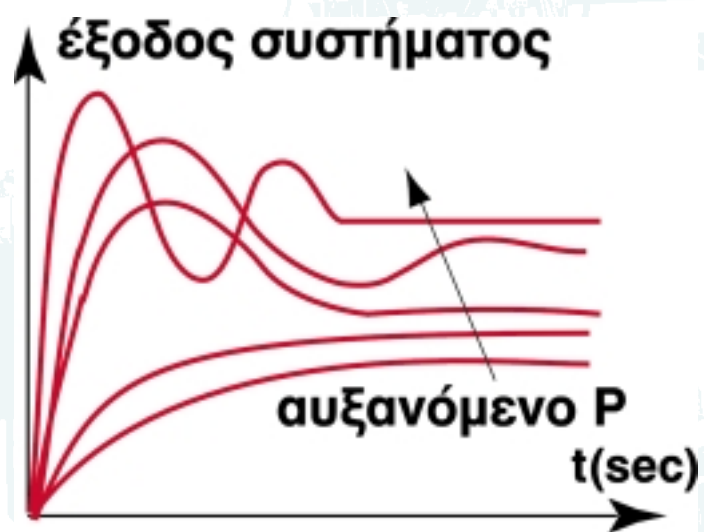


# άσκηση 20

Μελέτη

Ελεγκτή P



## Στόχοι της άσκησης

**διάρκεια άσκησης: 12 διδακτικές ώρες**

Στο τέλος της άσκησης οι μαθητές θα είναι ικανοί:

- ⇒ να γνωρίζουν τη λειτουργία ενός dc κινητήρα.
- ⇒ να γνωρίζουν τον τρόπο έλεγχου ενός dc κινητήρα .
- ⇒ να υπολογίζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.
- ⇒ να γνωρίζουν τη λειτουργία ενός P (αναλογικού) ελεγκτή.
- ⇒ να υπολογίζουν την απολαβή του μετατροπέα και του τελικού στοιχείου ελέγχου.
- ⇒ να συγκρίνουν ανοικτό και κλειστό βρόχο ελέγχου και να μελετούν την βηματική παρενόχληση της ταχύτητας του κινητήρα με ανάδραση ταχύτητας.
- ⇒ να σχολιάζουν την επίδραση της μεταβολής της ενίσχυσης του ελεγκτή πάνω στις στροφές του κινητήρα.
- ⇒ να εξηγούν την επίδραση της ενίσχυσης στο σφάλμα του συστήματος.

## Απαραίτητα εξαρτήματα

Για την πραγματοποίηση της άσκησης είναι απαραίτητα τα εξής υλικά:

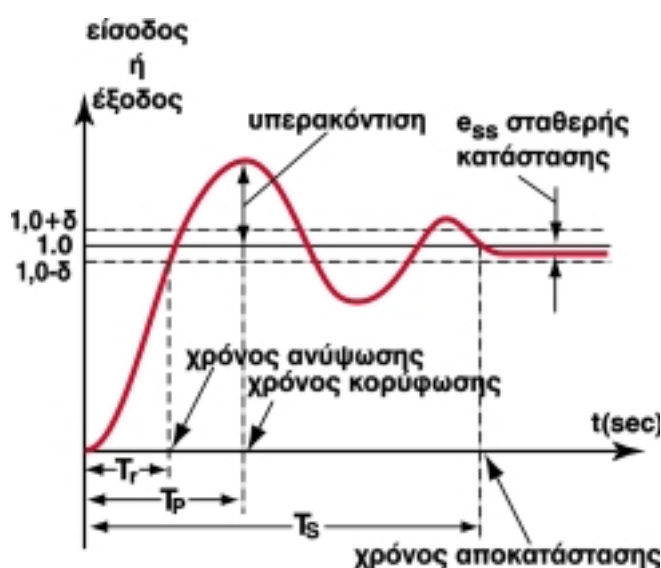
- ✓ Ένας DC κινητήρας ισχύος μικρότερης του 100 Watt
- ✓ Ένας P ελεγκτής (υλοποιείται και με PID ελεγκτή, αλλά με  $I=0$  και  $D=0$ )
- ✓ Ένα στροφόμετρο (κωδικοποιητής στροφών) του κινητήρα εξόδου 4 - 20 mA (ή 1 - 5 V)
- ✓ Ένα κύκλωμα οδήγησης κινητήρα εισόδου 4 - 20 mA (ή 1 - 5 V) με οπτική απομόνωση
- ✓ Μία μηχανική σύζευξη άξονα - κωδικοποιητή στροφών (συζεύκτης, coupler)
- ✓ Καλωδιώσεις σύνδεσης ελεγκτή - στροφόμετρου - κινητήρα
- ✓ Ένα καταγραφικό 1 - 5 V / 4 – 20 mA
- ✓ Πολύμετρα, αμπερόμετρο, βοητόμετρο
- ✓ Ένας παλμογράφος διπλής δέσμης

# Βασική θεωρία

## A. P έλεγχος

Ο έλεγχος διεργασιών (process control) είναι ένας σημαντικότερος τομέας της βιομηχανικής παραγωγής. Όλα τα βιομηχανικά συστήματα χρειάζονται κάποιο είδος ελέγχου, ώστε να εργάζονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις που έχουν τεθεί.

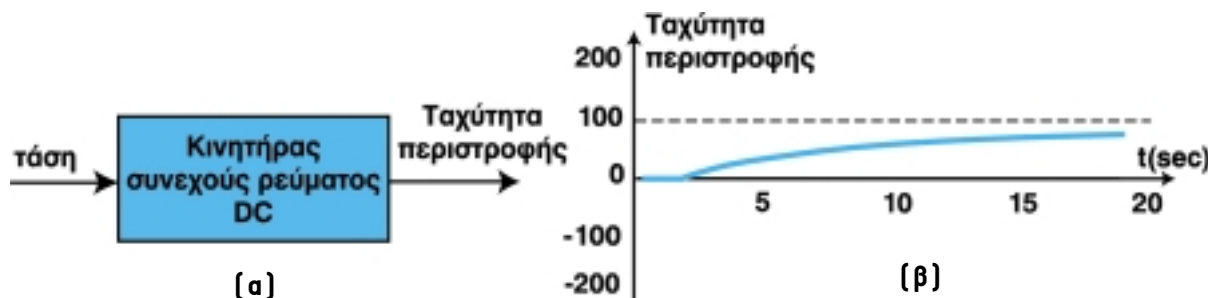
Ένα σύστημα, όσο καλά σχεδιασμένο και αν είναι, ποτέ δεν παρουσιάζει ιδανική συμπεριφορά. Το αποτέλεσμα είναι μεταξύ της εξόδου του συστήματος και της εισόδου του (που είναι η επιθυμητή απόκριση) να υπάρχει απόκλιση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 20.1.



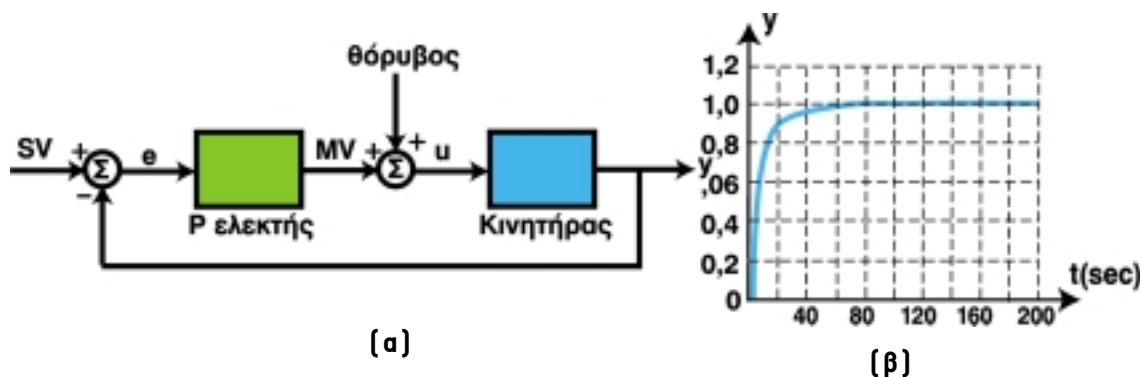
Σχήμα 20.1: Απόκριση συστήματος για βηματική είσοδο

Όταν ελέγχουμε μια παράμετρο μιας διεργασίας, επιθυμούμε να την αυξήσουμε ή να τη μειώσουμε γρήγορα από μια σταθερή τιμή σε μια άλλη σταθερή τιμή. Η μετάβαση αυτή χειροκίνητα καθυστερεί ή αδυνατεί να επιτύχει τον επιθυμητό στόχο. Ένας ελεγκτής ελέγχει την παράμετρο της διεργασίας με κάποια δική του αντικειμενική λογική και ευφυΐα, πιο αξιόπιστα και με ακρίβεια σε σύγκριση με το χειριστή, ωστόσο, αν δεν ρυθμιστεί σωστά, μπορεί να οδηγήσει σε ταλαντώσεις και άλλα σφάλματα. Τέτοια λογική μπορεί να είναι η ελαχιστοποίηση της υπερακόντισης, του σφάλματος σταθερής κατάστασης και του χρόνου απόκρισης, σχήμα 20.1.

Όπως ήδη αναφέραμε, προκειμένου το σύστημα να είναι ικανό να παρουσιάζει μια επιθυμητή συμπεριφορά, είναι απαραίτητη η χρήση ενός ελεγκτή. Το σύστημα με τον ελεγκτή μπορεί να αποτελούν ένα σύστημα *ανοικτού βρόχου* ή ένα *σύστημα κλειστού βρόχου*. Ένα σύστημα είναι ανοικτού βρόχου, όταν η έξοδος του δεν επιδρά στην είσοδο του συστήματος, σχήμα 20.2. Ένα σύστημα είναι κλειστού βρόχου, όταν η έξοδος του επιδρά στην είσοδο του συστήματος με σκοπό την αυτοδιόρθωση του συστήματος, σχήμα 20.3.

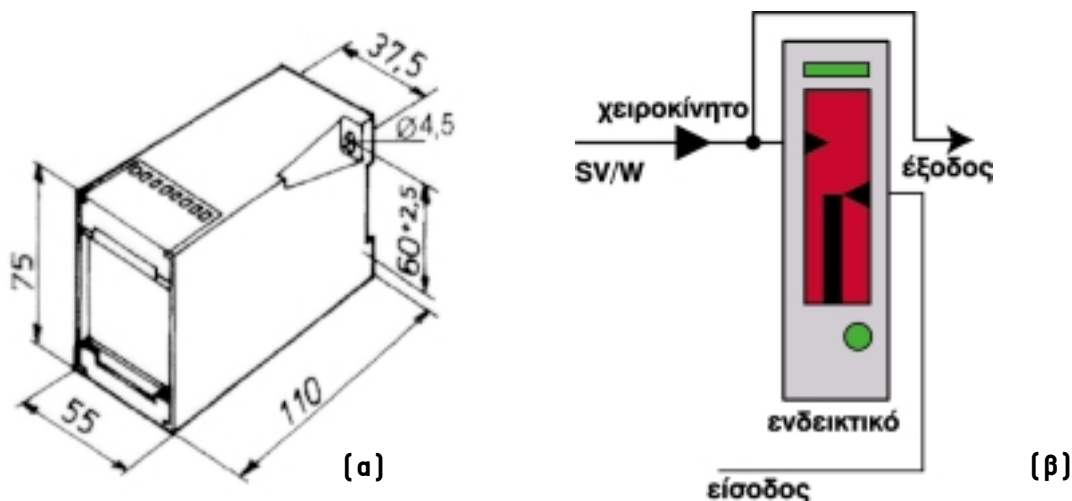


Σχήμα 20.2: Απόκριση ανοικτού βρόχου χωρίς ελεγκτή ή με ελεγκτή στο χειροκίνητο (manual)



Σχήμα 20.3: Σύστημα και απόκριση κλειστού βρόχου (ελεγκτής, σύστημα κινητήρα, διαταραχή, επιθυμητή ταχύτητα και ταχύτητα περιστροφής κινητήρα y)

Ο απλούστερος ελεγκτής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι ο *αναλογικός-P ελεγκτής* (*Proportional controller*) που φαίνεται στο σχήμα 20.4.



Σχήμα 20.4: Βιομηχανικός αναλογικός ελεγκτής και χειροκίνητη (manual) σύνδεση

Ο ελεγκτής αυτός δημιουργεί μία δράση που είναι ανάλογη του σφάλματος  $e(t)$ , δηλαδή της διαφοράς μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής τιμής της εξόδου. Δηλαδή ο ελεγκτής συγκρίνει συνεχώς την επιθυμητή έξοδο του

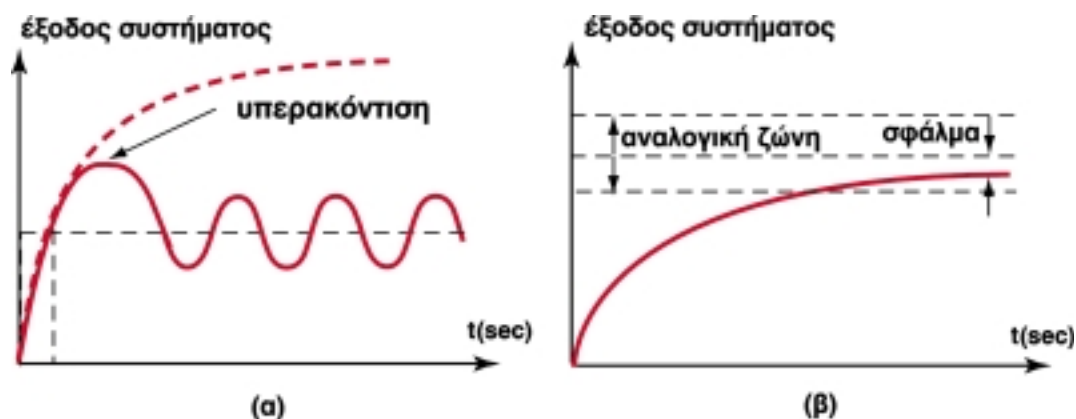
συστήματος με την πραγματική και παράγει ένα διορθωτικό σήμα, όταν η διαφορά μεταξύ αυτών των δυο τιμών είναι μετρήσιμη. Έτσι η επίδραση του αναλογικού ελεγκτή είναι:

$$MV(t) = P \cdot e(t) \quad (20.1)$$

Όπου  $P$  η απολαβή (ή ευαισθησία) του ελεγκτή. Η απολαβή συνδέεται με ένα άλλο μέγεθος του ελεγκτή, την αναλογική ζώνη [proportional band -  $PB$ ]. Δηλαδή:

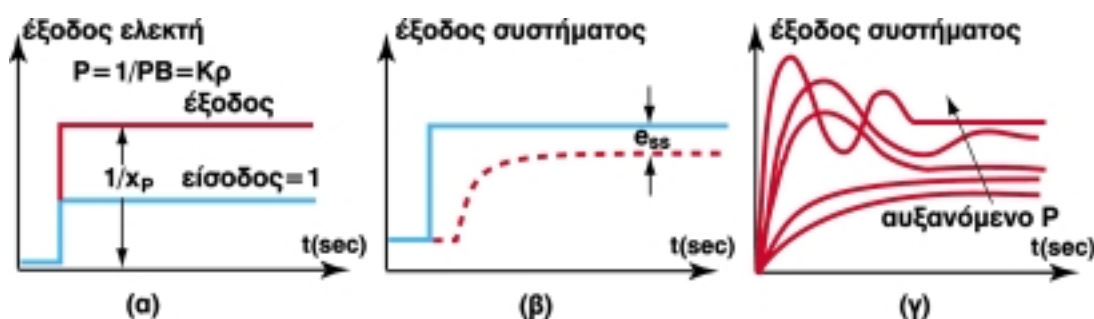
$$P = \frac{1}{PB[\%]} = k = k_p \quad (20.2)$$

Στη βιομηχανία χρησιμοποιείται περισσότερο η έννοια της αναλογικής ζώνης (Proportional Band  $PB$ ), παρά αυτή του κέρδους [ $P$ ]. Στο σχήμα 20.5, φαίνεται η φυσική ερμηνεία της αναλογικής ζώνης (Proportional Band  $PB = 1 / P$ ), που είναι η επιθυμητή ζώνη διακύμανσης του ελεγχόμενου μεγέθους.



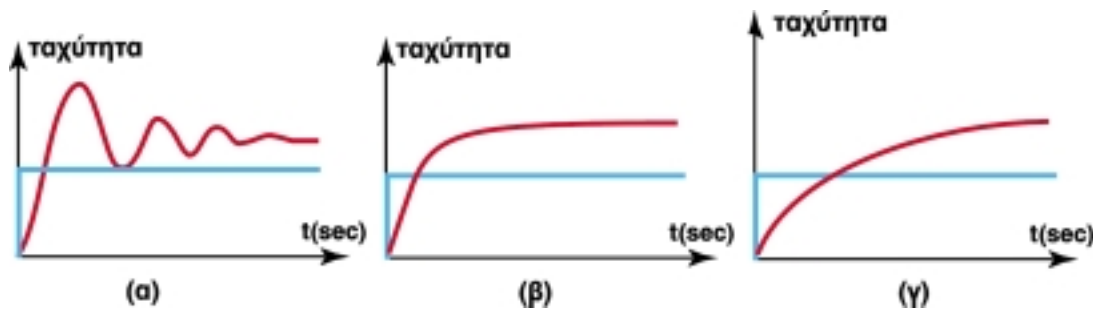
Σχήμα 20.5: Φυσική ερμηνεία της αναλογικής ζώνης

Ένα σημαντικό μειονέκτημα στη δράση του αναλογικού- $P$  ελεγκτή, είναι ότι τελικά παρουσιάζει ένα σφάλμα μόνιμης κατάστασης (δηλ. σφάλμα μετά από θεωρητικά άπειρο χρόνο και πρακτικά μετά από  $3 \div 4 T$ ) διάφορο του μηδενός, όταν έχουμε διαταραχή φορτίου, ή αλλαγή η είσοδος αναφοράς (set point), όπως φαίνεται στο σχήμα 20.6 (β). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *αντιστάθμιση* (offset). Για να σμικρύνουμε το σφάλμα αυτό αυξάνουμε το βαθμό ενίσχυσης  $P$  ( $P = 1/PB$ ). Μεγάλο  $P$  όμως μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε ταλάντωση, σχήμα 20.6(γ).



Σχήμα 20.6: (α) Βηματική απόκριση εξόδου ελεγκτή, (β) εξόδου συστήματος με  $P$  ελεγκτή (είναι εμφανές το σφάλμα σταθερής κατάστασης  $e_{ss}$ ) και (γ) βηματική απόκριση συναρτήσει της αύξησης του κέρδους  $P$

Στο σχήμα 20.7 βλέπουμε τρεις διαφορετικές αποκρίσεις ενός συστήματος καθώς η απολαβή P μειώνεται.



**Σχήμα 20.7:** Αποκρίσεις συστήματος σε βηματική διέγερση με P έλεγχο: (α) αστάθεια/ ταλάντωση, (β) ικανοποιητική, (γ) αργή

Είναι επομένως πολύ σημαντικό να *ρυθμίζουμε* κατάλληλα τον ελεγκτή, ώστε να ελαχιστοποιούμε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, χωρίς όμως να οδηγούμε το σύστημα σε αστάθεια.

Για να ρυθμίσουμε (κάνουμε tuning, ρεγουλάρουμε, καλιμπράρουμε) έναν ελεγκτή (κατευθυντή, controller) τύπου P (Proportional) πρέπει να επιλέξουμε την παράμετρο:

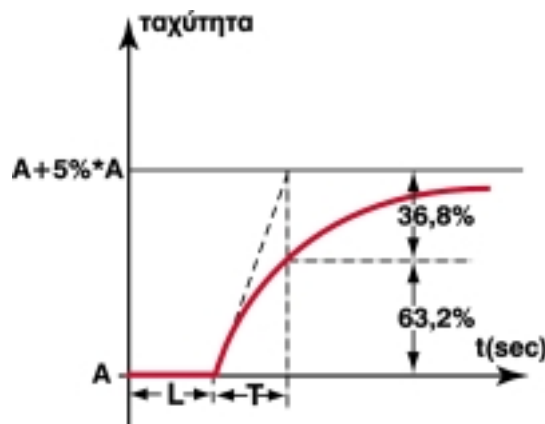
$$PB = \text{Proportional Band} = \text{Ζώνη Κέρδους} = 1/P$$

Συνήθως ρυθμίζουμε τον ελεγκτή πρακτικά, από εμπειρικούς κανόνες. Η απολαβή P υπολογίζεται από παραμέτρους μετρούμενες στην καμπύλη της απόκρισης, όπως φαίνεται στον ΠΙΝΑΚΑ 1.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1**

ΤΥΠΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗ	PB %
P	$100 / (1.2 * T/L)$

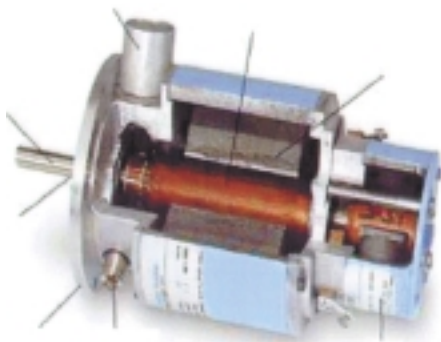
Οι χρονικές σταθερές L και T είναι ο χρόνος καθυστέρησης και η σταθερά απόκρισης αντίστοιχα και υπολογίζονται από την καμπύλη απόκρισης του σχήματος 20.8.



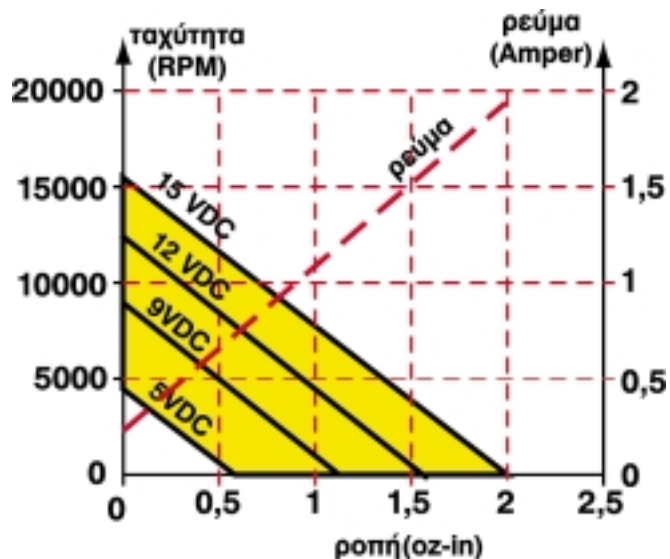
**Σχήμα 20.8:** Η καμπύλη απόκρισης ενός συστήματος για βηματική διέγερση, με τις σταθερές του χρόνου καθυστέρησης L και χρόνου απόκρισης T

## B. Ο Κινητήρας συνεχούς ρεύματος

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, βλ. σχήμα 20.9, χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο θέσης, ταχύτητας και ισχύος συστημάτων χαμηλής και μέσης ισχύος, χρησιμοποιούνται δε σε συσκευές αυτοματισμού γραφείου, και ιατρικών οργάνων.



(α)



(β)

**Σχήμα 20.9: Τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες ροπής - ταχύτητας - ρεύματος dc κινητήρα σταθερού μαγνήτη**

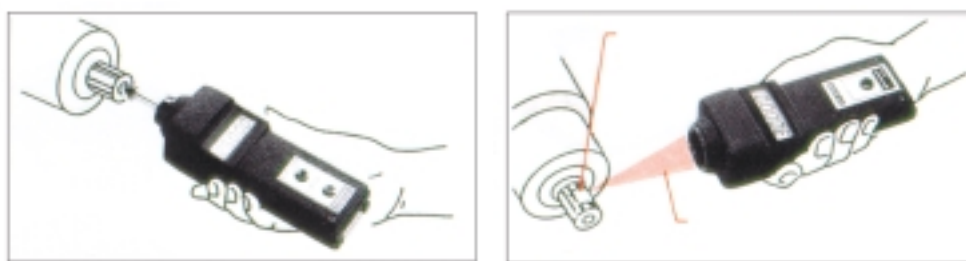
Οι dc κινητήρες, διακρίνονται:

- A. ως προς την ισχύ τους σε ακεραίου και κλάσματος του ίππου
- B. ως προς τον τύπο του μαγνητικού πεδίου σε σταθερού μαγνήτη, διέγερσης σειράς, διπλής διέγερσης σειράς, παράλληλης διέγερσης, μικτής διέγερσης
- Γ. ως προς το χρόνο λειτουργίας τους σε συνεχούς και διακεκομμένης
- Δ. και τέλος ως προς την μέθοδο ψύξης τους.

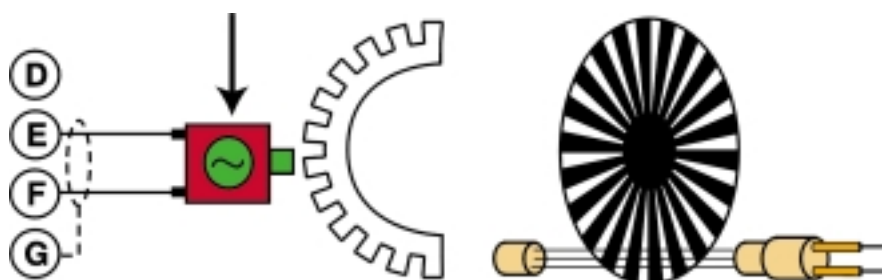
Στο παράρτημα ΙΙΙ δίνονται οι τυπικές χαρακτηριστικές ρεύματος και ταχύτητας συναρτήσει των στροφών του κινητήρα για (α) dc κινητήρα διέγερσης σειράς, (β) dc κινητήρα διπλής (split) διέγερσης σειράς, (γ) dc κινητήρα παράλληλης διέγερσης, (δ) dc κινητήρα μικτής διέγερσης και (ε) dc κινητήρα με σταθερά μαγνήτη.

## Γ. Ο Κωδικοποιητής Στροφών - Ταχύμετρο

Τα ταχύμετρα χρησιμοποιούνται για μέτρηση γραμμικών και περιστροφικών ταχυτήτων από 2 rpm μέχρι 1.000.000 rpm, καθώς και για μετρήσεις συχνότητας και ροής, και στατιστικών ή παραγώγων μεγεθών, όπως επιτάχυνση, μέγιστη ταχύτητα κτλ. Χρησιμοποιούν αισθητήρια ηλεκτρομαγνητικά ή φωτοηλεκτρικά ή προσέγγισης, για μετατροπή της περιστροφής σε σήμα συχνότητας, σχήμα 20.10. Μονάδες αυτόματης μεταβολής κέρδους (AGC) βελτιστοποιούν το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) για σωστό σήμα σε υψηλότερες ταχύτητες. Το ηλεκτρονικό κύκλωμα ενός ταχύμετρου αποτελείται από το αισθητήριο, τον ενισχυτή παλμών και τον επεξεργαστή (ολοκληρωτή) παλμών που βρίσκει το μέσο όρο των παλμών.



(α)

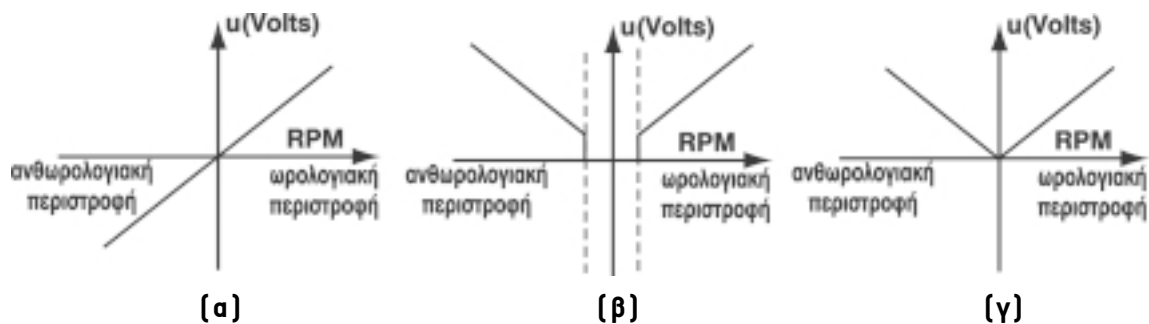


(β)

(γ)

**Σχήμα 20.10: Δισύρματος μαγνητικός και οπτικός κωδικοποιητής στροφών/ταχύτητας dc κινητήρα [χωρίς ανίχνευση κατεύθυνσης περιστροφής]**

Οι χαρακτηριστικές του κωδικοποιητή ταχύτητας συνήθως δείχνουν την κατεύθυνση περιστροφής του κινητήρα, ενώ άλλες φορές για να αποφύγουν τις τριβές και το θόρυβο διαθέτουν υστέρηση, σχήμα 20.11.



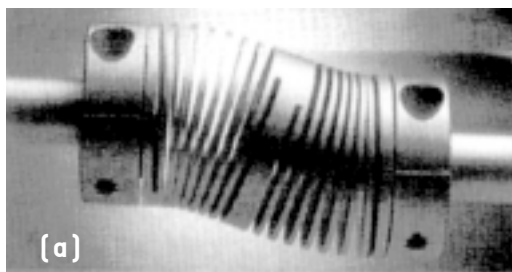
(α)

(β)

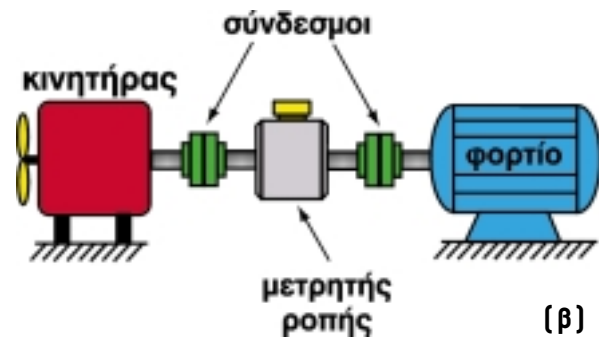
(γ)

**Σχήμα 20.11: Χαρακτηριστικές κωδικοποιητή ταχύτητας**





(α)



(β)

Σχήμα 20.12: Κινητήριοι σύνδεσμοι κινητήρων φορτίων

## Διαδικασία

Κατά την εκτέλεση της άσκησης ακολουθήστε τα εξής βήματα:

### 1<sup>ο</sup> τρίωρο

#### A. Δημιουργία και έλεγχος λειτουργίας του πειραματικού κυκλώματος

- Ελέγξτε την καλή κατάσταση του κινητήρα, που συμπεριλαμβάνει:
  - 1.1 αναγνώριση θέσης και κατάστασης κυκλώματος και ακροδεκτών
  - 1.2 έλεγχο συνέχειας στάτη / ρότορα με ωμόμετρο,
  - 1.3 έλεγχο διαρροών κυκλώματος στάτη / ρότορα με μεγερόμετρο (Να γίνεται με ιδιαίτερο έλεγχο της πειραματικής διάταξης από τον καθηγητή λόγω της τάσης 500 Volts),
  - 1.4 έλεγχο κατάστασης (φθοράς) συλλέκτη και λοιπών μερών,
  - 1.5 επαλήθευση της χαρακτηριστικής καμπύλης του κινητήρα, σχήμα 20.9.
- Συνδέστε το ωμόμετρο στα άκρα του ρότορα. Τι ένδειξη έχετε; Ποια είναι η γνώμη σας για την κατάσταση του ρότορα;
- Συνδέστε το ωμόμετρο στα άκρα του στάτη. Τι ένδειξη έχετε; Ποια είναι η γνώμη σας για την κατάσταση του στάτη;
- Ελέγξτε πιθανές διαρροές του κυκλώματος του στάτη και του ρότορα με μεγερόμετρο. **Προσοχή στην τάση 500 Volt**, μην κεραυνοβοληθείτε και μην κεραυνοβολήσετε τα λοιπά κυκλώματα οδήγησης και ελέγχου. Αποσυνδέστε τα κυκλώματα οδήγησης και ελέγχου.
- Συνδέστε μηχανικά τον αισθητήρα (κωδικοποιητή) ταχύτητας (στροφών) στον κινητήρα (συνήθως η σύνδεση γίνεται με έναν απλό σφιγκτήρα).

6. Συνδέστε το κύκλωμα οδήγησης (interface) στον κινητήρα (συμβουλευτείτε το τεχνικό φυλλάδιο του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα).
7. Συνδέστε ένα αμπερόμετρο σε σειρά στην τροφοδοσία του κινητήρα.
8. Συνδέστε ένα βοητόμετρο παράλληλα στην τροφοδοσία του κινητήρα.
9. Μεταβάλλετε το ρεύμα τροφοδοσίας (άρα και το φορτίο) του κινητήρα και σημειώστε κάθε φορά την ένδειξη του αισθητήρα ταχύτητας. Συμπληρώστε τον ΠΙΝΑΚΑ Α. Η τελευταία στήλη του πίνακα συμπληρώνετε με τη βοήθεια του πίνακα μετατροπής (ηλεκτρικό σήμα σε ταχύτητα) του αισθητηρίου που δίνεται στο τεχνικό φυλλάδιο του ταχύμετρου.

ΠΙΝΑΚΑΣ Α

ΡΕΥΜΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ τροφοδοσίας dc κινητήρα [ A ]	ΕΝΔΕΙΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ [ Volts ή Hz ή mA ]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ [στροφές / min]

10. Από τον ΠΙΝΑΚΑ Α σχεδιάστε την απόκριση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα συναρτήσει του ρεύματος που τον διαρρέει (άρα του φορτίου του κινητήρα).

**ταχύτητα**



I(ρεύμα - A)

11. Διακόψτε τη τροφοδοσία του κινητήρα.
12. Συνδέστε το καταγραφικό στην έξοδο του αισθητήρα ταχυτήτων.

13. Τροφοδοτήστε τον κινητήρα και περιμένετε μέχρι να σταθεροποιηθεί η λειτουργία του (σταθερή ταχύτητα περιστροφής). Από την απόκριση του κινητήρα υπολογίστε το χρόνο καθυστέρησης, τη σταθερά χρόνου του κινητήρα και την υπερακόντιση.
14. Από το διάγραμμα της απόκρισης προσδιορίστε την χρονική σταθερά απόκρισης του dc κινητήρα βλ. σχήμα 20.8
15. Διακόψτε την τροφοδοσία του κινητήρα.

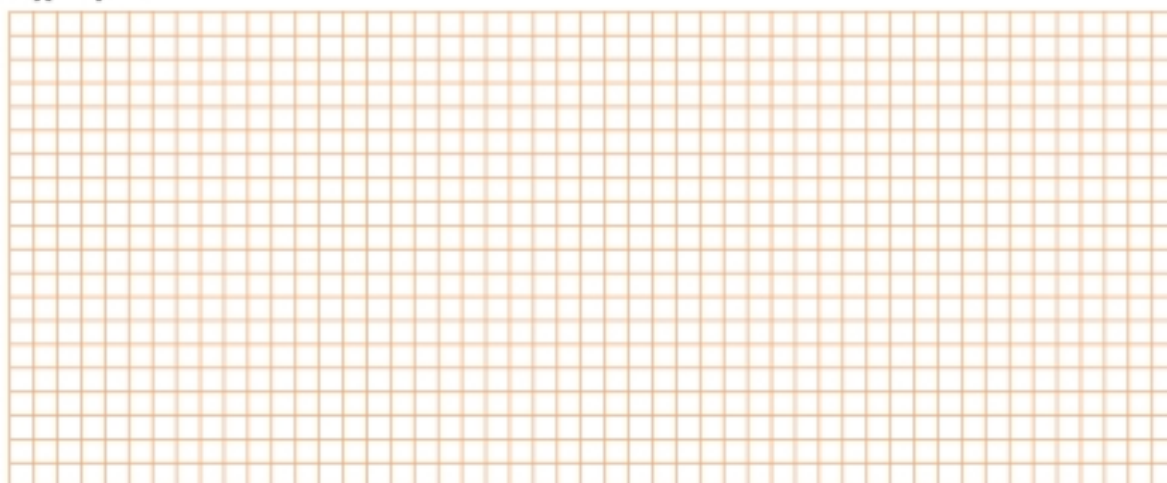
**Σημείωση:** Αν στο εργαστήριο δεν υπάρχει καταγραφικό μηχανήμα, τότε μπορούμε να πάρουμε την απόκριση του κινητήρα στο χρόνο με δύο τρόπους:

- Χρησιμοποιώντας παλμογράφο. Χρειάζεται όμως προσοχή να κρατήσουμε στην οθόνη του παλμογράφου την αρχή (χρόνο μηδέν) της απόκρισης.
- Χρησιμοποιούμε βοητόμετρο και συμπληρώνουμε ένα πίνακα σαν τον παρακάτω:

ΧΡΟΝΟΣ [ sec ]	ΕΝΔΕΙΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ [ Volts ή Hz ή mA ]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ [ στροφές / min ]
0 sec		
1 sec		
.....		
κτλ.		

16. Για να μετρήσουμε την ένδειξη του αισθητήρα ταχύτητας συνδέουμε παράλληλα στην έξοδό του ένα βοητόμετρο. Η τρίτη στήλη του πίνακα συμπληρώνετε με τη βοήθεια τεχνικών φυλλαδίων.
17. Από τον πίνακα αυτό τελικά σχεδιάζουμε την απόκριση της ταχύτητας του κινητήρα συναρτήσει του χρόνου.

