ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ 1: ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

[ΡΟΗ Σ] 7ο ΕΞΑΜΗΝΟ 2019-2020

ΟΜΑΔΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ: Γ2

ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ: Τετάρτη 27/11 16.00-17.30

Ασημάκη Γεωργία-Γρηγορία, Α.Μ.:03116197
Γιαννιός Γεώργιος-Ταξιάρχης, Α.Μ.:03116156
Κρανιάς Δημήτριος, Α.Μ.:03116030
Ντόκου Μυρσίνη, Α.Μ.:03116179
Χατζηαντωνίου Παυλίνα, Α.Μ.:03116186

2η Εργαστηριακή Άσκηση

Έλεγχος Pendubot

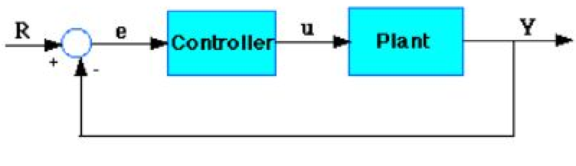
Στόχος Εργαστηρίου-Περίληψη

Στόχος του εργαστηρίου ήταν ο έλεγχος μιας άρθρωσης ενός ρομποτικού βραχίονα με δύο βαθμούς ελευθερίας. Στο πρώτο μέρος (*γραμμικό μοντέλο*), εξετάστηκε η επίδραση των όρων *Kp,Kd* (πλεονεκτήματα-αδυναμίες) στην απόκριση του συστήματος και συγκεκριμένα στο σφάλμα μόνιμης κατάστασης, στη μέγιστη υπερύψωση και στο χρόνο ανύψωσης. Στο δεύτερο μέρος, (*μη γραμμικό μοντέλο*), υλοποιήθηκε ελεγκτής, ο οποίος ισορροπούσε τον σύνδεσμο του ρομποτικού βραχίονα σε κατακόρυφη θέση (θέση ασταθούς ισορροπίας-ανάλογο ανάστροφου εκκρεμούς).

Θεωρητικό Μέρος

PD Ελεγκτής:

Σε ένα υπο-έλεγχο σύστημα (Plant), για την επίτευξη μιας επιθυμητής εξόδου(Y), χρησιμοποιούμε συχνά PD ελεγκτή(Controller).Σχηματικά :

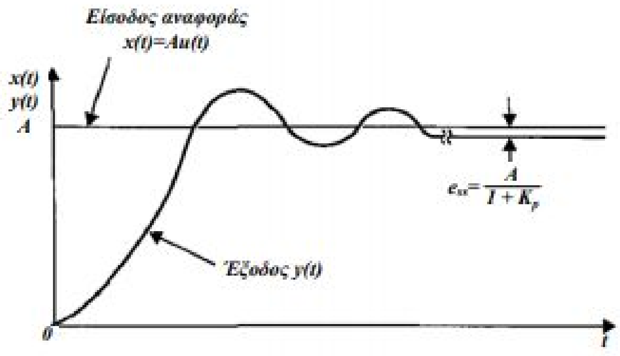


Η συνάρτηση μεταφοράς του PD Controller είναι : $C(s) = K_p + K_d \cdot s$
όπου Kp Αναλογικό, Kd Διαφορικό Κέρδος.

Είναι γνωστό ότι καθένα από αυτά τα κέρδη επιδρά στην απόκριση του συστήματος κλειστού βρόχου. Πιο ειδικά η χρήση *Αναλογικού* ελεγκτή (Kp) συντελεί στην ελάττωση του χρόνου ανύψωσης, αλλά δεν οδηγεί στην εξάλειψη του σφάλματος μόνιμης κατάστασης. Από την άλλη ο Διαφορικός Έλεγχος (Kd), μειώνει την υπερύψωση(overshoot) και βελτιώνει την μεταβατική απόκριση.

