



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ

ΠΡΩΤΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΡΑΠΕΖΙΟΥ
ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΑΣΑΦΕΙΣ ΕΛΕΓΚΤΕΣ

Ημερομηνία: 11/10/2024

Οικονόμου Χρήστος

A.E.M.: 10268

Email: cnoikonom@ece.auth.gr

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

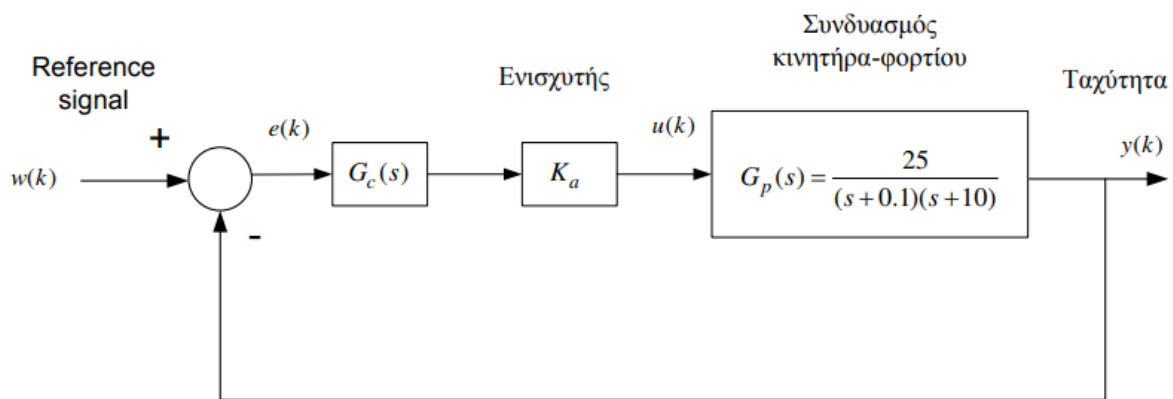
Εισαγωγή.....	σελ.3
Σχεδίαση Γραμμικού Ελεγκτή	3
Θεωρητική Ανάλυση	4
Προσομοιώσεις	4
Σχεδίαση Ασαφούς Ελεγκτή (FLC)	6
Σενάριο 1	8
Σενάριο 2	19
Βιβλιογραφικές Πηγές	21

Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η σχεδίαση ενός συστήματος ελεγκτών, με σκοπό την διατήρηση της υψηλής ακρίβειας, στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, ενός μηχανισμού τραπεζιού εργασίας. Για να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός, αρχικά σχεδιάζεται ένας γραμμικός PI ελεγκτής και, στη συνέχεια, ένας ασαφής ελεγκτής (Fuzzy Logic Controller – FLC). Η διαδικασία που ακολουθείται για τη σχεδίαση των εν λόγω ελεγκτών παρουσιάζεται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

Σχεδίαση Γραμμικού Ελεγκτή

Το σύστημα του μηχανισμού κίνησης του τραπεζιού εργασίας που μελετάται στην εργασία αποτυπώνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Μπλοκ Διάγραμμα Συστήματος

Από το παραπάνω μπλοκ διάγραμμα φαίνεται πως το σύστημα μοντελοποιείται από τη συνάρτηση μεταφοράς $G_p(s) = \frac{25}{(s+0.1)(s+10)}$. Όπως προαναφέρθηκε, ο έλεγχος της ταχύτητας του συστήματος θα πραγματοποιηθεί μέσω ενός γραμμικού PI ελεγκτή της μορφής $G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} = \frac{K_p(s+c)}{s}$. Η υλοποίηση του ελεγκτή θα γίνει μέσω της κατάλληλης επιλογής τιμών για τα κέρδη του. Οι τιμές θα πρέπει να είναι τέτοιες, ώστε να πληρούνται οι απαιτούμενες προδιαγραφές:

- Υπερύψωση για βηματική είσοδο μικρότερη από **8%**
- Χρόνος ανόδου μικρότερος από **0.6 δευτερόλεπτα**

Θεωρητική Ανάλυση

Η συνάρτηση ανοιχτού βρόχου του συνολικού συστήματος προκύπτει από το γινόμενο των συναρτήσεων $G_p(s)$ και $G_c(s)$. Επιπλέον, το μηδενικό του ελεγκτή επιλέγεται στην τιμή $c = 0.1$, προκειμένου να απαλειφθεί ο πόλος που υπάρχει στο -0.1 . Επομένως η συνάρτηση ανοιχτού βρόχου θα είναι:

$$A(s) = \frac{25K_p}{s(s+10)} \quad (1)$$

Για τη συνάρτηση κλειστού βρόχου ισχύει η σχέση $H(s) = \frac{A(s)}{1+A(s)}$, οπότε, αντικαθιστώντας τη σχέση (1), προκύπτει:

$$H(s) = \frac{25K_p}{s^2 + 10s + 25K_p} \quad (2)$$

Ο παρονομαστής της συνάρτησης μεταφοράς κλειστού βρόχου αποτελεί το **χαρακτηριστικό πολυώνυμο** του συστήματος, το οποίο, στη γενική του μορφή, γράφεται ως $s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2$. Είναι, λοιπόν, προφανές πως:

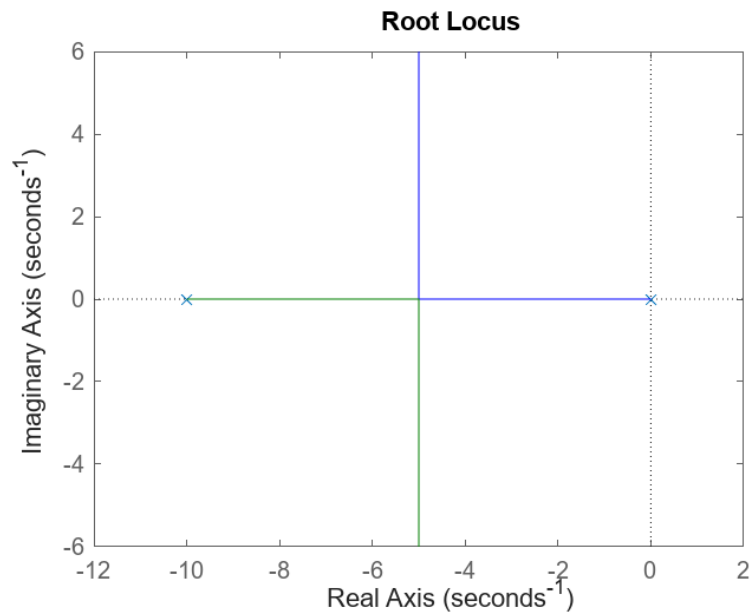
$$\omega_n^2 = 25K_p \Rightarrow \omega_n = 5\sqrt{K_p} \quad (3) \quad \text{και} \quad 2\zeta\omega_n = 10 \Rightarrow \dots \Rightarrow \zeta = \frac{1}{\sqrt{K_p}} \quad (4)$$

Από τον τύπο της **υπερύψωσης**, ισχύει: $M_p = e^{-\frac{(\zeta \cdot \pi)}{\sqrt{(1-\zeta^2)}}}$ (5) και, εφόσον ισχύει ο περιορισμός της εκφόνησης που απαιτεί υπερύψωση μικρότερη του 8%, αντικαθιστώντας με τις απαραίτητες παραπάνω σχέσεις, προκύπτει πως $K_p < 2.55$. Συνεπώς, επιλέγεται η τιμή $K_p = 2$ για τη σχεδίαση του ελεγκτή.