**ταχύτητα**

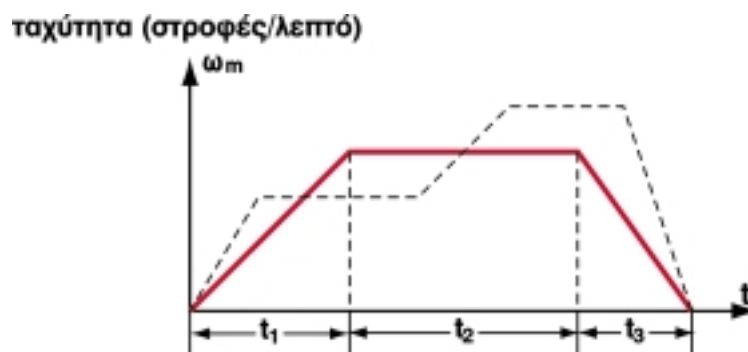


**t(χρόνος)**

## 2<sup>ο</sup> τρίωρο

### B. Δημιουργία και έλεγχος ανοικτού βρόχου

1. Σχεδιάστε το δομικό διάγραμμα βαθμίδων (block diagram) ελέγχου ανοικτού βρόχου του κινητήρα, χρησιμοποιώντας της μονάδες του κινητήρα, του ελεγκτή, του αισθητήρα ταχύτητας και του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα.
2. Συνδέστε το κύκλωμα οδήγησης του dc κινητήρα στην έξοδο (MV, Y) του ελεγκτή (controller).
3. Στην είσοδο επιθυμητής τιμής (SV/W) του ελεγκτή δώστε μία τιμή της επιλογής σας. Με τον ελεγκτή στη θέση MANUAL δώστε στο κέρδος P τιμή 10. Παρακολουθήστε τις μεταβολές. Κανονικά σε κλασσικό βιομηχανικό ελεγκτή δεν θα πρέπει να συμβεί καμία μεταβολή. Ο ελεγκτής στη θέση MANUAL ελέγχεται μόνο στο MV και το SV και οι παράμετροι, όπως το P είναι “στον αέρα” ενώ το PV λειτουργεί σαν απλό ενδεικτικό στροφών. Αν όμως ρυθμίσετε το κέρδος του κυκλώματος οδηγού (τάσης) του κινητήρα τότε συνεχίστε με τα επόμενα βήματα 4-10.
4. Τροφοδοτήστε τον κινητήρα και περιμένετε μέχρι να σταθεροποιηθεί η λειτουργία του (σταθερή ταχύτητα περιστροφής).
5. Παρενοχλήστε βηματικά τον κινητήρα με μια μικρή απότομη αύξηση στο ρυθμιστικό στροφών του ελεγκτή (θετική βηματική μεταβολή). Στο καταγραφικό παρατηρήστε την απόκριση του κινητήρα, δηλ. την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα συνάρτησε του χρόνου. Από το γράφημα αυτό υπολογίστε το χρόνο καθυστέρησης, τη σταθερά χρόνου και την υπερακόντιση του κινητήρα.
6. Αλλάξτε την τιμή του κέρδους του κυκλώματος οδηγού (τάσης) του κινητήρα. Επαναλάβετε τα βήματα 4-5.
7. Συγκρίνετε τα δύο γραφήματα. Τι παρατηρείτε; Για ποια από τις δύο τιμές του κέρδους του κυκλώματος οδηγού (τάσης) του κινητήρα έχουμε καλύτερη απόκριση;
8. Με την ίδια διαδικασία βρείτε το βέλτιστο κέρδος του κυκλώματος οδηγού (τάσης) του κινητήρα. Τι παρατηρείτε αν αλλάξουν οι συνθήκες (παράμετροι) στη διάταξη;
9. Για τη βέλτιστη απόκριση (άρα και το βέλτιστο κέρδος του κυκλώματος οδηγού (τάσης) του κινητήρα) σημειώστε το χρόνο καθυστέρησης, την υπερακόντιση, τη σταθερά χρόνου και το σφάλμα σταθερής κατάστασης. Υπολογίστε το κέρδος του κυκλώματος οδηγού (τάσης) του κινητήρα, ώστε οι παραπάνω σταθερές να βελτιωθούν κατά 30%.
10. Με τον ελεγκτή στη θέση MANUAL ελέγξτε το MV. Με αυτό τον τρόπο (δηλ. ελέγχοντας το MV) και με μόνο κριτήριο την ανάγνωση στροφών από τον μαθητή του στροφόμετρου, επιταχύνετε τον dc κινητήρα μέχρι μία σταθερή στάθμη στροφών και, αφού τη διατηρήσετε επί μικρό χρονικό διάστημα, επιβραδύνετε. Οι μεταβολή της ταχύτητας γίνεται με την έξοδο (MV/Y) του ελεγκτή σε χειροκίνητο (MANUAL). Αν ο ελεγκτής δεν είναι τυποποιημένος, η μεταβολή της ταχύτητας γίνεται με τη βοήθεια κάποιου ποτενσιόμετρου. Ακολουθήστε συγκεκριμένο μέτωπο ταχυτήτων του σχήματος 20.13 (πλήρης γραμμή). Καταγράψτε την ταχύτητα του ταχύμετρου.



**Σχήμα 20.13: Μέτωπο (profile ελέγχου) οδήγησης ταχύτητας περιστροφής κινητήρα (επιτάχυνση - σταθερή ταχύτητα - επιβράδυνση)**

11. Αξιολογήστε την επιτυχία ελέγχου σας στο χειροκίνητο (MANUAL).
12. Ξαναπροσπαθήστε το βήμα 10 στον χειροκίνητο (MANUAL) τρόπο λειτουργίας, που αντιστοιχεί σε έλεγχο ανοικτού βρόχου, με μεγαλύτερη προσπάθεια και εμπειρία του μαθητή, μέχρι τελικής επιτυχίας.
13. Πόσο δύσκολη σας φαίνεται αυτή η διαδικασία; Τι προτείνετε;
14. Διακόψτε τη τροφοδοσία του συστήματος.

## 3<sup>ο</sup> τρίωρο

### Γ. Δημιουργία και έλεγχος κλειστού βρόχου

1. Σχεδιάστε το δομικό διάγραμμα βαθμίδων (block diagram) ελέγχου κλειστού βρόχου του κινητήρα, χρησιμοποιώντας τις μονάδες του κινητήρα, του ελεγκτή, του αισθητήρα ταχύτητας και του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα.
2. Συνδέστε τον αισθητήρα ταχύτητας στην είσοδο (PV, X) του ελεγκτή. Στην περίπτωση που ο αισθητήρας έχει έξοδο τάση, η σύνδεση αυτή είναι μια απλή δισύρματη σύνδεση. Αν η έξοδος είναι ρεύμα, απαιτείται να μεσολαβήσει κύκλωμα μετατροπής ρεύματος σε τάση. Αν η έξοδος είναι παλμοσειρά, απαιτείται να μεσολαβήσει κύκλωμα μετατροπής συχνότητας σε τάση (f-to-V converter).
3. Τοποθετήστε τον ελεγκτή στη θέση AUTO και δώστε μια τυχαία τιμή στην επιθυμητή τιμή. Δώστε στο κέρδος P τιμή ίση με 10.
4. Τροφοδοτήστε τον κινητήρα και περιμένετε μέχρι να σταθεροποιηθεί η λειτουργία του (σταθερή ταχύτητα περιστροφής), για δεδομένη SV του ελεγκτή (π.χ. 50 % της μέγιστης τιμής της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα).
5. Παρενοχλήστε βηματικά τον κινητήρα με μια μικρή απότομη αύξηση της επιθυμητής τιμής (θετική βηματική μεταβολή ίση με 10% της μέγιστης ταχύτητας). Στο καταγραφικό παρατηρήστε την απόκριση του κινητήρα. Από το γράφημα αυτό υπολογίστε το χρόνο καθυστέρησης, τη σταθερά χρόνου και την υπερακόνηση του κινητήρα.

6. Διακόψτε την τροφοδοσία του κινητήρα.
7. Δώστε στο κέρδος P τιμή ίση με 30. Επαναλάβετε τα ερωτήματα 4, 5 και 6.
8. Δώστε στο κέρδος P τιμή ίση με 100. Επαναλάβετε τα ερωτήματα 4, 5 και 6.
9. Συγκρίνετε τα τρία γραφήματα από τις προηγούμενες ερωτήσεις. Τι παρατηρείτε; για ποια από τις τρεις τιμές έχουμε καλύτερη απόκριση;
10. Για την καλύτερη από τις τρεις αποκρίσεις σημειώστε το χρόνο καθυστέρησης και τη σταθερά χρόνου. Υπολογίστε το κέρδος P του ελεγκτή, ώστε οι δύο αυτές σταθερές να βελτιωθούν κατά 30% (συμβουλευτείτε τον ΠΙΝΑΚΑ 1 της θεωρίας).
11. Ρυθμίστε τον ελεγκτή στη νέα αυτή τιμή του P και επαναλάβετε τα ερωτήματα 4, 5 και 6.
12. Συγκρίνετε την απόκριση του κινητήρα (μέσω του γραφήματος του καταγραφικού) με την απόκριση από το βέλτιστο γράφημα των τριών προηγούμενων περιπτώσεων. Είναι όντως μικρότερες κατά 30% ο χρόνος καθυστέρησης και η σταθερά χρόνου;
13. Επιταχύνετε τον dc κινητήρα μέχρι μία σταθερή στάθμη στροφών και αφού την διατηρήσετε επί μικρό χρονικό διάστημα, επιβραδύνετε. Η μεταβολή της ταχύτητας γίνεται με την είσοδο επιθυμητής τιμής (SV/W) σε αυτόματη λειτουργία του ελεγκτή. Αν ο ελεγκτής δεν είναι τυποποιημένος, η μεταβολή της ταχύτητας γίνεται με τη βοήθεια κάποιου ποτενσιόμετρου. Ακολουθήστε συγκεκριμένο μέτωπο ταχυτήτων του σχήματος 20.13 (πλήρη γραμμή). Καταγράψτε την ταχύτητα του ταχύμετρου.
14. Καταγράψτε τα σήματα *ανάδρασης* ταχύτητας σε καταγραφικό.
15. Διακόψτε την τροφοδοσία του συστήματος.

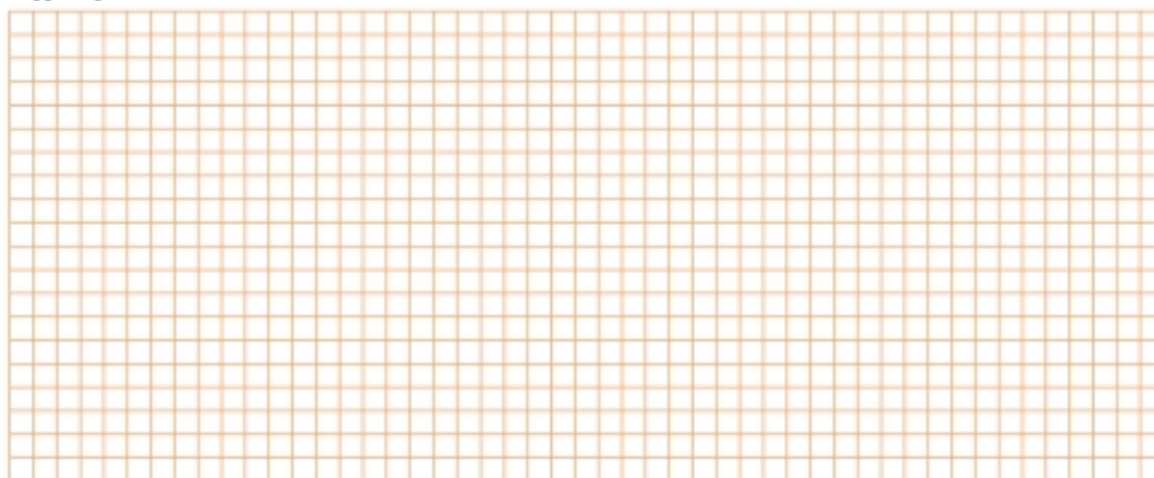
## Δ. Μετρήσεις χαρακτηριστικών dc κινητήρα

1. Τροφοδοτήστε τον κινητήρα και περιμένετε μέχρι να σταθεροποιηθεί η λειτουργία του (σταθερή ταχύτητα περιστροφής).
2. Συνδέστε το βολτόμετρο (παράλληλα) και αμπερόμετρο (σε σειρά) στην τροφοδοσία του dc κινητήρα και μεταβάλλετε τη ροπή μεταβάλλοντας το μηχανικό φορτίο του κινητήρα (με αύξηση της πέδησης). Σε μικρούς κινητήρες πέδηση μπορεί να εφαρμοστεί με τριβή στον άξονα.
3. Παρενοχλήστε βηματικά τον κινητήρα με μια μικρή απότομη ελάττωση της επιθυμητής τιμής (αρνητική βηματική μεταβολή). Η μεταβολή αυτή αντιστοιχεί σε διαδικασία πέδησης. Στο καταγραφικό παρατηρήστε και ερμηνεύστε την απόκριση του κινητήρα.
4. Επαναλάβετε το ερώτημα 3 για δύο διαφορετικές τιμές του κέρδους P. Πώς επηρεάζει η τιμή του P τη συμπεριφορά του κινητήρα;
5. Μειώστε το κέρδος του ελεγκτή P, έτσι ώστε η ροπή του να είναι συγκρίσιμη με τις τριβές και να παρουσιαστεί νεκρή περιοχή (dead zone). Καταγράψτε τη νεκρή ζώνη (ελάχιστη τιμή εκκίνησης του κινητήρα). Κατά τη μελέτη της νεκρής ζώνης χρησιμοποιήστε μικρές τιμές της τάσης οδήγησης (ενδεικτικά από 0-10% της περιοχής τάσης οδήγησης του dc κινητήρα σε Volt).
6. Μετρήστε την ταχύτητα και έμμεσα τη ροπή του dc κινητήρα μετρώντας το ρεύμα τροφοδοσίας, σχήμα 20.9.

ΡΕΥΜΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ της τροφοδοσίας του dc κινήτρου (σε A)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ (σε Volts ή Hz ή mA) στροφές / min

7. Σχεδιάστε και σχολιάστε τη χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας - ρεύματος του dc κινήτρου σας.

ταχύτητα



ροπή / φορτίο

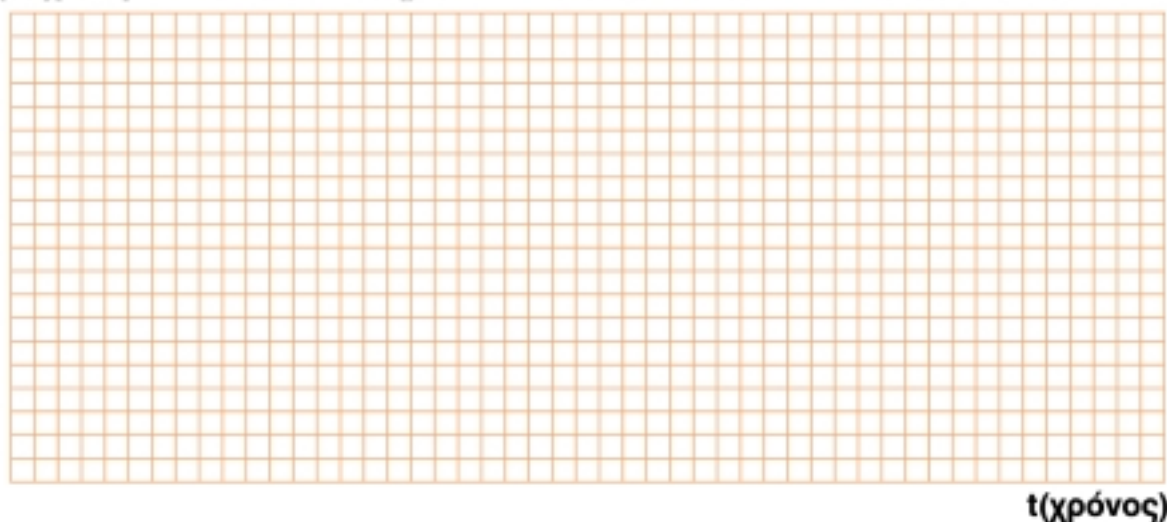
## Ε. Μετρήσεις χαρακτηριστικών ταχύμετρου

1. Μετρήστε με βοητόμετρο (ή συχνόμετρο, ανάλογα) την έξοδο του ταχύμετρου σας για διάφορες ταχύτητες περιστροφής του κινήτρου.

ΤΑΣΗ ΤΑΧΥΜΕΤΡΟΥ (σε Volts)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ στροφές / min

2. Χαράξτε τη *στατική χαρακτηριστική* του δικού σας ταχύμετρου, τάση εξόδου ταχύμετρου σε σχέση με την πραγματική ταχύτητα περιστροφής, σχήμα 20.11. Και οι δύο παράμετροι μετρώνται στο ταχύμετρο.

**έξοδος ταχυμέτρου**  
(συχνότητα / 4-20mA / τάση)



3. Από την παραπάνω καμπύλη συνάγεται αν έχει πολικότητα η χαρακτηριστική του ταχύμετρου σας; Σχήμα 20.11.
4. Από την παραπάνω καμπύλη συνάγεται αν έχει υστέρηση η χαρακτηριστική του ταχύμετρου σας; Σχήμα 20.11.
5. Μετρήστε τάσεις (ή ρεύμα ή συχνότητα) στην *έξοδο* του ταχύμετρου σας και
6. Διακριβώστε το ταχύμετρο στις παρακάτω τιμές 0 - 10 % - 50 % - 90 % της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής. Η διακριβώση ταχύμετρων προϋποθέτει την ύπαρξη και δεύτερου ακριβέστερου ταχύμετρου. Ωστόσο στο συγκεκριμένο βήμα διακριβώση είναι η διαπίστωση ότι π.χ. το 10 % του ταχύμετρου αντιστοιχεί πραγματικά στο 10 % της μέγιστης μετρούμενης τιμής.

## 4ο τρίωρο

### ΣΤ. Ρυθμίσεις του P ελεγκτή σε κλειστό βρόχο

1. Δώστε δύο δικές σας τιμές στο χρόνο καθυστέρησης και στη σταθερά χρόνου (πόσο μικρά επιθυμείτε να είναι), υπολογίστε την τιμή του κέρδους P και επαναλάβετε τα ερωτήματα B.9, B.10 και B.11. Είναι τα αποτελέσματα τα αναμενόμενα;
2. Τροφοδοτήστε το σύστημα και περιμένετε μέχρι να αποκατασταθεί η ισορροπία. Καταγράψτε το σφάλμα ελέγχου μόνιμης κατάστασης (τάση αναφοράς - τάση ταχογεννήτριας ή στροφόμετρου).



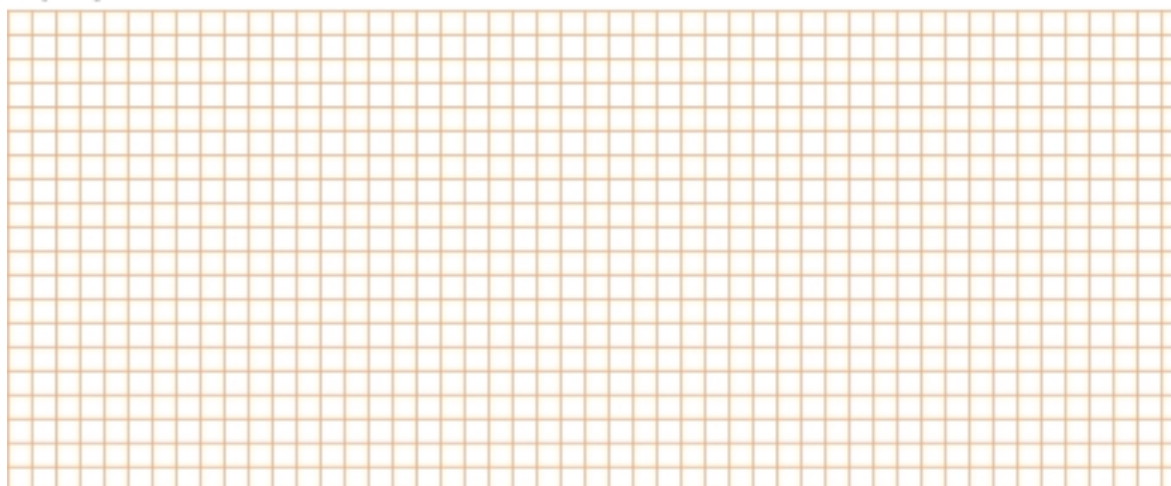
3. Αυξήστε το P κατά 20% από την προηγούμενη τιμή. Επαναλάβετε το ερώτημα 2.
4. Μειώστε το P (από τη βέλτιστη τιμή) κατά 20%. Επαναλάβετε το ερώτημα 2.
5. Από τις μεταβολές στο κέρδος του ελεγκτή, τι συμπεράσματα έχετε για την αποτελεσματικότητα του ελέγχου στο σφάλμα (με πολύ μικρό σφάλμα και μεγάλο κέρδος πρόσω βρόχου ο έλεγχος είναι επαρκής), όπου:  $v=P \cdot e$ , όπου  $e$  = σφάλμα.
6. Δώστε στο κέρδος P μία μικρή τιμή και υπολογίστε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Καταχωρίστε το στον ΠΙΝΑΚΑ Β.
7. Δώστε διαδοχικές τιμές στο P καταχωρίζοντας πάντα το σφάλμα στον ΠΙΝΑΚΑ Β. Συνεχίστε μέχρις ότου η απόκριση αρχίσει να παρουσιάζει αστάθεια (σημαντική ταλάντωση).

ΠΙΝΑΚΑΣ Β

P	ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΤΙΜΗ (SV/W) ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ		ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΤΙΜΗ (PV/X) ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ		ΣΦΑΛΜΑ (SV-PV)	
	Volt	σπρ/min	Volt	σπρ/min	Volt	σπρ/min

8. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Β σχεδιάστε τη γραφική παράσταση της μεταβολής του σφάλματος μόνιμης κατάστασης,  $e_{ss}$ , συναρτήσει του αναλογικού κέρδους P.

σφάλμα



κέρδος-P

9. Από το προηγούμενο διάγραμμα, πώς νομίζετε ότι επηρεάζει ο P έλεγχος το σφάλμα μόνιμης κατάστασης; Περίπου σε ποια τιμή του P το σφάλμα μόνιμης κατάστασης έχει τη μικρότερη τιμή του; Τι συμβαίνει με την υπερακόντιση;
10. Δώστε δύο δικές σας τιμές στο χρόνο καθυστέρησης και στη σταθερά χρόνου (πόσο μικρά επιθυμείτε να είναι) και επαναλάβετε τα ερωτήματα B.4 και B.5. Είναι τα αποτελέσματα τα αναμενόμενα;
11. Διακόψτε τη τροφοδοσία του συστήματος.
12. Δώστε στο κέρδος P μια μικρή τιμή. Παρενοχλήστε βηματικά τον κινητήρα με μια μικρή απότομη αύξηση στο ρυθμιστή στροφών του ελεγκτή (θετική βηματική μεταβολή).
13. Μετρήστε τη μέγιστη τιμή με την τελική τιμή της απόκρισης του κινητήρα (μέσω του αισθητήρα ταχύτητας). Η διαφορά των δύο τιμών (μέγιστη - τελική) δίνει την υπερακόντιση της απόκρισης του κινητήρα. Καταχωρίστε το αποτέλεσμα στον ΠΙΝΑΚΑ Γ.
14. Δώστε διαδοχικές τιμές στο P καταχωρίζοντας πάντα την υπερακόντιση στον ΠΙΝΑΚΑ Γ. Συνεχίστε μέχρις ότου η απόκριση αρχίσει να παρουσιάζει αστάθεια (σημαντική ταλάντωση).

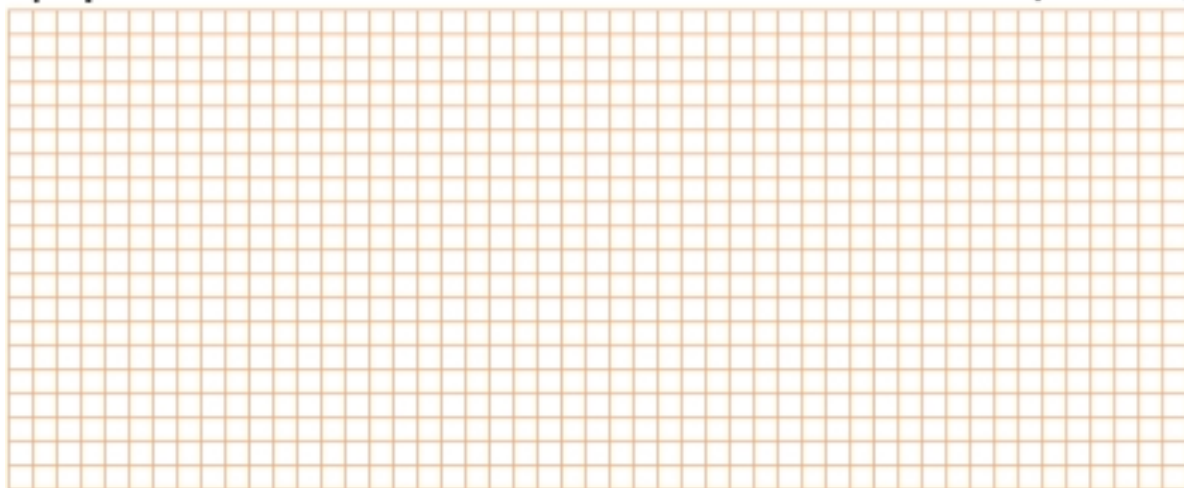
ΠΙΝΑΚΑΣ Γ

P	Μέγιστη τιμή		Τελική τιμή		Υπερακόντιση	
	Volt	σπρ/min	Volt	σπρ/min	Volt	σπρ/min

15. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Γ σχεδιάστε τη γραφική παράσταση της μεταβολής της υπερακόντισης συναρτήσει του P μαζί με αυτή της μεταβολής του σφάλματος.

σφάλμα

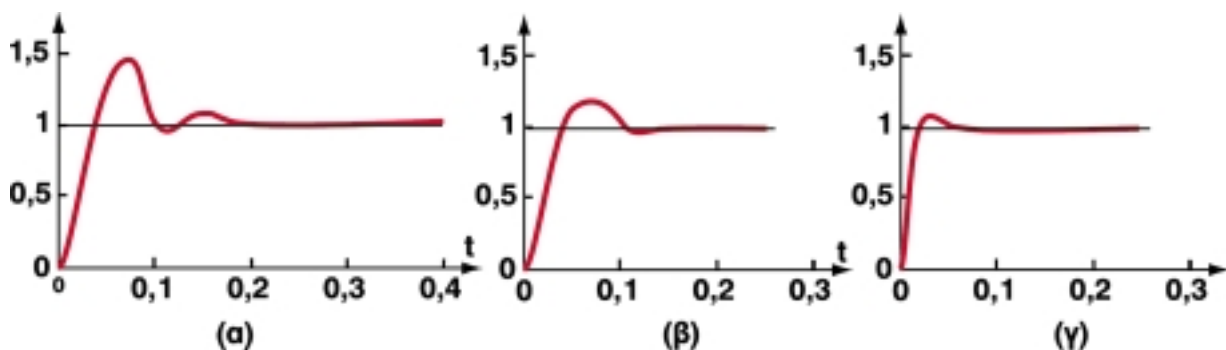
υπερακόντιση



κέρδος-P

16. Από το προηγούμενο γράφημα ποια πιστεύετε ότι είναι η καλύτερη τιμή του κέρδους P;
17. Επιταχύνετε τον dc κινητήρα μέχρι μία σταθερή στάθμη στροφών και αφού τη διατηρήσετε επί μικρό χρονικό διάστημα, επιβραδύνετε. Η μεταβολή της ταχύτητας γίνεται με την είσοδο επιθυμητής τιμής (SV/W) σε αυτόματη λειτουργία. Αν ο ελεγκτής δεν είναι τυποποιημένος, η μεταβολή της ταχύτητας γίνεται με τη βοήθεια κάποιου ποτενσιόμετρου. Ακολουθήστε συγκεκριμένο μέτωπο ταχυτήτων του σχήματος 20.13 (πλήρη γραμμή). Καταγράψτε την ταχύτητα του ταχύμετρου.
18. Καταγράψτε τα σήματα *ανάδρασης* ταχύτητας σε καταγραφικό.
19. Συγκρίνετε τις *ταχύτητες απόκρισης* και τις *υπερακοντίσεις* για όλες τις περιπτώσεις ανοικτού και κλειστού βρόχου με αναδράσεις ταχύτητας (κάντε όλες τις απαιτούμενες συνδέσεις και μετρήσεις, που σας είναι γνωστές από προηγούμενα ερωτήματα).
20. Συγκρίνετε το *σφάλμα μόνιμης κατάστασης* για όλες τις περιπτώσεις ανοικτού και κλειστού βρόχου.
21. Εκτελέστε *έλεγχο ταχύτητας* κινητήρα (θετική βηματική μεταβολή).
22. Εκτελέστε *ελεγχόμενη πέδηση* κινητήρα (αρνητική βηματική μεταβολή). Ερμηνεύστε τη *χαρακτηριστική πέδησης* του κινητήρα.

## Ζ. Ερωτήσεις



Σχήμα 20.14: Βηματικές αποκρίσεις κινητήρων με υπερακόντιση: (α), (β) μη αποδεκτές και (γ) αποδεκτή

1. Ποια είναι η βέλτιστη απόκριση από τις παρακάτω αποκρίσεις και γιατί; Ποια είναι τα μειονεκτήματα των λοιπών αποκρίσεων;
2. Σχεδιάστε έλεγχο κινητήρα με δυνατότητα αναστροφής της φοράς περιστροφής.
3. Γιατί το *σφάλμα έλεγχου* ενισχύεται κατά τον έλεγχο από τον P ελεγκτή;
4. Σχεδιάστε το κύκλωμα οδήγησης του dc κινητήρα.
5. Πόσους τρόπους πέδησης κινητήρων γνωρίζετε (τουλάχιστον 4);
6. Κατά την εκκίνηση ο dc κινητήρας συνδέεται με διέγερση σειράς και αμέσως αργότερα παράλληλα. Γιατί;
7. Πόσων ειδών *τεχνολογίες* στα ταχύμετρα γνωρίζετε; Πώς υλοποιείται ένας *αισθητήρας* θέσης & ταχύτητας & ροπής;

8. Ποια είναι η φυσική σημασία της υστέρησης στους αισθητήρες ταχύτητας;
  9. Πρέπει οι μηχανικοί ζεύκτες (σύνδεσμοι, coupler) να είναι *άκαμπτοι* ή ευέλικτοι;
  10. Σε περίπτωση κακής μηχανικής σύζευξης των αξόνων τι *προβλήματα* παρουσιάζονται;
  11. Πώς οι συνδεσμολογίες διέγερσης του dc κινητήρα επιτρέπουν συνδυασμούς για την καλύτερη συμπεριφορά σε στροφές, ροπή και κατανάλωση;
  12. Υπάρχει αντίστροφη  $\omega$  / ευθεία σχέση ροπής  $T$  / ταχύτητας περιστροφής του dc κινητήρα και αντίστροφη  $T$  / ευθεία σχέση ροπής  $T$  / ρεύματος dc κινητήρα, σχήμα 20.14.
  13. Η δράση του P ελεγκτή είναι ο απλούστερος έλεγχος και εφαρμόζει μια απλή αναλογική δράση, ένα κέρδος πάνω στο σφάλμα ελέγχου, αλλιώς είναι ανεπαρκής γιατί
- 
14. Ο P ελεγκτής δεν επαρκεί για τον ακριβή και ικανοποιητικό έλεγχο ενός dc κινητήρα γιατί
- 
15. Ο P ελεγκτής συνήθως παρουσιάζει σφάλμα σταθερής κατάστασης  $e_{ss}$  γιατί
- 
16. Η αύξηση του αναλογικού κέρδους (αντίστροφα η μείωση της αναλογικής ζώνης PB) του ελεγκτή αυξάνει  $\omega$  / μειώνει  $\omega$  την ταχύτητα περιστροφής του dc κινητήρα, σχήμα 20.6.
  17. Η αύξηση του αναλογικού κέρδους (αντίστροφα η μείωση της αναλογικής ζώνης PB) του ελεγκτή μειώνει το παραμένον σφάλμα σταθερής κατάστασης  $e_{ss}$ , σχήμα 20.6 (γ).

## Η. Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

## Θ. Παραρτήματα

### Παράρτημα Ι: Ανάδραση

Το κλασικό σύστημα με ανάδραση μελετάται για την περίπτωση ενισχυτή κέρδους  $P$  με αρνητική ανάδραση  $k$ , στο σχήμα 20.2 το κέρδος ανάδρασης  $k = 1$ , δηλ:

$$e(t) = \text{είσοδος} - k \cdot \text{έξοδος} = \text{σφάλμα ελέγχου}$$

$$\text{έξοδος} = P \cdot e(t) = P \cdot (\text{είσοδος} - k \cdot \text{έξοδος}) = P \cdot (SV - k \cdot PV)$$

$$G = \text{κέρδος κλειστού βρόχου} = \frac{\text{έξοδος}}{\text{είσοδος}} = \frac{P}{1 + P \cdot k} = \text{συνάρτηση μεταφοράς}$$

Το σφάλμα είναι ο κινητήριος μηχανισμός (διορθωτική δύναμη, ενεργός ισχύς) των ΣΑΕ, δηλ. αυτό επισημαίνει στο σύστημα την ανάγκη για διόρθωση, αλλιώς και ενισχυόμενο (το ηλεκτρικό σήμα που αντιπροσωπεύει το σφάλμα) οδηγεί και διορθώνει το σύστημα. Στα ΣΑΕ το κέρδος  $G$  είναι γνωστό και σαν συνάρτηση μεταφοράς. Για τον κλειστό βρόχο έχουμε να παρατηρήσουμε (πάντα σε σχέση με το ανοικτό σύστημα) ότι:

- α. έχει μεγαλύτερη στατική (μακροπρόθεσμη) ακρίβεια ελέγχου

- β. είναι λιγότερο ευαίσθητο σε μεταβολές των χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων του
- γ. διορθώνει αυτόματα το λάθος του συστήματος
- δ. οι ανοχές των εξαρτημάτων του μπορεί να είναι μικρότερες για ίδια απόδοση
- ε. μεταβολή της εξόδου προκαλούμενη από μεταβολή του κέρδους είναι μικρότερη στον κλειστό βρόχο
- στ. τυχόν μεταβολή στον κλάδο ανατροφοδότησης επιδρά ευθέως στην έξοδο του συστήματος (ενώ μεταβολή στο πρόσω βρόχο έχει μικρή επίδραση στην έξοδο)
- ζ. ιδιαιτέρως για τις χαμηλές συχνότητες (στατική ακρίβεια) ο κλάδος ανατροφοδότησης αποτελεί ευαίσθητο τμήμα του ΣΑΕ
- η. μειώνει το θόρυβο από το σύστημα προς την έξοδο του συστήματος
- θ. ενίσχυση στον πρόσω βρόχο, αυξάνει το λόγο σήματος / θόρυβο (SNR) και έτσι μειώνει το θόρυβο στην έξοδο του συστήματος
- ι. αρνητική ανάδραση, αλλιάζει την απόκριση συχνότητας του συστήματος, ελαττώνει το κέρδος και αυξάνει την ευστάθεια

Αντίθετα η θετική ανάδραση μπορεί να έχει καταστροφικές επιπτώσεις αστάθειας ή και έντονα ενισχυτικά αποτελέσματα.