<u>Σφάλματα Συστημάτων Τύπου 0 με είσοδο βηματική συνάρτηση και P έλεγχο</u> **:**

Εάν ένα σύστημα, είναι Τύπου-0 (καμία μηδενική ρίζα στον παρονομαστή της συνολικής συνάρτησης μεταφοράς), τότε το σύστημα έχει την ακόλουθη απόκριση:



Αν ονομάσουμε σαν G(s) το γινόμενο C(s) του Controller, και του P(s) του υπό ελέγχου συστήματος έχουμε :

$$Y(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)}$$

$$\acute{O}\mu\omega\varsigma\ E(s) = Y(s) - R(s) = \frac{R(s)}{1+G(s)}$$

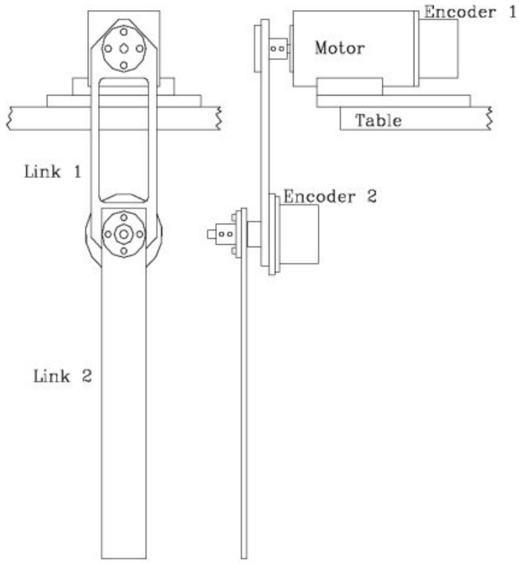
όπου R(s) ο Laplace εισόδου r(t) (Βηματική Συνάρτηση). Στην περίπτωση αυτή το σφάλμα μόνιμης κατάστασης είναι :

$$e_{ss} = \lim_{t\to\infty} e(t) = \lim_{s\to 0} (s \cdot E(s)) = \frac{1}{1+G(s=0)} = \frac{1}{1+Kp} \quad (1)$$

και το σφάλμα μόνιμης κατάστασης είναι πάντα διάφορο του μηδενός αφού το Kp παίρνει πάντα πεπερασμένες τιμές. Για το λόγο λοιπόν αυτον, δεν μπορεί ο Kp ελεγκτής να μηδενίσει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη της δεύτερης εργαστηριακής άσκησης περιλάμβανε τον μηχανισμό *pendubot* ο οποίος φαίνεται παρακάτω :



Πρόκειται για ένα ρομποτικό βραχίονα με δύο συνδέσμους και δύο αρθρώσεις. Από αυτές μόνο η μία άρθρωση ήταν ελεγχόμενη από ηλεκτρικό μοτέρ.Για το λόγο αυτό (δύο βαθμοι ελευθερίας, έλεγχος μιας μόνο άρθρωσης), το σύστημα ήταν *underactuated.*

Το παραπάνω σύστημα συνδεόταν με τον υπολογιστή του εργαστηρίου από που μέσω του λογισμικού *Matlab* τροποποιούσαμε τις τιμές *Kp, Kd* του ελεγκτή μας. Τέλος, μέσω *τερματικών εντολών* στέλναμε οδηγίες στο ρομποτικό βραχίονα, ενώ στο τέλος κάθε πειράματος παρατηρούσαμε τις αποκρίσεις στον υπολογιστή και καταγράφαμε τις τιμές του σφάλματος μόνιμης κατάστασης, του overshoot και του χρόνου ανύψωσης

Στόχος μας ήταν ο κάτω σύνδεσμος του μηχανισμού να φτάσει σε γωνία -60 °

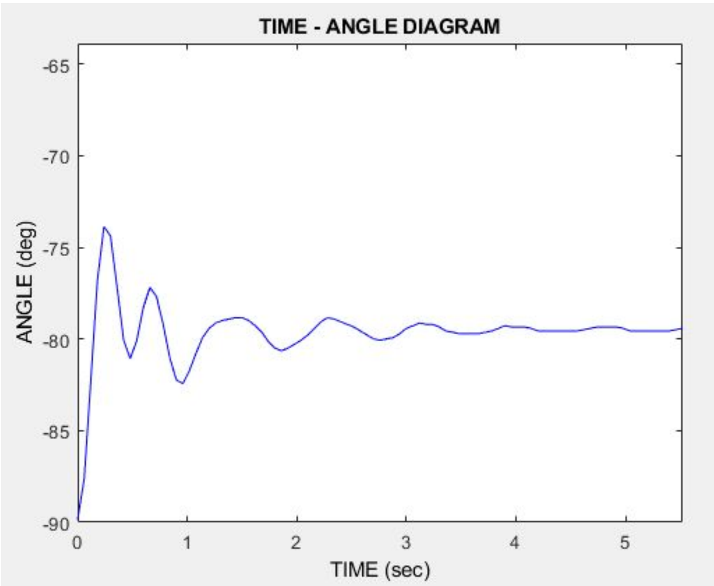
Σχολιασμός Αποτελεσμάτων
Α.Παραμετροποίηση PD χωρίς αντιστάθμιση