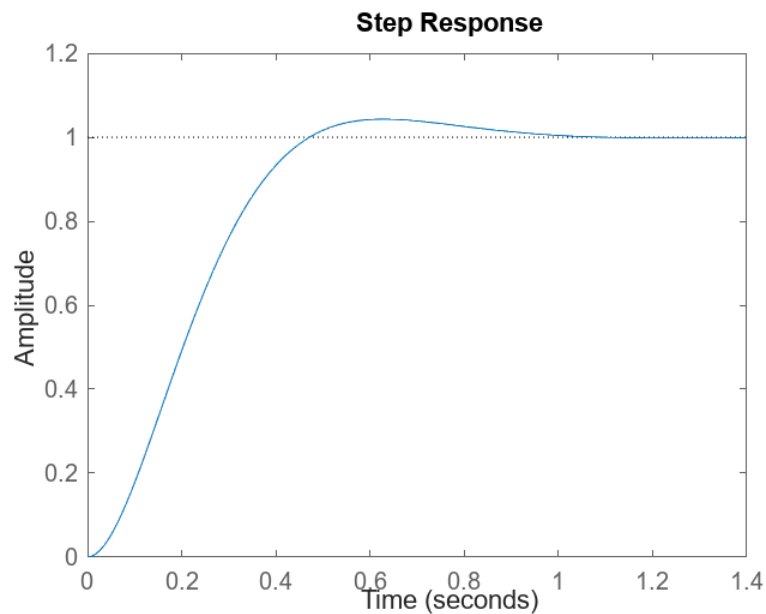
Τέλος, από τη σχέση $c = \frac{K_I}{K_p}$ και, εφόσον επιλέχθηκε η τιμή 0.1 για το μηδενικό του ελεγκτή, το κέρδος του ολοκληρωτή θα είναι $K_I = 0.2$

Προσομοιώσεις

Με βάση, λοιπόν, τις σχέσεις που προέκυψαν, υπολογίζεται ο **γεωμετρικός τόπος ριζών** και η **βηματική απόκριση** του συστήματος για $K_p = 2$ με τη χρήση MATLAB Live Script. Ο σχετικός κώδικας αναγράφεται στο αρχείο “PI_controller.mlx”.



Εικόνα 2: Γεωμετρικός Τόπος Ριζών Γραμμικού Ελεγκτή



Εικόνα 3: Βηματική Απόκριση Γραμμικού Ελεγκτή για $K_p = 2$

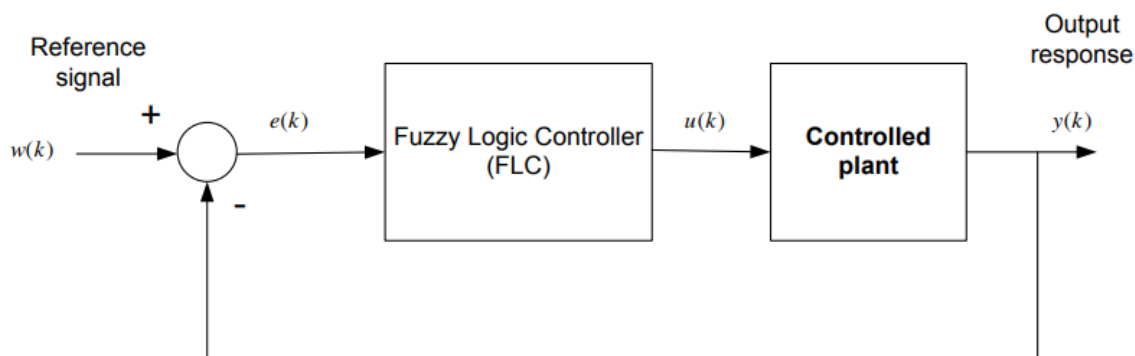
Οι τιμές των μετρικών που εξετάζει η εργασία έχουν ως εξής:

- Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time) = **0.303899 sec**
- Υπερύψωση (Overshoot) = **4.320950%**

Οι τιμές πληρούν τις προαπαιτούμενες προδιαγραφές, οπότε εξάγεται το συμπέρασμα πως έχει γίνει σωστή επιλογή της παραμέτρου K_p όπως, κατ' επέκταση, και των υπόλοιπων παραμέτρων.

Σχεδίαση Ασαφούς Ελεγκτή (FLC)

Στη συνέχεια της εργασίας, ζητείται η σχεδίαση ενός ασαφούς PI ελεγκτή, προκειμένου να διατηρείται η μέγιστη ακρίβεια για τον υπό μελέτη μηχανισμό. Ο ελεγκτής απεικονίζεται στο ακόλουθο μπλοκ διάγραμμα:



Εικόνα 4: Μπλοκ Διάγραμμα Ασαφούς Ελεγκτή

Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για τον ελεγκτή είναι:

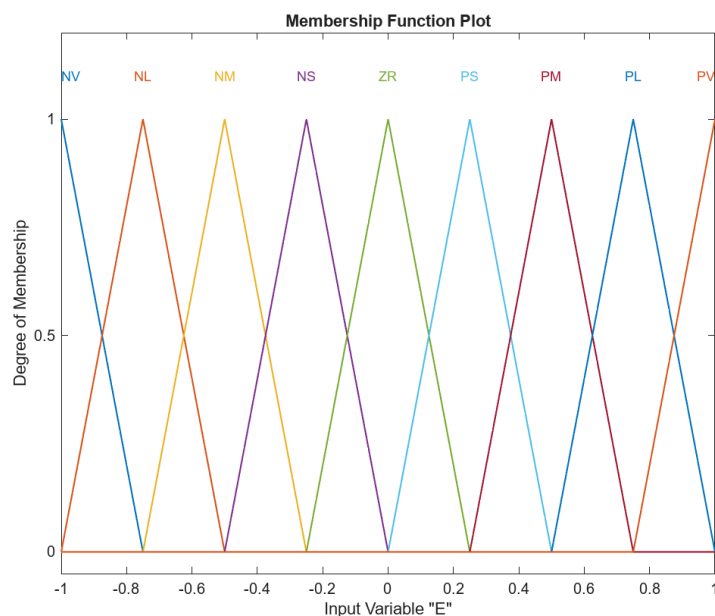
- Ασαφοποιητής Singleton
- Υλοποίηση του συνδετικού AND με τον τελεστή \min
- Υλοποίηση συνάρτησης συμπερασμού με τον κανόνα Mamdani
- Υλοποίηση του συνδετικού ALSO με τον τελεστή \max
- Υλοποίηση του απο-ασαφοποιητή με την τεχνική COS (Center of Sums)

Ο ζητούμενος ελεγκτής έχει δύο εισόδους, **το σφάλμα (E)** και τη **μεταβολή του σφάλματος (DE)**, όπως επίσης και μία έξοδο, τη **μεταβολή του σήματος ελέγχου (DU)**. Τόσο οι είσοδοι, όσο και η έξοδος, περιγράφονται από **εννέα λεκτικές μεταβλητές** σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνας 5.

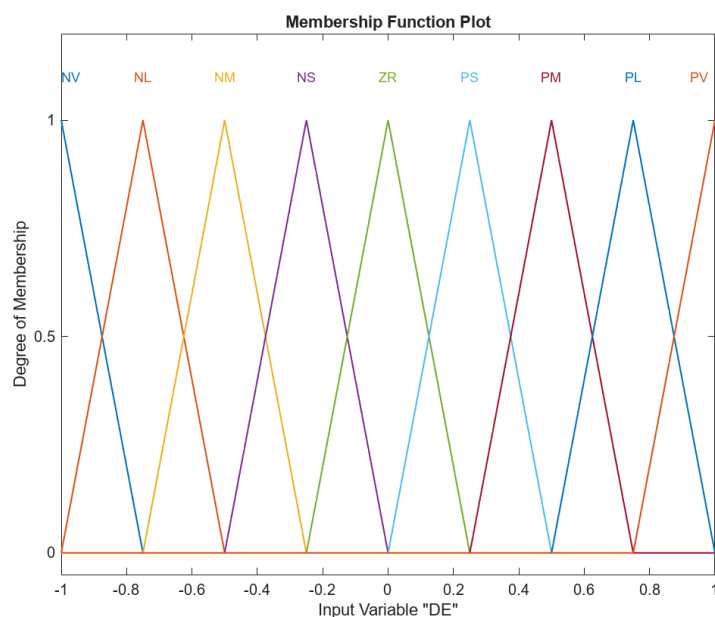
- Σενάριο 1 -

Α) Σχεδίαση του Ελεγκτή και Αποκρίσεις

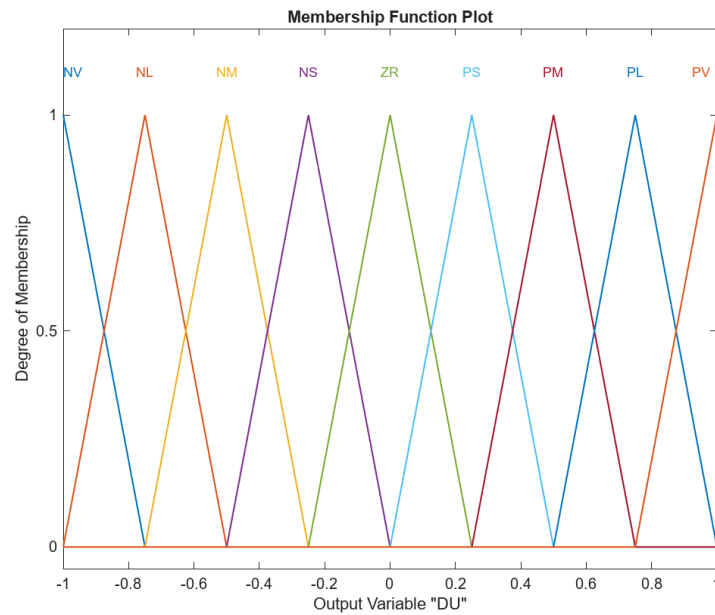
Με βάση τις προδιαγραφές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, πραγματοποιείται η σχεδίαση του ασαφούς PI ελεγκτή. Αρχικά, κατασκευάζονται τα απαραίτητα ασαφή μοντέλα για τις μεταβλητές εισόδου και εξόδου, σύμφωνα με τα οποία θα ρυθμιστεί η λειτουργία του συστήματος ελέγχου. Η αναλυτική περιγραφή των μοντέλων αυτών βρίσκεται στο αρχείο “fis_table_23.fis”.



