

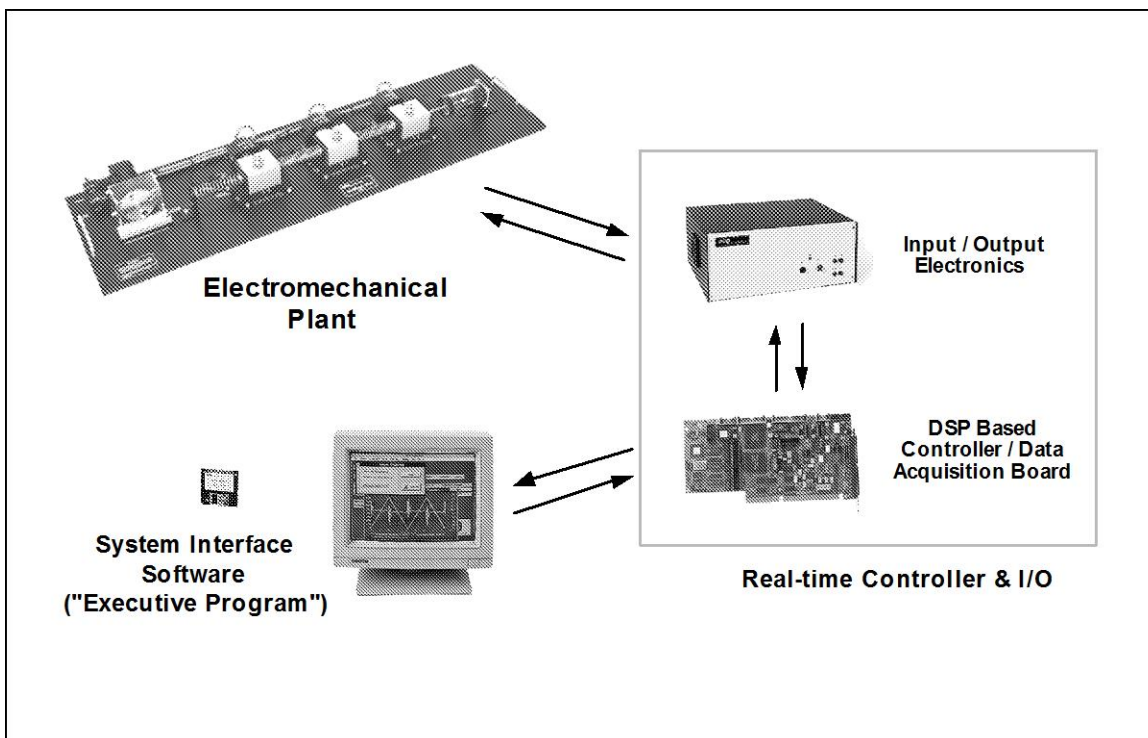
Εργαστηριακή άσκηση: Σύστημα Μάζας-Ελατηρίου-Αποσβεστήρα

Μέρος 1: Αναγνώριση Συστήματος

Μέρος 2: Κατευθυντές PD και PID

### I. Περιγραφή Συστήματος

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τρία υποσυστήματα όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Το πρώτο είναι το ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα (electromechanical plant) που περιλαμβάνει τις μάζες, ελατήρια και αποσβεστήρα, ένα ηλεκτρικό κινητήρα συνεχούς ρεύματος και αισθητήρες μέτρησης θέσης (οπτικούς κωδικοποιητές) των κινούμενων μαζών. Το δεύτερο είναι η μονάδα ελέγχου η οποία περιλαμβάνει ένα digital signal processor (DSP) και σύστημα λήψης δεδομένων (data acquisition board). Το τρίτο υποσύστημα είναι το κύριο λογισμικό (executive program) το οποίο τρέχει σε προσωπικό υπολογιστή (PC). Περιλαμβάνει διάφορα μενού επιτρέποντας στο χρήστη την επιλογή κατάλληλου κατευθυντή, επιλογή τροχιάς, δημιουργία γραφικών παραστάσεων και εκτέλεση εντολών.



Εικόνα 1. Κύρια στοιχεία της πειραματικής διάταξης.