Το υπό έλεγχο σύστημα περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$u = K_p\left(x_d - x_r\right) + K_d\left(\dot{x}_d - \dot{x}_r\right)$$

,όπου *u* η ροπή του κινητήρα. Στόχος είναι: $x_d = -60° \;\; \kappa\alpha\iota \;\; \dot{x}_d = 0$

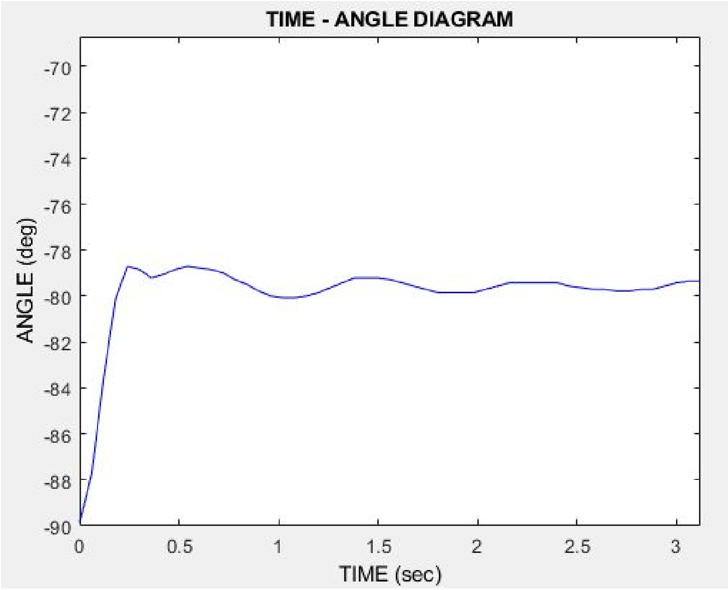
- **Kp=1, Kd=0**



Σφάλμα Μ.Κ	**Χρόνος Ανύψωσης**	**Overshoot**
19.416	0.18	0.0968

Παρατηρούμε ότι με τις τιμές αυτές είμαστε στις -80° και επιθυμούμε να φτάσουμε στις -60°.

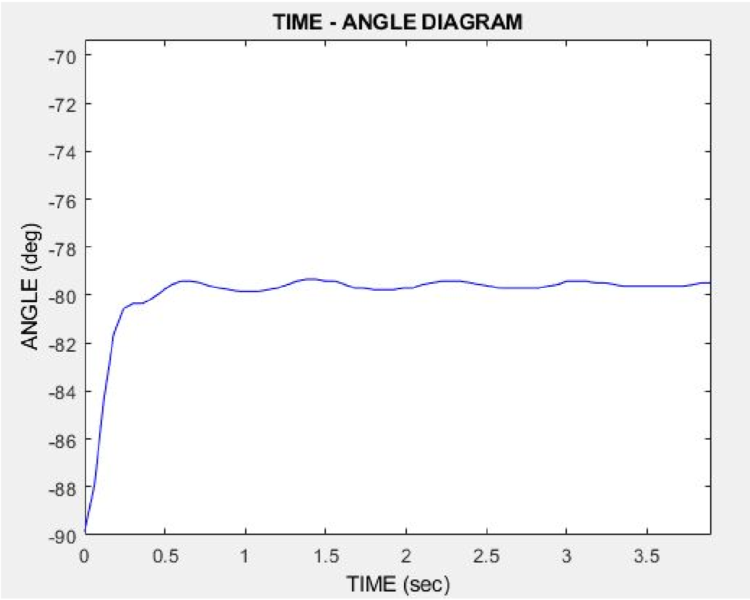
- **Kp=1, Kd=0.15**



Σφάλμα Μ.Κ	**Χρόνος Ανύψωσης**	**Overshoot**
19.344	0.24	0.0113

Βάζοντας και διαφορικό έλεγχο παρατηρήσαμε ότι το *overshoot* μειώθηκε αλλα αυξήθηκε λίγο ο χρόνος ανύψωσης.

