

## **Άσκηση 2**

**Έλεγχος της ταχύτητας (στροφών) ενός DC κινητήρα.**

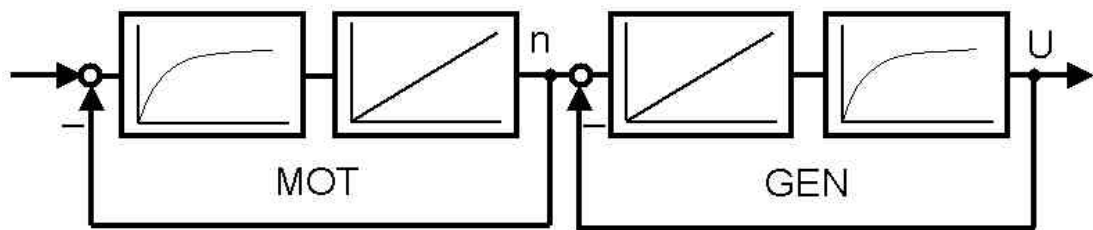
**Έλεγχος της τάσης εξόδου μιας DC γεννήτριας.**

### **A.1. Συνοπτική θεωρία.**

Η λειτουργία της ηλεκτρικής γεννήτριας και του ηλεκτρικού κινητήρα βασίζεται στην αλληλεπίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου. Η γεννήτρια και ο κινητήρας ήταν από τις πιο σημαντικές ανακαλύψεις του 19ου αιώνα για την ανθρωπότητα. Πιο συγκεκριμένα η ηλεκτρική γεννήτρια (δυναμογεννητρια, δυναμό) μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αντίστροφα ο ηλεκτρικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια. Στις μετατροπές αυτές ισχύει η αρχή της διατήρησης της ενέργειας που διατυπώθηκε από τους Robert Mayer και Hermann Helmholtz το 1847 «Σε ένα κλειστό σύστημα ενέργειας και για οποιοδήποτε φυσικό φαινόμενο, όπου παρατηρείται μετατροπή ενέργειας η συνολική ενέργεια παραμένει αμετάβλητη. Συνεπώς ένα είδος ενέργειας μπορεί να μετατραπεί σε ένα άλλο, χωρίς όμως να υπάρχουν απώλειες ή κέρδη». Οι ηλεκτρικές μηχανές μπορούν κατά αρχήν να λειτουργήσουν σαν κινητήρες και σαν γεννήτριες. Συνεπώς δε διαφέρουν στη βασική τους δομή. Δεν είναι δυνατό να διακρίνουμε αν μια μηχανή είναι μια γεννήτρια ή ένας κινητήρας.

### **A.2. Πειραματική διάταξη.**

Στο πείραμα το υπό έλεγχο σύστημα είναι ένα σετ κινητήρων, της Leybold Didactic GmbH, με κωδικό 734111. Η μια ηλεκτρική μηχανή είναι συνδεδεμένη ως κινητήρας και η δεύτερη είναι συνδεδεμένη ως γεννήτρια. Οι δυο ηλεκτρικές μηχανές είναι ακριβώς ίδιες μεταξύ τους και έχουν τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Διαφέρουν μονάχα στο τρόπο σύνδεσής τους. Έτσι ο κινητήρας δέχεται ως είσοδο τάση και δίνει έξοδο ροπή ενώ η γεννήτρια δέχεται ως είσοδο ροπή και δίνει ως έξοδο τάση. Οι ηλεκτρικές μηχανές είναι της εταιρίας Maxon DC motors, Swiss made, Part number 2140 934-22 112-050, Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών μηχανών δίνονται αναλυτικά στο κεφάλαιο E, στο τέλος.



**Σχήμα 6. Το σετ των κινητήρων του εργαστηρίου, συνολικής ισχύος 10 W.**

Το σετ των κινητήρων, συνολικής ισχύος, 10 W, αποτελείται από δυο ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος με μόνιμη διέγερση (permanent excitation) και ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο φορτίο. Οι ηλεκτρικές μηχανές είναι με ασφάλεια συζευγμένες (securely linked) μεταξύ τους και δημιουργούν μια ενιαία μονάδα – σετ κινητήρα - γεννήτρια. Η ηλεκτρική ισχύ που απαιτείται, προέρχεται από ένα ενσωματωμένο ενισχυτή ισχύος. Με τη βοήθεια, του ηλεκτρονικά ελεγχόμενου φορτίου, τα χαρακτηριστικά του φορτίου καταγράφονται (recorded) και παρεμβολές διαταραχών (disturbance interferences) μελετούνται με ρύθμιση της ταχύτητας και της τάσης. Οι χρονικές σταθερές των κινητήρων, λόγω του μικρού μεγέθους (small design), κυμαίνονται στη περιοχή των λίγων milliseconds. Αυτό δεν είναι χρήσιμο (practical), για ευκολία στην ανάλυση και στη λειτουργία. Για αυτό το λόγο οι χρονικές σταθερές του σετ των κινητήρων, αυξάνονται ηλεκτρονικά, σε τυπικές (typical) τιμές ανάλογες πραγματικών σετ κινητήρων. Τέτοιες αριθμητικές τιμές για DC κινητήρες ισχύος περίπου 100 kW είναι:

$T_1 = 300$  msec για τη μηχανικές (mechanical) χρονικές σταθερές,

$T_2 = 40$  msec για τις χρονικές σταθερές βραχυκυκλώματος των τυλιγμάτων πεδίου (short-circuit time constants of armature windings).

Για μεγαλύτερους DC κινητήρες, χρησιμοποιούμε τον εμπειρικό κανόνα (rule of thumb):  $T_1/T_2 = 4$ . Για το σετ κινητήρων, του εργαστηρίου, συνολικής ισχύος 10 W που λειτουργούν με ένα φίλτρο DR (DR = Dynamic Response), οι χρονικές σταθερές έχουν τις παρακάτω τιμές:

$T_1 = 800$  msec (η χρονική σταθερά του φίλτρου DR)

$T_2 = 200$  msec (η χρονική σταθερά του σετ των κινητήρων).

Με αυτό το τρόπο το σετ των κινητήρων, συνολικής ισχύος 10 W, αποκτά δυναμική συμπεριφορά παρόμοια με αυτή που έχουν σετ μεγάλων κινητήρων.

Το σύστημα, όπως θα δούμε παρακάτω μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δυο τρόπους:

- Σαν γεννήτρια που δίνει στην έξοδο της τάση και ο ηλεκτρικός κινητήρας χρησιμοποιείται ως μικρή κινητήρια μηχανή (prime mover), προσομοιώνοντας άλλες κινητήριες μηχανές όπως αεροστρόβιλος, κλπ, και δίνει την απαραίτητη ενέργεια για να κινηθεί η ηλεκτρική γεννήτρια.
- Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ηλεκτρικός κινητήρας που δίνει ως έξοδο του τη ταχύτητα (στροφές) του κινητήρα. Σε αυτή τη περίπτωση η ηλεκτρική γεννήτρια δεν συμμετέχει στο σύστημα αλλά παίζει το ρόλο του φορτίου του κινητήρα.

