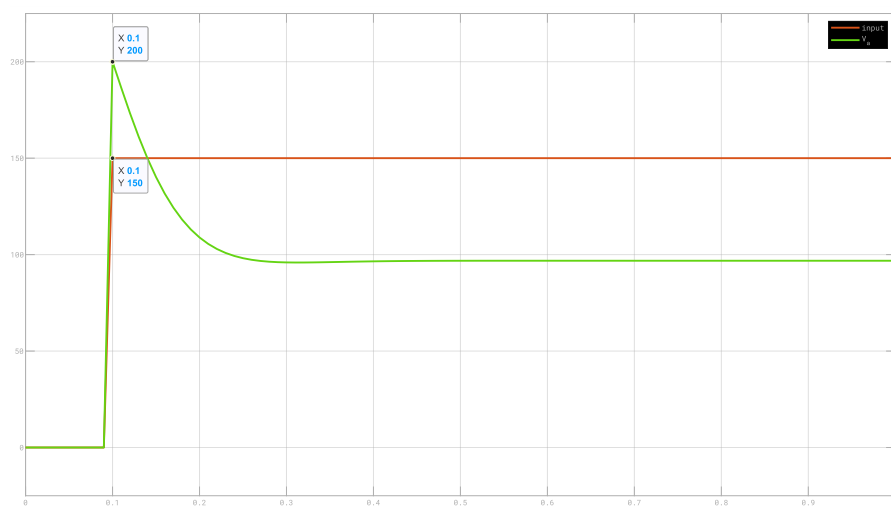
Χρόνος Ανόδου, $t_r$	62.0 msec
Χρόνος Αποκατάστασης, $t_s$	218.5 msec
Υπερύψωση, %	4.468 %
Peak	1.0447
Χρόνος εμφάνισης Peak, $t_{peak}$	142.0 msec

Πίνακας 3: Δείκτες απόδοσης γραμμικού PI ελεγκτή

Η απόδοση του γραμμικού ελεγκτή εκτός από την *stepinfo* φαίνεται και στη προσομοίωση με το Simulink παρακάτω:

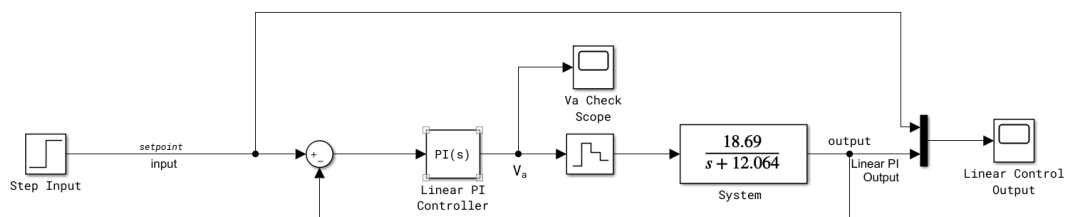


Εικόνα 4: Βηματική απόκριση γραμμικού PI ελεγκτή (step input 1V @ 0.0sec)



Εικόνα 5: Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου,  $V_a$  (step input 150V @ 0.1sec)

ενώ, το μοντέλο Simulink με το οποίο έγινε η προσομοίωση φαίνεται ακολούθως:



Εικόνα 6: Μοντέλο Simulink γραμμικού PI ελεγκτή

## 3.2. Υπολογισμός Κερδών Ασαφούς ΡΙ Ελεγκτή

### 3.2.1. Αρχικά Κέρδη Ασαφούς ΡΙ Ελεγκτή

Τα αρχικά κέρδη του ΡΙ ελεγκτή ασαφούς λογικής (FLC) υπολογίζονται με βάση τα κέρδη του (τελικού) γραμμικού ΡΙ ελεγκτή, ως εξής (σχέσεις 9-74, σημειώσεις κ. Θεοχάρη Ι.):

$$K_e = 1$$

$$K_1 = \frac{K_p}{F[a \cdot K_e]} = \frac{1.333}{0.0526} = 25.333$$

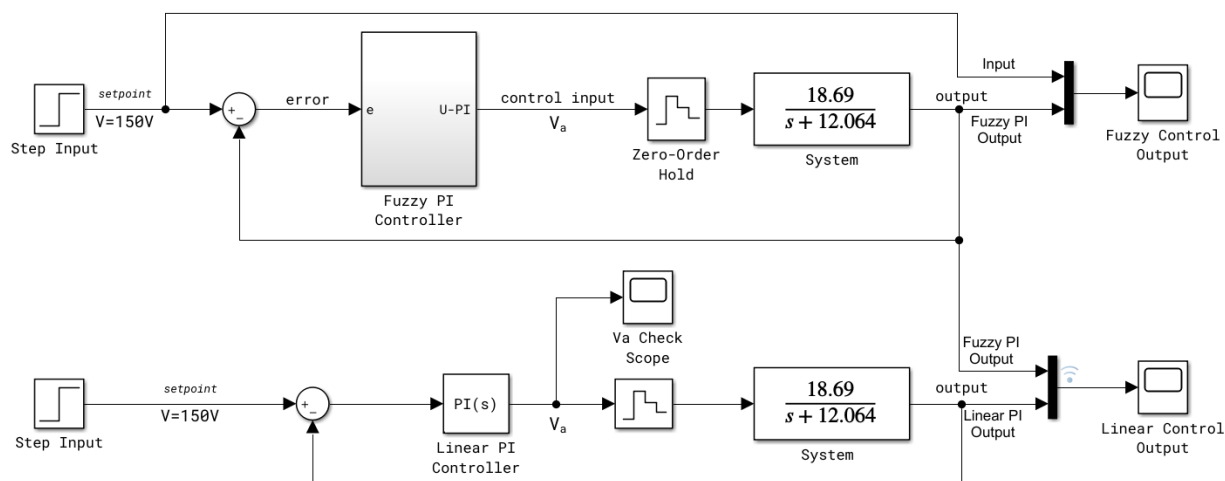
$$\text{όπου } a = T_i = \frac{K_p}{K_I} = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{19} = 0.0526$$

Έτσι, τα αρχικά κέρδη του ΡΙ FLC θα είναι:

$K_e$	1.0000
$K_d$	0.0526
$K$	25.3333

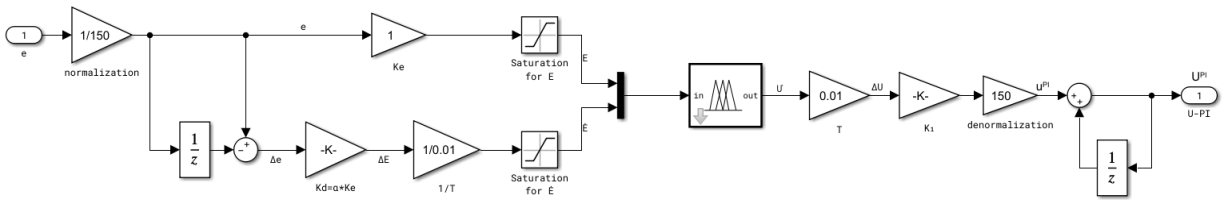
Πίνακας 4: Τα αρχικά κέρδη του ασαφούς ΡΙ ελεγκτή

Για τη προσομοίωση της λειτουργίας του ΡΙ FLC με τα παραπάνω αρχικά κέρδη δημιουργούμε το ακόλουθο μοντέλο Simulink (*initial.slx*):



Εικόνα 7: Μοντέλο Simulink για τον ΡΙ-FLC με τα αρχικά κέρδη

όπου το module «Fuzzy PI Controller» φαίνεται ακολούθως:



Εικόνα 8: Fuzzy PI Controller module του μοντέλου Simulink του PI FLC με τα αρχικά κέρδη στο οποίο το κέρδος «K» έχει ρυθμιστεί σύμφωνα με τα παραπάνω αρχικά κέρδη:

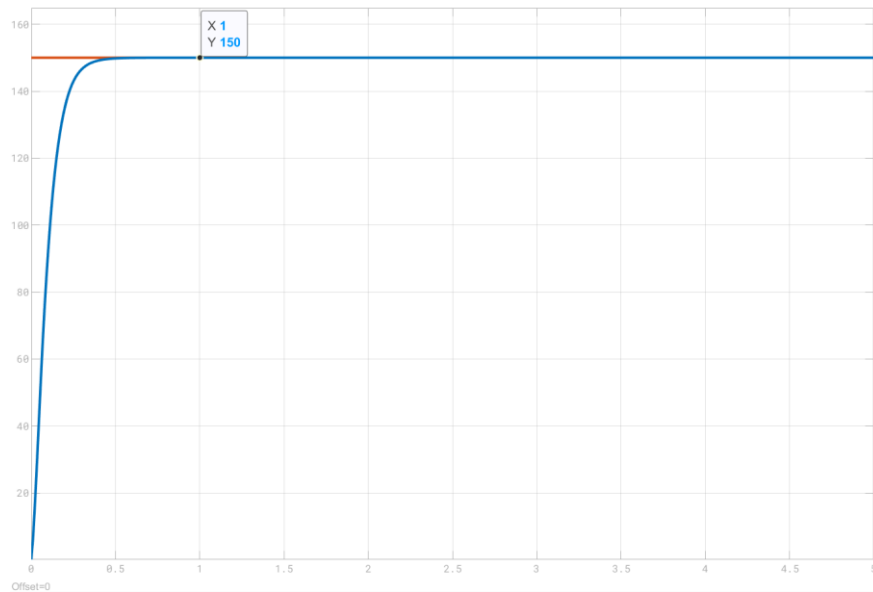
$$K_d = \alpha * K_e = 0.0526 * 1 = 0.0526$$

Ο PI FLC με τα αρχικά κέρδη αποδίδει ως εξής (βάσει της *stepinfo* στα αποτελέσματα της *sim* στο μοντέλο Simulink):

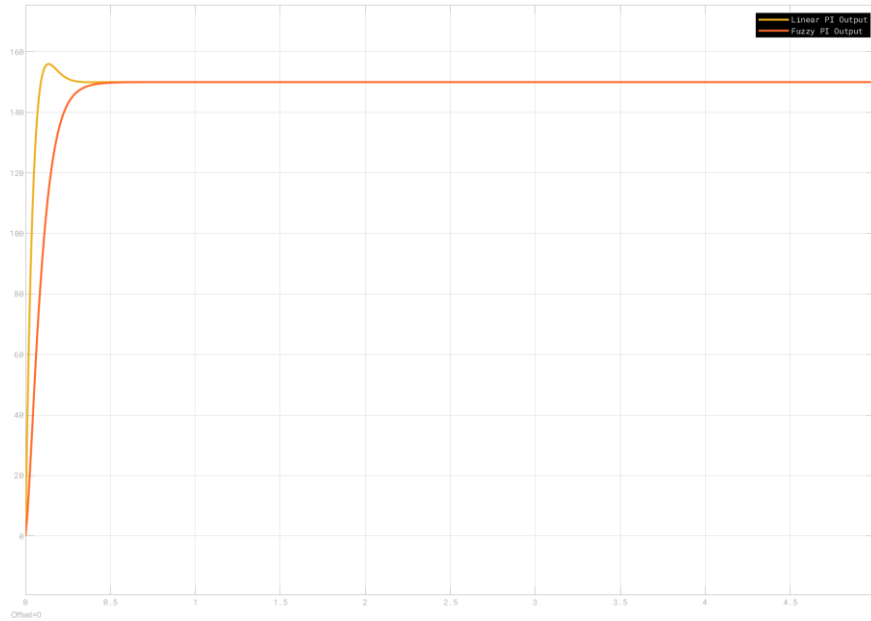
Χρόνος Ανόδου, $t_r$	178.7 msec
Χρόνος Αποκατάστασης, $t_s$	309.2 msec
Υπερύψωση, %	0.0 %
Peak	150
Χρόνος εμφάνισης Peak, $t_{peak}$	2650.0 msec

Πίνακας 5: Δείκτες απόδοσης PI ελεγκτή με τα αρχικά κέρδη

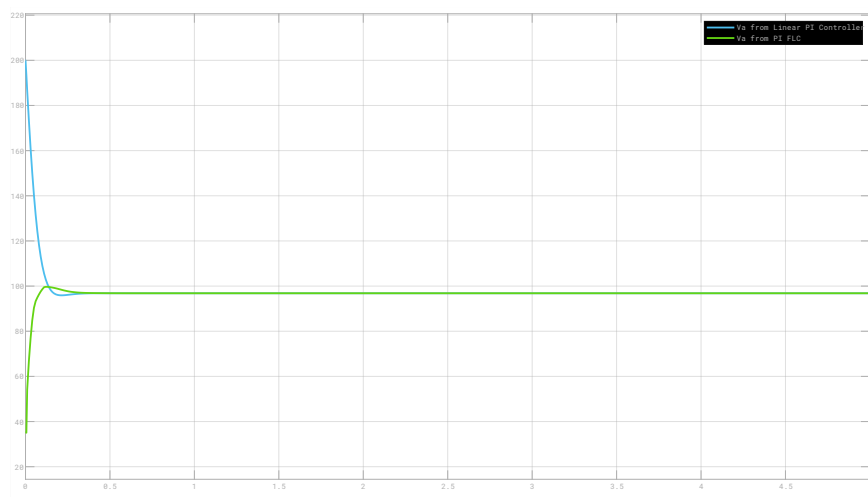
Η απόδοση του PI FLC με τα αρχικά κέρδη εκτός από την *stepinfo* φαίνεται και στη προσομοίωση με το Simulink παρακάτω:



Εικόνα 9: Βηματική απόκριση PI FLC με τα αρχικά κέρδη (step input 150V @ 0.0sec)



Εικόνα 10: Βηματική απόκριση PI FLC με τα αρχικά κέρδη vs. τον γραμμικό PI ελεγκτή (step input 150V @ 0.0sec)



Εικόνα 11: Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου,  $V_a$ , για τον PI FLC με τα αρχικά κέρδη vs. τον γραμμικό PI ελεγκτή (step input 150V @ 0.0sec)

Από τη σύγκριση των παραπάνω με τα αντίστοιχα διαγράμματα και πίνακες για τον γραμμικό PI ελεγκτή φαίνεται ότι ο PI FLC με τα αρχικά κέρδη  $K_e=1$  και  $K=25.333$  **είναι πιο «αργός»** (ως προς τον χρόνο ανόδου, αποκατάστασης αλλά και peak) σε σύγκριση με τον γραμμικό PI ελεγκτή. Έτσι, και σύμφωνα με το κεφ. 9 των σημειώσεων του κ. Θεοχάρη Ι., πρέπει να τροποποιήσουμε (tune) τα κέρδη των εισόδων  $E$  ( $K_e$ ) και  $\dot{E}$  ( $K_d$ ) καθώς και της εξόδου  $\dot{U}$  ( $K_1$  ή  $K$ ) του ασαφούς PI ελεγκτή.