- **Kp=1, Kd=0.25**

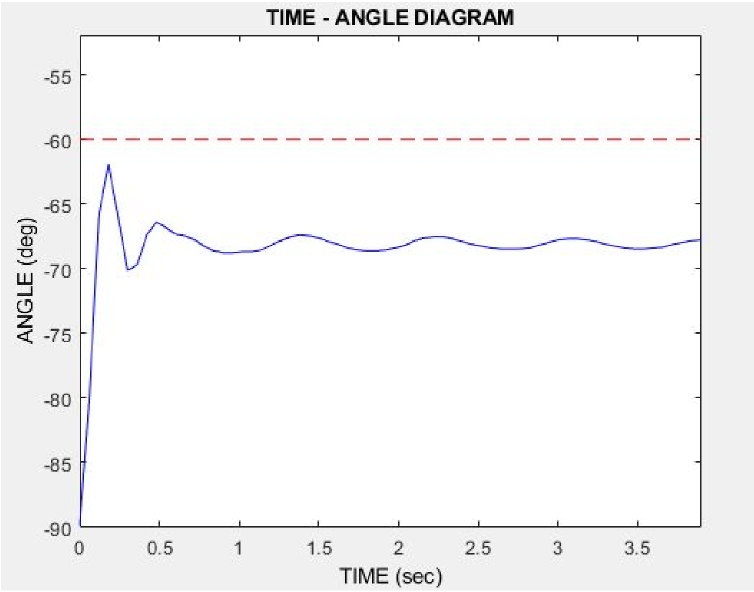


Σφάλμα Μ.Κ	**Χρόνος Ανύψωσης**	**Overshoot**
19.488	0.54	0.0025

Εδώ παρατηρήσαμε ότι μειώθηκε και άλλο το *overshoot,* αλλά υπερδιπλασιάστηκε ο χρόνος ανύψωσης. Παρατηρήσαμε λοιπόν ότι υπάρχει κρίσιμη απόσβεση εκεί που το σύστημα τείνει να κινηθεί ασυμπτωματικά με επιθυμητή έξοδο. Για το λόγο αυτό για Kd =0.25 έχουμε αρκετά ικανοποιητική απόκριση.

Γενικά, παρατηρούμε ότι κρατώντας σταθερό το Kp και αυξάνοντας το Kd, το overshoot μειώνεται αλλά αυξάνεται ο χρόνος ανύψωσης(ώστε να φτάσει πιο ομαλά στην μόνιμη κατάσταση). Βέβαια το σφάλμα Μ.Κ. παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστο από το Kd(εκτός μερικών μικρών μεταβολών).

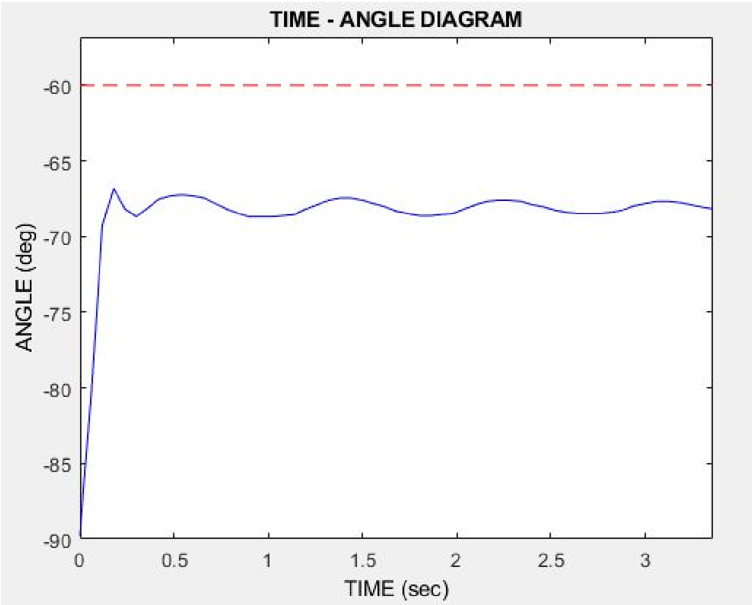
- **Kp=5, Kd=0.25**



Σφάλμα Μ.Κ	**Χρόνος Ανύψωσης**	**Overshoot**
7.752	0.12	0.1018

Κρατώντας σταθερή την τιμη του Kd και μεταβάλλοντας την τιμή του Kp, το σφάλμα Μ.Κ. ελαττώθηκε, ενώ το *overshoot* αυξήθηκε(γιατί χάλασε η αναλογία Kp-Kd).