### **A.3. Πείραμα**

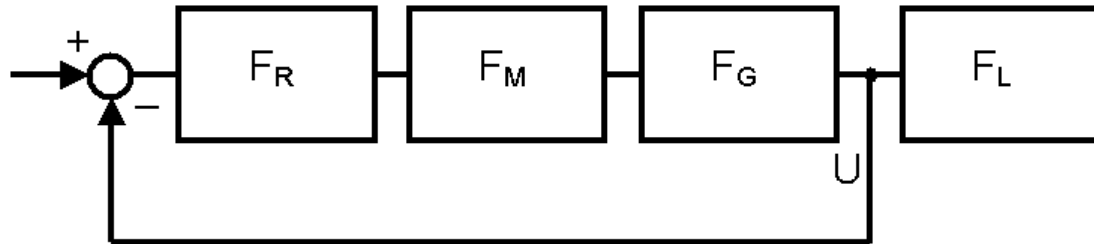
Τα προβλήματα που θα μας απασχολήσουν στο πείραμα είναι δυο, τα οποία είναι δυαδικά.

1. Έλεγχος της τάσης εξόδου μιας ηλεκτρικής γεννήτριας συνεχούς ρεύματός με μόνιμους μαγνήτες με PID ελεγκτή.

*Περιγραφή του προβλήματος.*

Εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε με την πειραματική διάταξη του εργαστηρίου ότι η τάση εξόδου μιας ηλεκτρικής γεννήτριας μεταβάλλεται, όταν μεταβάλλεται το εξυπηρετούμενο φορτίο. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε ότι όταν αυξάνεται το εξυπηρετούμενο φορτίο η τάση εξόδου της γεννήτριας μειώνεται. Το επιθυμητό είναι η τάση εξόδου της ηλεκτρικής γεννήτριας να διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα από τις μεταβολές, εντός κάποιων ορίων, του φορτίου που εξυπηρετεί η γεννήτρια. Το πρόβλημα είναι αρκετά συνηθισμένο στη τροφοδοσία ηλεκτρικών καταναλωτών από τη ΔΕΗ. Πιο συγκεκριμένα είναι γνωστό ότι η τάση που τροφοδοτεί η ΔΕΗ τους οικιακούς καταναλωτές μεταβάλλεται και μάλιστα αρκετά ανάλογα με την ώρα και την ημέρα. Έτσι σε ώρες χαμηλής κατανάλωσης (χαμηλό φορτίο) η παρεχόμενη τάση είναι η ονομαστική. Αντίθετα σε ώρες υψηλής κατανάλωσης η τάση που μας τροφοδοτεί η ΔΕΗ υπολείπεται της ονομαστικής κατά ένα ποσοστό. Το πρόβλημα αυτό γίνεται ιδιαίτερα έντονο με τις νέες ηλεκτρονικές συσκευές, που απαιτούν τροφοδοσία με μικρές διακυμάνσεις από την ονομαστική τάση. Στην Κρήτη το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα

έντονο και σε συνδυασμό με τις συχνές διακοπές ρεύματος είναι η αιτία του φαινομένου οι νέες τηλεοράσεις να έχουν σημαντικά μειωμένη διάρκεια ζωής σε σχέση με το παρελθόν. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με πολλούς τρόπους και ένας από αυτούς είναι ο έλεγχος με PID ελεγκτή.



**Σχήμα 7.** Το μπλοκ – διάγραμμα του σετ των κινητήρων για έλεγχο τάσης.

Στο Σχήμα 7, δίνεται το μπλοκ – διάγραμμα του σετ των κινητήρων, για έλεγχο τάσης, με ένα απλό βρόγχο ανάδρασης (single-loop) που κλείνει το κύκλωμα ρύθμισης στα τυλίγματα εξόδου της γεννήτριας  $F_G$ . Το κύκλωμα ρύθμισης φορτίζεται με το ηλεκτρονικό φορτίο  $F_L$ . Στα κυκλώματα ρύθμισης με ηλεκτρικές γεννήτριες, ισχύουν, καθολικά τα παρακάτω, :

- Ρύθμιση μιας ηλεκτρικής γεννήτριας: Η αρχή λειτουργίας των γεννητριών βασίζεται στην ηλεκτροδυναμική αρχή (electrodynamic principle) και απαιτούν μια μηχανολογική (mechanical) μηχανή .
- Εξαιτίας, της σταθερής (fixed) σύνδεσης μεταξύ του κινητήρα και της γεννήτριας, το σετ κινητήρα – γεννήτρια είναι ένα  $PT_n$  ελεγχόμενο σύστημα, όπου η τάση εξόδου στη μόνιμη κατάσταση αυξάνει αναλογικά με τη ταχύτητα:  $U \approx n$ . Έτσι, όσον αφορά τη χρονική απόκριση της γεννήτριας, μόνο, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα στοιχείο  $PT_1$ . Η δυναμική του συμπεριφορά καθορίζεται από τη χρονική σταθερά βραχυκυκλώματος των τυλιγμάτων πεδίου. .

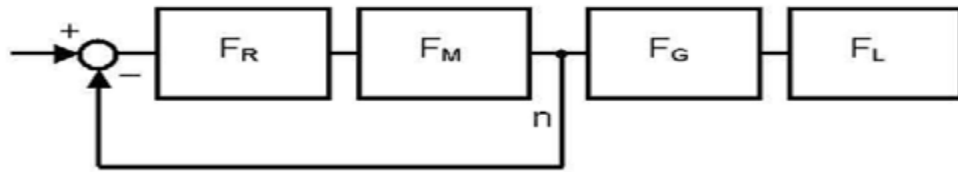
## 2. Έλεγχος της ταχύτητας (στροφών) ενός ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος με μόνιμους μαγνήτες με PID ελεγκτή.

Είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα προβλήματα αυτόματου ελέγχου με πολλές εφαρμογές και πολλές λύσεις.

*Περιγραφή του προβλήματος.*

Εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε με την πειραματική διάταξη του εργαστηρίου ότι η ταχύτητα (στροφές) ενός ηλεκτρικού κινητήρα μεταβάλλονται όταν μεταβάλλεται το εξυπηρετούμενο φορτίο. Πιο συγκεκριμένα βλέπουμε ότι όταν αυξάνεται το εξυπηρετούμενο φορτίο η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται. Το επιθυμητό είναι η ταχύτητα εξόδου του ηλεκτρικού κινητήρα να διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα από τις μεταβολές, εντός κάποιων ορίων, του φορτίου που εξυπηρετεί ο κινητήρας.

Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με πολλούς τρόπους και ένας από αυτούς είναι ο έλεγχος με PID ελεγκτή.



