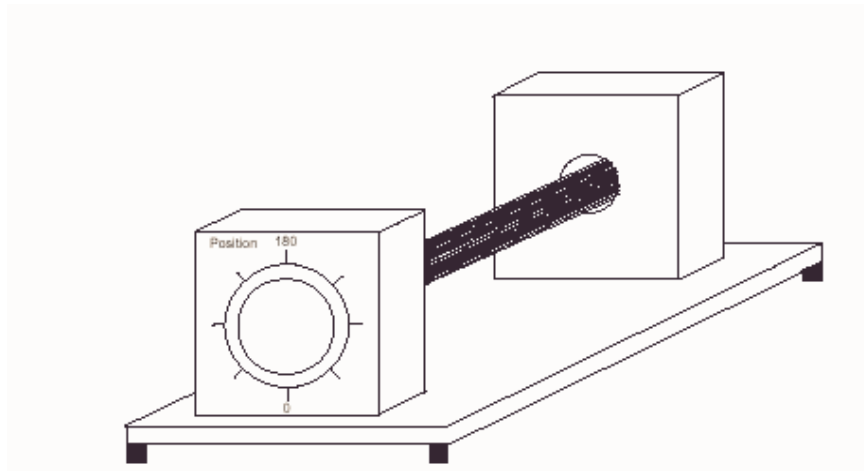


# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

## ΕΛΕΓΧΟΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ DC ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΑΕ ΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΤΗΣ ΣΙΕΝΝΑ

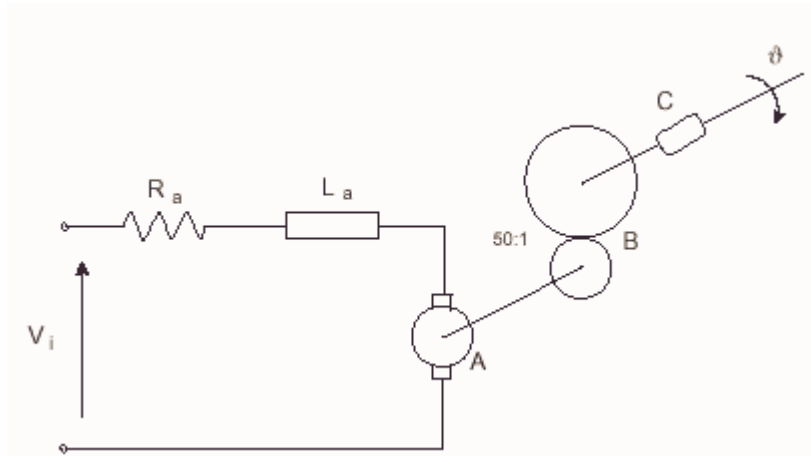
### 1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η εργαστηριακή διάταξη για το πείραμα ελέγχου γωνιακής θέσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 και αποτελείται από ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC), ένα μειωτήρα στροφών, ένα ποτενσιόμετρο και το σύστημα οπτικής απεικόνισης της γωνιακής θέσης. Ένα λειτουργικό διάγραμμα της διάταξης, το οποίο χρησιμοποιείται και για τη μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.



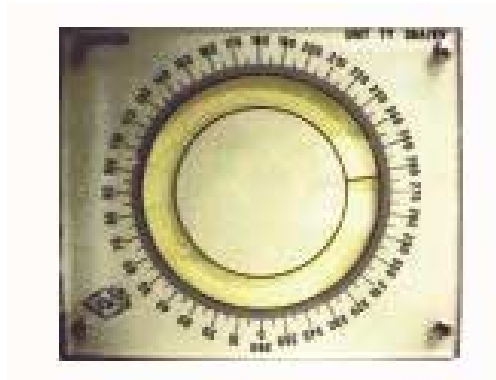
Σχήμα 1

Ο κινητήρας DC (A) περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα η οποία είναι συνάρτηση της τάσης  $V_i$  (σήμα ελέγχου) που εφαρμόζεται στον κινητήρα. Ο άξονας του κινητήρα συνδέεται με τον πρώτο από τους δυο οδοντωτούς τροχούς του μειωτήρα στροφών (B). Η περιστροφική κίνηση μεταφέρεται από τον πρώτο στο δεύτερο τροχό του μειωτήρα με σχέση μείωσης 50:1, δηλ. για 50 περιστροφές του πρώτου τροχού (και κατά συνέπεια του κινητήρα), ο δεύτερος τροχός συμπληρώνει μια περιστροφή. Ο δεύτερος τροχός του μειωτήρα οδηγεί τον δείκτη πάνω στην βαθμονομημένη σε μοίρες κλίμακα γωνιακής θέσης του συστήματος οπτικής απεικόνισης (Σχήμα 3). Ο έλεγχος της γωνιακής θέσης αυτού του δείκτη αποτελεί και το στόχο του πειράματος.