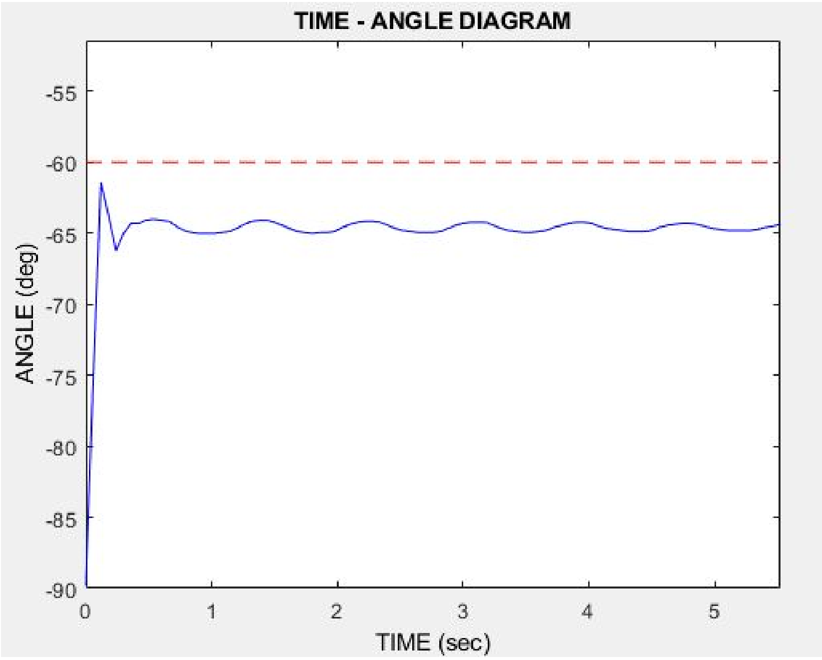
- **Kp=5, Kd=0.40**



Σφάλμα Μ.Κ	**Χρόνος Ανύψωσης**	**Overshoot**
8.184	0.18	0.0238

Αυξήσαμε και άλλο το Kp προκειμένου να προσεγγίσουμε την επιθυμητη έξοδο (κόκκινη μπάρα). Βλέπουμε όμως ότι υπάρχει και πάλι σφάλμα Μ.Κ.

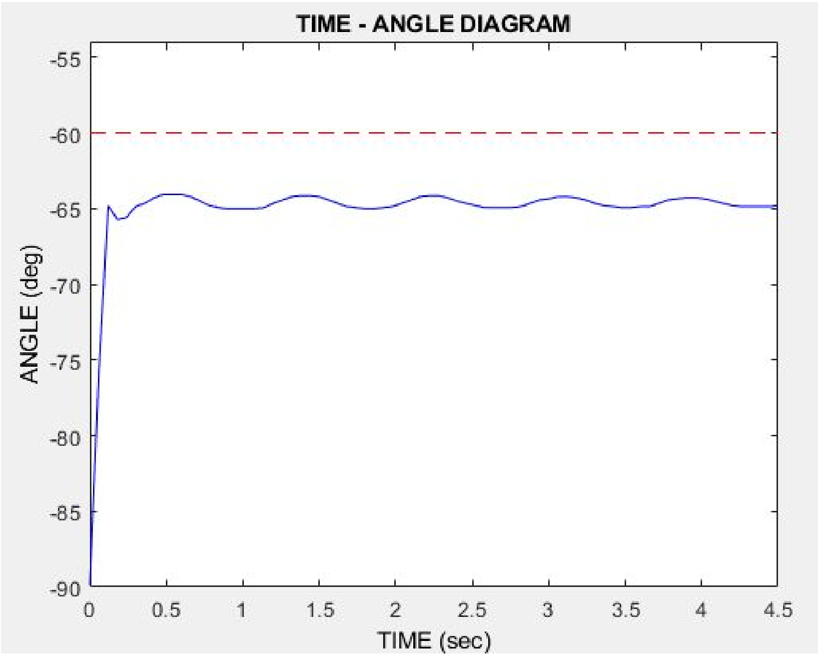
- **Kp=10, Kd=0.5**



Σφάλμα Μ.Κ	**Χρόνος Ανύψωσης**	**Overshoot**
4.4368	0.12	0.515

Αυξάνοντας και άλλο το Kp, πήραμε πολύ μικρό σφάλμα Μ.Κ και overshoot αλλά ο χρόνος ανύψωσης μεγάλωσε αισθητά.