### 3.2.2. Συγκριτική Μέθοδος και Τελικά Κέρδη Ασαφούς PI Ελεγκτή

Για τη βελτίωση της συμπεριφοράς του PI FLC, θα εφαρμόσουμε τη συγκριτική μέθοδο ρύθμισης των κερδών του ελεγκτή.

Επειδή θέλουμε να αυξήσουμε τη ταχύτητα απόκρισης του ελεγκτή ρυθμίζουμε τον λόγο  $K_e/K$  (αύξηση) αλλά και τον λόγο  $a$  (μείωση), ως εξής:

$$\left(\frac{K_e}{K}\right)' = 1.25 * \frac{K_e}{K} \Rightarrow \begin{cases} K_e' = 1.5 * K_e \\ K' = 1.2 * K \end{cases}$$

$$a' = a/2.5$$

$$K_d' = a' * K_e' = \frac{1.5}{2.5} * a * K_e = 0.6 * K_d$$

Τα τελικά κέρδη, επομένως, του PI FLC θα είναι:

$K_e$	<b>1.5000</b>
$K_d$	<b>0.0316</b>
$K$	<b>30.4000</b>

Πίνακας 6: Τα τελικά κέρδη του ασαφούς PI ελεγκτή

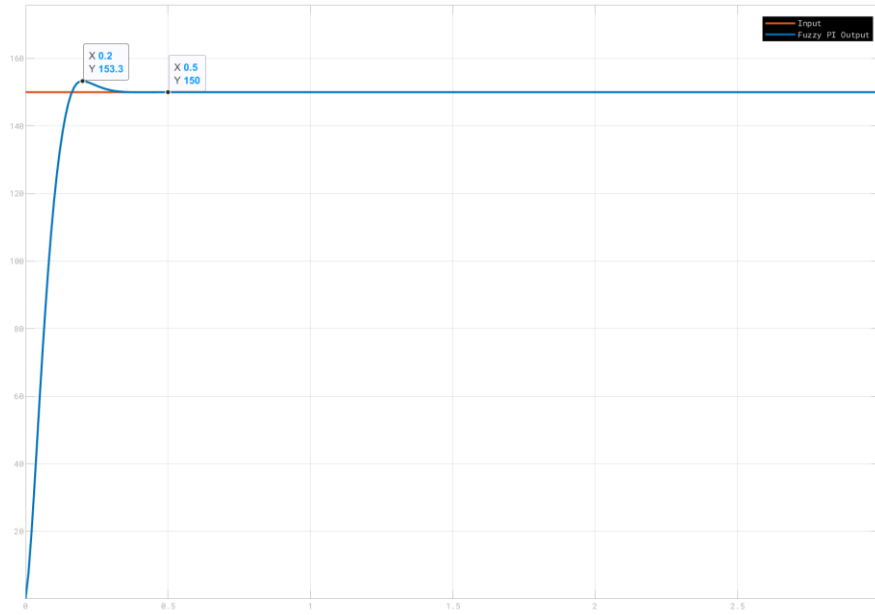
Για τη προσομοίωση της λειτουργίας του PI FLC με τα παραπάνω αρχικά κέρδη δημιουργούμε ένα νέο μοντέλο Simulink (*final.slx*) ίδιο με αυτό της εικόνας 7 αλλά με ενημερωμένα τα κέρδη (πλέον είναι αυτά του πίνακα 6) στο Fuzzy PI Controller module του μοντέλου.

Ο PI FLC με τα τελικά κέρδη αποδίδει ως εξής (βάσει της *stepinfo* στα αποτελέσματα της *sim* στο νέο μοντέλο Simulink):

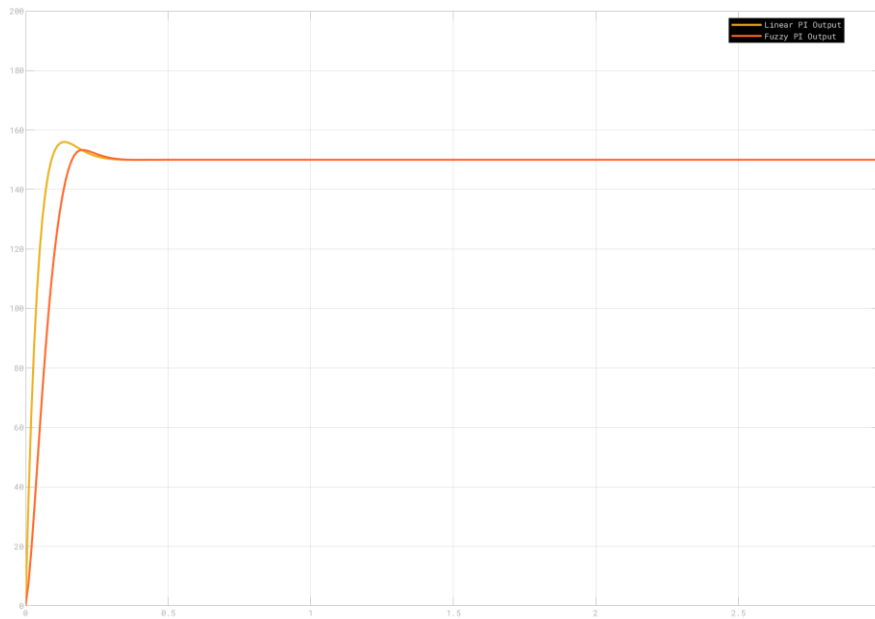
<b>Χρόνος Ανόδου, <math>t_r</math></b>	<b>107.5 msec</b>
<b>Χρόνος Αποκατάστασης, <math>t_s</math></b>	<b>216.8 msec</b>
<b>Υπερύψωση, %</b>	<b>2.19 %</b>
<b>Peak</b>	<b>153.2884</b>
<b>Χρόνος εμφάνισης Peak, <math>t_{peak}</math></b>	<b>200.0 msec</b>

Πίνακας 7: Δείκτες απόδοσης PI ελεγκτή με τα τελικά κέρδη

Η απόδοση του PI FLC με τα αρχικά κέρδη εκτός από την *stepinfo* φαίνεται και στη προσομοίωση με το Simulink παρακάτω:

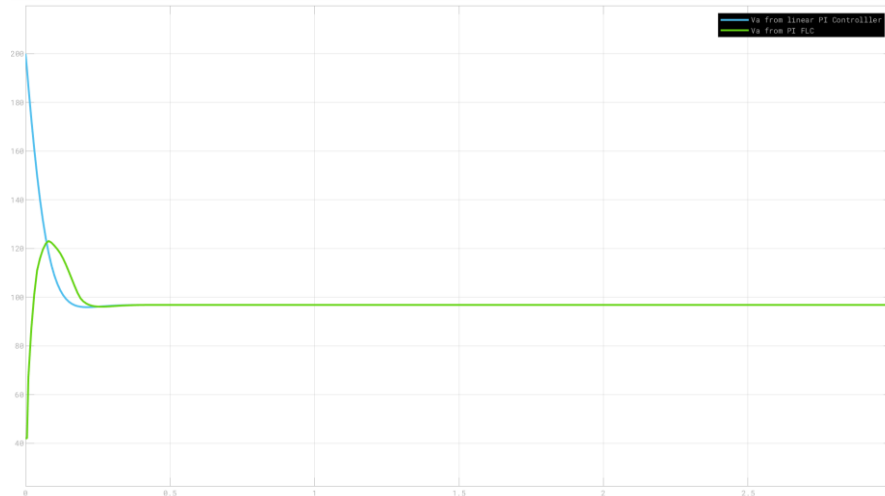


Εικόνα 12: Βηματική απόκριση PI FLC με τα τελικά κέρδη (step input 150V @ 0.0sec)



Εικόνα 13: Βηματική απόκριση PI FLC με τα αρχικά κέρδη vs. τον γραμμικό PI ελεγκτή (step input 150V @ 0.0sec)





Εικόνα 14: Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου,  $V_a$ , για τον PI FLC με τα τελικά κέρδη vs. τον γραμμικό PI ελεγκτή (step input 150V @ 0.0sec)

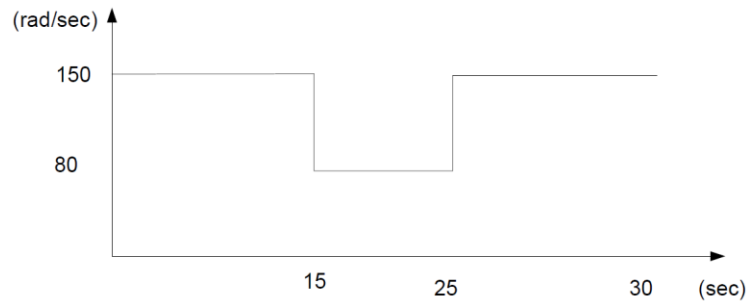
Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι τα τελικά κέρδη του PI FLC που προέκυψαν με βάση τη συγκριτική μέθοδο έκαναν τον FLC σαφώς ταχύτερο από τον αντίστοιχα με τα αρχικά κέρδη αλλά πλέον **ταχύτερο και από τον γραμμικό PI** ελεγκτή. Είναι προφανές ότι από τον πίνακα 7 ότι **τηρούνται όλες οι προδιαγραφές σχεδίασης** ενώ από την εικόνα 12 φαίνεται ότι ο FLC οδηγεί σε πολύ «καλύτερο» και «ασφαλέστερο» σήμα ελέγχου, το οποίο είναι και το σήμα που δέχεται στην είσοδό του ο κινητήρας.

Ακολουθούν τα ζητούμενα σενάρια κίνησης όπου γίνονται περαιτέρω συγκρίσεις μεταξύ του γραμμικού PI και των Fuzzy PI ελεγκτών (με τα αρχικά και τα τελικά κέρδη).

## 4. Σενάρια Ελέγχου – Προφίλ Κίνησης

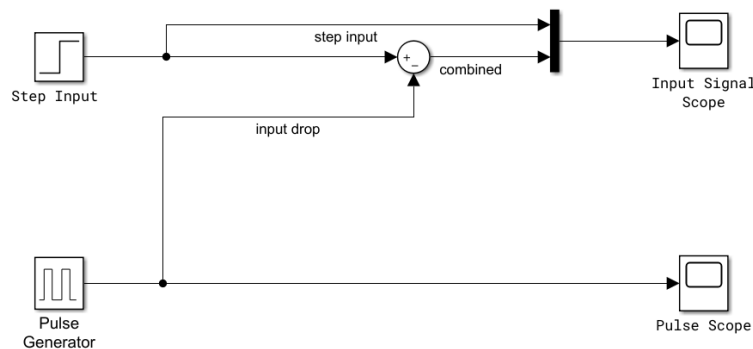
### 4.1. Σενάριο 1: Παρακολούθηση Σήματος Αναφοράς ( $T_L = 0$ )

Στο πρώτο σενάριο που υλοποιήθηκε (μοντέλα Simulink στα αρχεία *\*/scenario 1/\*\_scenario\_1.slx* όπου \*: linear|initial|final) η έξοδος πρέπει να ακολουθεί κατά το δυνατόν πιστά το ακόλουθο σήμα αναφοράς:



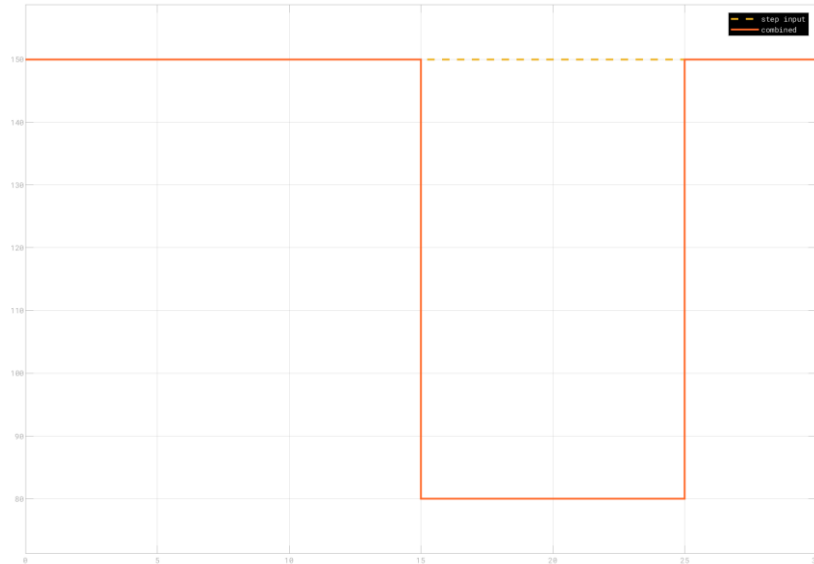
Εικόνα 15: Σήμα αναφοράς 1<sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης του ελεγκτή

