



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

## Υπολογιστική Νοημοσύνη

### Έλεγχος Γωνίας Προσανατολισμού ενός Δορυφόρου με Ασαφείς Ελεγκτές

Ονοματεπώνυμο: Χρήστος Πεντερίδης

AEM: 10111

Email: chrelipen@ece.auth.gr

## 1. Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά ενός δορυφορικού συστήματος ως προς τη γωνιακή του θέση, με σκοπό την ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός Ασαφούς Ελεγκτή (Fuzzy Logic Controller - FLC). Το υπό μελέτη σύστημα βασίζεται σε ένα μοντέλο προσομοίωσης όπου η έξοδος είναι η γωνία του δορυφόρου, και η είσοδος είναι η ροπή που ασκείται για τον έλεγχό του.

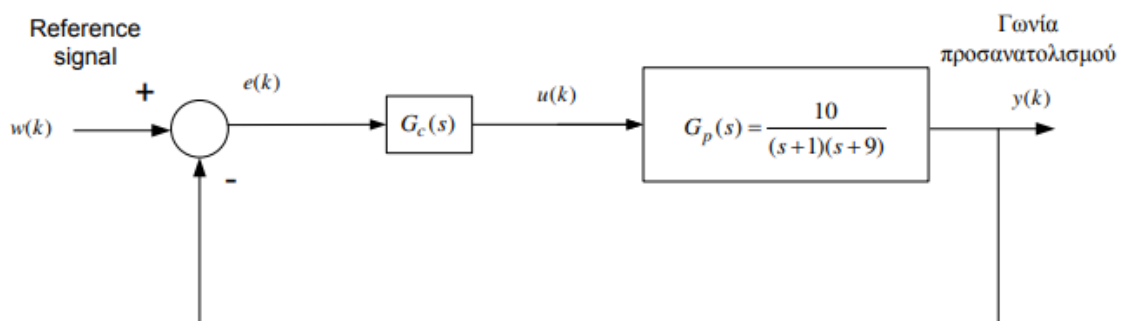
Ο στόχος της άσκησης είναι η σχεδίαση του FLC με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζει επιθυμητά χαρακτηριστικά απόκρισης στο κλειστό σύστημα, όπως:

- Μικρή υπέρβαση (π.χ. μικρότερη από 7%)
- Χρόνος ανύψωσης μικρότερος από 0.6 δευτερόλεπτα
- Καλή παρακολούθηση διαφορετικών σημάτων αναφοράς

Για τον σκοπό αυτό, ο ελεγκτής σχεδιάζεται ώστε να ελέγχει τη γωνία του δορυφόρου σε δύο διαφορετικά σενάρια σήματος αναφοράς. Στη συνέχεια, αναλύεται η επίδοση του συστήματος και αξιολογείται η ικανότητα του FLC να ανταποκρίνεται σε απαιτήσεις ευστάθειας, ταχύτητας και ακρίβειας, σε σύγκριση με έναν κλασικό ελεγκτή.

### Δομή του Κλειστού Συστήματος

Η συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω μπλοκ διάγραμμα. Ο FLC υπολογίζει τη μεταβολή της ροπής ελέγχου βάσει του σφάλματος και της μεταβολής του σφάλματος. Το παραγόμενο σήμα εισόδου εφαρμόζεται στο μοντέλο του δορυφόρου, το οποίο έχει δυναμική δεύτερης τάξης.



## 2. Σχεδίαση του Ελεγκτή

### α) Περιγραφή Συστήματος

Το υπό μελέτη δυναμικό σύστημα δευτέρου βαθμού περιγράφεται από την παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς:

$$G_p(s) = 10 / ((s + 1)(s + 9))$$

Το σύστημα χαρακτηρίζεται από δύο πραγματικούς και αρνητικούς πόλους στις θέσεις  $s = -1$  και  $s = -9$ . Πρόκειται για σταθερό σύστημα δεύτερης τάξης, με σχετικά καλή φυσική απόκριση και δυνατότητα βελτιστοποίησης μέσω ελέγχου.