Εικόνα 6: Ασαφή Σύνολα Μεταβλητής Εισόδου E

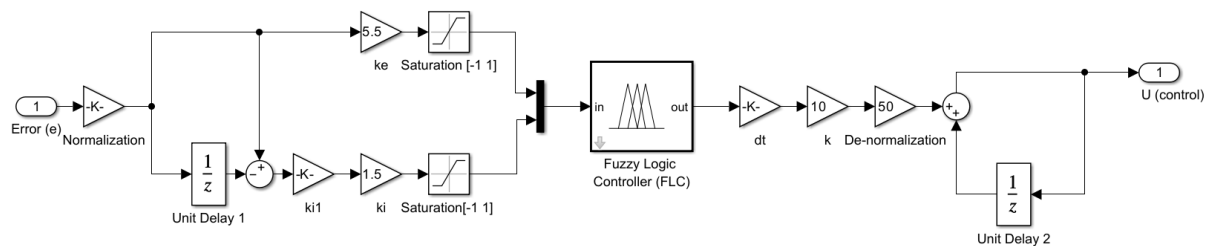


Εικόνα 7: Ασαφή Σύνολα Μεταβλητής Εισόδου DE



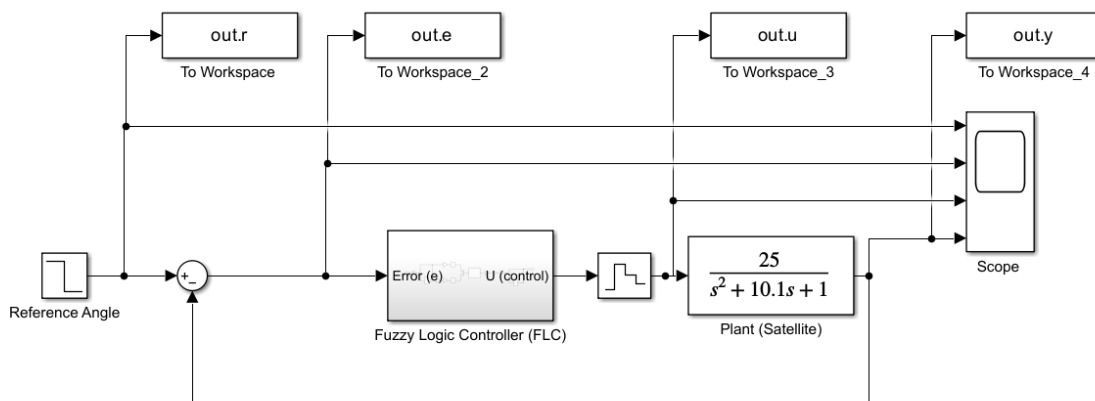
Εικόνα 8: Ασαφή Σύνολα Μεταβλητής Εξόδου DU

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε ενσωματώνεται στο Simulink και σχεδιάζεται ο ασαφής PI ελεγκτής. Αρχικά, το σφάλμα του συστήματος κανονικοποιείται στο εύρος $[-1, 1]$. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η διακριτή παράγωγος του σήματος σφάλματος για διάστημα 0.01 δευτερολέπτων. Το σφάλμα και η παράγωγός του πολλαπλασιάζονται με τα κέρδη K_e και K_i αντίστοιχα και εισάγονται στο ασαφές σύστημα. Η έξοδος του ελεγκτή πολλαπλασιάζεται με το κέρδος K_1 , κανονικοποιείται στο εύρος $[-50, 50]$, και, έπειτα, ολοκληρώνεται, ώστε να προκύψει το τελικό σήμα ελέγχου.



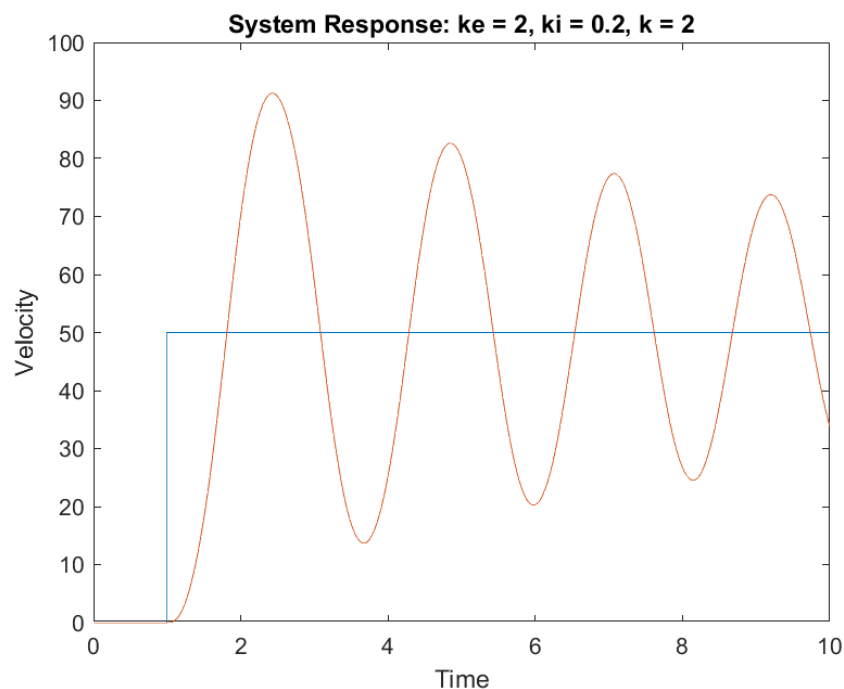
Εικόνα 9: Ασαφής Ελεγκτής PI

Κατόπιν, ο ελεγκτής που σχεδιάστηκε εισάγεται σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου, το οποίο μοντελοποιεί τον έλεγχο της ταχύτητας του υπό μελέτη συστήματος, δηλαδή του τραπεζιού εργασίας. Στην Εικόνα 10, αποτυπώνεται το διάγραμμα του συστήματος κλειστού βρόχου.



Εικόνα 10: Σύστημα Κλειστού Βρόχου με Ασαφή Ελεγκτή PI (FLC)

Ακολουθούν οι αποκρίσεις του συστήματος για είσοδο συστήματος **50 * stepfun**, όπου stepfun είναι η βηματική συνάρτηση, και για διάφορες τιμές των παραμέτρων K_e , K_I και K του ασαφούς ελεγκτή. Αρχικά, υπολογίζεται η απόκριση για τιμές ίσες με αυτές των αντίστοιχων παραμέτρων του γραμμικού PI ελεγκτή.