## II. Ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα

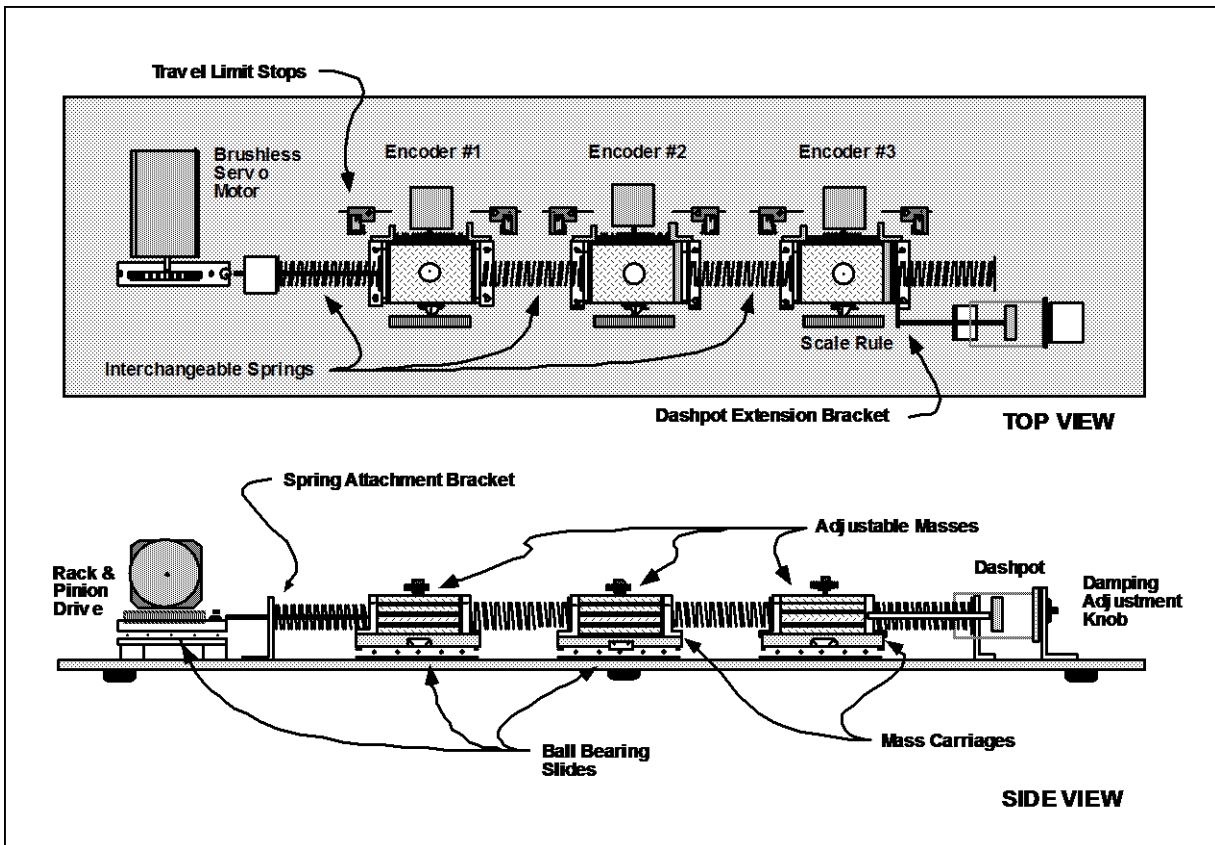
Το ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα (Εικόνα 2) αποτελείται από τρία βαγόνια (κινούμενες μάζες) που συνδέονται με μεταξύ τους ελατήρια συμπίεσης/εφελκυσμού. Τα βαγόνια κινούνται πάνω σε κατάλληλα έδρανα με ελάχιστη τριβή. Η συνολική διαδρομή τους είναι περίπου  $\pm 3$  cm. Η κίνηση του ηλεκτρικού κινητήρα μετατρέπεται σε γραμμική και μεταφέρεται στα βαγόνια μέσω ενός συστήματος οδοντωτού τροχού και κανόνα. Αισθητήρες (οπτικοί κωδικοποιητές) παρέχουν μέτρηση της θέσης καθενός βαγονιού.

Ελατήρια με διαφορετικές σταθερές είναι διαθέσιμα και μπορούν να συνδεθούν μεταξύ των μαζών ή μεταξύ των μαζών και της σταθερής πλάκας στη βάση. Ένας αποσβεστήρας με μεταβλητό συντελεστή απόσβεσης μπορεί να συνδεθεί με οποιαδήποτε από τις τρεις κινούμενες μάζες. Μπροστά από κάθε μάζα υπάρχουν εγκατεστημένοι χάρακες για να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα πειράματα.