## Παράρτημα II: Ο Ρ ελεγκτής

Ο ελεγκτής ταχύτητας, βλ. σχήμα 20.4 (α) συνεχώς συγκρίνει την επιθυμητή ταχύτητα με την πραγματική ταχύτητα του κινητήρα και παράγει διορθωτική δράση, όταν η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο ταχυτήτων είναι μετρήσιμη. Η πραγματική ταχύτητα καταγράφεται με κωδικοποιητή στροφών (ταχύμετρο). Ο συνήθης τύπος του PID και του Ρ ελεγκτή είναι:

$$MV(t) = P \cdot e(t) + k_i \int_0^t e(t) \cdot dt + D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

$$MV(t) = P \cdot e(t)$$

Για να ρυθμίσουμε έναν ελεγκτή τύπου PID (Proportional – Integral - Derivative), βλ. σχήμα 20.5 πρέπει να επιλέξουμε τις παραμέτρους:

PB = Proportional Band = Ζώνη Κέρδους =  $1 / P = 1 / k_p$

I =  $k_i$  Integral Action = Reset = Ολοκληρωτική Δράση

D = Derivative action = Rate = Διαφορική Δράση

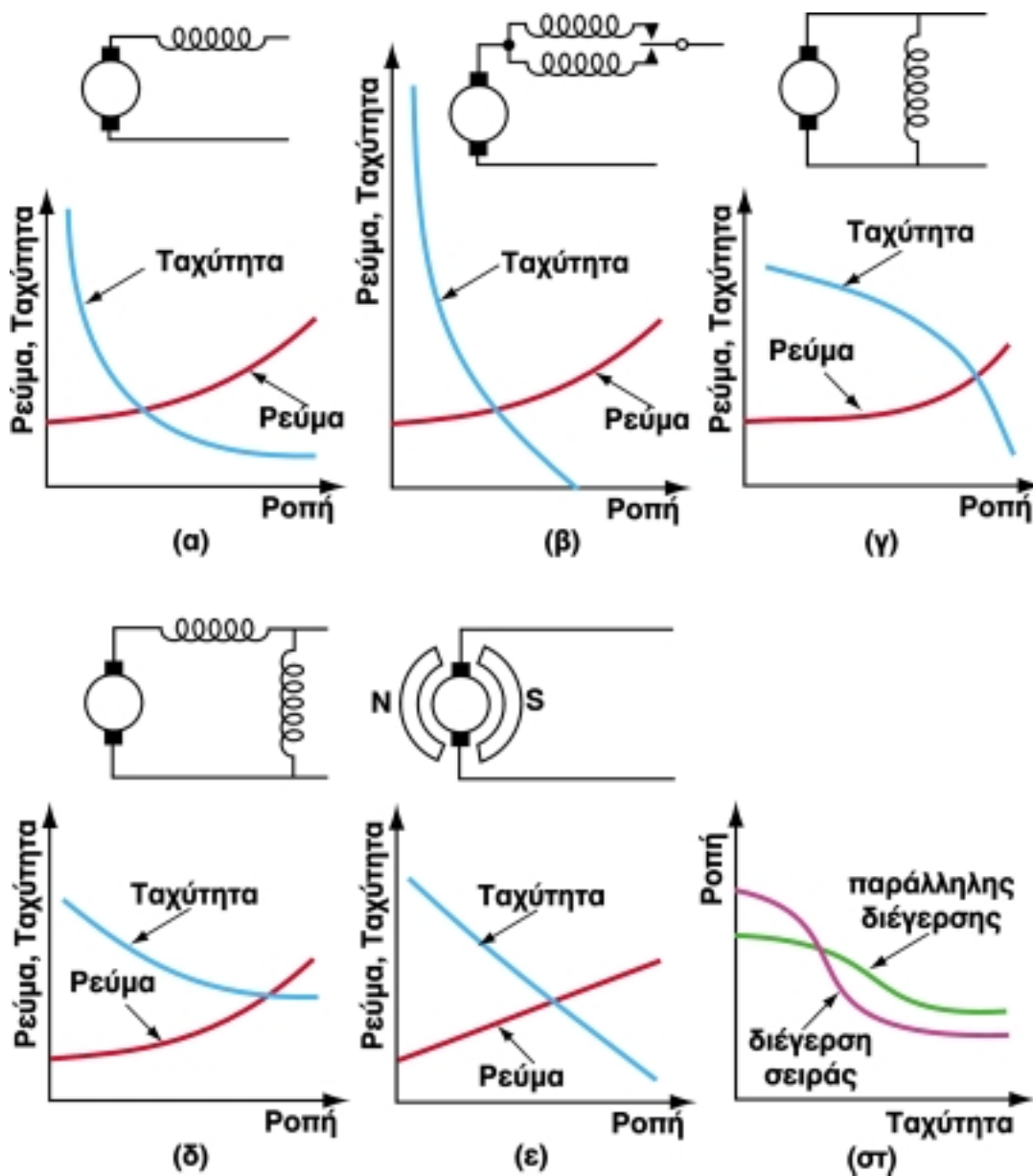
Από εμπειρικούς κανόνες υπολογίζουμε από παραμέτρους T και L, μετρούμενες στην καμπύλη της απόκρισης, βλ. σχήμα 20.8, ότι:

ΤΥΠΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗ	PB %	$k_i = I$ (sec)	D (sec)
PID	$100 / (1.2 * T/L)$	$2.0 * L$	$0.5 * L$

Η ολοκληρωτική και διαφορική δράση μπορούν να μηδενιστούν θέτοντας  $k_I = I = 0$  και  $D = 0$ . Έτσι σχηματίζουμε P, PD, PI και PID ελεγκτές. Έτσι ένας P ελεγκτής υλοποιείται και με PID ελεγκτή, αλλά με  $I=0$  και  $D=0$ .

### Παράρτημα III: Τύποι dc κινητήρων

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι τυπικές χαρακτηριστικές ρεύματος / ταχύτητας για σύγκριση, συναρτήσει των στροφών του κινητήρα για dc κινητήρα διέγερσης σειράς (α), dc κινητήρα διπλής (split) διέγερσης σειράς (β), dc κινητήρα παράλληλης διέγερσης (γ), dc κινητήρα μικτής διέγερσης (δ) και dc κινητήρα με σταθερό μαγνήτη (ε).

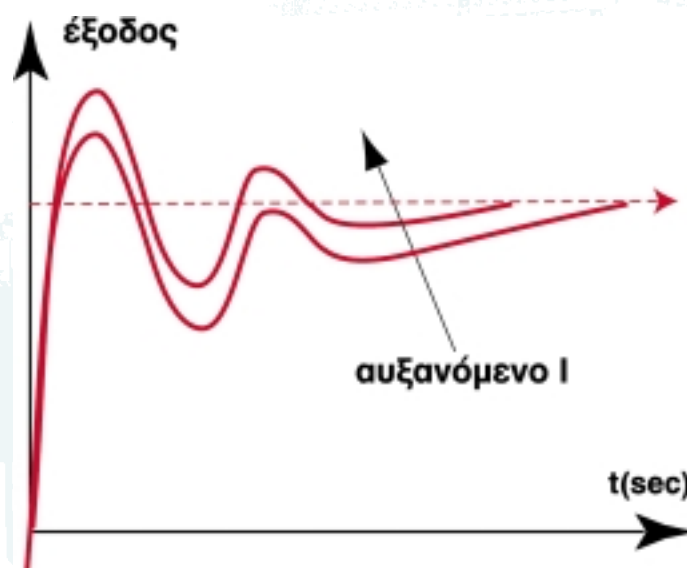


Σχήμα 20.15: Χαρακτηριστικές Ροπής - Ταχύτητας - Ρεύματος dc κινητήρα διέγερσης σειράς (α), dc κινητήρα (διπλής) split διέγερσης σειράς (β), παράλληλης διέγερσης (γ), μικτής διέγερσης (δ) και με σταθερό μαγνήτη (ε)

# άσκηση 21

Μελέτη

Ελεγκτή PI



## Στόχοι της άσκησης

**διάρκεια άσκησης: 12 διδακτικές ώρες**

Στο τέλος της άσκησης οι μαθητές θα είναι ικανοί:

- ⇒ να γνωρίζουν τη λειτουργία του κινητήρα συνεχούς ρεύματος:
  1. να υπολογίζουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του dc κινητήρα.
  2. να υπολογίζουν τη χρονική απόκριση του dc κινητήρα.
  3. να υπολογίζουν την απολαβή του dc κινητήρα.
  4. να υπολογίζουν την απολαβή και τη σταθερά χρόνου του συστήματος.
- ⇒ να ρυθμίζουν το σύστημα του PI ελεγκτή.
- ⇒ να χαράσσουν τη στατική χαρακτηριστική του αισθητήρα / μετατροπέα.
- ⇒ να συνδέουν τη διάταξη (επιθυμητή τιμή, ενισχυτής, ρυθμιζόμενο σύστημα).
- ⇒ να γνωρίζουν και μελετούν τον PI ελεγκτή:
  1. να εφαρμόζουν βηματικές αποκρίσεις στο σύστημα PI ελεγκτή - dc κινητήρα.
  2. να διακρίνουν και συγκρίνουν τις βηματικές αποκρίσεις του ελεγκτή στον παλμογράφο / καταγραφικό.
  3. να σχεδιάζουν τη στατική χαρακτηριστική του ελεγκτή.
- ⇒ να μελετούν τη συμπεριφορά του κλειστού συστήματος:
  1. να σχεδιάζουν τις βαθμίδες του κλειστού συστήματος.
  2. να σχεδιάζουν τις στατικές χαρακτηριστικές με διάφορα φορτία κινητήρα.
  3. να μετρούν την ελάχιστη τάση εκκίνησης του κινητήρα (νεκρή ζώνη).
  4. να σχολιάζουν την επίδραση της μεταβολής του ελεγκτή πάνω στις στροφές του κινητήρα.

## Απαραίτητα εξαρτήματα

Για την πραγματοποίηση της άσκησης είναι απαραίτητα τα εξής υλικά:

- ✓ Ένας DC κινητήρας ισχύος μικρότερης του 100 Watt
- ✓ Ένας PI ελεγκτής (υλοποιείται και με PID ελεγκτή, αλλά με  $D=0$ )
- ✓ Ένα στροφόμετρο (κωδικοποιητής στροφών) του κινητήρα, εξόδου 4 - 20 mA (ή 1 - 5 V)
- ✓ Ένα κύκλωμα οδήγησης κινητήρα, εισόδου 4 - 20 mA (ή 1 - 5 V) με οπτική απομόνωση
- ✓ Μία μηχανική σύζευξη άξονα - κωδικοποιητή στροφών (coupler)
- ✓ Καλωδιώσεις σύνδεσης ελεγκτή - στροφόμετρου - κινητήρα
- ✓ Ένα πολύμετρο (αμπερόμετρο, βοθτόμετρο, ωμόμετρο με ηχητικό σήμα (buzzer))



- ✓ Ένα καταγραφικό 1 - 5 V / 4 – 20 mA
- ✓ Ένας παλμογράφος διπλής δέσμης

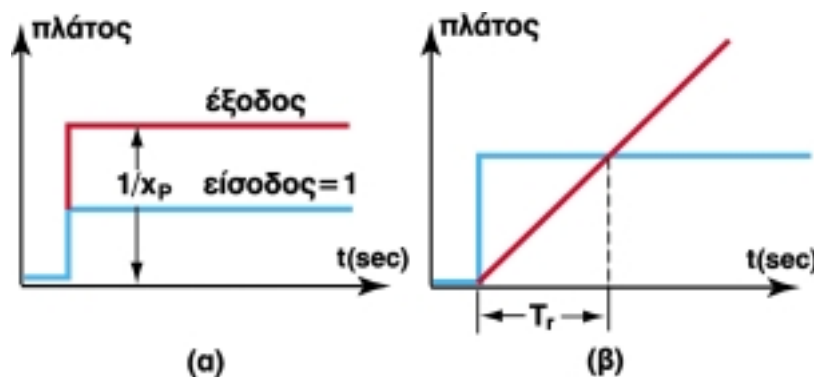
## Βασική θεωρία

Στην προηγούμενη άσκηση μελετήθηκε η δράση ενός P ελεγκτή. Είδαμε ότι ένας P ελεγκτής μπορεί να λύσει απλά προβλήματα, παρουσιάζει όμως και σημαντικά μειονεκτήματα. Ένα μειονέκτημά του είναι η εμφάνιση του φαινομένου της *αντιστάθμισης (offset)*, αφού συνήθως παρουσιάζει σφάλμα σταθερής (μόνιμης) κατάστασης  $e_{ss}$ . Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό πρέπει ο ελεγκτής να δημιουργεί μια δράση ελέγχου με μηδενική διακύμανση. Για το λόγο αυτό στην αναλογική δράση προστίθεται ένας όρος που είναι ανάλογος στην ολοκλήρωση του σφάλματος. Ο ολοκληρωτής εισάγει μια πρόσθετη δράση ελέγχου, που θα διαρκεί μέχρι να μηδενιστεί το σφάλμα. Το στοιχείο του ολοκληρωτή συχνά αναφέρεται και σαν *δράση επανατοποθέτησης (reset action)*. Η “ποσότητα” της δράσης εξαρτάται από μια σταθερά  $T_r$  που ονομάζεται *χρόνος επανατοποθέτησης (reset time)*. Έτσι η μεταβλητή ελέγχου που οφείλεται στο συνδυασμό αναλογικής και ολοκληρωτικής δράσης έχει τη μορφή:

$$MV(t) = P \cdot e(t) + k_i \cdot \text{άθροισμα σφαλμάτων σε μικρή χρονική περίοδο}$$

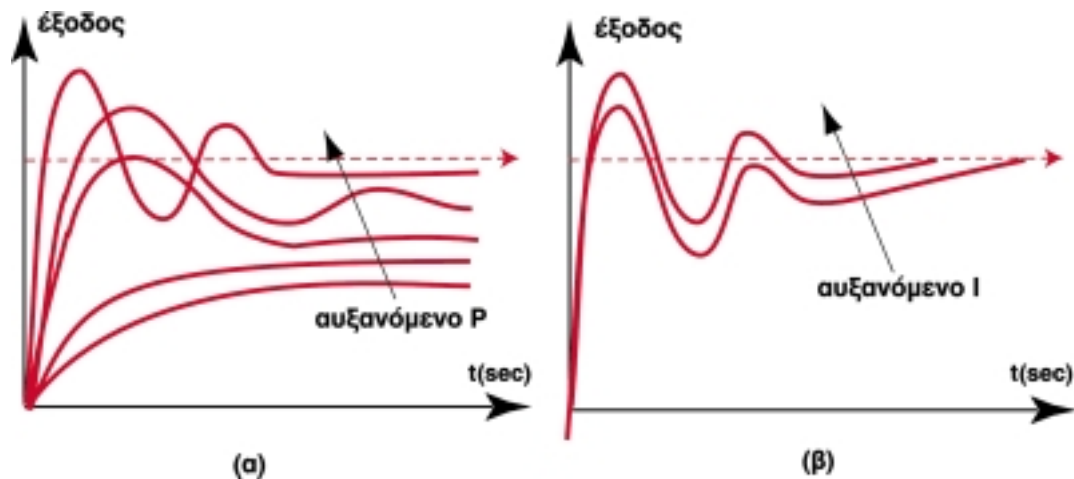
όπου  $e(t)$  είναι το σφάλμα ελέγχου [ $e(t) = SV - PV = \text{Set Value} - \text{Process Value}$ ] και  $k_i = \frac{1}{T_r}$ .

Στο σχήμα 21.1 φαίνεται η δράση του αναλογικού (P) και του ολοκληρωτικού (I) στοιχείου του ελεγκτή.



**Σχήμα 21.1: (α) P δράση και (β) I δράση εξόδου ενός PI ελεγκτή για είσοδο βηματική συνάρτηση - στην έξοδο του ελεγκτή (MV / Y)**

Όπως ήδη αναφέραμε, η ολοκληρωτική δράση I μειώνει (μηδενίζει) το σφάλμα σταθερής κατάστασης  $e_{ss}$ . Η ολοκλήρωση του ελεγκτή, I, αντιστοιχεί σε μνήμη των σφαλμάτων μέτρησης. Η αύξηση της ολοκληρωτικής δράσης I πέραν της βέλτιστης τιμής μηδενισμού του σφάλματος σταθερής κατάστασης  $e_{ss}$  (δηλ.  $I > I_{\text{βέλτιστο}}$ ) δημιουργεί προβλήματα υπερακόντισης (μέγιστης υπερύψωσης). Η I δράση ενός ελεγκτή, δίνεται στο σχήμα 21.2.



**Σχήμα 21.2: (α) Αναλογική δράση και (β) ολοκληρωτική δράση στην έξοδο ενός συστήματος ελεγχόμενου από ένα PI ελεγκτή για είσοδο βηματική συνάρτηση - στην έξοδο  $(PV / X)$  του συστήματος (κινητήρα, μέτρηση ταχύμετρου)**

Παρατηρήστε στο σχήμα 21.2 ότι αύξηση της αναλογικής δράσης (α) μειώνει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, αυξάνει όμως την ταλάντωση του συστήματος. Επίσης, στο ίδιο σχήμα, παρατηρήστε ότι αύξηση της ολοκληρωτικής δράσης (β) μειώνει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, αυξάνει όμως την υπερακόντιση του συστήματος.

Από τα ανωτέρω συνάγεται ότι:

1. η αναλογική P δράση επιταχύνει τη διεργασία (την έξοδό της) για να φτάσει γρήγορα και να ξεπεράσει την επιθυμητή τιμή.
2. η ολοκληρωτική I δράση επιταχύνει ή καθυστερεί την κλίση (ταχύτητα) προσέγγισης της επιθυμητής τιμής.

Για να ρυθμίσουμε (κάνουμε tuning, ρεγουλάρουμε, καλιμπράρουμε) έναν ελεγκτή (κατευθυντή, controller) τύπου PI (Proportional-Integral: Αναλογικό - Ολοκληρωτικό), πρέπει να επιλέξουμε τις παραμέτρους:

PB = Proportional Band = Ζώνη Κέρδους =  $1 / P = 1 / \kappa$

I = Integral Action = Reset = Ολοκληρωτική Δράση

(αν χρησιμοποιούμε PID ελεγκτή μηδενίζουμε τη διαφορική δράση)

Από εμπειρικούς κανόνες για ένα PI ελεγκτή επιλέγουμε τις τιμές της ζώνης κέρδους PB και της σταθεράς ολοκληρωτικής δράσης  $k_i$  σύμφωνα με τον ΠΙΝΑΚΑ 1.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1**

ΕΛΕΓΚΤΗΣ	PB %	$I = k_i$ sec	D
PI	$100 / [0.9 * T / L]$	$3.3 * L$	0

Όπου T και L είναι η σταθερά χρόνου και ο νεκρός χρόνος αντίστοιχα του συστήματος.

## Διαδικασία

Κατά την εκτέλεση της άσκησης ακολουθήστε τα εξής βήματα:

### 1<sup>ο</sup> τρίωρο

#### A. Μελέτη και έλεγχος της κατάστασης του κινητήρα συνεχούς τάσης<sup>1</sup>

1. Αναγνωρίστε τη θέση και ελέγξτε την κατάσταση του κυκλώματος και των επαφών.
2. Συνδέστε το ωμόμετρο στα άκρα του ρότορα. Τι ένδειξη έχετε; Ποια είναι η γνώμη σας για την κατάσταση του ρότορα;
3. Συνδέστε το ωμόμετρο στα άκρα του στάτη. Τι ένδειξη έχετε; Ποια είναι η γνώμη σας για την κατάσταση του στάτη;
4. Ελέγξτε πιθανές διαρροές του κυκλώματος του στάτη και του ρότορα με μεγгерόμετρο.
5. Συνδέστε μηχανικά τον αισθητήρα (κωδικοποιητή) ταχύτητας (στροφών) στον κινητήρα (συνήθως η σύνδεση γίνεται με έναν απλό σφιγκτήρα).
6. Συνδέστε το κύκλωμα οδήγησης στον κινητήρα (συμβουλευτείτε το τεχνικό φυλλάδιο του κυκλώματος).
7. Συνδέστε ένα αμπερόμετρο σε σειρά στην τροφοδοσία του κινητήρα.
8. Μετρήστε την ταχύτητα και έμμεσα την ροπή του dc κινητήρα (μετρώντας το ρεύμα κατανάλωσης του κινητήρα).
9. Μεταβάλλετε το ρεύμα τροφοδοσίας (άρα και το φορτίο) του κινητήρα και σημειώστε κάθε φορά την ένδειξη του αισθητήρα ταχύτητας. Συμπληρώστε τον ΠΙΝΑΚΑ Α. Η τελευταία στήλη του πίνακα συμπληρώνετε με τη βοήθεια του πίνακα μετατροπής (ηλεκτρικό σήμα σε ταχύτητα) του αισθητηρίου που δίνεται στο τεχνικό του φυλλάδιο.

ΠΙΝΑΚΑΣ Α

ΡΕΥΜΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ τροφοδοσίας dc κινητήρα [ A ]	ΕΝΔΕΙΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ [ Volts ή Hz ή mA ]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ [στροφές / min]

10. Από τον ΠΙΝΑΚΑ Α σχεδιάστε την απόκριση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα συναρτήσει του ρεύματος που τον διαρρέει.

<sup>1</sup> Βλ. προηγούμενη άσκηση 20

ταχύτητα



I (ρεύμα - A)

11. Διακόψτε την τροφοδοσία του κινητήρα.
12. Συνδέστε το καταγραφικό στην έξοδο του αισθητήρα ταχυτήτων.
13. Τροφοδοτήστε τον κινητήρα και περιμένετε μέχρι να σταθεροποιηθεί η λειτουργία του (σταθερή ταχύτητα περιστροφής).
14. Από την απόκριση του κινητήρα υπολογίστε το χρόνο καθυστέρησης, τη σταθερά χρόνου του κινητήρα και την υπερακόντιση.
15. Διακόψτε την τροφοδοσία του κινητήρα.

**Σημείωση:** Αν στο εργαστήριο δεν υπάρχει καταγραφικό μηχάνημα, τότε συμπληρώνουμε ένα πίνακα σαν τον παρακάτω:

ΧΡΟΝΟΣ [ sec ]	ΕΝΔΕΙΞΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ [ Volts ή Hz ή mA ]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ [ στροφές / min ]

Για να μετρήσουμε την ένδειξη του αισθητήρα ταχύτητας συνδέουμε παράλληλα στην έξοδό του ένα βοητό-μετρο. Η τρίτη στήλη του πίνακα συμπληρώνεται με τη βοήθεια τεχνικών φυλλαδίων.

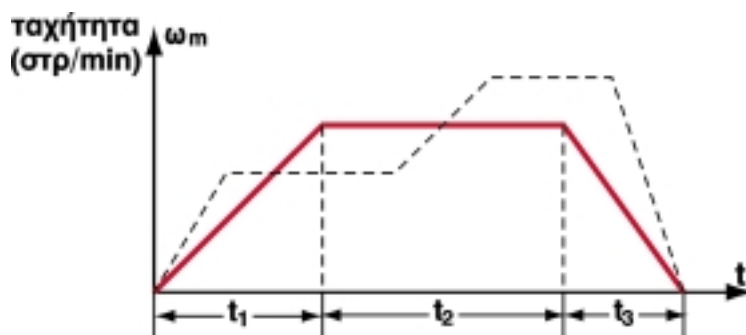
Από τον πίνακα αυτό τελικά σχεδιάζουμε την απόκριση της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου.

## B. Δημιουργία και έλεγχος του συστήματος ανοικτού βρόχου

1. Σχεδιάστε το δομικό διάγραμμα βαθμίδων (block diagram) ελέγχου ανοικτού του κινητήρα, χρησιμοποιώντας τις μονάδες του κινητήρα, του ελεγκτή, του αισθητήρα ταχύτητας και του κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα.
2. Συνδέστε το κύκλωμα οδήγησης του dc κινητήρα στην έξοδο (MV, Y) του ελεγκτή (controller).
3. Στην έξοδο (MV, Y) του ελεγκτή δώστε μία τιμή της επιλογής σας, π.χ. 50 % ή παρενοχλήστε βηματικά τον κινητήρα με μια μικρή απότομη αύξηση στο ρυθμιστικό στροφών του ελεγκτή (θετική βηματική μεταβολή).

ΧΡΟΝΟΣ από τη στιγμή της ΕΝΤΟΛΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ (βηματικής παρενόχλησης)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ [ Volts ή Hz ή mA ] [ στροφές / min ]
0 sec	
1 sec	
2 sec	
.....	
κτλ.	

4. Τροφοδοτήστε τον κινητήρα και περιμένετε μέχρι να σταθεροποιηθεί η λειτουργία του (σταθερή ταχύτητα περιστροφής).
5. Στο καταγραφικό παρατηρήστε την απόκριση του κινητήρα. Από το γράφημα αυτό υπολογίστε το χρόνο καθυστέρησης, τη σταθερά χρόνου και την υπερακόντιση του κινητήρα.
6. Με τον ελεγκτή στη θέση MANUAL ελέγξτε το MV. Με τον έλεγχο του MV και με μόνο κριτήριο την ανάγνωση -από τους μαθητές- των στροφών του στροφόμετρου, επιταχύνετε τον dc κινητήρα μέχρι μία σταθερή στάθμη στροφών και αφού τη διατηρήσετε επί μικρό χρονικό διάστημα, επιβραδύνετε. Η μεταβολή της ταχύτητας γίνεται με την έξοδο (MV/Y) του ελεγκτή σε χειροκίνητο (MANUAL). Αν ο ελεγκτής δεν είναι τυποποιημένος, η μεταβολή της ταχύτητας γίνεται με τη βοήθεια κάποιου ποτενσιόμετρου. Ακολουθήστε συγκεκριμένο μέτωπο ταχυτήτων του σχήματος 20.13 (πλήρη γραμμή). Καταγράψτε την ταχύτητα του ταχύμετρου.



Σχήμα 21.3: Μέτωπο (profile ελέγχου) οδήγησης ταχύτητας περιστροφής κινητήρα (επιτάχυνση - σταθερή ταχύτητα - επιβράδυνση)

7. Αξιολογήστε την επιτυχία ελέγχου σας στο χειροκίνητο (MANUAL).
8. Ξαναπροσπαθήστε το βήμα 6 στο χειροκίνητο (MANUAL) τρόπο λειτουργίας, που αντιστοιχεί σε έλεγχο ανοικτού βρόχου, με μεγαλύτερη προσπάθεια και εμπειρία του μαθητή, μέχρι τελικής επιτυχίας.
9. Πόσο δύσκολη σας φαίνεται αυτή η (χειροκίνητη) διαδικασία; Τι προτείνετε;
10. Διακόψτε την τροφοδοσία του συστήματος.

## 2ο τρίωρο

### Γ. Δημιουργία, σύνδεση και έλεγχος του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου

1. Συνδέστε τον αισθητήρα ταχύτητας στην είσοδο (PV, X) του ελεγκτή. Στη περίπτωση που ο αισθητήρας έχει έξοδο τάση, η σύνδεση αυτή είναι μια απλή δισύρματη σύνδεση. Αν η έξοδος είναι ρεύμα απαιτείται να μεσολαβήσει κύκλωμα μετατροπής ρεύματος σε τάση. Αν η έξοδος είναι παλμοσειρά, απαιτείται να μεσολαβήσει κύκλωμα μετατροπής συχνότητας σε τάση (f-to-V converter).
2. Τοποθετήστε τον ελεγκτή στη θέση AUTO και δώστε μια τιμή (ενδεικτικά 50 %) στην επιθυμητή τιμή (SV), δηλ. παρενοχλήστε βηματικά τον κινητήρα με μια μικρή απότομη αύξηση της επιθυμητής τιμής (θετική βηματική μεταβολή). Δώστε στο κέρδος P τιμή ίση με το 50 και στο συντελεστή ολοκληρωτικής δράσης I τιμή ίση με 50 s.
3. Τροφοδοτήστε τον κινητήρα και περιμένετε μέχρι να σταθεροποιηθεί η λειτουργία του (σταθερή ταχύτητα περιστροφής).
4. Στο καταγραφικό παρατηρήστε την απόκριση του κινητήρα. Από το γράφημα αυτό υπολογίστε το χρόνο καθυστέρησης, τη σταθερά χρόνου και την υπερακόντιση του κινητήρα.
5. Διακόψτε την τροφοδοσία του κινητήρα.
6. Δώστε στο κέρδος P τιμή ίση με το 100 διατηρώντας σταθερό το συντελεστή ολοκληρωτικής δράσης I. Επαναλάβετε τα ερωτήματα 2, 3, 4 και 5.
7. Δώστε στο κέρδος P τιμή ίση με το 150 διατηρώντας σταθερό το συντελεστή ολοκληρωτικής δράσης I. Επαναλάβετε τα ερωτήματα 2, 3, 4 και 5.
8. Συγκρίνετε τα τρία γραφήματα από τις προηγούμενες ερωτήσεις. Τι παρατηρείτε; Για ποια από τις τρεις τιμές P έχουμε καλύτερη απόκριση;
9. Ρυθμίστε το κέρδος P στην τιμή αυτή και αυξήστε το συντελεστή ολοκληρωτικής δράσης I στο 100 s. Επαναλάβετε τα ερωτήματα 2, 3, 4 και 5.
10. Αφήστε το κέρδος P στην τιμή αυτή και αυξήστε το συντελεστή ολοκληρωτικής δράσης I στο 150 s. Επαναλάβετε τα ερωτήματα 2, 3, 4 και 5.

11. Συγκρίνετε τα τρία τελευταία γραφήματα. Τι παρατηρείτε; Για ποια από τις τρεις τιμές του  $I$  έχουμε καλύτερη απόκριση;
12. Για τις τιμές των  $P$  και  $I$  για τις οποίες έχουμε την καλύτερη απόκριση σημειώστε το χρόνο καθυστέρησης και τη σταθερά χρόνου. Υπολογίστε τις δύο σταθερές του ελεγκτή,  $P$  και  $I$ , ώστε οι δύο χρόνοι να βελτιωθούν κατά 30% (συμβουλευτείτε τον ΠΙΝΑΚΑ 1 της θεωρίας).
13. Ρυθμίστε τον ελεγκτή στις νέες αυτές τιμές και επαναλάβετε τα ερωτήματα 2, 3, 4 και 5.
14. Συγκρίνετε την απόκριση του κινητήρα (μέσω του γραφήματος του καταγραφικού) με την απόκριση από το βέλτιστο γράφημα των προηγούμενων περιπτώσεων. Είναι όντως μικρότερες κατά 30% ο χρόνος καθυστέρησης και η σταθερά χρόνου;
15. Διακόψτε την τροφοδοσία του συστήματος.

## 3ο τρίωρο

### Δ1. Ρύθμιση PI ελεγκτή σε κλειστό βρόχο (Υπολογισμός βέλτιστου $P$ )

1. Τοποθετήστε τον ελεγκτή στο AUTO (αυτόματο).
2. Ρυθμίστε την έξοδο του ελεγκτή στο 50 % ή αφήστε τη στην τελευταία της θέση ηρεμίας.
3. Μεταβάλλετε την έξοδο του ελεγκτή. Μεταβολές της τάξης του 2-5% είναι επαρκείς. (Μεγέθυνση του display του καταγραφικού διευκολύνει τη μέτρηση των  $L$  και  $T$ ).
4. Αφού καταγράψετε τη βηματική παρενόχληση μετρήστε τους χρόνους:

$L = \text{Dead Time} = \text{χρόνος καθυστέρησης}$

$T = \text{Lag Time Constant} = \text{σταθερά απόκρισης}$

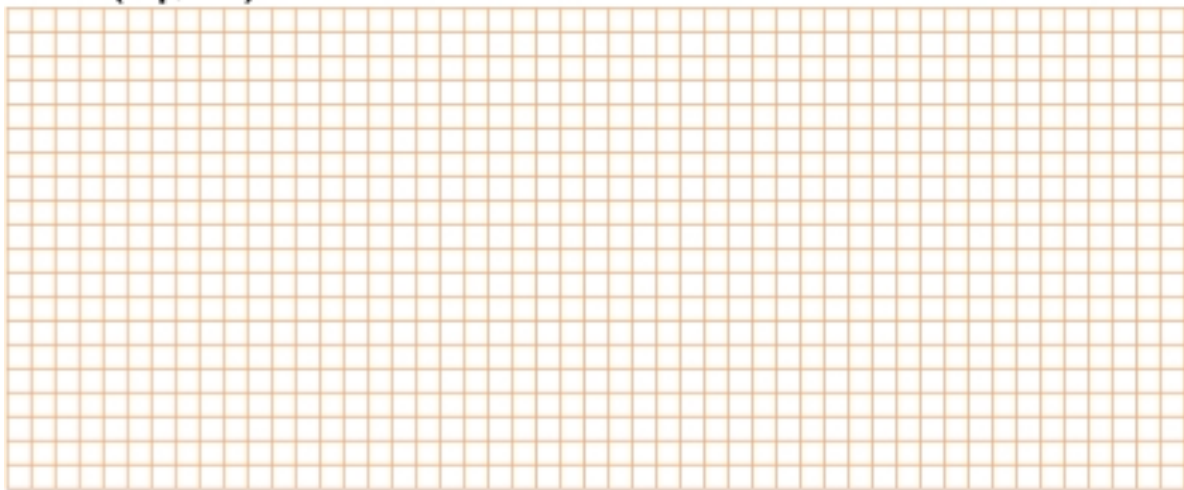
5. Αφού καταγράψετε τη βηματική παρενόχληση μετρήστε τους χρόνους: Ρυθμίστε τον ελεγκτή επιλέγοντας κέρδος και σταθερά ολοκλήρωσης σύμφωνα με τον ΠΙΝΑΚΑ 1 της θεωρίας. Αυτή η υπολογιστική διαδικασία ισχύει για διαταραχές άρα και όταν μεταβάλλουμε την επιθυμητή τιμή  $SV$  (Set Value).
6. Αυξήστε απότομα την επιθυμητή τιμή της εξόδου (βηματική διέγερση) και καταγράψτε την απόκριση του αισθητήρα ταχύτητας περιστροφής (με καταγραφικό).
7. Αντί για καταγραφικό στην έξοδο του αισθητήρα ταχύτητας συνδέστε παράλληλα ένα βοητόμετρο (αν η έξοδος του αισθητήρα είναι τάση).
8. Τροφοδοτήστε τη διάταξη.
9. Όταν σταθεροποιηθεί η κατάσταση δημιουργήστε ξανά βηματική διέγερση και καταγράψτε τις τιμές της τάσης ανά δευτερόλεπτο στον ΠΙΝΑΚΑ Β.

ΠΙΝΑΚΑΣ Β

ΧΡΟΝΟΣ [ sec ]	ΤΑΣΗ ΤΑΧΥΜΕΤΡΟΥ [ Volts ]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ [ στρ /min ]
1		
2		
...		
10		

10. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Β, σχεδιάστε την πειραματική απόκριση κινητήρα κλειστού βρόχου υπό PI έλεγχο σε βηματική διέγερση.

**ταχύτητα περιστροφής  
(στρ/min)**



**χρόνος (t)**

11. Διακόψτε την τροφοδοσία.
12. Ρυθμίστε το συντελεστή ολοκλήρωσης του ελεγκτή στην τιμή που υπολογίστε στο ερώτημα 5 και το  $P=50$ . Επιλέξτε μία επιθυμητή τιμή SV (Set Value).
13. Τροφοδοτήστε το σύστημα. Καταγράψτε στον ΠΙΝΑΚΑ Γ τη μέγιστη και την τελική τιμή του αισθητήρα ταχύτητας. Η διαφορά (επιθυμητή τιμή - τελική τιμή) δίνει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, ενώ η διαφορά (μέγιστη τιμή - τελική τιμή) δίνει την υπερακόντιση του συστήματος.

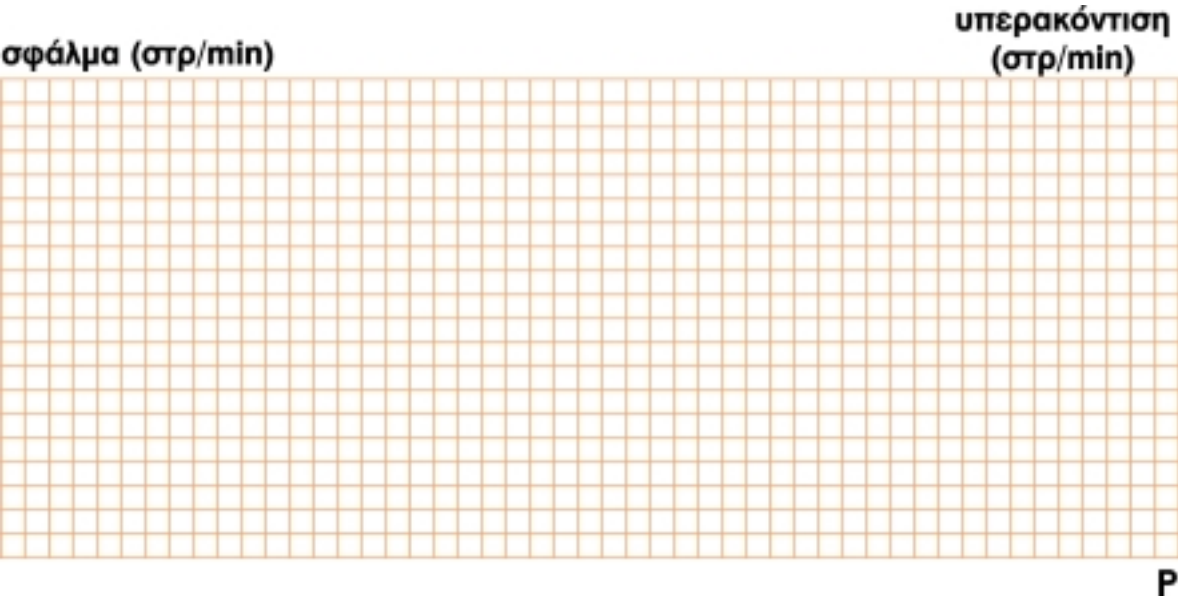




ΠΙΝΑΚΑΣ Γ

ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ		ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ		ΣΦΑΛΜΑ (SV – PV)	ΥΠΕΡΑΚΟΝΤΙΣΗ	P
σε Volts	σε στρ/min	σε Volts	σε στρ/min	σε στρ/min	σε στρ/min	

- 14. Διακόψτε την τροφοδοσία.
- 15. Αυξήστε το κέρδος P, τροφοδοτήστε το σύστημα και καταγράψτε στον ΠΙΝΑΚΑ Γ τις τιμές του P, της μέγιστης ταχύτητας και της τελικής ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Στη συνέχεια υπολογίστε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης και την υπερακόντιση του συστήματος.
- 16. Επαναλάβετε το ερώτημα 12 για μερικές τιμές του κέρδους P.
- 17. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Γ σχεδιάστε το γράφημα του σφάλματος και της υπερακόντισης συναρτήσει του κέρδους P.



- 18. Από το προηγούμενο διάγραμμα, πώς νομίζετε ότι επηρεάζει η μεταβολή του κέρδους του PI ελεγκτή, την απόκριση του συστήματος;

## 4<sup>ο</sup> τρίωρο

### Δ2. Ρύθμιση PI ελεγκτή σε κλειστό βρόχο (Υπολογισμός βέλτιστου I και PI)

1. Ρυθμίστε το αναλογικό κέρδος P του ελεγκτή στην τιμή που υπολογίσατε στο ερώτημα Δ1.13 και το συντελεστή ολοκλήρωσης  $I = 50 \text{ sec}$ . Επιλέξτε μία επιθυμητή τιμή SV [Set Value].
2. Τροφοδοτήστε το σύστημα. Καταγράψτε στον ΠΙΝΑΚΑ Δ τη μέγιστη και την τελική τιμή του αισθητήρα ταχύτητας. Η διαφορά (επιθυμητή τιμή - τελική τιμή) δίνει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, ενώ η διαφορά (μέγιστη τιμή - τελική τιμή) δίνει την υπερακόντιση του συστήματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ Δ

ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ		ΤΕΛΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ		ΣΦΑΛΜΑ (SV – PV)	ΥΠΕΡΑΚΟΝΤΙΣΗ	$I = k_I$
σε Volts	σε στρ/min	σε Volts	σε στρ/min	σε στρ/min	σε στρ/min	sec

3. Διακόψτε την τροφοδοσία.
4. Αυξήστε το συντελεστή ολοκλήρωσης, τροφοδοτήστε το σύστημα και καταγράψτε στον ΠΙΝΑΚΑ Δ τις τιμές του I, της μέγιστης ταχύτητας και της τελικής ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Στη συνέχεια υπολογίστε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης και την υπερακόντιση του συστήματος.
5. Επαναλάβετε το ερώτημα 1 για μερικές τιμές του κέρδους P.
6. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Δ σχεδιάστε το γράφημα του σφάλματος και της υπερακόντισης συναρτήσει του συντελεστή ολοκλήρωσης  $I = k_I$ .