Εικόνα 11: Απόκριση Συστήματος για $K_e = 2$, $K_I = 0.2$ και $K = 2$

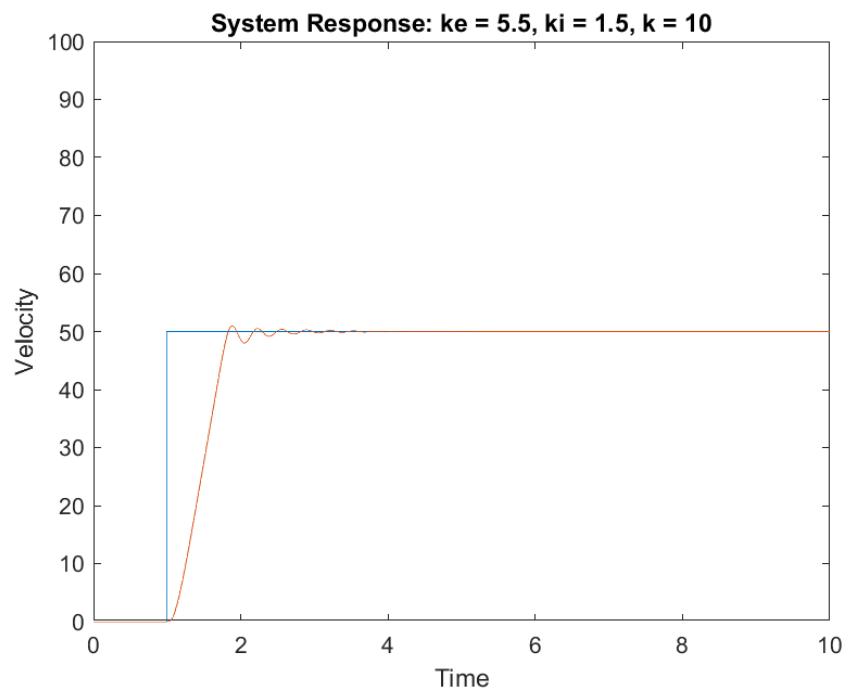
Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time) = **0.6261368 sec**

Υπερύψωση (Overshoot) = **169.8051%**

Είναι απολύτως προφανές πως, οι τιμές των μετρικών που προέκυψαν απέχουν αρκετά από τις ζητούμενες προδιαγραφές, οι οποίες είναι:

- Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time) < **0.6 sec**
- Υπερύψωση (Overshoot) < **5%**

Μέσω της διαδικασίας “trial and error”, υπολογίζονται οι επιθυμητές - ιδανικές τιμές των τριών κερδών. Οι τιμές αυτές, καθώς και η απόκριση του συστήματος για αυτές, αναγράφονται στην Εικόνα 11.



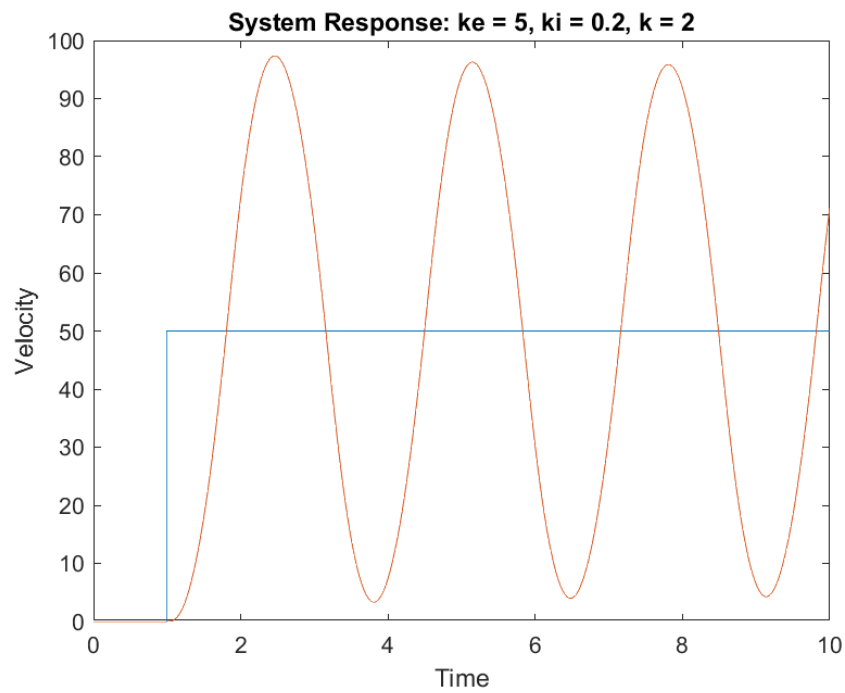
Εικόνα 12: Απόκριση Συστήματος για $K_e = 5.5$, $K_I = 1.5$ και $K = 10$

Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time) = **0.5662951 sec**

Υπερύψωση (Overshoot) = **1.92275%**

Παρατηρείται πως, για τις ιδανικές τιμές των κερδών, εκπληρώνονται οι απαιτήσεις της εκφώνησης. Στη συνέχεια, παρατίθενται διαγράμματα, με βάση τα οποία εξετάζεται η “συμπεριφορά” του συστήματος κλειστού βρόχου (σύμφωνα με τις βηματικές αποκρίσεις), για διάφορες μεταβολές των τιμών των παραμέτρων K_e , K_I και K .

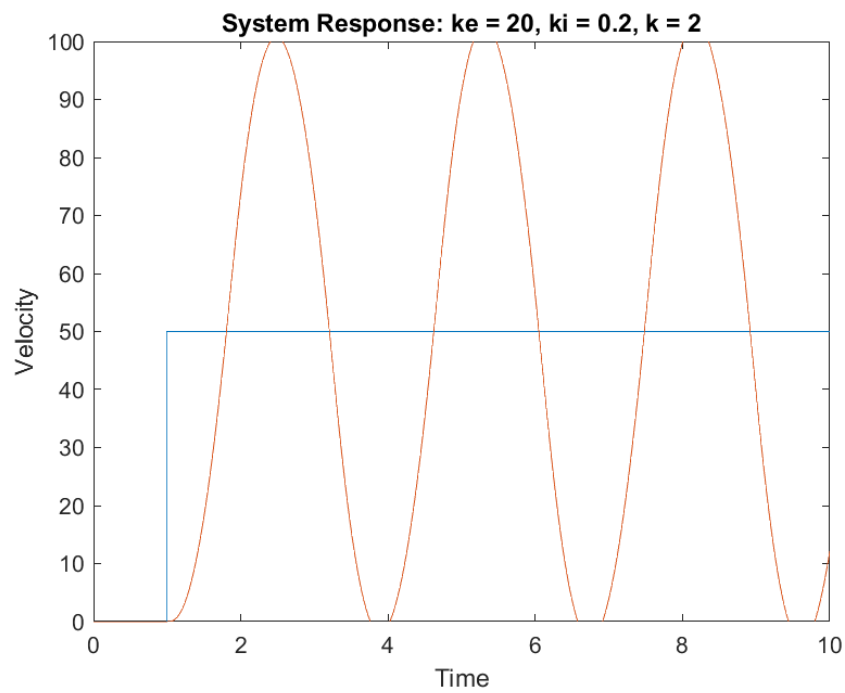
Μεταβολές Απόκρισης Συστήματος για Διαφορετικές Τιμές K_e