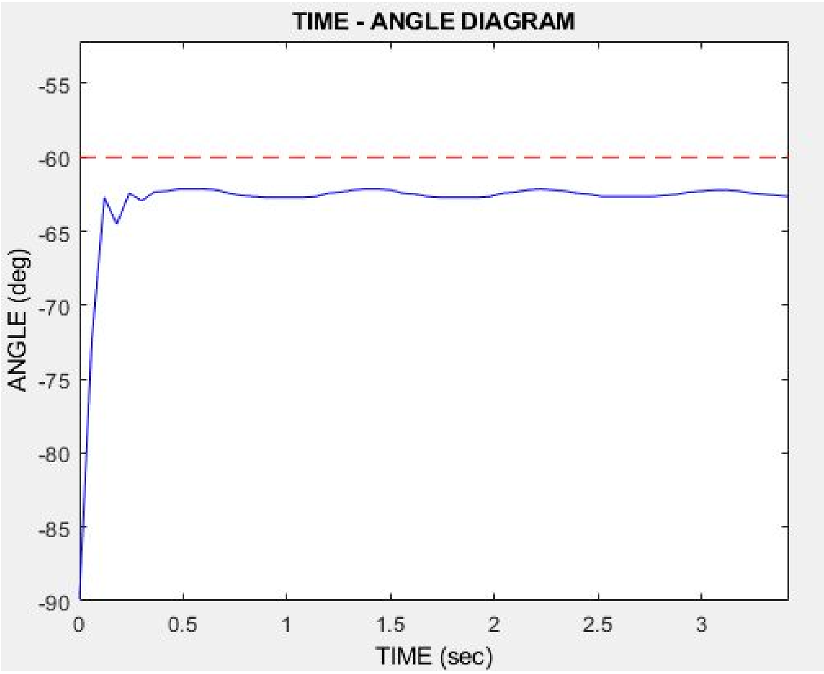
- **Kp=10, Kd=0.65**



Σφάλμα Μ.Κ	**Χρόνος Ανύψωσης**	**Overshoot**
4.8	0.12	0.0126

Κρατώντας σταθερό το Kp και αυξάνοντας Kd αυξήθηκε και το σφάλμα Μ.Κ.

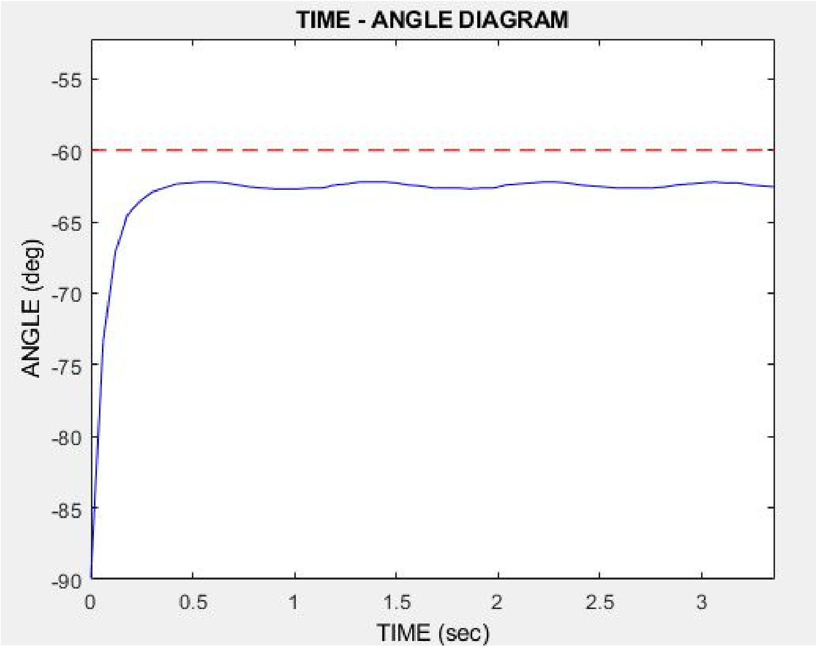
- **Kp=20, Kd=0.95**



Σφάλμα Μ.Κ	Χρόνος Ανύψωσης	Overshoot
2.64	0.12	0.0088

Αυξήσαμε σημαντικά και τα δύο κέρδη και είδαμε ότι το σύστημα πλησιάζει την επιθυμητή έξοδο με μικρό μάλιστα overshoot.

