

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΣΕΡΡΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΤΕ

**Έλεγχος θέσης μπάλας σε μία ράβδο
χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα της QUANSER**

Πτυχιακή Εργασία

Κύρκος Αντώνης 2239

**Επιβλέπων : Δρ. Σταύρος Βολογιαννίδης, Επιστημονικός
συνεργάτης**

ΣΕΡΡΕΣ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2013

Περίληψη

Στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι η εξοικείωση με το μοντέλο "Μπάλα και Δοκός", που στη συνέχεια θα αναφέρεται και ως BB01, της εταιρίας Quanser και η λεπτομερής περιγραφή της κατασκευής, των εξαρτημάτων, καθώς του μαθηματικού μοντέλου και η ξενάγηση στο μοντέλο simuling που υπάρχει διαθέσιμο.

Περιεχόμενα	
Εισαγωγή	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	
1. QUANSER "Μπάλα και Δοκός" -Συναρμολόγηση -Εξαρτήματα -Δοκιμές	5
1.1 Περιγραφή συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'	5
1.2 Εξαρτήματα συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'	5
1.3 Προδιαγραφές συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'	7
1.4 Συναρμολόγηση συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'	9
1.5 Βαθμονόμηση συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'	9
1.6 Διαδικασία Καλωδίωσης συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'	11
1.6.1. Ονοματολογία καλωδίων	11
1.6.2.Σύνδεση χρησιμοποιώντας VoltPAQ-X1	11
1.7 Δοκιμή σωστής λειτουργίας συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'	16
1.7.1 Αισθητήρας θέσης μπάλα	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο	
2. Μοντελοποίηση και έλεγχος συστήματος "μπάλα και δοκός"	18
2.1 Εισαγωγή	18
2.2 Μη γραμμική εξίσωση κίνησης	19
2.3 Προσθήκη SRV02 Dynamics	21
2.4 Απόκτηση συνάρτησης μεταφοράς	22
2.5 Επιθυμητή Απόκριση Ελέγχου	22
2.5.1 Προδιαγραφές στο πεδίο του χρόνου	23
2.6 Σχεδιασμός ελέγχου συστήματος "Μπάλας και Δοκού"	23
2.7 Σχεδιασμός Εσωτερικού Ελεγκτή: SRV02 PV ελεγκτή θέσης	24
2.8 Σχεδιασμός εξωτερικού βρόχου	25
2.9 Σχεδιασμός ιδανικού PD ελεγκτή	26
2.10 Πρακτικός PD ελεγκτής	27
2.11 Ασκήσεις εργαστηρίου	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο	
3. Έλεγχος συστήματος "μπάλα και δοκός" μέσω matlab	39
3.1 Εισαγωγή	39
3.2 Έλεγχος με ιδανικό PD ελεγκτή	39
3.2.1 Προσομοίωση χωρίς να ασκούνται δυνάμεις πάνω στο σέρβο	39
3.2.2 Προσομοίωση ενώ ασκούνται δυνάμεις πάνω στο σέρβο	43
3.3 Έλεγχος με πρακτικό PD ελεγκτή και δυνάμεις πάνω στο σέρβο	46
3.3.1 Προσομοίωση με πρακτικό PD ελεγκτή	46
Συμπεράσματα	49
Βιβλιογραφία	50

Εισαγωγή

Στόχος της πτυχιακής εργασίας είναι η εξοικείωση με το μοντέλο "Μπάλα και Δοκός", που στη συνέχεια θα αναφέρεται και ως BB01, της εταιρίας Quanser και η λεπτομερής περιγραφή της κατασκευής, των εξαρτημάτων, καθώς του μαθηματικού μοντέλου και η ξενάγηση στο μοντέλο simulink που υπάρχει διαθέσιμο.

Τα θέματα που καλύπτονται στην εργασία είναι τα ακόλουθα:

- Μοντελοποίηση δυναμικής της μπάλας.
- Απόκτηση συνάρτησης μεταφοράς της λειτουργίας του συστήματος.
- Αξιολόγηση των προδιαγραφών σχεδιασμού του συστήματος.
- Σχεδιασμός ενός συστήματος ελέγχου για τη ρύθμιση της θέσης της μπάλας επί της δοκού.
- Προσομοίωση του ελέγχου της μπάλας για να εξασφαλιστεί ότι οι προδιαγραφές τηρούνται.
- Εφαρμογή των ελεγκτών για τη συσκευή "Μπάλα και Δοκός" και την αξιολόγηση της απόδοσής του.

Μεγάλο μέρος της πτυχιακής εργασίας βασίστηκε στα manuals της κατασκευάστριας εταιρίας Quanser.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1. QUANSER "Μπάλα και Δοκός" -Συναρμολόγηση - Εξαρτήματα -Δοκιμές

1.1 Περιγραφή συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'.

Το σύστημα Quanser "Μπάλα και Δοκός", που απεικονίζεται στην εικόνα 1.1, περιλαμβάνει ένα μεταλλικό ευθύγραμμο κομμάτι στο οποίο η μπάλα είναι ελεύθερη να κυλίσει. Το μεταλλικό κομμάτι είναι εφοδιασμένο με ένα γραμμικό μετατροπέα για τη μέτρηση της θέσης της μπάλας, έτσι εξάγεται ένα σήμα τάσης ρεύματος αναλογικό με τη θέση της μπάλας. Η μία πλευρά της μεταλλικής δοκού συνδέεται σε ένα μοχλοβραχίονα που μπορεί να συζευχθεί με το γρανάζι του Quanser SRV02, ελέγχοντας τη τιμή του σήματος τάσης που καθορίζεται από τη θέση της μπάλας. Η γωνία κλίσης της μεταλλικής μπάρας μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να ισορροπεί η μπάλα στην επιθυμητή θέση.



Εικόνα 1.1 Σύστημα Quanser "Μπάλα και Δοκός"

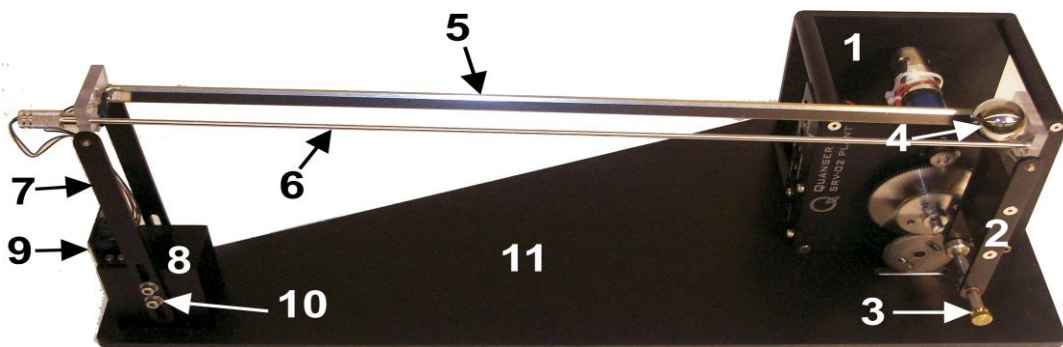
1.2 Εξαρτήματα συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'.

Τα εξαρτήματα του συστήματος "Μπάλα και Δοκός", παρατίθενται στον πίνακα 1.1 και επισημαίνονται στο εικόνα 1.2 που ακολουθούν.

ID	Εξάρτημα	ID	Εξάρτημα
1	SRV02	7	Βοηθητικός

			Βραχίονας
2	Μοχλός βραχίονα	8	Βάση Υποστήριξης
3	Ζεύξη με κοχλία	9	Αναλογικός μετρητής θέσης μπάλας
4	Ατσάλινη Μπάλα	10	Βίδες υποστήριξης του βραχίονα
5	BB01 αισθητήρας ποτενσιόμετρου	11	Βάση βαθμονόμησης
6	BB01 Ατσάλινη Ράβδος		

Πίνακας 1.1 Λίστα εξαρτημάτων του BB01



Εικόνα 1.2 Εξάρτημα συστήματος "Μπάλα και Δοκός"

Το κομμάτι του BB01 (οι 2 παράλληλες μεταλλικές γραμμικές ράβδοι) κατά την οποία η μεταλλική μπάλα είναι ελεύθερη να κυλήσει αποτελείται από μία ράβδο από χάλυβα που είναι παράλληλα συνδεδεμένη με ένα νικελ σύρμα χρωμίου, πηγή αντιστάτης που σχηματίζει το κομμάτι όπου κυλάει η μπάλα. Η αντίσταση-σύρμα είναι η μαύρη λωρίδα που έχει κολλήσει στο πλαστικό το

οποίο στερεώνεται επί του μεταλλικού σκελετού. Η θέση της μπάλας λαμβάνεται δια μετρήσεως της τάσης στη ασάλινη ράβδο. Όταν η σφαίρα κυλά κατά μήκος της δοκού, ενεργεί ως ένα ποτενσιόμετρο και έτσι προκύπτει η θέση της μπάλας.

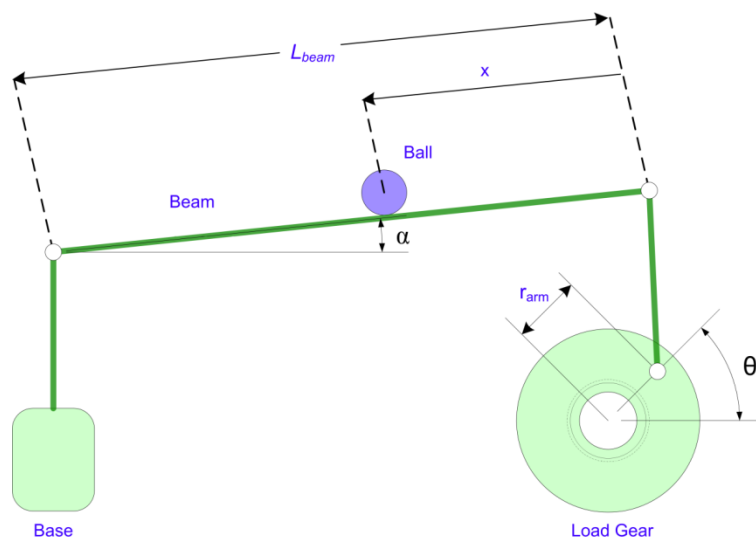
1.3 Προδιαγραφές

Ο πίνακας 1.2 βάζει σε λίστες και χαρακτηρίζει τις βασικές παραμέτρους που σχετίζονται με το σύστημα BB01. (Βλ. εικόνα 1.3 : Διαστάσεις και μεταβλητές α , θ και χ , του πειράματος 'Μπάλα και Δοκός'.) Ορισμένες από τις παραμέτρους που αναφέρονται στον πίνακα 1.2 χρησιμοποιούνται στο μαθηματικό μοντέλο που ακολουθεί στη συνέχεια.

Σύμβολο	Περιγραφή	Μεταβλητή MatLab	Τιμή
	Μάζα Μοντέλου		0.65 kg
	Βαθμονόμηση Μήκους Βάσης		50 cm
	Βαθμονόμηση Βάθους Βάσης		22.5 cm
<i>Lbeam</i>	Μήκος δοκού	<i>L_beam</i>	42.55 cm
	Μήκος βραχίονα		12.0 cm
<i>rarm</i>	Απόσταση μεταξύ εξόδου SRV02 και κέντρου SRV02	<i>r_arm</i>	2.54 cm
	Μήκος βοηθητικού βραχίονα		16.0 cm
<i>rb</i>	Ακτίνα της μπάλας	<i>r_ball</i>	1.27 cm
<i>mb</i>	Μάζα της	<i>m_ball</i>	0.064 kg

	μπάλας		
K_{bs}	Ευαισθησία αισθητήρα ελέγχου θέσης μπάλας	K_{BS}	-4.25 cm/v
V_{bias}	Ισχύς αισθητήρα θέσης μπάλας		± 12 V
V_{range}	Όρια αισθητήρα θέσης μπάλας		± 5 V

Πίνακας 1.2 Προδιαγραφές πειράματος "Μπάλα και Δοκός"



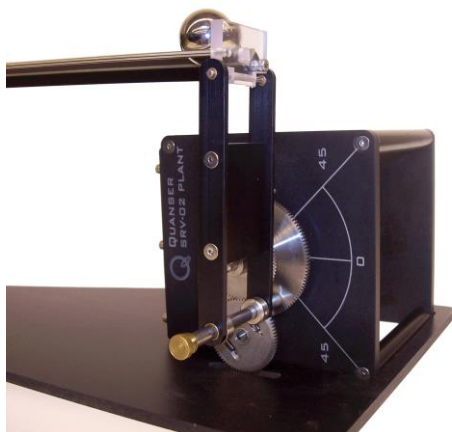
Εικόνα 1.3 Μήκη και μεταβλητές πειράματος "Μπάλα και Δοκός"

- Base: Το σταθερό μέρος του BB01 όπου εφαρμόζει η μεταλλική δοκός.
- Ball: Η μεταλλική μπάλα.
- Beam: Η μεταλλική δοκός όπου κυλάει η μεταλλική μπάλα.
- L_{BEAM} : Το μήκος της μεταλλικής δοκού.
- x : Η απόσταση του κέντρου της μπάλας από το δεξί άκρο της δοκού.
- θ_i : Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην αρχική θέση του μοχλού-βραχίονα και στην πραγματική του θέση.

- α: Είναι η γωνία ανάμεσα στην αρχική θέση της δοκού (αρχική θέση εννοούμε όταν η δοκός είναι παράλληλη προς το έδαφος) και στη στιγμιαία θέση της δοκού.

1.4 Συναρμολόγηση συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'.

1. Πριν από την έναρξη, πρέπει το SRV02 να είναι ρυθμισμένο σε λειτουργία high-gear.
2. Η βάση βαθμονόμησης, συστατικό # 11 στην εικόνα 1.2, τοποθετείται σε μια επίπεδη επιφάνεια.
3. Όπως απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 1.4), το SRV02 τοποθετείται στα πλάγια έτσι ώστε το κιβώτιο ταχυτήτων να εντάσσεται στο cut-out τμήμα της βάσης βαθμονόμησης. Η κορυφή του SRV02 θα πρέπει να είναι το μικρό 24-δοντιών γρανάζι κινήτριας.



Εικόνα 1.4 κιβώτιο ταχυτήτων SRV02

4. Ο συνδετικός κοχλίας συστατικό # 3 εικόνας 1.2 στερεώνεται μέσα στην οπή του κοχλίου του μεγάλου γραναζιού 120-δόντιων όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.4.
5. Η βάση στήριξης του πειράματος "Μπάλα και Δοκός" το συστατικό # 8 εικόνας 1.2 τοποθετείται στο αποκομμένο τμήμα της βάσης.

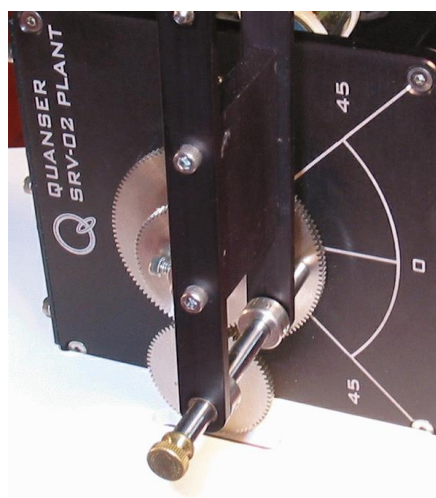
1.5 Βαθμονόμηση συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'.

1. Όπως απεικονίζεται στο εικόνα 1.5, χρησιμοποιείστε ένα 9/64 Allen κλειδί για να χαλαρώσετε τις βίδες στο πάνω άκρο



Εικόνα 01.5 Σφίξτε τις βοηθητικές βίδες μόλις η δοκός έχει ισορροπήσει.

2. Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 1.6, χειροκίνητα περιστρέψτε το SRV02 στη θέση μηδέν (0) μοιρών. Ο κοχλίας ζεύξεως θα πρέπει να ευθυγραμμιστεί με τη θέση 0 μοιρών του SRV02.



Εικόνα 1.6 Μετακινήστε τον εξοπλισμό φόρτωσης του SRV02 στην θέση των μηδέν μοιρών

3. Ενώ κρατάτε το SRV02 στην θέση των μηδέν μοιρών, τοποθετήστε την μπάλα στο κέντρο της δοκού και αυξομειώστε το ύψος του βραχίονας στήριξης, συστατικό # 7 εικόνας 1.2 , έτσι ώστε η μπάλα να παραμένει ακίνητη. Το ισορροπημένο σύστημα παρουσιάζεται στην εικόνα 1.7.



Εικόνα 1.7 Το BB01 βαθμονομείται όταν η μπάλα ισορροπεί στη δοκό, ενώ ο SRV02 είναι στις 0 μοίρες.

4. Όταν η μπάλα είναι ισορροπημένη, σφίξτε τις βίδες στο βραχίονα στήριξης, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.5, για να οριστικοποιήσετε τα βαθμονόμηση του BB01.

1.6 Διαδικασία Καλωδίωσης συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'.

Λίστα στοιχείων υλικού που χρησιμοποιούνται:

Ενισχυτής: Quanser VoltPAQ-X1

Data Acquisition Board: Quanser QPID, QPIDe, Q8-USB, Q2-USB, ή ισοδύναμα **Rotary Servo Plant:** Quanser SRV02-ET

Μπάλα και Δοκός: Quanser BB01 Module

1.6.1. Ονοματολογία καλωδίων





Τα καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση του συστήματος Quanser SRV02 με τον ενισχυτή ισχύος και με τη συσκευή απόκτησης δεδομένων παρουσιάζονται στον πίνακα 1.3.


1.6.2. Σύνδεση χρησιμοποιώντας VoltPAQ-X1

Οι τυπικές συνδέσεις που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση του SRV02 σε έναν πίνακα δεδομένων και σε ένα μονοκάναλο ενισχυτή ισχύος περιγράφονται λεπτομερώς στην παρακάτω διαδικασία. Συνοψίζονται στον πίνακα 1.4, και απεικονίζονται στην εικόνα 1.8.

Ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα πραγματοποιείται η σύνδεση του συστήματος "Μπάλα και Δοκός:

1. Η συσκευή απόκτησης δεδομένων πρέπει να έχει εγκατασταθεί και είναι σε λειτουργία.
2. Τα πάντα θα πρέπει να είναι απενεργοποιημένα πριν από την πραγματοποίηση οποιασδήποτε από αυτές τις συνδέσεις. Αυτό περιλαμβάνει την απενεργοποίηση του H/Y και του ενισχυτή.
3. Το ένα άκρο του 2xRCA σε 2xRCA καλωδίου συνδέεται από το αναλογικό κανάλι εξόδου # 0 του πίνακα ακροδεκτών, στο Amplifier Command connector του ενισχυτή, δηλαδή χρησιμοποιείται τόσο το λευκό όσο και το κόκκινο RCA βύσμα. Βλ. καλώδιο #1 που δείχνετε στην εικόνα 1.8. Αυτό φέρει το εξασθενημένο σήμα τάσεως ελέγχου κινητήρα, $\frac{V_m}{K_a}$, όπου K_a είναι η απολαβή του ενισχυτή.
4. Το καλώδιο 4-pin-stereo-DIN σε 6-pin-stereo-DIN συνδέεται από την υποδοχή Το Load του ενισχυτή, στην Motor υποδοχή του SRV02. Δείτε σύνδεση # 2 όπως φαίνεται στην εικόνα 1.8. Το καλώδιο μεταδίδει το ενισχυμένο σήμα τάσης που εφαρμόζεται στον κινητήρα SRV02 και συμβολίζεται σε V_m .
5. Το καλώδιο 5-pin-stereo-DIN σε 5-pin-stereo-DIN συνδέεται από την υποδοχή του κωδικοποιητή, στον πάνελ του SRV02 στην είσοδος του κωδικοποιητή # 0 στον πίνακα ακροδεκτών, όπως απεικονίζεται στη σύνδεση # 3 στην εικόνα 1.8. Αυτό μεταφέρει το φορτίο μέτρησης της γωνίας άξονα και συμβολίζεται με την μεταβλητή I .
6. Η ADC υποδοχή του ενισχυτή συνδέεται με τις αναλογικές εισόδους # 0-1 στην πλακέτα ακροδεκτών χρησιμοποιώντας το 5-pin-DIN σε 4xRCA καλώδιο. Το κόκκινο (S3) RCA καλώδιο συνδέεται στο αναλογικό κανάλι εισόδου # 0 και το μαύρο (S4) RCA στο αναλογικό κανάλι εισόδου # 1. Σημείωση: Τα καλώδια RCA μπορεί να μην επισημαίνονται ως S1, S2, S3, και S4. Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιήστε το κίτρινου χρώματος καλώδιο (S1), λευκό (S2), κόκκινο (S3), μαύρο (S4).
7. Ο αισθητήρας θέσης μπάλας από το BB01, συνδέεται στην υποδοχή S3 στον ενισχυτή, με τη χρήση του 6-pin-mini-DIN σε 6-pin-mini-DIN καλώδιο. Δείτε σύνδεση # 5 στο εικόνα 1.8. Αυτό φέρει την μέτρηση της θέσης της μπάλας από τη δοκό και συμβολίζεται με μεταβλητή χ .

Καλώδιο	Τύπος	Περιγραφή
 <p>(α) Καλώδιο RCA</p>	2xRCA to 2xRCA	Συνδέει ένα αναλογικό κανάλι εξόδου του πίνακα ακροδεκτών με το Amplifier Command connector του ενισχυτή.
 <p>(β) Καλώδιο κινητήρα</p>	4-pin-DIN to 6-pin-DIN	Συνδέει την υποδοχή Load του ενισχυτή, με την Motor υποδοχή του SRV02.
 <p>(γ) Καλώδιο αποκωδικοποιητής</p>	5-pin-stereo-DIN to 5-pin-stereo-DIN	Μεταφέρει τα κωδικοποιημένα σήματα από τον αισθητήρα θέσης μπάλας του BB01 στην υποδοχή S3 του ενισχυτή.
 <p>(δ) Αναλογικό καλώδιο</p>	6-pin-mini-DIN to 6-pin-mini-DIN	Συνδέει τον αισθητήρα θέσης της μπάλας από το BB01, στην υποδοχή S3 του ενισχυτή. Το καλώδιο φέρει αναλογικά σήματα στον ενισχυτή, όπου τα σήματα μπορεί είτε να παρακολουθούνται και / ή να χρησιμοποιηθούν από ένα ελεγκτή.

 <p>(ε) 5-pin-DIN to 4xRCA</p>	5-pin-DIN to 4xRCA	Συνδέει την υποδοχή "To ADC" του ενισχυτή με τις αναλογικές εισόδους # 0-1 στην πλακέτα ακροδεκτών του SRV01. Το καλώδιο μεταφέρει τα αναλογικά σήματα, αμετάβλητα, από τον ενισχυτή στην είσοδο Analog-To-Digital της μονάδας απόκτησης δεδομένων.
---	--------------------	---

Πίνακας 1.3 Καλώδια που χρησιμοποιούμε για να συνδέσουμε το SRV02 στον ενισχυτή και λοιπές συσκευές.

Παρακάτω ακολουθεί ένας πίνακας με την καλωδίωση του πειράματος.

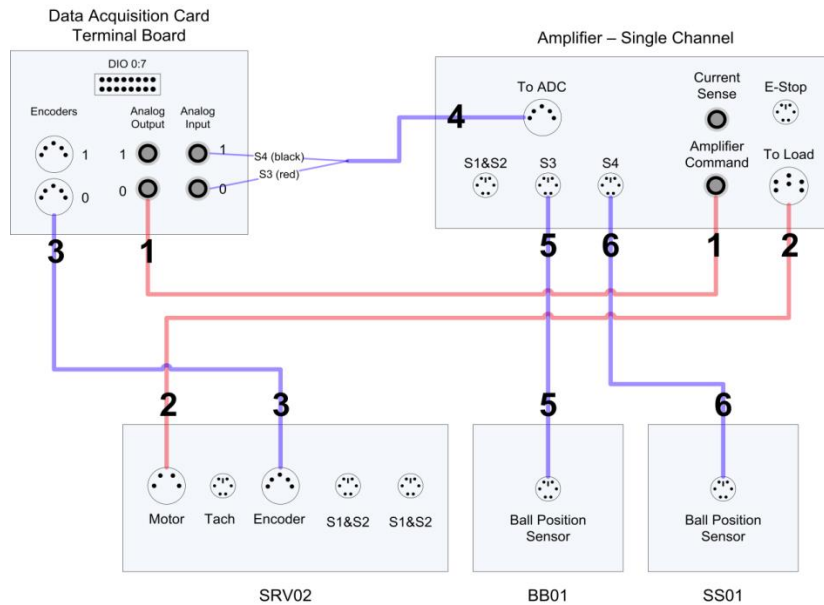
Καλώδιο #	Από	Σε	Σήμα
1	Terminal Board: DAC #0	Amplifier <i>Amplifier Command</i> connector	Συνδέει το σήμα ελέγχου από την αναλογική έξοδο # 0 στη συσκευή DAQ για να ενεργοποιήσει τον ενισχυτή.
2	Amplifier: <i>To Load</i> connector	SRV02 <i>Motor</i> connector	Παροχέας ρεύματος για το RSV02
3	Terminal Board: Encoder Input	SRV02 <i>Encoder</i> connector	Κωδικοποιητής μέτρησης της γωνίας του

	#0		άξονα του φορτίου.
4	Amplifier: To ADC Connector	Terminal Board: 1) S3 to ADC #0 2) S4 to ADC #1	Συνδέει το BB01 και το Remote Sensor (SS01) για τη μέτρηση της θέσης της μπάλας στα αναλογικά κανάλια εισόδου # 0 και # 1 στη DAQ συσκευή.
5	Amplifier S3 connector	BB01 Ball Position Sensor connector	Μέτρηση θέσης μπάλας με χρήση BB01
6	Amplifier S4 connector	SS01 Ball Position Sensor connector	Μέτρηση θέσης μπάλας με χρήση SS01

Πίνακας 1.4 Καλωδίωση BB01

Σημείωση: Κατά την εγκατάσταση, θεωρείται ότι ο SRV02 κωδικοποιητής χρησιμοποιείται για έλεγχο θέσης μπάλας (δηλαδή, ότι δεν χρησιμοποιείται ποτενσιόμετρο).

Προσοχή: Κάθε κωδικοποιητής θα πρέπει να είναι απευθείας συνδεδεμένος με το data-acquisition terminal board χρησιμοποιώντας το βασικό 5-pin DIN καλώδιο. ΜΗΝ συνοδεύεται το καλώδιο αποκωδικοποιητή με τον ενισχυτή.



Εικόνα 1.8 Συνδέσεις BB01 με χρήση του DAQ με μονοκάναλο ενισχυτή.

1.7 Δοκιμή σωστής λειτουργίας συστήματος Quanser 'Μπάλα και Δοκός'.

Αυτή η ενότητα περιγράφει κάποιες λειτουργικές δοκιμές για να διαπιστωθεί αν το σύστημα "Μπάλα και Δοκός" λειτουργεί σωστά, πάντα με την προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι συνδεδεμένο όπως ακριβώς περιγράφεται ανωτέρω.

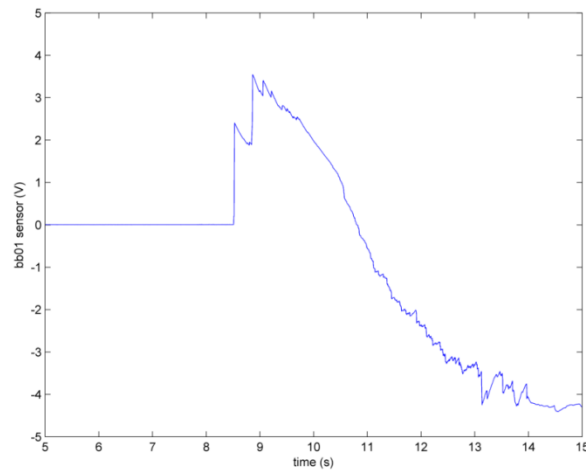
1.7.1 Αισθητήρας θέσης μπάλα

Ο αισθητήρα θέσης μπάλας του BB01 ρυθμίζεται με την ακόλουθη διαδικασία:

1. Η τιμή στο αναλογικό κανάλι εισόδου #2 μας δίνει τη θέση της μπάλας πάνω στη δοκό.
2. Μία τυπική απόκριση σήματος του αισθητήρα θέσης μπάλας απεικονίζεται στο εικόνα 1.9. Για το BB01, ο αισθητήρας που μας δίνει τη θέση της μπάλα θα πρέπει να εξάγει μία τάση περίπου 4,5 V, όταν είναι πλησιέστερα προς το SRV02. Καθώς η μπάλα κυλίζει μακριά από το SRV02 η μετρούμενη τάση σήματος θα πρέπει να μειώνεται σε περίπου -4,5 V, όταν η μπάλα φθάσει στο άλλο άκρο της δοκού.

Προσοχή: Μερικές φορές, όταν η μπάλα κάθεται στο τέλος της δοκού μπορεί να μην είναι σε επαφή με το αισθητήρα. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή θα είναι αρχικά μηδέν Volt αλλά όταν η μπάλα αρχίσει να κινείται το σήμα του αισθητήρα θα φτάσει μέχρι περίπου τα 4.5 V, και στη συνέχεια θα αρχίσει να μειώνεται

3. Δίπλα στα άκρα της δοκού, το σήμα δεν πρέπει να έχει ασυνέχειες.



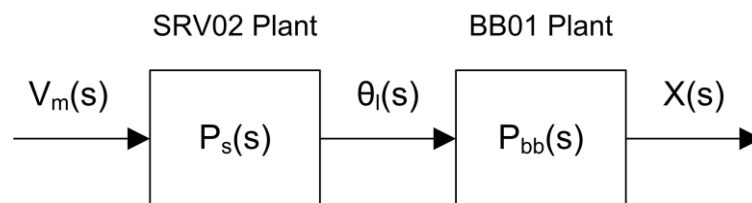
Εικόνα 1.9 Σήμα τάσης που μετρείται από τον αισθητήρα BB01 σε σχέση με τη θέση της μπάλα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2. Μοντελοποίηση και έλεγχος συστήματος "μπάλα και δοκός"

2.1 Εισαγωγή

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.1, αυτό το σύστημα αποτελείται από δύο μέρη: Το Περιτροφικό σέρβο (SRV02) και το σύστημα "μπάλα και δοκός" (BB01).



Εικόνα 2.1 Διάγραμμα "Μπάλας και Δοκού" ανοικτού βρόχου.

Ο κύριος στόχος αυτής της ενότητας είναι να επιτευχθεί η πλήρης συνάρτηση μεταφοράς του SRV02 και του BB01:

$$P(s) = P_{bb}(s)P_s(s) \quad (2.1)$$

όπου η συνάρτηση μεταφοράς BB01 είναι:

$$P_{bb}(s) = \frac{X(s)}{\theta_i(s)} \quad (2.2)$$

και η συνάρτηση μεταφοράς SRV02 είναι:

$$P_s(s) = \frac{\theta_i(s)}{V_m(s)} \quad (2.3)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του BB01 περιγράφει την γραμμική μετατόπιση της μπάλας, $x(t)$, σε σχέση με τη γωνία του σέρβο, $\theta_i(t)$. Στις επόμενες ενότητες, οι βασισμένες σε χρόνο εξισώσεις υλοποιούνται και η συνάρτηση μεταφοράς αποκτάτε. Η συνάρτηση μεταφοράς του SRV02 καθορίζει την αρχική θέση της μπάλας $\theta_i(t)$, σε σχέση με τη τάση εισόδου του σέρβο $V_m(t)$. Υπενθυμίζουμε ότι στο πείραμα μοντελοποίησης, η συνάρτηση μεταφοράς βρέθηκε να είναι:

$$P_s(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} \quad (2.4)$$

Οι ονομαστικές παράμετροι του μοντέλου, K και τ , του SRV02 χωρίς φορτίο και σε λειτουργία υψηλής διαμόρφωσης high-gear είναι:

$$K = 1.53 \text{ rad}/(V \cdot s) \quad (2.5)$$

και

$$\tau = 0.0248 \text{ s} \quad (2.6)$$

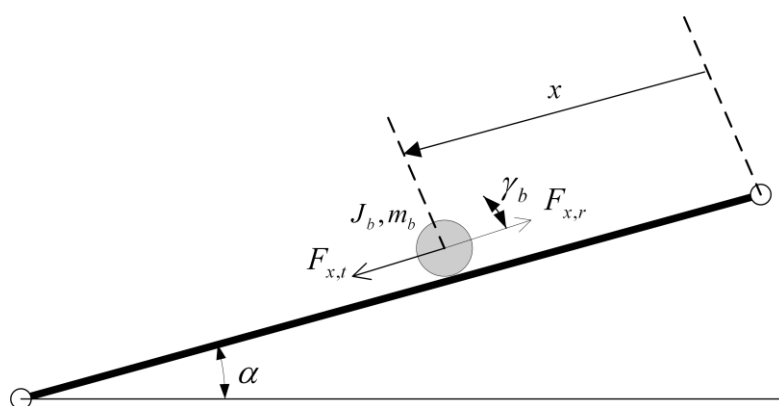
2.2 Μη γραμμική εξίσωση κίνησης

Στην ενότητα αυτή αναλύεται, η εξίσωση που περιγράφει την κίνηση της μπάλας, x , σε σχέση με τη γωνία της δοκού, a .

Αναφερόμενοι στην εικόνα 2.2, η εξίσωση της κίνησης, ή για συντομία *ETK*, μπορεί να βρεθεί ξεκινώντας από τον νόμο κίνησης του Νεύτωνα.

Το άθροισμα των δυνάμεων που επενεργούν επί της μπάλας κατά μήκος της δοκού ισούται με:

$$m_b \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) = \Sigma F \quad (2.7)$$



Εικόνα 2.2 Διάγραμμα μπάλας-δοκού(όπου m_b είναι η μάζα της μπάλας)

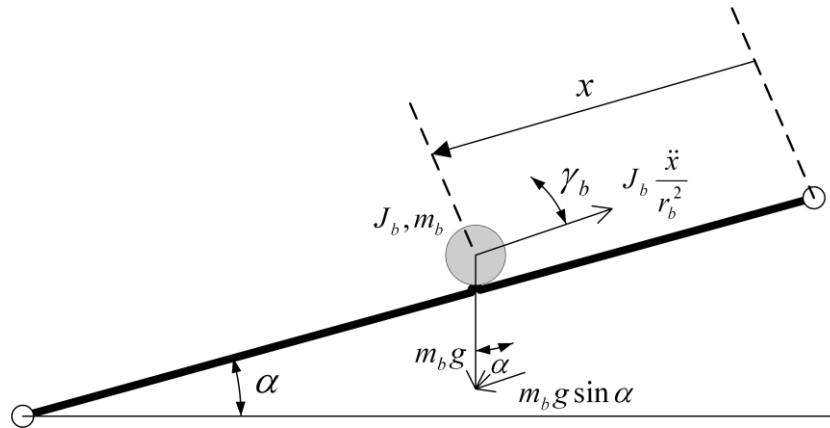
Παραμελώντας τριβές και την εξίσωση απόσβεσης, οι δυνάμεις πάνω στη σφαίρα μπορούν να περιγραφούν από τον τύπο:

$$m_b \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) = F_{x,t} - F_{x,r} \quad (2.8)$$

όπου $F_{x,r}$ είναι η δύναμη από την αδράνεια της μπάλας, $F_{x,t}$ είναι η δύναμη που παράγεται από τη βαρύτητα, m_b είναι η μάζα της μπάλας και $\frac{d^2}{dt^2} x(t) =$

$x''(t)$ είναι η επιτάχυνση της μπάλας . Για να είναι η μπάλα σταθερή σε μία ορισμένη χρονική στιγμή, δηλαδή να είναι σε ισορροπία, η δύναμη από την ορμή της μπάλας πρέπει να είναι ίση με τη δύναμη παράγεται από τη βαρύτητα. Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.3, η δύναμη $F_{x,t}$ κατά τη διεύθυνση x (κατά μήκος της δοκού) που προκαλείται από τη βαρύτητα μπορεί να βρεθεί ως εξής:

$$F_{x,t} = m_b g \sin \alpha (t) \quad (2.9)$$



Εικόνα 2.3 Ολοκληρωμένο διάγραμμα μπάλας και δοκού

Η δύναμη που οφείλεται στη περιστροφή στις μπάλας μπορεί να βρεθεί από τον τύπο:

$$F_{x,r} = \frac{T_b}{r_b} \quad (2.10)$$

Όπου το r_b είναι η ακτίνα της μπάλας , J_b είναι η ροπή αδράνειας συμπαγής σφαίρας , $\frac{d^2}{dt^2} \gamma_b(t)$ είναι η γωνιακή επιτάχυνση της μπάλας και T_b είναι η ροπή με την οποία ισούται με

$$T_b = J_b \left(\frac{d^2}{dt^2} \gamma_b(t) \right) \quad (2.11)$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο $x(t) = \gamma_b(t)r_b$ όπου γ_b είναι η γωνία στροφής της μπάλας, μπορούμε να μετατρέψουμε τη γωνιακή μετατόπιση σε γραμμική μετατόπιση. Στη συνέχεια, η δύναμη που ενεργεί πάνω στη μπάλα προς την κατεύθυνση x από την ορμή γίνεται:

$$F_{x,r} = \frac{J_b \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right)}{r_b^2} \quad (2.12)$$

Τώρα, με αντικατάσταση της δύναμης περιστροφής και μετατόπισης στην εξίσωση 2.8, μπορούμε να πάρουμε τη μη γραμμική εξίσωση κίνησης για την μπάλα και τη δοκό ως εξής:

$$m_b \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) = m_b g \sin a(t) - \frac{J_b \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right)}{r_b^2} \quad (2.13)$$

Λύνοντας την μη γραμμική εξίσωση έχουμε:

$$\frac{d^2}{dt^2} x(t) = \frac{m_b g \sin a(t) r_b^2}{m_b r_b^2 + J_b} \quad (2.14)$$

2.3 Προσθήκη δυναμικής συμπεριφοράς SRV02

Στην ενότητα αυτή, μελετάται η εξίσωση της κίνησης που αντιπροσωπεύει τη θέση της σφαίρας σε σχέση με τη γωνία του σέρβο του SRV02. Οι εξισώσεις που λαμβάνονται θα είναι μη γραμμικές. Συνεπώς, θα πρέπει να γραμμικοποιηθούν για να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό του ελεγκτή.

Ας δούμε πώς μπορεί να βρεθεί η σχέση μεταξύ της γωνίας του SRV02, θ_l , και της γωνίας της δοκού, α . Χρησιμοποιώντας το σχήμα που δίνεται στο εγχειρίδιο του BB01, εξετάζοντας τις γωνίες της δοκού και του σέρβο που απαιτούνται για να αλλάξει το ύψος της δοκού h και λαμβάνοντας το ημίτονο της γωνίας της δοκού εξάγεται ο τύπος

$$\sin a(t) = \frac{h}{L_{beam}} \quad (2.15)$$

Λαμβάνοντας υπόψη το ημίτονο του σέρβο εξάγεται ο τύπος

$$\sin \theta_l(t) = \frac{h}{r_{arm}} \quad (2.16)$$

Από αυτά μπορεί να εξαχθεί η ακόλουθη σχέση μεταξύ της δοκού και της γωνίας του σέρβο

$$\sin a(t) = \frac{\sin \theta_l(t) r_{arm}}{L_{beam}} \quad (2.17)$$

Για να βρεθεί η εξίσωση της κίνησης που αντιπροσωπεύει τη κίνηση της μπάλας σε σχέση με τη γωνία θ του SRV02 πρέπει να γραμμικοποιηθεί η εξίσωση κίνησης για το σέρβο θεωρώντας αρχική γωνία $\theta_l(t) = 0$. Αν ενωθεί η σχέση της δοκού και του σέρβο (εξίσωση 2.17) μαζί με την μη γραμμική συνάρτηση 2.14 προκύπτει:

$$\frac{d^2}{dt^2} x(t) = \frac{m_b g \sin \theta_l(t) r_{arm} r_b^2}{L_{beam} (m_b r_b^2 + J_b)} \quad (2.18)$$

Σχετικά με γωνίες κοντά στο μηδέν, η ημιτονοειδής συνάρτηση μπορεί να προσεγγισθεί με τον τύπο:

$$\sin \theta_l(t) \approx \theta_l(t) \quad (2.19)$$

Εφαρμόζοντας τον τύπο 2.19 δίνεται η μη γραμμική εξίσωση της κίνησης του BB01:

$$\frac{d^2}{dt^2} x(t) = \frac{m_b g \theta_l(t) r_{arm} r_b^2}{L_{beam}(m_b r_b^2 + J_b)} \quad (2.20)$$

Στην εξίσωση 2.20 όλοι οι όροι εκτός του $\theta_l(t)$ είναι σταθεροί και δηλώνονται στο πίνακα 1.2 . Έτσι μπορεί να δηλωθεί ότι $K_{bb} = \frac{m_b g r_{arm} r_b^2}{L_{beam}(m_b r_b^2 + J_b)}$, Εδώ, το K_{bb} ονομάζεται το κέρδος μοντέλου του συστήματος μπάλα και δοκός. Άρα η μη γραμμική εξίσωση της κίνησης του BB01 γίνεται: $\frac{d^2}{dt^2} x(t) = K_{bb} \theta_l(t)$

2.4 Απόκτηση συνάρτηση μεταφοράς

Σε αυτή την ενότητα, θα παραχθεί η συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφει την τάση του σέρβο σε σχέση με τη μετατόπιση της θέσης της μπάλας. Η συνάρτηση μεταφοράς $P_{bb}(s)$ του BB01 μπορεί να βρεθεί λαμβάνοντας το μετασχηματισμός Laplace της μη γραμμικής εξίσωσης της κίνησης του BB01 (εξίσωση 2.20):

$$P_{bb}(s) = \frac{X(s)}{\theta_l(s)} = \frac{K_{bb}}{s^2} \quad (2.21)$$

Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.1, τα δύο συστήματα είναι εν σειρά. Εισάγοντας τη συνάρτηση μεταφοράς του BB01 (εξίσωση 2.21) και τη συνάρτηση μεταφοράς του SRV02 (εξίσωση 2.4) στην εξίσωση 2.1, μπορεί να αντληθεί η πλήρης διαδικασία μεταφοράς της συνάρτησης $P(s)$ ως:

$$P(s) = \frac{X(s)}{V_M(s)} = \frac{K_{bb} K}{s^3(\tau s + 1)} \quad (2.22)$$

Αυτή είναι η τάση που χρειάζεται ο σέρβο για να μπορεί να μετατοπίσει τη μπάλα.

2.5 Επιθυμητή Απόκριση Ελέγχου

2.5.1 Προδιαγραφές στο πεδίο του χρόνου

Οι προδιαγραφές για τον έλεγχο της θέσης του SRV02 είναι:
το σφάλμα μόνιμης κατάστασης (e_{ss}) να είναι 0, ο χρόνος κορυφής (t_p) να είναι 0.15sec, και η υπερύψωση επί τοις εκατό (PO) να είναι 5%, ή αλλιώς:

$$e_{ss} = 0 \quad (2.23)$$

$$t_p = 0.15 \text{ s} \quad (2.24)$$

$$PO = 5.0\% \quad (2.25)$$

Οι προδιαγραφές για τον έλεγχο της θέσης της μπάλας είναι:
το σφάλμα μόνιμης κατάστασης (e_{ss}), ο χρόνος αποκατάστασης (t_s), το ποσοστό αποκατάστασης (c_{ts}) και η υπερύψωση επί τοις εκατό (PO):

$$|e_{ss}| \leq 0.005m \quad (2.26)$$

$$t_s = 3.5s \quad (2.27)$$

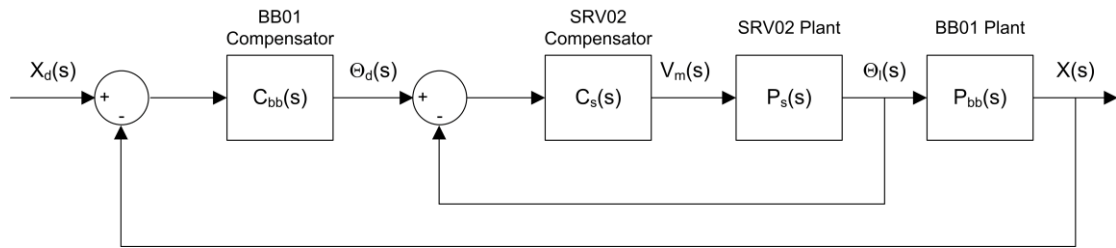
$$c_{ts} = 0.04 \quad (2.28)$$

$$PO = 10.0\% \quad (2.29)$$

Έτσι, όταν δίνεται μια βηματική συνάρτηση σαν επιθυμητή είσοδος, το ποσοστό υπερύψωσης επί τοις εκατό δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 10%. Μετά από 3,5 δευτερόλεπτα, η μπάλα θα πρέπει να σταθεροποιηθεί μέσα στο 4% της τελικής θέσης της και η σταθερή θέση της μπάλας θα πρέπει να είναι εντός 5 mm από την επιθυμητή θέση.

2.6 Σχεδιασμός ελέγχου συστήματος "Μπάλας και Δοκού"

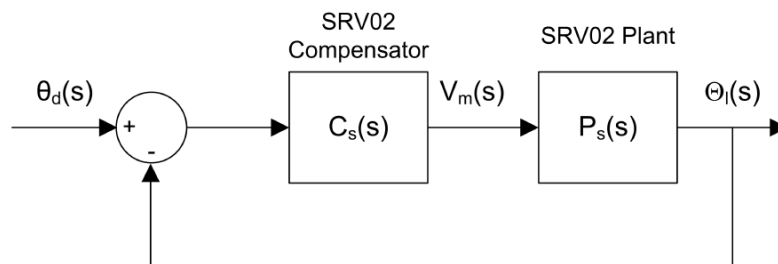
Ο έλεγχος που θα χρησιμοποιηθεί για το SRV02 και το BB01 απεικονίζεται από το διάγραμμα στην εικόνα 2.4. Με βάση τη μετρούμενη θέση της μπάλας $X(s)$, ο αντισταθμιστής του συστήματος BB01 $C_{bb}(s)$ στον εξωτερικό βρόχο, υπολογίζει τη γωνία του άξονα φορτίου $\theta_d(s)$ για την επίτευξη της επιθυμητής θέσης της μπάλας $X_d(s)$. Ο εσωτερικός βρόχος είναι ένα σύστημα ελέγχου θέσης του σέρβο. Έτσι, ο σέρβο αντισταθμιστής $C_s(s)$ υπολογίζει τη τάση του κινητήρα $V_m(s)$ που απαιτείται για να έχουμε την επιθυμητή γωνία στον άξονα φορτίου του SRV02.



Εικόνα 2.4 Σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μπάλας στο σύστημα SRV02 + BB01.

2.7 Σχεδιασμός Εσωτερικού Ελεγκτή: SRV02 ελεγκτή θέσης.

Ο εσωτερικός βρόχος υλοποιεί έναν ελεγκτή για τη διαχείριση της θέσεως της δοκού του SRV02. Στην εικόνα 2.5 αυτό δείχνεται ως $C_s(s)$. Για να πληρούνται οι επιθυμητές προδιαγραφές απόδοσης που δίδονται στο κεφάλαιο 2.5.1, πρέπει να υπολογιστούν τα k_p και k_v κέρδη του ελεγκτή όταν το SRV02 είναι σε λειτουργία υψηλής διαμόρφωσης.



Εικόνα 2.5 Κλειστό κύκλωμα SRV02

Η αρχική δήλωση για το χρόνο κορυφής t_p , και για το ποσοστά υπερύψωσης επί τοις εκατό PO , είναι:

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.30)$$

και

$$PO = 100 \exp\left(\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \quad (2.31)$$

Χρησιμοποιώντας αυτούς τους τύπους και με χρήση των προδιαγραφών που δίνονται στο κεφάλαιο 2.5.1, μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής απόσβεσης που απαιτείται για να αποκτηθεί η επιθυμητή υπερύψωση τοις εκατό:

$$\zeta = 0.690 \quad (2.32)$$

Και η ελάχιστη φυσική συχνότητα που απαιτείται για το επιθυμητό χρόνο αποκατάστασης που δίνεται στην εξίσωση 2.24 , είναι

$$\omega_n = 28.9 \text{ rad/s} \quad (2.33)$$

Το κέρδος k_p βρίσκεται με τη χρήση των παραμέτρων του συστήματος 2.5 και 2.6 που δόθηκαν παραπάνω, και με τη χρήση της ελάχιστης φυσικής συχνότητας που βρέθηκε πριν και ισούται με:

$$k_p = 13.5 \text{ V/rad} \quad (2.34)$$

Το κέρδος ταχύτητας k_v επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας πάλι τις παραμέτρους του συστήματος 2.5 και 2.6 που δόθηκαν παραπάνω και με τη χρήση του συντελεστή απόσβεσης που βρέθηκε στο 2.32, άρα:

$$k_v = 0.078 \text{ V.s/rad} \quad (2.35)$$

2.8 Σχεδιασμός εξωτερικού βρόχου.

Σκοπός είναι να χρησιμοποιηθεί μια δυναμική αντιστάθμισης στον εξωτερικό βρόχο στην εικόνα 2.6. Σε γενικές γραμμές, προσθέτοντας ένα μηδενικό στην εμπρός διαδρομή αυξάνεται το εύρος ζώνης του συστήματος κλειστού βρόχου. Προσθέτοντας ένα πόλο αυξάνεται ο χρόνος ανόδου και η υπερύψωση του συστήματος και το καθιστά συνολικά λιγότερο σταθερό. Στην περίπτωση μας, το εύρος ζώνης θα πρέπει να αυξηθεί και η υπέρβαση να ελαχιστοποιηθεί.

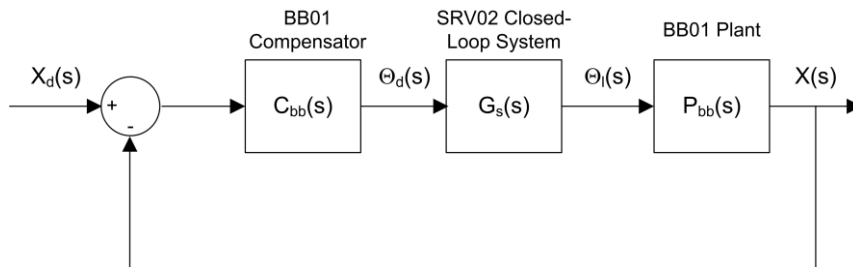
Μπορεί να απλοποιηθεί ο ελεγκτής του συστήματος όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4, με την αντικατάσταση του εσωτερικού βρόχου με ένα μόνο μπλοκ $G_s(s)$.

Προς το παρόν, θα θεωρείται η δυναμική του εσωτερικού βρόχου ως αμελητέα ($G_s(s)=1$). Ως εκ τούτου, θεωρείται ότι ο εσωτερικός βρόχος μπορεί να ελέγχει τη θέση του SRV02 τέλεια, ως εκ τούτου, η επιθυμητή γωνία του άξονα φορτίου ισούται με το πραγματική γωνία του άξονα φορτίου:

$$\theta_i(t) = \theta_d(t) \quad (2.36)$$

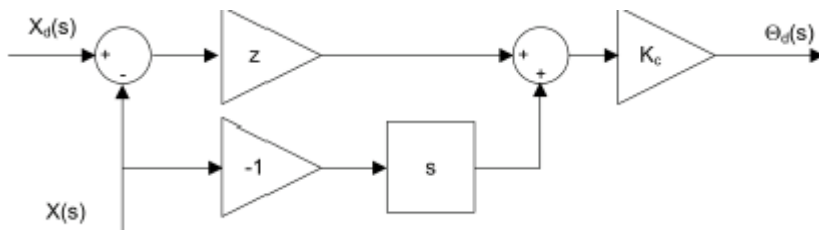
Θα σχεδιαστεί ένας PD ελεγκτής για το "BB01 Compensator" μπλοκ στην εικόνα 2.6. Αυτός ο ελεγκτής είναι στον εξωτερικό βρόχο. Με δεδομένη την

επιθυμητή θέση της μπάλας, $X_d(s)$, και τη πραγματική θέση της μπάλας $X(s)$, το σφάλμα στο σύστημα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί από τον ελεγκτή για να δημιουργήσει το $\theta_d(s)$ ως επιθυμητή είσοδο για τον ελεγκτή του εσωτερικού βρόχου $C_s(s)$. Δεδομένου ότι ο εσωτερικός ελεγκτής βρόχου μπορεί να ακολουθήσει τέλεια την επιθυμητή γωνία του άξονα, θα διαχειριστεί τη δυναμική του SRV02 τέλεια και θα μετακινήσει το SRV02 άξονα(δοκό) στη θέση $\theta_l(s)$.



Εικόνα 2.6 BB01 σύστημα κλειστού βρόχου.

Ένας PD ελεγκτής δίνεται από το $G_{PD}(s) = K_c * (s + z)$. Ωστόσο, για να μπορεί να προχωρήσει, θα πρέπει να γίνει μια μικρή μεταβολή στο PD ελεγκτή. Θα αντικατασταθεί ο PD ελεγκτής με εκείνον που φαίνεται στην εικόνα 2.7. Δεδομένου ότι αυτή η έκδοση δεν αφορά άμεσα τροφοδότηση της επιθυμητής τιμής ταχύτητας $sX_d(s)$, είναι πιο επιθυμητό σε πρακτικές εφαρμογές λόγω του θορύβου στα σήματα.



Εικόνα 2.7 Ιδανικός ελεγκτής συστήματος μπάλας και δοκού

2.9 Σχεδιασμός ιδανικού PD ελεγκτή

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα, ο εξωτερικός ελεγκτής βρόχου μπορεί να γραφεί ως:

$$\theta_d(s) = K_c \left(z(X_d(s) - X(s)) - sX(s) \right) \quad (2.37)$$

Υπενθυμίζεται ότι: όταν η δυναμική του σέρβο δεν λαμβάνεται υπόψη $\theta_l(t) = \theta_d(t)$. Με την αντικατάσταση της ανωτέρω συνάρτησης μεταφοράς

στη συνάρτηση 2.21 και λύνοντας για ως προς $X(s)/X_d(s)$, μπορεί να ληφθεί η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου του BB01 ως:

$$\frac{X(s)}{X_d(s)} = \frac{K_{bb}K_c z}{s^2 + K_{bb}K_c s + K_{bb}K_c z} \quad (2.38)$$

Στο σχήμα 2.7, z και K_c είναι η θέση των μηδενικών και το κέρδος για τον ελεγκτή, αντίστοιχα. Μπορεί να υπολογιστεί η τιμή z για να ανταποκρίνεται στον επιθυμητό χρόνο απόκρισης και τις προδιαγραφές υπέρβασης. Επίσης, είναι δυνατό να βρεθεί η τιμή του K_c για να ικανοποιεί τη δοσμένη φυσική συχνότητα και το δοσμένο συντελεστή απόσβεσης.

Ένα πρότυπο σύστημα δεύτερης τάξης δίνεται από την ακόλουθη συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.39)$$

Συγκρίνοντας τους συντελεστές του παρονομαστή της εξίσωσης αυτής με αυτές στην εξίσωση 2.38, δίνεται η δυνατότητα να βρεθούν οι εξισώσεις για το z και το k_c έτσι ώστε μετά να καλύπτονται οι δοσμένες προδιαγραφές για το ω_n και το ζ , έτσι :

$$z = \frac{\omega_n^2}{K_{bb}K_c} \quad (2.40)$$

και το κέρδος πρέπει να είναι

$$K_c = \frac{2\zeta\omega_n}{K_{bb}} \quad (2.41)$$

2.10 Πρακτικός PD ελεγκτής

Ακόμα κι αν ο ιδανικός PD ελεγκτής είναι μια βελτίωση σε σχέση με τον παραδοσιακό PD ελεγκτή, χρειάζεται ακόμα μια προσαρμογή για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη. Η θέση της μπάλας μετράται χρησιμοποιώντας ένα αναλογικό αισθητήρα και η μέτρηση αυτή περιλαμβάνει εγγενή θόρυβο. Λαμβάνοντας την παράγωγο του τύπου του σήματος, μπορούν να εξαχθούν τα αποτελέσματα σε ένα ενισχυμένο υψηλής συχνότητας σήμα που τελικά ανατροφοδοτείται στον κινητήρα και προκαλεί

λείανση του θορύβου . Όπως απεικονίζεται με $H(s)$ στην εικόνα 2.8, αυτό αποτρέπεται αν χρησιμοποιηθεί ένα υπερατά φίλτρο.

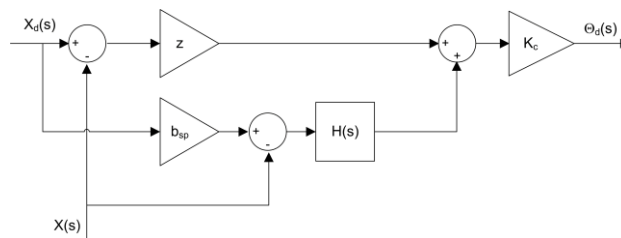
Η πρώτης τάξης φίλτρο αντικαθιστά την παράγωγο στην εικόνα 2.7 και έχει την μορφή:

$$H(s) = \frac{\omega_f s}{s + \omega_f} \quad (2.42)$$

Για το επαρκή φιλτράρισμα του θορύβου που βρέθηκε στο γραμμικό αισθητήρα του BB01, η συχνότητα αποκοπής, ω_f , θα πρέπει να οριστεί σε 1Hz, ή

$$\omega_f = 6.28 \text{ rad/s} \quad (2.43)$$

Επίσης, στον ελεγκτή προστίθεται η επιθυμητή τιμή του βάρους b_{sp} . Αυτό μεταβάλλει την ποσότητα της επιθυμητής τιμής που χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η ταχύτητα του σφάλματος. Αυτός ο αντισταθμιστής λέγεται πρακτικός PD ελεγκτής.



Εικόνα 2.8 BB01 πρακτικός PD ελεγκτής με φίλτρο

Παρά το γεγονός ότι το φιλτράρισμα είναι συχνά απαραίτητο κατά τον έλεγχο πραγματικών συστημάτων ώστε να γίνουν πιο ισχυρά απέναντι από στο θόρυβο, επίσης προσθέτει νέα δυναμική στο σύστημα. Έτσι, το κέρδος αντιστάθμισης και η θέση των μηδενικών πρέπει να υπολογιστούν εκ νέου για την κάλυψη των προδιαγραφών που αναφέρονται στη παράγραφο 2.5.1.

$$\theta_d(s) = K_c \left(z(X_d(s) - X(s)) + \frac{\omega_f s (b_{sp} X_d(s) - X(s))}{s + \omega_f} \right) \quad (2.44)$$

Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν δυνάμεις που δρουν πάνω στο σέρβο, δηλαδή, $\theta_d(s) = \theta_i(s)$, η εξίσωση κλειστού βρόχου του BB01 μπορεί να βρεθεί υποκαθιστώντας τον ανωτέρω ελεγκτή ανοικτού βρόχου του BB01 με τη συνάρτηση μεταφοράς 2.21 και λύνοντας ως προς $\frac{X(s)}{X_d(s)}$,

$$\frac{X(s)}{X_d(s)} = \frac{K_{bb} K_c ((z + \omega_f b_{sp})s + z\omega_f)}{s^3 + s^2 \omega_f + (K_{bb} K_c \omega_f + K_{bb} K_c z)s + K_{bb} K_c z \omega_f} \quad (2.45)$$

Όταν η επιθυμητή τιμή βάρους του πρακτικού PD ελεγκτή είναι 1 ($B_{sp} = 1$), ο αντισταθμιστή του BB01, $C_{bb}(s)$ στην εικόνα 2.6 μπορεί να βρεθεί από το τύπο:

$$C_{bb}(s) = \frac{\theta_d(s)}{X_d(s) - X(s)} \quad (2.46)$$

Θέτοντας το $B_{sp} = 1$ στον ελεγκτή της εξίσωση 2.44 και με την επίλυση των παραπάνω εξάγεται ο τύπος:

$$C_{bb}(s) = \frac{((z+\omega_f)s+z\omega_f)K_c}{s+\omega_f} \quad (2.47)$$

Οι θέσεις των μηδενικών και των πόλων του αντισταθμιστή είναι:

$$z_c = \frac{-z\omega_c}{z+\omega_f} \quad (2.48)$$

και

$$p_c = -\omega_f \quad (2.49)$$

αντιστοίχως.

Αφού $p_c < z_c$, ο πόλος έρχεται πριν από το μηδενικό κατά μήκος του αρνητικού πραγματικού άξονα, αυτός είναι ένας αντισταθμιστής προβαδισματικού τύπου.

Ένα χαρακτηριστικό πρότυπο εξίσωσης τρίτης τάξεως μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)(1 + T_p s) \quad (2.50)$$

όπου T_p είναι η διάσπαση του πόλου σε δευτερόλεπτα. Όταν επεκταθεί, η τρίτης τάξης χαρακτηριστική εξίσωση γίνεται:

$$s^3 + \frac{(2\zeta\omega_n T_p + 1)s^2}{T_p} + \frac{(\omega_n^2 T_p + 2\zeta\omega_n)s}{T_p} + \frac{\omega_n^2}{T_p} \quad (2.51)$$

Η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος κλειστού βρόχου (εξίσωση 2.45) χρησιμοποιώντας το πρακτικό PD ελεγκτής είναι:

$$s^3 + s^2\omega_f + (K_{bb}K_c\omega_f + K_{bb}K_c z)s + K_{bb}K_c z\omega_f \quad (2.52)$$

Η ακόλουθη έκφραση λαμβάνεται μετά από εξομοίωση των συντελεστών των όρων s^2 στις εξισώσεις 2.51 και 2.52.

$$\omega_f = \frac{2\zeta\omega_n T_p + 1}{T_p} \quad (2.53)$$

Λύνοντας ως προς T_p μας δίνει την απαιτούμενη θέση του πόλου έτσι ώστε το σύστημα να έχει την επιθυμητή απόκριση:

$$T_p = \frac{1}{\omega_f - 2\zeta\omega_n} \quad (2.54)$$

2.11 Ασκήσεις εργαστηρίου

Άσκηση 1

Βρείτε το K_{bb} μέσω της απλούστευσης της εξίσωση 2.18 χρησιμοποιώντας τα μεγέθη που δίνονται στο πίνακα 1.2: προδιαγραφές πειράματος "Μπάλα και Δοκός".

Συμβουλή: Υπενθυμίζεται ότι η ροπή αδρανείας συμπαγής σφαίρας είναι $J_b = \frac{2}{5}m_b r_b^2$, όπου m_b είναι η μάζα της μπάλας και r_b είναι η ακτίνα της μπάλας.

Απάντηση:

$$K_{bb} = \frac{m_b g r_{arm} r_b^2}{L_{beam}(m_b r_b^2 + J_b)},$$

έτσι η γραμμική εξίσωση της κίνησης γίνεται:

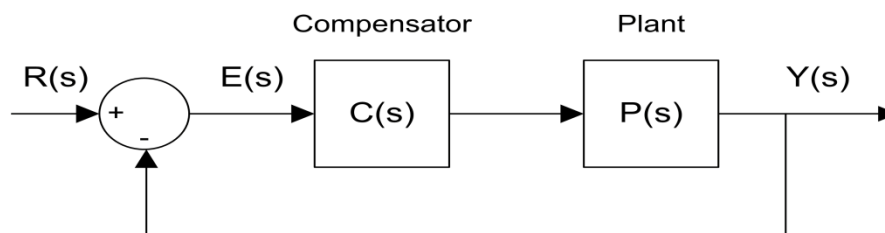
$$\frac{d^2}{dt^2} x(t) = K_{bb} \theta_i(t),$$

αντικαθιστώντας τους παράγοντες που βρίσκουμε στο πίνακα 1.2 έχουμε:

$$K_{bb} = 0.419 \frac{m}{s^2 rad}$$

Άσκηση 2

Βρείτε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης του συστήματος "μπάλα και δοκός" που δίνεται από τη συνάρτηση μεταφοράς $P_{bb}(s)$. Το σύστημα φαίνεται στην εικόνα 2.9 .



Εικόνα 2.9 Σύστημα κλειστού βρόγχου

Όπου $C(s) = 1$ και η επιθυμητή τιμή εισόδου ισούται με: $R(s) = \frac{R_0}{s}$

όπου R_0 είναι το πλάτος βήματος. Σημείωση: Σε αυτό τον υπολογισμό οι δυνάμεις που ασκούνται στο SRV02 πρέπει να αγνοηθούν και να λυφθεί υπόψη μόνο το σύστημα BB01.

Απάντηση:

Αντικαθιστώντας το σύστημα BB01 της εξίσωσης 2.21

$$(P_{bb}(s) = \frac{X(s)}{\theta_l(s)} = \frac{K_{bb}}{s^2})$$

μαζί με τον αντισταθμιστή $C(s)$ και την επιθυμητή τιμή είσοδο που καθορίζονται παραπάνω στην γενική συνάρτηση εύρεσης λάθους του συστήματος, έχουμε:

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + C(s)P_{bb}(s)}$$

που μας οδηγεί στην εξίσωση:

$$E(s) = \frac{R_0}{s(1 + \frac{K_{bb}}{s^2})}$$

Αυτό προκύπτει βάση του ότι:

$$C(s) = 1 \text{ και } P_{bb}(s) = \frac{K_{bb}}{s^2}$$

μετά από απλοποίηση, ο τύπος εύρεσης του λάθους γίνεται:

$$E(s) = \frac{R_0 s}{s^2 + K_{bb}}$$

Το σύστημα έχει 2 πόλους κατά μήκος του φανταστικού άξονα. Η απόκριση του συστήματος είναι ταλαντευμένη και ως εκ τούτου, δεν μπορεί να βρεθεί σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Με τη λήψη του αντίστροφου Laplace, το σφάλμα σε συνάρτηση με το χρόνο μπορεί να βρεθεί ως εξής:

$$e(t) = R_0 \cos(\sqrt{K_{bb}t})$$

Άσκηση 3

Χρησιμοποιώντας την εικόνα 2.6 , βρείτε τη συνάρτηση μεταφοράς του κλειστού βρόγχου του συστήματος BB01 με αναλογικό ελεγκτή όπου

$$C_{bb}(s) = K_c$$

Απάντηση:

Ο εξωτερικός ελεγκτής του βρόχου με χρήση αναλογικού αντισταθμιστή είναι:

$$\theta_d(s) = K_c(X_d(s) - X(s))$$

Με δεδομένο ότι οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο σέρβο αγνοούνται , όπως περιγράφηκε και στην σχέση 2.36 αντικαθιστούμε τον ελεγκτή που βρήκαμε πάνω στη συνάρτηση ανοιχτού βρόχου του συστήματος BB01 και λύνουμε ως προς $X(s)/X_d(s)$ και έτσι έχουμε:

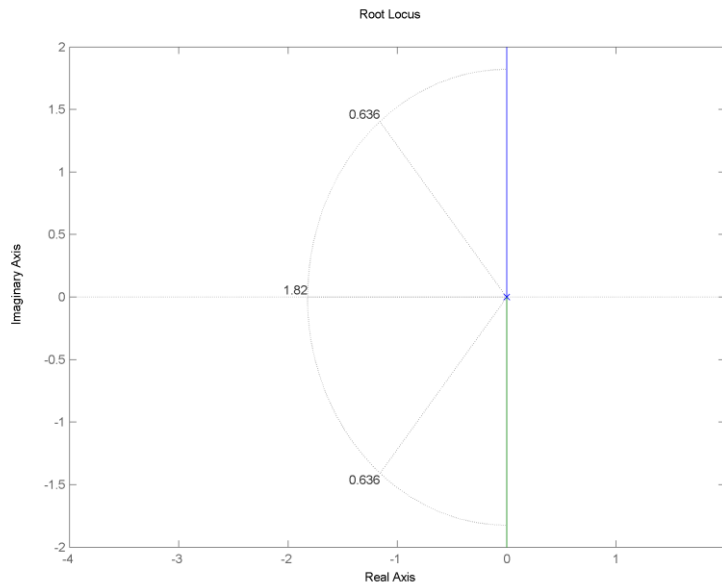
$$\frac{X(s)}{X_d(s)} = \frac{K_{bb}K_c}{s^2 + K_{bb}K_c}$$

Άσκηση 4

Σχεδιάστε το γεωμετρικό τόπο ριζών του BB01 συστήματος $P_{bb}(s)$. Περιγράψτε πώς οι πόλοι συμπεριφέρονται καθώς το κέρδος αντισταθμιστή K_c πηγαίνει προς το άπειρο.

Απάντηση:Ο γεωμετρικός τόπος ριζών του $P_{bb}(s)$ φαίνεται στην εικόνα 2.10 . Οι πόλοι του συστήματος κινούνται περεταίρω κατά μήκος του φανταστικού άξονα καθώς το K_c αυξάνεται προς το άπειρο. Η συμπεριφορά επίσης φαίνεται κοιτώντας τους πόλους του συστήματος κλειστού βρόχου της συνάρτησης

$$\frac{X(s)}{X_d(s)} = \frac{K_{bb}K_c}{s^2 + K_{bb}K_c}$$



Εικόνα 2.10 Γεωμετρικός τόπος ριζών του ανοικτού συστήματος BB01

Άσκηση 5

Βρείτε τη φυσική συχνότητα και το συντελεστή απόσβεσης που απαιτείται για την επίτευξη των χρονικών προδιαγραφών του συστήματος "μπάλα και δοκός" που αναφέρονται στο τμήμα 2.5.1.

Απάντηση:

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.31, ο ελάχιστος συντελεστής απόσβεσης που απαιτείται ώστε να έχουμε την επιθυμητή υπερύψωση επί τοις εκατό όπως δίνεται στην εξίσωση 2.29 είναι:

$$\zeta = 0.591$$

Χρησιμοποιώντας αυτό το αποτέλεσμα και την εξίσωση 2.30, μπορεί να βρεθεί ότι η φυσική συχνότητα πρέπει να είναι τουλάχιστον:

$$\omega_n = 1.66 \frac{rad}{s}$$

ώστε το σύστημα να έχει το χρόνο αποκατάστασης που καθορίζεται στη συνάρτηση 2.27 και το ποσοστό σταθεροποίησης στην επιθυμητή θέση που καθορίζεται στη συνάρτηση 2.28

Άσκηση 6

Αφού σχεδιάσετε το γεωμετρικό τόπο ριζών του συστήματος BB01 $P_{bb}(s)$, περιγράψτε που πρέπει να βρίσκονται οι πόλοι ώστε να ικανοποιούν τις επιθυμητές προδιαγραφές απόκρισης.

Απάντηση:

Εάν οι πόλοι τοποθετούνται στη τομή του τόξου και των διαγωνίων γραμμών όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10, τότε οι προδιαγραφές του χρόνου αποκατάστασης και της υπέρβασης επί τοις εκατό θα πρέπει να πληρούνται.

Άσκηση 7

Αναλύστε την απόκριση του συστήματος αν οι πόλοι βρίσκονται πέρα από την ακτίνα του κύκλου κατά μήκος των διαγωνίων γραμμών, δηλαδή σε απόσταση από τον φανταστικό άξονα. Επίσης, σχολιάστε τι γίνεται αν οι πόλοι του συστήματος βρίσκονται εντός των διαγωνίων γραμμών κατά μήκος της ακτίνας του κύκλου, δηλαδή κινούνται προς της κατεύθυνση του πραγματικού άξονα. Κάντε αναφορές στις επιπτώσεις που θα έχει στο χρόνο αποκατάστασης και στην απόκριση του συστήματος.

Απάντηση:

Όταν οι πόλοι κινούνται κατά μήκος των διαγωνίων γραμμών μακριά από το φανταστικό άξονα, η φυσική συχνότητα αυξάνεται και έτσι ο χρόνος αποκατάστασης μειώνεται, αλλά αυτό αυξάνει την υπέρβαση επί τοις εκατό. Εάν οι πόλοι μετακινούνται κατά μήκος του τόξου προς την κατεύθυνση του πραγματικού άξονα, ο συντελεστής απόσβεσης αυξάνεται προς το 1 και η υπέρβαση μειώνεται. Μόλις οι πόλοι είναι κατά μήκος του πραγματικού άξονα, ο συντελεστής απόσβεσης είναι 1 και το σύστημα δεν έχει υπερύψωση ($P_O=0$).

Άσκηση 8

Βασιζόμενοι στο γεωμετρικό τόπο ριζών του συστήματος που βρήκαμε προηγουμένως στην άσκηση 6, μπορούν οι προδιαγραφές του συστήματος "μπάλα και δοκός" να ικανοποιηθούν χρησιμοποιώντας έναν αναλογικό αντισταθμιστή;

Απάντηση:

Όχι. Όπως δείχνεται στην εικόνα 2.10 , οι πόλοι του συστήματος ανοικτού βρόχου δεν μπορούν να τοποθετηθούν στην επιθυμητή περιοχή χρησιμοποιώντας μονό αναλογικό έλεγχο.

Άσκηση 9

Υποθέτουμε ότι ένας παραδοσιακός PD ελεγκτής ($C_{bb}(s) = K_c(s + z)$) χρησιμοποιείται στο σύστημα που δίνεται στην εικόνα 2.6 . Βρείτε τη συνάρτηση που βρίσκει το σφάλμα του συστήματος. (Με τον όρο σφάλμα εννοούμε την διάφορα της πραγματική από την επιθυμητή έξοδο)

Απάντηση:

Αφού σε αυτή τη περίπτωση έχουμε ένα ενοποιημένο σύστημα ανατροφοδότησης , η συνάρτηση μεταφοράς του λάθους του συστήματος δίνεται από το τύπο:

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + C(s)P(s)}$$

Αντικαθιστώντας το σύστημα BB01, $P_{bb}(s)$, όπως δίνεται στην εξίσωση 2.21 και αντικαθιστώντας και τον αντισταθμιστή έχουμε:

$$E(s) = \frac{R_0}{s(1 + \frac{K_c(s+z)K_{bb}}{s^2})}$$

Μετά την απλοποίηση το σφάλμα του συστήματος BB01 γίνεται:

$$E(s) = \frac{R_0 s}{s^2 + K_{bb}K_c s + K_{bb}K_c z}$$

Άσκηση 10

Βρείτε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης του συστήματος κλειστού βρόχου BB01 με τη χρήση ενός παραδοσιακού PD ελεγκτή. Μπορεί το σφάλμα σταθερής κατάστασης που ζητείται στη συνάρτηση 2.26 να ικανοποιηθεί;

Απάντηση:

Εισάγοντας τη συνάρτηση εύρεσης λάθους του συστήματος BB01 ($E(s)$) στο θεώρημα τελικής τιμής έχουμε:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s E(s)$$

έτσι παίρνουμε τον παρακάτω τύπο:

$$e_{ss} = R_0 \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^2}{s^2 + K_{bb}K_c s + K_{bb}K_c z}$$

Υπολογίζοντας το όριο, το σφάλμα μόνιμης κατάστασης της θέσης της μπάλας είναι:

$$e_{ss} = 0$$

Έτσι, οι προδιαγραφές που δόθηκαν για το σφάλμα μόνιμης κατάστασης στην συνάρτηση 2.26, μπορούν να ικανοποιηθούν με αυτό το τύπο αντισταθμιστή.

Άσκηση 11

Βασισμένοι στις εξισώσεις 2.40($z = \frac{\omega_n^2}{K_{bb}K_c}$) και 2.41($K_c = \frac{2\zeta\omega_n}{K_{bb}}$), εκτιμήστε με χρήση αριθμών τη θέση των μηδενικών και του κέρδους που απαιτείται για να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές του συστήματος.

Απάντηση:

Για να υπολογίσουμε το απαιτούμενο κέρδος, αντικαθιστούμε το κέρδος που βρέθηκε προηγουμένως στην άσκηση 1($K_{bb} = 0.419 \frac{m}{s^2 rad}$), το συντελεστή απόσβεσης ($\zeta = 0.591$) και τη φυσική συχνότητα ($\omega_n = 1.66 \frac{rad}{s}$) που βρεθήκαν στην άσκηση 5, ώστε να βρούμε το επιθυμητό κέρδος από την εξίσωση 2.41 ($K_c = \frac{2\zeta\omega_n}{K_{bb}}$). Έτσι:

$$K_c = 4.68 \frac{rad}{m}$$

Για να βρούμε τις θέσεις των μηδενικών ,λύνουμε την συνάρτηση 2.40 ($z = \frac{\omega_n^2}{K_{bb}K_c}$) με χρήση του κέρδους που βρήκαμε στην άσκηση 1 ($K_{bb} = 0.419 \frac{m}{s^2 rad}$) και της φυσικής συχνότητας που βρήκαμε στην άσκηση 5 ($\omega_n = 1.66 \frac{rad}{s}$) και έτσι η συναρτησης z γίνεται:

$$z = 1.41 \frac{rad}{s}$$

Άσκηση 12

Βρείτε τις θέσεις των μηδενικών, z , και το κέρδος του αντισταθμιστή, K_c , για το πρακτικό PD ελεγκτή για να ικανοποιείται η φυσική συχνότητα, ω_n και ο συντελεστής απόσβεσης, ζ , που δόθηκαν στ παράγραφο 2.5.1 και η

επιθυμητή συχνότητα αποκοπής που καθορίζεται στη συνάρτηση 2.43 ($\omega_f = 6.28 \text{ rad/s}$) . Μετα υπολογίστε μαθηματικά τη σταθερά χρόνου του πόλου, τη θέση των μηδενικών και το κέρδος που απαιτείτε για να ικανοποιηθούν οι προδιαγραφές.

Απάντηση:

Αυτές οι 2 εξισώσεις αποκτούνται εξισώνοντας τους συντελεστές s^1 και $s^0 = 1$ της πρωτυπης χαρακτηριστικής εξίσωσης 2.51

$$(s^3 + \frac{(2\zeta\omega_n T_p + 1)s^2}{T_p} + \frac{(\omega_n^2 T_p + 2\zeta\omega_n)s}{T_p} + \frac{\omega_n^2}{T_p} s^0)$$

και της χαρακτηριστικής εξίσωσης για το σύστημα BB01, εξίσωση 2.52,

$$(s^3 + s^2\omega_f + (K_{bb}K_c\omega_f + K_{bb}K_c z)s + K_{bb}K_c z\omega_f)$$

έτσι έχουμε:

$$K_{bb}K_c z\omega_f = \frac{\omega_n^2}{T_p}$$

και

$$K_{bb}K_c\omega_f + K_{bb}K_c z = \frac{\omega_n^2 T_p + 2\zeta\omega_n}{T_p}$$

Λύνοντας ως προς K_c την εξίσωση

$$K_{bb}K_c z\omega_f = \frac{\omega_n^2}{T_p}$$

το κέρδος που απαιτείται για να έχουμε τις προδιαγραφές για τα ω_f, ω_n και ζ είναι:

$$K_c = \frac{\omega_n^2}{T_p K_{bb} z \omega_f}$$

Έτσι αντικαθιστώντας και λύνοντας ως προς z εξάγεται ο τύπος:

$$z = \frac{\omega_n \omega_f}{-\omega_n + \omega_f \omega_n T_p + 2\omega_f \zeta}$$

Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται για την εύρεση των μηδενικών που απαιτούνται για να πληροί το σύστημα μας τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Για να βρούμε τις τιμές των μεταβλητών της σταθεράς χρόνου του πόλου T_p , τις θέσεις των μηδενικών, z , και το κέρδος του αντισταθμιστή, K_c , αντικαθιστούμε το συντελεστή απόσβεσης $\zeta = 0.591$, και τη φυσική

συχνότητα $\omega_n = 1.66 \frac{rad}{s}$ που βρεθήκαν στην άσκηση 5 και τη συχνότητα αποκοπής $\omega_f = 6.28 rad/s$ που δόθηκε στο στη παράγραφο 2.10 στη συνάρτηση 2.54 ($T_p = \frac{1}{\omega_f - 2\zeta\omega_n}$) και έτσι έχουμε:

σταθερά χρόνου του πόλου:

$$T_p = 0.231 s$$

θέσεις των μηδενικών:

$$z = 1.20 \frac{rad}{s}$$

και το κέρδος:

$$K_c = 3.56 \frac{rad}{m}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3. Έλεγχος συστήματος "μπάλα και δοκός" μέσω matlab

3.1 Εισαγωγή

Ο κύριος στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να διερευνηθεί ο έλεγχος θέσης της μπάλας του συστήματος "Μπάλα και Δοκός".

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα διενεργηθούν δύο ομάδες πειραμάτων:

1. Έλεγχος με ιδανικό PD ελεγκτή.

1.1 Προσομοίωση χωρίς να ασκούνται δυνάμεις πάνω στο σέρβο.

1.2 Προσομοίωση ενώ ασκούνται δυνάμεις πάνω στο σέρβο.

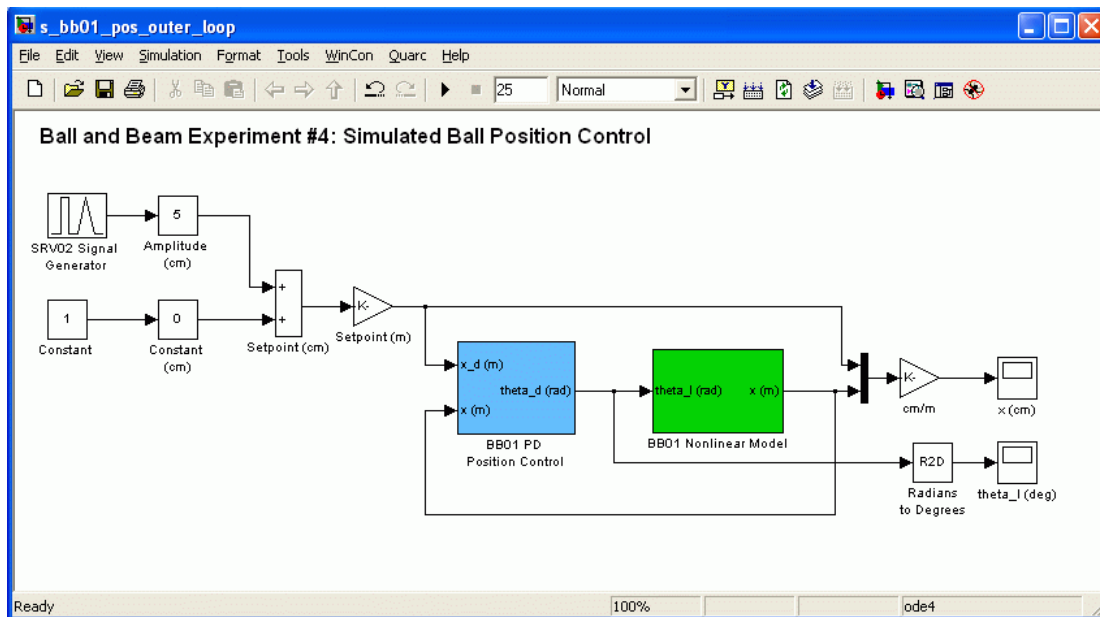
2. Έλεγχος με πρακτικό PD ελεγκτή και δυνάμεις πάνω στο σέρβο.

2.1 Προσομοίωση με πρακτικό PD ελεγκτή.

3.2 Έλεγχος με ιδανικό PD ελεγκτή

3.2.1 Προσομοίωση χωρίς να ασκούνται δυνάμεις πάνω στο σέρβο

Το διάγραμμα Simulink s_bb01_pos_outer_loop που φαίνεται στην εικόνα 3.1 χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ανταπόκρισης της θέσης του BB01 κατά τη χρήση του κλειστού βρόχου ελέγχου. Έτσι, οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο SRV02 παραμελούνται, δηλαδή $\theta_d = \theta_l$. Η απόκριση έχει προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας το ανεπτυγμένο μη γραμμικό μοντέλο του συστήματος "Μπάλας και Δοκός".



Εικόνα 3.1 Simulink διάγραμμα που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του κλειστού βρόχου του BB01 συστήματος.

Το BB01 μη γραμμικό υποσύστημα περιλαμβάνει τη $P_{bb}(s)$ συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει στο κεφάλαιο 2. Στο κεφάλαιο 2 το μοντέλο έπρεπε να γραμμοποιηθεί για να ληφθεί η $P_{bb}(s)$ συνάρτηση μεταφοράς. Αυτή η μη γραμμικότητα επανεισάγεται στο μη γραμμικό υποσύστημα BB01, προκειμένου να έχει το σύστημα μεγαλύτερη ακρίβεια και για να διασφαλιστεί ότι οι προδιαγραφές μπορούν ακόμα να ικανοποιηθούν. Το υποσύστημα ελέγχου θέσης του BB01 περιέχει τον ιδανικό PD ελεγκτή που σχεδιάστηκε στο κεφ. 2. Σημείωση ότι το υποσύστημα περιλαμβάνει ένα μπλοκ που περιορίζει την γωνία του SRV02 μεταξύ ± 56 μοιρών.

Προσομοίωση

Οι θέσεις των ριζών του συστήματος έχουν αναπαρασταθεί γραφικά με χρήση Matlab και η βηματική απόκριση του κλειστού συστήματος του BB01 έχει προσομοιωθεί με σκοπό να επικυρώσει ότι έχουν τηρηθεί οι προδιαγραφές. Όπως αναφέρθηκε και πριν, η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε χρήση του μη γραμμικού μοντέλου του συστήματος "Μπάλα και Δοκός" και του ιδανικού PD ελεγκτή που σχεδιάστηκε.

1. Ανοίξτε το διάγραμμα Simulink s_bb01_pos_outer_loop.

2. Πληκτρολογήστε το κέρδος μοντέλου του BB01 ως μεταβλητή K_{bb} . Το κέρδος βρέθηκε στην ενότητα 2.11 και είναι: $K_{bb} = 0.419 \frac{m}{s^2 rad}$.

3. Στο Matlab, εισάγετε το κέρδος αντισταθμιστή του BB01 K_c και το μηδενικό του αντισταθμιστή, z . Το κέρδος αντισταθμιστή του BB01 K_c και το μηδενικό του αντισταθμιστή z , βρέθηκαν στην ενότητα 2.11 και είναι:

$$K_c = 4.68 \frac{rad}{m}$$

και

$$z = 1.41 \frac{rad}{s}$$

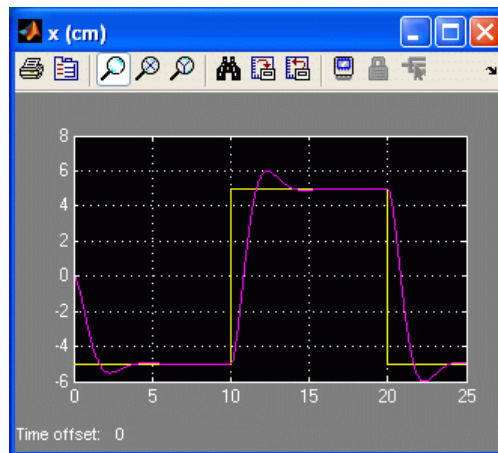
4. Χρησιμοποιώντας Matlab, σχεδιάστε το γεωμετρικό τόπο ριζών της συνάρτησης μεταφοράς του BB01 όταν χρησιμοποιούμε τον ιδανικό PD ελεγκτή με την βοήθεια του εργαλείου *locus*. Υπενθύμιση, ότι όπως βρέθηκε στην άσκηση 6 του κεφαλαίου 2.11, η επιθυμητή θέση των πόλων βρίσκεται στη τομή του τόξου και των διαγώνιων γραμμών. Χρησιμοποιήστε την εντολή *sgrid* για να περιελάβετε τις διακεκομμένες γραμμές που δείχνουν τις επιθυμητές θέσεις των πόλων. Βεβαιωθείτε ότι οι πόλοι περνάν μέσα από τις επιθυμητές θέσεις.

5. Επιλέξτε *square* στο *Signal Type* field της γεννήτριας σημάτων του SRV02, προκειμένου να δημιουργήσει μια βηματική αναφορά.

6. Ρυθμίστε το εύρος (*Amplitude*) κέρδους(σε cm) στο 5 για να δημιουργήσει ένα βήμα με πλάτος 5 εκατοστά.

7. Ανοίξτε το *load shaft position scope*, $\theta_{l}(deg)$, και το *ball position scope*, x (m).

8. Ξεκινήστε την προσομοίωση. Από προεπιλογή, η προσομοίωση τρέχει για 25 δευτερόλεπτα. Στα πεδία πρέπει να δείτε αποκρίσεις παρόμοιες με την εικόνα 3.2 και την εικόνα 3.3. Στο x (m), το κίτρινο ίχνος είναι η επιθυμητή θέση της μπάλας και το μωβ ίχνος είναι η προσομοιωμένη αντίδραση.



Εικόνα 3.2 Ανταπόκριση θέσης μπάλα εξωτερικού βρόχου με χρήση ιδανικού PD ελεγκτή.



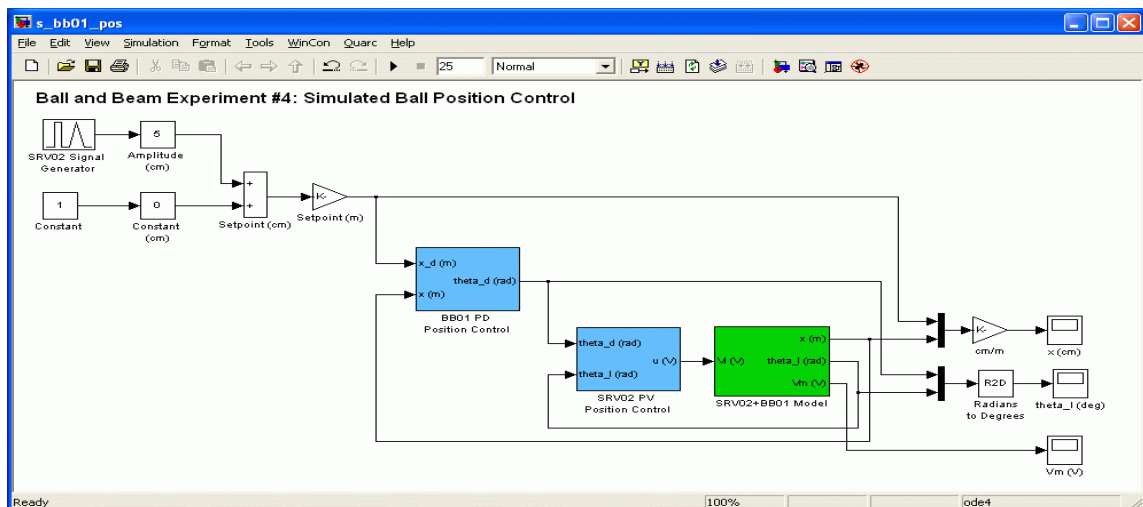
Εικόνα 3.3 Ανταπόκριση γωνίας σέρβο εξωτερικού βρόχου με χρήση ιδανικού PD ελεγκτή.

9. Δημιουργήστε ένα γράφημα στο Matlab που να δείχνει την μη γραμμική ανταπόκριση της θέσης της μπάλα του εξωτερικού βρόχου του BB01 και την αντίστοιχη γωνία του σέρβο. Μετά από κάθε κύκλο προσομοίωσης, κάθε πεδίο αποθηκεύει αυτόματα την απόκριση του σε μια μεταβλητή στο Matlab workspace. Το x (m) αποθηκεύει την τιμή του στην μεταβλητή που ονομάζεται $data_x$ και το $theta_l$ (deg) αποθηκεύει την τιμή του στην μεταβλητή $data_theta_l$. Η μεταβλητή X έχει την ακόλουθη δομή: $data_x(:, 1)$ είναι το διάλυμα χρόνου, το $data_x(:, 2)$ είναι η επιθυμητή τιμή, και το $data_x(:, 3)$ είναι η προσομοιωμένη θέση της μπάλας. Για τη μεταβλητή $data_theta_l$, $data_theta_l(:, 1)$ είναι ο χρόνος και τα $data_theta_l(:, 2)$ είναι η γωνία του σέρβο.

10. Μετρήστε το σφάλμα σταθερής κατάστασης, το χρόνο αποκατάστασης, και την υπερέυωση επί τοις εκατό της προσομοιωμένης απόκρισης.

3.2.2 Προσομοίωση ενώ ασκούνται δυνάμεις πάνω στο σέρβο

Οι δυνάμεις του σέρβο μπορούν τώρα να προστεθούν και η απόκριση θέσης κλειστού βρόχου με το σύστημα ελέγχου μπορεί να προσομοιωθούν χρησιμοποιώντας το διάγραμμα Simulink s_BB01_pos που απεικονίζεται στην εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4 Διάγραμμα Simulink που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του συστήματος ελέγχου.

Το SRV02 + BB01 υποσύστημα περιλαμβάνει το μη γραμμικό μοντέλο του συστήματος BB01 και τη συνάρτηση μεταφοράς που αντιπροσωπεύουν τη σχέση της τάση εισόδου ως προς τη θέση του SRV02. Ο ελεγκτής θέσης που έχει σχεδιαστεί στο κεφάλαιο 2 εφαρμόζεται στο *SRV02 PV Position Control* block.

Ο ελεγκτής είναι ο αλγόριθμος που θα εφαρμοστεί στην πραγματική SRV02 + BB01 συσκευή. Πριν από την εγκατάσταση, θα πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι οι προδιαγραφές εξακολουθούν να πληρούνται όταν προστίθενται οι δυνάμεις στο σέρβο. Επιπλέον, η γωνία του σέρβο πρέπει να διατηρείται μεταξύ ± 56 μοιρών και η τάση του σέρβο δεν μπορεί να υπερβαίνει τα $\pm 10V$.

Προσομοίωση

Ο σκοπός αυτής της προσομοίωσης είναι να δούμε πώς ο χρόνος αποκατάστασης, η υπερύψωση και το σφάλμα μόνιμης κατάστασης αλλάζει όταν ο εσωτερικός βρόχος ελέγχου του σέρβο που σχεδιάστηκε στο κεφάλαιο 2, προστίθεται. Σε αυτή την προσομοίωση, θα χρησιμοποιηθεί ο ιδανικός PD ελεγκτής.

1. Ανοίξτε το διάγραμμα Simulink `s_BB01_pos`.
2. Στο Matlab, εισάγετε το κέρδος του SRV02, K , και τη σταθερά χρόνο, τ (στο περιβάλλον του matlab θα αναφέρεται ως `tau`), που δίνονται στην ενότητα 2.1 και ισούνται με:

$$K = 1.53 \text{ rad}/(V \cdot s)$$

$$\tau = 0.0248 \text{ s}$$

3. Εισάγετε τα κέρδη του SRV02 PV: Αποκαλούνται μεταβλητές k_p και k_v στο Matlab που βρεθήκαν στην ενότητα 2.7 και ισούνται με:

$$k_p = 13.5 \text{ V}/\text{rad}$$

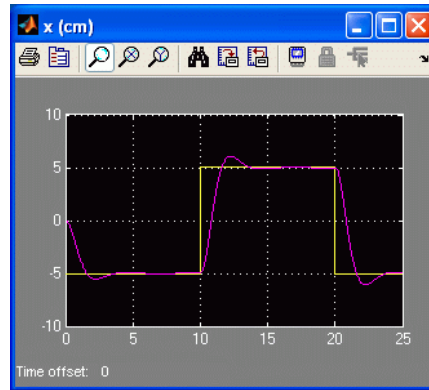
$$k_v = 0.078 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{rad}$$

4. Επιλέξτε `square` στο `Signal Type` field της γεννήτριας σήματος του SRV02, προκειμένου να δημιουργηθεί μια βηματική αναφορά.
5. Ρυθμίστε το εύρος (`Amplitude`) (cm) σε 5 εκατοστά για να δημιουργήσετε ένα βήμα με πλάτος 5 εκατοστά.
6. Ανοίξτε το γράφημα θέσης μπάλας `x` (m), το γράφημα γωνίας σέρβο `theta_1` (deg), και το γράφημα τάσης εισόδου του SRV02 `Vm` (V).

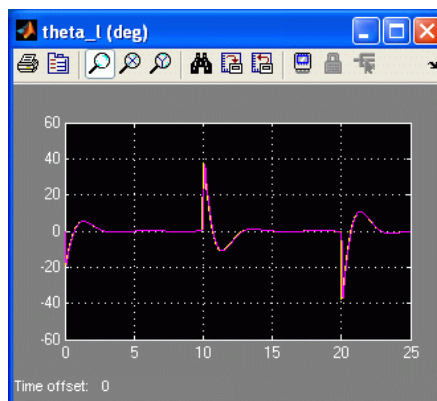
7. Τοποθετήστε το χειροκίνητο διακόπτη `BB01 PD Position Control` subsystem στην πάνω θέση, προκειμένου να χρησιμοποιήσετε τον ιδανικό PD ελεγκτή κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης.

8. Ξεκινήστε την προσομοίωση. Από προεπιλογή, η προσομοίωση τρέχει για 25 δευτερόλεπτα. Στα πεδία πρέπει να δείτε αποκρίσεις όμοιες με αυτές που βλέπεται στους πίνακες 3.5, 3.6, και 3.7. Οι κίτρινες και μοβ γραμμές στο `x`

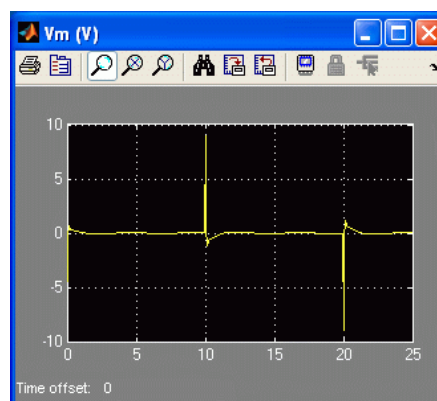
(m) παράθυρο είναι η επιθυμητή τιμή της θέσης της μπάλας και οι προσομοιωμένες τιμές αντίστοιχα. Ομοίως, στο $theta_l$ (deg) παράθυρο, το κίτρινο ίχνος είναι η επιθυμητή γωνία του άξονα, η οποία παράγεται από τον εξωτερικό βρόχο ελέγχου, και το μωβ ίχνος είναι η προσομοίωση γωνίας του άξονα.



Εικόνα 3.5 Ανταπόκριση θέσης μπάλας με χρήση ιδανικού PD ελεγκτή



Εικόνα 3.6 Ανταπόκριση γωνίας σέρβο με χρήση ιδανικού PD ελεγκτή



Εικόνα 3.7 Ανταπόκριση τάσης εισόδου με χρήση ιδανικού PD ελεγκτή

9. Μετρήστε το σφάλμα μόνιμης θέσης, το χρόνο αποκατάστασης, και την υπερύψωση τοις εκατό του ιδανικού PD ελεγκτή.

3.3 Έλεγχος με πρακτικό PD ελεγκτή και δυνάμεις πάνω στο σέρβο

3.3.1 Προσομοίωση με πρακτικό PD ελεγκτή

Ο πρακτικός ελεγκτής PD αναπτύσσεται στο κεφάλαιο 2 και προσομοιώνεται σε αυτή την ενότητα. Αυτός είναι ο αντισταθμιστής που θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της πραγματικής BB01 συσκευή. Οι πόλοι και μηδενικά μπορεί να χρειαστεί να τελειοποιηθούν, προκειμένου να αντισταθμίσουν τη προστιθέμενη δυναμική του φιλτραρίσματος και του εσωτερικού βρόχου ελέγχου του σέρβο. Ακολουθήστε τα παρακάτω βήματα για την προσομοίωση του κλειστού κυκλώματος πρακτικού PD ελεγκτή:

1. Ανοίξτε το διάγραμμα του Simulink s_BB01_pos.
2. Πληκτρολογήστε το κέρδος του συστήματος BB01 στο Matlab ως μεταβλητή K_{bb} . Το κέρδος βρέθηκε στην ενότητα 2.11 και είναι: $K_{bb} = 0.419 \frac{m}{s^2 rad}$.
3. Εισάγετε το κέρδος του πρακτικού PD αντισταθμιστή K_c , και τις θέσεις των μηδενικών, z . Το φίλτρο αποκοπής, ω_f , έχει ήδη οριστεί από το Matlab. Οι θέσεις των μηδενικών και το κέρδος βρεθήκαν στην άσκηση 12 του κεφαλαίου 2.11 και είναι:

$$z = 1.20 \frac{rad}{s}$$

$$K_c = 3.56 \frac{rad}{m}$$

4. Στο Matlab, εισάγετε το κέρδος του SRV02, K , και τη σταθερά χρόνο, τ (στο περιβάλλον του matlab θα αναφέρεται ως tau), που δίνονται στην ενότητα 2.1 και ισούνται με:

$$K = 1.53 \text{ rad}/(V \cdot s)$$

$$\tau = 0.0248 \text{ s}$$

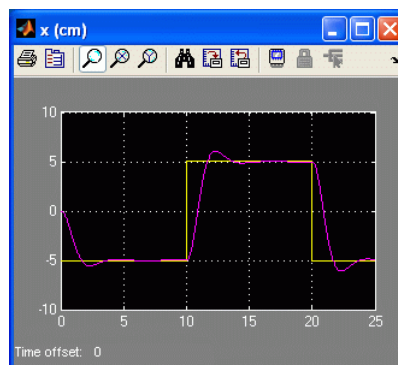
5. Εισάγετε τα κέρδη του SRV02 PV: Αποκαλούνται μεταβλητές k_p και k_v στο Matlab που βρεθήκαν στην ενότητα 2.7 και ισούνται με:

$$k_p = 13.5 \text{ V}/rad$$

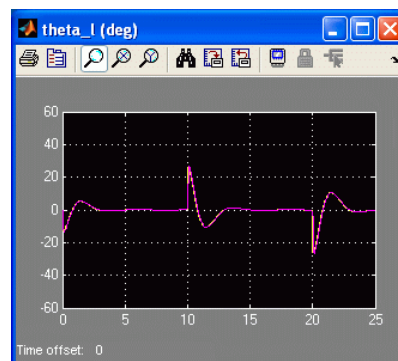
$$k_v = 0.078 \text{ V} \cdot s/rad$$

6. Επιλέξτε square στο *Signal Type* field της γεννήτριας σήματος του SRV02, προκειμένου να δημιουργηθεί μια βηματική αναφορά.

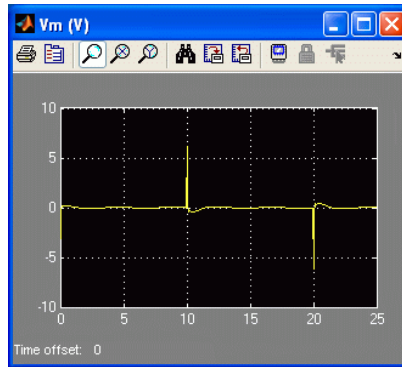
7. Ρυθμίστε το εύρος (*Amplitude*) (cm) σε 5 εκατοστά για να δημιουργήσετε ένα βήμα με πλάτος 5 εκατοστά.
8. Για την προσομοίωση με το πρακτικό ελεγκτή PD, βαλτέ το Manual Switch του υποσυστήματος του BB01 PD Position Control στην κάτω θέση.
9. Χρησιμοποιώντας Matlab, σχεδιάστε το γεωμετρικό τόπο ριζών της συνάρτησης μεταφοράς του BB01 όταν χρησιμοποιείται τον πρακτικό PD ελεγκτή. Δείτε τις επιθυμητές θέσεις των πόλων στο γράφημα και βεβαιωθείτε ότι οι πόλοι περνούν από τις επιθυμητές θέσεις.
10. Ανοίξτε το γράφημα θέσης μπάλας x (m), το γράφημα θέσης άξονα θ_{a1} (DEG), και το γράφημα τάσης εισόδου του SRV02 Vm (V).
11. Ξεκινήστε την προσομοίωση. Από προεπιλογή, η προσομοίωση τρέχει για 25 δευτερόλεπτα. Στα γραφήματα πρέπει να δείτε αποκρίσεις όμοιες με την εικόνα 3.8, εικόνα 3.9 και το εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.8 Θεση μπάλας με χρήση πρακτικού ελεγκτή



Εικόνα 3.9 Γωνία σέρβο με χρήση πρακτικού ελεγκτή



Εικόνα 3.10 Τάση εισόδου με χρήση πρακτικού ελεγκτή

12. Δημιουργήστε ένα σχήμα Matlab που δείχνει την θέση μπάλας, τη γωνία του σέρβο, και τη τάση εισόδου με χρήση ελεγκτή.

13. Μετρήστε το σφάλμα σταθερής κατάστασης, το χρόνο αποκατάστασης, και την υπερύψωση επί τοις εκατό της προσομοίωσης του πρακτικού PD ελεγκτή.

14. Τα αποτελέσματα του προηγούμενου βήματος ικανοποιούν τις προδιαγραφές που δόθηκαν στη παράγραφο 2.5.1

Υπενθύμιση προδιαγραφών:

$$|e_{ss}| \leq 0.005m$$

$$t_s = 3.5s$$

$$PO = 10.0\%$$

Συμπεράσματα

Στόχος της πτυχιακής εργασίας ήταν η εξοικείωση με το μοντέλο "Μπάλα και Δοκός", της εταιρίας Quanser και η λεπτομερής περιγραφή της κατασκευής, των εξαρτημάτων, καθώς του μαθηματικού μοντέλου και η ξενάγηση στο μοντέλο simulink που υπάρχει διαθέσιμο.

Τα θέματα που καλύφθηκαν στην εργασία είναι τα ακόλουθα:

- Μοντελοποίηση δυναμικής της μπάλας.
- Απόκτηση συνάρτησης μεταφοράς της λειτουργίας του συστήματος.
- Αξιολόγηση των προδιαγραφών σχεδιασμού του συστήματος.
- Σχεδιασμός ενός συστήματος ελέγχου για τη ρύθμιση της θέσης της μπάλας επί της δοκού.
- Προσομοίωση του ελέγχου της μπάλας για να εξασφαλιστεί ότι οι προδιαγραφές τηρούνται.
- Εφαρμογή των ελεγκτών για τη συσκευή "Μπάλα και Δοκός" και την αξιολόγηση της απόδοσής του.

Μεγάλο μέρος της πτυχιακής εργασίας βασίστηκε στα manuals της κατασκευάστριας εταιρίας Quanser.

Βιβλιογραφία

Εγχειρίδιο χρήσης για μαθητές του πειράματος "Μπάλα και δοκός" της εταιρίας Quanser "Ball and Beam Workbook (Student)"

Εγχειρίδιο χρήσης του συστήματος "Μπάλα και δοκός" της εταιρίας Quanser "BB01 User Manual"

Υπεύθυνη Δήλωση

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε υποστήριξη ή βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται μέσα σε αυτήν. Επίσης, σε αυτή την πτυχιακή εργασία αναφέρονται όλες οι πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων και πληροφοριών. Τέλος, βεβαιώνω ότι αυτή η πτυχιακή εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά και ειδικά για τις αναγκαίες απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Πληροφορικής & Επικοινωνιών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Σερρών.