**Σχήμα 8.** Το μπλοκ – διάγραμμα του σετ των κινητήρων για έλεγχο στροφών.

Στο σχήμα 8, δίνεται το μπλοκ – διάγραμμα του σετ των κινητήρων για έλεγχο στροφών (ταχύτητας), που περιλαμβάνει ένα κύκλωμα έλεγχου που αποτελείται από τον ελεγκτή  $F_R$  και τον κινητήρα  $F_M$ . Το κύκλωμα ρύθμισης (έλεγχου) φορτίζεται με τη γεννήτρια  $F_G$  και το ηλεκτρονικό φορτίο  $F_L$ . Στα συστήματα ρύθμισης στροφών (ταχύτητας) κινητήρων, ισχύουν, καθολικά, οι παρακάτω αρχές:

- Τα συστήματα ρύθμισης της ταχύτητας, δεν εξαρτώνται, από τη φύση (nature) της μηχανής που μπορεί να είναι, μηχανές εσωτερικής καύσης, τουρμπίνες, ανεμογεννήτριες, ηλεκτρικοί κινητήρες, για παράδειγμα.
- Στις ηλεκτρικές μηχανές με λειτουργία κινητήρα έχουμε τουλάχιστον δυο στοιχεία αποθήκευσης και μπορούν να θεωρηθούν ως ένα δευτεροβάθμιο σύστημα. Για τη ρύθμιση των ελεγκτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές μέθοδοι ρύθμισης όπως η μέθοδος των Chien, Hrones and Reswick (CHR) ή η μέθοδος του εμπειρικού κανόνα ο άθροισμα T sum.
- Στους ηλεκτρικούς κινητήρες, απαιτείται μια ελαχίστη τάση εκκίνησης, κάτω από την οποία οι κινητήρες δε λειτουργούν. Η τριβή των ρουλεμάν, προκαλεί ένα νεκρό χρόνο, όταν η μεταβλητή διόρθωσης αυξάνεται αργά

## ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑ

Τα δυο προβλήματα που μελετάμε είναι δικά μεταξύ τους. Ξέροντας τη λύση του ενός έχουμε τη λύση και του άλλου.

Το σύστημα μας και στις δυο περιπτώσεις είναι ένα μη γραμμικό σύστημα 3<sup>ης</sup> τάξης που με γραμικοποίηση στο σημείο λειτουργίας μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ως ένα δευτεροβάθμιο γραμμικό σύστημα. Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις, η συνάρτηση μεταφοράς του κινητήρα (γεννήτρια) του εργαστηρίου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$H(s) = K_s \frac{1}{T_1s+1} \cdot \frac{1}{T_2s+1} = \frac{b_0}{s^2+a_1s+a_0} \quad (1)$$

Επειδή το σύστημα μας είναι αρκετά γρήγορο, δε χρειάζεται, μάλλον χειροτερεύει τα αποτελέσματα, το D στοιχείο του PID ελεγκτή. Επίσης δεν αρκεί το P στοιχείο του PID ελεγκτή μόνο του, γιατί τότε θα έχουμε λάθος στη μόνιμη κατάσταση. Τα αποτελέσματα του PI ελεγκτή μπορούν να βελτιωθούν με τη χρήση μη γραμμικού ελεγκτή πχ neural, fuzzy, neurofuzzy. Η σύγκλιση στη περίπτωση μας είναι εκθετική και όχι ασυμπτωτική.

Στο σύστημα μας του εργαστηρίου, module 734111 χρησιμοποιούνται κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (DC PM), γιατί συνδυάζουν πληθώρα πλεονεκτημάτων στη χρήση τους σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα:

- Χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή ροπή ανά όγκο σε λογικό κόστος.
- Δε χρειάζονται ουσιαστικά συντήρηση.
- Είναι δημοφιλείς σε συστήματα ελέγχου υψηλής απόδοσης
- Επιτυγχάνουν πολύ υψηλό λόγο ροπής προς αδράνεια
- Έχουν μικρές χρονικές σταθερές

Στο πρόβλημα μας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δυο εμπειρικές μέθοδοι συντονισμού του PID ελεγκτή, χωρίς κανένα περιορισμό.

Στο πείραμα μας, χρησιμοποιούμε αντί της βηματικής εισόδου, μια μεταβλητή είσοδο που θέλουμε η έξοδος να την ακολουθεί όσο το δυνατό καλύτερα (πρόβλημα tracing).

## Πειραματικό μέρος

### Σημείωση

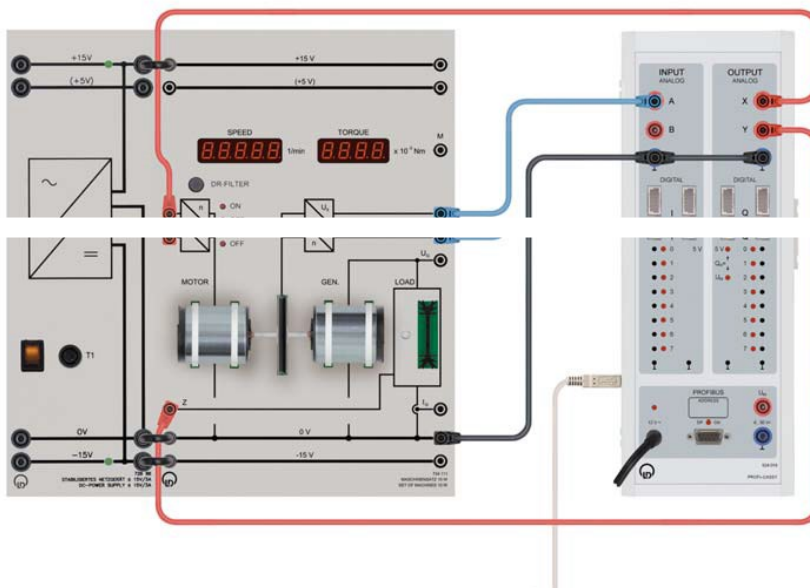
Όλες οι μετρήσεις γίνονται ως εξής:

- Τα Volt/div και Time/div ρυθμίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα Cassy Lab.
- Μερικές φορές χρειάζεται να ρυθμίσετε κατάλληλα το interval.
- Τα πάνελ συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσμους στα +15 Volt, -15 Volt και 0 Volt (όχι στα +5 Volt).

### 1. Έλεγχος της ταχύτητας (στροφών) ενός DC κινητήρα.

Πείραμα 1.1. Βηματική απόκριση του ανοικτού συστήματος με κινητήρα, για διαφορετικά φορτία, χωρίς χρήση ελεγκτών.

Υλοποιήστε τη συνδεσμολογία του διαγράμματος 1.



**Διάγραμμα 1.** Βηματική απόκριση ανοικτού συστήματος για έλεγχο στροφών κινητήρα.

Κάνετε τις ακόλουθες ρυθμίσεις στο Cassy lab2:

- **Έξοδος X** (γεννήτρια κυματομορφών): Στη τάση έλεγχου του κινητήρα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1.
- **Έξοδος Y** (γεννήτρια κυματομορφών): Στη DC τάση, που χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του φορτίου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1.
- **Κανάλι A** (καταγραφικό): Στο αισθητήριο μέτρησης των στροφών του κινητήρα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1.
- **Κανάλι B** (καταγραφικό): Δε χρησιμοποιείται, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1.

*Controlling the motor is done with a constant voltage of 2 V DC, layered by a step with adjustable amplitude Step voltage U. The load's control voltage changes the load resistance. In the CASSY Lab 2 example, the control voltage is adjusted with the Load shifter.*

- Ενεργοποιήστε το DR filter στο σετ – κινητήρα – γεννήτρια,
- «Φορτώστε» το αρχείο, SRSpeed.labs.
- Με τη βοήθεια των πολύμετρων που εμφανίζονται στην οθόνη του Cassy lab2:
- Ρυθμίστε τη Step voltage shifter σε  $U = 2 \text{ V}$ .
- Ρυθμίστε το Load shifter σε  $Z = 0 \text{ V}$ .
- Ενεργοποιήστε τη διαδικασία μέτρησης πατώντας F9.
- Θέσετε το Load shifter διαδοχικά το  $Z = 1 / 2 / 3 \text{ V}$  και επαναλάβετε κάθε φορά τη μέτρηση.
- Analyze graphically the measurement for  $Z = 0 \text{ V}$  and  $Z = 1 \text{ V}$ , using Zoom and Marker.