Σχήμα 2

Η περιστροφική κίνηση του δεύτερου τροχού του μειωτήρα μεταδίδεται και στο ποτενσιόμετρο (C), το οποίο παρέχει τάση ανάλογη της γωνιακής θέσης του (δηλ. της θέσης του δείκτη του συστήματος οπτικής απεικόνισης). Η τάση του ποτενσιόμετρου κυμαίνεται στο διάστημα  $[-8V, 8V]$ . Το ποτενσιόμετρο είναι ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται για την ανατροφοδότηση της γωνιακής θέσης (εξόδου) κατά τον έλεγχο κλειστού βρόχου του συστήματος.



Σχήμα 3

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1

|                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| Ονομαστική τάση                     | 24 V         |
| Αυτεπαγωγή τυλίγματος ( $L_a$ )     | 2.8 mH       |
| Αντίσταση τυλίγματος ( $R_a$ )      | 5.5 $\Omega$ |
| Σταθερά ροπής στρέψης μηχανής       | 0.046 Nm/A   |
| Ονομαστική ταχύτητα                 | 4000 RPM     |
| Μέγιστη τάση ( $V_i$ ) χωρίς κίνηση | $\pm 2.3$ V  |
| Μέγιστη τάση ελέγχου ( $V_i$ )      | $\pm 5$ V    |

Το σύστημα παρουσιάζει δυο μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τον Πίνακα 1: α) όταν η τάση ελέγχου ( $V_i$ ) του κινητήρα είναι κατ' απόλυτη τιμή μικρότερη των 2.3V, δεν υπάρχει περιστροφή του και β) η μέγιστη τάση ελέγχου με την οποία μπορεί να τροφοδοτηθεί ο κινητήρας είναι  $\pm 5V$ . Για τη θεωρητική μοντελοποίηση του συστήματος και τη σχεδίαση ελεγκτή αυτά τα χαρακτηριστικά θα αγνοηθούν και θα χρησιμοποιηθεί το γραμμικό μοντέλο που περιγράφεται στη συνέχεια.

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος ανοικτού βρόχου που απεικονίζεται στο Σχήμα 2 είναι:

$$G_p(s) = \frac{K}{s(1 + T_f s)(1 + T_m s)}$$

όπου  $K = \frac{k_g k_M}{R_f}$ . Η φυσική σημασία των παραμέτρων μοντελοποίησης του συστήματος δίνεται στον Πίνακα 2.

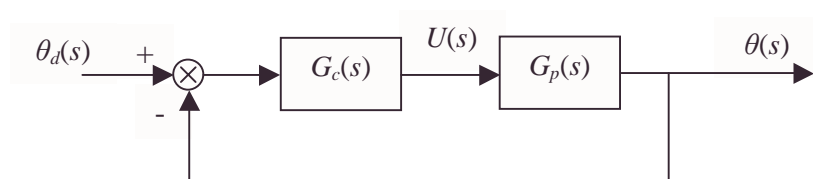
Πίνακας 2

|       |   |
|-------|---|
| $k_M$ | Γενική σταθερά κινητήρα ( $rad/V \cdot sec$ ) |
| $k_g$ | Σταθερά γεννήτριας ( $V/A$ )                  |
| $R_f$ | Αντίσταση κυκλώματος ( $\Omega$ )             |
| $T_f$ | Σταθερά πεδίου γεννήτριας ( $sec$ )           |
| $T_m$ | Μηχανική σταθερά κινητήρα ( $sec$ )           |

Με βάση την προηγούμενη μοντελοποίηση, είσοδος του συστήματος ανοικτού βρόχου είναι η τάση ελέγχου του κινητήρα (σε V) και έξοδος η γωνιακή θέση σε rad. Θεωρώντας ότι η γωνιακή θέση μετράται σε μοίρες (στο διάστημα  $[0^\circ, 360^\circ]$ ), η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος ανοικτού βρόχου είναι:

$$G_p(s) = \frac{400000}{s(s + 10)(s + 2000)}$$

Το θεωρητικό μοντέλο του αντισταθμισμένου συστήματος δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 4

Είσοδος του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου είναι η επιθυμητή γωνιακή θέση  $\theta_d$  σε μοίρες, έξοδος η πραγματική γωνιακή θέση  $\theta$  σε μοίρες, ενώ το σήμα ελέγχου  $u$  είναι η τάση ελέγχου του κινητήρα σε V. Στη γενική της μορφή, η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή (θεωρούμε ελεγκτή PID) είναι:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s$$