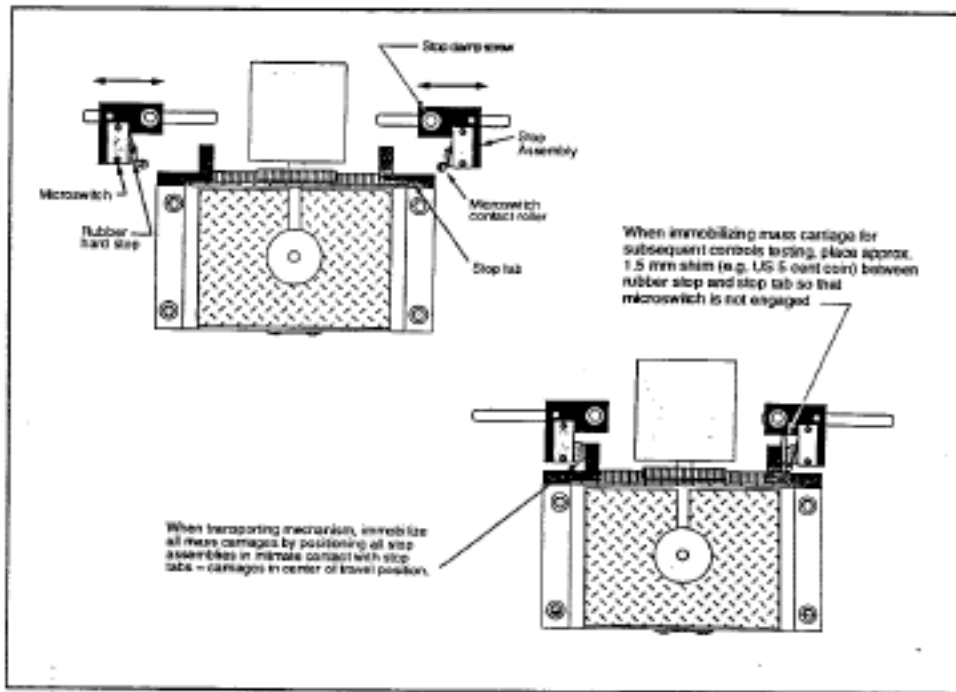
Ανάλογα με τη συνδεσμολογία των στοιχείων (μάζες, ελατήρια, αποσβεστήρας) μπορούν να προκύψουν διαφορετικά συστήματα που περιλαμβάνουν ελεύθερες και πακτωμένες μορφές με 1, 2, και 3 βαθμούς ελευθερίας. Τα ελατήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά και είναι διαθέσιμα σε τρεις ονομαστικές σταθερές: 175 N/m, 400 N/m, και 800 N/m. Καλό θα ήταν η εναλλαγή της διάταξης του συστήματος να γίνεται από ειδικευμένο τεχνικό εργαστηρίου.

Ο αποσβεστήρας μπορεί να συνδεθεί με οποιαδήποτε βαγόνι είτε απευθείας είτε διαμέσου κατάλληλου εξαρτήματος (extension bracket). Ο συντελεστής απόσβεσης του μπορεί να μεταβληθεί ρυθμίζοντας τη βαλβίδα ροής του αέρα που βρίσκεται στο πίσω του μέρος. Ο χρήστης μπορεί επίσης να μεταβάλλει τις τιμές των κινούμενων μαζών σε κάθε βαγόνι αλλάζοντας τον αριθμό των μπρούντζινων βαρών ( $500 \pm 4$  g το καθένα) που μπορούν να στοιβαχθούν σε αυτά. Να δίδεται προσοχή ώστε τα βάρη να είναι καλά στερεωμένα με σύσφιξη του κοχλία συγκράτησης τους προτού τεθεί σε λειτουργία το σύστημα.

Πριν από τη λειτουργία πρέπει επίσης να ρυθμιστεί η θέση των εξαρτημάτων που καθορίζουν τα μηχανικά όρια της διαδρομής του κάθε βαγονιού. Η Εικόνα 3 περιέχει πληροφορίες για τον τρόπο ρύθμισης αυτών των ορίων. Τα εξαρτήματα αυτά περιλαμβάνουν ένα ελαστικό «προφυλακτήρα» ώστε να σταματούν τη κίνηση, και ένα μικροδιακόπτη που ενεργοποιείται πριν το βαγόνι προσκρούσει στον προφυλακτήρα. Όταν μια συγκεκριμένη μάζα πρόκειται να κινείται ελεύθερα τα όρια πρέπει γενικά να επιτρέπουν κίνηση περίπου  $\pm 3$  cm. Για κάποιες μορφές του συστήματος η δεύτερη και τρίτη μάζα χρειάζεται να ακινητοποιηθούν. Σε αυτή την περίπτωση ένα διαχωριστικό (π.χ., νόμισμα) χρειάζεται μεταξύ του προφυλακτήρα και του ελάσματος του μικροδιακόπτη εξασφαλίζοντας τη μη ενεργοποίηση του (βλ. Εικόνα 3).



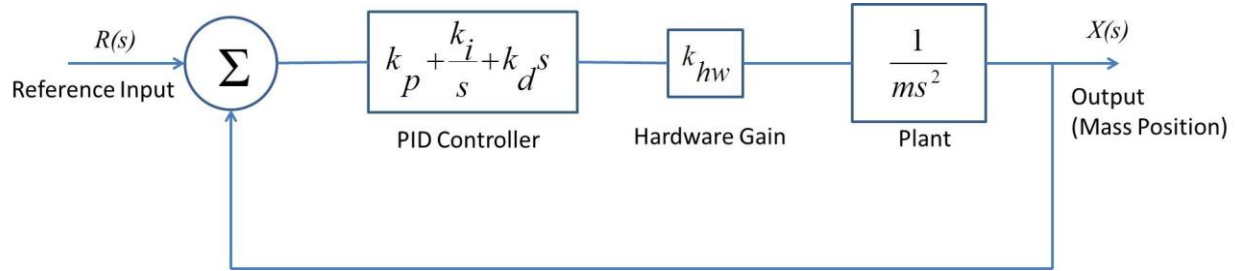
Εικόνα 2. Το σύστημα μαζών και ελατηρίων.