### β) Γραμμικός Ελεγκτής (Αναφορά)

Ο γραμμικός PI ελεγκτής ορίζεται ως εξής:

$$G_c(s) = k_P + k_I / s = (k_P(s + c)) / s, \text{ όπου } c = k_I / k_P$$

Επιλέγοντας  $c = 1$ , το μηδενικό του PI τοποθετείται στο  $-1$  ώστε να ακυρώσει τον πόλο του φυτού στο  $-1$ .

Η νέα συνάρτηση μεταφοράς του ανοιχτού βρόχου γίνεται:

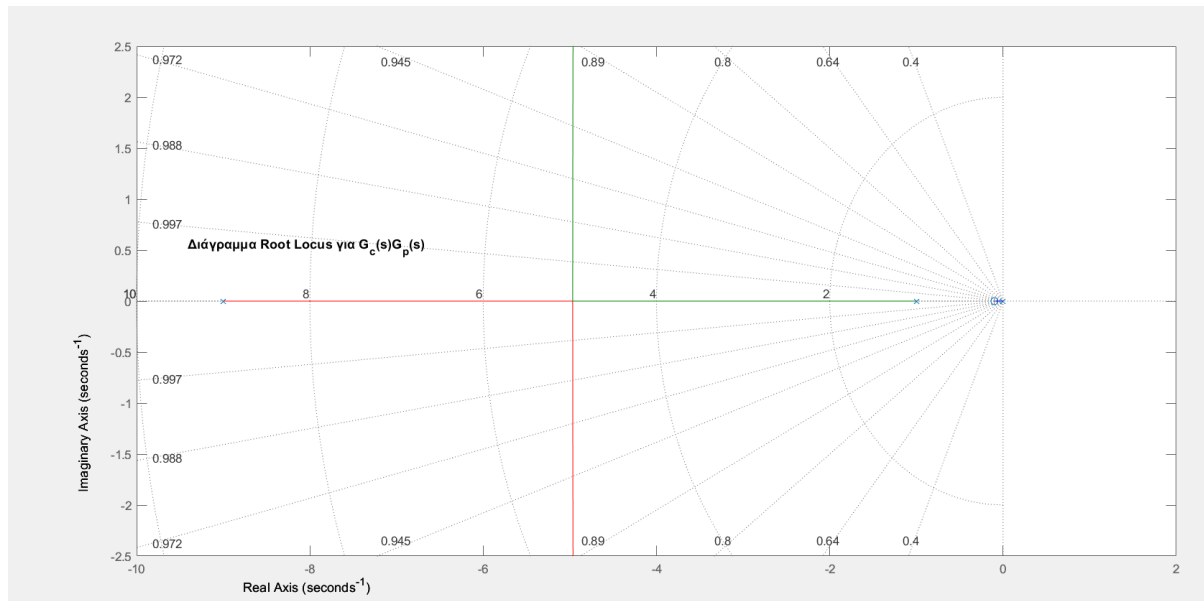
$$A(s) = G_c(s) \cdot G_p(s) = (10 \cdot k_P) / (s(s + 9))$$

Με χρήση **Root Locus**, ορίζεται ενίσχυση  $k_P=5$ , η οποία δίνει:

- Υπέρβαση  $< 10\%$
- Χρόνος ανόδου  $< 1.2 \text{ sec}$

### β) Root Locus Ανάλυση

Για την ανάλυση της επίδρασης των κερδών ανάδρασης, χρησιμοποιείται το διάγραμμα Root Locus της μεταφοράς  $G_p(s)$ . Η προσθήκη ενίσχυσης μέσω του FLC (π.χ. με κέρδος  $k$ ) επιδρά στην τοποθέτηση των πόλων στο μιγαδικό επίπεδο.