### 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ SIMULINK

Το πραγματικό σύστημα ελέγχου γωνιακής θέσης προσομοιώνεται με το μοντέλο SIMULINK *sienna\_servo.mdl*. Το μοντέλο αυτό περιέχει μη γραμμικά δομικά στοιχεία, τα οποία μοντελοποιούν τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του πραγματικού συστήματος. Το μη γραμμικό στοιχείο κόρου (saturation) μετά την έξοδο του PID ελεγκτή περιορίζει την τάση ελέγχου στο διάστημα  $\pm 5V$  (μέγιστη παρεχόμενη τάση ελέγχου στο πραγματικό σύστημα). Επίσης, τα μη γραμμικά στοιχεία που περιέχονται στο μπλοκ *motor* μοντελοποιούν την ύπαρξη του κατωφλίου  $\pm 2.3V$  για την τάση ελέγχου, κάτω από το οποίο δεν υπάρχει περιστροφή του κινητήρα.

Πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης είναι απαραίτητα τα εξής βήματα:

- α) καθορισμός της επιθυμητής εισόδου (σε μοίρες) μέσω του μπλοκ *Des. Pos.*
- β) καθορισμός των παραμέτρων του PID ελεγκτή μέσω του μπλοκ *PID Controller*.

Η προσομοίωση εκτελείται επιλέγοντας *Simulation/Start* (ο χρόνος προσομοίωσης είναι ρυθμισμένος στα 20sec). Το σήμα ελέγχου, καθώς και η επιθυμητή και πραγματική γωνιακή θέση, παρουσιάζονται γραφικά μέσω των μπλοκ παλμογράφου *Control* και *Reference/Output*, αντίστοιχα.

Μετά το τέλος της προσομοίωσης, εξάγονται στο χώρο εργασίας (workspace) της MATLAB οι μεταβλητές *tsim* και *sim\_out*. Η πρώτη αποθηκεύει το χρόνο ενώ η δεύτερη τις εξόδους της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, οι τρεις στήλες του πίνακα *sim\_out* αντιστοιχούν στην πραγματική θέση (έξοδος), την επιθυμητή θέση (είσοδος) και τον έλεγχο του συστήματος. Η είσοδος και η έξοδος του συστήματος δίνονται σε μοίρες, ενώ ο έλεγχος σε V. Είναι έτσι δυνατή η επεξεργασία των αποτελεσμάτων και η αποθήκευσή τους σε αρχείο κειμένου μέσω της MATLAB.

#### **4. ΟΔΗΓΙΕΣ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ**

Εφ' όσον έχουμε βρει τις επιθυμητές τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή από τη θεωρητική μελέτη του συστήματος, ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

- Εκκινούμε ένα από τα προγράμματα περιήγησης του διαδικτύου (Internet Explorer, Netscape Navigator). Στη γραμμή διευθύνσεων, πληκτρολογείται η διεύθυνση <http://www-dii.dii.unisi.it/~control/act/experiments2.html> για την είσοδο στην ιστοσελίδα του Εργαστηρίου ΣΑΕ του Πανεπιστημίου της Sienna.
- Στο πλαίσιο *Position Control*, κάνουμε κλικ στον υπερσύνδεσμο *On-line Experiment* (ή στην εικόνα του συστήματος οπτικής απεικόνισης της γωνιακής θέσης που βρίσκεται δίπλα).
- Στο παράθυρο που εμφανίζεται συμπληρώνουμε τα προσωπικά στοιχεία που ζητούνται (όνομα χρήστη, χώρα και διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου) στα αντίστοιχα πεδία και κάνουμε κλικ στο «κουμπί» που αναγράφει *Go to Process* (ο εξ' ορισμού τύπος ελεγκτή είναι PID, οπότε δεν χρειάζεται κάποια περαιτέρω ενέργεια σε αυτό το σημείο).
- Στο παράθυρο που εμφανίζεται, καθορίζουμε:

α) Τις τιμές των παραμέτρων του PID ελεγκτή με τη βοήθεια του πλαισίου *Parameters Panel* (αναλογικός όρος  $K_P$ , ολοκληρωτικός όρος  $K_I$ , και παραγωγικός όρος  $K_D$ ). Στη συνέχεια πατάμε το κουμπί *Update Parameters* (ενημέρωση παραμέτρων ελεγκτή).

β) Την τιμή της επιθυμητής γωνιακής θέσης (είσοδος αναφοράς) σε μοίρες με τη βοήθεια του πλαισίου *value* εντός του *Reference Panel*. Στη συνέχεια πατάμε το κουμπί *Update Reference* (ενημέρωση εισόδου αναφοράς). Εξ' ορισμού η συνάρτηση εισόδου είναι βηματική.