Για τη δημιουργία της παραπάνω εισόδου στο Simulink χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα blocks:



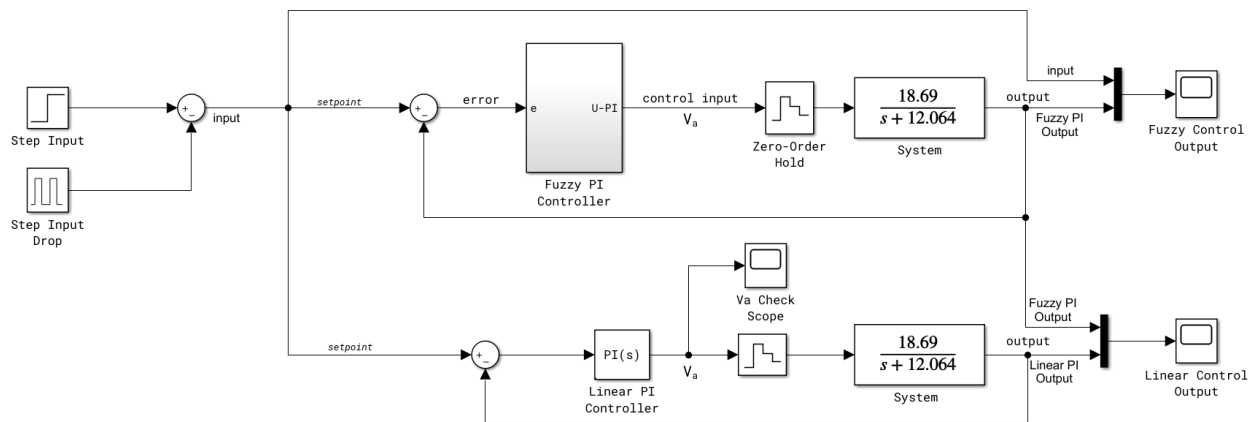
Εικόνα 16: Κύκλωμα Simulink για σχηματισμό του σήματος αναφοράς του 1<sup>ου</sup> σεναρίου

ενώ η έξοδος του «Input Signal Scope» είναι:



Εικόνα 17: Σήμα Αναφοράς (από Simulink) 1<sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης

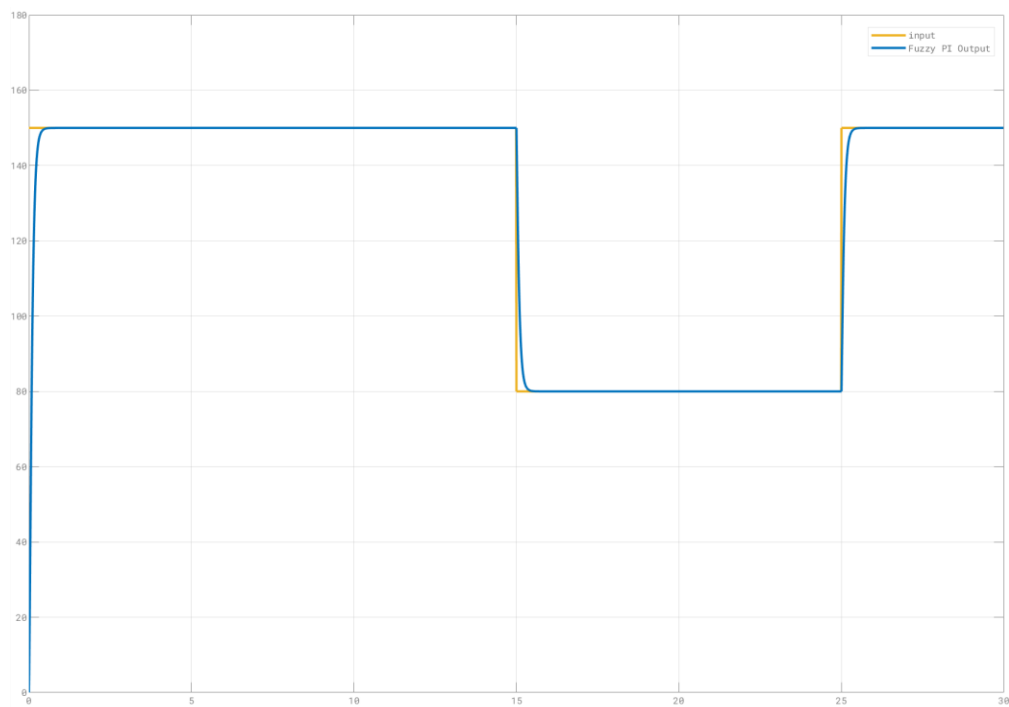
Το κύκλωμα Simulink για τη προσομοίωση του 1<sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης, φαίνεται ακολούθως:



Εικόνα 18: Κύκλωμα Simulink για την προσομοίωση του 1<sup>ου</sup> σεναρίου

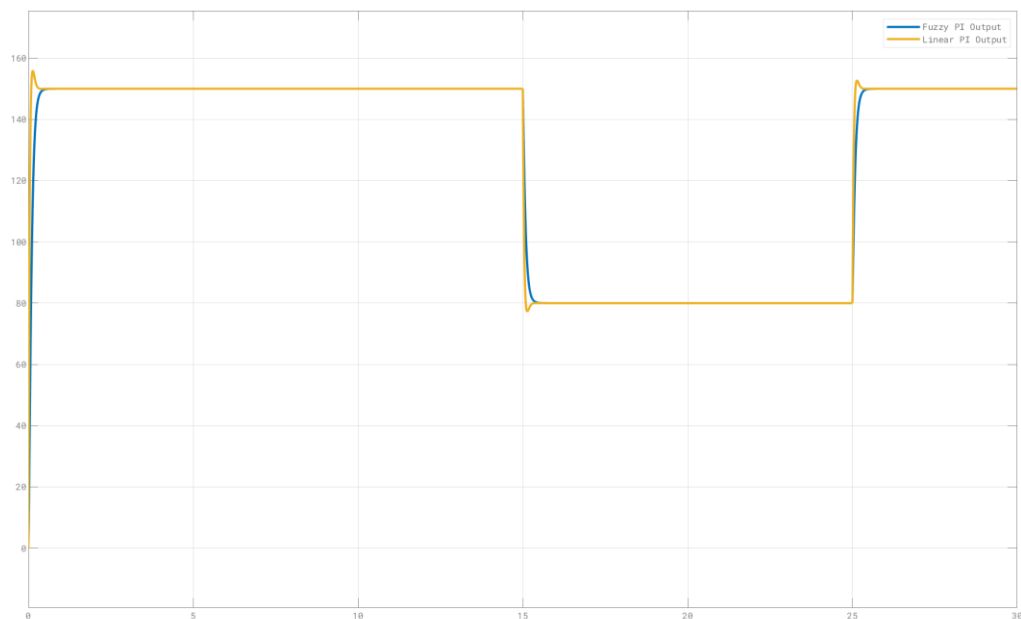
#### 4.1.1. Ασαφής Ελεγκτής με Αρχικά Κέρδη

Για τον ασαφή ελεγκτή (FLC) με τα αρχικά κέρδη, η έξοδος του συστήματος ως προς την είσοδο αναφοράς φαίνεται ακολούθως:



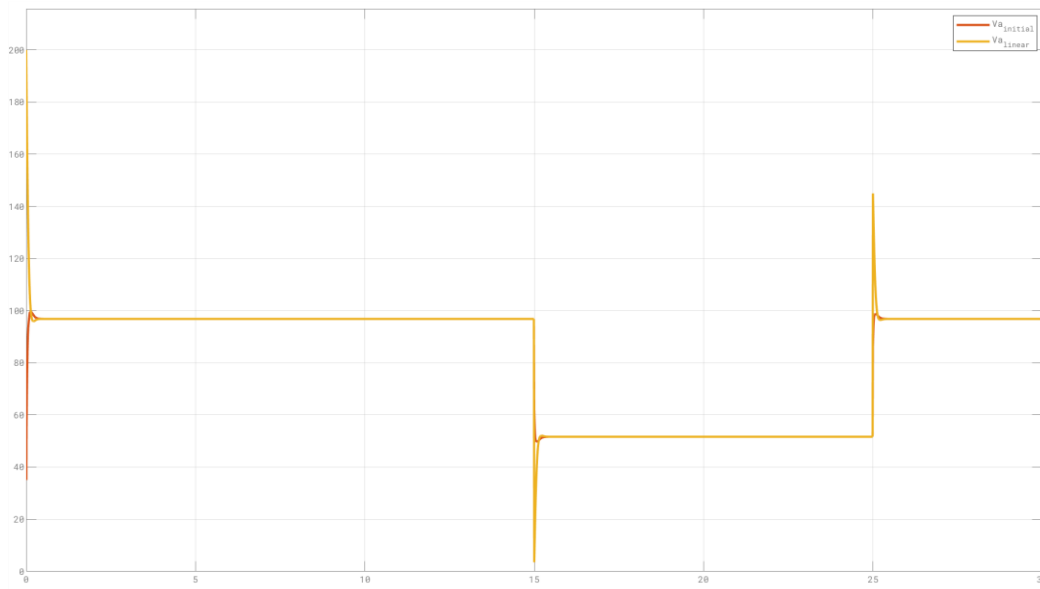
Εικόνα 19: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με αρχικά κέρδη ως προς Σήμα Αναφοράς

ενώ η έξοδος του συστήματος για τον FLC με τα αρχικά κέρδη σε σύγκριση με τον γραμμικό PI ελεγκτή φαίνεται ακολούθως:



Εικόνα 20: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με αρχικά κέρδη vs Έξοδος του συστήματος με το Γραμμικού PI ελεγκτή

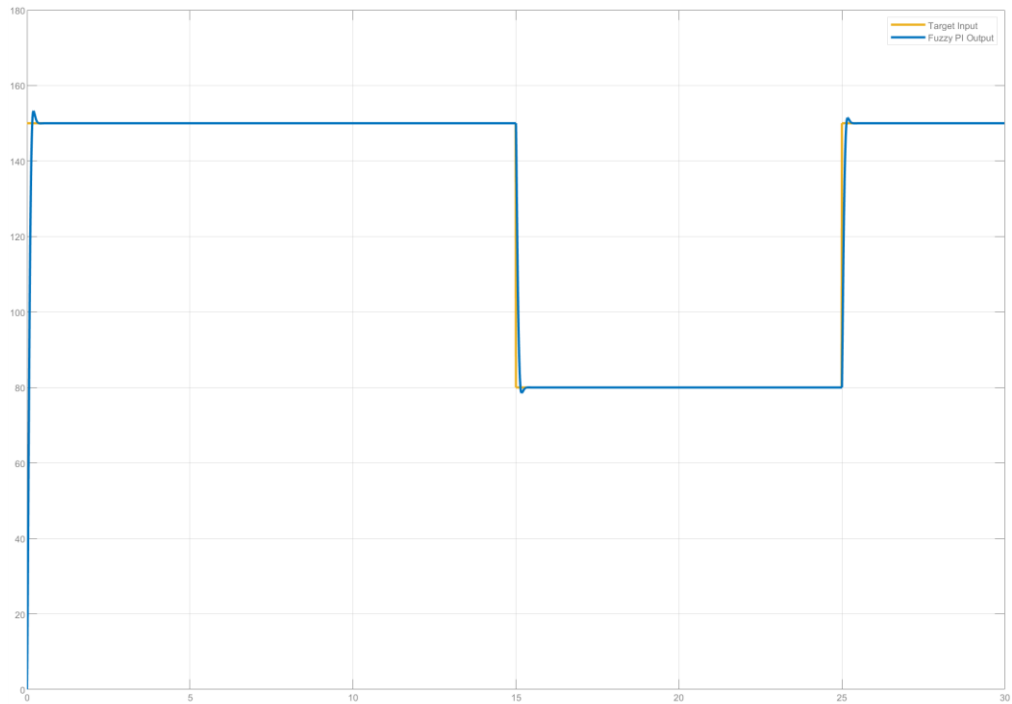
Επίσης, παραθέτουμε την το διάγραμμα της τάσης οδήγησης του κινητήρα,  $V_a$ , για τον FLC με τα αρχικά κέρδη σε σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα για τον γραμμικό ελεγκτή:



Εικόνα 21: Διάγραμμα  $V_a$  του FLC με αρχικά κέρδη vs  $V_a$  του Γραμμικού PI

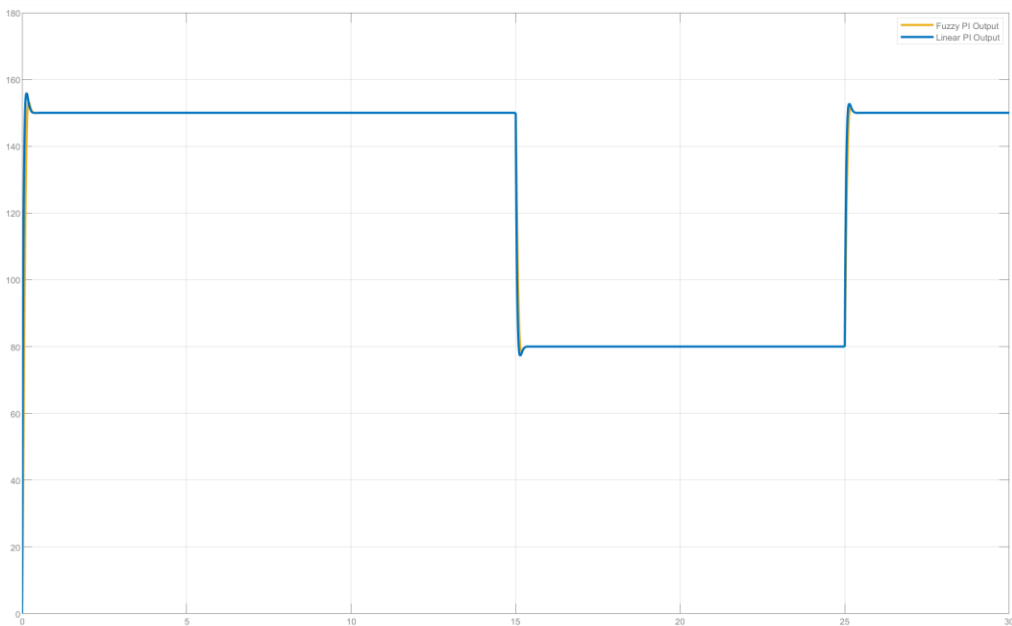
#### 4.1.2. Ασαφής Ελεγκτής μετά τη Ρύθμιση των Κερδών