❖ **Kp=20, Kd=1.3**



Σφάλμα Μ.Κ	**Χρόνος Ανύψωσης**	**Overshoot**
2.568	0.36	0.0063

Κρατώντας σταθερό Kp αλλά αυξάνοντας ελάχιστα το Kd πετύχαμε μια σχετικά ικανοποιητική περίπτωση.

Συμπέρασμα απο παραμετροποίηση PD

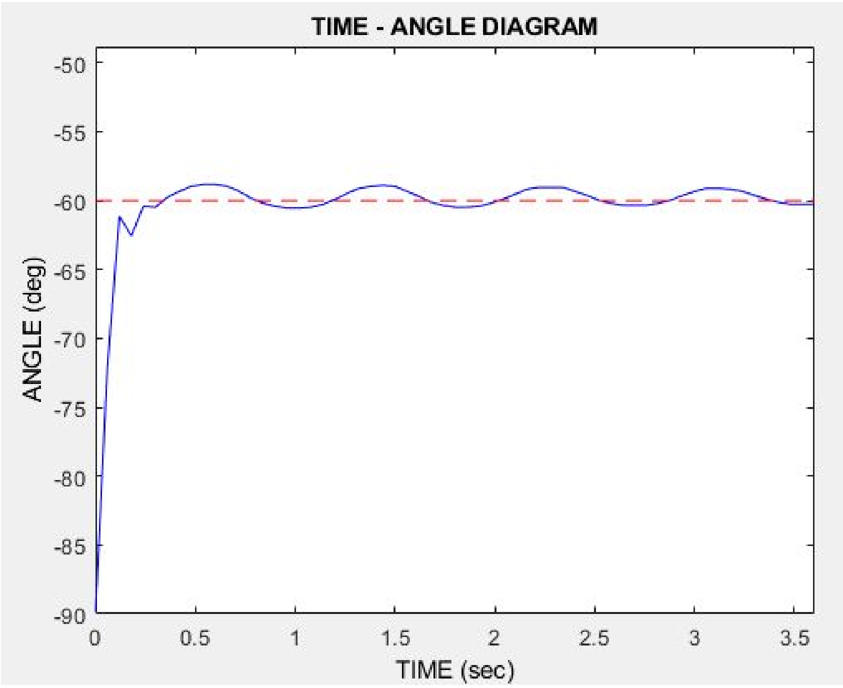
Αυτό που έγινε αισθητό απο τα παραπάνω είναι ότι δεν μπορούμε για οποιαδήποτε τιμές Kp και Kd να επιτύχουμε την επιθυμητή έξοδο και να μηδενίσουμε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Αυτό συμβαίνει για δύο λόγους. Πρώτον με τη χρήση μόνο P ελεγκτή, το σφάλμα, όπως αναφέρεται στη θεωρία, δίνεται από τον τύπο(1), (βλ.Θεωρητικά στοιχεία). Αυτό σημαίνει ότι για να μηδενιστεί το σφάλμα, πρέπει το Kp να γίνει άπειρο(άτοπο-λαμβάνει πεπερασμένες τιμές). Δέυτερον υπάρχει η δύναμη της βαρύτητας η οποία εμποδίζει την ελεύθερη κίνηση του συνδέσμου. Για το λόγο αυτό, πρέπει να αντισταθμίσουμε τη δύναμη της βαρύτητας. Οπότε προσθέτω έναν τ_g όρο και το σύστημα γίνεται:

$$u = K_p\left(x_d - x_r\right) + K_d\left(\dot{x}_d - \dot{x}_r\right) + \tau_g$$

όπου το u περιγράφει τη ροπή του κινητήρα.