Με βάση τα παραπάνω, πάρτε μέση τιμή των τριών παραπάνω περιπτώσεων, να υπολογίσετε τις παραμέτρους του συστήματος κινητήρα – γεννήτρια,, οι οποίες είναι:

- **Σταθερά μεταφοράς  $K_s$**  (gain factor)
- **Χρόνος καθυστέρησης  $T_u$**  (Delay time)
- **Χρόνος ανόρθωσης  $T_g$**  (Compensation time)

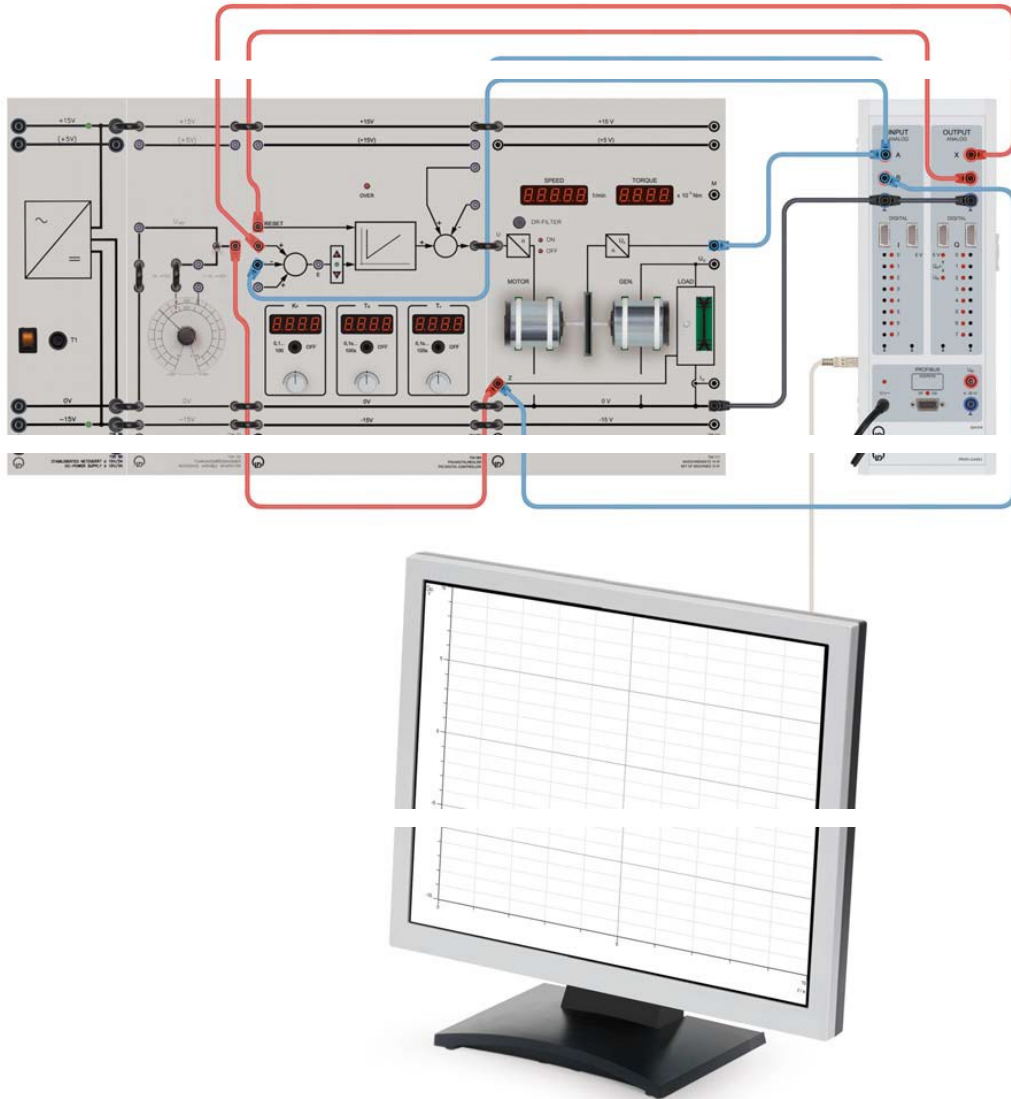
Υπολογίστε επίσης τις χρονικές σταθερές του απλοποιημένου δευτεροβαθμίου συστήματος  $T_1$ ,  $T_2$ , καθώς και τη τάξη του συστήματος  $n$ .

Καταγράψετε τη βηματική απόκριση του συστήματος, ξανά, με αποσυνδεδεμένο (OFF) το DR φίλτρο, για  $Z=1$ .



**Πείραμα 1.2 Βηματική απόκριση (του κλειστού συστήματος) ελέγχου στροφών κινητήρα με χρήση PI ελεγκτή**

Υλοποιήστε τη συνδεσμολογία του διαγράμματος 2.



**Διάγραμμα 2.** Βηματική απόκριση κλειστού συστήματος με ελεγκτή για έλεγχο στροφών κινητήρα.

Κάνετε τις ακόλουθες ρυθμίσεις στο Cassy lab2:

- Έξοδος X (γεννήτρια κυματομορφών): στη θετική είσοδο του PID ελεγκτή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.

- **Έξοδος Y** (γεννήτρια κυματομορφών): στη RESET είσοδο του PID ελεγκτή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.
- **Κανάλι A** (καταγραφικό): στην έξοδο του συστήματος κινητήρας – γεννήτρια, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των στροφών του κινητήρα, - ισοδύναμα στην αρνητική είσοδο του PID ελεγκτή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.
- **Κανάλι B** (καταγραφικό): στο σημείο Z, του σετ κινητήρας – γεννήτρια, για τη μέτρηση της τάσης του φορτίου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.

Στο σετ – κινητήρα – γεννήτρια, κάνετε τις ακόλουθες ρυθμίσεις (με τη βοήθεια του εργαστηριακού βοηθού):

- Ενεργοποιήστε το DR filter
- Με τη βοήθεια, του πανέλλου με κωδικό 73402, Reference Variable Generator, ρυθμίζουμε το Load Shifter ως εξής: Z=1 Volt
- Να υπολογίσετε τις παραμέτρους των PI ελεγκτή με τη μέθοδο CHR για 0% overshoot, reference aperiodic (setpoint response). (Δίδονται:  $K_s=0.8$ ,  $T_u=0.14$  sec,  $T_g=1.05$  sec,)

Ρυθμίσετε τον ελεγκτή PID του εργαστηρίου, σύμφωνα με τους υπολογισμούς σας.

«Φορτώστε», το αρχείο CLSpeedRef.labs.

Να καταγράψτε, πατώντας το F9, την βηματική απόκριση του κλειστού συστήματος με δράση PI ελεγκτή για 0% overshoot και aperiodic (set point response) με βάση την μέθοδο CHR.