Για τον ασαφή ελεγκτή (FLC) με τα τελικά (ρυθμισμένα) κέρδη, η έξοδος του συστήματος ως προς την είσοδο αναφοράς φαίνεται ακολούθως:



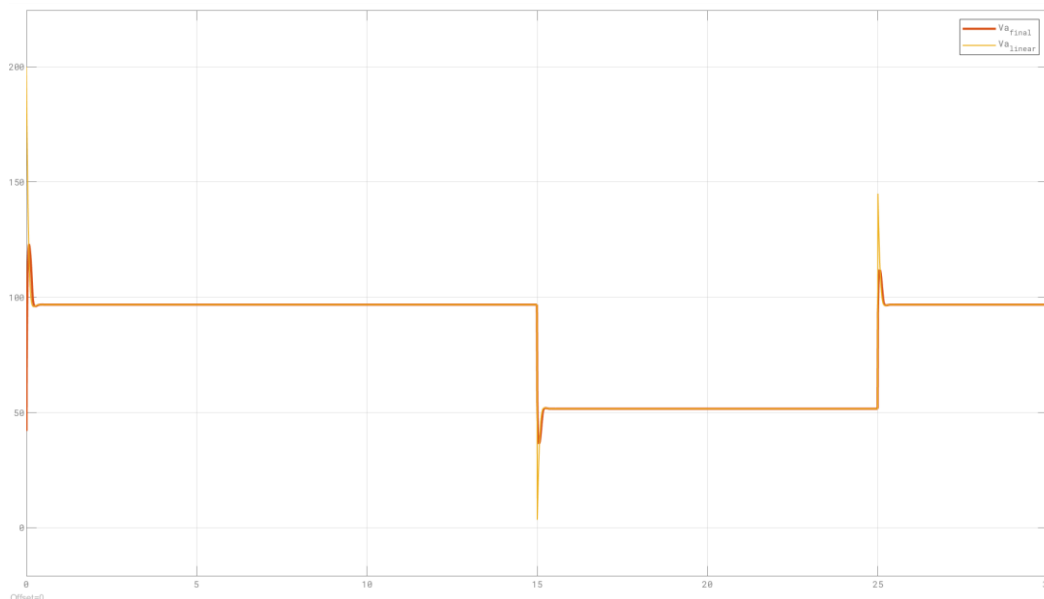
Εικόνα 22: Έξοδος FLC με τελικά κέρδη ως προς Σήμα Αναφοράς

ενώ η έξοδος του συστήματος για τον FLC με τα τελικά κέρδη σε σύγκριση με τον γραμμικό PI ελεγκτή φαίνεται ακολούθως:



Εικόνα 23: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με τα τελικά κέρδη vs Έξοδος του συστήματος με το Γραμμικού PI ελεγκτή

Τέλος, παραθέτουμε την το διάγραμμα της τάσης οδήγησης του κινητήρα,  $V_a$ , για τον FLC με τα τελικά κέρδη σε σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα για τον γραμμικό ελεγκτή:



Εικόνα 24: Διάγραμμα  $V_a$  του FLC με τελικά κέρδη vs  $V_a$  του Γραμμικού PI ελεγκτή

#### 4.1.3. Διέγερση Κανόνων για $(E, \dot{E}) = (PM, NS)$

Στο σημείο αυτό θεωρούμε σαν είσοδο της ασαφούς βάσης κανόνων μια διέγερση όπου  $E=PM$  και  $\dot{E}=NS$ . Η βάση κανόνων αποτελείται από τους παρακάτω 63 κανόνες:

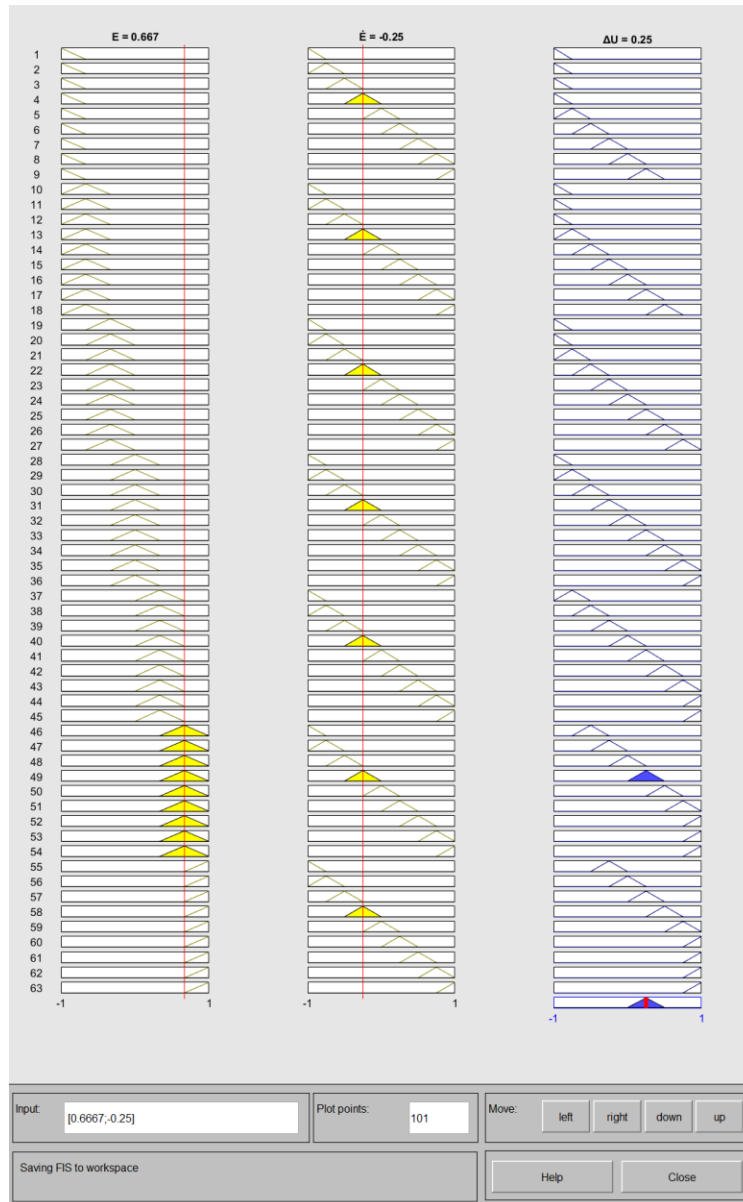
1. If (E is NL) and ( $\dot{E}$  is NV) then ( $\Delta U$  is NV)
2. If (E is NL) and ( $\dot{E}$  is NL) then ( $\Delta U$  is NV)
3. If (E is NL) and ( $\dot{E}$  is NM) then ( $\Delta U$  is NV)
4. If (E is NL) and ( $\dot{E}$  is NS) then ( $\Delta U$  is NV)
5. If (E is NL) and ( $\dot{E}$  is ZR) then ( $\Delta U$  is NL)
6. If (E is NL) and ( $\dot{E}$  is PS) then ( $\Delta U$  is NM)
7. If (E is NL) and ( $\dot{E}$  is PM) then ( $\Delta U$  is NS)
8. If (E is NL) and ( $\dot{E}$  is PL) then ( $\Delta U$  is ZR)
9. If (E is NL) and ( $\dot{E}$  is PV) then ( $\Delta U$  is PS)
10. If (E is NM) and ( $\dot{E}$  is NV) then ( $\Delta U$  is NV)
11. If (E is NM) and ( $\dot{E}$  is NL) then ( $\Delta U$  is NV)
12. If (E is NM) and ( $\dot{E}$  is NM) then ( $\Delta U$  is NV)
13. If (E is NM) and ( $\dot{E}$  is NS) then ( $\Delta U$  is NL)
14. If (E is NM) and ( $\dot{E}$  is ZR) then ( $\Delta U$  is NM)
15. If (E is NM) and ( $\dot{E}$  is PS) then ( $\Delta U$  is NS)
16. If (E is NM) and ( $\dot{E}$  is PM) then ( $\Delta U$  is ZR)
17. If (E is NM) and ( $\dot{E}$  is PL) then ( $\Delta U$  is PS)
18. If (E is NM) and ( $\dot{E}$  is PV) then ( $\Delta U$  is PM)
19. If (E is NS) and ( $\dot{E}$  is NV) then ( $\Delta U$  is NV)
20. If (E is NS) and ( $\dot{E}$  is NL) then ( $\Delta U$  is NV)
21. If (E is NS) and ( $\dot{E}$  is NM) then ( $\Delta U$  is NL)
22. If (E is NS) and ( $\dot{E}$  is NS) then ( $\Delta U$  is NM)
23. If (E is NS) and ( $\dot{E}$  is ZR) then ( $\Delta U$  is NS)

24. If (E is NS) and ( $\dot{E}$  is PS) then ( $\Delta U$  is ZR)
25. If (E is NS) and ( $\dot{E}$  is PM) then ( $\Delta U$  is PS)
26. If (E is NS) and ( $\dot{E}$  is PL) then ( $\Delta U$  is PM)
27. If (E is NS) and ( $\dot{E}$  is PV) then ( $\Delta U$  is PL)
28. If (E is ZR) and ( $\dot{E}$  is NV) then ( $\Delta U$  is NV)
29. If (E is ZR) and ( $\dot{E}$  is NL) then ( $\Delta U$  is NL)
30. If (E is ZR) and ( $\dot{E}$  is NM) then ( $\Delta U$  is NM)
31. If (E is ZR) and ( $\dot{E}$  is NS) then ( $\Delta U$  is NS)
32. If (E is ZR) and ( $\dot{E}$  is ZR) then ( $\Delta U$  is ZR)
33. If (E is ZR) and ( $\dot{E}$  is PS) then ( $\Delta U$  is PS)
34. If (E is ZR) and ( $\dot{E}$  is PM) then ( $\Delta U$  is PM)
35. If (E is ZR) and ( $\dot{E}$  is PL) then ( $\Delta U$  is PL)
36. If (E is ZR) and ( $\dot{E}$  is PV) then ( $\Delta U$  is PV)
37. If (E is PS) and ( $\dot{E}$  is NV) then ( $\Delta U$  is NL)
38. If (E is PS) and ( $\dot{E}$  is NL) then ( $\Delta U$  is NM)
39. If (E is PS) and ( $\dot{E}$  is NM) then ( $\Delta U$  is NS)
40. If (E is PS) and ( $\dot{E}$  is NS) then ( $\Delta U$  is ZR)
41. If (E is PS) and ( $\dot{E}$  is ZR) then ( $\Delta U$  is PS)
42. If (E is PS) and ( $\dot{E}$  is PS) then ( $\Delta U$  is PM)
43. If (E is PS) and ( $\dot{E}$  is PM) then ( $\Delta U$  is PL)
44. If (E is PS) and ( $\dot{E}$  is PL) then ( $\Delta U$  is PV)
45. If (E is PS) and ( $\dot{E}$  is PV) then ( $\Delta U$  is PV)
46. If (E is PM) and ( $\dot{E}$  is NV) then ( $\Delta U$  is NM)
47. If (E is PM) and ( $\dot{E}$  is NL) then ( $\Delta U$  is NS)
48. If (E is PM) and ( $\dot{E}$  is NM) then ( $\Delta U$  is ZR)
49. If (E is PM) and ( $\dot{E}$  is NS) then ( $\Delta U$  is PS)
50. If (E is PM) and ( $\dot{E}$  is ZR) then ( $\Delta U$  is PM)
51. If (E is PM) and ( $\dot{E}$  is PS) then ( $\Delta U$  is PL)
52. If (E is PM) and ( $\dot{E}$  is PM) then ( $\Delta U$  is PV)
53. If (E is PM) and ( $\dot{E}$  is PL) then ( $\Delta U$  is PV)
54. If (E is PM) and ( $\dot{E}$  is PV) then ( $\Delta U$  is PV)
55. If (E is PL) and ( $\dot{E}$  is NV) then ( $\Delta U$  is NS)
56. If (E is PL) and ( $\dot{E}$  is NL) then ( $\Delta U$  is ZR)
57. If (E is PL) and ( $\dot{E}$  is NM) then ( $\Delta U$  is PS)
58. If (E is PL) and ( $\dot{E}$  is NS) then ( $\Delta U$  is PM)
59. If (E is PL) and ( $\dot{E}$  is ZR) then ( $\Delta U$  is PL)
60. If (E is PL) and ( $\dot{E}$  is PS) then ( $\Delta U$  is PV)
61. If (E is PL) and ( $\dot{E}$  is PM) then ( $\Delta U$  is PV)
62. If (E is PL) and ( $\dot{E}$  is PL) then ( $\Delta U$  is PV)
63. If (E is PL) and ( $\dot{E}$  is PV) then ( $\Delta U$  is PV)

Λαμβάνοντας υπόψη ότι έχουμε singleton ασαφοποιητή, παραπάνω έχουν υποσημειωθεί με κίτρινο χρώμα οι κανόνες που τουλάχιστο μια από τις δύο εισόδους τους διεγείρεται εντελώς ( $DoF_E=1$  ή  $DoF_{\dot{E}}=1$ ). Με πράσινο χρώμα έχει υποσημειωθεί ο κανόνας 49 του οποίου ο βαθμός ικανοποίησης αμφότερων των εισόδων του είναι 1 και έτσι το συνολικό  $DoF$  του κανόνα θα είναι  $\min(1,1) = 1$ .