Παραμετροποίηση PD με αντιστάθμιση τ_g

- **Kp=20, Kd=0.95 με τ_g**

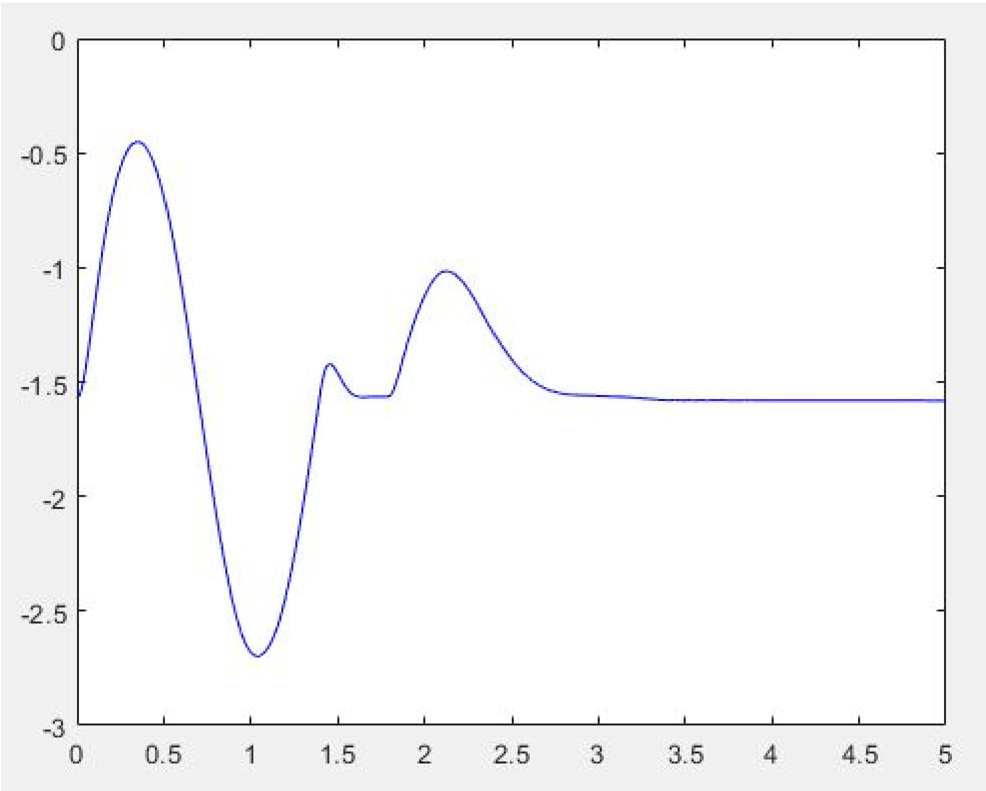


Σφάλμα Μ.Κ	Χρόνος Ανύψωσης	Overshoot
0.264	0.36	0.251

Παρατηρούμε ότι το σύστημα σχεδόν ακολουθεί την έξοδο. Βέβεαια παρατηρούνται ορισμένες ταλαντώσεις (κυρίως στην μεταβατική κατάσταση) γεγονός που εξηγείται αν λάβει κανείς υπόψη ότι το σύστημα είναι underactuated και ο δευτερος σύνδεσμος ελέγχεται μόνο έμμεσα από την άρθρωση 1(πάνω-πανω).

Μελέτη Μη γραμμικού Ελεγκτή

Τέλος εξετάσαμε και την περίπτωση ενός μη γραμμικού ελεγκτή δύο φάσεων. Η μια φάση φρόντιζε για την επιθυμητή γωνία, ενώ η δεύτερη να φέρει το σύστημα στη θέση ισορροπίας στη Μ.Κ.Ουσιαστικά αυτό που κάναμε ήταν γραμμικοποίηση(με τη βοήθεια *Taylor*) απο -90° στις 180° για να μεταβεί το σύστημα στην επιθυμητή θέση εξισορρόπησης(θέση ασταθούς ισορροπίας). Μέσω αυτής της διακριτοποίησης γνωρίζαμε την απόκλιση σε κάθε θέση.



Παίρνοντας την κυματομορφή της απόκρισης, παρατηρήσαμε ότι το σύστημα μετά από κάποιες ταλαντώσεις ισορροπεί. Μάλιστα οι ταλαντώσεις στη κίνηση του δεύτερου (κάτω) συνδέσμου στη μεταβατική κατάσταση, μεταφέρονται στη κίνηση του πάνω.Αξιζει να παρατηρήσει κανείς πως , αν προσθέσουμε, στο σύστημα τη στιγμή που βρίσκεται στη θέση αυτή, μια μικρή είσοδο ισορροπεί και πάλι.