### Μέθοδος CHR.

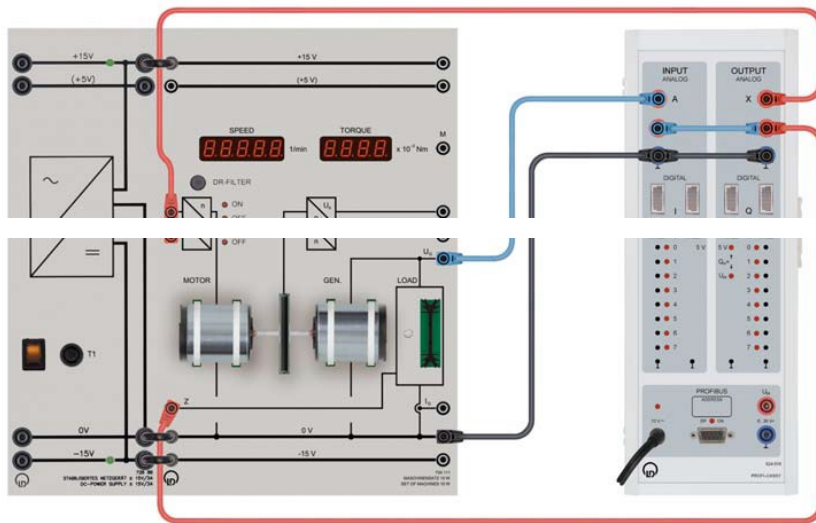
Overshoot	0%			20%		
Ελεγκτής	K	$T_i$	$T_d$	K	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$\frac{0.3 T_g}{K T_u}$			$\frac{0.7 T_g}{K T_u}$		
<b>PI</b>	$\frac{0.35 T_g}{K T_u}$	$1.2 T_g$		$\frac{0.6 T_g}{K T_u}$	$T_g$	
<b>PID</b>	$\frac{0.6 T_g}{K T_u}$	$T_g$	$0.5 T_u$	$\frac{0.95 T_g}{K T_u}$	$1.4 T_g$	$0.47 T_u$

**Πίνακας 1.** Παράμετροι ελεγκτή με τη μέθοδο CHR για setpoint response.

## 2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΣΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

### Πείραμα 2.1 Βηματική απόκριση του ανοικτού συστήματος, χωρίς χρήση ελεγκτών.

Υλοποιήστε τη συνδεσμολογία του διαγράμματος 3.



**Διάγραμμα 3.** Βηματική απόκριση ανοικτού συστήματος έλεγχου τάσης γεννήτριας.

Κάνετε τις ακόλουθες ρυθμίσεις στο Cassy lab2:

- **Έξοδος X** (γεννήτρια κυματομορφών): Στη τάση έλεγχου – εισόδου του κινητήρα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3
- **Έξοδος Y** (γεννήτρια κυματομορφών): Στη dc τάση που χρησιμοποιείται για τη ενεργοποίηση του φορτίου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3
- **Κανάλι A** (καταγραφικό): Στη τάση εξόδου της γεννήτριας, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3
- **Κανάλι B** (καταγραφικό): Στη τάση του φορτίου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3

Στο σετ – κινητήρα – γεννήτρια , κάνετε τις ακόλουθες ρυθμίσεις (με τη βοήθεια του εργαστηριακού βοηθού):

- Ενεργοποιήστε το DR filter

«Φορτώστε» το αρχείο [StepResponseVoltage.labs](#).

Με τη βοήθεια των πολύμετρων που εμφανίζονται στην οθόνη του Cassy lab2:

Ρυθμίστε το φορτίο σε  $Z = 0.00 \text{ V}$ .

Ενεργοποιήστε τη διαδικασία μέτρησης πατώντας F9.

- Θέσετε το φορτίο διαδοχικά σε  $Z = 0.50 / 1.00 \text{ V}$  και επαναλάβετε κάθε φορά τη μέτρηση.

Με βάση τα παραπάνω, πάρτε μέση τιμή των τριών παραπάνω περιπτώσεων, να υπολογίσετε τις παραμέτρους του συστήματος κινητήρα – γεννήτρια, για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις φορτίου, οι οποίες είναι:

- **Σταθερά μεταφοράς  $K_s$**  (gain factor)
- **Χρόνος καθυστέρησης  $T_u$**  (Delay time)
- **Χρόνος ανόρθωσης  $T_g$**  (Compensation time)

Υπολογίστε επίσης, σε κάθε περίπτωση, τις χρονικές σταθερές του απλοποιημένου δευτεροβαθμίου συστήματος  $T_1, T_2$ , καθώς και τη τάξη του συστήματος  $n$ .

### **Πείραμα 2.2 Βηματική απόκριση της γεννήτριας (του κλειστού συστήματος) με χρήση PI ελεγκτή**

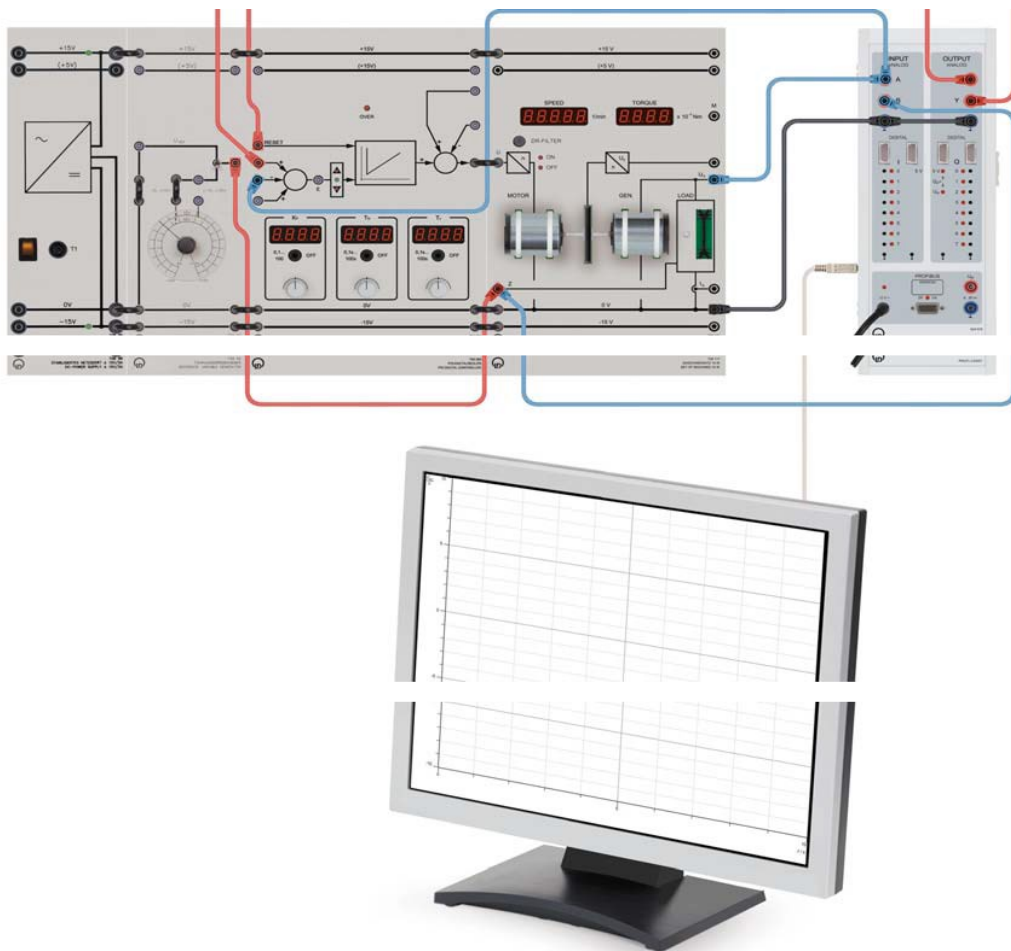
Υλοποιήστε τη συνδεσμολογία του διαγράμματος 4.

Κάνετε τις ακόλουθες ρυθμίσεις στο Cassy lab2:

- **Έξοδος X** (γεννήτρια κυματομορφών): όπως φαίνεται στο Σχήμα
- **Έξοδος Y** (γεννήτρια κυματομορφών): όπως φαίνεται στο Σχήμα
- **Κανάλι A** (καταγραφικό: όπως φαίνεται στο Σχήμα
- **Κανάλι B** (καταγραφικό): όπως φαίνεται στο Σχήμα

Στο σετ κινητήρα – γεννήτρια, κάνετε τις ακόλουθες ρυθμίσεις (με τη βοήθεια του εργαστηριακού βοηθού):





**Διάγραμμα 4.** Βηματική απόκριση κλειστού συστήματος με ελεγκτή για έλεγχο τάσης γεννήτριας.

- Ενεργοποιήστε το DR filter
- Με τη βοήθεια, του πανέλλου με κωδικό 73402, Reference Variable Generator, ρυθμίζουμε το Load Shifter ως εξής:  $Z=0.5$  Volt
- Θέσετε  $A = 2$  Volt

Να υπολογίσετε τις παραμέτρους των PI ελεγκτή με τη μέθοδο CHR για 0% overshoot, reference aperiodic (set point response). (Δίδονται:  $K_s = 0.87$ ,  $T_u = 0.10$  sec,  $T_g = 1.12$ sec,)

Ρυθμίσετε τον ελεγκτή PID του εργαστηρίου, σύμφωνα με τους υπολογισμούς σας.

«Φορτώστε», το αρχείο CLVoltageRef.labs .

Να καταγράψετε, πατώντας F9 την βηματική απόκριση του κλειστού συστήματος με δράση PI ελεγκτή για 0% overshoot και aperiodic (set point response με βάση την μέθοδο CHR.

### Μέθοδος CHR.

Overshoot	0%			20%		
Ελεγκτής	K	T <sub>i</sub>	T <sub>d</sub>	K	T <sub>i</sub>	T <sub>d</sub>
<b>P</b>	$\frac{0.3}{K} \frac{T_g}{T_u}$			$\frac{0.7}{K} \frac{T_g}{T_u}$		
<b>PI</b>	$\frac{0.35}{K} \frac{T_g}{T_u}$	1.2 T <sub>g</sub>		$\frac{0.6}{K} \frac{T_g}{T_u}$	T <sub>g</sub>	
<b>PID</b>	$\frac{0.6}{K} \frac{T_g}{T_u}$	T <sub>g</sub>	0.5 T <sub>u</sub>	$\frac{0.95}{K} \frac{T_g}{T_u}$	1.4T <sub>g</sub>	0.47 T <sub>u</sub>

**Πίνακας 2.** Παράμετροι ελεγκτή με τη μέθοδο CHR για set point response.

### **Ε. Επεξεργασία των μετρήσεων –**

### **Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.**

*(Όλες οι ερωτήσεις είναι ισοδύναμες)*

**(Οι απαντήσεις αξιολογούνται, όταν δίνονται ανά ερώτημα. Απαντήσεις που καλύπτουν πολλά ερωτήματα δεν αξιολογούνται)**

1. Σχολιάσετε την επιλογή DC PM κινητήρων, στο module 734111 του εργαστηρίου
2. Περιγράψετε συνοπτικά την λειτουργία – συμπεριφορά των κινητήρων του module 734111 του εργαστηρίου, στα δυο πειράματα.
3. Πως σχολιάζετε την επιλογή της μεθόδου CHR ως μέθοδο σχεδιασμού του ελεγκτή μας, στα δυο προβλήματα που αντιμετωπίσατε;

4. Σχολιάσετε την επιλογή και τη καταλληλότητα του PI ελεγκτή, στα δυο προβλήματα που αντιμετωπίσατε.
5. Περιγράψετε όσο το δυνατό καλύτερα το πρόβλημα tracing που μελετήσατε.
6. Ποια η σκοπιμότητα της χρήσης του DR φίλτρου; Τι πετυχαίνουμε έτσι;

### **ΣΤ. Επεξεργασία του υπολογιστικού μέρους–**

#### **Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.**

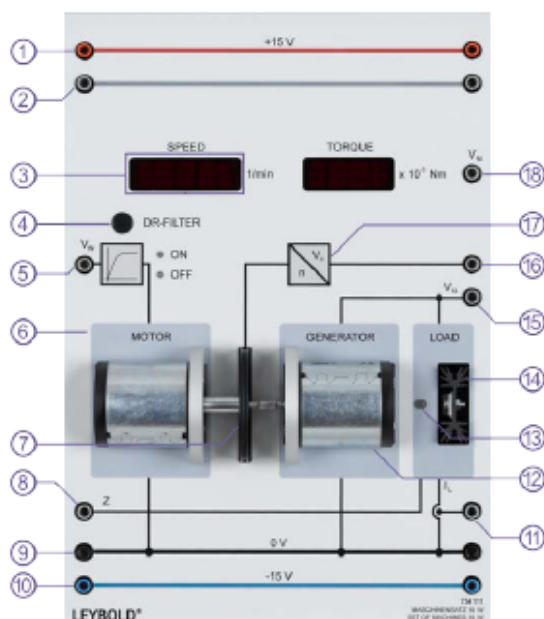
*(Όλες οι ερωτήσεις είναι ισοδύναμες)*

*(Οι απαντήσεις αξιολογούνται, όταν δίνονται ανά ερώτημα. Απαντήσεις που καλύπτουν πολλά ερωτήματα δεν αξιολογούνται)*

Να σχολιάσετε - δικαιολογήσετε, ανά μέτρηση, όσο πιο αναλυτικά μπορείτε, τυχόν διαφορές ή ομοιότητες μεταξύ των αποτελεσμάτων προσημείωσης με Matlab στο θεωρητικό μέρος και των πειραματικών αποτελεσμάτων στο πειραματικό μέρος.

### **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1** **ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΟΡΓΑΝΩΝ**

04/14-W10-Bb



## Instruction Sheet 734 111

### Set of machines 10 W

- 1 Power supply +15 V
- 2 Bus line without internal connection
- 3 Five-digit seven-segment display for speed
- 4 Activation of the prefilter, ON/OFF LED display
- 5 Input  $V_{IN}$ , control of the motor
- 6 Motor
- 7 Spoked wheel for optical tachogenerator
- 8 Input Z, activation of the electronic load
- 9 Ground
- 10 Power supply -15 V
- 11 Voltage output  $I_L$  for the load current
- 12 Generator
- 13 LED to display the generator's output
- 14 Heat sink for generator load
- 15 Generator output  $V_G$
- 16 Tachogenerator output  $V_n$
- 17 Speed-to-voltage converter
- 18 Torque four-digit seven-segment display and test port  $V_M$

## 1 Description

The set of machines 10 W represents an electric drive with two permanently excited DC machines. The coupled machines can for example operate as a motor-generator set. The drive's speed is captured optoelectronically and output as an analog voltage at  $V_n$  (16). The generator voltage  $V_G$  (15) can also be measured. A FET transistor mounted on the heat sink (14) functions as a voltage-controlled load that can receive the electrical power the generator produced. Actual load curves can be measured. The seven-segment displays represent the torque generated with a load and the current speed, which can be measured as analog voltages (3, 16, 18). No external power amplifier is necessary to operate the motor. The switchable prefilter (Dynamic Response = DR filter) amplifies the system order. The set of machines 10 W then also behaves during measurements with a greater time resolution like a 2nd order system.

## 2 Safety Note

- The device's design lends itself to connecting to a direct voltage of  $\pm 15$  V DC, preferably: 726 86 Stabilized power supply  $\pm 15$  V / 3 A. Operation with other power supply units is also possible.
- The sockets  $I_L$  (11),  $V_n$  (16), and  $V_M$  (18) are outputs. Do not connect any signal or voltage sources here.
- The socket  $V_G$  (15) is both an **output** for the generator voltage and an **input** during active braking.
- The device complies with the safety regulations in effect and bears the CE mark. Proper usage ensures the safety of those carrying out the experiments and of the connected devices.
- To prevent operating errors, please read this Instruction Sheet carefully.

## 3 Startup

Also required:

1 power supply 726 86

1 reference variable generator 734 02

In preparation, connect the set of machines to the DC power supply:  $\pm 15$  V and ground to bus lines (1), (9) and (10).



#### 4 Technical Data

Supply voltage:	$\pm 15 \text{ V DC}$
Current consumption:	$+1.5 \text{ A max.}/-0.1 \text{ A}$ with motor blocking
Safety regulations:	VDE 0411
Displays:	7 segments, 4/5 digits
Speed:	$\pm 3500 \text{ min}^{-1}$ max. for $\pm 10 \text{ V}$ at socket (5) $\pm 1800 \text{ min}^{-1}$ max. for $\pm 10 \text{ V}$ at socket (15)
Torque:	$25 \times 10^{-3} \text{ Nm max.}$
Control voltage for LOAD:	0 - 10 V at socket (8)
Rotor's resistance:	$R = 11 \Omega$ , DC measurement
Rotor's inductivity:	$L = 1.3 \text{ mH}$ , for $f = 120 \text{ Hz}$
Approx. dimensions:	297 x 200 x 100 mm
Approx. weight:	1.5 kg
Sockets:	SIBUS, 4 mm

#### Remarks

- The  $V_G$  (15) and ground (9) sockets connect directly – without intermediary electronics – to the generator's terminals.
- The generator can therefore also connect to an external power amplifier or a power supply. This also allows for active braking.
- The rotor impedance ( $R$  and  $L$ ) is measured at a standstill at the generator's  $V_G$  (15) and ground (9) sockets. The influence of carbon brushes, commutator and the machine's iron is not taken into account.
- After turning on, the DR filter always functions in the last activated operating mode. Pressing the key changes the mode. The decimal point of the number to the right in the SPEED display briefly flashes to confirm storage of the new mode.

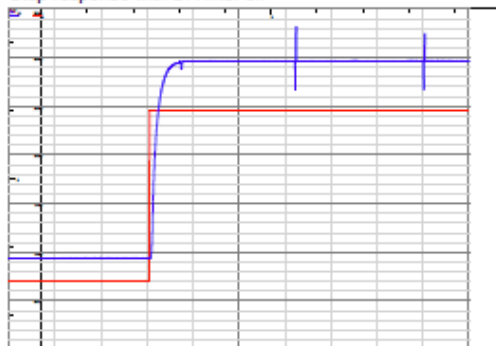
#### 5 Operation

After switching the power supply on, an LED and display test takes place, and the device's firmware version appears in the display, e.g.: *dC.Ld 1.1*. The set of machines then switches to its start settings, e.g. in the absence of activation:

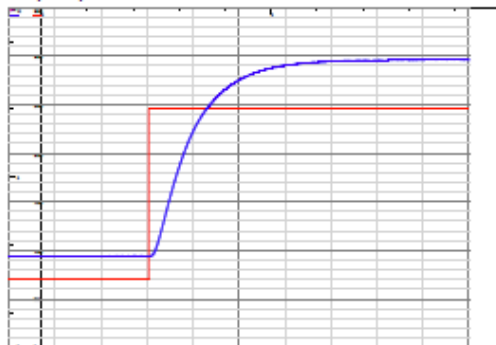
Speed:	0/min
Torque:	$0.0 \times 10^{-3} \text{ Nm}$
DR filter:	ON/OFF (last setting)

Feeding a control voltage, e.g. from the reference variable generator 734 02 or from Profi-CASSY 524 016 starts turning the set of machines. The speed's step response to a reference step depends on the DR filter's status. Following are two typical examples recorded and analyzed with Profi-CASSY and CASSY Lab 2. In the measurement examples, the input voltage experiences a step after  $t = 3 \text{ s}$  from 2 VDC to 7 VDC (red curves). The blue curves show how the speed progresses.

Step response with DR filter off



Step response with DR filter on



The prefilter slows the step response down and makes analysis easier.

NRND

F 2140 Ø40 mm, Precious Metal Brushes CLL, 4 Watt

Partnumber 2140.934.22.112.050

Compare product

Add to wishlist

Make a request

NRND (Not Recommended for New Designs): These products continue to be available, but are not recommended for new projects. Our sales team will be happy to suggest alternatives.

Order quantity

1

Make a request

Enlarge image

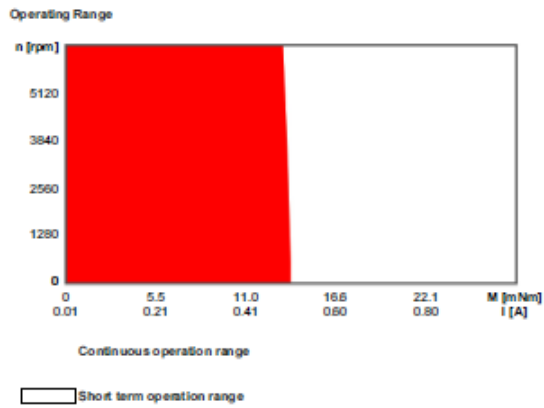
Print specifications

Description

maxon DC motors are high-quality motors fitted with powerful permanent magnets. The "heart" of the motor is the worldwide patented ironless rotor. For you, this means cutting-edge technology in compact, powerful and low inertia drives.

Specifications

Values at nominal voltage	
Nominal voltage	12 V
No load speed	4080 rpm
No load current	12.3 mA
Nominal speed	2380 rpm
Nominal torque (max. continuous torque)	13.6 mNm
Nominal current (max. continuous current)	0.499 A
Stall torque	32.9 mNm
Stall current	1.19 A
Max. efficiency	81 %
Characteristics	
Terminal resistance	10.1 Ω
Terminal inductance	1.27 mH
Torque constant	27.8 mNm/A
Speed constant	344 rpm/V
Speed / torque gradient	125 rpm/mNm
Mechanical time constant	33.3 ms
Rotor inertia	25.4 gm <sup>2</sup>
Thermal data	
Thermal resistance housing-ambient	10.4 KW
Thermal resistance winding-housing	8.8 KW
Thermal time constant winding	45.8 s
Thermal time constant motor	988 s
Ambient temperature	-20...+65 °C
Max. winding temperature	+85 °C
Mechanical data	
Bearing type	sleeve bearing
Max. speed	6400 rpm
Axial play	0.3 - 0.2 mm
Radial play	0.025 mm
Max. axial load (dynamic)	0.5 N
Max. force for press fits (static)	50 N
(static, shaft supported)	700 N
Max. radial load	2.5 N, 5 mm from flange
Other specifications	
Number of pole pairs	1
Number of commutator segments	7
Number of autoclave cycles	0
Product	
Weight	190 g



## Downloads

## Catalog page

- Catalog pages (deutsch, PDF 498 KB)
- Catalog page (english, PDF 501 KB)
- カタログのページ (日本語, PDF 46 KB)

Version 2013  
Version 2013  
Version 2013

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

### ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

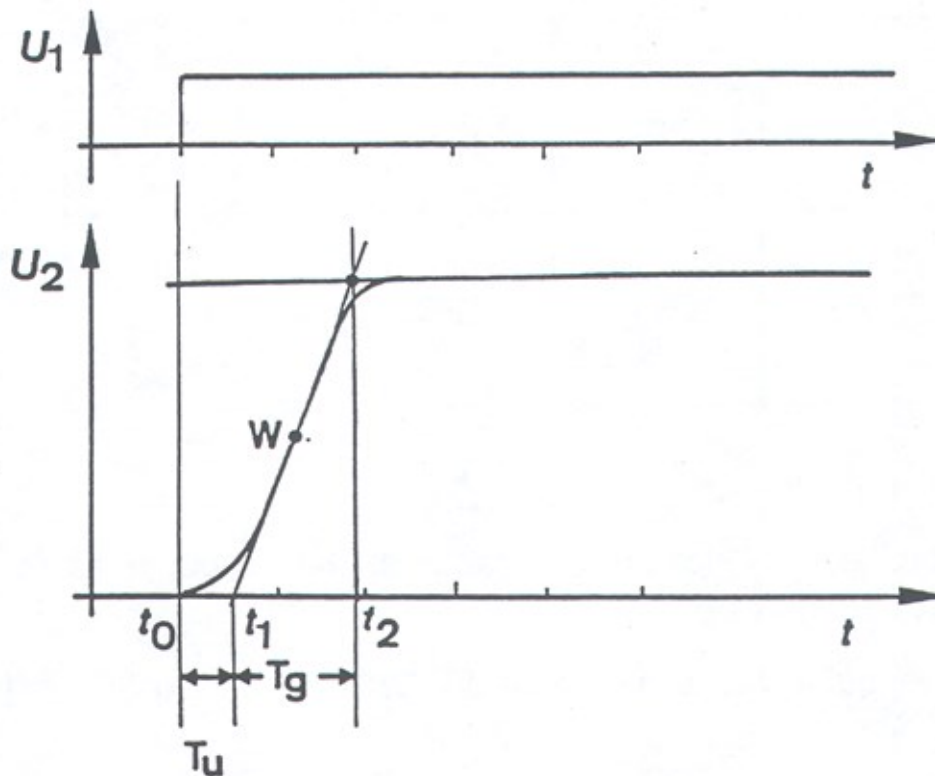
Η συνάρτηση μεταφοράς, ενός δευτεροβάθμιου συστήματος ή ισοδύναμα ενός απλοποιημένου δευτεροβάθμιου συστήματος, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$H(s) = K_s \frac{1}{T_1 s + 1} \cdot \frac{1}{T_2 s + 1} \quad (1)$$

- controlled system time constants  $T_1$  and  $T_2$
- controlled system gain  $K_s$

Παρατηρώντας στο παλμογράφο τη βηματική απόκριση ενός συστήματος έχουμε, για μη πρωτοβάθμια συστήματα, τις παραμέτρους:

- dead time  $t_u = T_e$  (equivalent dead time), και
- balancing time  $t_g = T_b$  (balancing time



Δίνεται:

$$T_1 = \frac{T_b}{e} \approx 0.37 T_b$$

$$T_2 = \frac{T_e}{3 - e} \approx 3.33 T_e$$

$$T_\Sigma = T_1 + T_2$$

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3**  
**ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥ**  
**CHR**

Overshoot	0%			20%		
Ελεγκτής	K	T <sub>i</sub>	T <sub>d</sub>	K	T <sub>i</sub>	T <sub>d</sub>
<b>P</b>	$\frac{0.3}{K} \frac{T_g}{T_u}$			$\frac{0.7}{K} \frac{T_g}{T_u}$		
<b>PI</b>	$\frac{0.35}{K} \frac{T_g}{T_u}$	1.2 T <sub>g</sub>		$\frac{0.6}{K} \frac{T_g}{T_u}$	T <sub>g</sub>	
<b>PID</b>	$\frac{0.6}{K} \frac{T_g}{T_u}$	T <sub>g</sub>	0.5 T <sub>u</sub>	$\frac{0.95}{K} \frac{T_g}{T_u}$	1.4 T <sub>g</sub>	0.47 T <sub>u</sub>

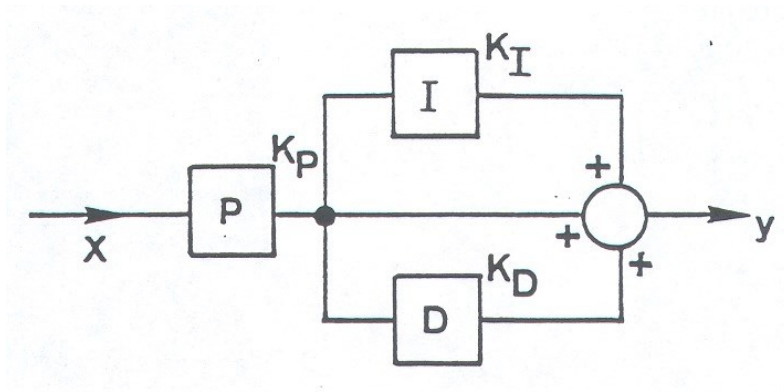
**Πίνακας 1.** Παράμετροι ελεγκτή με τη μέθοδο CHR για setpoint response.

**T<sub>sum</sub>**

Ελεγκτής	K	T <sub>i</sub>	T <sub>d</sub>
<b>P</b>	$\frac{1}{K_s}$		
<b>PI</b>	$\frac{0.5}{K_s}$	<b>0.5 · T<sub>Σ</sub></b>	
<b>PID</b>	$\frac{1}{K_s}$	<b>0.66 · T<sub>Σ</sub></b>	<b>0.17 · T<sub>Σ</sub></b>

**Μέθοδος 1.** Παράμετροι ελεγκτή με τη μέθοδο T<sub>sum</sub>.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4**  
**PID Ελεγκτής του εργαστηρίου**



$$F_R = \frac{K_p}{s} \left[ s + \frac{1}{T_i} + T_d \cdot s^2 \right]$$

Υλοποιείται στο Control Toolbox του Matlab με τη συνάρτηση `pidstd(Kp,Ti,Td)`.

Εναλλακτικά υλοποιείται με το apps PID Tuner, Form Standard.