Με βάσει τα παραπάνω για είσοδο  $E = 0.6667$  και  $\dot{E} = -0.25$  η έξοδος των κανόνων της βάσης φαίνεται γραφικά παρακάτω:





Εικόνα 25: Προβολή διέγερσης και συμπερασμάτων κανόνων καθώς και τελικού συμπεράσματος της ασαφούς βάσης για είσοδο  $(E, \dot{E}) = (0.667, -0.25)$

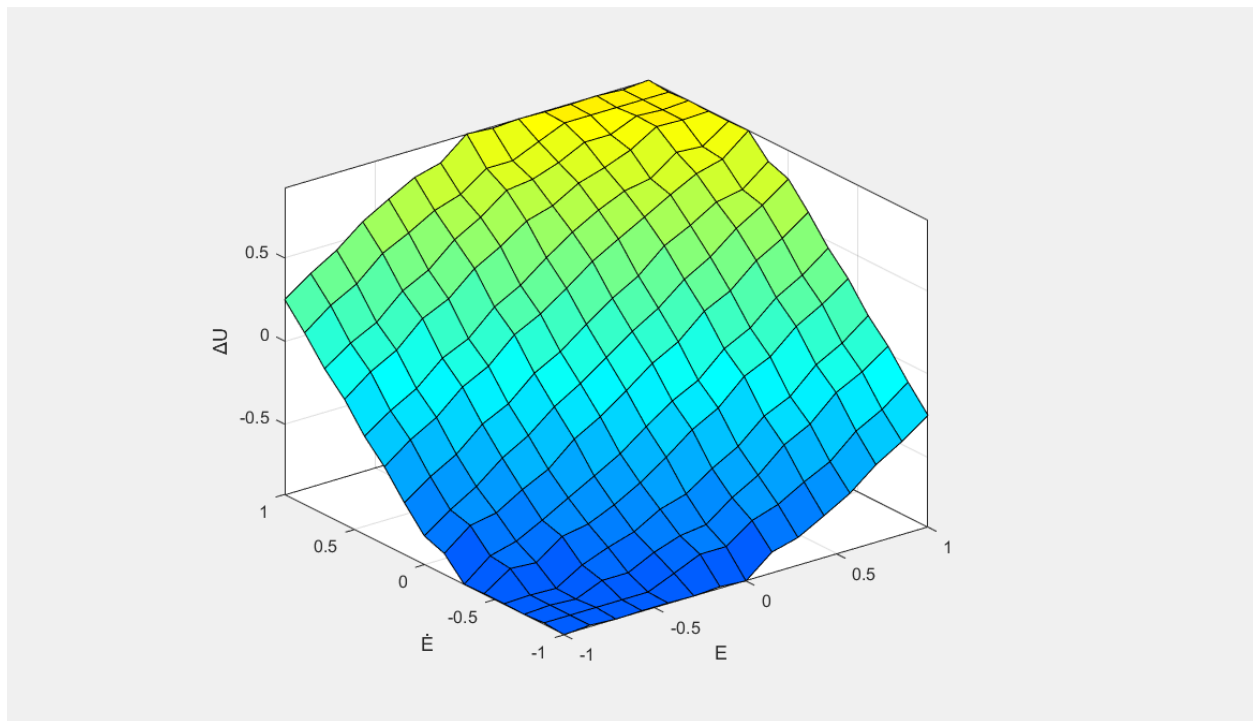
Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα από το MatLab διεγείρεται μόνο ο κανόνας 49. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς παρόλο που το ALS0 υλοποιείται με το max για εισόδους στο core («κορυφή» των τριγωνικών MFs) των ασαφών τιμών της κάθε εισόδου θα ενεργοποιούνται μόνο εκείνοι οι κανόνες και κανένας άλλος, αφού τον τελεστή AND μεταξύ των κανόνων τον υλοποιούμε με το min.

Έτσι, για τις εισόδους 0.6667 και -0.25 που ασαφοποιούνται σαν singleton MFs θα δώσουν DoF=1 για τους κανόνες που έχουν στο τμήμα υπόθεσης  $E = PM$  και  $\dot{E} = NS$  αντίστοιχα, και άρα μόνο ο κανόνας 49 ενεργοποιείται με DoF=1 ενώ για όλους τους υπόλοιπους θα είναι DoF=0.

Μία πιο λεκτική εξήγηση του παραπάνω είναι ότι η είσοδος  $E = PM$  σημαίνει η έξοδος υστερεί αρκετά του σήματος αναφοράς ενώ η είσοδος  $\dot{E} = NS$  σημαίνει ότι το σφάλμα τείνει να μειωθεί με μικρό ρυθμό. Είναι επομένως λογικό, να αυξήσουμε λίγο τη τάση εισόδου ώστε να επιταχύνουμε το ρυθμό με τον οποίο η έξοδος προσεγγίζει την είσοδο αναφοράς, και άρα  $\dot{U} = PS$ .

#### 4.1.4. Επιφάνεια Εξόδου Ασαφούς Ελεγκτή

Παρακάτω φαίνεται η τρισδιάστατη επιφάνεια της εξόδου ( $\dot{U}$ ) του ασαφούς ελεγκτή ως προς τις εισόδους του,  $E$  και  $\dot{E}$ :



Εικόνα 26: Τρισδιάστατη επιφάνεια της εξόδου ( $\dot{U}$ ) του ασαφούς ελεγκτή

Η επιφάνεια αυτή αποτελεί μία τρισδιάστατη απεικόνιση της βάσης κανόνων που αναπτύχθηκε. Η ανάπτυξη των κανόνων βασίζεται στη λογική ότι  $\dot{U} = E + \dot{E}$ .

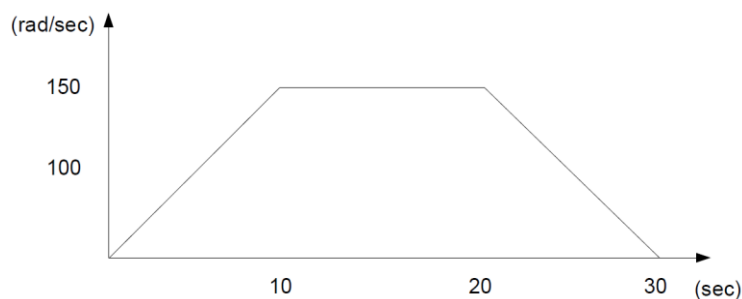
Επειδή οι δύο εισοδοί των κανόνων της βάσης περιγράφονται από διαφορετικό αριθμό λεκτικών τιμών, η επιφάνεια εξόδου είναι λογικό να μην εμφανίζει πλήρη συμμετρία.

Παρατηρούμε ότι όταν το  $E$  πλησιάζει τις ακραίες τιμές του, δηλαδή το σήμα εξόδου απέχει σημαντικά από το σήμα αναφοράς, η έξοδος του ελεγκτή και άρα και το σήμα οδήγησης του κινητήρα μεταβάλλεται σημαντικά (σύμφωνα με τη φορά του σφάλματος) ώστε να προσεγγίσει την επιθυμητή απόκριση. Αντίστοιχα, όταν το  $\dot{E}$  πλησιάζει ακραίες τιμές, δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής του σήματος εξόδου είναι σημαντικός και αποκλίνει από το σήμα αναφοράς, τότε, το σήμα ελέγχου και άρα και το σήμα οδήγησης του κινητήρα παίρνει και πάλι μεγάλες τιμές ώστε να εξομαλύνει τον

ρυθμό μεταβολής της εξόδου για να αποφευχθούν φαινόμενα υπερύψωσης ή υπούψωσης (undershoot). Επίσης, φαίνεται ότι όταν το σφάλμα είναι μικρό και η μεταβολή του είναι επίσης μικρή, τότε αντίστοιχα μικρή θα είναι και η μεταβολή του σήματος ελέγχου του κινητήρα, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις το σήμα ελέγχου είναι κοντά ή πάνω στο σήμα αναφοράς.

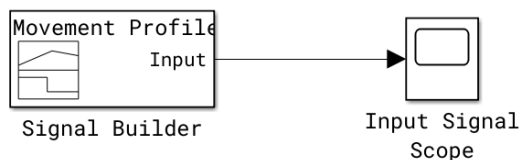
#### 4.2. Σενάριο 2: Τραπεζοειδές Προφίλ Κίνησης ( $T_L = 0$ )

Στο δεύτερο σενάριο που υλοποιήθηκε (μοντέλα Simulink στα αρχεία `*/scenario 2/*_scenario_2.slx` όπου `*`: linear|initial|final) η έξοδος πρέπει να ακολουθεί κατά το δυνατόν πιστά το ακόλουθο προφίλ κίνησης (σήμα αναφοράς):



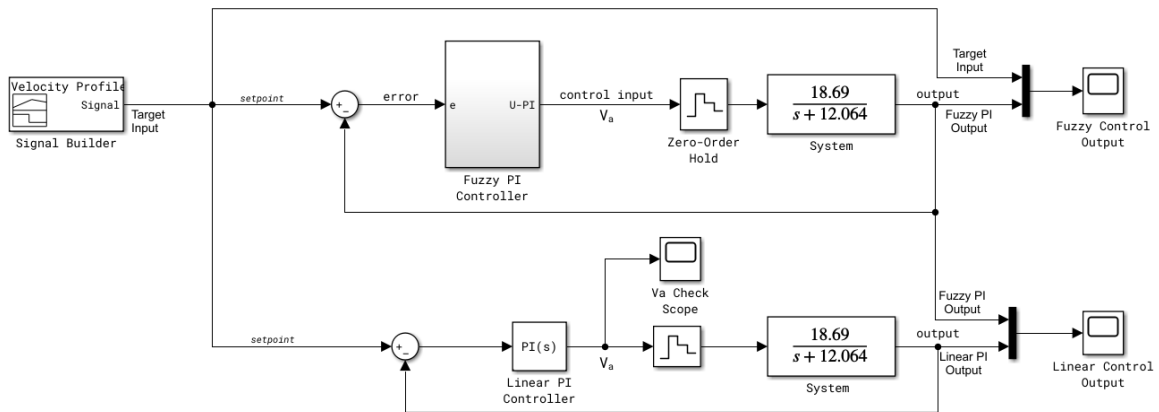
Εικόνα 27: Σήμα αναφοράς (προφίλ κίνησης) 2ου σεναρίου χρήσης του ελεγκτή

Για τη δημιουργία της παραπάνω εισόδου στο Simulink χρησιμοποιήθηκαν το ακόλουθο block:



Εικόνα 28: Κύκλωμα Simulink για σχηματισμό του σήματος αναφοράς του 2<sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης

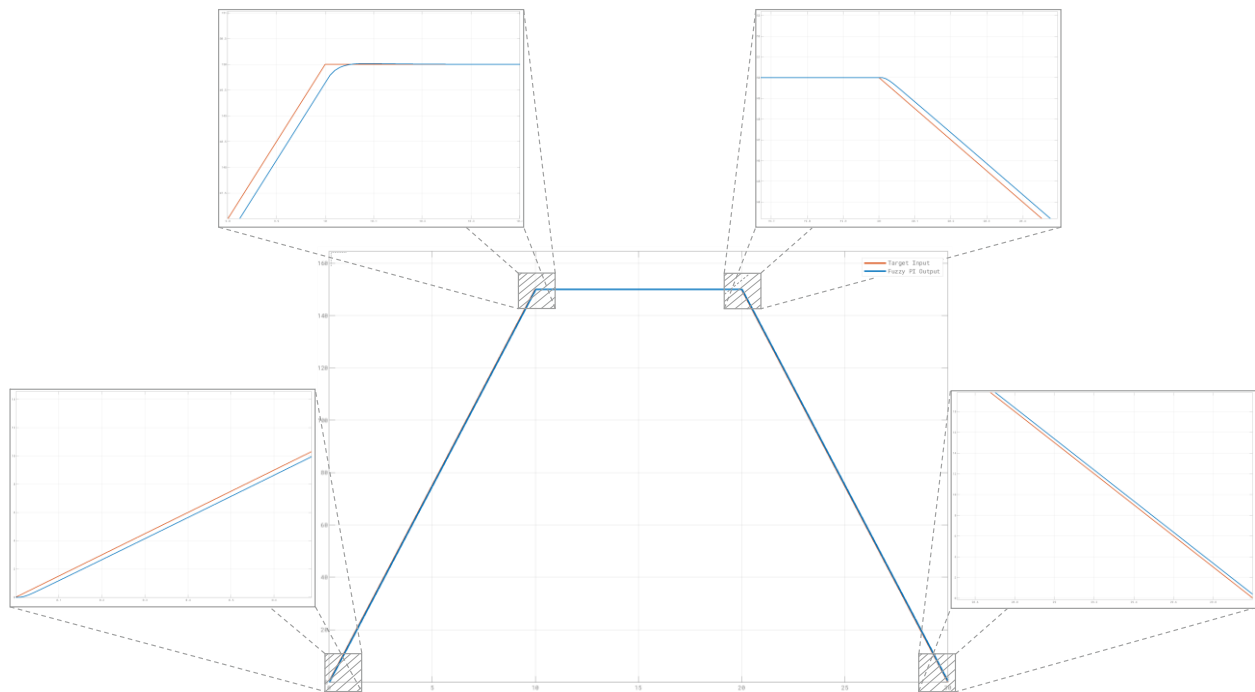
Το κύκλωμα Simulink για τη προσομοίωση του 2<sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης, φαίνεται ακολούθως:



Εικόνα 29: Κύκλωμα Simulink για την προσομοίωση του 2ου σεναρίου χρήσης

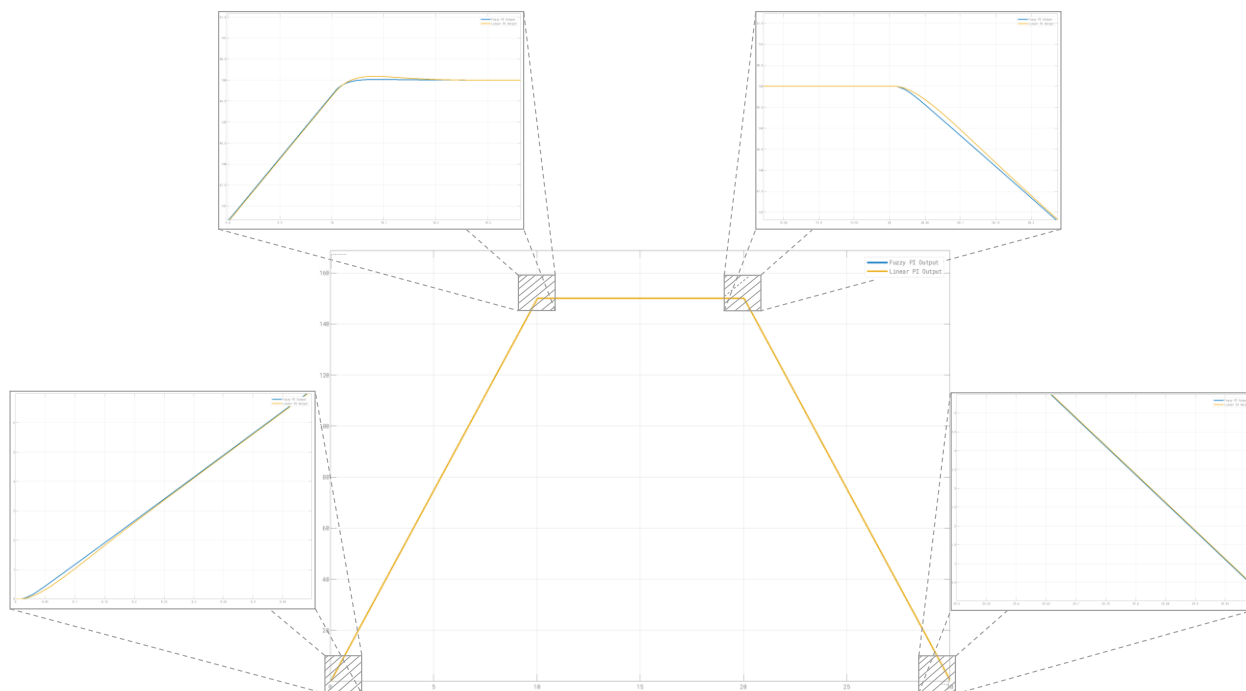
#### 4.2.1. Ασαφής Ελεγκτής με Αρχικά Κέρδη

Για τον ασαφή ελεγκτή (FLC) με τα αρχικά κέρδη, η έξοδος του συστήματος ως προς την είσοδο αναφοράς φαίνεται ακολούθως:



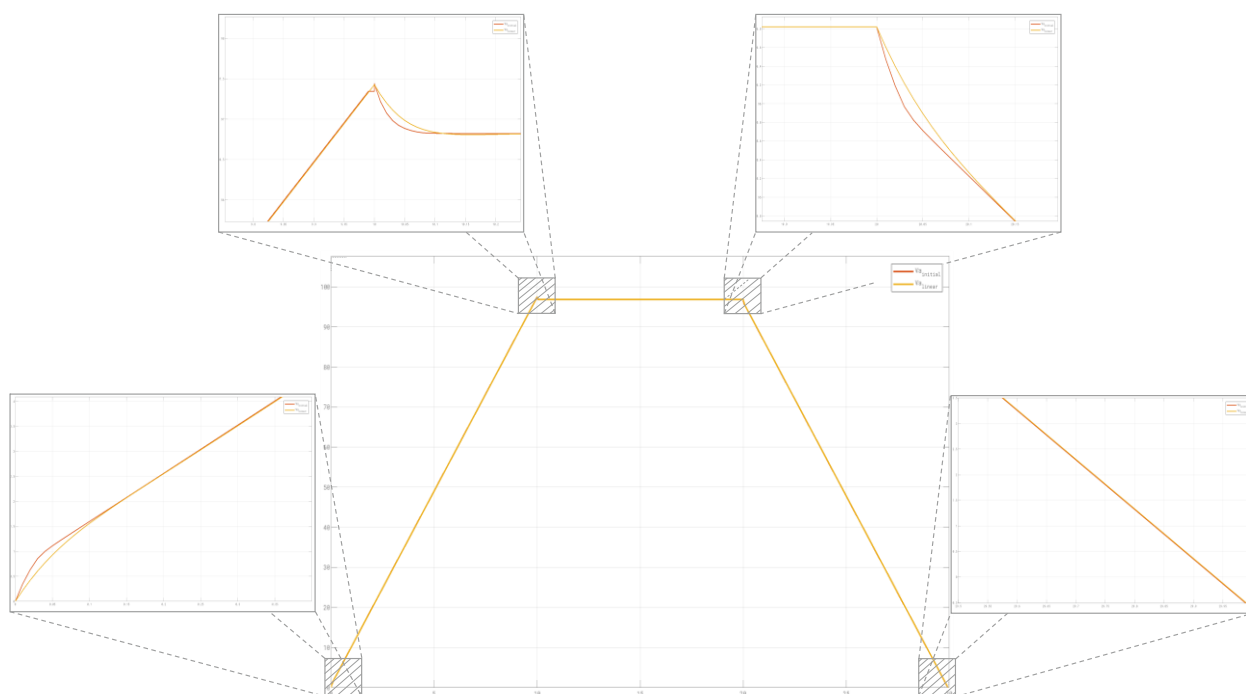
Εικόνα 30: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με αρχικά κέρδη ως προς Σήμα Αναφοράς

ενώ η έξοδος του συστήματος για τον FLC με τα αρχικά κέρδη σε σύγκριση με τον γραμμικό PI ελεγκτή φαίνεται ακολούθως:



Εικόνα 31: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με αρχικά κέρδη vs Έξοδος του συστήματος με το Γραμμικού PI ελεγκτή

Επίσης, παραθέτουμε την το διάγραμμα της τάσης οδήγησης του κινητήρα,  $V_a$ , για τον FLC με τα αρχικά κέρδη σε σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα για τον γραμμικό ελεγκτή:



Εικόνα 32: Διάγραμμα  $V_a$  του FLC με αρχικά κέρδη vs  $V_a$  του Γραμμικού PI ελεγκτή

#### 4.2.2. Ασαφής Ελεγκτής μετά τη Ρύθμιση των Κερδών

Χρησιμοποιώντας τα ρυθμισμένα (τελικά) κέρδη που υπολογίστηκαν προηγούμενα ο ελεγκτής αν και πληροί τις προδιαγραφές σχεδίασης εμφανίζει μία σχετικά μεγάλη υπερύψωση, δεδομένου ότι στο συγκεκριμένο προφίλ κίνησης απαιτούμε σχεδόν μηδενική. Για το λόγο αυτό, θα ρυθμίσουμε εκ νέου τα κέρδη του ασαφούς ελεγκτή ώστε να πληρείται η νέα αυτή απαίτηση.

Μετά από δοκιμές καταλήγουμε στα εξής κέρδη για τον ασαφή PI ελεγκτή:

<b><math>K_e</math></b>	<b>1.5000</b>
<b><math>K_d</math></b>	<b>0.0451</b>
<b><math>K</math></b>	<b>30.4000</b>

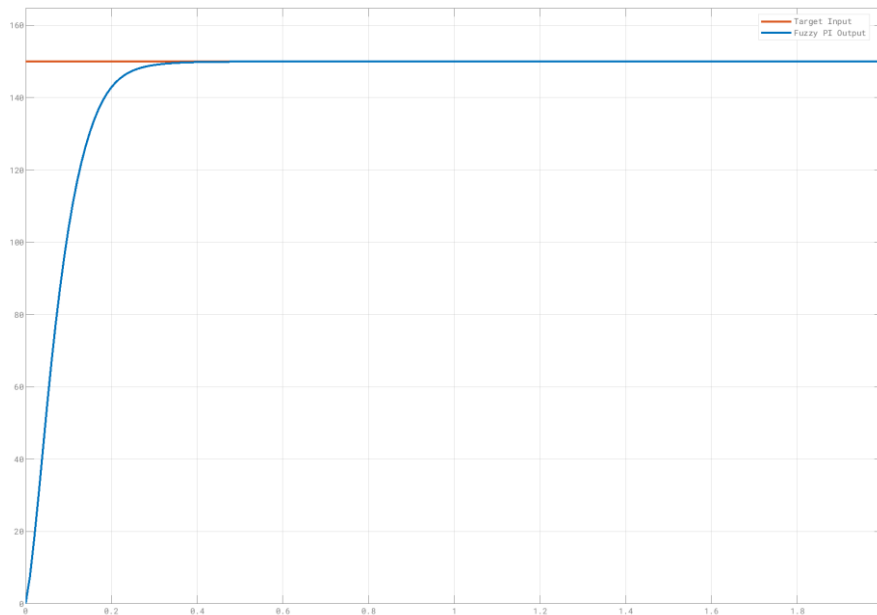
Πίνακας 8: Τα ρυθμισμένα κέρδη του ασαφούς PI ελεγκτή για το 2<sup>ο</sup> σενάριο χρήσης

Ο PI FLC με τα παραπάνω κέρδη αποδίδει ως εξής (βάσει της *stepinfo* στα αποτελέσματα της *sim* στο μοντέλο Simulink *final.slx* χρησιμοποιώντας τα παραπάνω κέρδη):

<b>Χρόνος Ανόδου, <math>t_r</math></b>	<b>146.6 msec</b>
<b>Χρόνος Αποκατάστασης, <math>t_s</math></b>	<b>241.6 msec</b>
<b>Υπερύψωση, %</b>	<b>0.0 %</b>
<b>Peak</b>	<b>150</b>
<b>Χρόνος εμφάνισης Peak, <math>t_{peak}</math></b>	<b>2080.0 msec</b>

Πίνακας 9: Δείκτες απόδοσης ρυθμισμένου PI ελεγκτή για το 2<sup>ο</sup> σενάριο χρήσης

Η απόδοση του PI FLC με τα αρχικά κέρδη εκτός από την *stepinfo* φαίνεται και στη προσομοίωση με το Simulink παρακάτω:



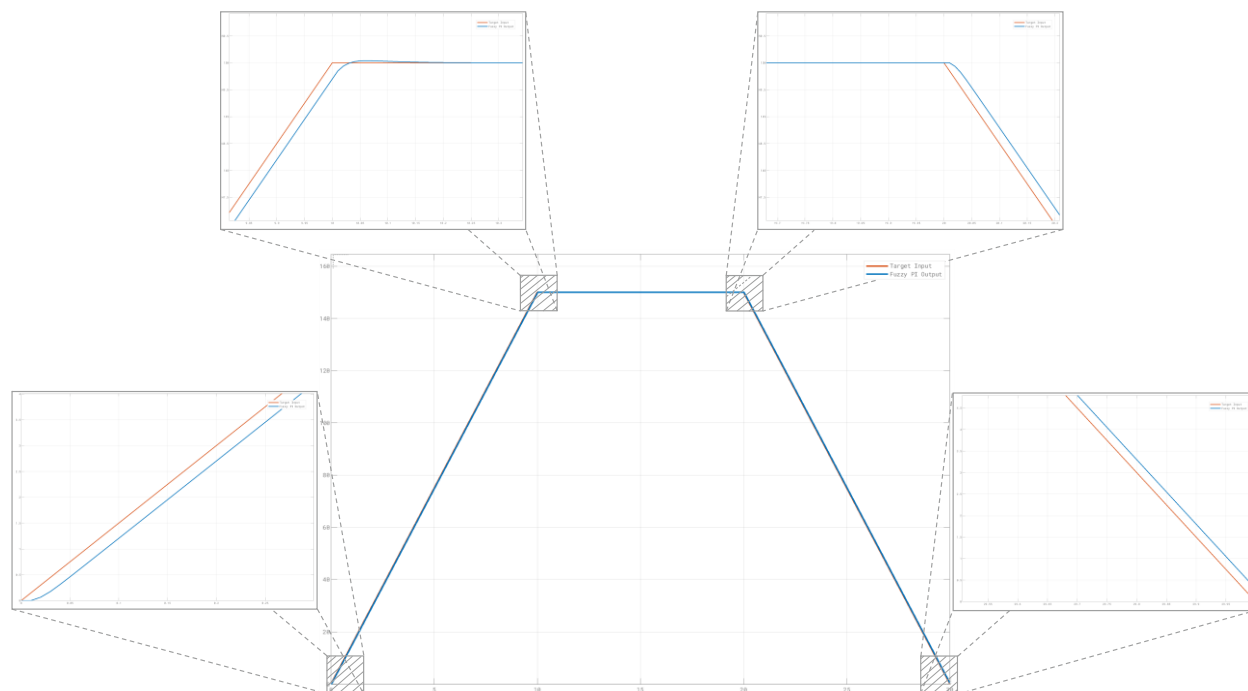
Εικόνα 33: Βηματική απόκριση PI FLC με τα ρυθμισμένα κέρδη του 2<sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης(step input 150V @ 0.0sec)



Εικόνα 34: Βηματική απόκριση PI FLC με τα ρυθμισμένα κέρδη του 2<sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης vs. τον γραμμικό PI ελεγκτή (step input 150V @ 0.0sec)

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι τα ρυθμισμένα κέρδη του PI FLC του 2<sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης αφενός βελτιώνουν την απόδοση του ασαφούς ελεγκτή με τα αρχικά κέρδη και αφετέρου εξασφαλίζουν τη **τήρηση των προδιαγραφών σχεδίασης**. Το σημαντικότερο όμως για τα νέα αυτά κέρδη είναι ότι **οδηγούν σε μηδενική υπερύψωση**, κάτι που είναι επιθυμητό εάν όχι απαραίτητο για αυτό το σενάριο χρήσης.