Εικόνα 13: Απόκριση Συστήματος για $K_e = 5$, $K_I = 0.2$ και $K = 2$

Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time) = **0.7670228 sec**

Υπερύψωση (Overshoot) = **36.5635%**

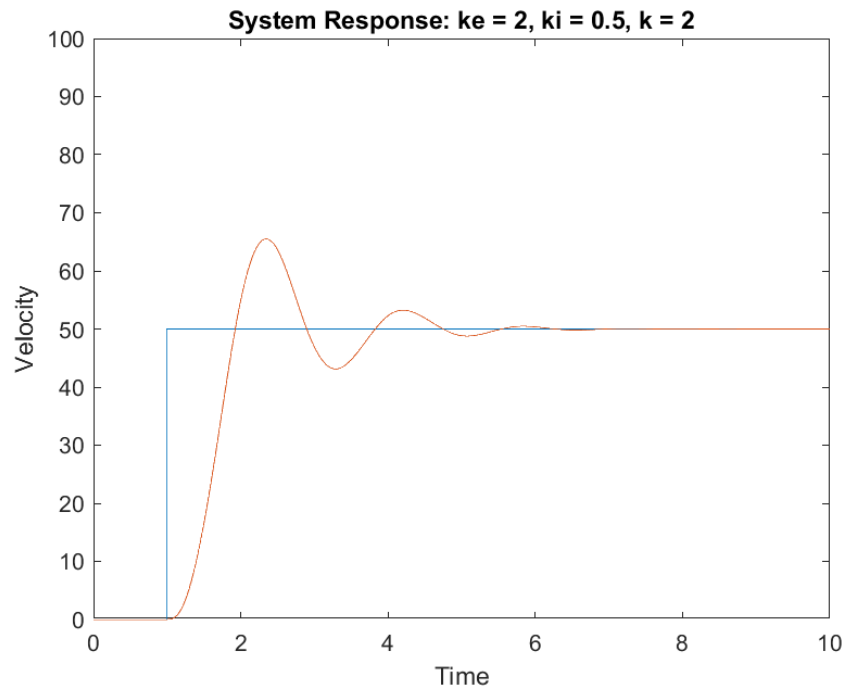


Εικόνα 14: Απόκριση Συστήματος για $K_e = 20$, $K_I = 0.2$ και $K = 2$

Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time) = **0.4363987 sec**

Υπερύψωση (Overshoot) = **754.9508%**

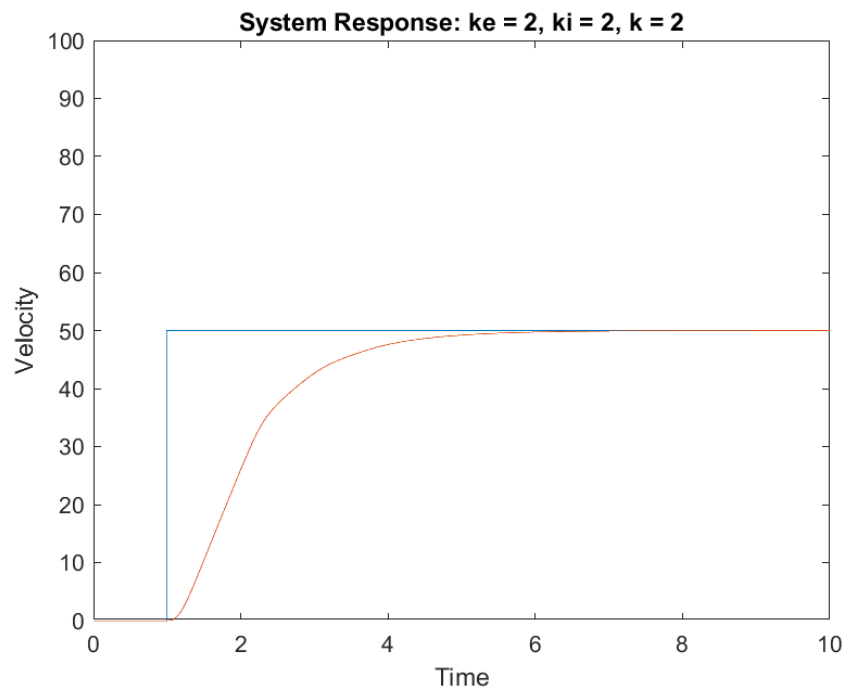
Μεταβολές Απόκρισης Συστήματος για Διαφορετικές Τιμές K_i



Εικόνα 15: Απόκριση Συστήματος για $K_e = 2$, $K_I = 0.5$ και $K = 2$

Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time) = **0.5606236 sec**

Υπερύψωση (Overshoot) = **30.96355%**

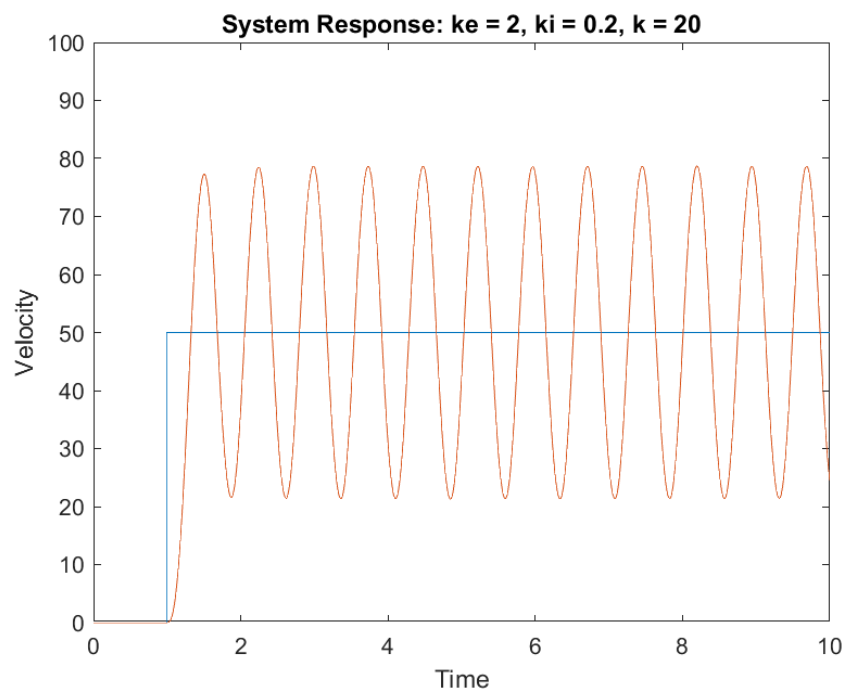


Εικόνα 16: Απόκριση Συστήματος για $K_e = 2, K_I = 2$ και $K = 2$

Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time) = **1.984560 sec**

Υπερύψωση (Overshoot) = **0**

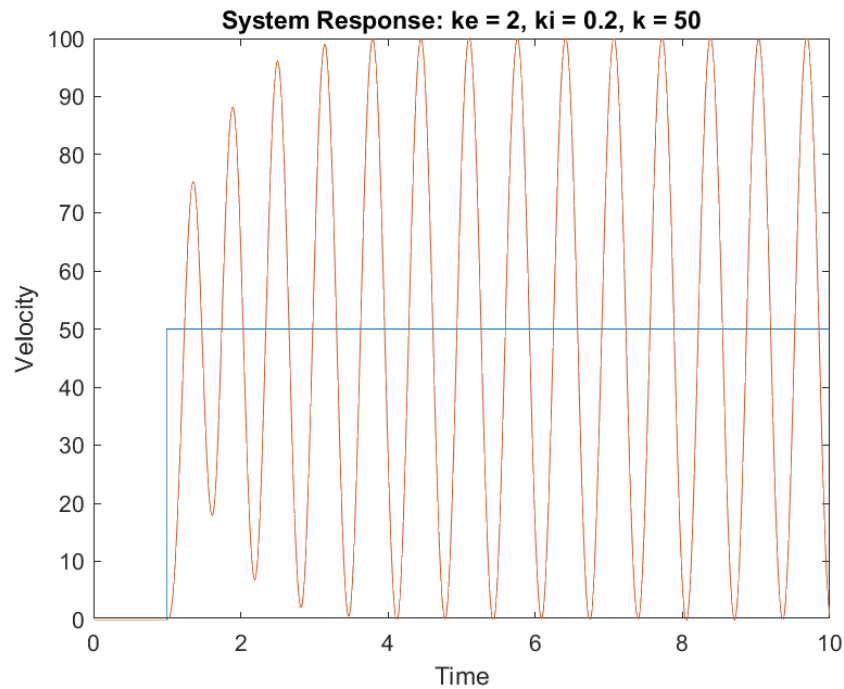
Μεταβολές Απόκρισης Συστήματος για Διαφορετικές Τιμές K