σφάλμα (στρ/min)

υπερακόντιση  
(στρ/min)



$I = k_I$

7. Από το προηγούμενο διάγραμμα, πως νομίζετε πως επηρεάζει η μεταβολή του συντελεστή ολοκλήρωσης  $I$  του  $PI$  ελεγκτή, την απόκριση του συστήματος;
8. Επιταχύνετε τον  $dc$  κινητήρα μέχρι μία σταθερή στάθμη στροφών και αφού την διατηρήσετε επί μικρό χρονικό διάστημα, στη συνέχεια τον επιβραδύνετε. Ακολουθήσατε το μέτωπο ταχυτήτων του σχήματος 21.3 (πλήρης γραμμή) ή εναλλακτικά κάποια άλλη εντολή. Καταγράψετε την ταχύτητα του ταχύμετρου και την απόκριση του  $dc$  κινητήρα.
9. Καταγράψτε τα σήματα *ανάδρασης* ταχύτητας σε καταγραφικό.
10. Συγκρίνετε τις *ταχύτητες απόκρισης* για όλες τις περιπτώσεις ανοικτού και κλειστού βρόχου με αναδράσεις ταχύτητας.
11. Συγκρίνετε τις *υπερακοντίσεις* για όλες τις περιπτώσεις ανοικτού και κλειστού βρόχου με αναδράσεις ταχύτητας.
12. Συγκρίνετε το *σφάλμα μόνιμης κατάστασης* για όλες τις περιπτώσεις ανοικτού και κλειστού βρόχου.

## Ε. Ερωτήσεις

1. Πώς επιτυγχάνεται συνεχής έξοδος, όταν ο χρόνος ολοκλήρωσης είναι μεγάλος;
2. Πώς επιλέγεται ο χρόνος ολοκλήρωσης;
3. Τι σημαίνει ο χρόνος ολοκλήρωσης για τη μέτρηση του σφάλματος;
4. Τι σημαίνει ο χρόνος ολοκλήρωσης για τις μετρήσεις γενικά;
5. Τι επιθυμητό επιτυγχάνει η ολοκλήρωση στον τυχαίο θόρυβο της μέτρησης;
6. Τι ανεπιθύμητο επιτυγχάνει η ολοκλήρωση στις λεπτομέρειες (μεταβολές) μιας μέτρησης;
7. Διπλάσιασμός του αναλογικού κέρδους υποδιπλασιάζει την αναλογική ζώνη;
8. Διπλάσιασμός της ολοκληρωτικής δράσης υποδιπλασιάζει το χρόνο προσέγγισης της τελικής τιμής;
9. Επηρεάζεται η ελάχιστη τάση εκκίνησης του κινητήρα (νεκρή ζώνη) από τον  $PI$  ελεγκτή;
10. Ποια η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων ρύθμισης του  $PI$  ελεγκτή πάνω στις στροφές του κινητήρα;
11. Πότε δρα η αναλογική δράση (αρχή / μέσον / τέλος διαταραχής);
12. Πότε δρα η ολοκληρωτική δράση (αρχή / μέσον / τέλος διαταραχής);
13. Η ολοκληρωτική δράση  $I$  μειώνει  $\square$  / αυξάνει  $\square$  το σφάλμα σταθερής κατάστασης  $e_{ss}$ .
14. Η ολοκλήρωση του  $PID$  ελεγκτή,  $I$ , αντιστοιχεί σε μνήμη  $\square$  / ταχύτητα  $\square$  των σφαλμάτων μέτρησης.
15. Η αύξηση της ολοκληρωτικής δράσης  $I$  πέραν της βέλτιστης τιμής μηδενισμού του σφάλματος σταθερής κατάστασης  $e_{ss}$  (δηλ.  $I > I_{\text{βέλτιστο}}$ ) αυξάνει  $\square$  / μειώνει  $\square$  την υπερακόντιση της απόκρισης στην ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.

## ΣΤ. Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

### Ζ. Παραρτήματα

#### Παράρτημα Ι: Ο PID ελεγκτής

Ο ελεγκτής ταχύτητας συνεχώς συγκρίνει την επιθυμητή ταχύτητα με την πραγματική ταχύτητα του κινητήρα και παράγει διορθωτική δράση όταν η διαφορά μεταξύ αυτών των δυο ταχυτήτων είναι μετρήσιμη. Η πραγματική ταχύτητα καταγράφεται με κωδικοποιητή στροφών (ταχύμετρο). Ο συνήθης τύπος του PID και του PI ελεγκτή είναι:

$$MV(t) = P \cdot e(t) + k_I \int_0^t e(t) \cdot dt + D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

$$MV(t) = P \cdot e(t) + k_I \int_0^t e(t) \cdot dt$$

Για να ρυθμίσουμε έναν ελεγκτή τύπου PID (Proportional – Integral - Derivative), βλ. σχήμα 20.5 πρέπει να επιλέξουμε τις παραμέτρους:

PB = Proportional Band = Ζώνη Κέρδους =  $1 / P = 1 / k_I$

I = Integral Action = Reset = Ολοκληρωτική Δράση

D = Derivative action = Rate = Διαφορική Δράση

Από εμπειρικούς κανόνες υπολογίζουμε από παραμέτρους T και L, μετρούμενες στην καμπύλη της απόκρισης, ότι:

ΤΥΠΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗ	PB %	$k_I = I$ (sec)	D (sec)
PID	$100 / (1.2 * T / L)$	$2.0 * L$	$0.5 * L$

Γενικά η εύρεση των βέλτιστων P, I και D παραμέτρων είναι μια αέναη διαδικασία (trial and error method) διαδοχικών προσεγγίσεων και βελτιώσεων.

Η ολοκληρωτική και διαφορική δράση μπορούν να μηδενιστούν θέτοντας  $k_I = I = 0$  και  $D = 0$ . Έτσι σχηματίζουμε P, PD, PI και PID ελεγκτές. Ένας PI ελεγκτής (υλοποιείται και με PID ελεγκτή, αλλά με  $D=0$ ).

## άσκηση 22

# Έλεγχος Στάθμης Υγρού με Ελεγκτή PI



## Στόχοι της άσκησης

**διάρκεια άσκησης: 12 διδακτικές ώρες**

Στο τέλος της άσκησης οι μαθητές θα είναι ικανοί:

- ⇒ να ρυθμίζουν την ισχύ της αντλίας.
- ⇒ να μετρούν το χρόνο (ανάλογο του χρόνου απόκρισης) για το γέμισμα της δεξαμενής.
- ⇒ να υπολογίζουν την παροχή της αντλίας.
- ⇒ να σχεδιάζουν τη στατική χαρακτηριστική της αντλίας.
- ⇒ να υπολογίζουν την απολαβή (κέρδος) της αντλίας.
- ⇒ να σχεδιάζουν τη στατική χαρακτηριστική του μετατροπέα.
- ⇒ να εξηγούν τη μεταβολή ύψους, υπό την επίδραση της διαταραχής.
- ⇒ να υπολογίζουν τις τιμές των  $P$  και  $I$  αντίστοιχα.

## Απαραίτητα εξαρτήματα

Για την πραγματοποίηση της άσκησης είναι απαραίτητα τα εξής υλικά:

- ✓ Μία δεξαμενή κυλινδρική ή ορθογώνια μικρής διατομής (ενδεικτικά 20 cmX20 cmX1m)
- ✓ Μία αντλία 1/4 HP
- ✓ Μία ηλεκτρική ή πνευματική βάνα ελέγχου ροής (βοηθά και στην υλοποίηση της διαταραχής) ή
- ✓ Ένας ρυθμιστής (ελεγκτής) αντλίας
- ✓ Σωληνώσεις, βάνες απομόνωσης
- ✓ Ένας μετατροπέας (αισθητήρας) στάθμης δεξαμενής εξόδου 4-20 mA ή 1-5 V
- ✓ Ένα καταγραφικό βιομηχανικού ή εργαστηριακού τύπου για καταγραφή αποκρίσεων
- ✓ Ένας παλμογράφος δικάναλος (με μνήμη) για παρακολούθηση αποκρίσεων
- ✓ Ένα πολύμετρο με βομβητή (buzzer) για έλεγχο συνέχειας καλωδίων



# Βασική θεωρία

Προβλήματα ελέγχου στάθμης δεξαμενών παρουσιάζονται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές:

1. Διαλισθήρια νερού και καυσίμων.
2. Μονάδα επεξεργασίας λιμμάτων.
3. Διασυνδεδεμένες δεξαμενές.
4. Υδροηλεκτρικά φράγματα κτλ.

Ο έλεγχος στάθμης δεξαμενής είναι από τα πιο κλασικά παραδείγματα, που για βέλτιστο έλεγχο απαιτούν χρησιμοποίηση PID ελεγκτών. Στην άσκηση που ακολουθεί ο έλεγχος της στάθμης θα γίνει με έναν PI ελεγκτή.

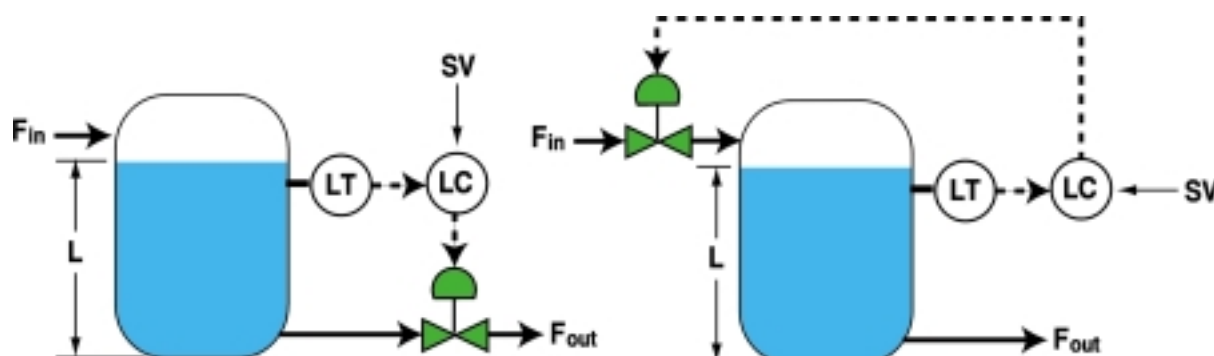
## A. Βασική θεωρία PI ελέγχου στάθμης

Στις δύο προηγούμενες εργαστηριακές ασκήσεις γνωρίσαμε το ρόλο του P και PI ελεγκτή στη μείωση του σφάλματος και στη μείωση του στατικού (μόνιμου) σφάλματος  $e_{ss}$ . Εδώ εφαρμόζουμε τον PI έλεγχο στη μέτρηση και έλεγχο στάθμης μιας δεξαμενής. Η δεξαμενή θεωρείται και είναι (μαζί με τον ηλεκτρικό πυκνωτή) το βασικότερο στοιχείο ολοκλήρωσης στη φύση υπό την έννοια ότι στοιχειώδεις, στιγμιαίες ποσότητες ρευστού (εδώ νερού) αθροίζονται συσσωρευτικά στη δεξαμενή. Η ολοκληρωτική δράση στη δεξαμενή είναι δηλαδή ενδογενής, ωστόσο ένας PI ελεγκτής προσθέτει νέα, πρόσθετη ολοκληρωτική δράση με στόχο να μειώσει το στατικό σφάλμα στάθμης της δεξαμενής, δηλαδή το σφάλμα:

$$\text{Σφάλμα} = \text{επιθυμητή στάθμη} - \text{πραγματική στάθμη}$$

Ανάλογα αν το σφάλμα είναι θετικό ή αρνητικό, δηλ. η στάθμη μιας δεξαμενής είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη της επιθυμητής, ο ελεγκτής θα δράσει ευθέως ή ανάστροφα σε βάνα εισροής ή βάνα εκροής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 22.1.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ	ΕΥΘΕΙΑ ΔΡΑΣΗ	ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΔΡΑΣΗ
Έλεγχος Στάθμης	Για μείωση στάθμης μείωση εισροής	Για μείωση στάθμης αύξηση εκροής



Σχήμα 22.1: Ευθύς / Ανάστροφος έλεγχος

Ο συνήθης τύπος του PI ελεγκτή είναι:

$$MV(t) = P \cdot \text{σφάλμα} + k_i \cdot \text{άθροισμα σφαλμάτων σε κάποιο χρονικό διάστημα}$$

Θυμίζουμε ότι για να ρυθμίσουμε έναν ελεγκτή τύπου PI (Proportional – Integral) πρέπει να επιλέξουμε τις παραμέτρους:

$PB = 1 / P = \text{Proportional Band} = \text{Ζώνη Κέρδους}$

$k_i = I = \text{Integral Action} = \text{Reset} = \text{Ολοκληρωτική Δράση}$

Στη πράξη όμως ο ελεγκτής ρυθμίζεται, από εμπειρικούς κανόνες που φαίνονται στον ΠΙΝΑΚΑ 1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

ΤΥΠΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗ	PB %	I (sec)	D (sec)
PI	$100 / (1.2 * T / L)$	$2.0 * L$	0
PID	$100 / (1.2 * T / L)$	$2.0 * L$	$0.5 * L$

Όπου L και T ο νεκρός χρόνος και η σταθερά χρόνου αντίστοιχα, που γνωρίσαμε σε προηγούμενες ασκήσεις.

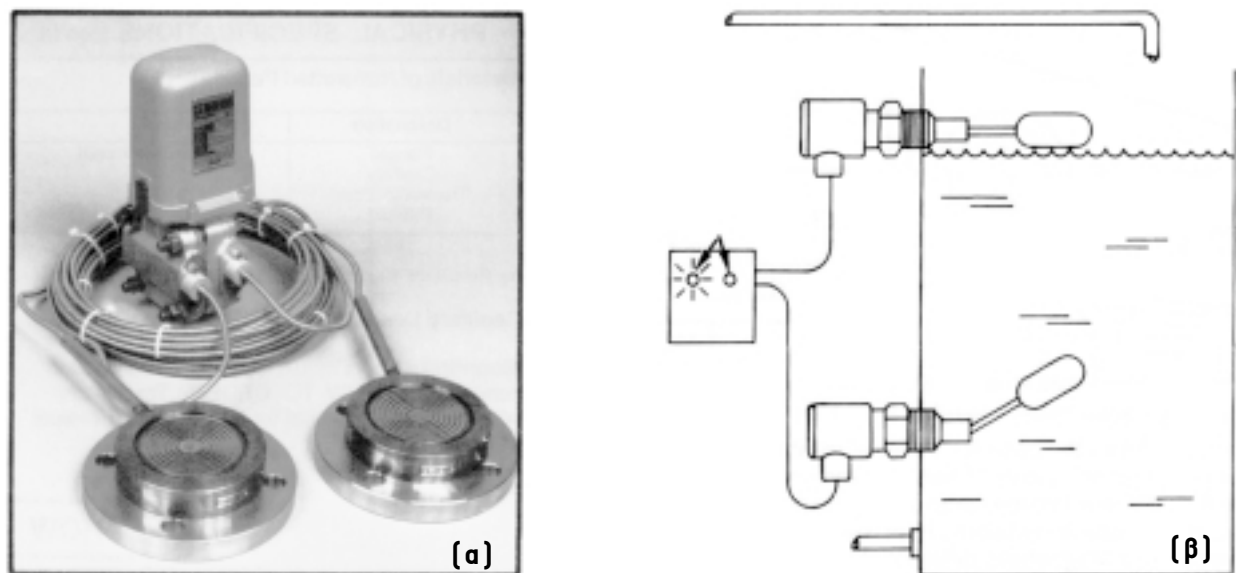
Άλλοι παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία ελέγχου της στάθμης είναι:

- η ευαισθησία του ελεγκτή και της μέτρησης
- η απόκριση χρόνου ελεγκτών, αισθητήριου και άλλων στοιχείων
- η διεργασία και οι αθροιστικές χρονικές καθυστερήσεις του βρόχου

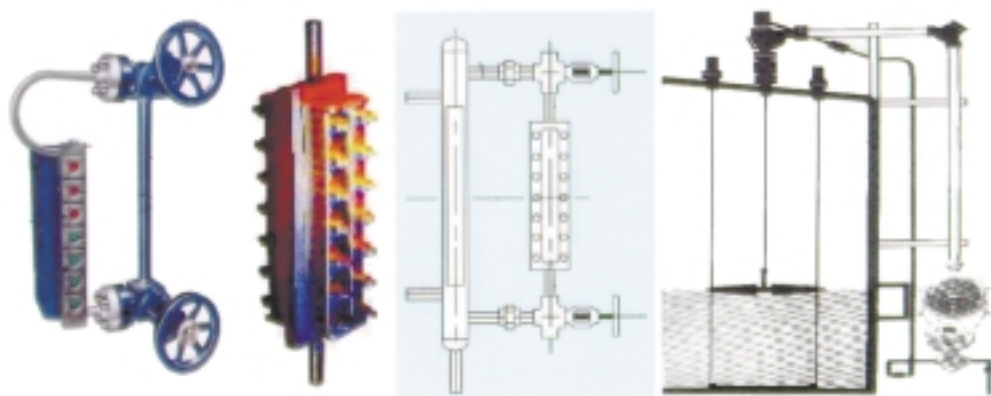
## B. Μετρητές στάθμης - σταθμίμετρα

Υπάρχουν διάφορα είδη σταθμιμέτρων, όπως απόλυτης στάθμης και διαφορικής στάθμης, σταθμίμετρα χωρητικότητας, σταθμίμετρα υάλου και σταθμίμετρα με πλωτήρα (φλοτέρ), διακόπτες στάθμης κτλ. Σχήματα 22.2 και 22.3.

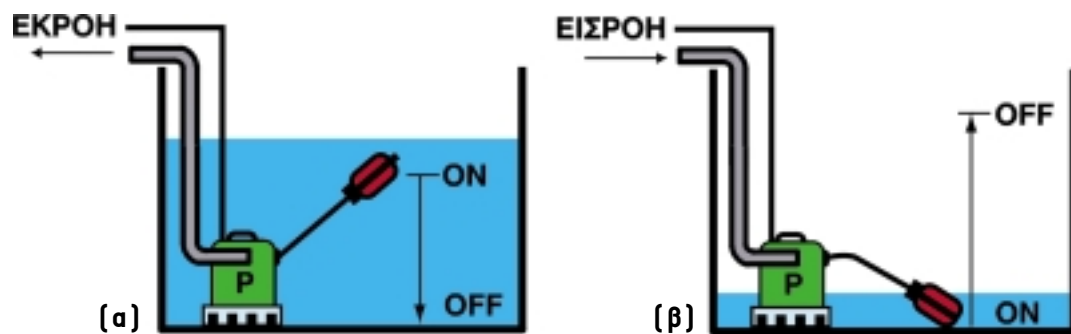




Σχήμα 22.2: α) Απόλυτα και β) διαφορικά σταθμίμετρο τύπου χωρητικότητας και διακότητας στάθμης με πλωτήρα (φλωτέρ)



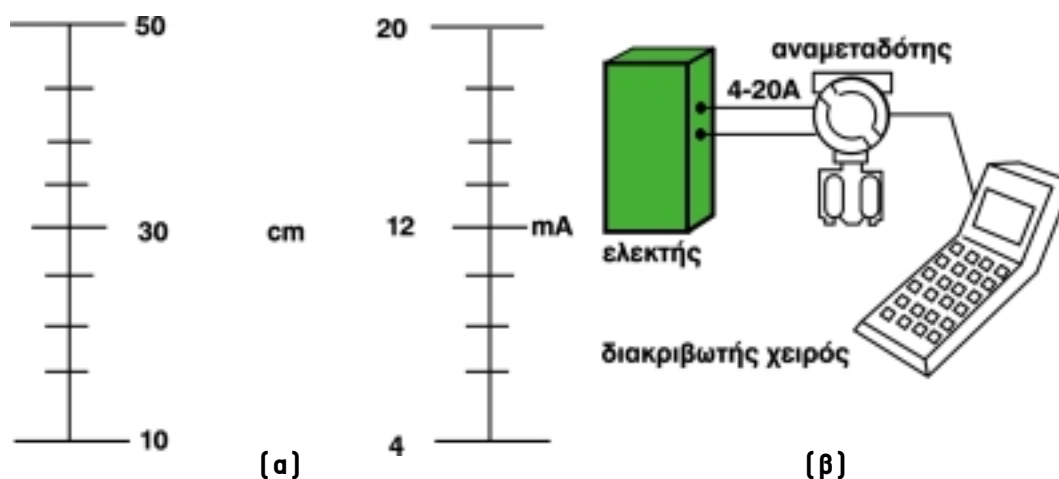
Σχήμα 22.3: Σταθμίμετρο υάλου (α, β, γ) και αναλογικό σταθμίμετρο πλωτήρα (φλωτέρ)



Σχήμα 22.4: Παρουσίαση διακοπών κανονικά (απενεργοποιημένα) α) ανοικτών / β) κλειστών (Normal Open-NO) / Normal Close-NC) και ευθεία / ανάστροφη δράση διακοπών ελέγχου στάθμης για εμβρατιζόμενες και εξωτερικές αντλίες

Στο σχήμα 22.4 δίνονται δύο υδραυλικά κυκλώματα με αντλία. Στο πρώτο η υποβρύχια αντλία αδειάζει τη δεξαμενή και, όταν πέσει η στάθμη η αντλία γίνεται off, ενώ στο δεύτερο η αντλία γεμίζει τη δεξαμενή και, όταν ανέβει η στάθμη και η δεξαμενή κινδυνεύει να υπερχειλίσει, η αντλία γίνεται off. Πρόκειται για δύο κοινές δράσεις με αντίθετο αποτέλεσμα. Γι' αυτό το λόγο η διάταξη αντλίας - φλοτεροδιακόπτη στο σχ. 22.4 (α) ονομάζεται κανονικά ανοικτή (normal open-NO) ενώ στο σχ. 22.4 (β) κανονικά κλειστή (normal close-NC).

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την καλή λειτουργία του συστήματος ελέγχου, είναι η *διακρίβωση* του μετατροπέα στάθμης. Με τον όρο *διακρίβωση* ενός οργάνου ή αισθητηρίου, ορίζουμε τη σωστή αντιστοίχιση του φυσικού μεγέθους που αυτό παρακολουθεί, σε ηλεκτρικό σήμα. Στο σχήμα 22.5 βλέπουμε τη διαδικασία διακρίβωσης ενός μετατροπέα στάθμης.



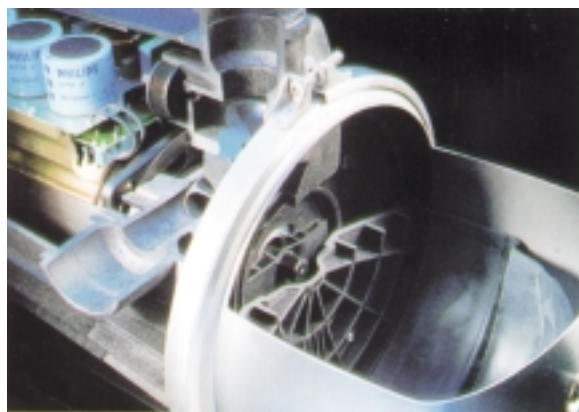
**Σχήμα 22.5:** α) Ρυθμιζόμενη περιοχή (αντιστοίχιση περιοχής μετρούμενης μεταβλητής και ρυθμιζόμενης σήματος) ηλεκτρονικού αναμεταδότη στάθμης 10 - 50 cm / 4- 20 mA και β) η διαδικασία διακρίβωσης



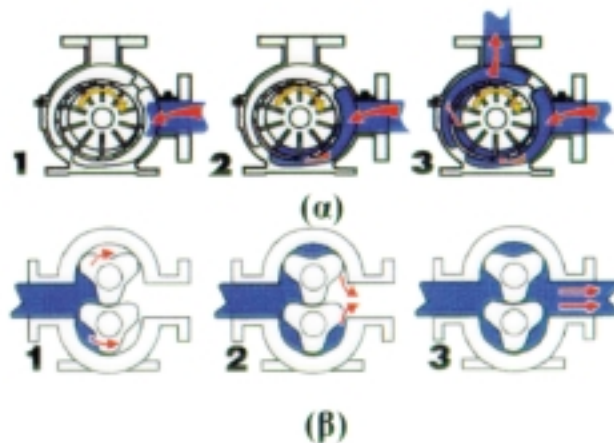
**Σχήμα 22.6:** Όργανο διακρίβωσης

## Γ. Αντλίες

Οι αντλίες αντλούν, αναρροφούν, συμπιέζουν και δημιουργούν ροή ρευστών, σχήματα 22.7 και 22.8. Ο έλεγχος στην περίπτωση μικρών αντλιών μπορεί να είναι εύκολος, όπως και με έναν dc κινητήρα, βλ. άσκηση 20.

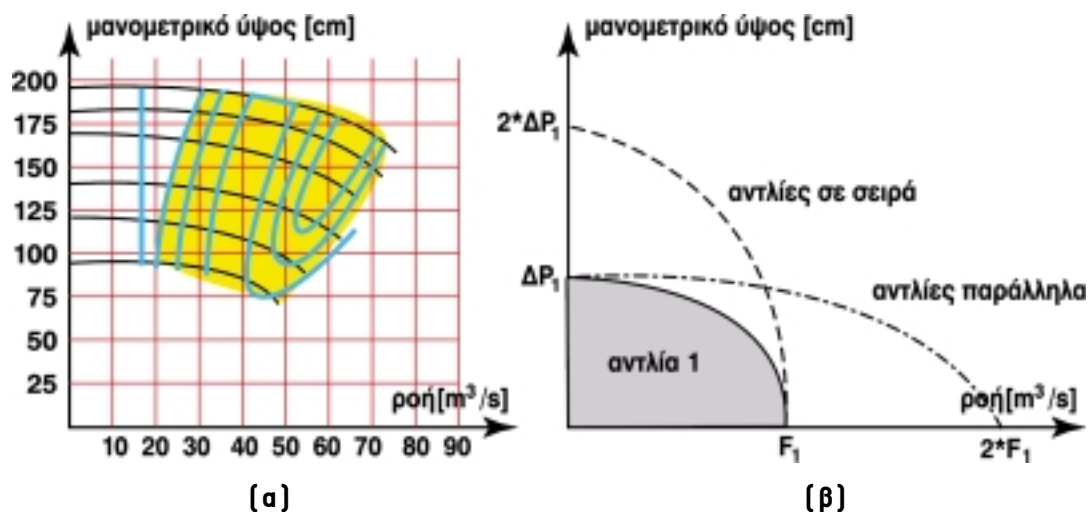


**Σχήμα 22.7:**  
Σύγχρονη αντλία με ηλεκτρονική οδήγηση

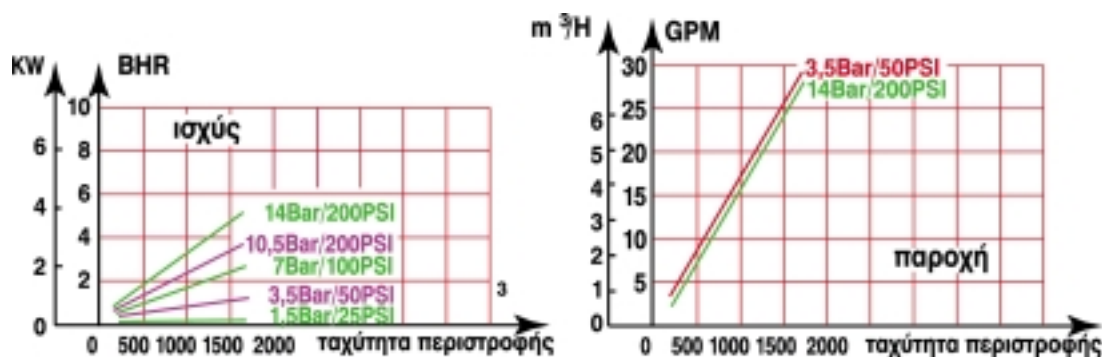


**Σχήμα 22.8:**  
Τύποι αντλιών και λειτουργία τους

Στο σχήμα 22.9 δίνονται η χαρακτηριστική μιας αντλίας, δηλαδή η καμπύλη του μανομετρικού ύψους συναρτήσει της παρεχόμενης από την αντλία ροής [σχήμα 22.9 (α)] καθώς και οι χαρακτηριστικές κοινών συνδεσμο-λογιών των αντλιών, π.χ. σε σειρά και παράλληλα [σχήμα 22.9(β)].



**Σχήμα 22.9:** (α) Χαρακτηριστικές αντλίας και (β) αντλιών σε σειρά και παράλληλα



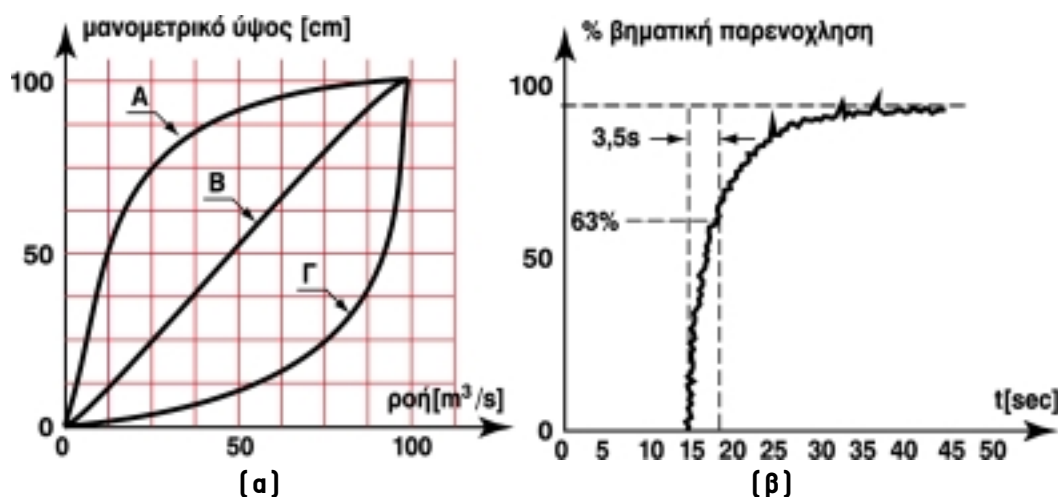
**Σχήμα 22.10: Χαρακτηριστική αντλίας: Δίνεται η ισχύς και παροχή συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας για διαφορετικές τιμές διαφορεικής πίεσης**

Στο σχήμα 22.10 εικονίζεται η χαρακτηριστική αντλίας, δηλ. η ισχύς και παροχή συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής της αντλίας για διαφορετικές τιμές διαφορεικής πίεσης.

Μπορούμε να βελτιώσουμε τη λειτουργία μιας αντλίας με ένα κύκλωμα ανακυκλοφορίας ρευστού περί την αντλία. Το κύκλωμα αυτό βελτιστοποιεί ρευστοδυναμικά τη λειτουργία της αντλίας και μεταβάλλει με μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα το σημείο λειτουργίας της. Η αντλία (όπως και κάθε όργανο γραμμής ρευστού) ελέγχει καλύτερα -με μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα- όταν η πτώση ή η ανάπτυξη πίεσης είναι μέγιστη. Επίσης η χρησιμοποίηση βανών αποκοπής και παραλληλισμού βοηθούν στη συντήρηση της αντλίας.

Στη βιομηχανία οι αντλίες ελέγχονται με διάφορους τρόπους, όπως με:

- έλεγχο ανοίγματος / κλεισίματος μιας βάνας (στραγγαλισμό) σχήμα 22.11 και
- έλεγχο περιστροφής της αντλίας.



**Σχήμα 22.11: (α) Χαρακτηριστικές διάφορων τύπων βανών, (β) χρονική απόκριση μιας βάνας**

## Διαδικασία

Κατά την εκτέλεση της άσκησης ακολουθήστε τα εξής βήματα:

### 1<sup>ο</sup> τρίωρο

#### A. Εισαγωγικές Δραστηριότητες

1. Κατασκευάστε την πειραματική διάταξη ελέγχου στάθμης και αναγνωρίστε τα στοιχεία ελέγχου στάθμης (δεξαμενή, βάνα, σταθμίμετρο κτλ.) καθώς και τη λειτουργία δράσης του συστήματος, π.χ. εισροή για γέμισμα της δεξαμενής ή εκροή για άδειασμα της δεξαμενής.

**Σημείωση:** στην άσκηση δεχόμαστε ότι η δεξαμενή μας διαθέτει μια εκροή με χειροκίνητη βάνα (π.χ. βρύση) ενώ ο ελεγκτής επιδρά πάνω στη βάνα που ρυθμίζει την εισροή. Αν η κατασκευή είναι αντίστροφη, η διαδικασία της άσκησης δεν αλλάζει.

2. Αναγνωρίστε τις διάφορες φυσικές μονάδες που θα χρησιμοποιήσετε.
3. Από τα τεχνικά φυλλάδια καταγράψτε τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές των φυσικών μονάδων που θα χρησιμοποιήσετε.
4. Μετρήστε την παροχή της αντλίας και τη μεταβολή πίεσης ( $\Delta P$ ) ή μανομετρικό ύψος της αντλίας. Η παροχή μετράται με ένα ογκομετρικό δοχείο, ενώ η μεταβολή πίεσης ( $\Delta P$ ) με ένα φορητό διαφορικό μανόμετρο ή με δυο τοπικά μανόμετρα  $\Delta P = P_1 - P_2$  ή με άλλους εμπειρικούς τρόπους.
5. Σχεδιάστε (σε χαρτί mm) τη στατική χαρακτηριστική της αντλίας, για την αντλία του συστήματος σας, σχήματα 22.9 και 22.10.

#### B. Διακρίβωση μετατροπέα στάθμης - Σύνδεση PI ελεγκτή με μετατροπέα στάθμης

1. Συνδέστε τον PI ελεγκτή με τον μετατροπέα στάθμης στην είσοδο του ελεγκτή (PV / X).
2. Διακριβώστε το μετατροπέα στάθμης, σχήματα 22.2 και 22.3. Για αναμεταδότες (transmitters) μετρητών στάθμης με έξοδο 4-20 mA (ή 1-5 V) η διακρίβωση γίνεται βάσει του παρακάτω πίνακα:

Μηδενισμός (zeroing)	Περιοχή μέτρησης (span)		
0 %	10 %	50 %	90 %
4 mA	5.8 mA	12 mA	18.4 mA

3. Αρχίστε να γεμίζετε τη δεξαμενή με νερό.
4. Χρησιμοποιώντας ένα μακρύ (1 m) κατακόρυφο σωλήνα βαθμολογημένο σε cm  $H_2O$ , μετρήστε και συγκρίνετε την πραγματική στάθμη, όπως τη μετράτε από την ένδειξη του σωλήνα και από το μετρητή στάθμης. Καταχωρίστε τις μετρήσεις στον ΠΙΝΑΚΑ Α και υπολογίστε το σφάλμα.

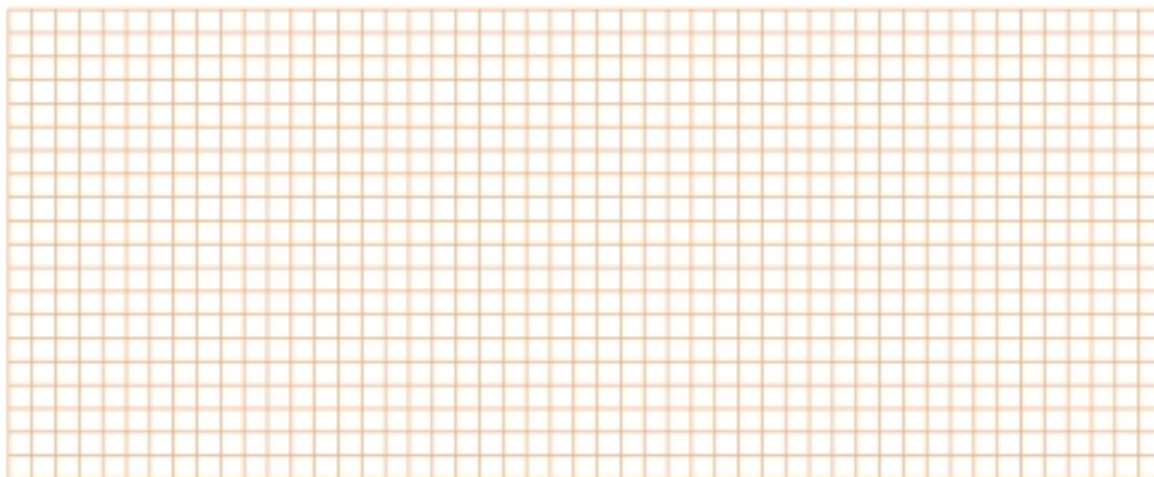


ΠΙΝΑΚΑΣ Α

ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟ ΣΩΛΗΝΑ	ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟ ΣΤΑΘΜΙΜΕΤΡΟ		ΣΦΑΛΜΑ	ΣΧΕΤΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ
[cm H <sub>2</sub> O]	[σε Volts ή mA]	[σε cm H <sub>2</sub> O]	[σε cm H <sub>2</sub> O]	%
0 %				
10 %				
...				
90 %				

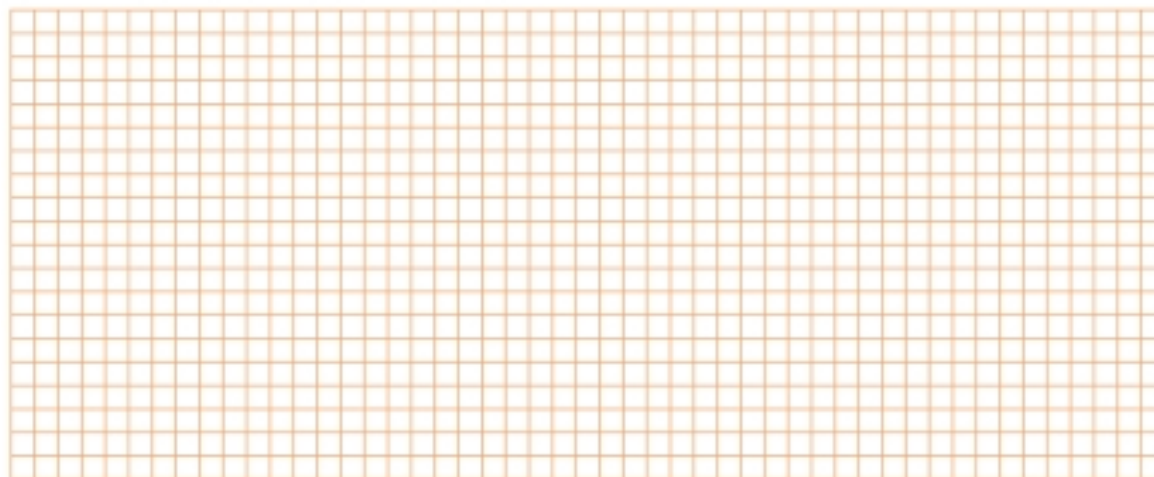
5. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Α σχεδιάστε τη χαρακτηριστική του μετρητή στάθμης (μετατροπέα) και τη μεταβολή του σφάλματος.

στάθμη (σε cmH<sub>2</sub>O)



στάθμη (σε Volts)

σφάλμα σταθμίμετρου (σε cmH<sub>2</sub>O)



στάθμη (σε cm)

Γ. Έλεγχος κυκλώματος ανοικτού βρόχου

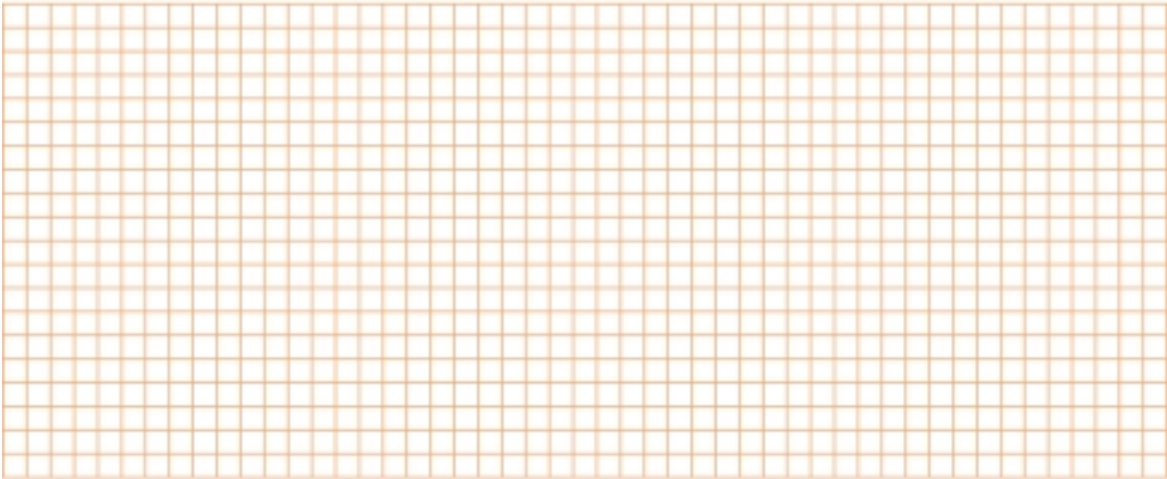
1. Στον έλεγχο ανοικτού βρόχου ο μαθητής προσπαθεί να επιτύχει την επιθυμητή στάθμη, ρυθμίζοντας την έξοδο του ελεγκτή και παρακολουθώντας (ο μαθητής και όχι ο ελεγκτής) την στάθμη οπτικά είτε στο σταθμίμετρο, είτε μέσα από τη διάφανη δεξαμενή.
2. Τοποθετήστε τον ελεγκτή σε χειροκίνητη λειτουργία (MANUAL) και μεταβάλετε την έξοδό του (MV/Y) χειροκίνητα.
3. Καταγράψτε τη στάθμη στη δεξαμενή ανά δευτερόλεπτο και καταχωρίστε τις τιμές στον ΠΙΝΑΚΑ Β, έως ότου επιτύχετε την επιθυμητή στάθμη.

ΠΙΝΑΚΑΣ Β

ΧΡΟΝΟΣ	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΣΤΑΘΜΗ	
(σε sec)	(σε Volts)	(σε cm)
0		
1		
...		

4. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Β σχεδιάστε την απόκριση του συστήματος.

στάθμη (σε cm<sub>2</sub>)



χρόνος(σε sec)

5. Ποια νομίζετε ότι είναι τα πλεονεκτήματα και ποια τα μειονεκτήματα στον έλεγχο της στάθμης μιας δεξαμενής με σύστημα ανοικτού βρόχου;

## 2<sup>ο</sup> τρίωρο

### Δ. Δημιουργία και έλεγχος κυκλώματος κλειστού βρόχου

1. Συνδέστε την έξοδο του ελεγκτή (MV/Y) στον οδηγό της βάνας.
2. Συνδέστε την είσοδο του ελεγκτή (PV/X) στην έξοδο του μετρητή στάθμης (σταθμίμετρο).
3. Αναγνωρίστε τις διάφορες μονάδες του συστήματος ανοικτού και κλειστού βρόχου.
4. Σχεδιάστε το διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος ανοικτού και κλειστού βρόχου.
5. Φροντίστε ώστε αρχικά η δεξαμενή να είναι άδεια και η βάνα εκροής να είναι κλειστή. Τοποθετήστε τον ελεγκτή σε αυτόματη λειτουργία (AUTO).
6. Δώστε στην είσοδο του ελεγκτή την επιθυμητή τιμή του ύψους της στάθμης (προσέξτε να είναι σημαντικά μικρότερη από το ύψος της δεξαμενής).
7. Συνδέστε το καταγραφικό (ή τον παλμογράφο) στην έξοδο του μετρητή στάθμης.
8. Ρυθμίστε το κέρδος  $P = 100$  και το συντελεστή ολοκλήρωσης  $I = 100$ .
9. Τροφοδοτήστε το σύστημα. Στο καταγραφικό (ή στον παλμογράφο) παρακολουθήστε τη μεταβολή της στάθμης, μέχρι να αποκατασταθεί η ισορροπία, στην επιθυμητή τιμή του ύψους της στάθμης.
10. Καταγράψτε την καμπύλη μεταβολής της στάθμης (με καταγραφικό ή παλμογράφο) υπό την επίδραση βηματικής διαταραχής, 10 % της μέγιστης τιμής.
11. Μετρήστε το χρόνο αποκατάστασης (ο χρόνος μέχρι η στάθμη να φτάσει στο 95% της επιθυμητής τιμής) και την υπερακόντιση του συστήματος (αν υπάρχει). Καταγράψτε το αποτέλεσμα στον ΠΙΝΑΚΑ Γ.
12. Κρατώντας σταθερή τη σταθερά ολοκλήρωσης αυξήστε το κέρδος  $P$  του ελεγκτή και επαναλάβετε τα ερωτήματα 25 και 26 για 8 διαφορετικές τιμές του  $P$ .

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ

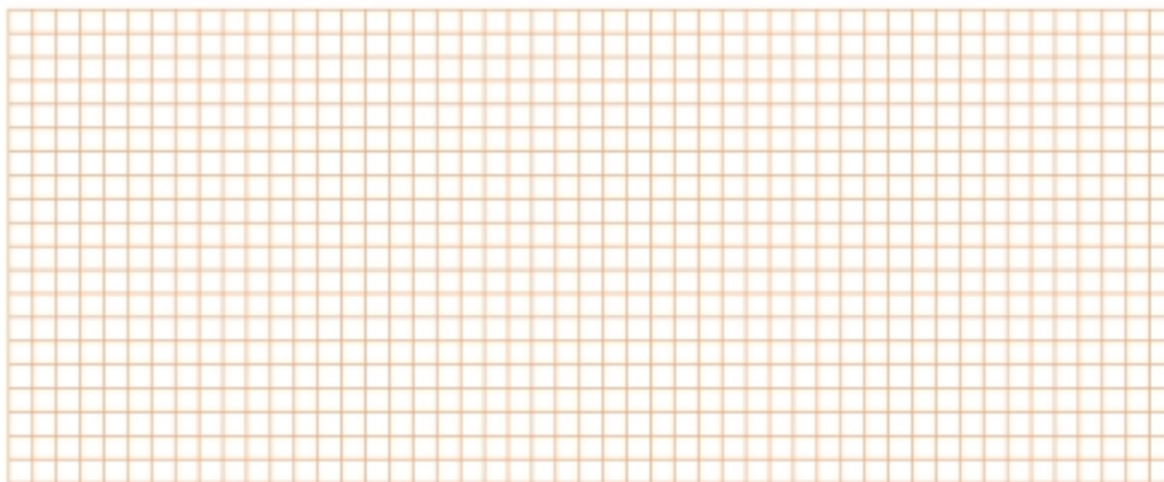
P	ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ [ sec ]	ΥΠΕΡΑΚΟΝΤΙΣΗ [ cm H <sub>2</sub> O ]



13. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Γ σχεδιάστε το γράφημα του χρόνου αποκατάστασης και της υπερακόντισης για τις διάφορες τιμές του P.

χρόνος αποκατάστασης

υπερακόντιση



κέρδος - P

14. Σχολιάστε το γράφημα που προέκυψε.  
 15. Διακόψτε την τροφοδοσία.  
 16. Αδειάστε τη δεξαμενή.  
 17. Διατηρήστε την τιμή του  $P = 100$  και αυξήστε το συντελεστή ολοκλήρωσης  $I = k_I$ .  
 18. Για 8 διαφορετικές τιμές του  $k_I$  επαναλάβετε τα ερωτήματα 25 και 26, καταχωρίζοντας τα αποτελέσματα στον ΠΙΝΑΚΑ Δ.

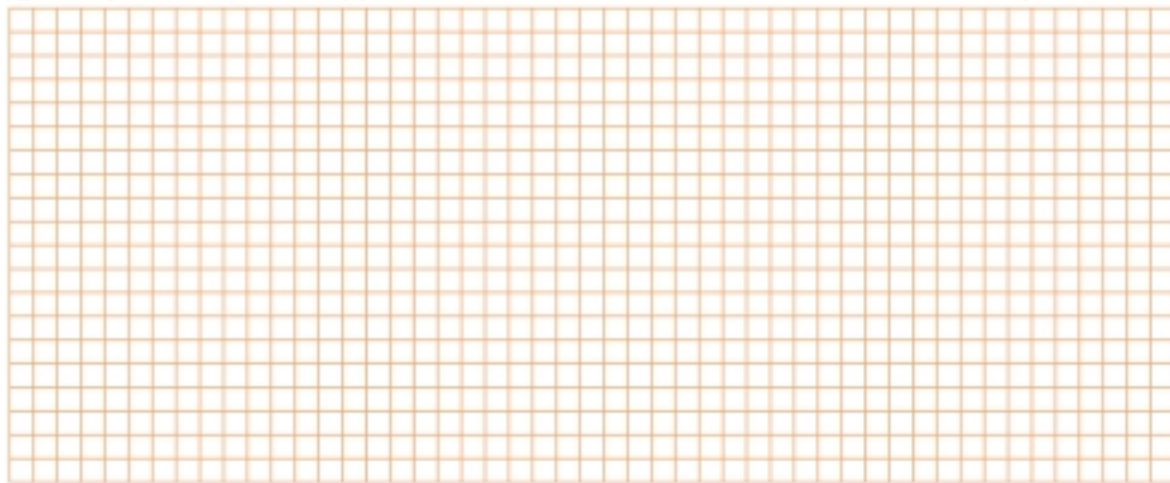
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ

$P = 100$ $I$	ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ [sec]	ΥΠΕΡΑΚΟΝΤΙΣΗ [cm H <sub>2</sub> O]

19. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Δ σχεδιάστε το γράφημα του χρόνου αποκατάστασης και της υπερακόντισης για τις διάφορες τιμές του P.

χρόνος αποκατάστασης

υπερακόντιση



K<sub>1</sub>

20. Σχολιάστε το γράφημα που προέκυψε.

21. Διακόψτε την τροφοδοσία.

22. Αδειάστε τη δεξαμενή.

### 3<sup>ο</sup> τρίωρο

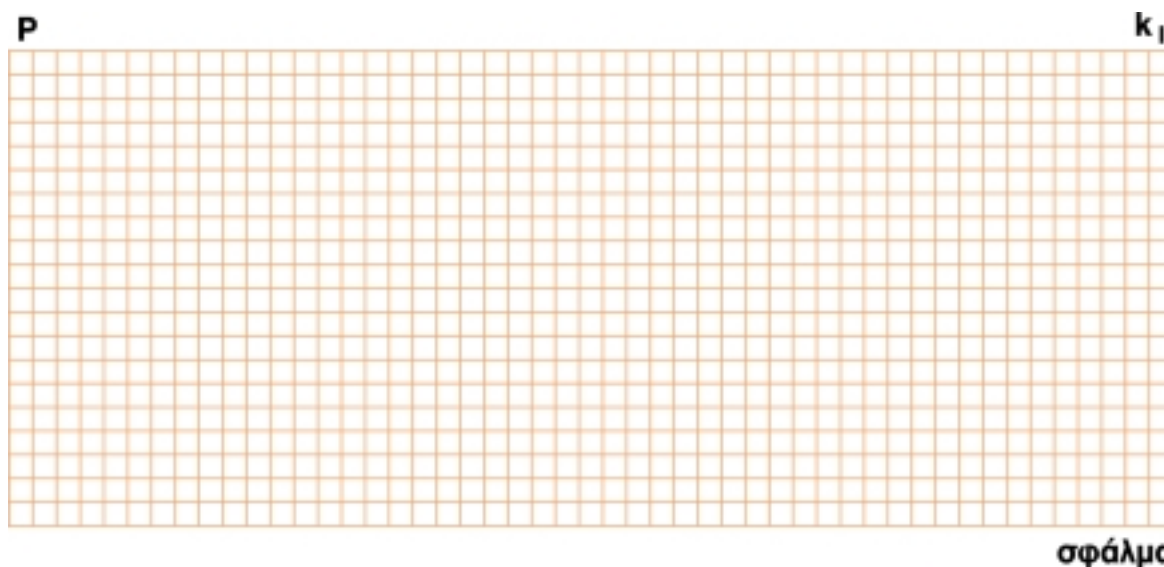
1. Δώστε στην είσοδο του ελεγκτή την επιθυμητή τιμή της στάθμης περίπου στο 50% του ύψους της δεξαμενής.
2. Ρυθμίστε το κέρδος και τη σταθερά ολοκλήρωσης του ελεγκτή, με βάση τα συμπεράσματα από τα προηγούμενα ερωτήματα.
3. Συνδέστε έναν παλμογράφο στην είσοδο της βάνας εισροής και παρακολουθήστε τη μεταβολή της τάσης.
4. Με τη βάνα εκροής ανοικτή κατά το ήμισυ (ή μικρότερο ποσοστό) τροφοδοτήστε το σύστημα.
5. Παρακολουθήστε την μεταβολή της στάθμης (σε καταγραφικό ή παλμογράφο) και της τροφοδοσίας της βάνας.
6. Μετρήστε το χρόνο αποκατάστασης της στάθμης και την (πιθανή) υπερακόντιση.
7. Δημιουργήστε μια βηματική διαταραχή της στάθμης (π.χ. αυξήστε κατά 10% την επιθυμητή στάθμη) και παρακολουθήστε τη μεταβολή της στάθμης. Μετρήστε ξανά το χρόνο αποκατάστασης και την υπερακόντιση.
8. Είναι το σύστημα ευαίσθητο σε μικρές διαταραχές;
9. Μετρήστε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

10. Κρατώντας σταθερό το συντελεστή ολοκλήρωσης, αυξήστε το κέρδος  $P$  του ελεγκτή, μετρώντας κάθε φορά το σφάλμα μόνιμης κατάστασης (για μικρές βηματικές διαταραχές). Καταχωρίστε τις μετρήσεις στον ΠΙΝΑΚΑ Ε.
11. Επαναφέρετε το  $P$  στην αρχική του τιμή. Κρατώντας το σταθερό αυξήστε το συντελεστή ολοκλήρωσης  $k_i$ , μετρώντας ξανά κάθε φορά το σφάλμα μόνιμης κατάστασης (για μικρές βηματικές διαταραχές). Καταχωρίστε τις μετρήσεις στον ΠΙΝΑΚΑ Ε.

ΠΙΝΑΚΑΣ Ε

$P$	ΣΦΑΛΜΑ [cm H <sub>2</sub> O]	$I = k_i$ [sec]	ΣΦΑΛΜΑ [cm H <sub>2</sub> O]

12. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Ε σχεδιάστε τη μεταβολή του σφάλματος μόνιμης κατάστασης για μεταβολή του  $P$  και του  $k_i$ .



13. Πώς επηρεάζεται το σφάλμα μόνιμης κατάστασης από το κέρδος ( $P$ ) και το συντελεστή ολοκλήρωσης ( $I$ );
14. Σταματήστε την τροφοδοσία και αδειάστε τη δεξαμενή. Κλείστε τη βάνα εκροής.

## 4<sup>ο</sup> τρίωρο

### Ε. Ρύθμιση του PI ελεγκτή για τον έλεγχο της στάθμης δεξαμενής

1. Τοποθετήστε τον ελεγκτή στο αυτόματο (AUTO) και μεταβάλλετε την επιθυμητή τιμή του ελεγκτή (SV / W), π.χ. από 40 % της μέγιστης στάθμης σε 50 %. Έτσι ελέγξετε τη στάθμη της δεξαμενής σαν σύστημα κλειστού βρόχου με I δράση ελεγκτή. Υπολογίστε τις βέλτιστες τιμές της I δράσης, με κριτήρια τη βέλτιστη ταχύτητα απόκρισης και το ελάχιστο σφάλμα υπερακόντισης και σφάλμα σταθερής κατάστασης σε βηματική εντολή αλλαγής της στάθμης της δεξαμενής από 40 % της μέγιστης στάθμης σε 50 %. Σχολιάστε τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα.
2. Ρυθμίστε τον ελεγκτή σε λειτουργία AUTO, με  $P = 100$  και  $I = 0$ .
3. Ρυθμίστε την επιθυμητή τιμή της στάθμης.
4. Συνδέστε στο σταθμίμετρο ένα καταγραφικό (ή παλμογράφο).
5. Τροφοδοτήστε το σύστημα.
6. Παρακολουθήστε τη μεταβολή της στάθμης στο καταγραφικό (ή παλμογράφο).
7. Όταν η ισορροπία αποκατασταθεί, δημιουργήστε μια βηματική διαταραχή.
8. Όταν η ισορροπία αποκατασταθεί, μετρήστε ξανά το χρόνο καθυστέρησης και τη σταθερά χρόνου.
9. Μετρήστε επίσης το χρόνο αποκατάστασης και την υπερακόντιση.
10. Από τις μετρήσεις του ερωτήματος 8 υπολογίστε τις βέλτιστες τιμές του κέρδους P και του συντελεστή ολοκλήρωσης I.
11. Ρυθμίστε τον ελεγκτή στις τιμές αυτές.
12. Δημιουργήστε ξανά μια βηματική διαταραχή και παρακολουθήστε την μεταβολή της στάθμης στο καταγραφικό (ή τον παλμογράφο).
13. Όταν η ισορροπία αποκατασταθεί, μετρήστε επίσης το χρόνο αποκατάστασης και την υπερακόντιση. Υπάρχει βελτίωση στη συμπεριφορά του συστήματος;
14. Κάνετε τις απαραίτητες μετρήσεις, ώστε να σχεδιάσετε τις γραφικές παραστάσεις της απόκρισης του συστήματος και του σφάλματος.
15. Ποια νομίζετε ότι είναι τα πλεονεκτήματα και ποια τα μειονεκτήματα στον έλεγχο της στάθμης μιας δεξαμενής με σύστημα κλειστού βρόχου;
16. Συγκρίνετε τα αποτελέσματα του ελέγχου κλειστού βρόχου με αυτά του ελέγχου ανοικτού βρόχου και σχολιάστε.

### ΣΤ. Ερωτήσεις

1. Ποια είναι η διαφορά μεταξύ P και PI ελέγχου ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και στάθμης δεξαμενής;
2. Εξηγήστε φυσικά τη μεταβολή (ταλάντωση ή σφάλμα) στάθμης υπό την επίδραση διαταραχής. Τι συμβαί-

νει στο σύστημα από φυσική άποψη;

3. Δώστε τεχνικές προδιαγραφές ενός σταθμίμετρου.
4. Ποια τα είδη των σταθμίμετρων;
5. Δώστε τεχνικές προδιαγραφές για διάφορα είδη σταθμίμετρων
6. Δώστε τεχνικές προδιαγραφές μιας αντλίας.
7. Δώστε τεχνικές προδιαγραφές μιας βάνας.
8. Δώστε τεχνικές προδιαγραφές σωληνώσεων.
9. Πώς ρυθμίσαμε την ισχύ της αντλίας στην παραπάνω άσκηση;
10. Τι άλλους τρόπους ρύθμισης αντλιών γνωρίζετε;
11. Οι μεγάλες δεξαμενές γεμίζουν και αδειάζουν αργά ή γρήγορα;
12. Οι μικρές δεξαμενές γεμίζουν και αδειάζουν αργά ή γρήγορα;
13. Τι δηλώνει η στατική χαρακτηριστική (παροχή νερού συναρτήσει του υδροστατικού ύψους) της αντλίας μας; Ερμηνεύστε αυτό για μία μικρή αγροικία με πηγάδι και αντλία παροχής νερού;
14. Εντοπίστε προϊόντα αντλιών με ηλεκτρονικών ρυθμιστές στροφών ισχύος στην αγορά.
15. Δίνεται μια δεξαμενή  $L = 0 - 2 \text{ m}$ , με κυκλικό πυθμένα εσωτερικής διαμέτρου  $20 / \sqrt{\pi} \text{ m}$ . Υπολογίστε και σχεδιάστε την αντίστοιχη καθαρή μεταβολή (αλγεβρική) της παροχής εισόδου σε  $\text{m}^3/\text{h}$  και της ποσότητας του ρευστού σε  $\text{m}^3$  που είναι στις 9:30 μέσα στη δεξαμενή.

Χρόνος	Παροχή [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	Στάθμη [m]	Ποσότητα [ $\text{m}^3$ ]
[h]	0 50 100 150 200	0 0.5 1.0 1.5 2	0 50 100 150 200
10:00			
09:00			
08:00			
07:00			

16. Δώστε φυσικά φαινόμενα που αναπτύσσονται σε διατάξεις με δεξαμενές και αντλίες.
17. Τι σημαίνει στάθμη σε αφρώδη ρευστά (π.χ. μπύρα);
18. Γιατί μικρές δεξαμενές αναπτύσσουν δίνες κοντά σε βάνες εκροής; Πώς αποφεύγεται το φαινόμενο;

## Ζ. Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

### Η. Παράρτημα Ι: Ο PI Ελεγκτής

Ο ελεγκτής στάθμης συγκρίνει συνεχώς την επιθυμητή στάθμη με την πραγματική στάθμη και παράγει διορθωτική δράση, όταν η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο μεγεθών είναι μετρήσιμη. Η πραγματική στάθμη καταγράφεται με σταθμίμετρο. Ο συνήθης τύπος του PID και του PI ελεγκτή είναι:

$$MV(t) = P \cdot e(t) + k_I \int_0^t e(t) \cdot dt + D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

$$MV(t) = P \cdot e(t) + k_I \int_0^t e(t) \cdot dt$$

Για να ρυθμίσουμε έναν ελεγκτή τύπου PID (Proportional – Integral - Derivative), βλ. σχήμα 20.5 πρέπει να επιλέξουμε τις παραμέτρους:

PB = Proportional Band = Ζώνη Κέρδους =  $1 / P = 1 / \kappa_p$

I =  $\kappa_I$  Integral Action = Reset = Ολοκληρωτική Δράση

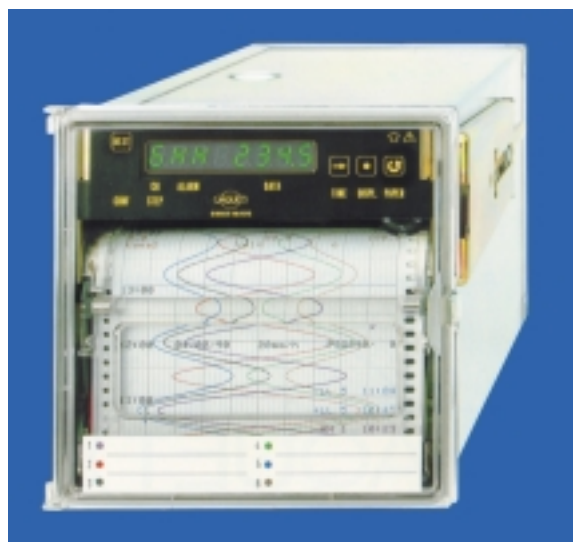
D = Derivative action = Rate = Διαφορική Δράση

Από εμπειρικούς κανόνες υπολογίζουμε από παραμέτρους T και L, μετρούμενες στην καμπύλη της απόκρισης, ότι:

ΤΥΠΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗ	PB %	$k_I = I$ (sec)	D (sec)
PID	$100 / (1.2 * T / L)$	$2.0 * L$	$0.5 * L$

Γενικά η εύρεση των βέλτιστων P, I και D παραμέτρων είναι μια αέλιαν διαδικασία (trial and error method) διαδοχικών προσεγγίσεων και βελτιώσεων.

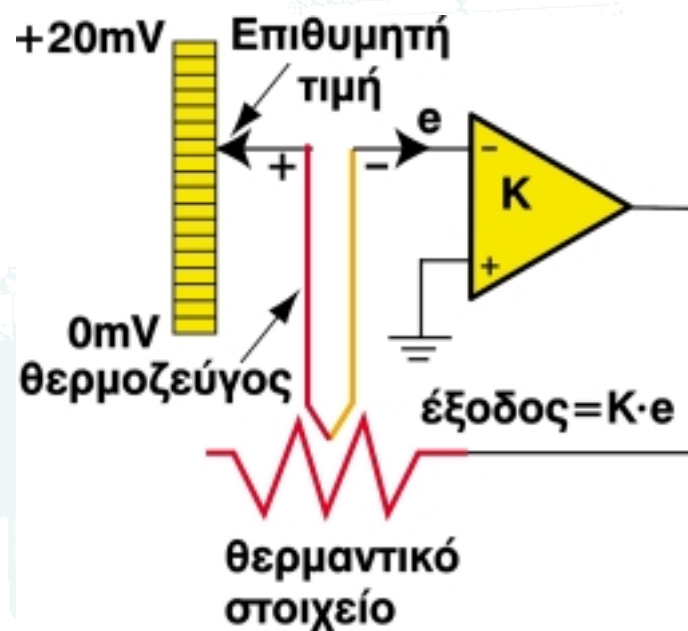
Η ολοκληρωτική και διαφορική δράση μπορούν να μηδενιστούν θέτοντας  $k_I = I = 0$  και  $D = 0$ . Έτσι σχηματίζουμε P, PD, PI και PID ελεγκτές. Ένας PI ελεγκτής (υλοποιείται και με PID ελεγκτή, αλλήλ με  $D=0$ ).



Σχήμα 22.12: Καταγραφικό 2x3 παραμέτρων (PV, SV, MV)

## άσκηση 23

# Έλεγχος θερμοκρασίας χώρου με Ελεγκτή δύο θέσεων



## Στόχοι της άσκησης

**διάρκεια άσκησης: 12 διδακτικές ώρες**

Στο τέλος της άσκησης οι μαθητές θα είναι ικανοί:

- ⇒ να γνωρίζουν και εξηγούν τη λειτουργία του ελεγκτή δύο θέσεων.
- ⇒ να συνδέουν το κύκλωμα του ελεγκτή θέσεων.
- ⇒ να εξηγούν τις κυματομορφές εισόδου και εξόδου στο καταγραφικό (ή παλμογράφο) με διαφορετικές υστερήσεις.
- ⇒ να μελετούν το ρυθμιζόμενο σύστημα και να βρίσκουν τη χρονική του απόκριση με διαφορετικές διαταραχές.
- ⇒ να μελετούν με τη βοήθεια του καταγραφικού τις χρονικές μεταβολές της ελεγχόμενης μεταβλητής σε κλειστό σύστημα ελέγχου.

## Απαραίτητα εξαρτήματα

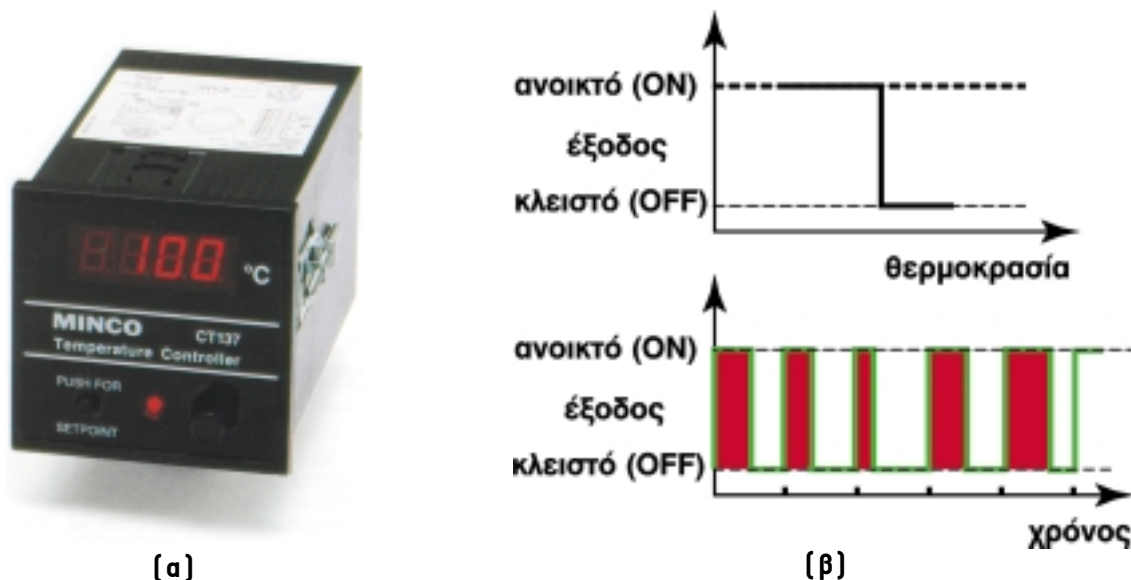
Για την πραγματοποίηση της άσκησης είναι απαραίτητα τα εξής υλικά:

- ✓ Ένας χώρος ελεγχόμενης θερμοκρασίας και θερμαντικό στοιχείο (ηλεκτρικό ή άηλο). *Μικρός ηλεκτρικός φούρνος με χρόνους θέρμανσης κάτω των 10 min μπορεί να επιταχύνει τη διάρκεια εκτέλεσης της άσκησης*
- ✓ Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας (θερμοζεύγος ή θερμίστορ) ή εναλλακτικά διμεταλλικό έλασμα
- ✓ Ένας ελεγκτής δύο θέσεων μεταβλητής υστέρησης (*υλοποιείται και με ρελέ στην έξοδο συγκριτή*) ή εναλλακτικά με δύο διαφορετικά διμεταλλικά ελάσματα
- ✓ Ένα κύκλωμα οδήγησης θερμαντικού στοιχείου με οπτική απομόνωση (driver)
- ✓ Καλωδιώσεις σύνδεσης ελεγκτή - αισθητήρα θερμοκρασίας - θερμαντικού στοιχείου
- ✓ Ένα ηλεκτρομηχανικό ρελέ ή ρελέ στερεάς κατάστασης (solid state)
- ✓ Ένα καταγραφικό υλικού ή παλμογράφος δικάναλος
- ✓ Ένα πολύμετρο (μερικά πολύμετρα διαθέτουν και αισθητήρα θερμοκρασίας)



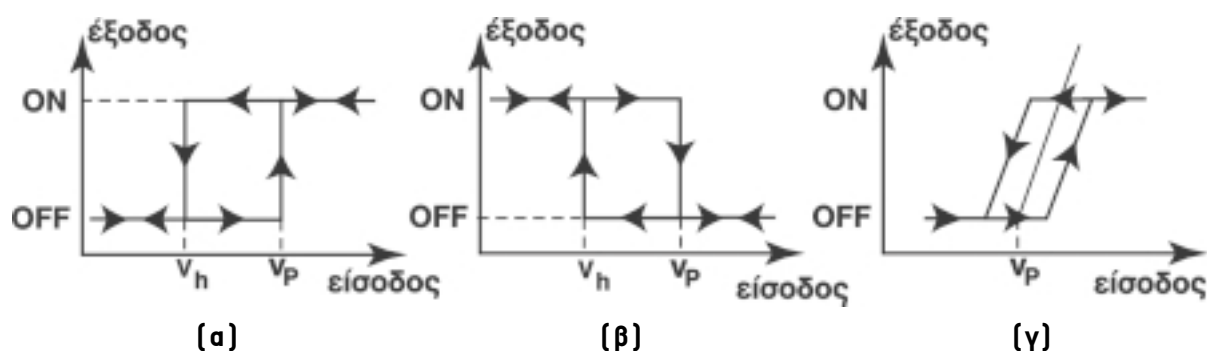
## Βασική θεωρία - Υλοποίηση Ελεγκτή Δύο θέσεων

Ο Ελεγκτής δύο θέσεων είναι μία συσκευή που παρακολουθεί τη μεταβολή ενός φυσικού μεγέθους και, όταν αυτό ξεπεράσει μια προκαθορισμένη τιμή (που ορίζει ο χρήστης), αλλάζει την κατάσταση της εξόδου του (για έξοδο συνήθως έχει ρελέ). Πρόκειται δηλαδή για έναν on-off ελεγκτή. Στο σχήμα 23.1 βλέπουμε έναν ελεγκτή θερμοκρασίας δύο θέσεων.



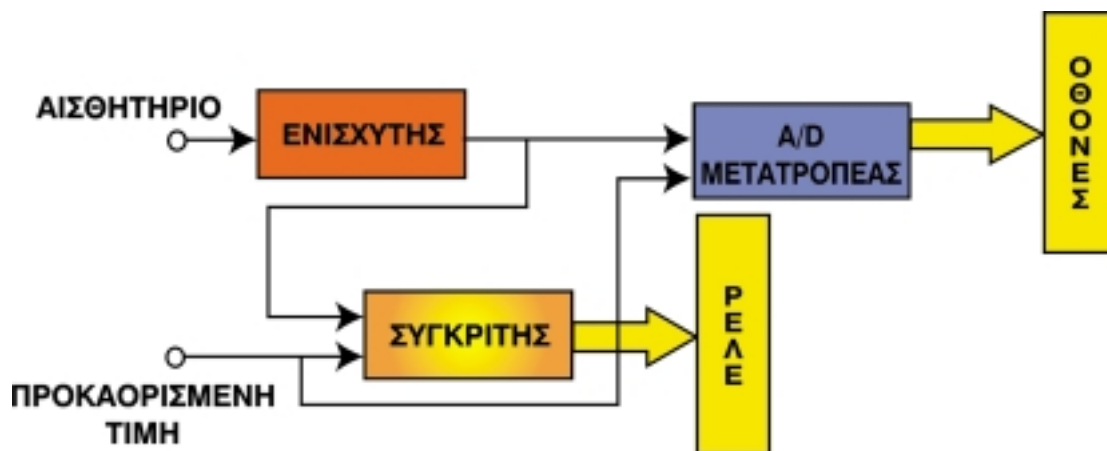
Σχήμα 23.1: Ελεγκτής θερμοκρασίας δύο θέσεων και τρόπος λειτουργίας του

Οι ελεγκτές αυτοί παρουσιάζουν φαινόμενο *υστέρησης*. Δηλαδή, όταν η θερμοκρασία αυξάνει και όταν ελαττώνεται, η αλλαγή της εξόδου του ελεγκτή δεν συμβαίνει ακριβώς στην ίδια τιμή. Στο σχήμα 23.2 περιγράφεται η κατάσταση της εξόδου, όταν μεταβάλλεται η είσοδος, και φαίνεται η υστέρηση.



Σχήμα 23.2: Έξοδος ιδανικού ελεγκτή δύο θέσεων - Ερμηνεία της υστέρησης διακόπτη

Το διάγραμμα βαθμίδων ενός ελεγκτή δύο θέσεων φαίνεται στο σχήμα 23.3. Το ηλεκτρικό σήμα που φθάνει από το αισθητήριο ενισχύεται και οδηγείται μέσω του Α/Δ μετατροπέα σε ενδεικτικές οθόνες (displays), για οπτική απεικόνιση του μεγέθους. Επίσης οδηγείται στη μονάδα του συγκριτή μαζί με το σήμα από ένα χειροκίνητο επιλογέα (ποτενσιόμετρο). Το δεύτερο αυτό σήμα αποτελεί την προτοποθετημένη τιμή. Όταν το σήμα από το αισθητήριο γίνει μεγαλύτερο (ή μικρότερο ανάλογα με το όργανο) από την καθορισμένη τιμή, αλλάζει η κατάσταση της εξόδου.



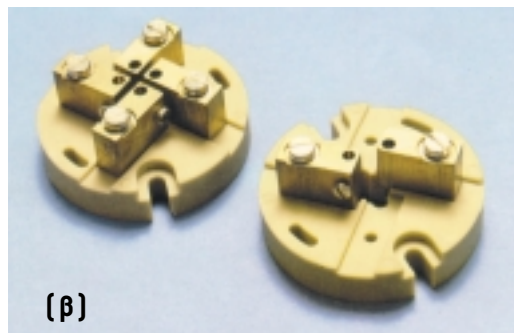
Σχήμα 23.3: Διάγραμμα βαθμίδων ενός ελεγκτή δύο θέσεων

Στην είσοδο του ελεγκτή συνδέεται το κατάλληλο αισθητήριο (sensor). Για μέτρηση της θερμοκρασίας υπάρχουν μια σειρά από αισθητήρια. Κυριότερα είναι τα εξής:

- Θερμοζεύγη σχήμα 23.4. Πρόκειται για αισθητήρια που ανάλογα με τη θερμοκρασία δίνουν μια συγκεκριμένη τάση σε mVolts (συνθετέρος τύπος ο K).
- Θερμοαντιστάσεις. Είναι αισθητήρια που ανάλογα με τη θερμοκρασία μεταβάλλουν την τιμή της ωμικής τους αντίστασης (συνθετέρος τύπος το Pt100).
- Θερμίστορς. Είναι αισθητήρια που, καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, η αντίσταση τους αυξάνει (PTC) ή μειώνεται (NTC).



(α)



(β)

Σχήμα 23.4: Θερμοζεύγος (probe, στεγανοποίηση / κεφαλή / κάλυμμα, συνδέσεις)

Ο κάθε ελεγκτής δέχεται συνήθως ένα είδος αισθητηρίου. Απαίτηση για το αισθητήριο που χρησιμοποιείται είναι να παρουσιάζει καλή *γραμμικότητα*. Όταν η εφαρμογή αφορά μια μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών, τότε το αισθητήριο παύει να έχει γραμμική συμπεριφορά. Για το λόγο αυτό στην είσοδο του ελεγκτή, υπάρχει (μαζί με τον ενισχυτή - σχήμα 23.3) μια βαθμίδα γραμμικοποίησης του αισθητηρίου.

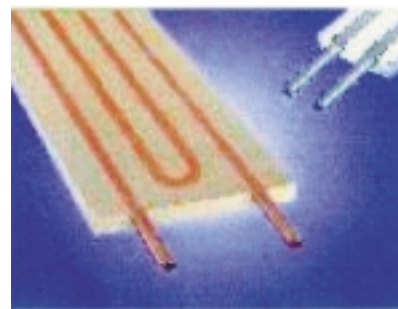
Όταν ο έλεγχος αφορά τη θέρμανση ενός χώρου, τότε ο ελεγκτής ρυθμίζει τη λειτουργία ενός ή περισσοτέρων θερμαντικών σωμάτων. Αν, αντίθετα, αφορά την ψύξη ενός χώρου, τότε ο ελεγκτής ελέγχει τη λειτουργία ψυκτικών μηχανημάτων. Είναι όμως δυνατόν να ζητάμε άλληλοτε τη θέρμανση και άλληλοτε την ψύξη ενός χώρου, ώστε η θερμοκρασία του να είναι σταθερή (π.χ. για όλες τις εποχές του χρόνου). Τότε χρειαζόμαστε έναν ελεγκτή με δύο επιλογές θερμοκρασιών και δύο ανεξάρτητες εξόδους (διαφορετικά χρησιμοποιούμε δύο ανεξάρτητους ελεγκτές). Η μία έξοδος θα ελέγχει το κύκλωμα θέρμανσης και η άλλη το κύκλωμα ψύξης. Στην άσκηση αυτή θα εξετάσουμε τη θέρμανση ενός χώρου. Η θέρμανση θα γίνει μέσω ενός θερμαντικού στοιχείου. Στο σχήμα 23.5 βλέπουμε μια σειρά από τέτοια στοιχεία.



(α)



(β)



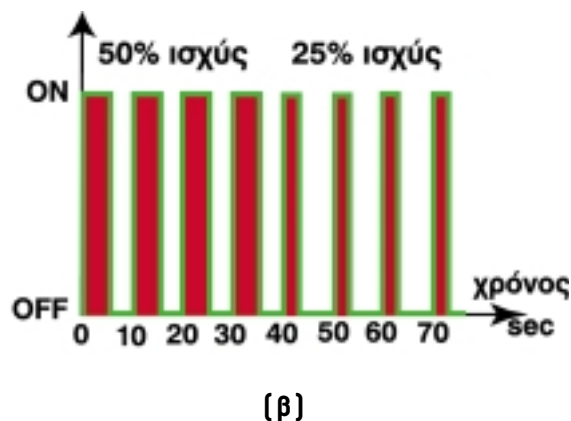
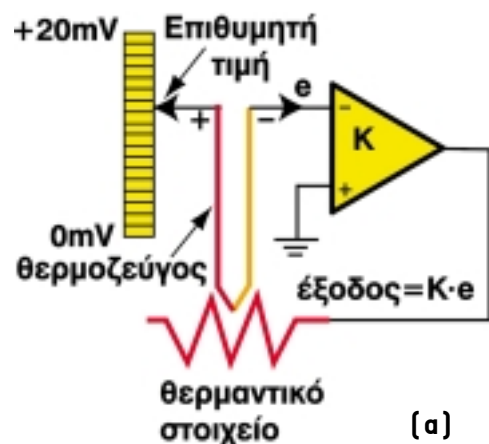
(γ)

**Σχήμα 23.5: Θερμαντικά στοιχεία: επιφανειακά, εμβραπτιζόμενα σε νερό, ευλύγιστα κτλ.**

Ο ON/OFF έλεγχος που περιγράψαμε είναι ο απλούστερος έλεγχος στη βιομηχανία και την φύση. Ο τύπος αυτός ελέγχου είναι χαμηλού κόστους, αλλά όχι ακριβής στις περισσότερες διεργασίες και εφαρμογές ελέγχου μηχανών. Ο ON/OFF έλεγχος συνήθως οδηγεί σε υπερακόντιση (overshoot) και ταλαντώσεις (cycling), όπως φαίνεται και στο σχήμα 23.10. Συνήθως γύρω από το επιθυμητό σημείο ισορροπίας χρησιμοποιείται μια νεκρή ζώνη (deadband) για να αποφευχθεί το φαινόμενο άσκοπων διακοπτικών δράσεων (μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας γύρω από την επιθυμητή τιμή θα οδηγούσε σε ανεπιθύμητες συνεχείς μεταβολές την έξοδο του ελεγκτή).

Ο ON/OFF έλεγχος με σταθερό χρόνο ανοιγοκλεισίματος μεταβολής του ρελέ (διακοπτική συχνότητα) επιτυγχάνει:

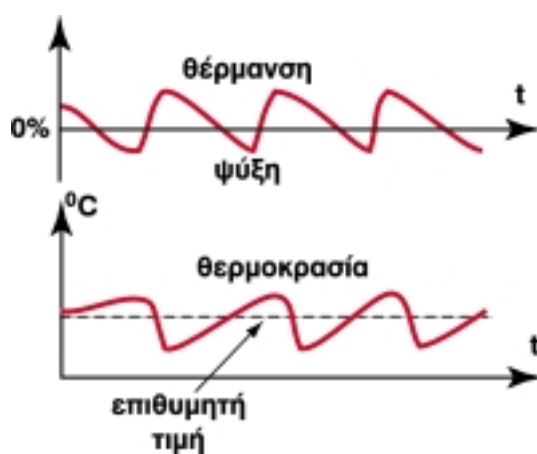
1. Να ελαχιστοποιεί ανάγκες για φίλτρα.
2. Να μειώνει τους κινδύνους συντονισμού σε μεγάλα ac συστήματα.



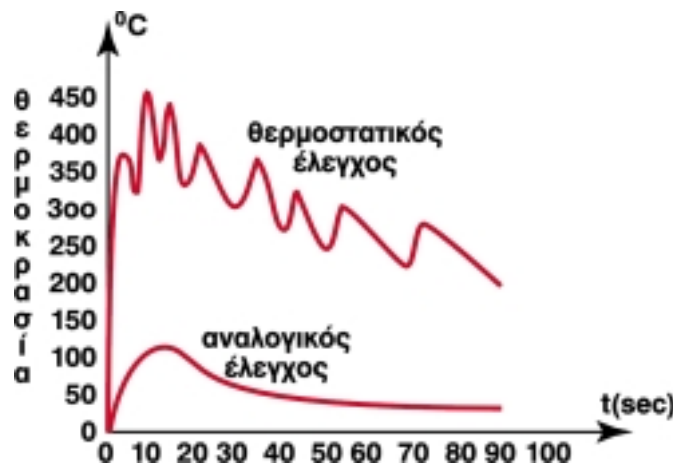
Σχήμα 23.6: Έλεγχος ισχύος με PWM (Pulse Width Modulation) σήμα

Έτσι, για τον έλεγχο της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται παλμοί μεγάλου χρονικού μήκους για υψηλή ισχύ εξόδου και παλμών μικρού χρονικού μήκους για μικρή ισχύ εξόδου, γνωστή σαν τεχνική ελέγχου αναλογικού χρόνου (time proportioning control, PWM), που επιτυγχάνεται με ένα απλό ρελέ που ανοιγοκλείνει με κάποιο προκαθορισμένο χρόνο ανοιγοκλεισίματος (cycle time). Στο σχήμα 23.6 βλέπουμε ένα σήμα PWM.

Για μικρή συχνότητα του PWM σήματος, η ταχύτητα είναι πολύ χαμηλή και η θερμοκρασία ταλαντώνει σημαντικά. Μια απλοποιημένη εξήγηση της μεταβολής θερμοκρασίας σε PWM οδήγηση είναι ότι το θερμαντικό στοιχείο ή μέσο οδηγείται σε καταστάσεις ON/OFF αλλά δεν προλαβαίνει να οδηγηθεί στα άκρα αυτών των καταστάσεων ON ή OFF. Στο σχήμα 23.7 φαίνεται η ταλάντωση της εξόδου του ελεγκτή δύο θέσεων ή τριών θέσεων (με θέρμανση / ψύξη) και πώς αυτή επηρεάζει τη θερμοκρασία του χώρου. Επίσης στο σχήμα 23.8 παρουσιάζεται μια σύγκριση επίδρασης ON/OFF και αναλογικού ελέγχου στη θερμοκρασία του χώρου.



Σχήμα 23.7: ON/OFF έλεγχος θερμοκρασίας. Το σήμα εξόδου του ελεγκτή και η μεταβολή του μεγέθους

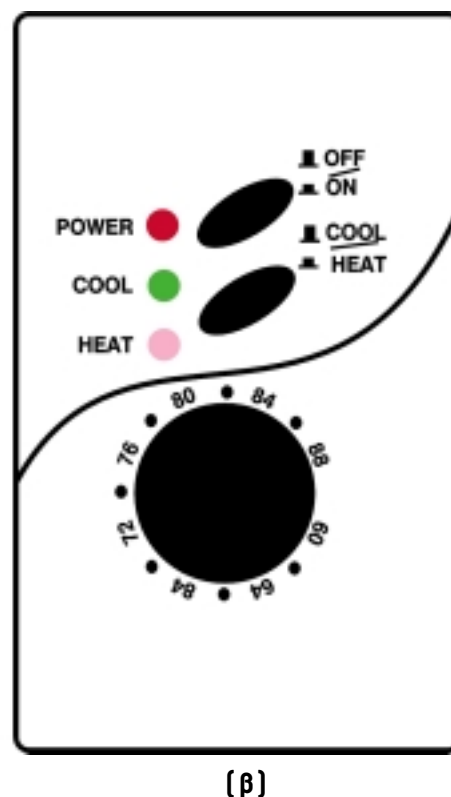
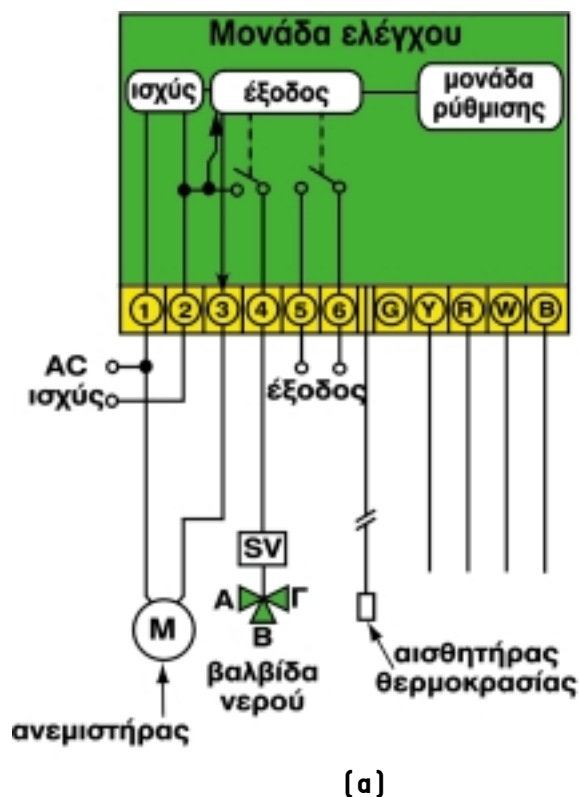


Σχήμα 23.8: και αναλογικού ελεγκτή Αποκρίσεις ελεγκτή δύο θέσεων

Στον ON/OFF έλεγχο, έχουν αναφερθεί διάφορες διακοπτικές συχνότητες, όπως 4, 15, 20, 24KHz. Με την τεχνική αυτή λειτουργούν:

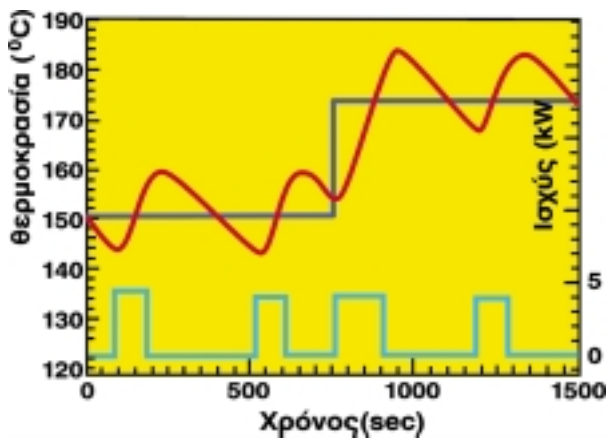
1. η ηλεκτρική θερμάστρα και κάθε συσκευή οικιακής θέρμανσης / ψύξης, π.χ. ηλεκτρική εστία σε ηλεκτρική κουζίνα, βραστήρας νερού, θερμοσίφωνας, στεγνωτήρας μαλλιών κτλ.
2. οι ψυκτικές / θερμαντικές εγκαταστάσεις βιομηχανικών εφαρμογών,
3. ο φορνητός καυστήρας σε ερασιτεχνικό αερόστατο,
4. οι αντλίες που ρυθμίζουν την πλευστότητα ενός υποβρυχίου,
5. η διόρθωση πορείας ενός διαστημοπλοίου.

Τα στοιχεία που συνήθως ρυθμίζονται είναι βάνες, ρελέ, στοιχεία δράσης, κινητήρες, αντλίες, ανεμιστήρες, υδραυλικά και πνευματικά στοιχεία. Στο σχήμα 23.9 φαίνεται πώς συνδέονται τα αισθητήρια και τα στοιχεία που ρυθμίζονται σε έναν ελεγκτή δύο θέσεων.

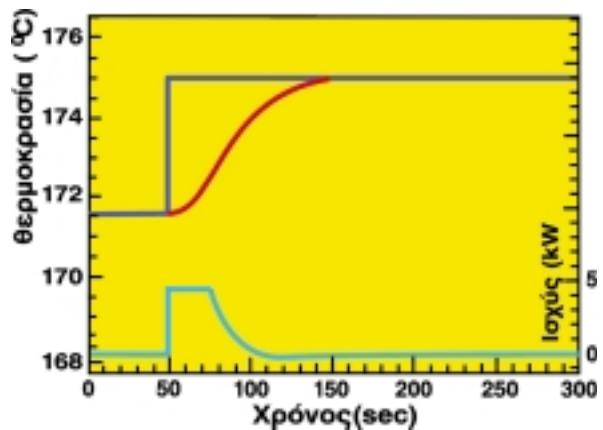


Σχήμα 23.9: Διάγραμμα σύνδεσης ελεγκτή δύο καταστάσεων και front panel

Η προοδευτική αυξομείωση της διάρκειας των ON/OFF παλμών διατηρεί τη θερμοκρασία στην επιθυμητή τιμή (set point), όπως φαίνεται και στα σχήματα 23.10 και 23.11.



**Σχήμα 23.10:**  
**Προβλήματα ON/OFF ελέγχου θερμοκρασίας**



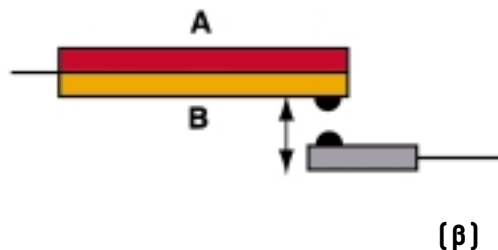
**Σχήμα 23.11:**  
**Επιτυχής ON/OFF έλεγχος θερμοκρασίας**

Επίσης μείωση της τάσης των παλμών οδήγησης του θερμαντικού στοιχείου, λόγω της δεύτερης δύναμης της σχέσης τάσης και ισχύος ( $P=V^2/R$ ), οδηγεί σε ταχύτατη μείωση και της παρεχόμενης θερμικής ισχύος. Αποτέλεσμα αυτού είναι να καθυστερεί η προσέγγιση της επιθυμητής θερμοκρασίας, που όμως επιτυγχάνεται χωρίς (ή με ελάχιστη) υπερακόνηση (βλέπε σχήμα 23.11).

Σε ιδιαίτερα απλές εφαρμογές αντί του ελεγκτή δύο θέσεων που περιγράψαμε, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας απλός διμεταλλικός διακόπτης, όπως φαίνεται στα σχήματα 23.12 (β) και 23.13 (σε μορφή ταινίας ή σύρματος και σε ελικοειδή και τυλίγματα διμεταλλικών συρμάτων). Ο διακόπτης αυτός αποτελείται από δύο ελάσματα από διαφορετικά υλικά που διαστέλθουν ανομοιόμορφα. Αποτέλεσμα αυτού είναι το έλασμα να κάμπτεται (σχήμα 23.13) και τελικά να έρχεται σε επαφή με έναν ακροδέκτη. Οι θερμικοί συντελεστές μεταβολής μήκους,  $\alpha = \frac{\Delta L/L}{\Delta T} * 100$ , διαφόρων υλικών δίνονται στο σχήμα 23.12 (α).

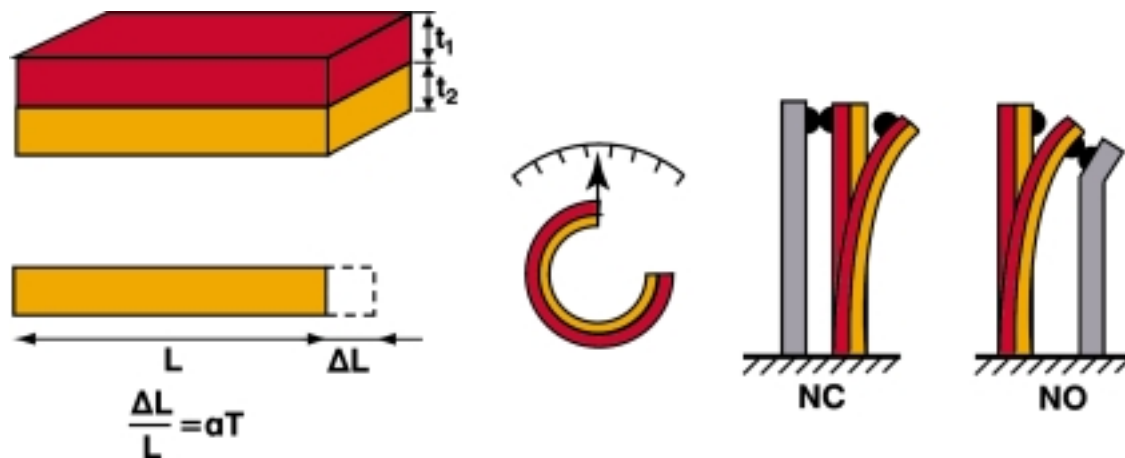
ΥΛΙΚΟ	$[^{\circ}\text{C}]^{-1}$
Πλατίνα	8,9
Ασήμι	10,0
Χρυσός	4,2
Χαλκός	16,7
Invar	1,2
Σίσηρος	11,8
Μόλυβδος	28,7
Tungsten	4,5

(α)



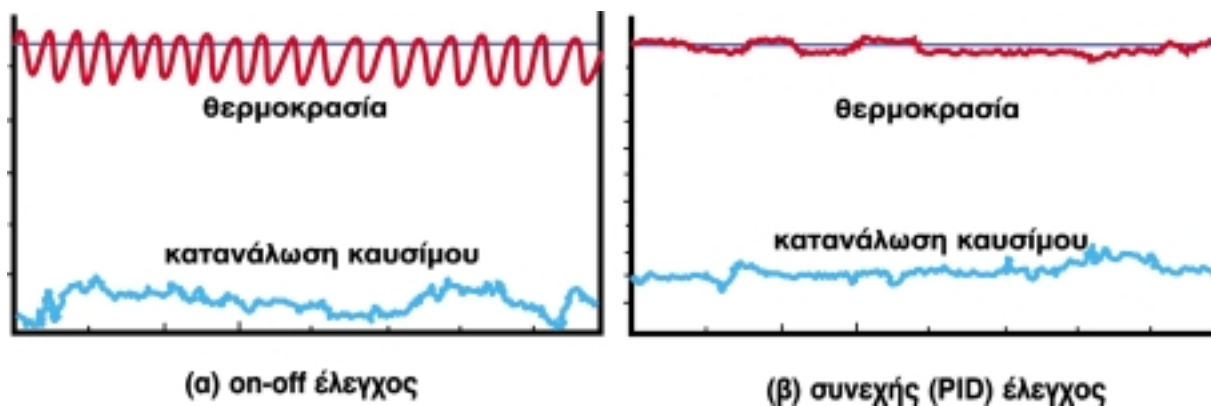
(β)

**Σχήμα 23.12:** (α) Θερμικοί συντελεστές α μεταβολής μήκους και (β) διμεταλλικός διακόπτης



Σχήμα 23.13: Διμεταλλικό Έλασμα (ρυθμίζει τον χρόνο ON / OFF )

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι:



Σχήμα 23.14: Σύγκριση του on-off και συνεχούς ελέγχου θερμοκρασίας αέρα και της κατανάλωσης καυσίμου (προσπάθεια ελέγχου) σε χώρο θερμοκηπίου

Τα πλεονεκτήματα του on/off ελέγχου είναι:

1. απλό και χαμηλού κόστους κύκλωμα οδήγησης (ειδικότερα σε εφαρμογές υψηλής ισχύος με συχνότητα διακοπής μέχρι 1 kHz) αποτελεί μια καλή λύση για μη κρίσιμες εφαρμογές.
2. ελάχιστη σχετικά κατανάλωση.
3. λειτουργεί για ευρείες περιοχές λειτουργίας (τάσης, θερμοκρασίας κτλ.).
4. απαιτεί ελάχιστη διακρίβωση (ρύθμιση).
5. αυξάνει την αξιοπιστία του κυκλώματος και φιλοσοφίας οδήγησης.



Τα μειονεκτήματα του on/off ελέγχου είναι:

6. κακή χαρακτηριστική εκκίνησης (startup).
7. διαχειρίζεται μεγάλα ρεύματα εκκίνησης κατά την εκκίνηση (κατάσταση ON, start up) και άρα απαιτεί στοιχεία δράσης (actuator) σχεδιασμένα για μεγαλύτερα ρεύματα.
8. μειώνει την αξιοπιστία οδήγησης εξόδου του συστήματος λόγω βλαβών.
9. αυξάνει το θόρυβο των συστημάτων, που μειώνεται με αυξανόμενη τη συχνότητα του PWM.
10. σε ωμικά φορτία η τεχνική είναι ανεπαρκής σε υψηλά ρεύματα (ωστόσο αυτό είναι ικανοποιητικό για ηλεκτρική θέρμανση).

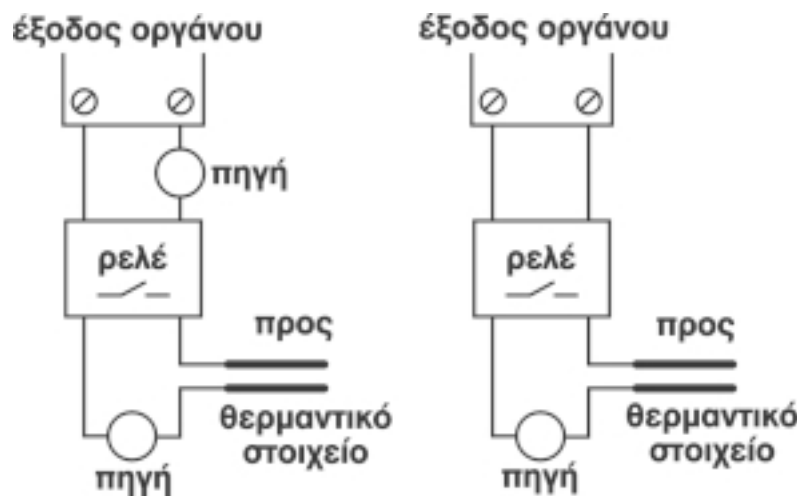
## Διαδικασία

Κατά την εκτέλεση της άσκησης ακολουθήστε τα εξής βήματα:

### 1<sup>ο</sup> τρίωρο

#### A. Εισαγωγικές Δραστηριότητες

1. Μελετήστε το εγχειρίδιο χρήσης και λειτουργίας του ελεγκτή δύο θέσεων.
2. Παρατηρήστε τον ελεγκτή δύο θέσεων. Εντοπίστε τις επαφές σύνδεσης των στοιχείων εισόδου και εξόδου. Εντοπίστε τον τρόπο ρύθμισης της επιθυμητής θερμοκρασίας ενεργοποίησης της εξόδου του ελεγκτή (Preset Value, PV).



Σχήμα 23.15: Σύνδεση του θερμαντικού στοιχείου στην έξοδο του ελεγκτή



3. Συνδέστε το στοιχείο ελέγχου (θερμαντικό στοιχείο) στην έξοδο και το αισθητήριο θερμοκρασίας (προτιμήστε θερμοζεύγος) στην είσοδο του ελεγκτή δύο θέσεων. Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο σύνδεσης του θερμαντικού στοιχείου. Αν η έξοδος του οργάνου είναι επαφή, η σύνδεση γίνεται όπως στο σχήμα 23.15[α]. Αν είναι τάση, όπως στο σχήμα 23.15[β]. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήστε ένα βοηθητικό ρελέ, που να έχει επαφές που επιτρέπουν δίοδο ρεύματος ίση με αυτή του θερμαντικού στοιχείου.
4. Ελέγξτε το κύκλωμα σύνδεσης ελεγκτή και θερμαντικού στοιχείου.
5. Μετρήστε την έξοδο του θερμικού αισθητήρα για διαφορετικές θερμοκρασίες.
6. Χαράξτε χαρακτηριστική του θερμικού αισθητήρα και ελέγξτε τη γραμμικότητά του.

## B. Μελέτη της απόκρισης του ελεγκτή

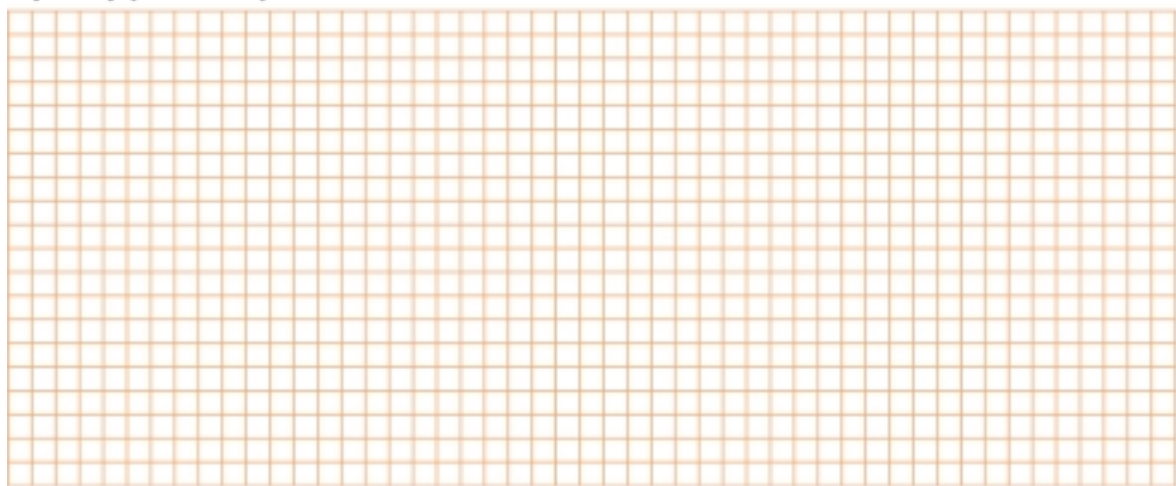
1. Αν το όργανο έχει έξοδο επαφή, συνδέστε ένα ωμόμετρο στην έξοδό του (αν δίνει έξοδο τάση, συνδέστε βοήτομετρο). Αν το ωμόμετρο δείξει άπειρο, σημαίνει ότι η επαφή είναι ανοικτή, ενώ αν δείξει μηδέν σημαίνει ότι η επαφή είναι κλειστή.
2. Ορίστε επιθυμητή τιμή ενεργοποίησης της εξόδου του οργάνου τους 60 °C.
3. Τροφοδοτήστε τη διάταξη.
4. Αυξήστε αργά τη θερμοκρασία του αισθητήριου (π.χ. με ένα αναπτήρα) και αφού αλλιάξει η κατάσταση της εξόδου, μειώστε τη (αφήστε το αισθητήριο να κρυώσει), παρακολουθώντας την ένδειξη θερμοκρασίας στο όργανο.
5. Καταγράψτε τη μεταβολή της θερμοκρασίας, καθώς και την κατάσταση της εξόδου του οργάνου.
6. Καταχωρίστε τις μετρήσεις σας στον ΠΙΝΑΚΑ Α.

ΠΙΝΑΚΑΣ Α

ΕΙΣΟΔΟΣ (σε °C)	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ (ON/OFF)

7. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Α σχεδιάστε τη χαρακτηριστική λειτουργία του οργάνου.

### έξοδος (ON/OFF)



θερμοκρασία (°C)

8. Από το διάγραμμα μετρήστε την υστέρηση που παρουσιάζει το όργανο. Μεταβάλλετε και ελέγχετε την υστέρηση του θερμικού διακόπτη. (Η υστέρηση του θερμικού διακόπτη μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με οδηγίες του κατασκευαστή).
9. Συνδέστε την είσοδο Χ ενός παλμογράφου στο αισθητήριο και την είσοδο Υ στην έξοδο μέσω μιας πηγής 5 V dc σε σειρά (αν το όργανο έχει έξοδο τάση οι ακροδέκτες του παλμογράφου να συνδεθούν απ' ευθείας στις επαφές εξόδου). Επιλέξτε ΧΥ τρόπο λειτουργίας του παλμογράφου.
10. Περιμένετε μέχρι το αισθητήριο να κρυώσει τελείως.
11. Επαναλάβετε το ερώτημα 2. Παρακολουθήστε τη χαρακτηριστική λειτουργίας του οργάνου στην οθόνη του παλμογράφου.
12. Ρυθμίστε την επιθυμητή θερμοκρασία ενεργοποίησης, ενδεικτικά στους 80 °C.
13. Επαναλάβετε τα ερωτήματα 2 έως 6.
14. Πώς μεταβάλλεται η υστέρηση με αύξηση της τιμής Preset Value;

## 2° τρίωρο

### Γ. Λειτουργία του ελεγκτή

1. Τοποθετήστε το αισθητήριο σε ένα κλειστό μικρό χώρο που θέλτε να θερμάνετε.
2. Επιλέξτε επιθυμητή θερμοκρασία τους 50°C.
3. Παρακολουθήστε τη μεταβολή της θερμοκρασίας στην οθόνη του οργάνου και καταγράψτε τη στον ΠΙΝΑΚΑ Β, έως ότου η θερμοκρασία σταθεροποιηθεί.

ΠΙΝΑΚΑΣ Β

ΧΡΟΝΟΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ [°C]
0 min	
1 min	
2 min	
3 min	
4 min	
.....	
κτλ.	

4. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Β σχεδιάστε τη χαρακτηριστική καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας στο συγκεκριμένο χώρο, συναρτήσει του χρόνου.

**θερμοκρασία (°C)**



**χρόνος (min)**

5. Στη γραφική παράσταση μετρήστε το χρόνο αποκατάστασης της θερμοκρασίας, την (πιθανή) υπερακόντιση και το σφάλμα μόνιμης κατάστασης.
6. Συνδέστε παράλληλα στο θερμοζεύγος ένα καταγραφικό.
7. Μεταβάλλετε την επιθυμητή θερμοκρασία στην SV του on/off ελεγκτή (ενδεικτική βηματική παρενόχληση από 100 °C σε 110 °C), μετρήστε τη θερμοκρασιακή κατάσταση του συστήματος και καταχωρίστε τις στον ΠΙΝΑΚΑ Γ.

ΠΙΝΑΚΑΣ Γ

ΧΡΟΝΟΣ από την στιγμή της ΕΝΤΟΛΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ (βηματικής παρενόχλησης)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ [°C]
0 min	
1 min	
2 min	
3 min	
4 min	
.....	
κτλ.	

8. Με τη βοήθεια του ΠΙΝΑΚΑ Γ σχεδιάστε τη χαρακτηριστική καμπύλη μεταβολής της θερμοκρασίας στο συγκεκριμένο χώρο, συναρτήσει του χρόνου για βηματική διαταραχή.

θερμοκρασία (°C)



χρόνος (min)

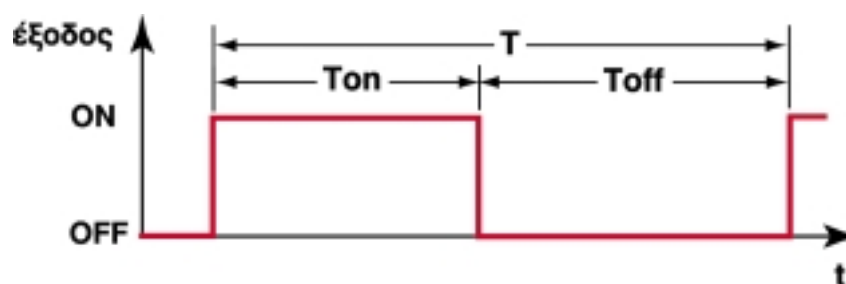
9. Συγκρίνετε την καμπύλη που σχεδιάσατε με την απόκριση από το καταγραφικό.
10. Δημιουργήστε διαφορετικές διαταραχές στη θερμοκρασία (ενδεικτικά 2°C - 5°C - 10°C - 15°C) και παρακολουθήστε την απόκριση του συστήματος. Τι συμπεραίνετε για την ύπαρξη ή όχι υστέρησης στο σύστημα.

## 3<sup>ο</sup> τρίωρο

### Δ. Βελτίωση της λειτουργίας του ελεγκτή

1. Συνδέστε ένα παλμογράφο στην είσοδο του θερμαντικού στοιχείου.
2. Θέσατε επιθυμητή θερμοκρασία τους 80°C. Όταν η θερμοκρασία αποκατασταθεί, δημιουργήστε μια βηματική διαταραχή και παρακολουθήστε τη μεταβολή της τροφοδοσίας του θερμαντικού στοιχείου στον παλμογράφο.
3. Μετρήστε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης.
4. Από το γράφημα του παλμογράφου υπολογίσατε τον κύκλο καθήκοντος φορτίου duty cycle όπου:

$$\text{duty cycle} = \frac{T_{\text{on}}}{T_{\text{on}} + T_{\text{off}}} \cdot 100\% \quad (\text{πρακτικά μικρότερο από } 300 \text{ Hz}).$$



5. Μετρήστε τη σταθερά χρόνου και το χρόνο αποκατάστασης της θερμοκρασίας του χώρου.
6. Μεταβάλλετε τον κύκλο καθήκοντος φορτίου του ελεγκτή στο 10 %.
7. Δημιουργήστε μία βηματική διαταραχή και μετρήστε τη σταθερά χρόνου και το χρόνο αποκατάστασης της θερμοκρασίας του χώρου.
8. Επαναλάβετε το ερώτημα 5 για τρεις ακόμη τιμές του κύκλου καθήκοντος φορτίου (έως το 70%).
9. Πώς επηρεάζει την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος ο κύκλος καθήκοντος φορτίου; Αποδείξτε πειραματικά ότι όσο μεγαλύτερος ο κύκλος καθήκοντος φορτίου τόσο πιο γρήγορα παρακολουθούνται θερμοκρασιακές μεταβολές.
10. Η ποιότητα ελέγχου του ON-OFF ελεγκτή καθορίζεται από το σφάλμα θερμοκρασίας σε βηματικές θερμοκρασιακές παρενοχλήσεις. Με μεγάλο κύκλο καθήκοντος φορτίου δημιουργήστε βηματικές παρενοχλήσεις (ενδεικτικά 5°C - 10 °C - 15°C) και βρείτε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Καταχωρίστε τις μετρήσεις στον ΠΙΝΑΚΑ Δ.

ΠΙΝΑΚΑΣ Δ

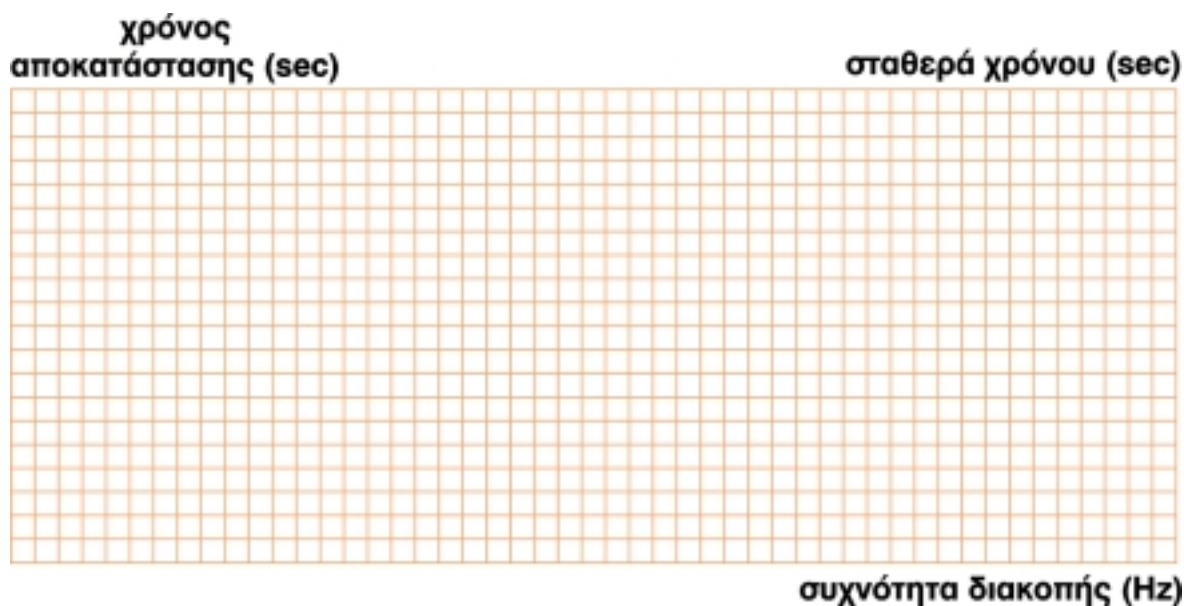
ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡ. (SV/W) [°C]	ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΚΡ. (PV/X) [°C]	ΣΦΑΛΜΑ (SV – PV) [°C]	ΣΧΕΤΙΚΟ ΣΦΑΛΜΑ %

- Σχολιάστε τα αποτελέσματα των μετρήσεών σας.
- Υπολογίστε τη χρονική καθυστέρηση στο συνολικό έλεγχο θερμοκρασίας του χώρου.
- Μεταβάλλετε τον κύκλο καθήκοντος φορτίου - Κ.Κ.Φ. (ενδεικτικά από 10 % – 70 %) για 8 διαφορετικές τιμές και καταγράψτε στον ΠΙΝΑΚΑ Ε την τιμή του.
- Δημιουργήστε κάθε φορά μια βηματική διαταραχή και καταγράψτε στον ΠΙΝΑΚΑ Ε τις τιμές του χρόνου αποκατάστασης, της σταθεράς χρόνου και της υπερακόντισης. Υπολογίστε την συχνότητα διακοπτικού ελέγχου.

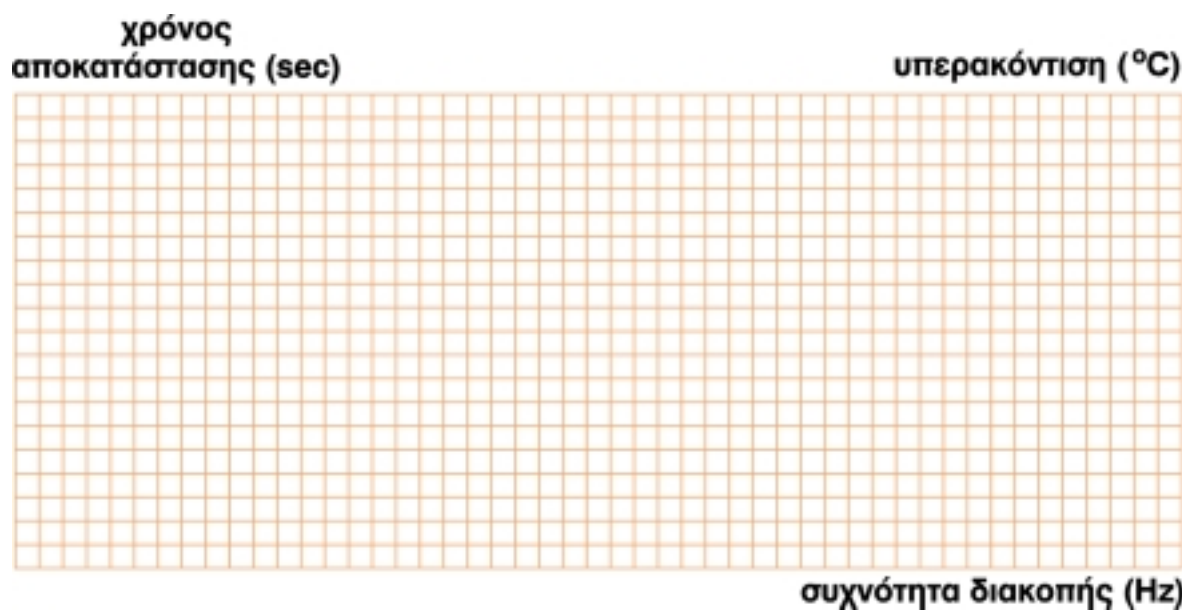
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε

Κ.Κ.Φ. [%]	ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΣΤΑΘΕΡΑ ΧΡΟΝΟΥ	ΥΠΕΡΑΚΟΝΤΙΣΗ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΚΟΠΗΣ

- Από τις τιμές του ΠΙΝΑΚΑ Ε δημιουργήστε τη γραφική παράσταση του χρόνου αποκατάστασης και της σταθεράς χρόνου συναρτήσει της συχνότητας διακοπής.



16. Από τις τιμές του ΠΙΝΑΚΑ Ε δημιουργήστε τη γραφική παράσταση του χρόνου αποκατάστασης και της πιθανής υπερακόντισης συναρτήσει της συχνότητας διακοπής.



17. Τι συμπεράσματα βγάξετε από τη μελέτη των δύο διαγραμμάτων;
18. Ορίστε την ποιότητα ελέγχου θερμοκρασίας χώρου.
19. Ορίστε τη σχέση ποιότητας ελέγχου και συχνότητας διακοπτικού ελέγχου.

## 4<sup>ο</sup> τρίωρο

### Ε. Δημιουργία συστήματος ελέγχου και βελτίωσή του

1. Θέλετε να θερμάνετε ένα συγκεκριμένο χώρο στους 200°C. Κάνετε όλες τις απαιτούμενες ρυθμίσεις.
2. Κάντε τις απαραίτητες ενέργειες και μετρήσεις και δημιουργήστε τη γραφική παράσταση της απόκρισης του συστήματος.
3. Δημιουργήστε την απόκριση του συστήματος και σε καταγραφικό ή σε παλμογράφο.
4. Μετρήστε το χρόνο αποκατάστασης, τη συχνότητα διακοπής και την υπερακόντιση του συστήματος.
5. Μετρήστε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης.
6. Κάντε τις απαραίτητες ρυθμίσεις, ώστε το σύστημα να γίνει κατά 20% γρηγορότερο.
7. Μετρήστε τώρα το χρόνο αποκατάστασης, την υπερακόντιση και το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Σχολιάστε τις νέες τιμές.
8. Ορίστε την ποιότητα ελέγχου θερμοκρασίας χώρου.
9. Ορίστε τη σχέση ποιότητας ελέγχου και συχνότητας διακοπτικού ελέγχου.

### ΣΤ. Ερωτήσεις

Απαντήστε τις παρακάτω ερωτήσεις πολλαπλών επιλογών:

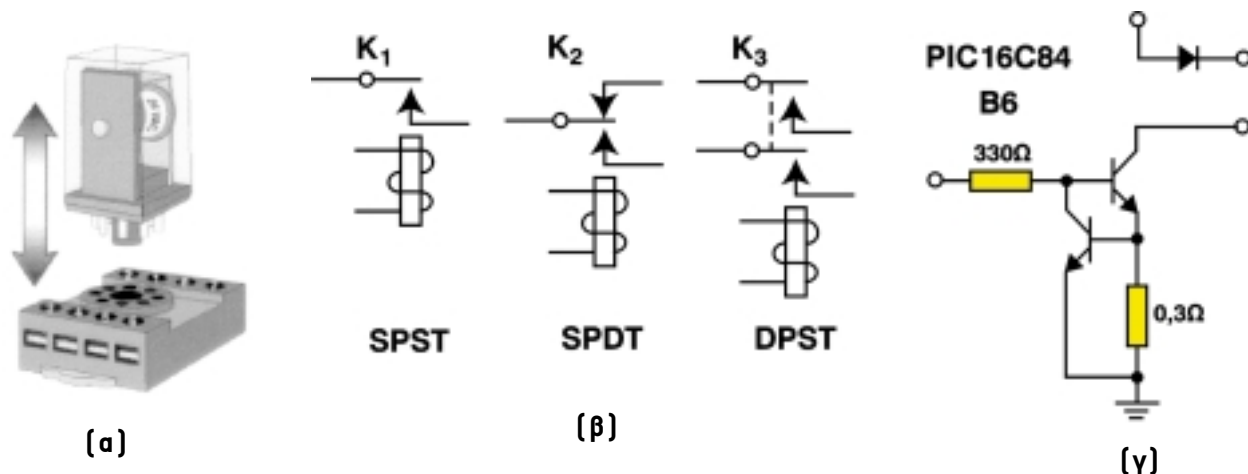
1. Κατά τον ON-OFF έλεγχο παρουσιάζεται μεγάλο ☐ / μικρό ☐ ρεύμα εκκίνησης.
2. Κατά τον ON-OFF έλεγχο υπάρχει ☐ / δεν υπάρχει ☐ μεγάλη πιθανότητα να καεί η ασφάλεια τήξης γιατί  
\_\_\_\_\_
3. Κατά τον ON-OFF έλεγχο με θερμοστάτη ο έλεγχος ανοικτού βρόχου είναι ☐ / δεν είναι ☐ δυνατός γιατί  
\_\_\_\_\_
4. Με ελεγκτές τριών καταστάσεων ON-MEDIUM-OFF έχουμε ταχύτερο ☐ / αργότερο ☐ έλεγχο σε σύγκριση με ON-OFF ελεγκτές δύο καταστάσεων.
5. Με ελεγκτές τριών καταστάσεων ON-MEDIUM-OFF έχουμε λιγότερες ☐ / περισσότερες ☐ αρμονικές σε σύγκριση με ON-OFF ελεγκτές δύο καταστάσεων για δεδομένη διακοπτική συχνότητα.
6. Το θερμαντικό στοιχείο ενισχύει ☐ / εξομαλύνει (βρίσκοντας τον μέσο όρο) ☐ του ηλεκτρικού θορύβου των παλμών δίνοντας ΝΑΙ ☐ / ΟΧΙ ☐ τον μέσο όρο των ON-OFF διακοπών.
7. Ο ON-OFF έλεγχος είναι ψηφιακός ☐ / αναλογικός ☐ τρόπος ελέγχου ή  
\_\_\_\_\_
8. Τι παρατηρείτε μεταβάλλοντας την υστέρηση του ελεγκτή;
9. Τι παρατηρείτε μεταβάλλοντας την υστέρηση του ελεγκτή σε τακτά χρονικά διαστήματα;
10. Δώστε τις τεχνικές προδιαγραφές των εξαρτημάτων της πειραματικής διάταξης.



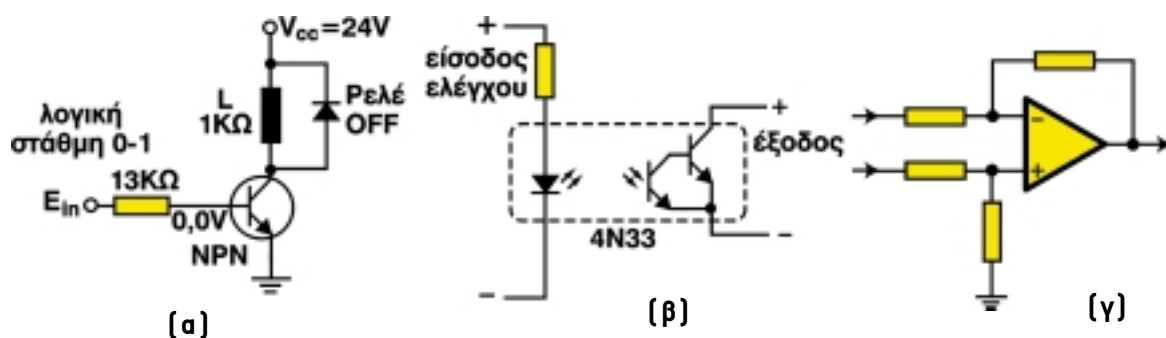
11. Ο ON-OFF έλεγχος είναι απλός / δύσκολος και χαμηλού / μεγάλου κόστους με μικρή / μεγάλη κατανάλωση, λειτουργεί για ευρείες / στενές περιοχές λειτουργίας (τάσης, θερμοκρασίας κτλ.) και απαιτεί ελάχιστη / πολύπλοκη διακρίβωση (ρύθμιση), αυξάνει / μειώνει την αξιοπιστία του κυκλώματος και φιλοσοφίας οδήγησης.
12. Ο ON-OFF έλεγχος είναι έχει κακή / καλή χαρακτηριστική εκκίνησης (startup), διαχειρίζεται μικρά / μεγάλα ρεύματα εκκίνησης κατά την εκκίνηση (κατάσταση ON, start up) και άρα απαιτεί στοιχεία δράσης (actuator) σχεδιασμένα για μικρά / μεγάλα ρεύματα, αυξάνει / μειώνει την αξιοπιστία οδήγησης εξόδου του συστήματος λόγω βλαβών και αυξάνει / μειώνει το θόρυβο των συστημάτων.
13. Δώστε πρακτικά παραδείγματα ON-OFF ελέγχου στην καθημερινή ζωή.

## Ζ. Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

### Η. Παράρτημα Ι: Κυκλώματα υλοποίησης on/off ελέγχου



Σχήμα 23.16: Ρελέ στερεάς κατάστασης για PWM



Σχήμα 23.17: (α) Ηλεκτρονική οδήγηση ηλεκτρομηχανικού ρελέ, (β) ρελέ στερεάς κατάστασης με οπτική απομόνωση και (γ) συγκριτής τάσης



## άσκηση 24

# Κατασκευή ενός Αναλογικού- Ολοκληρωτικού-Διαφορικού (PID) Ελεγκτή



## Στόχοι της άσκησης

**διάρκεια άσκησης: 6 διδακτικές ώρες**

Στο τέλος της άσκησης οι μαθητές θα είναι ικανοί:

- ⇒ να κατασκευάζουν τμήματα ενός ή ολόκληρου PID ελεγκτή.
- ⇒ να ελέγχουν τον ελεγκτή.
- ⇒ να χρησιμοποιούν συναφή ηλεκτρονικά όργανα.
- ⇒ να ελέγχουν τη λειτουργία των διαφόρων βαθμίδων ενός ελεγκτή με αναλογικά στοιχεία.

## Απαραίτητα εξαρτήματα

Για την πραγματοποίηση της άσκησης είναι απαραίτητα τα εξής υλικά:

- ✓ Τελεστικοί Ενισχυτές 741 ή OP11
- ✓ Αντιστάσεις, ποτενσιόμετρα, πυκνωτές, σύρμα με μόνωση
- ✓ Μία αναπτυξιακή πηλακέτα
- ✓ Ένα τροφοδοτικό dc τάσεων μεταβαλλόμενο  $\pm 15\text{ V}$
- ✓ Ένα καταγραφικό  $1 - 5\text{ V} / 4 - 20\text{ mA}$
- ✓ Πολύμετρα, αμπερόμετρο, βολτόμετρο
- ✓ Ένας παλμογράφος διπλής δέσμης

## Βασική θεωρία

Σε προηγούμενες ασκήσεις είδαμε τη λειτουργία βιομηχανικών P και PI ελεγκτών. Στην άσκηση αυτή υλοποιούμε με υλικό τρόπο (hardware) έναν κλασικό βιομηχανικό PID ελεγκτή, βλ. σχήμα 24.1. Όπως είναι γνωστό η αναλογική και η ψηφιακή υλοποίηση των P, PI, PID ελεγκτών δίνεται από τους τύπους του Πίνακα 1:

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1**

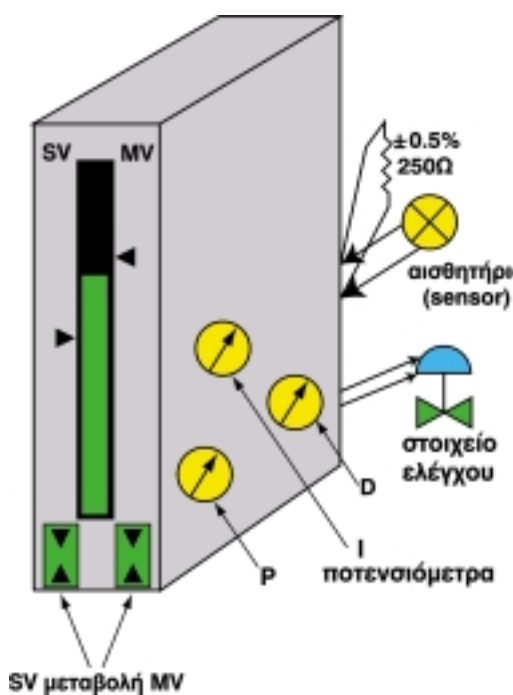
P ελεγκτής	$MV(t) = \text{Έξοδος} = P * \text{σφάλμα}$
PI ελεγκτής	$MV(t) = \text{Έξοδος} = P * \text{σφάλμα} + I * \text{Άθροισμα Σφαλμάτων}$
PID ελεγκτής	$MV(t) = P * \text{σφάλμα} + I * \text{Άθροισμα Σφαλμάτων} + D * \text{Διαφορά Σφαλμάτων}$

Όπου  $e(t)$  είναι το σφάλμα μεταξύ της εισόδου αναφοράς (επιθυμητής τιμής) και της μετρούμενης τιμής της εξόδου του συστήματος. Η βηματική απόκριση της εξόδου του συστήματος και όχι της εξόδου του ελεγκτή για διάφορες P, I, D δράσεις, δίνεται στο σχήμα 24.2, καθώς και η βηματική απόκριση της εξόδου του ελεγκτή και όχι

της εξόδου του συστήματος για διάφορες P, I, D δράσεις, δίνεται στο σχήμα 24.3. Αυτές οι βηματικές αποκρίσεις πρέπει να αποδοθούν από τον σχεδιαζόμενο και κατασκευαζόμενο PID ελεγκτή.



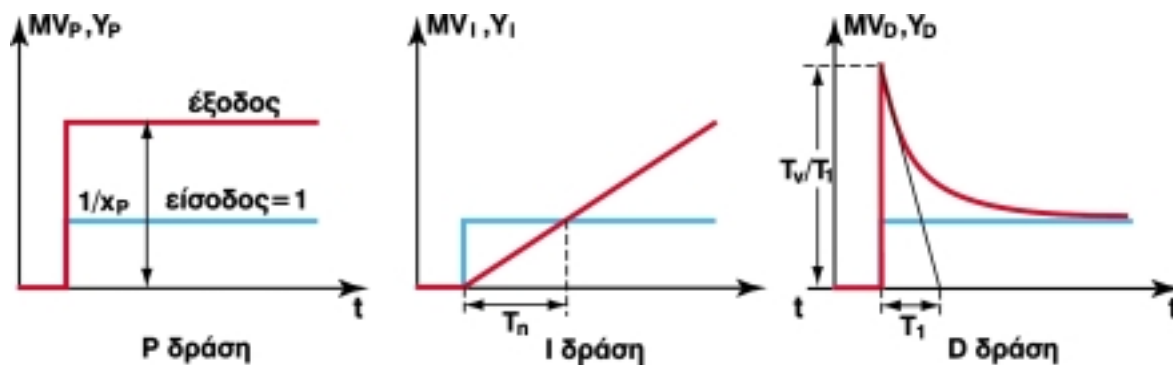
Σχήμα 24.1(α):  
Σύγχρονος ψηφιακός PID ελεγκτής



Σχήμα 24.1(β): Κλασικός βιομηχανικός PID ελεγκτής με αναλογικά ποτενσιόμετρα P,I,D ρύθμισης παραμέτρων

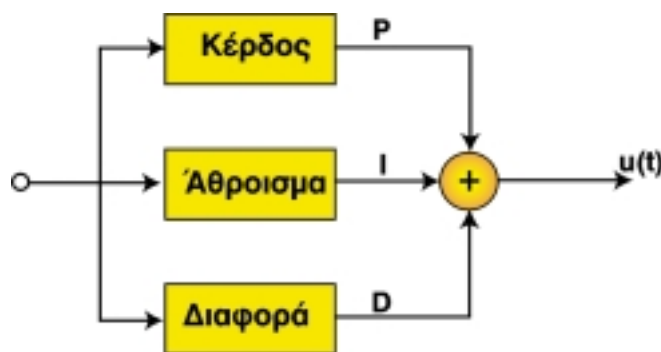


Σχήμα 24.2: Βηματική απόκριση εξόδου συστήματος (όχι εξόδου ελεγκτή) και επιλογή P, I, D δράσεων



Σχήμα 24.3: Βηματική απόκριση εξόδου ελεγκτή (όχι εξόδου συστήματος) και επιλογή P, I, D δράσεων

Το διάγραμμα βαθμίδων ενός PID ελεγκτή δίνεται στο σχήμα 24.4.

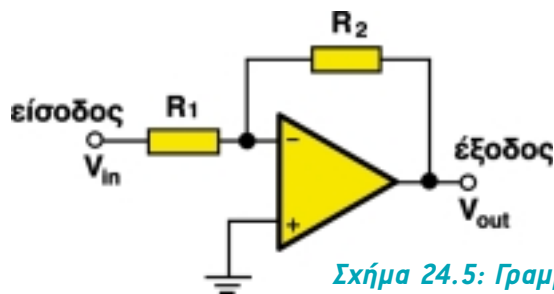


Σχήμα 24.4: Σχηματική αναλογική υλοποίηση των PID ελεγκτών

Όπως βλέπουμε στο σχήμα αυτό ο ελεγκτής αποτελείται από τρεις ανεξάρτητες βαθμίδες (αναλογικής δράσης, ολοκληρωτικής δράσης, διαφορικής δράσης) και έναν αθροιστή. Επίσης για να υλοποιηθεί ο PID ελεγκτής, χρειάζεται ένας συγκριτής για να υλοποιηθεί το σφάλμα  $e(t)$ .

As εξετάσουμε τώρα πώς μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα προς ένα τα δομικά στοιχεία που αποτελούν τον PID ελεγκτή.

Το αναλογικό στοιχείο του ελεγκτή είναι ένας απλός ενισχυτής. Μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί ένας αναστρέφων ενισχυτής (με ένα Τελεστικό Ενισχυτή), όμοιος με αυτόν του σχήματος 24.5.

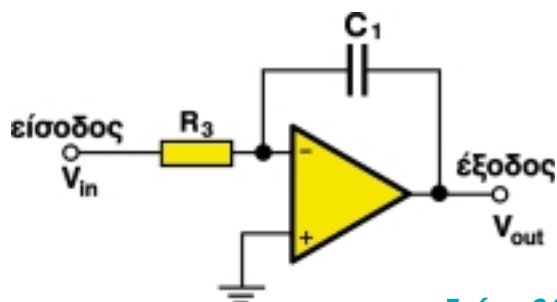


Σχήμα 24.5: Γραμμικός αναστρέφων ενισχυτής

Η απόκριση του ενισχυτή αυτού είναι

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in} \quad (24.1)$$

Ο ολοκληρωτής μπορεί να υλοποιηθεί με το κύκλωμα του σχήματος 24.6.

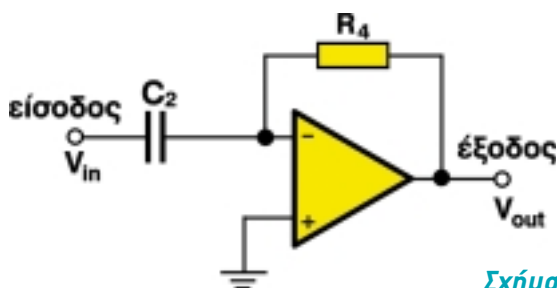


Σχήμα 24.6: Κύκλωμα ολοκλήρωσης

Η απόκριση του κυκλώματος αυτού είναι

$$V_{out} = -\frac{1}{R_3 C_1} \int V_{in}(t) dt \quad (24.2)$$

Τέλος το στοιχείο διαφόρισης μπορεί να υλοποιηθεί με το κύκλωμα του σχήματος 24.7.

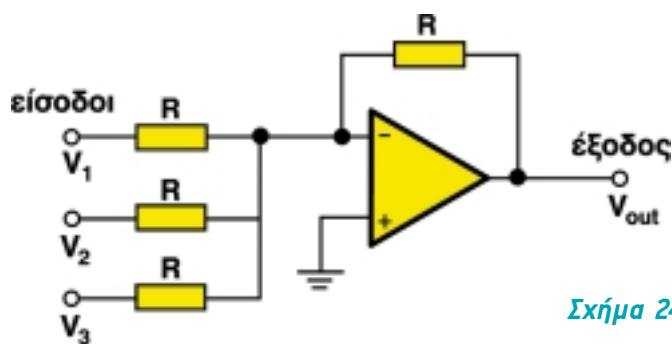


Σχήμα 24.7: Κύκλωμα διαφόρισης

Η απόκριση του κυκλώματος αυτού είναι

$$V_{out} = -R_4 C_2 \frac{dV_{in}}{dt} \quad (24.3)$$

Τα τρία αυτά κυκλώματα συνδέονται μέσω ενός κυκλώματος άθροισης, όμοιο με αυτό του σχήματος 24.8.

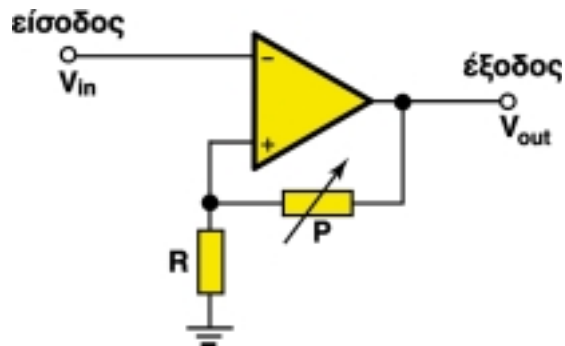


Σχήμα 24.8: Κύκλωμα αθροιστή

Η απόκριση του κυκλώματος άθροισης είναι

$$V_{out} = -(V_1 + V_2 + V_3) \quad (24.4)$$

Όπως ήδη αναφέραμε, για να δημιουργήσουμε το σφάλμα  $e$  απαιτείται ένας συγκριτής. Στο σχήμα 24.9 φαίνεται ένα κύκλωμα σύγκρισης.



Σχήμα 24.9: Κύκλωμα σύγκρισης με Schmitt trigger

Με το ποτενσιόμετρο P δημιουργούμε την τάση αναφοράς με την οποία συγκρίνεται η είσοδος  $V_{in}$ . Η απόκριση ενός απλού κυκλώματος αφαίρεσης τάσεων, σχήμα 24.10 είναι:

$$V_{out} = V_1 - V_2 \quad (24.5)$$

Από τις σχέσεις 24.1 έως 24.4 έχουμε ότι

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} V_{in} + \frac{1}{R_3 C_1} \int V_{in}(t) dt + R_4 C_2 \frac{dV_{in}(t)}{dt} \quad (24.6)$$

οπότε από το σχήμα 24.1, αν θεωρήσουμε ότι  $e = V_{in}$ , έχουμε ότι

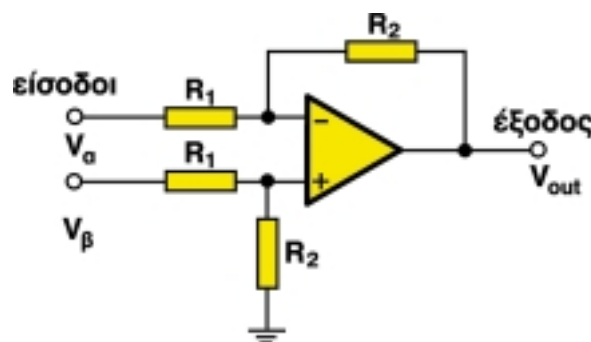
$$K_p = \frac{R_2}{R_1} \quad K_I = \frac{1}{R_3 C_1} \quad K_D = R_4 C_2$$

Η απόκριση του κυκλώματος του σχήμα 24.10 είναι:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_\beta - V_\alpha) \quad (24.7)$$

Έτσι η μία είσοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν είσοδος αναφοράς (set point), ενώ η άλλη σαν είσοδος για τη μετρούμενη τιμή. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται το σφάλμα  $e$ , που ενισχύεται με λόγο ενίσχυσης  $R_2/R_1$ .



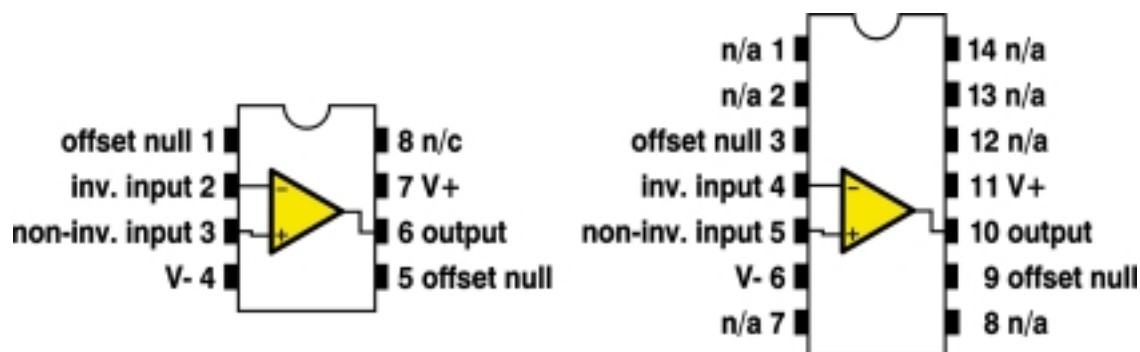


**Σχήμα 24.10: Κύκλωμα διαφορικού ενισχυτή, κατάλληλο για χρήση σαν P ελεγκτή**

Αν τώρα συνδέσουμε κατάλληλα τα κυκλώματα που παρουσιάζονται στα σχήματα 24.5 έως 24.10, μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα πλήρη PID ελεγκτή βλ. σχήμα 24.12. Να σημειώσουμε ότι εκτός από τον πλήρη PID ελεγκτή μπορούμε να δημιουργήσουμε και οποιονδήποτε άλλο ελεγκτή επιθυμούμε (P, PI, PD).

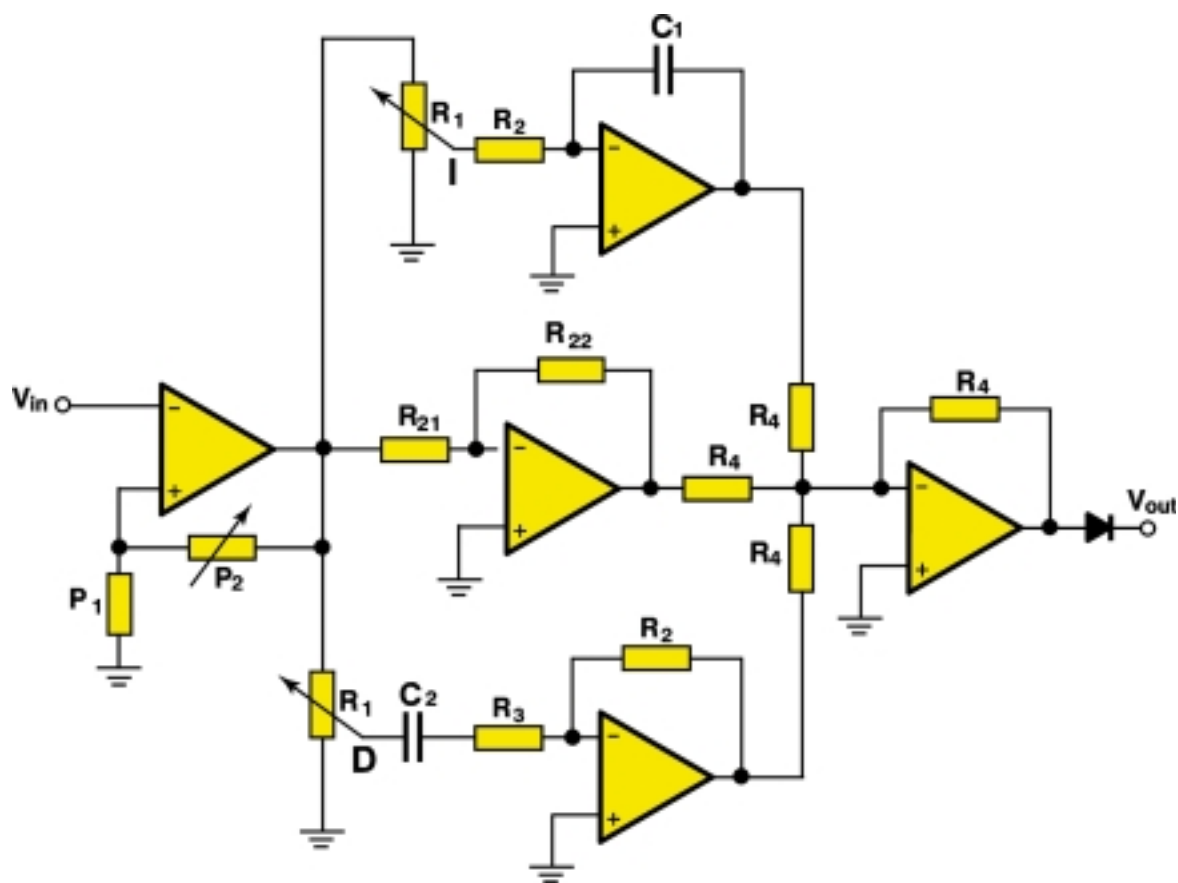
Πάντως, αν θέλουμε να δημιουργήσουμε έναν απλό P ελεγκτή αντί να ενώσουμε τις βαθμίδες ενός ενισχυτή, ενός αναστροφέα (αθροιστής μιας μόνο εισόδου) και ενός συγκριτή, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μόνο ένα διαφορικό ενισχυτή, σαν αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 24.10.

Στα κυκλώματα που παρουσιάσαμε μέχρι τώρα χρησιμοποιήσαμε τελεστικούς ενισχυτές. Για να δουλέψει όμως ένας τελεστικός ενισχυτής πρέπει να συνδέσουμε σε αυτόν κατάλληλα πηγή τροφοδοσίας. Ο τρόπος σύνδεσης των στοιχείων στους ακροδέκτες ενός Τελεστικού Ενισχυτή φαίνεται στο σχήμα 24.11.



**Σχήμα 24.11: Ακροδέκτες Τελεστικού Ενισχυτή 741 (8 - pin και 14 - pin)**

Οι ακροδέκτες In- και In+ αντιστοιχούν στις εισόδους - και + του Τελεστικού ενώ ο ακροδέκτης Out είναι η έξοδός του. Στους ακροδέκτες V- και V+ συνδέονται δύο συνεχείς τάσεις -5V και +5V αντίστοιχα (ο δεύτερος ακροδέκτης της κάθε πηγής γειώνεται).



Σχήμα 24.12: Ηλεκτρονικό κύκλωμα ενός PID ελεγκτή

## Διαδικασία

Κατά την εκτέλεση της άσκησης ακολουθήστε τα εξής βήματα:

### 1<sup>ο</sup> τρίωρο

#### A. Γενικές οδηγίες για την κατασκευή

1. Επιλέξτε τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα βάσει των τύπων της θεωρίας Ηλεκτρονικών για αναλογικό συγκριτή, ενισχυτή, αναλογικό ολοκληρωτή, αναλογικό διαφοριστή και αναλογικό αθροιστή.

2. Χρησιμοποιήστε σαν σήματα εισόδου ημίτονο 1-5 V ή χαμηλές τάσεις ή ρεύματα από αισθητήρες (mV, mA) ανάλογα την χρησιμοποιούμενη ενίσχυση.
3. Χρησιμοποιήστε παλμογράφο για τη σύγκριση εισόδου / εξόδου κάθε βαθμίδας.

## B. Κατασκευή κυκλώματος P ελεγκτή

4. Συνδέστε τα εξαρτήματα και κατασκευάστε έναν ενισχυτή τάσης (υλοποιεί το P) με μεταβλητή ενίσχυση. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο του συγκριτή τάσης, ώστε οι τάσεις εξόδου να μην παραμορφώνονται και τα σήματα εισόδου να ενισχύονται επαρκώς. Διαπιστώστε την λειτουργία του ενισχυτή τάσης.
5. Για να κατασκευάσετε τον αναλογικό ελεγκτή του σχήματος 24.10 θα χρησιμοποιήσετε τα εξής υλικά:
  - ένα Τελεστικό Ενισχυτή 741 (προτιμήστε τον τύπο με τους οκτώ ακροδέκτες)
  - δύο αντιστάσεις  $R_1=1\text{K}\Omega$
  - δύο συμμεταβληλλόμενα ποτενσιόμετρα  $R_2=100\text{K}\Omega$ .
6. Με τα υλικά αυτά κατασκευάστε το κύκλωμα του σχήματος 24.10, δίνοντας προσοχή στα εξής:
  - οι συνδέσεις στους ακροδέκτες του ολοκληρωμένου κυκλώματος του 741 θα γίνονται σύμφωνα με το σχήμα 24.11
  - στα ποτενσιόμετρα θα χρησιμοποιείτε τον ένα ακραίο ακροδέκτη (σταθερό άκρο) και τον μεσαίο (δρομέας)
  - μην παραλείψετε να συνδέσετε τις δύο πηγές πόλωσης στο ολοκληρωμένο (για τον τρόπο σύνδεσής τους βλ έπε και στο παράρτημα).
7. Συνδέστε στις δύο εισόδους δύο γεννήτριες συνεχούς τάσης 0-1V (γεννήτρια mV είναι επιθυμητή).
8. Ρυθμίστε τη τάση  $V_{\beta}$  (τάση αναφοράς) στα 200mV και την τάση  $V_{\alpha}$  (τάση εισόδου) στα 150mV (μέτρηση με βοητόμετρο).
9. Ρυθμίστε τα δύο ποτενσιόμετρα στα 20 K $\Omega$  (με ωμομέτρηση).
10. Συνδέστε ένα βοητόμετρο στην έξοδο του κυκλώματος. Μετρήστε την τάση εξόδου και επαληθεύστε την ορθότητα της σχέσης (24.7).
11. Αυξήστε την τάση εισόδου στα 190mV. Η σχέση 24.7 επαληθεύεται;
12. Κλείστε όλες τις συσκευές.
13. Αποσυνδέστε την πηγή συνεχούς από την τάση εισόδου ( $V_{\alpha}$ ) και τοποθετήστε μια πηγή εναλλασσόμενου. Επίσης χρησιμοποιήστε παλμογράφο και συνδέστε τη μια του είσοδο στην τάση εισόδου και την άλλη στην έξοδο του κυκλώματος (αντί του βοητόμετρου).
14. Ρυθμίστε την πηγή εναλλασσόμενου σε συχνότητα 1Hz, πλάτος 20mV και offset 200mV. Με τη ρύθμιση αυτή δημιουργούμε μια διαταραχή στο σήμα γύρω από τη θέση μόνιμης κατάστασης. Αν η γεννήτρια δεν διαθέτει offset, ρυθμίστε το πλάτος στα 220mV.
15. Τροφοδοτήστε τις συσκευές.
16. Στην οθόνη του παλμογράφου αποτυπώνεται η έξοδος του ελεγκτή, όπως και το σήμα εισόδου. Αν στον

παλμογράφο αποκόψετε τη συνεχή συνιστώσα του σήματος εισόδου (πιέζοντας το πλήκτρο AC του αντίστοιχου καναλιού), στην οθόνη θα έχετε την έξοδο του ελεγκτή και το σφάλμα μεταξύ εισόδου και τάσης αναφοράς.

17. Σχολιάστε τις κυματομορφές.
18. Επιλέξτε XY τρόπο λειτουργία του παλμογράφου. Τώρα στην οθόνη αποτυπώνεται η μεταβολή της εξόδου του P ελεγκτή συναρτήσει του σφάλματος (μεταξύ εισόδου και τάσης αναφοράς).
19. Υπολογίστε την κλίση της ευθείας και συγκρίνετε το αποτέλεσμα με το πηλίκο  $R_2/R_1$ .
20. Αλλάξτε τη συχνότητα της γεννήτριας στο 1KHz. Επαναλάβετε τα ερωτήματα 16, 17 και 18.
21. Διακόψτε την τροφοδοσία.

## Γ. Δημιουργία κυκλώματος ενίσχυσης

1. Κατασκευάστε τον ενισχυτή του σχήματος 24.5 (ακολουθήστε τις οδηγίες που δόθηκαν στο ερώτημα Β.4), χρησιμοποιώντας:
  - ένα Τελεστικό Ενισχυτή 741 (προτιμήστε τον τύπο με τους οκτώ ακροδέκτες)
  - μια αντίσταση  $R_1=1K\Omega$
  - ένα ποτενσιόμετρο  $R_2=100K\Omega$ .
2. Συνδέστε στην είσοδο μία γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης και στην έξοδο τη μια είσοδο ενός παλμογράφου. Τη δεύτερη είσοδο του παλμογράφου συνδέστε τη στην είσοδο του κυκλώματος.
3. Ρυθμίστε τη γεννήτρια σε πλάτος 100mV, συχνότητα 1Hz και το ποτενσιόμετρο σε τιμή 30K $\Omega$  (χρησιμοποιήστε ωμόμετρο).
4. Τροφοδοτήστε τις συσκευές.
5. Παρακολουθήστε τις κυματομορφές στην οθόνη του παλμογράφου. Μετρήστε τις τάσεις εισόδου και εξόδου και υπολογίστε την ενίσχυση του κυκλώματος. Επαληθεύεται η σχέση (24.1);
6. Αλλάξτε τη συχνότητα σε 100Hz και μετά σε 10KHz. Άλλαξε κάτι στο σήμα εξόδου του ελεγκτή (εκτός από τη συχνότητα);
7. Αυξήστε την τιμή του ποτενσιόμετρου. Αλλάζει η τάση εξόδου του ενισχυτή;
8. Κλείστε και αποσυνδέστε τις συσκευές χωρίς όμως να χαλάσετε το κύκλωμα.

## Δ. Κατασκευή κυκλώματος μονάδας ολοκλήρωσης

1. Συνδέστε τα εξαρτήματα και κατασκευάστε έναν ολοκληρωτή (υλοποιεί το I). Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο του συγκριτή τάσης, ώστε οι τάσεις εξόδου να μην παραμορφώνονται και τα σήματα εισόδου να ενισχύονται επαρκώς. Διαπιστώστε τη λειτουργία του ολοκληρωτή.
2. Κατασκευάστε το κύκλωμα ολοκλήρωσης του σχήματος 24.6 (ακολουθήστε τις οδηγίες που δόθηκαν στο ερώτημα 4 και 6), χρησιμοποιώντας:
  - ένα Τελεστικό Ενισχυτή 741 (προτιμείστε τον τύπο με τους οκτώ ακροδέκτες)

- ένα πυκνωτή  $C1=1\mu F$
  - ένα ποτενσιόμετρο  $R3=1k\Omega$ .
3. Συνδέστε στην είσοδο μία γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης και στην έξοδο τη μια είσοδο ενός παλμογράφου. Τη δεύτερη είσοδο του παλμογράφου συνδέστε τη στην είσοδο του κυκλώματος.
  4. Ρυθμίστε τη γεννήτρια σε πλάτος 100mV, συχνότητα 1Hz και το ποτενσιόμετρο σε τιμή 300Ω (χρησιμοποιήστε ωμόμετρο).
  5. Τροφοδοτήστε τις συσκευές.
  6. Παρακολουθήστε τις κυματομορφές στην οθόνη του παλμογράφου. Μετρήστε τις τάσεις εισόδου και εξόδου.
  7. Ρυθμίστε τη συχνότητα στα 10 Hz και μετά στα 100Hz.
  8. Παρακολουθήστε τις κυματομορφές στην οθόνη του παλμογράφου. Μετρήστε τις τάσεις εισόδου και εξόδου.
  9. Άλλαξε η τάση εξόδου του κυκλώματος ολοκλήρωσης; Πώς επηρεάζει η συχνότητα της γεννήτριας (στην εφαρμογή αντιστοιχεί στη συχνότητα του σήματος του σφάλματος) την απόκριση του κυκλώματος;
  10. Μειώστε την τιμή του ποτενσιόμετρου μέχρι να μηδενιστεί, ενώ παρακολουθείτε στον παλμογράφο το σήμα εξόδου. Πώς μεταβλήθηκε;
  11. Κλείστε και αποσυνδέστε τις συσκευές χωρίς όμως να χαλάσετε το κύκλωμα.

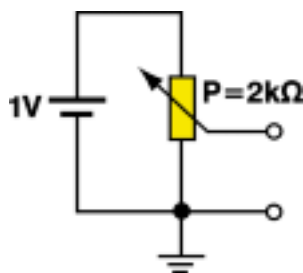
## E. Κατασκευή κυκλώματος μονάδας διαφόρισης

1. Συνδέστε τα εξαρτήματα και κατασκευάστε έναν διαφοριστή (υλοποιεί το D). Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο του συγκριτή τάσης, ώστε οι τάσεις εξόδου να μην παραμορφώνονται και τα σήματα εισόδου να ενισχύονται επαρκώς. Διαπιστώστε την λειτουργία του διαφοριστή.
2. Κατασκευάστε το κύκλωμα διαφόρισης του σχήματος 24.7 (ακολουθήστε τις οδηγίες που δόθηκαν στο ερώτημα B.4 και B.6), χρησιμοποιώντας:
  - ένα Τελεστικό Ενισχυτή 741 (προτιμήστε τον τύπο με τους οκτώ ακροδέκτες)
  - ένα πυκνωτή  $C2=1\mu F$
  - ένα ποτενσιόμετρο  $R3=1k\Omega$ .
3. Συνδέστε στην είσοδο μία γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης και στην έξοδο τη μια είσοδο ενός παλμογράφου. Τη δεύτερη είσοδο του παλμογράφου συνδέστε τη στην είσοδο του κυκλώματος.
4. Ρυθμίστε τη γεννήτρια σε πλάτος 100mV, συχνότητα 1Hz και το ποτενσιόμετρο σε τιμή 100 Ω (χρησιμοποιήστε ωμόμετρο).
5. Τροφοδοτήστε τις συσκευές.
6. Παρακολουθήστε τις κυματομορφές στην οθόνη του παλμογράφου. Μετρήστε τις τάσεις εισόδου και εξόδου.
7. Ρυθμίστε τη συχνότητα στα 10 Hz και μετά στα 100Hz.

8. Παρακολουθήστε τις κυματομορφές στην οθόνη του παλμογράφου. Μετρήστε τις τάσεις εισόδου και εξόδου.
9. Άλλαξε η τάση εξόδου του κυκλώματος διαφόρισης; Πώς επηρεάζει η συχνότητα της γεννήτριας (στην εφαρμογή αντιστοιχεί στη συχνότητα του σήματος του σφάλματος) την απόκριση του κυκλώματος;
10. Αυξήστε την τιμή του ποτενσιόμετρου, ενώ παρακολουθείτε στον παλμογράφο το σήμα εξόδου. Πώς μεταβλήθηκε;
11. Κλείστε και αποσυνδέστε τις συσκευές μέτρησης χωρίς όμως να χαλάσετε το κύκλωμα.

## ΣΤ. Κατασκευή κυκλώματος αθροιστή και αφαιρέτη

1. Συνδέστε τα εξαρτήματα και κατασκευάστε έναν αντιστροφέα. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο του συγκριτή τάσης, ώστε οι τάσεις εξόδου να μην παραμορφώνονται και τα σήματα εισόδου να ενισχύονται επαρκώς. Διαπιστώστε την λειτουργία του αντιστροφέα.
2. Συνδέστε τα εξαρτήματα και κατασκευάστε ένα συγκριτή τάσης. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο του συγκριτή τάσης, ώστε οι τάσεις εξόδου να μην παραμορφώνονται και τα σήματα εισόδου να ενισχύονται επαρκώς. Διαπιστώστε την λειτουργία του συγκριτή τάσης.
3. Συνδέστε τα εξαρτήματα και κατασκευάστε έναν αθροιστή. Ρυθμίστε τον αθροιστή ώστε οι τάσεις εξόδου να μην παραμορφώνονται και τα σήματα εισόδου να ενισχύονται επαρκώς. Διαπιστώστε την λειτουργία του αθροιστή.
4. Δημιουργήστε το κύκλωμα του αθροιστή του σχήματος 24.8, χρησιμοποιώντας τέσσερις αντιστάσεις του  $1\text{K}\Omega$ .
5. Συνδέστε στις εισόδους τρεις γεννήτριες συνεχούς τάσης και στην έξοδο ένα βολτόμετρο.
6. Ρυθμίστε τις γεννήτριες σε τιμές 2V, 4V, 5V. Μετρήστε την τάση εξόδου. Επαληθεύεται η σχέση (24.4);
7. Δημιουργήστε το κύκλωμα αφαίρεσης τάσεων του σχήματος 24.10, χρησιμοποιώντας τέσσερις αντιστάσεις  $1\text{K}\Omega$ .
8. Στο κύκλωμα αυτό θα θεωρήσουμε σαν επιθυμητή τιμή την  $V_1$  και σαν μετρούμενη τιμή την  $V_2$ . Την επιθυμητή τιμή μπορούμε να τη δημιουργήσουμε με το κύκλωμα του σχήματος χρησιμοποιώντας ένα ποτενσιόμετρο  $2\text{K}\Omega$  και μία πηγή 1V.



9. Συνδέστε στις δύο εισόδους δύο πηγές συνεχούς τάσης με τιμές 100mV και 80mV.
10. Με ένα βολτόμετρο μετρήστε την τάση στην έξοδο του κυκλώματος. Επαληθεύεται η σχέση 24.5;
11. Αθροίστε τις τάσεις εξόδου του ενισχυτή τάσης, ολοκληρωτή, διαφοριστή (υλοποιεί το  $PID = P + I + D$ ).

## 2<sup>ο</sup> τρίωρο

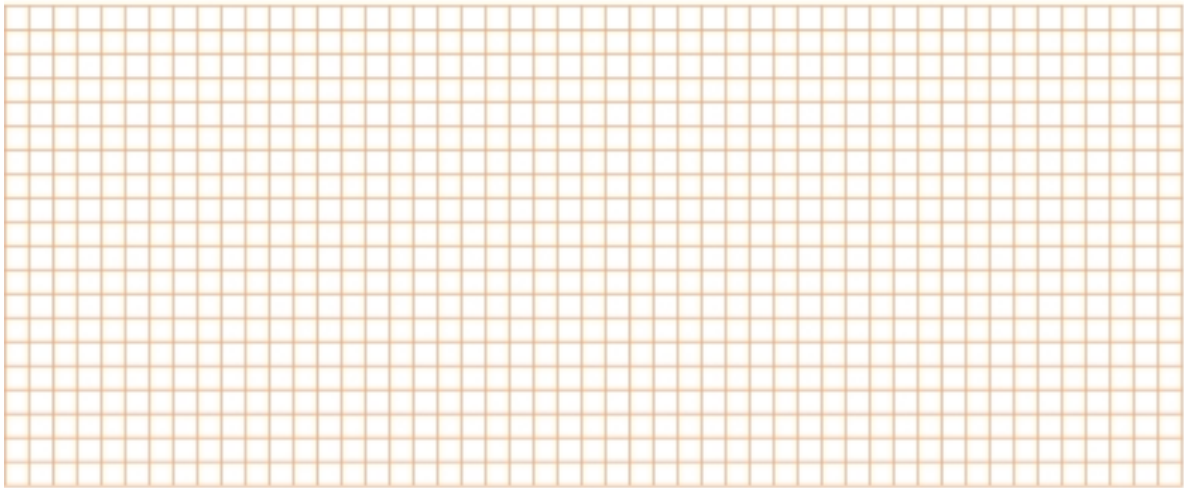
### Ζ. Κατασκευή PI και PID ελεγκτών

1. Μέχρι τώρα έχετε κατασκευάσει όλα τα δομικά μέρη μιας μονάδας ελέγχου. Συνδέστε τις διάφορες μονάδες και δημιουργήστε έναν ελεγκτή PI.
2. Ρυθμίστε την επιθυμητή τιμή στα 100mV.
3. Συνδέστε στην είσοδο του κυκλώματος μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης με πλάτος 10mV, τάση offset 100mV και συχνότητα 10Hz.
4. Συνδέστε στην έξοδο του κυκλώματος ένα παλμογράφο και παρακολουθήστε την τάση εξόδου.
5. Αλλάξτε τη συχνότητα της γεννήτριας σε 100Hz. Τι άλλαξε στην τάση εξόδου;
6. Αλλάξτε διαδοχικά το κέρδος και το συντελεστή ολοκλήρωσης του ελεγκτή και παρατηρήστε τις μεταβολές της τάσης εξόδου. Τι παρατηρείτε;
7. Συνδέστε τις διάφορες μονάδες και δημιουργήστε έναν ελεγκτή PID.
8. Ρυθμίστε την επιθυμητή τιμή στα 100mV.
9. Συνδέστε στην είσοδο του κυκλώματος μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης με πλάτος 10mV, τάση offset 100mV και συχνότητα 10Hz.
10. Συνδέστε στην έξοδο του κυκλώματος ένα παλμογράφο και παρακολουθήστε την τάση εξόδου.
11. Αλλάξτε τη συχνότητα της γεννήτριας σε 100Hz. Τι άλλαξε στην τάση εξόδου;
12. Αλλάξτε διαδοχικά το κέρδος, το συντελεστή ολοκλήρωσης και το συντελεστή διαφορίσης του ελεγκτή και παρατηρήστε τις μεταβολές της τάσης εξόδου. Τι παρατηρείτε;

### Η. Τελικός έλεγχος - Έλεγχος Λειτουργίας/Αξιολόγηση PID ελεγκτή

1. Ελέγξτε τις συνδέσεις και την κατασκευή.
2. Όταν ολοκληρωθεί η καλωδίωση του P ελεγκτή, το τροφοδοτούμε συνολικά με τάση από το τροφοδοτικό (μέχρι τώρα τροφοδοτήσαμε τάση ανά βαθμίδα).
3. Ελέγξτε προκαταρκτικά την λειτουργία κάθε βαθμίδας και συνολικά.

ταχύτητα κινητήρα ή  
στάθμη δεξαμενής

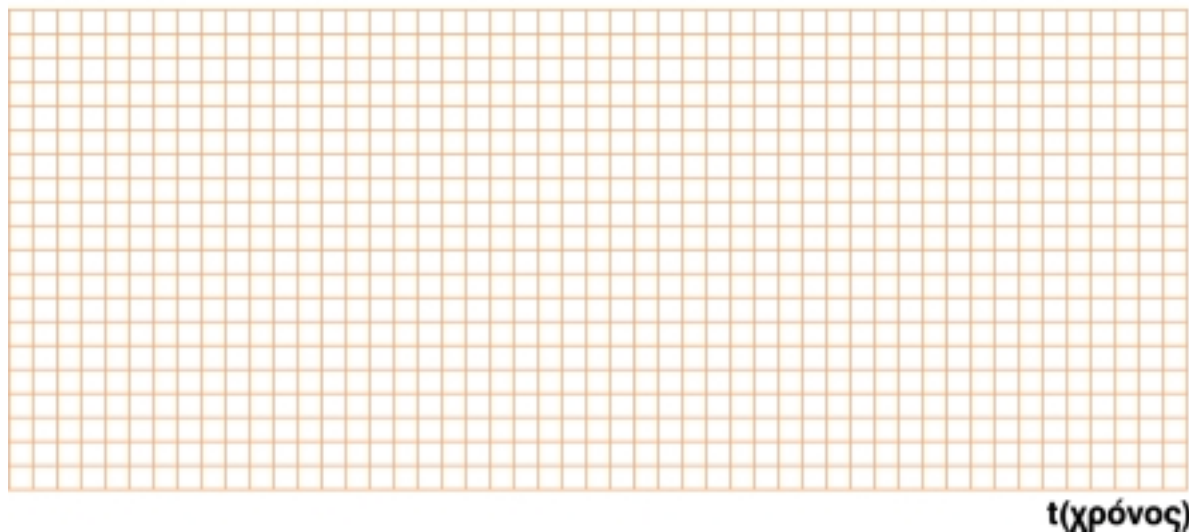


t(χρόνος)

4. Επιλέξατε έναν σύστημα για έλεγχο, δηλ. πειραματικές διατάξεις προς έλεγχο από τις προηγούμενες ασκήσεις, π.χ. έλεγχος ταχύτητας κινητήρα συνεχούς ρεύματος ή έλεγχος στάθμης δεξαμενής.
5. Ρυθμίστε το κέρδος του P ελεγκτή και καταγράψτε με P ελεγκτή την απόκριση της εξόδου του συστήματος και την απόκριση της εξόδου (MV, Y) του ελεγκτή.
6. Αξιολογήστε - σχολιάστε τις παραπάνω διαπιστώσεις για δράση (έξοδο) του πειραματικού PID ελεγκτή.
7. Καταγράψτε διαφορετικές αποκρίσεις του συστήματος με γρήγορη / αργή απόκριση με / χωρίς υπερακόντιση. Καταγράψτε το κέρδος του P ελεγκτή για κάθε περίπτωση.
8. Υλοποιήστε βηματική αλλαγή και επαληθεύσατε την απόκριση των ελεγκτών σε κάθε ρυθμό λειτουργίας (P, I, D) και σε συνδυασμούς τους, με ρυθμίσεις των αντίστοιχων ποτενσιόμετρων P, I, D.
9. Υλοποιήστε και τον PI, PID και PD ελεγκτή σύμφωνα με τα ανωτέρω.
10. Επαναλάβετε τα παραπάνω βήματα αξιολόγησης του ελεγκτή και προσπαθήστε να σχεδιάσετε (επιτύχετε) τη βηματική απόκριση εξόδου συστήματος (όχι εξόδου ελεγκτή), βλ. σχήμα 24.2 και τη βηματική απόκριση εξόδου ελεγκτή (όχι εξόδου συστήματος), βλ. σχήμα 24.3, με επιλογή των P, I και D δράσεων.
11. Μελετήστε τις εισόδους και εξόδους, επιθυμητή τιμή (Set Value, SV / W), μετρούμενη τιμή (Process Value, PV / X), έξοδος ελεγκτή, (Manipulated Value, MV / Y) στη συνδεσμολογία του ελεγκτή.



ταχύτητα κινητήρα ή  
στάθμη δεξαμενής



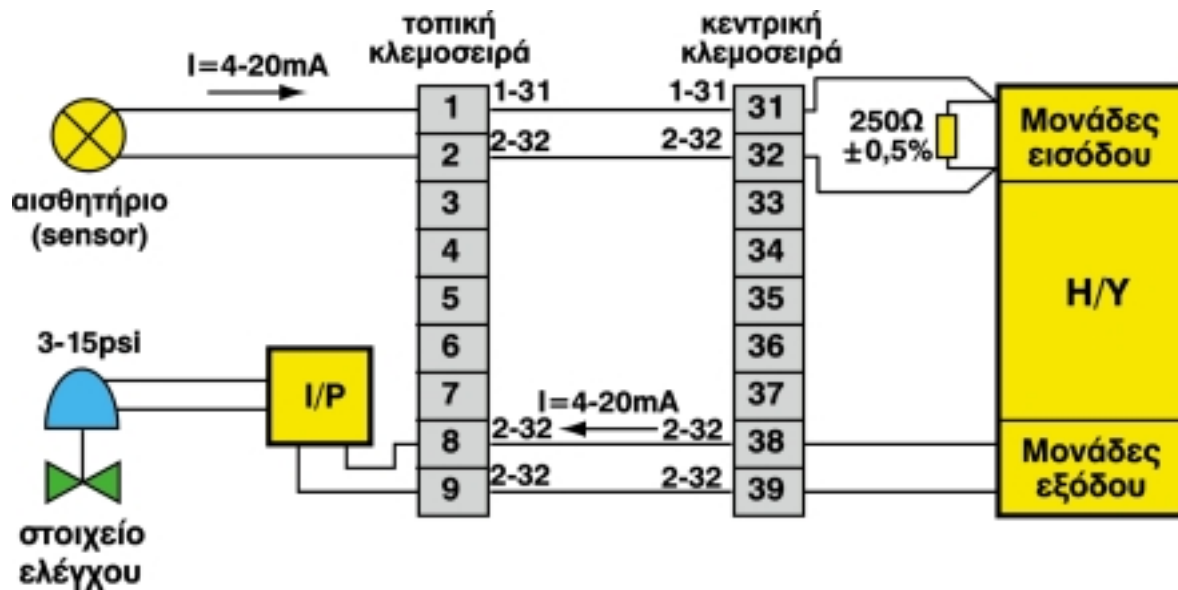
Σχήμα 24.13: Πειραματική μέτρηση απόκρισης συστήματος υπό PID έλεγχο

12. Ελέγξτε χειροκίνητα τον ελεγκτή σας. Τι παρατηρείτε;
13. Μετρήστε / καταγράψετε εξόδους του ελεγκτή 4 - 20 mA σε χειροκίνητο (MANUAL) ρυθμό.

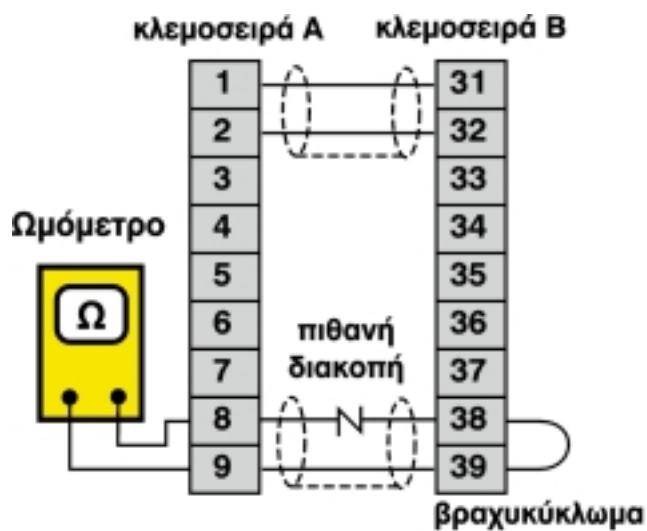
## Θ. Εγκατάσταση PID ελεγκτή

Στο σχήμα 24.10 δίνεται η βασική συνδεσμολογία σήματος κλειστού βρόχου στα ΣΑΕ. Αποτελείται από τη μέτρηση (αισθητήρα, sensor) και το στοιχείο ελέγχου (actuator).

1. Μελετήστε την συνδεσμολογία του ελεγκτή βλ. σχήμα 24.14.
2. Καθορίστε τα βήματα συντήρησης ενός ελεγκτή, βλ. σχήματα 24.14 και 24.15.
3. Δημιουργήστε μια πιθανή διακοπή καλωδίου και ανιχνεύστε τη θέση της διακοπή του καλωδίου με ωμόμετρο (το συνολικό καλώδιο αντικαθίσταται από διαθέσιμα (spare) καλώδια).
4. Μια πιθανή διαρροή ρεύματος ανιχνεύεται με μεγερρόμετρο (γεννήτρια 500 V) αφού αποσυνδεθούν όλα τα ηλεκτρονικά για να μην κεραυνοβοληθούν και καούν από την τάση 500 V (σε περίπτωση διαρροής το συνολικό καλώδιο αντικαθίσταται από διαθέσιμα (spare) καλώδια). Κάντε μεγερρομέτρηση.



Σχήμα 24.14: Βασική συνδεσμολογία σήματος στα ΣΑΕ - Συνδεσμολογία κλειστού βρόχου



Σχήμα 24.15(α): Ανύχνευση πιθανής διακοπής με ωμόμετρο



Σχήμα 24.15(β): Ανύχνευση πιθανής διακοπής με μεγγέρομετρο

## I. Ερωτήσεις

1. Δώστε τις τεχνικές προδιαγραφές ενός ελεγκτή.
2. Εάν ένας ή περισσότεροι τελεστικοί ενισχυτές σε κάθε βαθμίδα του σχήματος 24.8 οδηγηθεί στον κόρο έχουμε παραμορφώσεις τους σήματος, οπότε υποβαθμίζεται η λειτουργία του PID ελεγκτή. Ποιο το αποτέλεσμα μιας τέτοιας κατάστασης κόρου;
3. Εάν ένας ή περισσότεροι τελεστικοί ενισχυτές σε κάθε βαθμίδα του σχήματος 24.8 οδηγηθεί στον κόρο έχουμε παραμορφώσεις τους σήματος, οπότε υποβαθμίζεται η λειτουργία του PID ελεγκτή. Πιστεύετε ότι χάνεται εντελώς ο έλεγχος σε μια τέτοια κατάσταση κόρου;
4. Τι είναι ο ευφυής ελεγκτής;
5. Κατασκευάστε έναν αναλογικό (P) ελεγκτή και δευτερευόντως τον I και D ελεγκτή.
6. Ελέγξτε και ρυθμίστε τον PID ελεγκτή.
7. Πώς κατασκευάζεται ένας PID ελεγκτής με ψηφιακά στοιχεία;
8. Ποια η διαφορά μεταξύ διακοπής και διαρροής καλωδίου;
9. Ποιος είναι και γιατί ο καλύτερος έλεγχος μεταξύ του ελέγχου διακοπής και ελέγχου διαρροής καλωδίου;

## ΙΑ. Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα

## ΙΒ. Παράρτημα

ΙΒ1. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΡΙD ΕΛΕΓΚΤΗ	
Λειτουργία	<i>συνεχής, διακοπτόμενη εξωτερικά</i>
Ασφάλεια λειτουργίας	<i>διαχωρισμός λειτουργίας και ρύθμισης, κλειδωμένες παράμετροι, αξιοπιστία χειρισμών</i>
Είσοδοι	<i>ρεύματος, θερμοζευγών, αντίστασης, ρεύματος, τάσης</i>
Παρουσίαση (Display)	<i>LCD (PV, SV, MV, κατάσταση) <math>\pm 9999</math></i>
Πρόσθετα χαρακτηριστικά	<i>1. χωρίς διαταραχές (bumpless) μεταφορά από manual σε auto 2. αυτορύθμιση (self-tuning) 3. έλεγχος προγράμματος 4. εξωτερική επιθυμητή τιμή (SV) 5. έλεγχος λόγου (ratio control) 6. ανάδραση θέσης για βηματικούς ελεγκτές τριών σημείων 7. είσοδος δεύτερης μέτρησης 8. είσοδος διαφοράς θερμοκρασίας</i>
Θερμοκρασία περιβάλλοντος	<i>60° C</i>
Κατανάλωση	<i>Χαμηλή</i>
MTBF (χρόνος βλάβης)	<i>6 χρόνια</i>
Προστασία σκόνη / υγρασία	<i>IP 54 / 65</i>
RF παρεμβολές	<i>Υψηλή ανοσία και μείωση</i>
EEPROM	<i>με ασφάλεια δεδομένων (data security)</i>

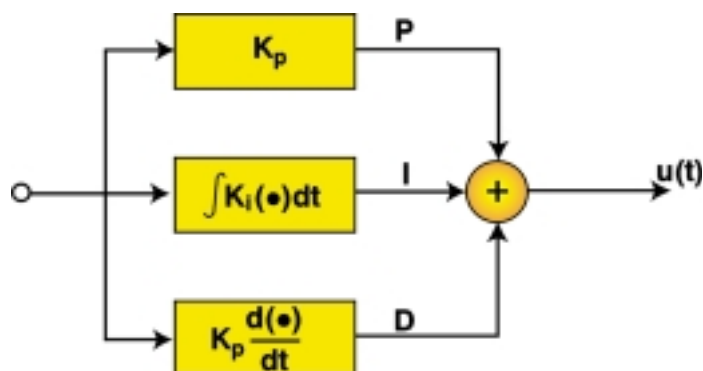
### ΙΒ2. ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΕΛΕΓΚΤΗ

Ο ελεγκτής συντηρείται (από εκπαιδευμένο κατάλληλα προσωπικό) με:

- οπτικό έλεγχο συνδέσεων (καλή κατάσταση και καθαριότητα, έλεγχος χρώματος)*
- έλεγχο λειτουργίας (και έλεγχο χρησιμοποιούμενων λειτουργιών)*
- έλεγχο πλήκτρων και παρουσίαση πληροφοριών (display)*
- έλεγχο ηλεκτρικής και ηλεκτρονικής απομόνωσης τους (π.χ. γαλβανικής)*
- έλεγχο συνδέσεων εισόδου (π.χ. πολικότητας σημάτων)*
- έλεγχο τροφοδοσίας*
- έλεγχο περιοχών μέτρησης με ρυθμιστές (calibrators) ή με πηγές σήματος ακρίβειας*
- επίδειξη συμπεριφοράς ευσταθείας σε διάφορες μεταβολές*
- αν δεν είναι δυνατή η συντήρηση στο πεδίο (on-site) επιστροφή στον κατασκευαστή για συντήρηση*

### IB3. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ PID ΕΛΕΓΚΤΗ

Εδώ δίνονται με αυστηρά μαθηματικά οι τύποι του PID ελεγκτή που χρησιμοποιήθηκαν στην άσκηση 24.



Σχήμα 24.16: Σχηματική αναλογική υλοποίηση των PID ελεγκτών

Η αναλογική υλοποίηση των P, PI και PID ελεγκτών του PID ελεγκτή δίνεται στους παρακάτω τύπους:

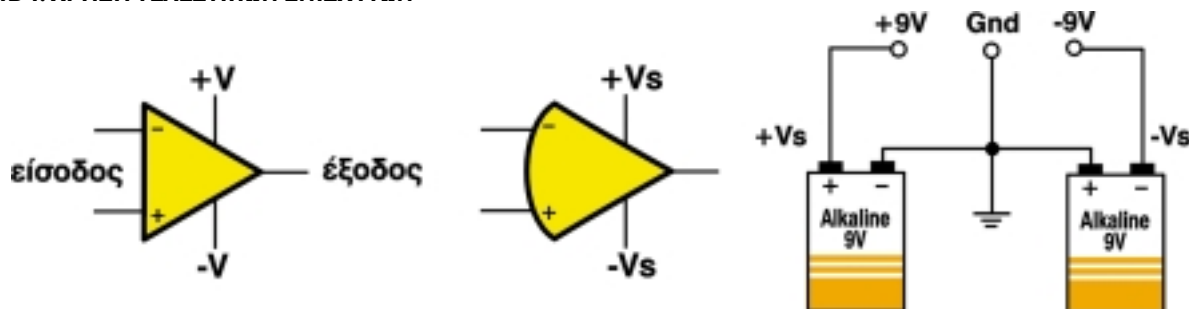
ΠΙΝΑΚΑΣ 1

P ελεγκτής	$OUTPUT = K_p[e(T)]$
PI ελεγκτής	$OUTPUT = K_p[e(t)] + \frac{1}{I} \int e(t)dt$
PID ελεγκτής	$OUTPUT = K_p[e(t)] + \frac{1}{I} \int e(t)dt + D \frac{de(t)}{dt}$

Ενώ η ψηφιακή υλοποίηση του PID ελεγκτή δίνεται στον παρακάτω τύπο:

$$c(t) = c_0 + K_C \left[ e(t) + \frac{\Delta t}{\tau_I} \sum_{i=1}^K e(i\Delta t) + \tau_D \frac{e(t) - e(t - \Delta t)}{\Delta t} \right]$$

### IB4. ΧΡΗΣΗ ΤΕΛΕΣΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ



Σχήμα 24.17: Τελεστικοί ενισχυτές και τρόπος δημιουργίας τάσης -9 Volts ≈ +9 Volts

ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ – ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ του 741 ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Τάση τροφοδοσίας	$\pm 18 \text{ Volts}$
Εσωτερική κατανάλωση ισχύος	$500 \text{ mW}$
Διαφορική τάση εισόδου	$\pm 30 \text{ Volts}$
Τάση εισόδου	$\pm 15 \text{ Volts}$
Τάση μετατόπισης μηδέν / V-	$\pm 0.5 \text{ Volt}$
Περιοχή θερμοκρασίας λειτουργίας	$0^\circ \text{ C} \div +70^\circ \text{ C}$
Περιοχή θερμοκρασίας αποθήκευσης	$-65^\circ \text{ C} \div +150^\circ \text{ C}$
Θερμοκρασία κόλλησης για 60 sec	$300^\circ \text{ C}$
Βραχυκύκλωμα εξόδου	<i>Μεγάλης διάρκειας</i>

Δίνονται ενδεικτικές (και όχι μοναδικές) τιμές των αντιστάσεων και πυκνωτών  $R_1, R_2, R_3, R_4, C_1, C_2$  των παραπάνω κυκλωμάτων, βλ. σχήμα 24.12:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 100 \text{ k}\Omega & R_2, R_{22} &= 1 - 2 - 50 - 100 \text{ k}\Omega \\
 P_1 &= 5 \text{ k}\Omega & P_2 &= 10 \text{ k}\Omega \\
 R_3, R_{21} &= 100 - 200 \Omega & R_4 &= 2 - 10 - 100 \text{ k}\Omega \\
 C_1 &= 100 \text{ nF} - 10 \mu\text{F} & C_2 &= 100 \text{ nF} - 1 \mu\text{F}
 \end{aligned}$$

(Ωστόσο ανάλογα τις διαθέσιμες πειραματικές διατάξεις, τόσο ο διδάσκων, όσο και οι μαθητές θα πρέπει να πειραματισθούν και με άλλες πιθανές τιμές των αντιστάσεων και πυκνωτών, για λόγους εξοικείωσης. Σκοπός της επιλογής των τιμών των αντιστάσεων και πυκνωτών είναι να λειτουργήσει κάθε βαθμίδα του σχήματος 24.12 χωρίς να οδηγηθεί στον κόρο, οπότε έχουμε παραμορφώσεις τους σήματος).