Από το διάγραμμα παρατηρείται:

- Οι πόλοι ξεκινούν στις θέσεις -1 και -9.
- Με αύξηση του κέρδους, μετακινούνται αριστερότερα στον πραγματικό άξονα.
- Το σύστημα δεν εισέρχεται σε ταλαντωτική κατάσταση (δεν δημιουργούνται φανταστικά μέρη).
- Συνεπώς, η παρουσία ταλαντώσεων στην απόκριση εξαρτάται κυρίως από τον σχεδιασμό του FLC.

### γ) Δομή Ελεγκτή FLC

#### γ) Ασαφής Ελεγκτής (Fuzzy Logic Controller – FLC)

Ο FLC υλοποιείται με αρχιτεκτονική **τύπου Mamdani**, και δέχεται ως είσοδο:

- Σφάλμα θέσης:  $E=r(t)-y(t)$
- Παράγωγος του σφάλματος:  $dE$

και εξάγει:

- Τη μεταβολή του ελέγχου  $du$

Η λογική ανάλυσης και απόφασης βασίζεται σε **63 κανόνες**, συνδυάζοντας 7 λεκτικούς όρους για το σφάλμα και 9 για την παράγωγο.

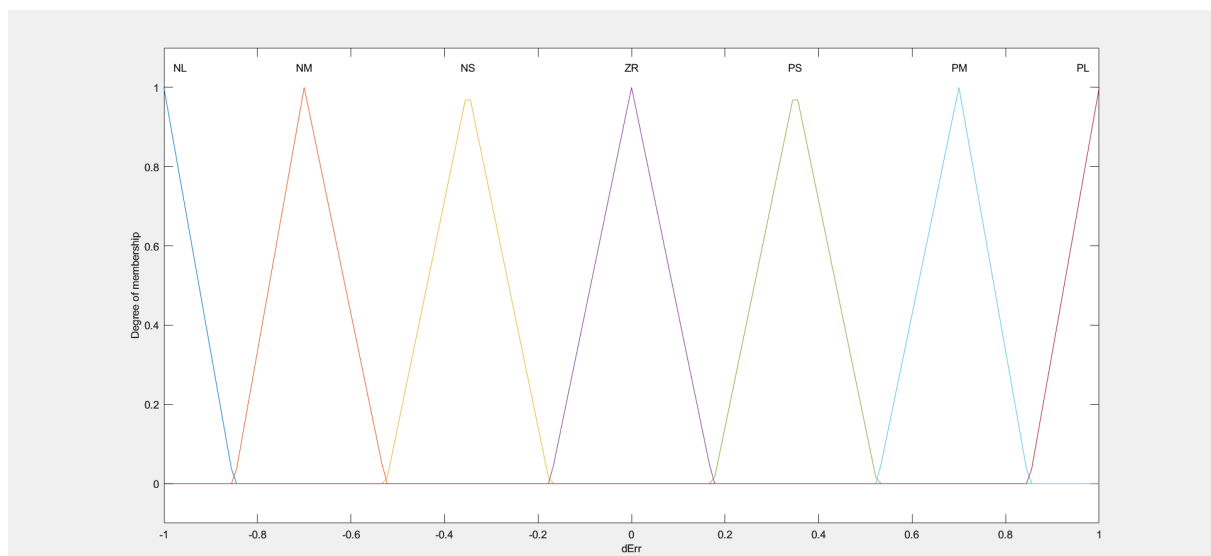
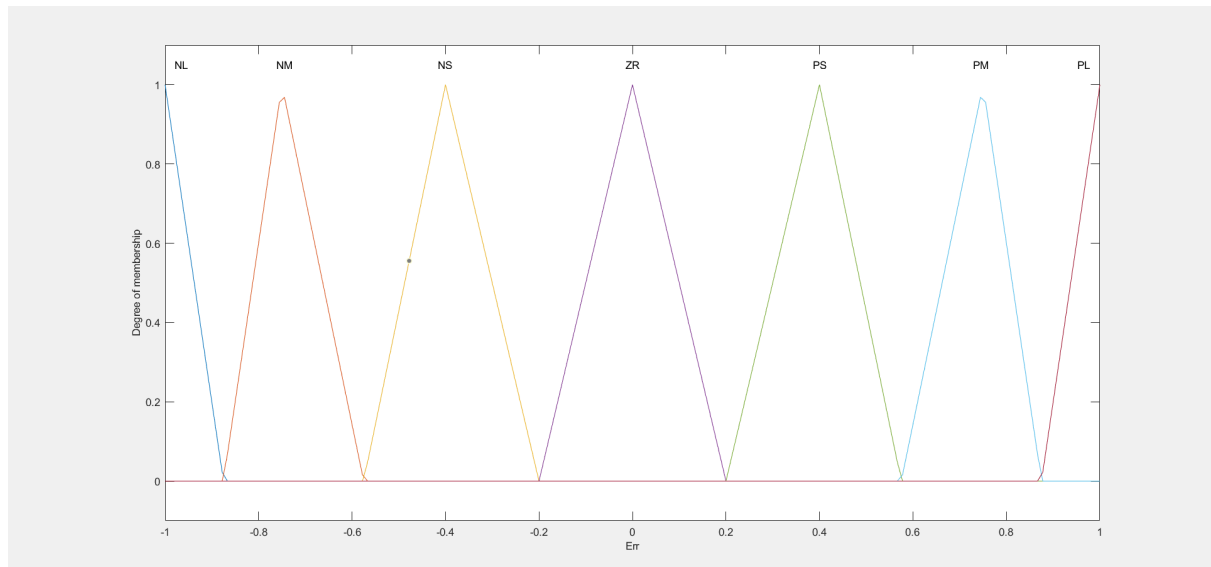
Ρύθμιση	Τιμή
Τύπος Ελεγκτή	Mamdani
Μέθοδος AND	min
Μέθοδος OR	max
Απόφαση (Defuzz)	Center of Area (centroid)
Κανόνες	63

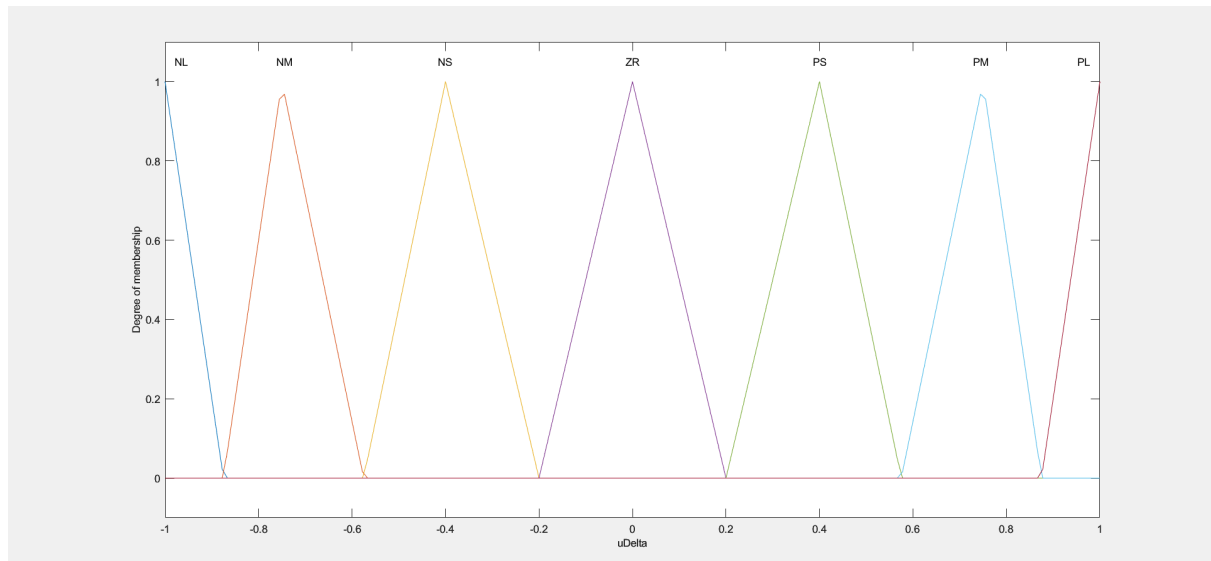
#### δ) Μέλη Συνόλου (Membership Functions)

Για την απεικόνιση των μεταβλητών χρησιμοποιούνται **τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής (trimf)** κανονικοποιημένες στο διάστημα  $[-1, 1]$ . Η υλοποίηση έχει ως εξής:

Μεταβλητή	Ονομασία	Αριθμός MF	Λεκτικά μέλη
Είσοδος 1	E	7	NL, NM, NS, ZR, PS, PM, PL
Είσοδος 2	DE	9	NV, NL, NM, NS, ZR, PS, PM, PL, PV
Έξοδος	DU	7	NL, NM, NS, ZR, PS, PM, PL

Οι συναρτήσεις έχουν σχεδιαστεί συμμετρικά, καλύπτοντας πλήρως την περιοχή [-1, 1] με επικάλυψη ώστε να επιτρέπεται ομαλή μετάβαση μεταξύ τιμών.





### ε) Κανόνες Fuzzy Ελέγχου

Ο ελεγκτής περιλαμβάνει **63 λογικούς κανόνες**, ένας για κάθε συνδυασμό των  $7 \times 9$  τιμών εισόδου. Οι κανόνες βασίζονται στη λογική:

- Μεγάλο θετικό σφάλμα  $\rightarrow$  θετική διόρθωση
- Μικρό σφάλμα και μικρή μεταβολή  $\rightarrow$  μηδενική διόρθωση
- Αρνητικό σφάλμα  $\rightarrow$  αρνητική διόρθωση

### στ) Κανονικοποίηση Εισοδων και Κλιμακωτές Τιμές

Για την εφαρμογή του ελεγκτή στο φυσικό σύστημα, γίνεται χρήση των εξής κερδών:

- $k_e=5$  : ενίσχυση σφάλματος
- $k_i=0.5$ : ενίσχυση παραγώγου
- $k=20$ : ενίσχυση εξόδου ελεγκτή

Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις:

- Χρόνος ανύψωσης  $< 0.6 \text{ s}$
- Υπέρβαση  $< 7\%$

και να προσφέρουν ικανοποιητική ταχύτητα και ακρίβεια απόκρισης.

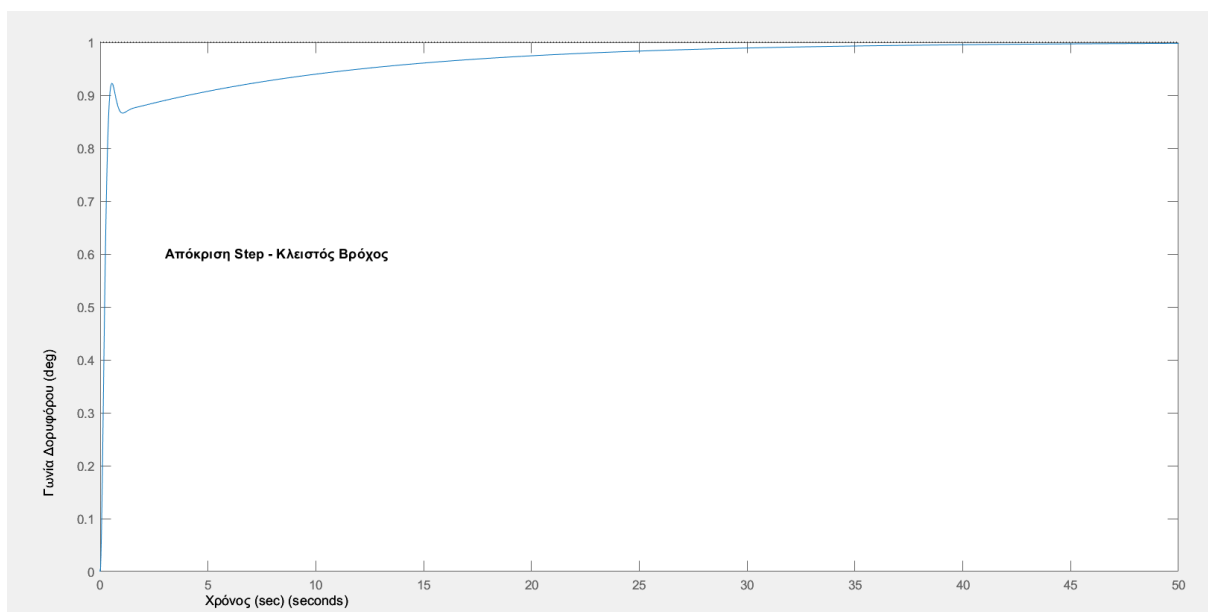
### 3. Απόκριση του Συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η συμπεριφορά του συστήματος υπό την επίδραση διαφορετικών σημάτων αναφοράς, τόσο για τον Fuzzy Logic Controller (FLC) όσο και για τον γραμμικό PI ελεγκτή. Η αξιολόγηση γίνεται βάσει μεταβατικών χαρακτηριστικών και της δυνατότητας παρακολούθησης της επιθυμητής τιμής.

#### Απόκριση με PI Ελεγκτη (γραμμική ανάλυση)

Η απόκριση του συστήματος αξιολογείται με βάση δύο διαφορετικά προφίλ αναφοράς:

- Βηματική είσοδος



Στατιστικά της απόκρισης:

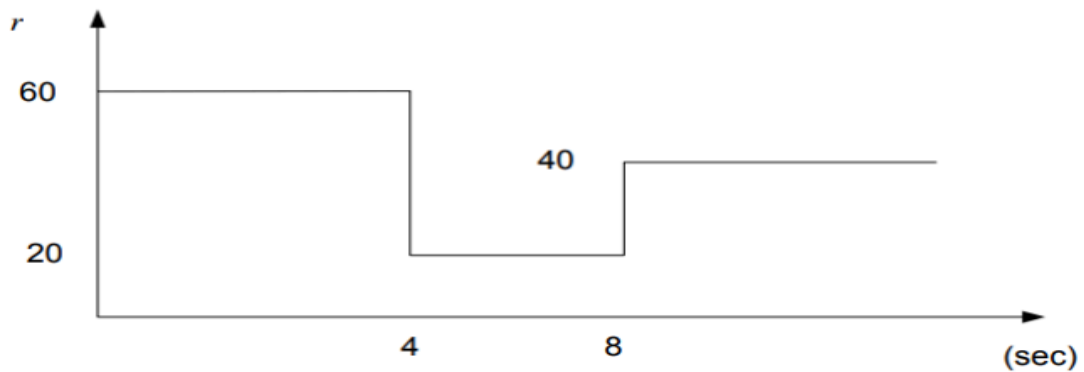
Η απόκριση του συστήματος παρουσιάζει εξαιρετικά χαρακτηριστικά:

- Χρόνος ανόδου: 0.335 s
- Υπερκορύφωση: 0%
- Χρόνος καθίζησης (2%): 6.706 s
- Μέγιστη τιμή: 0.997

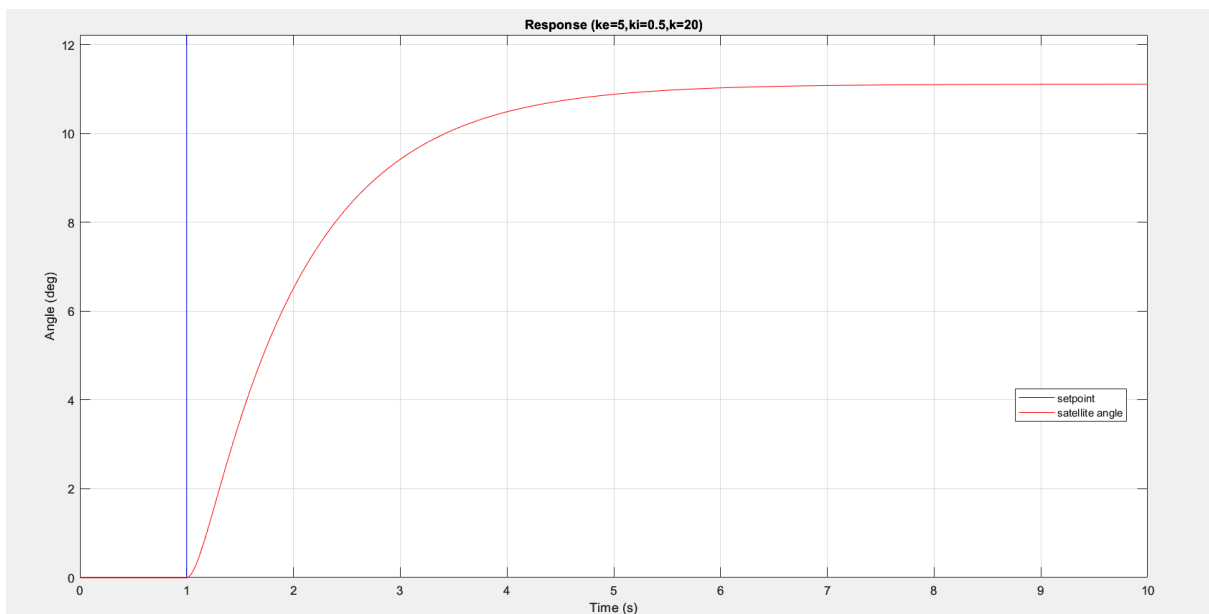


### α) Απόκριση FLC σε βηματική είσοδο (Step)

Το σήμα αναφοράς αλλάζει απότομα σε διακριτές χρονικές στιγμές (π.χ.  $60 \rightarrow 20 \rightarrow 40$  deg). Αυτή η απόκριση αναφέρεται σε βηματική μεταβολή της αναφοράς (setpoint) από  $0^\circ$  σε  $10^\circ$ .



Σχ.3

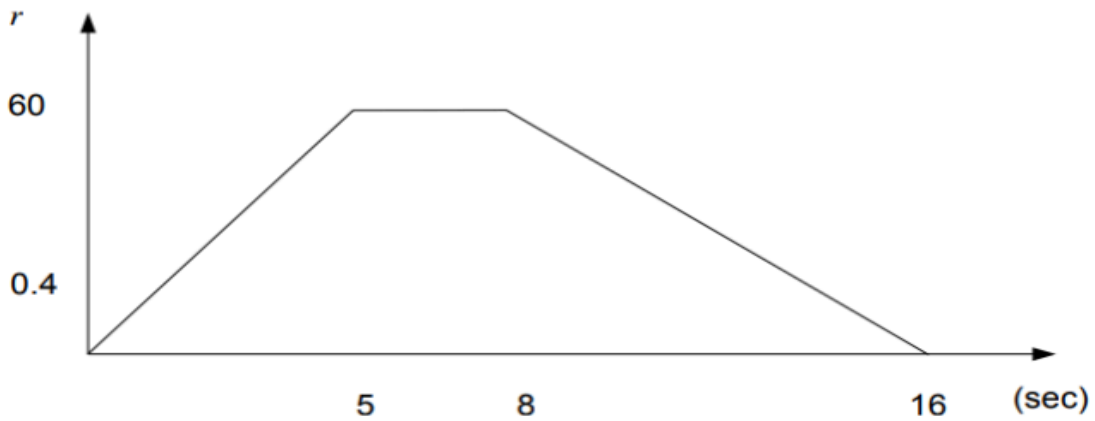


### Παρατηρήσεις:

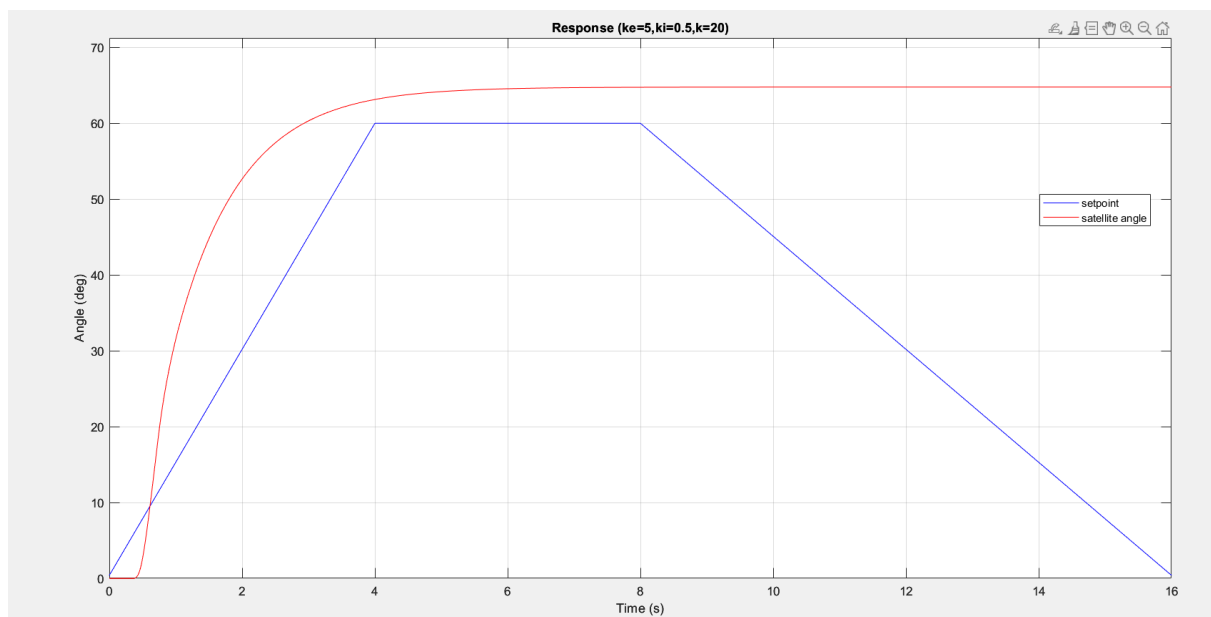
- Η έξοδος ακολουθεί την αναφορά χωρίς υπερύψωση.
- Χρόνος ανύψωσης και σταθεροποίησης είναι ικανοποιητικοί.
- Δεν εμφανίζονται ταλαντώσεις ή αστάθεια.

### β) Απόκριση FLC σε ραμπική είσοδο (Ramp)

Το σήμα αναφοράς αυξάνεται και μειώνεται γραμμικά με το χρόνο, χαρακτηριστικό της ράμπας. Η αναφορά αυξάνεται γραμμικά (ramp) μέχρι τις  $60^\circ$ , παραμένει σταθερή, και στη συνέχεια επιστρέφει στο  $0^\circ$  με αρνητική ράμπα.



Σχ.4



Παρατηρήσεις:

- Η έξοδος προσεγγίζει τη ράμπα με μικρή υστέρηση.
- Η μείωση παρουσιάζει πιο αργή απόκριση λόγω χαρακτηριστικών του ελεγκτή.
- Το σύστημα δεν παρουσιάζει σημαντικές ταλαντώσεις ή overshoot.