Εικόνα 17: Απόκριση Συστήματος για $K_e = 2, K_I = 0.2$ και $K = 20$

Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time) = **0.2617603 sec**

Υπερύψωση (Overshoot) = **221.9365%**



Εικόνα 18: Απόκριση Συστήματος για $K_e = 2$, $K_I = 0.2$ και $K = 50$

Χρόνος Ανύψωσης (Rise Time) = **0.1409024 sec**

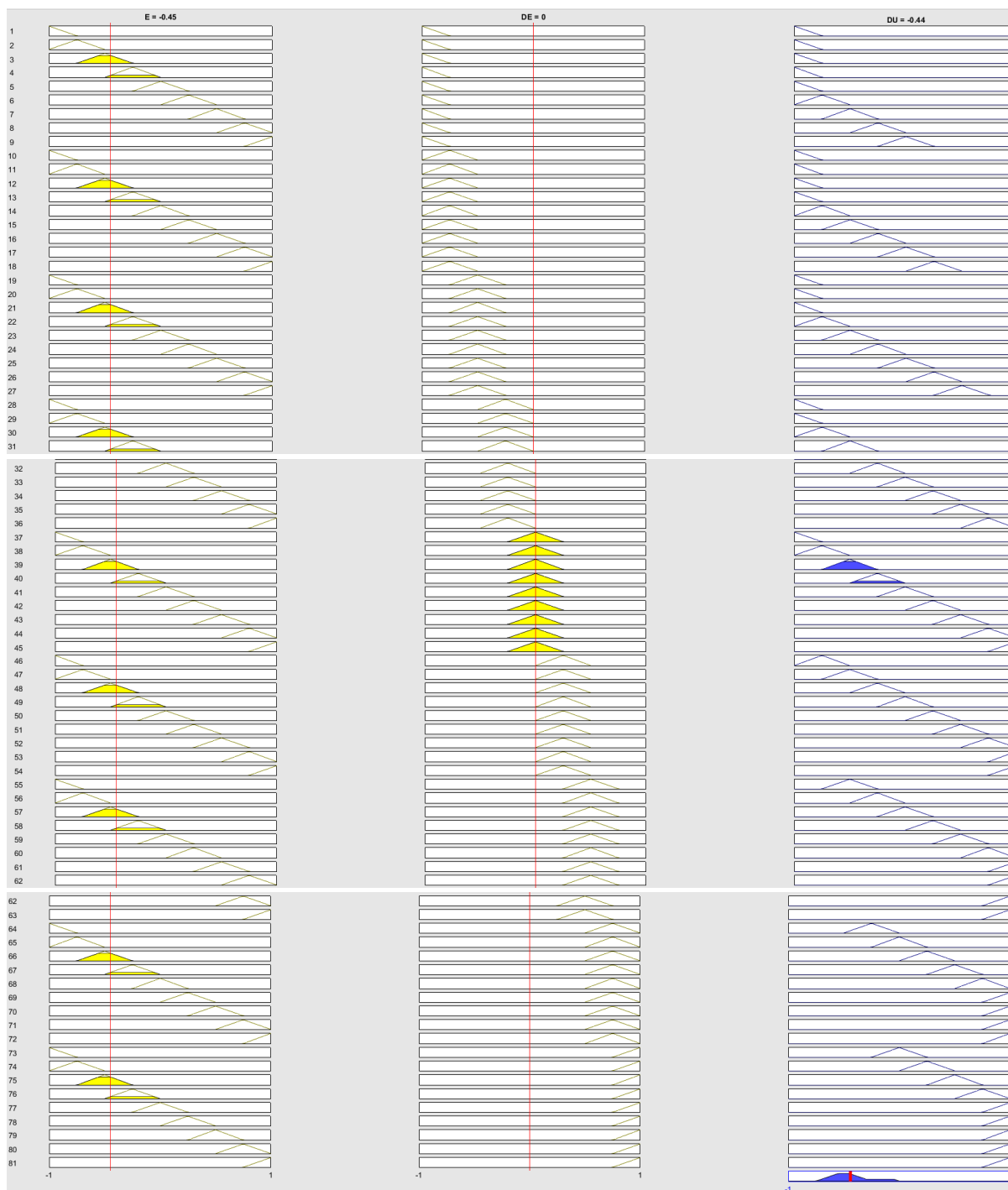
Υπερύψωση (Overshoot) = **1484.120%**

Συμπεράσματα:

Το υπό μελέτη σύστημα φαίνεται να είναι εξαιρετικά ασταθές για τις αρχικές τιμές των κερδών του ασαφούς ελεγκτή, καθώς και στις περισσότερες περιπτώσεις που εξετάστηκαν κατά την παραπάνω διερεύνηση, κάτι που φαίνεται ξεκάθαρα από τις ακραίες τιμές υπερύψωσης που προέκυψαν. Ωστόσο, φαίνεται να σταθεροποιείται ικανοποιητικά για τις “ιδανικές” τιμές των κερδών που προέκυψαν μέσω της μεθόδου “trial and error”, καθώς για αυτές πληρούνται οι απαιτούμενες προδιαγραφές, χωρίς όμως να επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση σε σχέση με τον γραμμικό PI ελεγκτή. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι όσο πιο κοντά μεταξύ τους βρίσκονται οι τιμές των κερδών, τόσο περισσότερο σταθεροποιείται η απόκριση του συστήματος, σε σημείο που, για ίσες τιμές των τριών κερδών, εξαλείφεται η υπερύψωση. Τέλος, με την αύξηση του κέρδους K , μειώνεται ο σημαντικά ο χρόνος ανύψωσης, ωστόσο το σύστημα οδηγείται ξανά σε υψηλές τιμές υπερύψωσης.

Β) Λειτουργία της Βάσης του Ελεγκτή και Συμπεράσματα

Ζητούμενο του παρόντος ερωτήματος είναι η εισαγωγή διέγερσης στο σύστημα, ώστε να ισχύει ότι “**E is NM**” και “**ΔE is ZR**”. Επομένως, μέσω του εργαλείου Ruleview, δόθηκαν οι (κανονικοποιημένες) τιμές **-0.45** και **0** στις μεταβλητές εισόδου E και ΔE αντίστοιχα. Η γραφική αποτύπωση της διέγερσης των κανόνων του ασαφούς ελεγκτή φαίνεται στην Εικόνα 19.



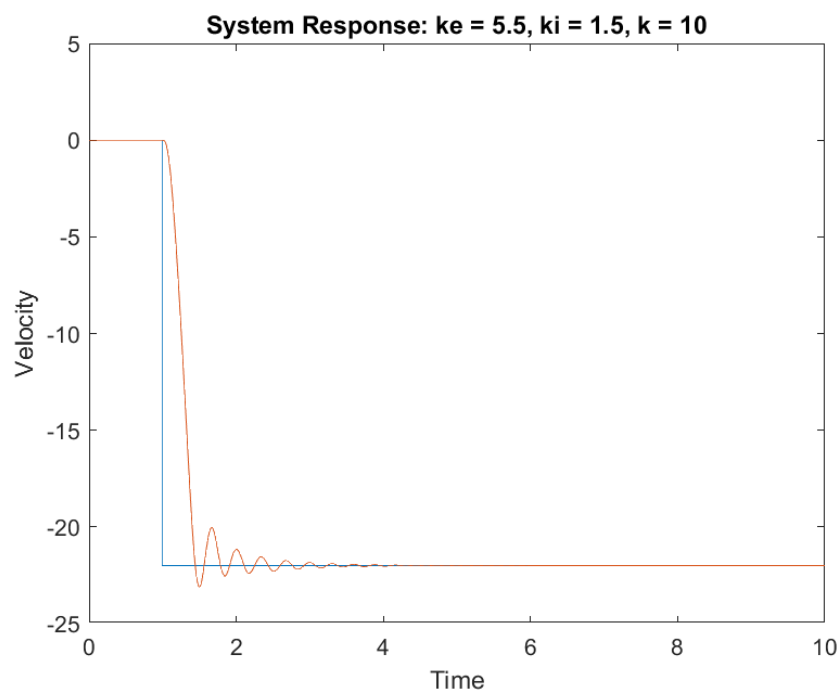
Εικόνα 19: Διέγερση Κανόνων για “E is NM” και “ΔE is ZR”

Όπως αποτυπώνεται και στην παραπάνω εικόνα, οι κανόνες που διεγείρονται είναι:

- Για τη μεταβλητή εισόδου E : Κανόνες 3, 4, 12, 13, 21, 22, 30, 31, 39, 40, 48, 49, 57, 58, 66, 67, 75, 76
- Για τη μεταβλητή εισόδου ΔE : Κανόνες 37 – 45
- Για τη μεταβλητή εξόδου ΔU : Κανόνες 39 και 40

Στη μέθοδο αποσαφοποίησης Center of Sums (COS), η διαδικασία περιλαμβάνει τον υπολογισμό του κέντρου βάρους της αθροιστικής ασαφούς επιφάνειας, αλλά αντί να συνδυάζονται τα σύνολα μέσω της υπέρθεσης, όπως γίνεται στη μέθοδο του Κέντρου Βάρους (COA), εδώ τα επιμέρους σύνολα αθροίζονται άμεσα. Κάθε ενεργοποιημένος κανόνας παράγει το δικό του ασαφές σύνολο, και το συνολικό άθροισμα αυτών των συνόλων χρησιμοποιείται για να βρεθεί το σημείο του κέντρου βάρους. Η μέθοδος COS τείνει να παράγει μια πιο συντηρητική έξοδο σε σύγκριση με την COA, διατηρώντας μεγαλύτερη ακρίβεια στην επίλυση συγκεκριμένων ασαφών συνθηκών, καθώς αποφεύγονται μεγάλες υπερθέσεις μεταξύ των συνόλων.