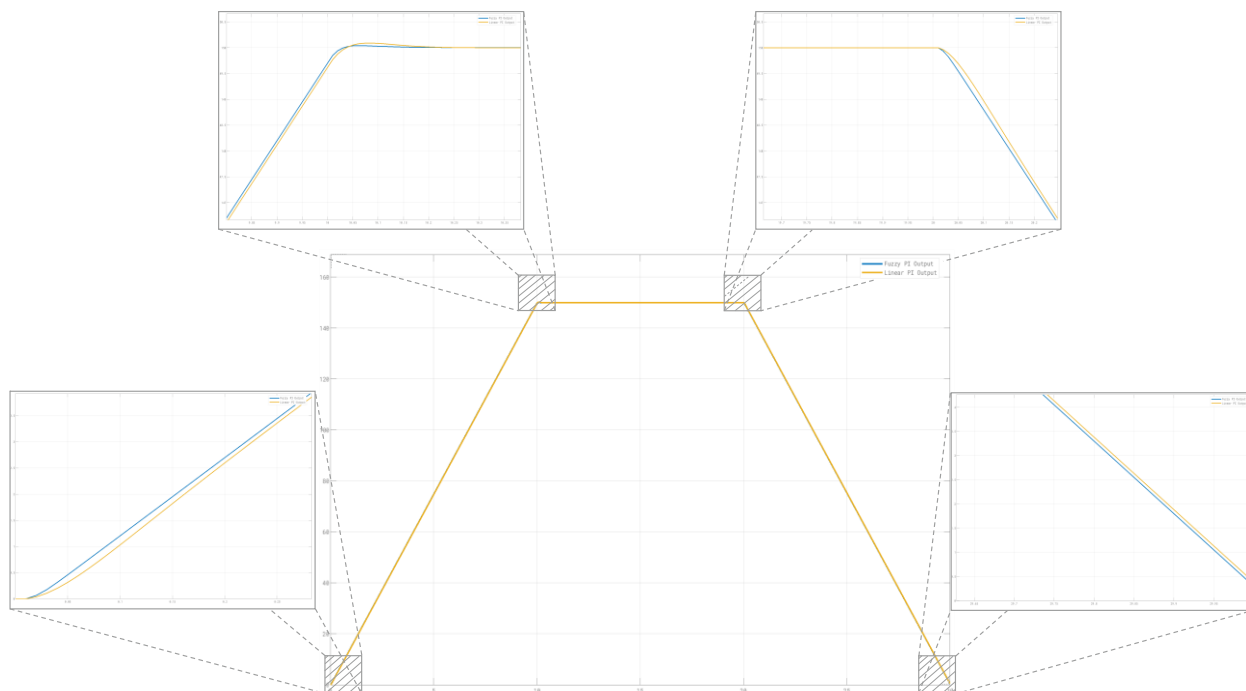
Για τον ασαφή ελεγκτή (FLC) με τα τελικά (ρυθμισμένα) κέρδη η έξοδος του συστήματος ως προς την είσοδο αναφοράς φαίνεται ακολούθως:



Εικόνα 35: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με τελικά κέρδη ως προς Σήμα Αναφοράς

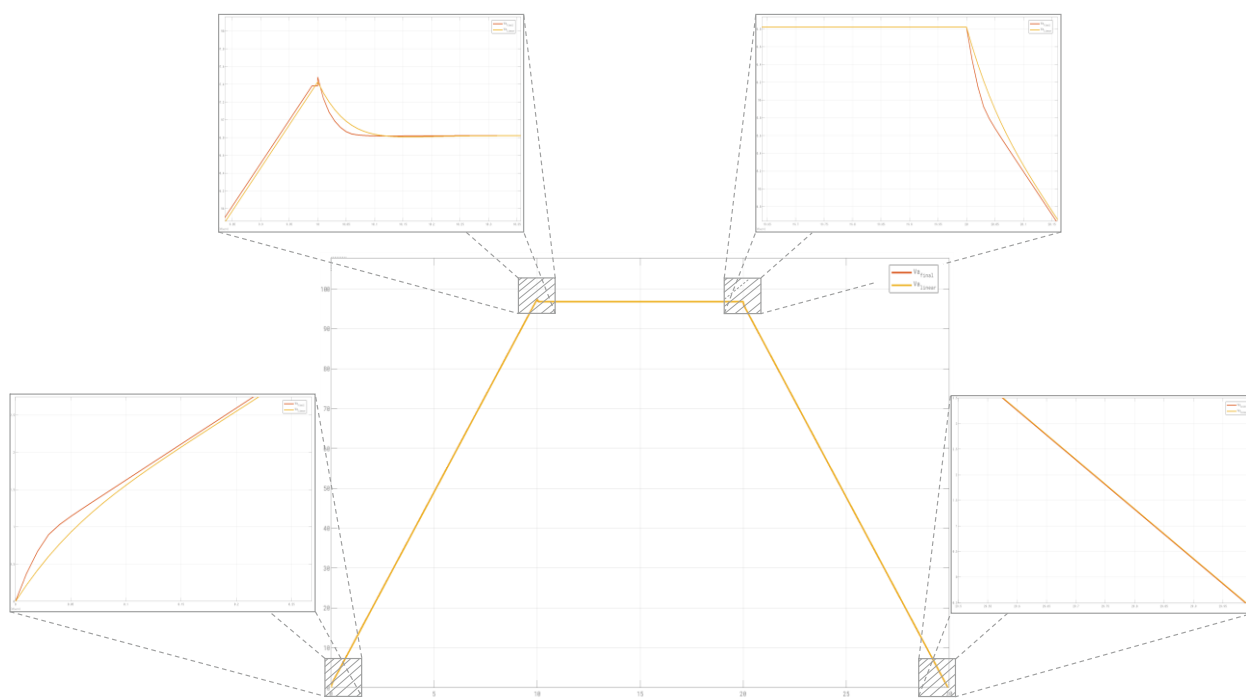
ενώ η έξοδος του συστήματος για τον FLC με τα τελικά κέρδη σε σύγκριση με τον γραμμικό PI ελεγκτή φαίνεται ακολούθως:





Εικόνα 36: Έξοδος του συστήματος με τον ασαφή ελεγκτή με τελικά κέρδη vs Έξοδος συστήματος με το Γραμμικού PI Ελεγκτή

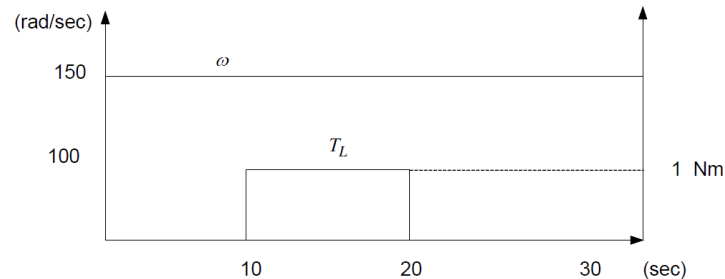
Επίσης, παραθέτουμε την το διάγραμμα της τάσης οδήγησης του κινητήρα,  $V_a$ , για τον FLC με τα τελικά κέρδη σε σύγκριση με το αντίστοιχο διάγραμμα για τον γραμμικό ελεγκτή:



Εικόνα 37: Διάγραμμα  $V_a$  του FLC με τελικά κέρδη vs  $V_a$  του Γραμμικού PI ελεγκτή

### 4.3. Σενάριο 3: Απόρριψη Διαταραχών $T_L$

Στο τρίτο σενάριο που υλοποιήθηκε (μοντέλα Simulink στα αρχεία `*/scenario 3/*_scenario_3.slx` όπου `*`: linear|initial|final) η έξοδος θεωρείται ότι βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση (με μηδενικό σφάλμα θέσης) στα 150r/s όσο και το σήμα αναφοράς. Στα 10sec από την έναρξη της προσομοίωσης θεωρείται ότι υπάρχει είσοδος φορτίου/διαταραχής (ως μία ροπή 1Nm) για 10sec όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

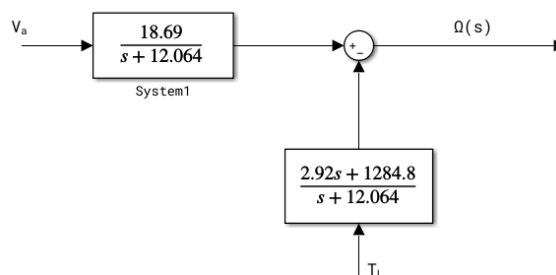


Εικόνα 38: Σήμα αναφοράς και σήμα διαταραχών 3ου σεναρίου χρήσης του ελεγκτή

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στο Κεφ. 6 του βιβλίου «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου» Τόμος Α του κ. Πετρίδη, η συνάρτηση μεταφοράς διαταραχών (με προσέγγιση κυρίου πόλου) είναι:

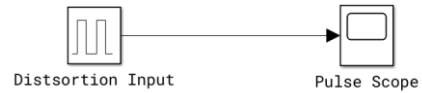
$$H_{T_L}(s) = \frac{\Omega(s)}{T_L(s)} = -\frac{2.92 \cdot (s + 440)}{s + 12.064}$$

με προς-έλεγχο σύστημα πλέον να γίνεται:



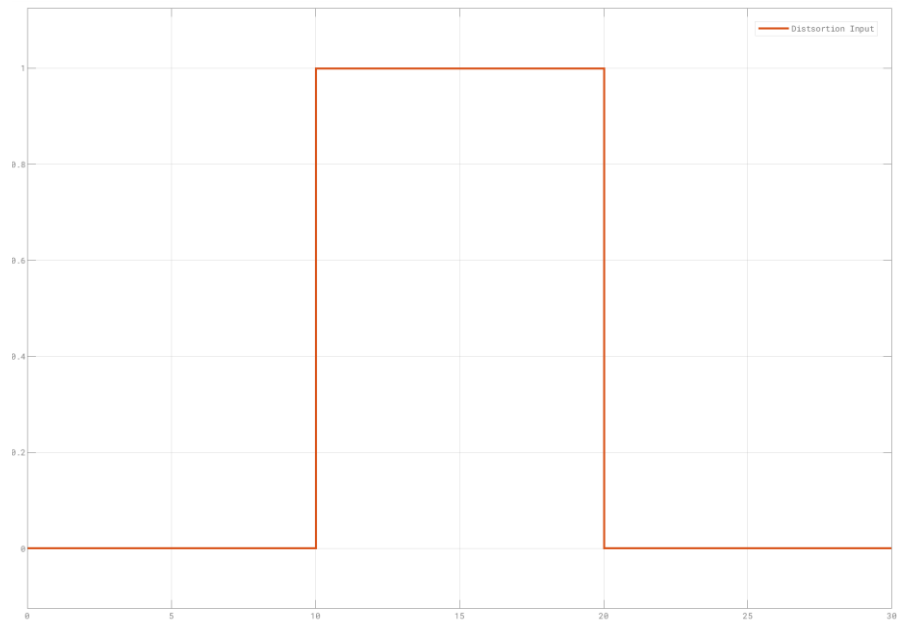
Εικόνα 39: Προσ-έλεγχο σύστημα με διαταραχές (διαγραμματική μορφή)

Στόχος είναι κατά το δυνατόν γρήγορη και πλήρης απόρριψη της διαταραχής από τον ασαφή ελεγκτή. Για τη δημιουργία της εισόδου διαταραχών στο Simulink χρησιμοποιήθηκε το ακόλουθο block:



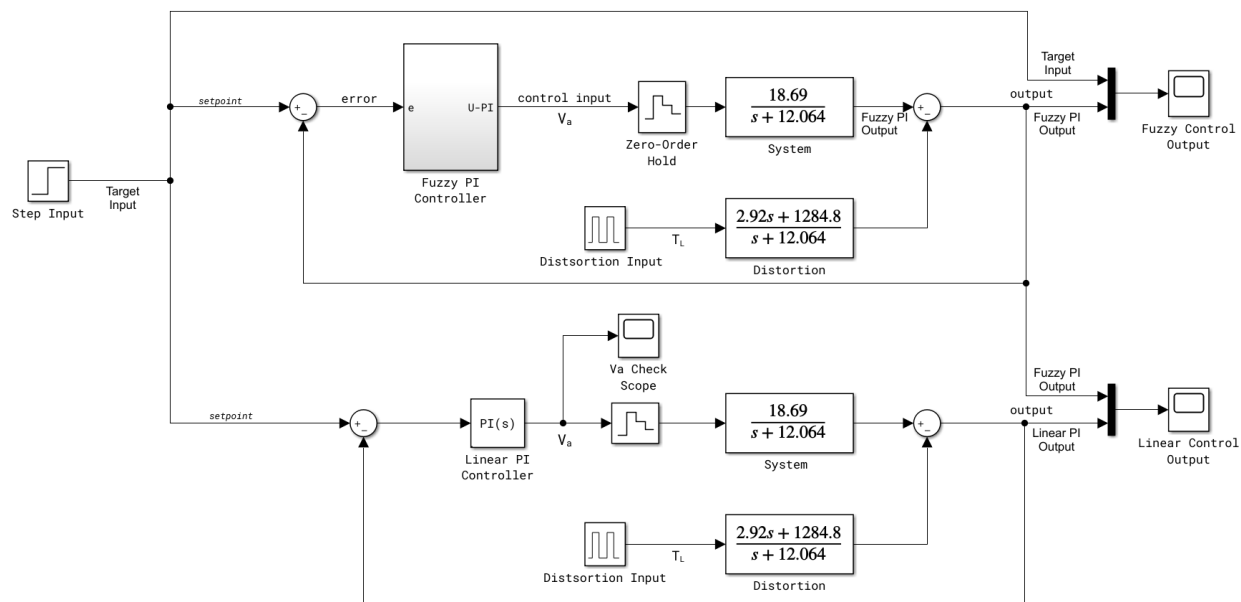
Εικόνα 40: Κύκλωμα Simulink για σχηματισμό του εισόδου διαταραχών του 3<sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης

με την έξοδο στο scope να φαίνεται ακολούθως:



Εικόνα 41: Είσοδος διαταραχής για το 3ο σενάριο χρήσης

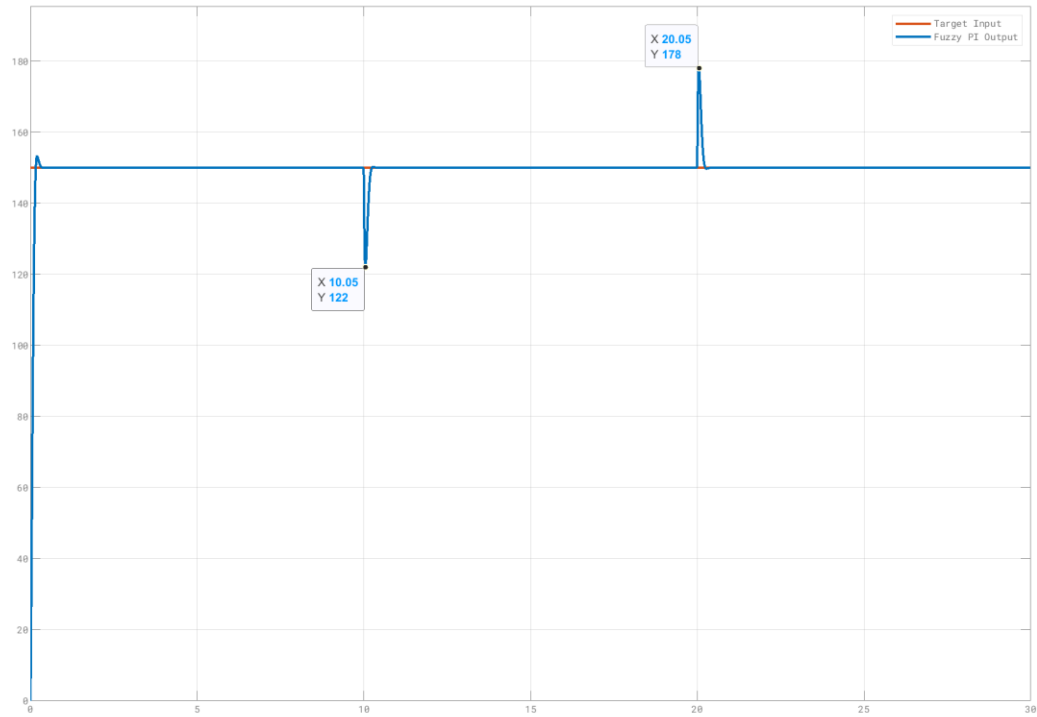
Το κύκλωμα Simulink για τη προσομοίωση του 3<sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης, φαίνεται ακολούθως:



Εικόνα 42: Κύκλωμα Simulink για την προσομοίωση του 3ου σεναρίου χρήσης

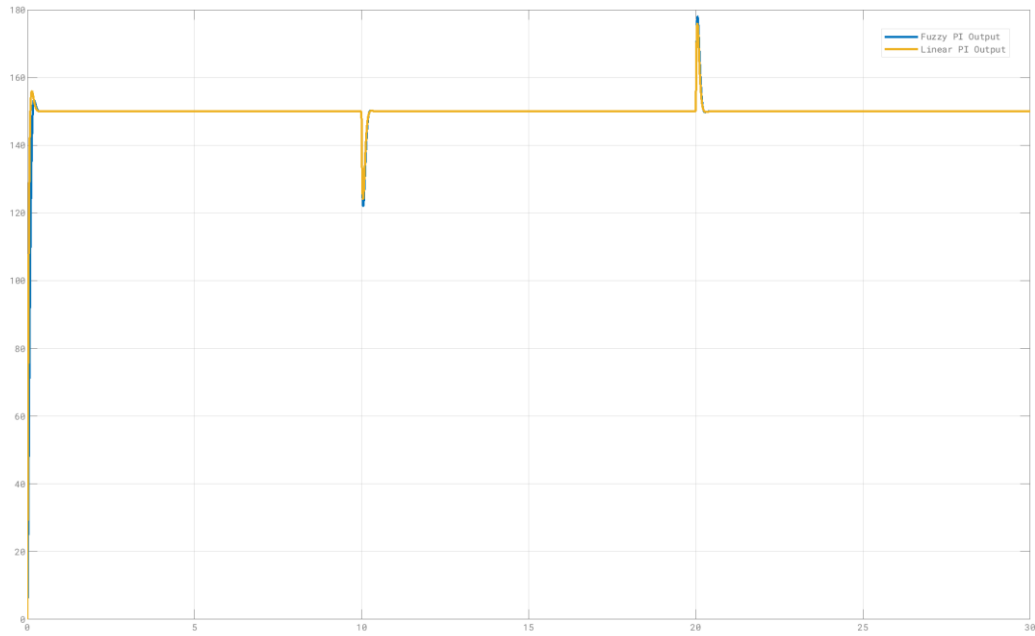
#### 4.3.1. Ασαφής Ελεγκτής με τα Τελικά Κέρδη

Για τον ασαφή ελεγκτή (FLC) με τα τελικά κέρδη που υπολογίστηκαν αρχικά (όχι αυτά του 2<sup>ου</sup> σεναρίου χρήσης), η έξοδος του συστήματος ως προς την είσοδο αναφοράς φαίνεται ακολούθως:



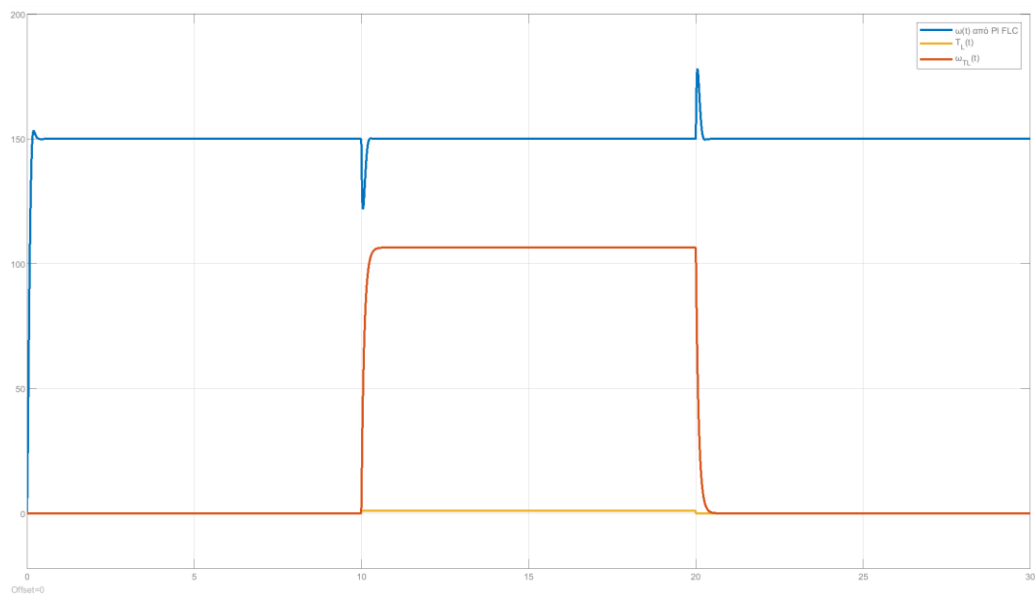
Εικόνα 43: Έξοδος του συστήματος με τον ρυθμισμένο ασαφή ελεγκτή ως προς Είσοδο Αναφοράς

Επίσης, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της παραπάνω εξόδου και της εξόδου του συστήματος (στροφές κινητήρα) εάν χρησιμοποιούνταν ο γραμμικός PI ελεγκτής αντί του FLC:

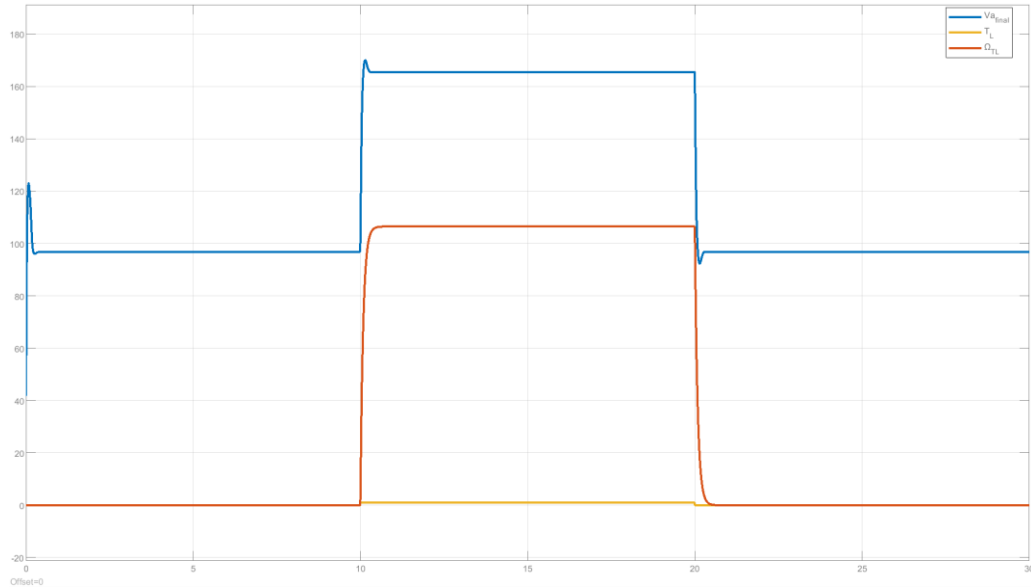


Εικόνα 44: Έξοδος του συστήματος με τον ρυθμισμένο ασαφή ελεγκτή  
vs Έξοδος του συστήματος με τον Γραμμικό PI ελεγκτή

Τέλος, παραθέτουμε σε κοινά διαγράμματα την είσοδο διαταραχής, τις «στροφές» από τη διαταραχή ( $\Omega_{TL} = H_{TL} \cdot T_L$ ) και την είσοδο/έξοδο του κινητήρα, δηλαδή το σήμα/τις στροφές του κινητήρα (αντίστοιχα):



Εικόνα 45: Έξοδος του συστήματος (στροφές του κινητήρα,  $\omega(t)$ ) με τον ρυθμισμένο FLC με τα τελικά κέρδη ως προς είσοδο διαταραχών  $T_L$  (σε Nm) και  $\Omega_{TL}$



Εικόνα 46: Διάγραμμα  $V_g$  του FLC με τελικά κέρδη ως προς είσοδο διαταραχών  $T_L$  (σε Nm) και  $\Omega_{T_L}$

Από τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι όταν το ΣΚΒ, ενώ βρίσκεται στη steady state, δεχθεί μία έσοδο διαταραχών με τη μορφή του σχήματος της Εικόνας 38, θα επέλθει μια μικρή βύθιση στις στροφές στην έξοδο του συστήματος, ωστόσο μετά από μικρό χρονικό διάστημα οι στροφές επανέρχονται στη κανονική τους λειτουργία και συνεχίζουν να παρακολουθούν το σήμα αναφοράς. Έτσι, το ΣΚΒ απορροφά τις διαταραχές και αναπροσαρμόζει τη λειτουργία του, ώστε οι στροφές του κινητήρα στην έξοδο να διατηρούνται σταθερές, με τη γωνιακή ταχύτητα να επανέρχεται στα 150rad/s. Η παραπάνω απόρριψη των διαταραχών ικανοποιεί τις προδιαγραφές σχεδίασης του ελεγκτή.

#### Σημείωση:

Στα διαγράμματα παραπάνω η ένδειξη “Fuzzy Pi Output” αναφέρεται στην έξοδο του συστήματος κλειστού βρόχου (ΣΚΒ), δηλαδή στις στροφές του κινητήρα ως προς το χρόνο –  $\omega(t)$ , έχοντας βάλει σαν ελεγκτή τον ασαφή PI ελεγκτή. Αντίστοιχα, η ένδειξη “Linear Pi Output” αναφέρεται στην έξοδο του συστήματος κλειστού βρόχου (ΣΚΒ), δηλαδή στις στροφές του κινητήρα ως προς το χρόνο –  $\omega(t)$ , έχοντας βάλει σαν ελεγκτή τον γραμμικό PI ελεγκτή.