Εικόνα 3. Τρόπος ακινητοποίησης μαζών με μηχανικά όρια.

### III. Σκοπός

Στη συγκεκριμένη πειραματική άσκηση επιδεικνύονται βασικά ζητήματα σχετικά με τον αναλογικό-ολοκληρωτικό-διαφορικό κατευθυντή (PID). Ο συγκεκριμένος τύπος ελέγχου βρίσκει πολλές εφαρμογές σε διάφορα συστήματα όπως για παράδειγμα ρομποτικά συστήματα και οχήματα. Παράδειγμα ενός δομικού διαγράμματος για ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου με PID κατευθυντή φαίνεται στην Εικόνα 4.



**Εικόνα 4.** Δομικό διάγραμμα PID ελέγχου κλειστού βρόχου.

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου που σχετίζεται με το παραπάνω σύστημα είναι:

$$\frac{X(s)}{R(s)} = \frac{(K_{hw}/m)(K_d s^2 + K_p s + K_i)}{s^3 + (K_{hw}/m)(K_d s^2 + K_p s + K_i)} \quad (1)$$

Για το πρώτο μέρος του εργαστηρίου θεωρούμε μόνο PD έλεγχο ( $K_i=0$ ) καθιστώντας την παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς ως:

$$\frac{X(s)}{R(s)} = \frac{(K_{hw}/m)(K_d s + K_p)}{s^2 + (K_{hw}/m)(K_d s + K_p)} \quad (2)$$

$$= \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

όπου

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p K_{hw}}{m}} \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{K_d K_{hw}}{2m\omega_n} \quad (5)$$

Η επίδραση των κερδών ανάδρασης  $K_p$  και  $K_d$  στις ρίζες του παρονομαστή της παραπάνω συνάρτησης μεταφοράς θα θεωρηθούν παρακάτω.

#### IV. Διαδικασία για αναγνώριση συστήματος

Στον υπολογιστή σας αφού συνδεθείτε με το δίκτυο εκκινήστε την εφαρμογή από το εικονίδιο **ECP32**.

##### Αναγνώριση συστήματος

1. Ακινητοποιείτε τη δεύτερη μάζα ώστε το σύστημα να έχει τη δομή που φαίνεται στην Εικόνα 5. Τοποθετήστε ένα νόμισμα μεταξύ του προφυλακτήρα και του ελάσματος του μικροδιακόπτη ώστε να παραμένει ανοικτός (Εικόνα 4). Επιβεβαιώστε ότι το ελατήριο με την ενδιάμεση τιμή σταθεράς (ονομαστική  $K_2=400$  N/m) συνδέει το πρώτο και δεύτερο βαγόνι. Για το σκοπό αυτό οι κοχλίες απαιτούν ελάχιστη ροπή σύσφιξης.
2. Τοποθετήστε τέσσερις μάζες των 500 g στο πρώτο βαγόνι.
3. Με τη μονάδα ελέγχου ξεκινήστε στο **Control Algorithm** διαμέσου του μενού **Setup** και ρυθμίστε  $T_s=0.00442$ . Από το μενού **Command** πηγαίνετε στο **Trajectory** για να επιλέξετε **Step, Set-up**. Επιλέξτε **Open Loop Step** για να εισαγάγετε βηματική συνάρτηση (step size = 0, dwell time = 3000 ms, 1 repetition). Επιστρέψτε στη βασική οθόνη πατώντας επανειλημμένα **OK**.
4. Από το **Setup Data Acquisition** στο μενού **Data** επιλέξτε **encoder #1** ως μετρήσεις προς καταγραφή και καθορίστε data sampling κάθε 2 servo cycles (δηλαδή 2  $T_s$ ). Επιλέξτε **OK** για να εξέλθετε. Επιλέξτε **Zero Position** από το μενού **Utility** για να αρχικοποιηθούν (μηδενιστούν) οι μετρήσεις των αισθητήρων θέσης.
5. Επιλέξτε **Execute** από το μενού **Command**. Ετοιμαστείτε να μετακινήσετε χειροκίνητα το πρώτο βαγόνι για περίπου 2.5 cm. Η μετακίνηση να γίνει με προσοχή ώστε να μην ενεργοποιηθεί ο μικροδιακόπτης. Με το πρώτο βαγόνι μετατοπισμένο κατά περίπου 2.5 cm σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, επιλέξτε **Run** από το κουτί **Execute** και ελευθερώστε το βαγόνι περίπου 1 sec αργότερα. Η μάζα θα ταλαντευτεί και σιγά σιγά η κίνηση θα αποσβεστεί καθώς ο αισθητήρας (οπτικός κωδικοποιητής) θα καταγράφει την απόκριση. Επιλέξτε **OK** μετά που θα ολοκληρωθεί η φόρτωση των δεδομένων.
6. Επιλέξτε **Setup Plot** από το μενού **Plotting** και στη συνέχεια επιλέξτε **encoder #1 position**. Μετά επιλέξτε **Plot Data** από το μενού **Plotting**. Θα δείτε την απόκριση της πρώτης μάζας.
7. Επιλέξτε μερικούς διαδοχικούς κύκλους για μέτρο στο εύρος μεταξύ 750 και 4500 counts (για απόκριση με μικρές τιμές του μέτρου κυριαρχεί η επίδραση της μη γραμμική τριβής επισκιάζοντας τη καθαρή δυναμική του συστήματος). Διαιρέστε τον αριθμό των κύκλων με τον αντίστοιχο χρόνο. Μετατρέψτε την συχνότητα που υπολογίσατε από Hz σε radians/sec. Αυτή η αποσβεσμένη συχνότητα (damped frequency),  $\omega_d$ , προσεγγίζει την φυσική συχνότητα,  $\omega_n$ , σύμφωνα με τη σχέση

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

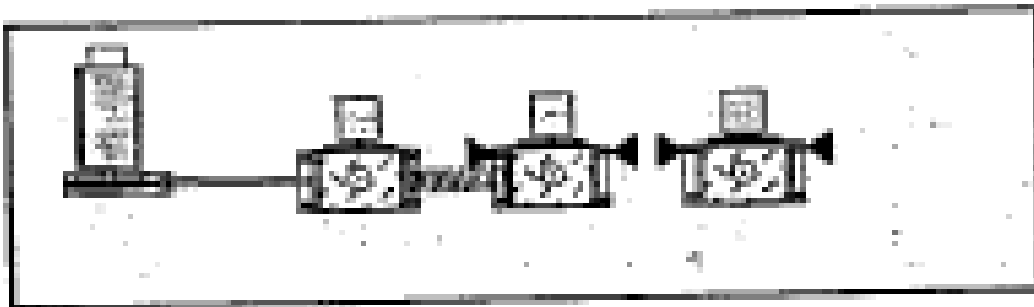
όπου  $\zeta$  είναι ο συντελεστής απόσβεσης ο οποίος θεωρείται πολύ μικρός.

Για αυτή τη δοκιμή (και τις επόμενες) μπορείτε να αποθηκεύσετε τα δεδομένα για μετέπειτα ανάλυση και δημιουργία γραφικών παραστάσεων (π.χ., με Matlab) επιλέγοντας **Export Raw Data** στο μενού **Data**. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει όνομα αρχείου τύπου “.txt”. Η πρώτη γραμμή του αρχείου κατονομάζει τις στήλες ακολουθούμενη από σειρές δεδομένων σε παρενθέσεις. Η πρώτη στήλη του αρχείου περιέχει τον αριθμό του δείγματος, η επόμενη το χρόνο, και οι υπόλοιπες είναι οι καταγεγραμμένες τιμές των μεταβλητών. Οποιοσδήποτε επεξεργαστής κειμένου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να ανοιχτεί και διαμορφωθεί ανάλογα το αρχείο αυτό.

8. Αφαιρέστε τις τέσσερις μάζες από το πρώτο βαγόνι και επαναλάβετε τα βήματα 4 μέχρι 7 για να λάβετε την τιμή  $\omega_{n,d}$  για το άδειο βαγόνι. Εφόσον είναι αναγκαίο επαναλάβετε το βήμα 3 για να ελαττωθεί η διάρκεια εκτέλεσης (data sampling).

9. Κάθε μάζα είναι  $500 \pm 5$  g. Συμβολίζοντας τη μάζα των τεσσάρων μπλοκ ως  $m_w$ , χρησιμοποιείτε τις παρακάτω σχέσεις για να επιλύσετε για ως προς την μάζα του άδειου βαγονιού  $m_c$  και τη σταθερά του ελατηρίου  $K_2$ :

$$K_2 / (m_w + m_c) = \omega_n^2$$
$$K_2 / m_c = \omega_{n,d}^2$$



Εικόνα 5. Διάταξη για τη διαδικασία αναγνώρισης.

### Πείραμα για μέτρηση του Hardware Gain

10. Αφαιρέστε το ελατήριο που συνδέει την πρώτη και δεύτερη μάζα και τοποθετήστε τέσσερις μάζες των 500 g πάνω στο πρώτο βαγόνι. (κρατήστε ξεχωριστά το συγκεκριμένο ελατήριο ώστε να χρησιμοποιηθεί το ίδιο και στις επόμενες δοκιμές). Χρησιμοποιήστε τα εξαρτήματα για να ακινητοποιήσετε τη δεύτερη μάζα μακριά από την πρώτη. Επιβεβαιώστε ότι το βαγόνι κινείται ελεύθερα και οι μάζες πάνω του είναι σταθερά προσδεμένες. Ενεργοποιήστε τη μονάδα ελέγχου

ξεκινώντας την. Τοποθετήστε την πρώτη μάζα περίπου 1 cm προς τα αριστερά (αρνητική θέση για το  $x_1$ ) από το κέντρο της κίνησης του βαγονιού. Επιλέξτε **Zero Position** από το μενού **Utility**.

11. Από το μενού **Command** επιλέξτε **Step** από το παράθυρο **Trajectory**, και στη συνέχεια **Open Loop Step** με **2.00 Volts, 100 ms, 1 rep**. Από το μενού **Command** επιλέξτε **Execute** και στη συνέχεια αφού απομακρυνθείτε από το κινούμενο βαγόνι επιλέξτε **Run**. (Αυτό υπάρχει πιθανότητα να ενεργοποιήσει το όριο ταχύτητας στο λογισμικό το οποίο με τη σειρά του απενεργοποιεί τον έλεγχο εμφανίζοντας την ένδειξη “disabled” στο κουτί με το **Controller Status** στην οθόνη. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να γίνει reset αλλά επιλέγοντας και πάλι **Execute** από το μενού **Execute**). Πηγαίνοντας στο **Setup Plot** στο μενού **Plotting** επιλέξτε **encoder #1 position** και **encoder #1 velocity** για γραφική παράσταση (καλύτερα να μπουν το καθένα ξεχωριστά στον δεξιό και αριστερό άξονα ώστε η κλίμακα τους να είναι πιο κατάλληλη) και μετά **Plot Data**.

12. Να γίνει η γραφική παράσταση των παραπάνω δεδομένων και εξαχθεί η επιτάχυνση  $\ddot{x}_{1e}$  (counts/s<sup>2</sup>) διαιρώντας την διαφορά ταχυτήτων με τον αντίστοιχο χρόνο σε επιλεγμένο ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης. Είναι δυνατό να διαβαστεί αυτή η τιμή απευθείας εάν γίνει γραφική παράσταση του encoder #1 acceleration. Τα δεδομένα αυτά προκύπτουν μετά από διπλή διαφόριση και περιέχουν γενικά θόρυβο. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί παρατηρώντας τη γραφική παράσταση της επιτάχυνσης. Δημιουργήστε και αυτή τη γραφική παράσταση.

13. Φυλάξτε όλα τα αρχεία και γραφικές παραστάσεις που ενδιαφέρουν. Βγείτε από το πρόγραμμα και κλείστε το σύστημα ελέγχου.

### Υπολογισμός του Hardware Gain

Το ονομαζόμενο hardware gain,  $K_{hw}$ , του συστήματος το συνθέτει το γινόμενο:

$$K_{hw} = K_c K_a K_t K_{mp} K_e K_{ep} K_s \quad (6)$$

όπου

$K_c$	=	DAC Gain = 10 V/32768 DAC counts
$K_a$	=	Servo Amplifier Gain = (approx.) 2 Amp/V
$K_t$	=	Servo Motor Torque constant = (approx.) 0.1 N · m/Amp
$K_{mp}$	=	Motor Pinion pitch radius inverse = 26.25 m <sup>-1</sup>
$K_e$	=	Encoder gain = 16000 pulses/2π radians
$K_{ep}$	=	Encoder pitch radius inverse = 90.9 m <sup>-1</sup>
$K_s$	=	Controller Software Gain = 32 controller counts/encoder or ref input counts

Στο βήμα 12 παραπάνω, υπολογίστηκε η επιτάχυνση  $\ddot{x}_{1e}$  (counts/s<sup>2</sup>) για μια γνωστή μάζα,  $m_I = m_w + m_c$  με γνωστή τάση εφαρμοζόμενη από το DAC. Αυτό συσχετίζει την εφαρμοζόμενη δύναμη κατά την επιτάχυνση σύμφωνα με:

$$Applied\ Force = m_1 \ddot{x}_1 = m_1 \ddot{x}_{1e} / (K_e K_{ep}) \quad (7)$$

Επομένως έχουμε απευθείας μέτρηση του γινομένου των τεσσάρων όρων  $K_d K_t K_{mp} K_e K_{ep}$ , δηλαδή,

$$2.00V K_a K_t K_{mp} = \text{Applied Force (in Step 12)} \quad (8)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (6)-(8) επιλύστε για το  $K_{hw}$  με τις διαθέσιμες τιμές για τα  $K_c$ ,  $K_e$ , και  $K_s$ .

## V. Έλεγχος του συστήματος

Προτού προχωρήσετε πρέπει να έχουν καθοριστεί οι τιμές των  $K_{hw}$  και  $m_c$  χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που έχουν ήδη ληφθεί στο πρώτο μέρος της εργαστηριακής άσκησης. Οι τιμές αυτές θα χρειαστούν για να απαντηθούν συγκεκριμένα ερωτήματα παρακάτω.

### Αναλογικός-Διαφορικός Έλεγχος (PD Control)

1. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από την αναγνώριση του συστήματος φτιάξτε μοντέλο του συστήματος για τέσσερις μάζες 500 g τοποθετημένες στο πρώτο βαγόνι. Αγνοήστε την τριβή.
2. Φέρτε το σύστημα στη μορφή που περιγράφεται στο Βήμα 1 (αυτό πρέπει να έχει ήδη γίνει). Δεν πρέπει να υπάρχουν ελατήρια συνδεδεμένα με το πρώτο βαγόνι και τα υπόλοιπα βαγόνια πρέπει να είναι ακινητοποιημένα εκτός του εύρους κίνησης του πρώτου βαγονιού.
3. Από την Εξ. (4) καθορίστε την τιμή του  $K_p$  ( $K_d=0$ ) ώστε το σύστημα να συμπεριφέρεται σαν  $\sqrt{2}$  Hz ταλαντωτής μάζας-ελατηρίου.
4. Επιλέξτε να καταγραφεί ο **Encoder #1** και **Commanded Position** διαμέσου του κουτιού **Setup Data Acquisition** στο μενού **Data**. Από το μενού **Command** επιλέξτε **Trajectory**. Από εκεί επιλέξτε closed-loop step **0** counts, dwell time = **3000 ms**, και **1** repetition.
5. Στο κουτί **Control Algorithm** κάτω από το **Setup** και ορίστε **Ts=0.00442 s**. Επίσης, επιλέξτε **Continuous Time Control**. Στη συνέχεια επιλέξτε **PID** και **Setup Algorithm**. Εισαγάγετε την τιμή του  $K_p$  που καθορίστηκε παραπάνω για  $\sqrt{2}$  Hz ταλάντωση ( $K_d = K_i = 0$ , προσοχή η τιμή να μην υπερβεί την  $K_p=0.08$ ) και επιλέξτε **OK**. Τοποθετήστε το πρώτο βαγόνι στην αρχική του θέση.

Από τώρα και στο εξής απαιτείται προσοχή ώστε να βρίσκεστε απομακρυσμένοι από τον κινούμενο μηχανισμό προτού προχωρήσετε με το επόμενο βήμα. Επιλέγοντας **Implement Algorithm** αυτομάτως εφαρμόζεται ο κατευθυντής που έχει καθοριστεί. Εάν παρουσιαστεί αστάθεια ή υψηλό σήμα ελέγχου το σύστημα μπορεί να αντιδράσει βίαια. Εάν το σύστημα φαίνεται ευσταθές μετά από την εφαρμογή του κατευθυντή, πρώτα μετατοπίστε με ένα ελαφρύ όχι κοφτερό αντικείμενο (π.χ., πλαστικό χάρακα) για να επιβεβαιώσετε την ευστάθεια πριν ακουμπήσετε το σύστημα. Με τον κατευθυντή ενεργοποιημένο προσπαθήστε να μετακινήσετε χειροκίνητα το βαγόνι ελαφρώς προς τις δύο κατευθύνσεις κίνησης του. Νιώθετε την δύναμη αποκατάστασης της θέσης που εξασκεί ο κατευθυντής; Επιλέξτε ξανά **Implement Algorithm** και μετά **OK**.



6. Επιλέξτε **Execute** κάτω από το **Command**. Ετοιμαστείτε να μετατοπίσετε χειροκίνητα το βαγόνι περίπου 2 cm. Επιλέξτε **Run**, μετατοπίστε τη μάζα περίπου 2 cm και ελευθερώστε την. Μην κρατήσετε τη μάζα μετατοπισμένη για περισσότερο από 1 sec καθώς αυτό μπορεί να προκαλέσει το σύστημα θερμικής προστασίας του μοτέρ να ανοίξει το βρόχο ανάδρασης.

7. Επιλέξτε **Setup Plot** από το μενού **Plotting**. Στη συνέχεια επιλέξτε **encoder #1 position** και **Plot Data** από το μενού **Plotting**. Θα δείτε την απόκριση της πρώτης μάζας. Υπολογίστε τη συχνότητα της ταλάντωσης. Τι θα συμβεί εάν το αναλογικό κέρδος ανάδρασης,  $K_p$ , διπλασιαστεί; Επαναλάβετε τα βήματα 5 και 6 για να επιβεβαιώσετε την πρόβλεψή σας. (Πάλι μην εισαγάγετε τιμές μεγαλύτερες από  $K_p=0.08$ ).

8. Καθορίστε την τιμή του διαφορικού κέρδους,  $K_d$ , ώστε να επιτευχθεί  $K_d K_{hw} = 50 \text{ N/m/s}$ . Επαναλάβετε τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στο βήμα 5, βάζοντας τώρα την παραπάνω τιμή για το  $K_d$  και θέτοντας  $K_p=K_i=0$ . (Μην εισαγάγετε τιμές μεγαλύτερες από  $K_d=0.1$ ).

9. Αφού επιβεβαιώσετε την ευστάθεια του συστήματος με χρήση ενός πλαστικού χάρακα, μετακινήστε χειροκίνητα μπρος-πίσω τη μάζα ώστε να νιώσετε την επίδραση της απόσβεσης που παρέχεται από το  $K_d$ . Μην τη μετακινήσετε πολύ βίαια καθώς αυτό μπορεί ενεργοποιήσει το σύστημα θερμικής προστασίας του μοτέρ και να ανοίξει αυτόματα ο βρόχος ανάδρασης.

10. Επαναλάβετε τη δοκιμή των βημάτων 8 και 9 για τιμές του  $K_d$  πέντε φορές μεγαλύτερες (πάλι,  $K_d < 0.1$ ). Αντιλαμβάνεστε την αυξημένη τιμή της απόσβεσης;

11. Από τις εξισώσεις (4) και (5) σχεδιάστε PD κατευθυντές (δηλαδή, καθορίστε τα κέρδη ανάδρασης  $K_p$  και  $K_d$ ) για σύστημα με φυσική συχνότητα  $\omega_n=4 \text{ Hz}$  και τρεις διαφορετικές περιπτώσεις απόσβεσης:  $\zeta=0.2$  (υποαπόσβεση),  $\zeta=1.0$  (κρίσιμη απόσβεση), και  $\zeta=2.0$  (υπεραπόσβεση).

12. Εφαρμόστε την περίπτωση του κατευθυντή με υποαπόσβεση και καθορίστε τροχιά (trajectory) για ένα βήμα (step) 2500 counts με 2000 ms dwell time και 1 repetition.

13. Εκτελέστε τη δοκιμή και φτιάξτε τη γραφική παράσταση του commanded position και encoder #1 position (να γίνει η γραφική παράσταση των δύο μεταβλητών χρησιμοποιώντας τον ίδιο κατακόρυφο άξονα ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση).

14. Επαναλάβετε τα βήματα 12 και 13 για τις περιπτώσεις της κρίσιμης απόσβεσης και της υπεραπόσβεσης. Φυλάξτε τις γραφικές παραστάσεις για να κάνετε αργότερα τη σύγκριση.

### **Αναλογικός-Διαφορικός-Ολοκληρωτικός Έλεγχος (PID control)**

15. Τώρα υπολογίστε τιμή για το ολοκληρωτικό κέρδος  $K_i$  έτσι ώστε  $K_i K_{hw} = 6500 \text{ N/(m}\cdot\text{s)}$ . Υλοποιήστε τον έλεγχο με την τιμή αυτή του  $K_i$  και τις τιμές των  $K_p$  και  $K_d$  για την περίπτωση της κρίσιμης απόσβεσης του βήματος 11 (να μη χρησιμοποιηθεί τιμή μεγαλύτερη από  $K_i = 30$ ). (Επιβεβαιώστε ότι το σφάλμα-error που εμφανίζεται στην οθόνη σας είναι λιγότερο από 20 counts πριν από την εφαρμογή). Εκτελέστε ένα βήμα (step) 2500 counts closed-loop με 2000 ms dwell time και 1 repetition. Να γίνει η γραφική παράσταση του encoder #1 μαζί με το commanded position. Έπειτα, χειροκίνητα μετατοπίστε

τη μάζα για περίπου 2 mm. Αισθάνεστε την ολοκληρωτική δράση του κατευθυντή όπου η δύναμη επαναφοράς αυξάνει με το χρόνο; (Μην κρατήστε περισσότερο από 2 sec για να αποφευχθεί η μεγάλη συσσώρευση δύναμης που θα ενεργοποιήσει το σύστημα θερμικής προστασίας του μοτέρ). Τι γίνεται όταν ελευθερώσετε το βαγόνι;

16. Αυξήστε το  $K_i$  κατά δύο φορές και υλοποιήστε τον έλεγχο (μη ξεπεράσετε την τιμή  $K_i = 3.0$ ) και φτιάξτε ξανά τη γραφική παράσταση της βηματικής απόκρισης.

17. Εξετάστε τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις μαζί και με την περίπτωση της κρίσιμης απόσβεσης ( $K_f=0$ ) του βήματος 14. Ποια είναι η επίδραση της ολοκληρωτικής δράσης πάνω στο σφάλμα μόνιμης κατάστασης (steady-state-error); Πως επηρεάζεται η υπερακόνηση (overshoot); Να ερμηνευτούν οι παρατηρήσεις σας.

## VI. Συγγραφή αναφοράς εργαστηρίου

Μετά την εκτέλεση ολόκληρης της εργαστηριακής άσκησης (αναγνώριση και έλεγχος), κάθε φοιτητής/φοιτήτρια πρέπει να ετοιμάσουν ατομική αναφορά που να περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των πειραμάτων και την ερμηνεία τους. Η αναφορά να έχει την παρακάτω δομή:

- Εξώφυλλο
- Εισαγωγή
- Περιγραφή της διάταξης
- Διαδικασία
- Υπολογισμοί
- Πειραματικά αποτελέσματα
- Σχολιασμός αποτελεσμάτων
- Συμπεράσματα