Η κανονικοποιημένη τιμή που προκύπτει από την μέθοδο COS για τη μεταβλητή εξόδου είναι ίση με **-0.44**. Με την αποκανονικοποίησή της, (δηλαδή τον πολλαπλασιασμό επί 50), προκύπτει η τιμή **-22**, η οποία εισάγεται στο σύστημα ως **αναφορά (reference)**. Για τη συγκεκριμένη τιμή της ταχύτητας ως αναφορά και για τις ιδανικές τιμές των κερδών που υπολογίστηκαν στο ερώτημα (α), δηλαδή $K_e = 5.5$, $K_I = 1.5$ και $K = 10$, υπολογίζεται η απόκριση του συστήματος, η οποία αποτυπώνεται στην Εικόνα 20.

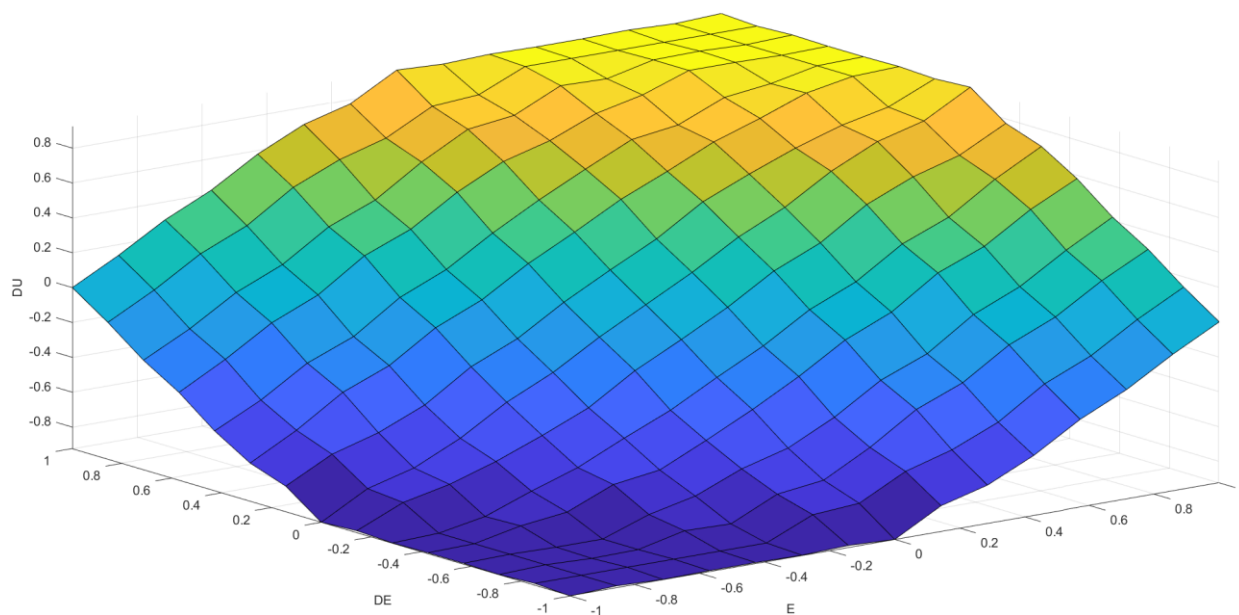


Εικόνα 20: Απόκριση Συστήματος για $K_e = 5.5$, $K_I = 1.5$ και $K = 10$ (Σήμα Αναφοράς = $-22 * \text{stepfun}$)

Παρατηρείται πως, παρόλο που αρχικά εμφανίζεται μια υπολογίσιμη υπερύψωση, το σύστημα αποκρίνεται σχετικά γρήγορα και το σήμα αναφοράς προσεγγίζεται σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό.

Γ) Ερμηνεία του Νόμου Ελέγχου του FLC

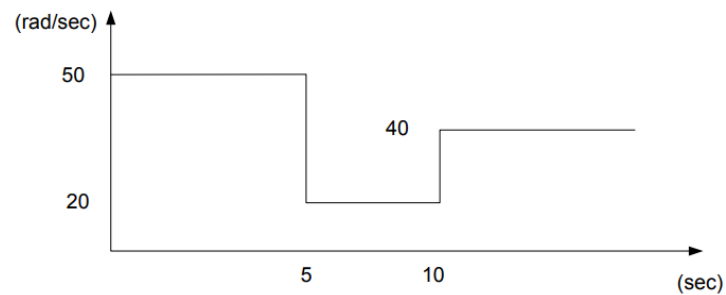
Με την χρήση της εντολής `gensurf(fis)` δημιουργείται η τρισδιάστατη απεικόνιση της εξόδου $Du(k)$ συναρτήσει των εισόδων $E(k)$ και $DE(k)$. Όταν το σφάλμα και η μεταβολή του σφάλματος είναι αρνητικές, τότε και η έξοδος θα είναι αρνητική για να διορθώσει το σφάλμα, ενώ αν αυξάνονται το σφάλμα και η μεταβολή του σφάλματος, έξοδος θα γίνει θετική για να επιδράσει και να το μειώσει. Αν το σφάλμα και η μεταβολή τείνουν στο μηδέν, τότε και έξοδος του ελεγκτή θα τείνει στο μηδέν μιας και το σύστημα έχει φτάσει στην επιθυμητή έξοδο στην μόνιμη κατάσταση.



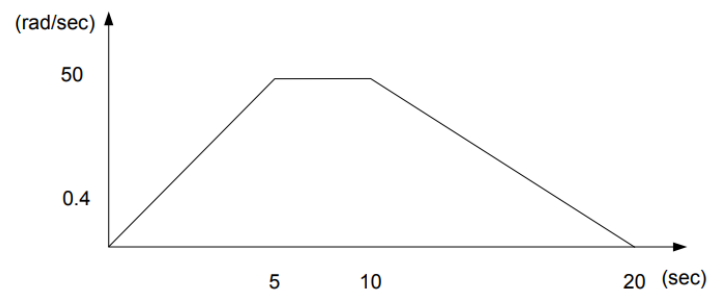
Εικόνα 21: Επιφάνεια Εξόδου του Ασαφούς Συστήματος Συναρτήσει των Εισόδων

- Σενάριο 2 -

Στο δεύτερο σενάριο της εργασίας, εξετάζεται το κατά πόσο το σύστημα έχει τη δυνατότητα να ακολουθήσει μια πορεία αναφοράς σε ικανοποιητικό βαθμό. Για να εξακριβωθεί αυτό, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά προφίλ του σήματος αναφοράς, τα οποία απεικονίζονται στις Εικόνες 22 και 23.