- Μόλις ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία πατάμε το κουμπί *Start Experiment* που βρίσκεται στο πλαίσιο *Command Panel* και αρχίζει η εκτέλεση του πειράματος.
- Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να σταματήσει το πείραμα όποτε εκείνος κρίνει σκόπιμο, πατώντας το κουμπί *End Session* (πρακτικά σταματάμε το πείραμα εφόσον το σύστημα επιτύχει απόκριση σταθερής κατάστασης). Με το πάτημα του κουμπιού *End Session*, στην οθόνη εμφανίζεται ένα παράθυρο το οποίο ζητάει την επιβεβαίωση τερματισμού του πειράματος. Πατώντας *OK*, μεταβαίνουμε στη σελίδα *Download Page*, από την οποία μπορούμε να αποθηκεύσουμε στον τοπικό υπολογιστή (μέσω των αντίστοιχων υπερσυνδέσμων) τα αποτελέσματα του πειράματος σε αρχείο *.zip* ή *.mat* (συνίσταται το δεύτερο, καθώς είναι δυνατή απ' ευθείας η επεξεργασία του μέσω της *MATLAB*).

**Σημείωση:** το αποθηκευόμενο αρχείο *.mat* έχει εξ ορισμού το όνομα *process*. Χρησιμοποιώντας την εντολή *load*, είναι διαθέσιμες στο χώρο εργασίας της *MATLAB* οι μεταβλητές *rt\_Time* (χρόνος εκτέλεσης), *rt\_Reference* (είσοδος αναφοράς), *rt\_Output* (έξοδος) και *rt\_Command* (σήμα ελέγχου).

- Μετά την ολοκλήρωση της αποθήκευσης των αποτελεσμάτων, επιλέγουμε *EXIT* για την ομαλή έξοδο από την ιστοσελίδα του εργαστηρίου.

Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του πειράματος εμφανίζονται τα γραφήματα της επιθυμητής και πραγματικής γωνιακής θέσης αλλά και του σήματος ελέγχου. Είναι επίσης διαθέσιμη και η οπτική ένδειξη της θέσης μέσω web camera.

## 5. ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1) Με χρήση του θεωρητικού μοντέλου και με βάση την ρύθμιση με αναλυτικές σχέσεις:

α) Να βρεθούν οι τιμές των  $K_P$ ,  $K_I$  έτσι ώστε το αντισταθμισμένο με PI ελεγκτή σύστημα να ικανοποιεί τις εξής προδιαγραφές:

- Μέγιστη υπερένωση  $\leq 10\%$
- Χρόνος αποκατάστασης  $2\% \leq 2 \text{ sec}$

Ποια είναι τα σφάλματα σταθερής κατάστασης του αντισταθμισμένου συστήματος σε είσοδο μοναδιαίου βήματος και μοναδιαίας αναρρίχησης;

β) Να γίνει επιβεβαίωση των παραπάνω με τη βοήθεια της MATLAB.

*Υπόδειξη: Οι τιμές των  $K_P$ ,  $K_I$  μπορούν να προσδιοριστούν βάσει των προδιαγραφών για τα  $M_p$  και  $t_s$  θέτοντας  $K_D = 0$  στις σχέσεις (4.6) των σημειώσεων.*

2) Χρησιμοποιώντας το μοντέλο προσομοίωσης του πραγματικού συστήματος σε SIMULINK, για βηματική είσοδο (όχι μοναδιαία):

α) Να γίνει επιβεβαίωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων (μέσω του γραφήματος της απόκρισης του συστήματος) και να εξηγηθούν οι λόγοι τυχόν ασυμφωνίας των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα θεωρητικά αποτελέσματα.

β) Δώστε το γράφημα του σήματος ελέγχου του συστήματος. Είναι ο ελεγκτής κατάλληλος για χρήση στο πραγματικό σύστημα;

3) Εκτέλεση του πειράματος στο πραγματικό σύστημα μέσω του διαδικτύου.

Χρησιμοποιώντας βηματική είσοδο (προτείνεται η χρήση εισόδου μεγαλύτερης των  $10^\circ$  κατ' απόλυτη τιμή):

Να γίνει επιβεβαίωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων (μέσω του γραφήματος της απόκρισης του συστήματος) και να εξηγηθούν οι λόγοι τυχόν ασυμφωνίας των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα θεωρητικά αποτελέσματα.

*Σημείωση:* Για την κατασκευή του γραφήματος της απόκρισης του συστήματος είναι απαραίτητη η αποθήκευση των αποτελεσμάτων της εκτέλεσης του πειράματος μέσω διαδικτύου.