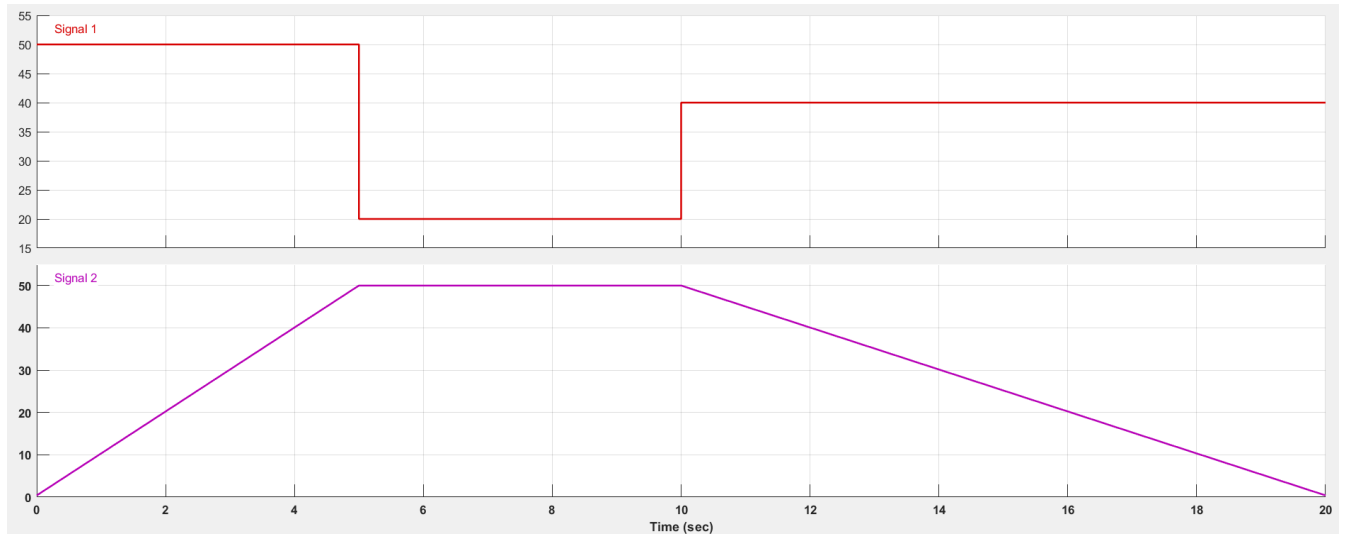


Εικόνα 22: Πρώτο Προφίλ Σήματος Αναφοράς



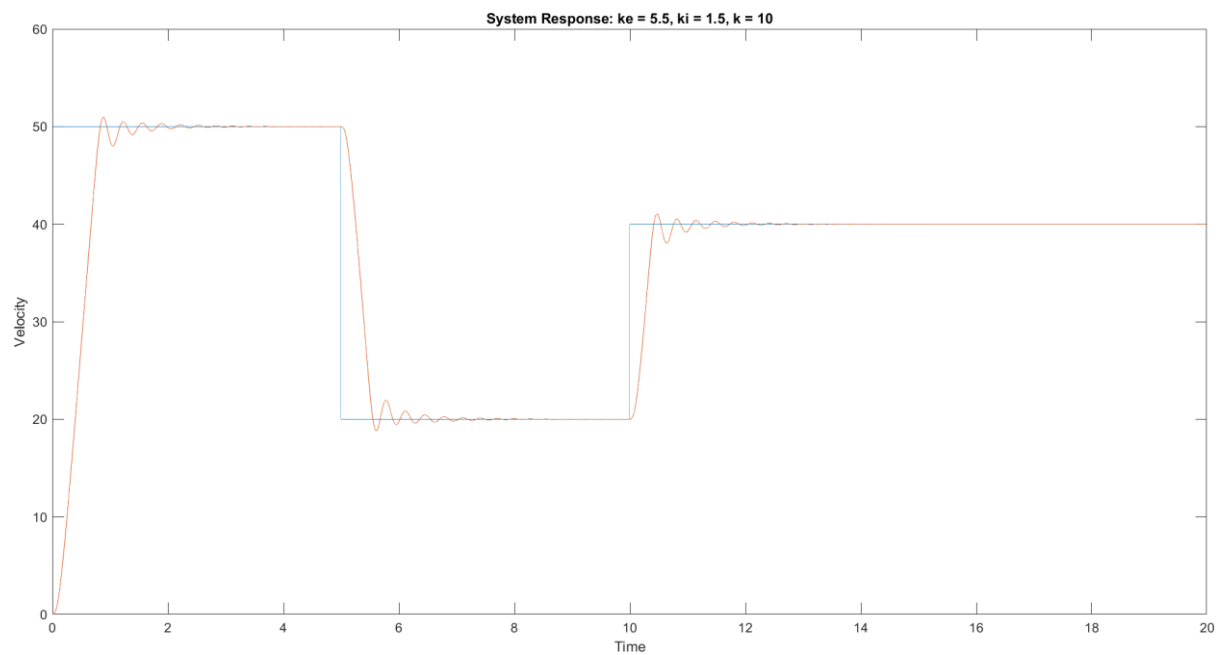
Εικόνα 23: Δεύτερο Προφίλ Σήματος Αναφοράς

Αρχικά, δημιουργούνται τα δύο προφίλ του σήματος αναφοράς μέσω του εργαλείου Signal Builder του Simulink και εισάγονται στο σύστημα κλειστού βρόχου.

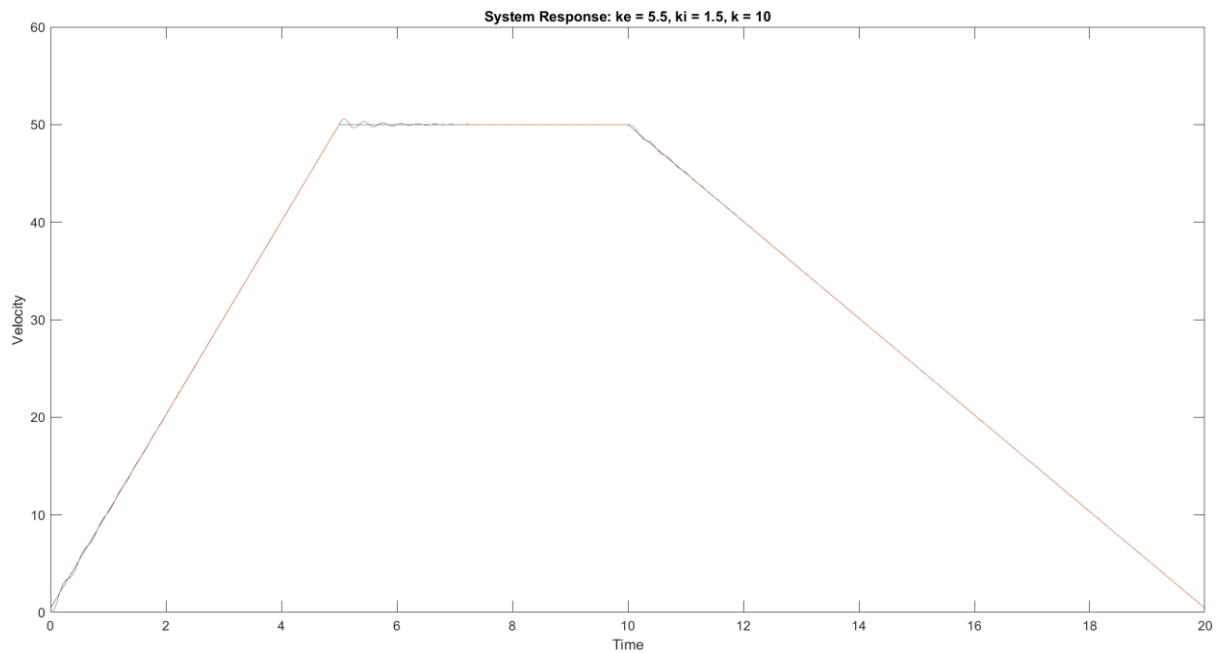


Εικόνα 24: Δημιουργία Σημάτων Αναφοράς στο *Signal Builder*

Για τις προαναφερθείσες “ιδανικές” τιμές των κερδών του ασαφούς ελεγκτή που σχεδιάστηκε προηγουμένως, δηλαδή για $K_e = 5.5$, $K_i = 1.5$ και $K = 10$, υπολογίζονται οι αποκρίσεις του συστήματος κλειστού βρόχου για κάθε προφίλ του σήματος αναφοράς ξεχωριστά.



Εικόνα 25: Απόκριση Συστήματος στο Πρώτο Προφίλ του Σήματος Αναφοράς



Εικόνα 26: Απόκριση Συστήματος στο Δεύτερο Προφίλ του Σήματος Αναφοράς

Το σύστημα ανταποκρίνεται αρκετά αποτελεσματικά και γρήγορα σε κάθε αλλαγή της θέσης του, αλλά πριν σταθεροποιηθεί παρουσιάζει ταλαντώσεις, οι οποίες, όμως, δεν έχουν μεγάλο βαθμό υπερύψωσης. Εάν επιδιώκεται η μείωση αυτών των ταλαντώσεων, θα πρέπει να αυξηθεί το κέρδος του ολοκληρωτικού μέρους, κάτι που θα οδηγήσει σε μεγαλύτερο χρόνο ανόδου. Για το δεύτερο προφίλ του σήματος, που περιλαμβάνει εισόδους ράμπας, το σύστημα ακολουθεί την πορεία αναφοράς αρκετά ικανοποιητικά και αποδίδει καλύτερα σε σύγκριση με τις βηματικές αποκρίσεις του πρώτου προφίλ.

Βιβλιογραφικές Πηγές

1. Γιάννης Μπουτάλης, Γεώργιος Συρακούσης, “Υπολογιστική Νοημοσύνη & Εφαρμογές”, Ξάνθη 2019
2. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, “Σύγχρονα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου”, 13η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα