

# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

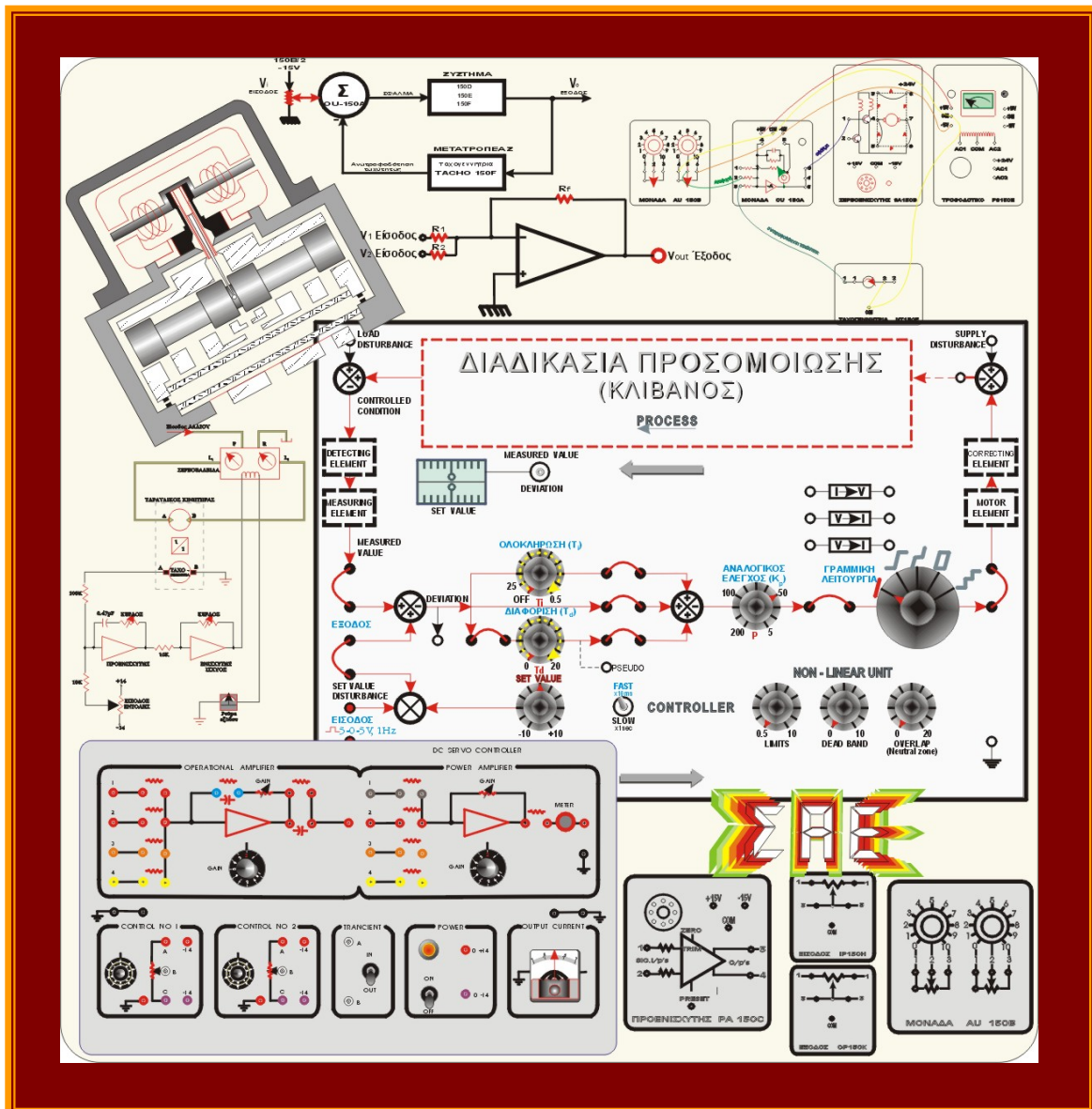
## ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Επιμέλεια Ασκήσεων

Μπούταλης Ιωάννης Αναπλ. Καθηγητής Δ.Π.Θ.  
Πλάτσης Χαράλαμπος μέλος Ε.Τ.Ε.Π.  
Πάντσογλου Χρήστος μέλος Ε.Τ.Ε.Π.



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σύγγραμμα αυτό αποτελεί το βασικό βοηθητικό υλικό για την κατανόηση και υλοποίηση των εργαστηριακών ασκήσεων στα πλαίσια του μαθήματος των Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου (1 και 2). Με τις ασκήσεις που ακολουθούν ο φοιτητής εξοικειώνεται με τις έννοιες των συστημάτων ανοικτού και κλειστού βρόγχου και τον έλεγχο αυτών, με τη διαδικασία ρύθμισης PID ελεγκτών και με τη διαδικασία προσομοίωσης φυσικών συστημάτων με τη χρήση ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων ή αναλογικών υπολογιστών.

Όλες οι ασκήσεις διακρίνονται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος δίνονται βασικά στοιχεία της θεωρίας, περιγράφονται τα χρησιμοποιούμενα όργανα και εξηγείται η λειτουργία τους. Στο δεύτερο μέρος, το οποίο φέρει και ειδικό πίνακα για την αναγραφή των στοιχείων του φοιτητή, δίνονται οι οδηγίες για την υλοποίηση των ασκήσεων και ζητούνται τα συμπεράσματα από την εκτέλεση της κάθε άσκησης.

Στο τέλος του συγγράμματος υπάρχει ειδικό παράρτημα με τις βασικές αρχές των τελεστικών ενισχυτών και των αναλογικών υπολογιστών.

# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΣΑΕ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>2</b>
<b>ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΣΑΕ.....</b>	<b>3</b>
<b>Ε Ρ Γ Α Σ Τ Η Ρ Ι Α Κ Η Α Σ Κ Η Σ Η 1.....</b>	<b>5</b>
ΘΕΜΑ: ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ DC.....	5
<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ:</i> .....	5
ΜΕΡΟΣ Α: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ (ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΙΣ ΜΟΝΑΔΩΝ).....	6
ΜΕΡΟΣ Α: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ (ΑΣΚΗΣΗ) .....	9
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ: .....	9
ΜΕΡΟΣ Β: ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ (ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΙΣ ΜΟΝΑΔΩΝ).....	9
ΜΕΡΟΣ Β: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ .....	17
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ: .....	17
<b>Ε Ρ Γ Α Σ Τ Η Ρ Ι Α Κ Η Α Σ Κ Η Σ Η 2.....</b>	<b>23</b>
ΘΕΜΑ: ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΕΡΒΟΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ .....	23
<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ:</i> .....	23
ΜΕΡΟΣ Α: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ (ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΙΣ ΜΟΝΑΔΩΝ).....	24
ΜΕΡΟΣ Α: ΗΛΕΚΤΡΟΪΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ .....	30
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ: .....	30
ΜΕΡΟΣ Β: ΗΛΕΚΤΡΟΪΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ .....	36
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ: .....	36
ΜΕΡΟΣ Γ: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΘΕΣΕΩΣ ΜΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	38
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ: .....	38
<b>Ε Ρ Γ Α Σ Τ Η Ρ Ι Α Κ Η Α Σ Κ Η Σ Η 3.....</b>	<b>42</b>
ΘΕΜΑ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ.....	42
<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ:</i> .....	42
ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ .....	43
<input type="checkbox"/> Μονάδα αναλογικού ελέγχου (Proportional – P controller) .....	44
<input type="checkbox"/> Μονάδες αναλογικού ελέγχου και ελέγχου με ολοκλήρωση (PI controller) .....	45
<input type="checkbox"/> Μονάδα αναλογικού ελέγχου και έλεγχου με διαφόριση (PD controller) .....	45
<input type="checkbox"/> Μονάδες αναλογικού ελέγχου και ελέγχου με ολοκλήρωση και διαφόριση (PID controller) .....	46
ΜΟΝΑΔΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	46
<input type="checkbox"/> Βηματική διέγερση .....	47
ΜΟΝΑΔΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ.....	48
ΜΟΝΑΔΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΙΣΗ .....	50
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ PCS-327 .....	52
ΘΕΜΑ: ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	
ΤΡΙΩΝ ΟΡΩΝ.....	54
<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</i> .....	54
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ: .....	56
<b>Ε Ρ Γ Α Σ Τ Η Ρ Ι Α Κ Η Α Σ Κ Η Σ Η 4.....</b>	<b>60</b>
ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ.....	60
<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</i> .....	60
<input type="checkbox"/> Αθροιστές .....	66
<input type="checkbox"/> Ολοκληρωτές.....	67

<input type="checkbox"/>	Πολλαπλασιαστές .....	68
<input type="checkbox"/>	Ποτενσιόμετρα .....	69
<input type="checkbox"/>	Συγκριτές .....	69
<input type="checkbox"/>	Αναλογικοί διακόπτες.....	70
<input type="checkbox"/>	Πύλες AND ή NAND.....	70
<input type="checkbox"/>	Πολυδονητές.....	70
	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....	71
	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ: .....	71
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>76</b>
	<b>ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ – ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ .....</b>	<b>76</b>
	(ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ).....	76
	<b>I) ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ .....</b>	<b>77</b>
	A. ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ .....	77
	B. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΣΤΡΕΦΟΝΤΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ.....	80
	<i>Στατικές Γραμμικές Συναρτήσεις.....</i>	<i>80</i>
	<i>Δυναμικές Γραμμικές Συναρτήσεις.....</i>	<i>81</i>
	<b>II) ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ .....</b>	<b>85</b>

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 1.

**ΘΕΜΑ: ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ DC.**

### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ:**

Η πρώτη εργαστηριακή άσκηση χωρίζεται σε δύο μέρη. Στα πρώτο μέρος θα μελετηθεί το σύστημα «κινητήρας συνεχούς ρεύματος» χωρίς ανατροφοδότηση δηλαδή σαν ανοιχτό σύστημα. Θα εξετασθεί ΠΟΣΟ και ΠΩΣ μεταβάλλεται η ταχύτητα του κινητήρα όταν στον άξονά του δεν υπάρχει φορτίο και όταν εφαρμοσθούν διάφορες τιμές φορτίου. Από την διεξαγωγή του μέρους αυτού θα βγουν συμπεράσματα για την συμπεριφορά του κινητήρα σαν ανοιχτό σύστημα και θα βρεθεί η σχέση μεταξύ στροφών του άξονα του κινητήρα και της τάσης της ταχογεννήτριας.

Στο δεύτερο μέρος θα μελετηθεί το κλειστό σύστημα αυτομάτου ελέγχου. Θα εφαρμοσθούν διάφορες τιμές φορτίου στον άξονα του κινητήρα σε συνδυασμό με διάφορες τιμές του συντελεστή ενίσχυσης  $K$  για να μελετηθεί η επίδραση που έχει το κέρδος  $K$  του συστήματος στην χρονική απόκριση του σερβομηχανισμού δηλαδή θα μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος μέσα στο πεδίο του χρόνου καθώς εμείς θα αυξάνουμε ή θα ελαττώνουμε την ενίσχυση  $K$ .

Από την όλη άσκηση ζητείται να βγουν τα κατάλληλα συμπεράσματα συγκρίνοντας τις μετρήσεις και τις καμπύλες που θα παραχθούν από τις παραπάνω μετρήσεις και των δύο συστημάτων: ανοιχτού και κλειστού βρόγχου.

**ΜΕΡΟΣ Α: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ****(ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΙΣ ΜΟΝΑΔΩΝ)**

Για το πρώτο μέρος της άσκησης θα χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες μονάδες του σερβοσυστήματος MS-150:

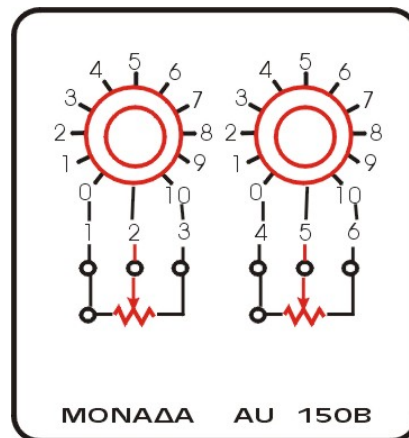
- I. ΜΟΝΑΔΑ ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ AU-150B**
- II. ΜΟΝΑΔΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 150L**
- III. ΜΟΝΑΔΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ-ΤΑΧΥΜΕΤΡΟΥ MT-150F**
- IV. ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ PS-150E**
- V. ΣΕΡΒΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ SA-150D**
- VI. ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΟ**
- VII. ΒΟΛΤΟΜΕΤΡΟ**

Περιγραφή των διαφόρων μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν:

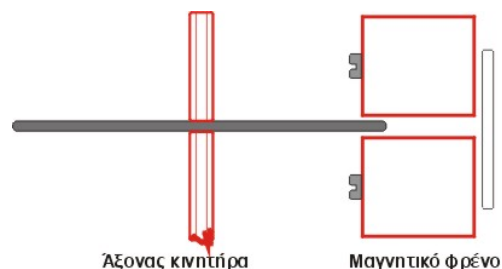


Σχήμα 1: Λειτουργικό διάγραμμα ανοιχτού βρόγχου

**I. ΜΟΝΑΔΑ ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΩΝ AU-150B.** Περιλαμβάνει δύο γραμμικά ποτενσιόμετρα άνθρακα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν διαιρέτες τάσεως και σαν μεταβλητές αντιστάσεις στον βρόγχο ανατροφοδότησης ενός τελεστικού ενισχυτή ώστε να μεταβάλλεται το κέρδος τάσης του ενισχυτή.



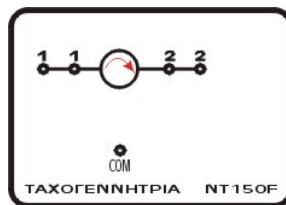
**II. ΜΟΝΑΔΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 150L.** Το φορτίο αυτό αποτελείται από έναν μόνιμο μαγνήτη που είναι προσαρμοσμένος σε μια βάση από αλουμίνιο. Τοποθετείται έτσι ώστε το κενό που έχει ο μαγνήτης



ανάμεσα στους οπλισμούς να μπορεί να δεχθεί μικρό ή μεγάλο μέρος της επιφάνειας του δίσκου που βρίσκεται προσαρμοσμένος στον άξονα του κινητήρα. Όταν ο δίσκος κινείται αναπτύσσονται επάνω του ρεύματα κλειστής διαδρομής (δεν παράγουν έργο) τα οποία δημιουργούν μαγνητικό πεδίο αντίθετο από αυτό που τα προκάλεσε και η επίδραση των δύο μαγνητικών πεδίων έχει σαν αποτέλεσμα το φρενάρισμα του άξονα του κινητήρα.

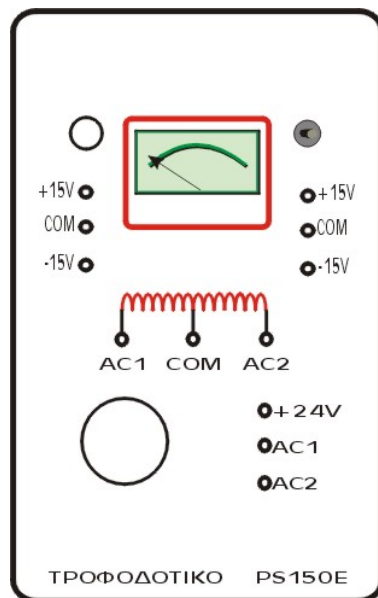
### III. ΜΟΝΑΔΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ-ΤΑΧΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ NT-150F.

Όπως θα παρατηρήσετε η μονάδα αυτή αποτελείται από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος και μία ταχογεννήτρια που συνδέεται απ' ευθείας στον άξονα του κινητήρα. Τα καλώδια του κινητήρα συνδέονται στο τροφοδοτικό με την βοήθεια ειδικού βύσματος για να μην γίνεται λάθος στην σύνδεση. Αντιθέτως οι ακροδέκτες της ταχογεννήτριας που είναι συνεχούς ρεύματος είναι ελεύθεροι χωρίς τις ενδείξεις συν και πλην. Αυτό συμβαίνει διότι ο κινητήρας μπορεί να στραφεί είτε προς την μια είτε προς την άλλη φορά δηλαδή η ταχογεννήτρια θα εμφανίζει το συν είτε στον έναν είτε στον άλλο ακροδέκτη. Η μέγιστη τάση που μπορεί να παράγει η ταχογεννήτρια είναι 15 Volts. Είναι απαραίτητο να γίνεται ο υπολογισμός ή η μέτρηση της σταθεράς  $K$  του ταχυμέτρου. Η σταθερά αυτή είναι η σχέση που συνδέει τις στροφές του άξονα με την τάση που παράγει η ταχογεννήτρια και ειδικότερα η σταθερά  $K$  είναι η τάση του ταχυμέτρου όταν ο κινητήρας περιστρέφεται με 1000 στροφές το λεπτό. Η τιμή αυτή μπορεί να βγει από υπολογισμό ως εξής: για δύο διαφορετικές ταχύτητες που τις μετράμε με στροφόμετρο ή με χρονόμετρο μετράμε με βολτόμετρο ακριβείας τις αντίστοιχες τάσεις της ταχογεννήτριας. Τις τιμές αυτές τις βάζουμε σε σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων και ενώνουμε τις μετρήσεις με μια ευθεία που μας δίνει την προσεγγιστική σχέση στροφών/τάσης της ταχογεννήτριας. Από εδώ μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση της ταχογεννήτριας στις 1000 στροφές ανά λεπτό.



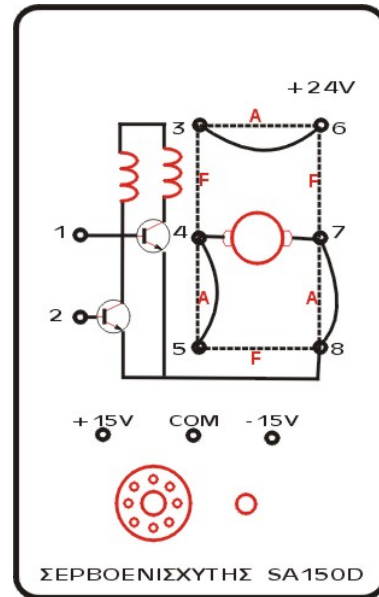
### IV. ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ PS-150E.

Η μονάδα του τροφοδοτικού μας δίνει συνεχές ρεύμα τάσεως συν και πλην 15 Volts για την τροφοδοσία των μονάδων που έχουν ενεργά στοιχεία όπως τρανζίστορ και ολοκληρωμένα ή για την παροχή σταθερής τάσεως που χρησιμοποιείται σαν αναφορά. Επίσης μας δίνει και εναλλασσόμενο ρεύμα 30 Volts AC για την τροφοδοσία των μονάδων που το χρησιμοποιούν.



**V. ΣΕΡΒΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ SA-150D.** Η κατασκευή του σερβοενισχυτή είναι τέτοια ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και με κινητήρες συνεχούς ρεύματος αλλά και με κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Έχει διαφορετική είσοδο για να είναι δυνατόν να αναστρέψει την πολικότητα της τάσης εξόδου προς τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος και κατά τον τρόπο αυτό να αλλάξει φορά περιστροφής ο κινητήρας.

**VI. ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΟ.** Θα χρειασθεί για να μετρηθεί ο αριθμός των στροφών ανά λεπτό του κινητήρα δηλαδή χρειάζεται για τη σωστή εκτίμηση του χρόνου.



**VII. ΒΟΛΤΟΜΕΤΡΟ (30-0-30 Volts).** Το βολτόμετρο θα πρέπει να είναι αναλογικό για να μπορεί να διαβαστεί η τιμή της τάσης ακόμη και αν μεταβάλλεται μικρομετρικά. Για να μην επηρεάζει το κύκλωμα στο οποίο συνδέεται θα πρέπει να έχει πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου και να μπορεί να μετρά και θετικές και αρνητικές τάσεις ταυτόχρονα. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να βρεθούν μόνο στα αναλογικά βολτόμετρα με κύκλωμα ενισχυτή.



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

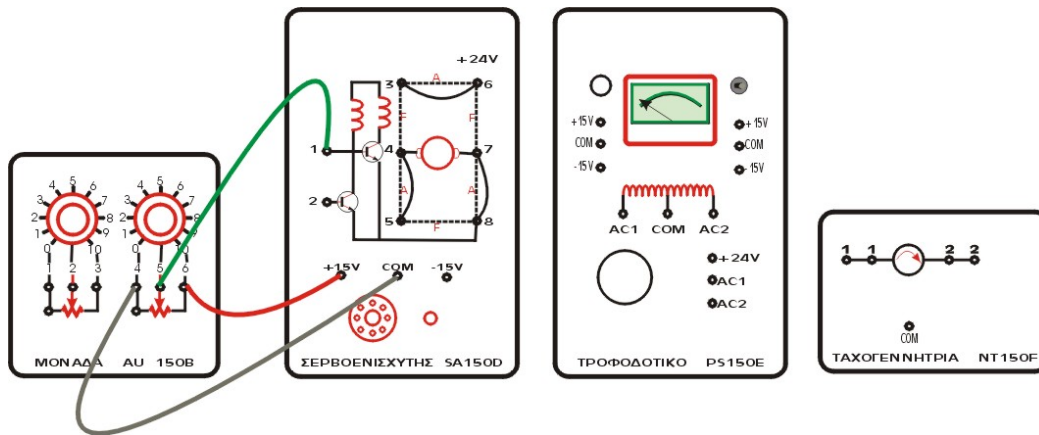
ΒΑΘΜΟΣ

## ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
ΕΤΟΣ:
ΑΡ. ΜΗΤΡΩΟΥ:
ΟΜΑΔΑ:
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:

**ΜΕΡΟΣ Α: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ****(ΑΣΚΗΣΗ)****ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ:**

1. Επιλέξτε τις μονάδες που προαναφέρθηκαν στην εισαγωγή και αφαιρέστε τους οπλισμούς των μαγνητών που βρίσκονται στην βάση τους.
2. Τοποθετήστε τις μονάδες επάνω στην μεταλλική επιφάνεια έτσι ώστε να υπάρχει αρκετός χώρος ανάμεσά τους.



Σχήμα 2: Λειτουργία ανοιχτού βρόγχου

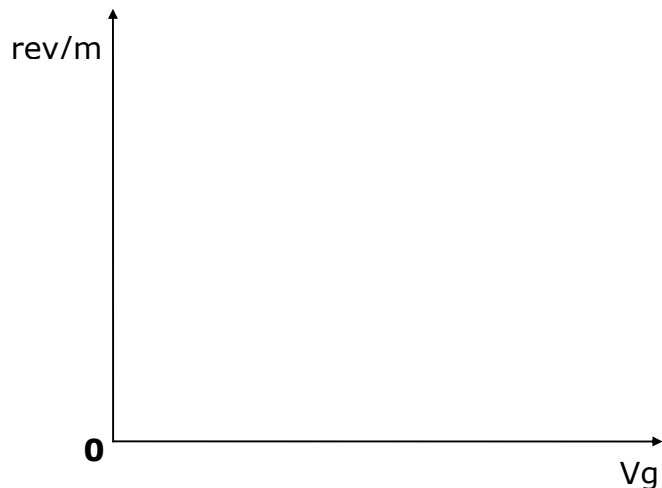
3. Κάνετε τις συνδέσεις μεταξύ των μονάδων όπως φαίνεται στο σχήμα. «2». Με το ποτενσιόμετρο μπορείτε να ρυθμίζετε την σταθερή τάση από 0 έως 15 Volts. Όπως φαίνεται και από το λειτουργικό διάγραμμα του σχήματος «1» η τάση αυτή είναι η εντολή, δηλαδή η είσοδος του συστήματος.
4. Συνδέστε ένα βολτόμετρο που είναι δυνατόν να μετρήσει και θετικές και αρνητικές τιμές τάσεων (γαλβανόμετρο) στους

- ακροδέκτες της ταχογεννήτριας. Βεβαιωθείτε ότι έχετε επιλέξει την σωστή κλίμακα μέτρησης (DC Volts 0-15).
5. Συνδέστε ένα βολτόμετρο μεταξύ του δρομέα του ποτενσιόμετρου και της γείωσης. Προσοχή στην πολικότητα.
  6. Περιστρέψτε τον δρομέα του ποτενσιόμετρου έως ότου μετρήσετε 1 Volt (δηλαδή η τάση εισόδου στο σύστημα ρυθμίζεται στο 1 Volt).
  7. Γράψτε ένα πίνακα με τις εξής μεταβλητές:
    - α) τάση ποτενσιόμετρου
    - β) τάση ταχογεννήτριας
    - γ) χρόνος σε sec
    - δ) στροφές και
    - ε) στροφές ανά λεπτό (υπολογιστικά από γ και δ).
  8. Με την βοήθεια του χρονομέτρου μετρήστε τον χρόνο που χρειάζεται για να ολοκληρωθούν 20 στροφές από τον άξονα του κινητήρα. Για να διευκολυνθεί η μέτρηση αυτή τοποθετήστε μια μονάδα ST-150R στον άξονα χαμηλής ταχύτητας του κινητήρα (βρίσκεται στο πλάι στο μπροστινό μέρος του κινητήρα). Ο άξονας χαμηλής ταχύτητας συμπληρώνει μία στροφή για κάθε 30 στροφές του άξονα του κινητήρα.
  9. Γράψτε αυτή τη μέτρηση στον πίνακα. «I»

ΠΙΝΑΚΑΣ I.

ΤΑΣΗ ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ	ΤΑΣΗ ΤΑΧΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΣΕ sec	ΣΤΡΟΦΕΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΝΑ ΛΕΠΤΟ (υπολογιστικά) rev/min
Vp	Vg	t	rev	rev/min

10. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο ώστε η ταχογεννήτρια να παράγει 2 Volts.
11. Για χρόνο ενός λεπτού μετρήστε τον αριθμό των στροφών όπως και στο 8. Γράψτε αυτή τη μέτρηση στον πίνακα. «I»
12. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο ώστε η ταχογεννήτρια να παράγει 4,5 Volts.
13. Για χρόνο ενός λεπτού μετρήστε τον αριθμό των στροφών όπως και στο 8. Γράψτε αυτή τη μέτρηση στον πίνακα. «I»
14. Από τις μετρήσεις που πήρατε σχεδιάστε την καμπύλη:  
Ταχύτητα κινητήρα (σε στροφές ανά λεπτό) σαν συνάρτηση της τάσεως εξόδου του ταχυμέτρου.  
Από την καμπύλη αυτή υπολογίστε την κλίση της σταθεράς K.



15. Ελαττώστε την τάση εισόδου από το ποτενσιόμετρο έως ότου ο κινητήρας μόλις που να περιστρέφεται.
16. Σημειώστε σαν πρώτη μέτρηση στον πίνακα «II» την τάση του ποτενσιόμετρου και την τάση της ταχογεννήτριας.

ΠΙΝΑΚΑΣ II.

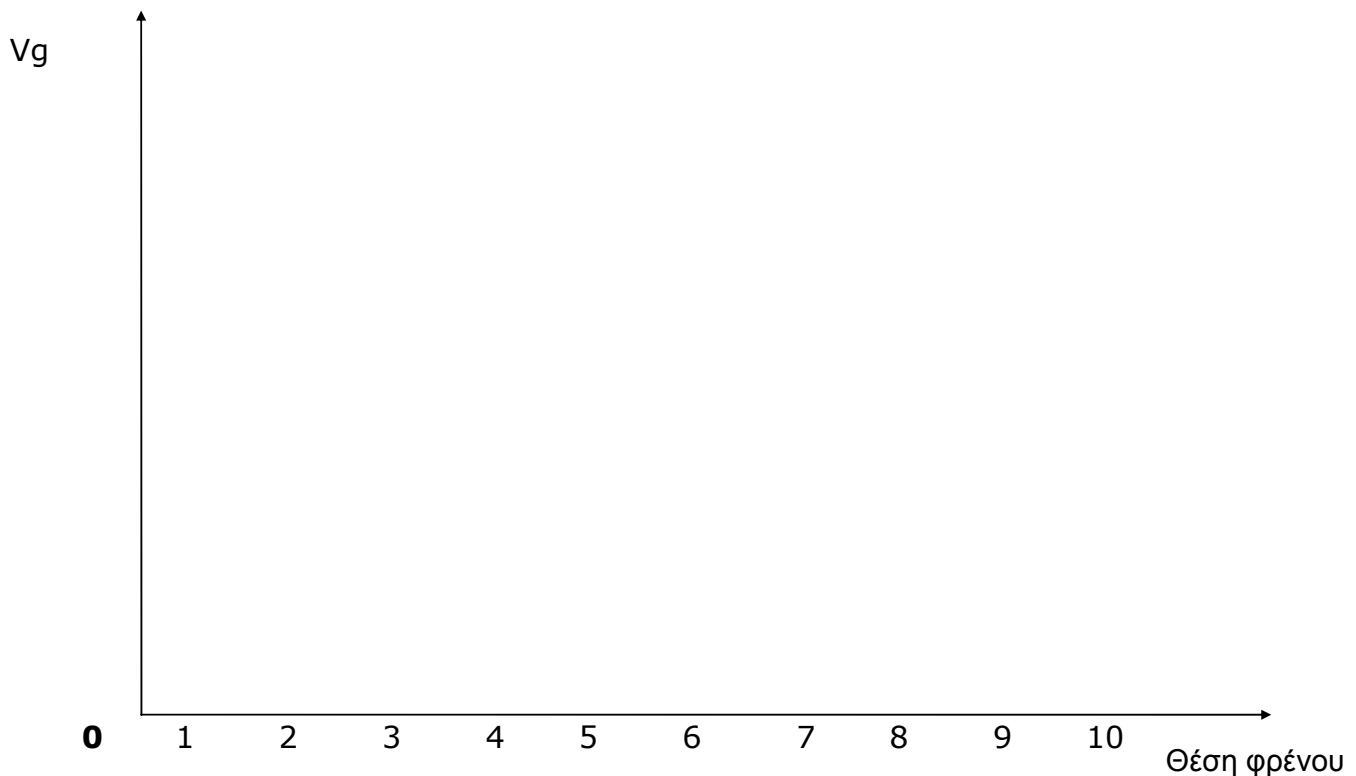
ΤΑΣΗ ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ $V_p$	ΤΑΣΗ ΤΑΧΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ $V_g$

17. Για τρεις ακόμη τιμές της τάσης εισόδου μετρήστε την αντίστοιχη τάση της ταχογεννήτριας και γράψτε τις μετρήσεις στον πίνακα «II». Επειδή το σύστημα είναι ανοικτό θα πρέπει να περιμένετε λίγο χρόνο έως ότου δεν επιταχύνεται άλλο ο κινητήρας πριν μετρήσετε την τάση της ταχογεννήτριας.
18. Από τις μετρήσεις που πήρατε σχεδιάστε την καμπύλη μεταβολής της τάσεως εξόδου (ταχογεννήτρια) σαν συνάρτηση της τάσεως εισόδου.
19. Τοποθετήστε την μονάδα φρένου (φόρτισης) έτσι ώστε ο δίσκος του κινητήρα να μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα μέσα στο διάκενο του μόνιμου μαγνήτη.
20. Με το φρένο στη θέση 10 (μέγιστη) περιστρέψτε το ποτενσιόμετρο ώστε ο κινητήρας μόλις που να περιστρέφεται.
21. Σημειώστε την τάση του ποτενσιόμετρου σαν πρώτη μέτρηση στον πίνακα «III» .

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ.

ΘΕΣΗ ΦΡΕΝΟΥ L	ΤΑΣΗ ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ Vp	ΤΑΣΗ ΤΑΧΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ Vg
10		
9		
8		
7		
6		
5		
4		
3		
2		
1		

22. Αυξήστε κατά μία θέση την τιμή του ποτενσιόμετρου προσέχοντας να μην ξεπεράσει την ένδειξη 2 Αμπέρ το όργανο που βρίσκεται στο τροφοδοτικό PS-150E διότι υπάρχει κίνδυνος καταστροφής των τυλιγμάτων του κινητήρα.
23. Σημειώστε στον πίνακα «ΙΙΙ» την θέση του φρένου και την τάση της ταχογεννήτριας.
24. Ελαττώνοντας κατά μια μονάδα την φορά την θέση του φρένου γράψτε την τάση της ταχογεννήτριας για κάθε θέση του φρένου (από 10 έως 1) στον πίνακα «ΙΙΙ» .
25. Με τις μετρήσεις αυτές σχεδιάστε μια καμπύλη που να δείχνει την μεταβολή της ταχύτητας του κινητήρα σε συνάρτηση με τη φόρτιση του άξονα (σχήμα 4).



26. Τοποθετήστε το φρένο στη θέση 0, δηλαδή όταν κανένα τμήμα του μαγνητικού πεδίου του διάκενου δεν επιδρά στον δίσκο.  
27. Βάλτε το διακόπτη του τροφοδοτικού στη θέση OFF.

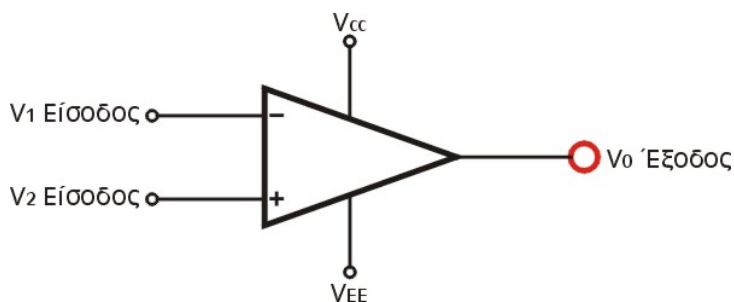
Παρατηρήσεις - Σχόλια

**ΜΕΡΟΣ Β: ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ****(ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΙΣ ΜΟΝΑΔΩΝ)**

Για το δεύτερο μέρος της άσκησης θα χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες μονάδες του σερβοσυστήματος MS-150

- I. ΜΟΝΑΔΑ ΠΟΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΟΥ AU-150B**
- II. ΜΟΝΑΔΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 150L**
- III. ΜΟΝΑΔΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ-ΤΑΧΥΜΕΤΡΟΥ ΜΤ-150F**
- IV. ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ PS-150E**
- V. ΣΕΡΒΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ SA-150D**
- VI. ΒΟΛΤΟΜΕΤΡΟ**
- VII. ΜΟΝΑΔΑ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ ΟΥ-150Α**

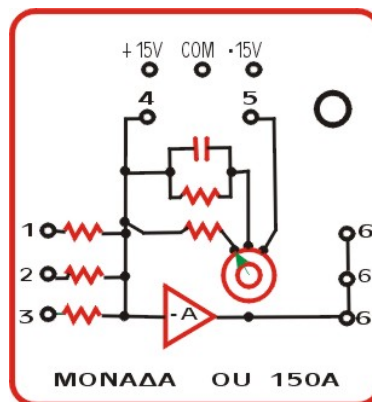
Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι η μόνη νέα μονάδα είναι αυτή του τελεστικού ενισχυτή. Παρακάτω θα επιχειρηθεί μια σύντομη περιγραφή της μονάδας αυτής με το σκεπτικό ότι η θεωρία των τελεστικών ενισχυτών δεν έχει διδαχθεί ακόμη. Επειδή όμως κάτι τέτοιο είναι πέρα από τους σκοπούς της παρούσας άσκησης θα δοθούν μόνο οι απαραίτητες έννοιες επιγραμματικά<sup>1</sup>.



Σχήμα 1. Σύμβολο τελεστικού ενισχυτή.

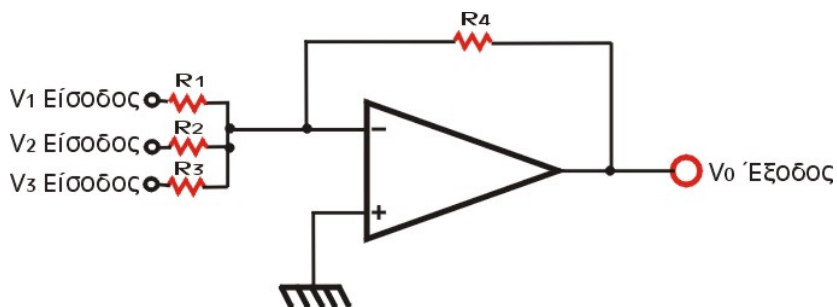
**ΜΟΝΑΔΑ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ ΟΥ-150Α.**

Σε ένα κλειστό σύστημα ΣΑΕ όπως αυτό που θα δημιουργηθεί στην παρακάτω διαδικασία υπάρχει απαραίτητα ένας κόμβος όπου προστίθενται αλγεβρικά το σήμα της εισόδου  $V_i$  και το σήμα της ανατροφοδότησης που στην παρούσα περίπτωση είναι το σήμα που προέρχεται από την ταχογεννήτρια  $V_g$ . Όπως αντιλαμβάνεται κανείς αυτός ο κόμβος δεν μπορεί να είναι ένα απλό βραχυκύκλωμα των δύο σημάτων. Στην θέση λοιπόν αυτή



<sup>1</sup> Περισσότερες λεπτομέρειες για τους τελεστικούς ενισχυτές θα βρείτε στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ των εργαστηριακών ασκήσεων στην σελίδα 77.

χρησιμοποιείται ένας τελεστικός ενισχυτής διότι είναι κατάλληλος για την εργασία αυτή.



Σχήμα 2. Συνδεσμολογία ενισχυτή τάσεως.

Ο τελεστικός ενισχυτής είναι μια ηλεκτρονική διάταξη που αποτελείται από τρανζίστορ, σαν ενεργά στοιχεία, από αντιστάσεις και πυκνωτές.

Ο συμβολισμός του φαίνεται στο σχήμα 1. Υπάρχουν δύο εισοδοί  $V_1$  και  $V_2$ , μία έξοδος  $V_o$  και δύο γραμμές τροφοδοσίας  $V_{cc}$  και  $V_{ee}$ . Η γραμμή τροφοδοσίας  $V_{cc}$  είναι η θετική τάση τροφοδοσίας ενώ η  $V_{ee}$  είναι η αρνητική (σε άλλους τύπους τελεστικών ενισχυτών η  $V_{ee}$  είναι δυνατόν να είναι η γείωση). Χρειάζεται προσοχή κατά την σύνδεση των γραμμών τροφοδοσίας διότι διαφορετικά θα καταστραφεί ο τελεστικός ενισχυτής. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1 η μία είσοδος ( $V_1$ ) έχει τον συμβολισμό '-' και η άλλη τον '+'. Η έννοια αυτών των συμβολισμών είναι 'αναστρέφουσα' και 'μη αναστρέφουσα' είσοδος αντιστοίχως. Τα σήματα που θα τροφοδοτούνται στην αναστρέφουσα είσοδο θα εμφανίζονται στην έξοδο  $V_o$  με διαφορά φάσεως 180 μοιρών ενώ τα σήματα που θα συνδέονται στην μη αναστρέφουσα είσοδο θα εμφανίζονται στην έξοδο με την ίδια φάση.

Το θεωρητικό κύκλωμα του τελεστικού ενισχυτή, που πρέπει να εφαρμοσθεί στην παρούσα άσκηση, φαίνεται στο σχήμα 2. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι όλα τα σήματα εισόδου θα εμφανίζονται στην έξοδο με διαφορά φάσης 180 μοιρών. Οι αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  είναι οι αντιστάσεις εισόδου για τα σήματα  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  αντίστοιχα και η αντίσταση  $R_4$  είναι η αντίσταση ανατροφοδότησης. Από την θεωρία των τελεστικών ενισχυτών είναι γνωστό ότι η τάση  $V_1$  θα εμφανισθεί στην έξοδο του ενισχυτή με ανεστραμμένη φάση και πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή  $R_4/R_1$ . Το ίδιο ισχύει και για την  $V_2$  και για την  $V_3$  μόνο που οι συντελεστές είναι  $R_4/R_2$  και  $R_4/R_3$  αντιστοίχως. Ο συντελεστής αυτός θα αναφέρεται και σαν συντελεστής ενίσχυσης  $K$  στην διαδικασία της άσκησης.

Όταν συνδεθεί μόνο ένα σήμα στις εισόδους π.χ. το  $V_1$ , τότε η τάση της εξόδου δίδεται από την σχέση:

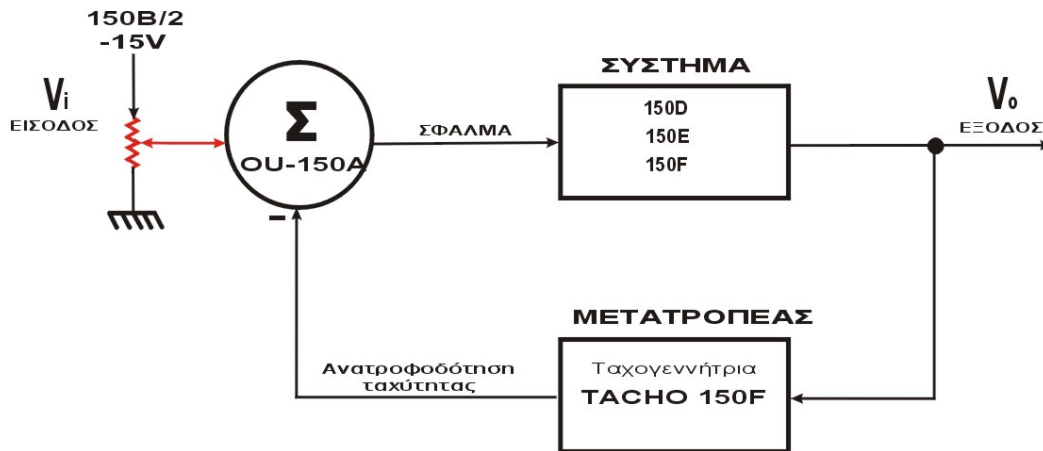
$$V_0 = V_1 \cdot R_4 / R_1$$

Όταν συνδεθούν όλες οι εισοδοί με αντίστοιχα σήματα τότε η τάση εξόδου δίδεται από την σχέση:

$$V_0 = V_1 \cdot R_4 / R_1 + V_2 \cdot R_4 / R_2 + V_3 \cdot R_4 / R_3$$

Όταν οι τάσεις εισόδου είναι ομόσημες θα έχουμε πρόσθεση και όταν είναι ετερόσημες αφαίρεση. Όπως θα φανεί από την διαδικασία της άσκησης, στα κλειστά ΣΑΕ είναι κανόνας απαράβατος τα σήματα εντολής και ανατροφοδότησης να έχουν αντίθετο πρόσημο δηλαδή να γίνεται αφαίρεση. Ο κόμβος που αποτελείται από τον τελεστικό ενισχυτή συμβολίζεται με το γράμμα  $\Sigma$  (διεθνώς) και η τοποθέτηση των συμβόλων '+' και '-' έχει την έννοια της αναγκαιότητας του διαφορετικού πρόσημου στα δύο σήματα και όχι την έννοια του ποιο πρέπει να είναι θετικό και ποιο αρνητικό.

Το λειτουργικό διάγραμμα του κλειστού ΣΑΕ που θα χρησιμοποιηθεί στο Μέρος Β είναι:



Σχήμα 3. Λειτουργικό διάγραμμα ΣΑΕ ταχύτητας κλειστού βρόγχου.



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

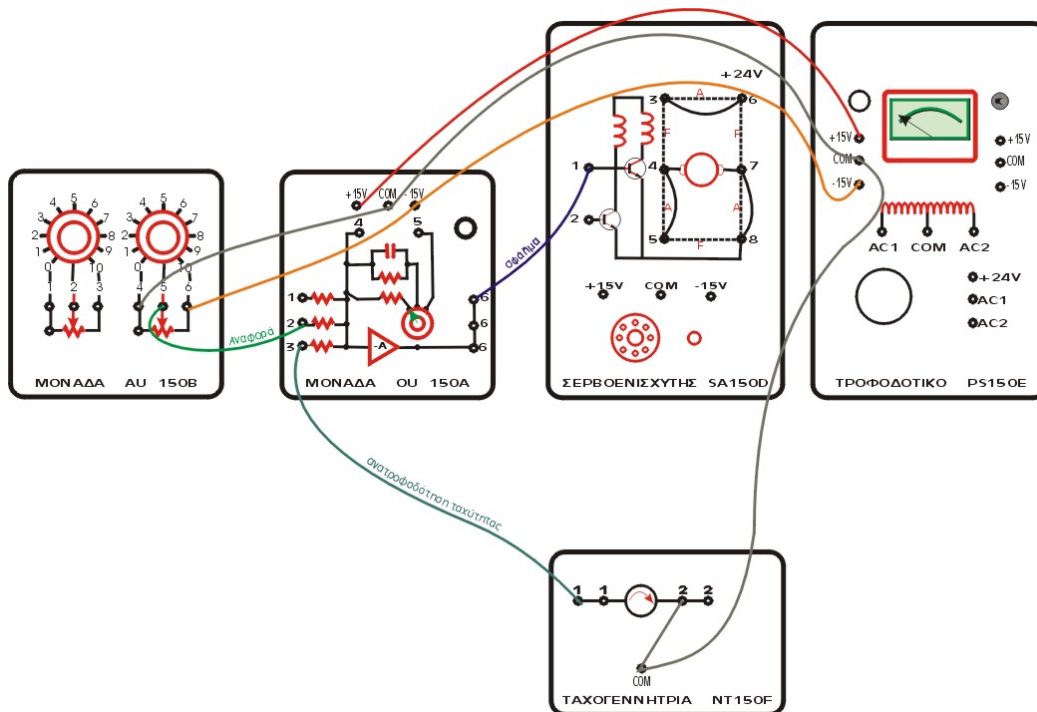
ΒΑΘΜΟΣ

## ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
ΕΤΟΣ:
ΑΡ. ΜΗΤΡΩΟΥ:
ΟΜΑΔΑ:
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:

**ΜΕΡΟΣ Β: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ**
**ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ:**

1. Επιλέξτε τις μονάδες που προαναφέρθηκαν στην εισαγωγή του Μέρους Β και αφαιρέστε τους οπλισμούς των μαγνητών που βρίσκονται στην βάση των μονάδων.
2. Τοποθετήστε τις μονάδες επάνω στην μεταλλική επιφάνεια έτσι ώστε να υπάρχει αρκετός χώρος ανάμεσά τους.
3. Κάνετε τις συνδέσεις μεταξύ των μονάδων όπως φαίνεται στο σχήμα «4». Με το ποτενσιόμετρο μπορείτε να ρυθμίζετε την σταθερή τάση από 0 έως -15 Volts. Όπως φαίνεται και από το λειτουργικό διάγραμμα του σχήματος «4» η τάση αυτή είναι η εντολή, δηλαδή η είσοδος του συστήματος.



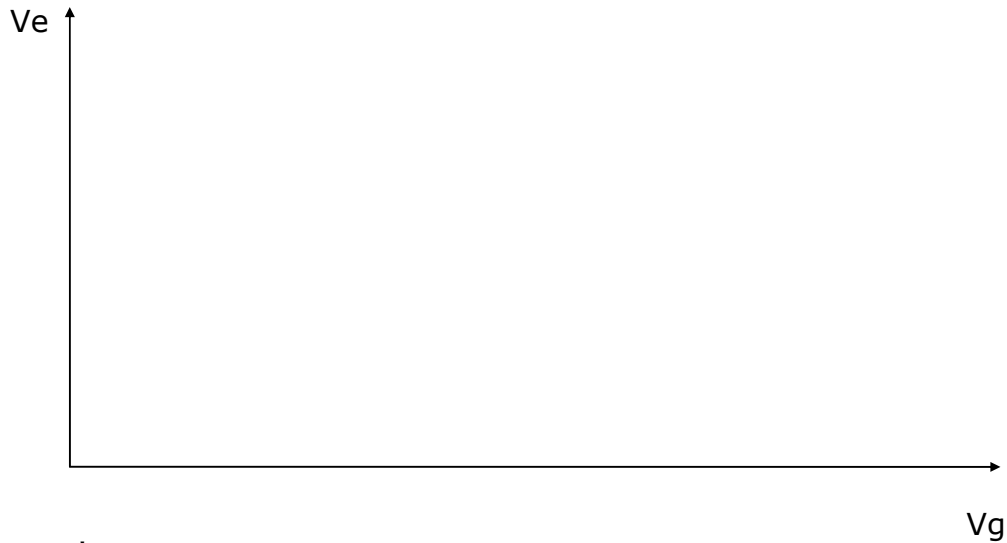
Σχήμα 4. Σχεδιάγραμμα συνδέσεων ΣΑΕ ταχύτητας κλειστού βρόγχου.

4. Συνδέστε ένα βολτόμετρο που είναι δυνατόν να μετρήσει και θετικές και αρνητικές τιμές τάσεων (γαλβανόμετρο) στους ακροδέκτες της ταχογεννήτριας. Βεβαιωθείτε ότι έχετε επιλέξει την σωστή κλίμακα μέτρησης (DC Volts 0-15).
5. Συνδέστε ένα βολτόμετρο μεταξύ του δρομέα του ποτενσιόμετρου και της γείωσης. Προσοχή στην πολικότητα.
6. Αφαιρέστε την σύνδεση της εξόδου του ταχυμέτρου από την είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Βάλτε τον διακόπτη του τροφοδοτικού στο ON. Περιστρέψτε το ποτενσιόμετρο εισόδου έως ότου ο κινητήρας αρχίσει να περιστρέφεται. Με την βοήθεια του βολτομέτρου καθορίστε σε ποιο από τα δύο σημεία του ταχυμέτρου η τάση είναι θετική. Βάλτε τον διακόπτη του τροφοδοτικού στο OFF.
7. Εξηγήστε για ποιόν λόγο πρέπει να συνδεθεί ο θετικός πόλος της ταχογεννήτριας στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή.
8. Συνδέστε το θετικό σημείο του ταχυμέτρου στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή και το αρνητικό στην γείωση.
9. Μηδενίστε την τάση εισόδου από το ποτενσιόμετρο.
10. Βεβαιωθείτε ότι ο διακόπτης που βρίσκεται στον τελεστικό ενισχυτή βρίσκεται στην θέση 100 K $\Omega$  (πρώτη θέση από αριστερά).
11. Αφαιρέστε τις εισόδους του τελεστικού ενισχυτή και βάλτε το τροφοδοτικό στο ON. Εάν ο κινητήρας περιστρέφεται θα πρέπει να ρυθμίσετε το ποτενσιόμετρο που υπάρχει στην μονάδα του τελεστικού ενισχυτή έτσι ώστε ο κινητήρας να μην περιστρέφεται. Αυτή η ρύθμιση είναι ο μηδενισμός της τάσης offset του τελεστικού ενισχυτή ώστε για μηδενική είσοδο να έχει 0 Volt στην έξοδο. Βάλτε το τροφοδοτικό στο OFF και συνδέστε πάλι τις δύο εισόδους του τελεστικού ενισχυτή.
12. Βεβαιωθείτε ότι δεν υπάρχει η μονάδα του φρένου και ότι το ποτενσιόμετρο εισόδου είναι στο 0.
13. Βάλτε τον διακόπτη του τροφοδοτικού στο ON.
14. Αρχίστε τώρα να αυξάνετε βαθμιαία την τάση εισόδου από το ποτενσιόμετρο έως ότου αρχίσει ο κινητήρας να περιστρέφεται. Κάνετε τις μετρήσεις που χρειάζονται για τον πίνακα I. Όλες οι τάσεις μετρώνται με βάση την γείωση που είναι η υποδοχή COM.

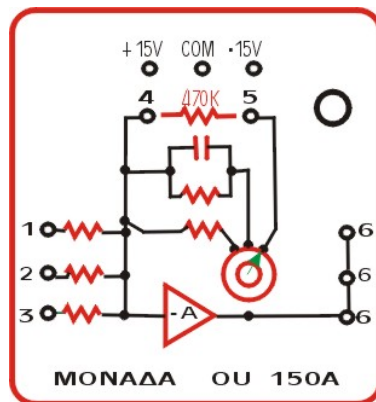
**ΠΙΝΑΚΑΣ I**

Τάση εισόδου $V_i$						
Τάση εξόδου $V_g$						
Τάση σφάλματος $V_e$						

15. Για πέντε διαφορετικές τιμές της τάσης εισόδου γράψτε τις μετρήσεις που χρειάζονται στον πίνακα I.
16. Από τις μετρήσεις του πίνακα I σχεδιάστε μία καμπύλη που προκύπτει από τις τάσεις  $V_e$  σαν συνάρτηση της  $V_g$ .



Σχήμα 5.

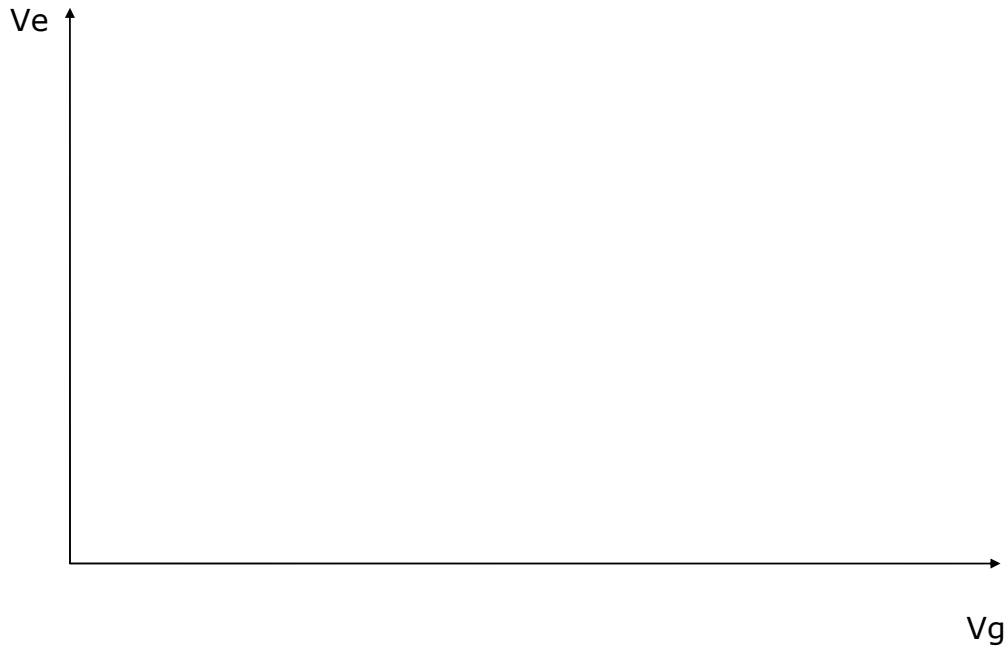


Σχήμα 6. Συνδεσμολογία εξωτερικής αντίστασης κέρδους.

17. Βάλτε τον διακόπτη του τροφοδοτικού στο OFF και τον δρομέα του ποτενσιόμετρου στο 0.
18. Περιστρέψτε τον διακόπτη του τελεστικού ενισχυτή στην δεξιά θέση και τοποθετήστε μια αντίσταση 470 KΩ στα σημεία 4 και 5.
19. Επαναλάβετε τα 12 έως 15.

**ΠΙΝΑΚΑΣ Ι**

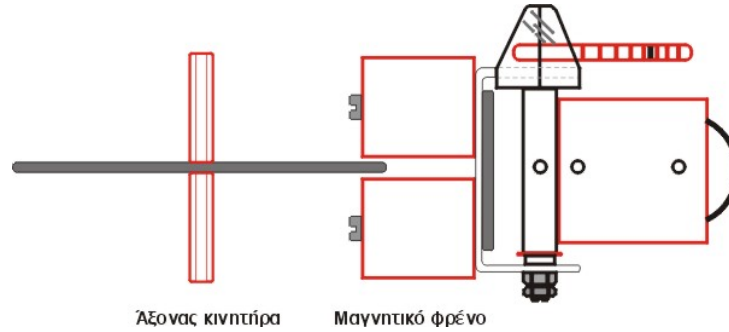
Τάση εισόδου $V_i$						
Τάση εξόδου $V_g$						
Τάση σφάλματος $V_e$						



20. Με την βοήθεια των δύο πινάκων και καμπυλών απαντήστε στο ερώτημα:

- ποιες είναι οι διαφορές μεταξύ τους και γιατί προέκυψαν;

21. Βάλτε τον διακόπτη του τροφοδοτικού στο OFF και τον δρομέα του ποτενσιόμετρου στο 0.



Σχήμα 7. Ορθή θέση μαγνητικού φορτίου.

22. Τοποθετήστε την μονάδα του φρένου στον δίσκο του άξονα όπως και στο πρώτο μέρος της άσκησης αλλά σε μία τυχαία θέση μεταξύ των διαβαθμίσεων 0 έως 10.
23. Επαναλάβετε τα βήματα 12 έως 20 για την ίδια θέση του φρένου.
24. Βάλτε το φρένο σε μία άλλη θέση και επαναλάβετε το 22.
25. Από τις μετρήσεις απαντήστε στα ακόλουθα ερωτήματα:
  - α) γιατί το σύστημα είναι όντως αυτομάτου ελέγχου,
  - β) γιατί μεταβάλλεται η  $V_e$  στις διαφορετικές θέσεις του φορτίου,
  - γ) ποια είναι η επίδραση της μεγαλύτερης αντίστασης 470 KΩ στην λειτουργία του συστήματος σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις και
  - δ) γιατί πρέπει οπωσδήποτε η τάση ανατροφοδότησης να είναι αντιθέτου πρόσημου εν σχέση με την τάση εισόδου.

26. Βάλτε τον διακόπτη του τροφοδοτικού στο OFF και αφαιρέστε τις καλωδιώσεις.
27. Αποθηκεύσετε τις μονάδες που χρησιμοποιήσατε αφού βάλετε τους προστατευτικούς οπλισμούς στους μαγνήτες.
28. Βάλτε όλες τις μετρήσεις, τις καμπύλες και τις παρατηρήσεις σας σε ένα φύλλο Excel και παραδώστε το στο Εργαστήριο.

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 2.

### **ΘΕΜΑ: ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΣΕΡΒΟΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ**

#### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ:**

Στη δεύτερη εργαστηριακή άσκηση χρησιμοποιούνται οι υδραυλικοί σερβομηχανισμοί. Τα γενικά χαρακτηριστικά τους είναι **η υψηλή ταχύτητα**, **η υψηλή πιστότητα** και **η πολύ μεγάλη ροπή** για τους κινητήρες ή **η δύναμη** για τα έμβολα.

Αυτά τα γενικά χαρακτηριστικά τους καθιστούν κατάλληλους για εφαρμογές όπου χρειάζεται να παράγεται **μεγάλο έργο με την υψηλότερη δυνατή ταχύτητα και πιστότητα**.

Έναντι των **ηλεκτρομηχανικών σερβομηχανισμών** υπερτερούν στο μέγεθος του έργου που είναι δυνατόν να παραχθεί αλλά υστερούν στην ευκολία της εγκατάστασης και στο κόστος κατασκευής και συντήρησης.

Έναντι των **πνευματικών σερβομηχανισμών** υπερτερούν στην ταχύτητα και την πιστότητα της απόκρισης αλλά υστερούν στο κόστος κατασκευής και συντήρησης.

**ΜΕΡΟΣ Α: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ****(ΕΠΕΞΗΓΗΣΕΙΣ ΜΟΝΑΔΩΝ)**

Θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω μονάδες του σύνθετου συστήματος DIGIAC 845:

- I. ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ**
- II. ΗΛΕΚΤΡΟΎΔΡΑΥΛΙΚΗ ΣΕΡΒΟΒΑΛΒΙΔΑ**
- III. ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ**
- IV. ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ**
- V. ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ**
- VI. ΒΟΛΤΟΜΕΤΡΟ**
- VII. ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΟ**

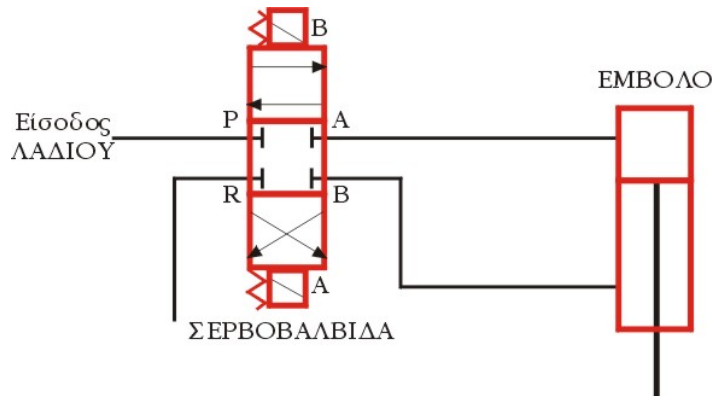
Περιγραφή των διαφόρων μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν:

**I. ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ.** Είναι ένα δοχείο, γεμάτο με λάδι, που η μία πλευρά του αποτελείται από μια σκληρή μεμβράνη. Ένας ηλεκτροκινητήρας με έκκεντρο στρόφαλο πιέζει περιοδικά την μεμβράνη, δηλαδή το λάδι, που βρίσκεται στο δοχείο. Υπάρχει μια βαλβίδα εξαγωγής του λαδιού, που δεν επιτρέπει την επιστροφή του από την σωλήνα εξαγωγής προς το δοχείο. Κάθε φορά λοιπόν που το έκκεντρο πιέζει το λάδι και επειδή τα υγρά δεν είναι συμπιεστά, η πίεση αυτή θα εμφανίζεται και στην βαλβίδα εξαγωγής και όποτε είναι μεγαλύτερη το λάδι θα περνά από το δοχείο στον σωλήνα εξαγωγής. Κατά τον χρόνο που το έκκεντρο δεν πιέζει το λάδι, η βαλβίδα εξαγωγής είναι κλειστή, διότι η πίεση του λαδιού στην σωλήνα είναι μεγαλύτερη από αυτήν του δοχείου. Υπάρχει και μια βαλβίδα εισαγωγής η οποία είναι κλειστή κατά τον χρόνο που το λάδι πιέζεται και ανοιχτή κατά τον χρόνο που δεν πιέζεται. Έτσι το λάδι που έχει φύγει από το δοχείο επιστρέφει σε αυτό με χαμηλή πίεση. Από την περιγραφή αυτή αμέσως φαίνεται ότι, εκείνο που αλλάζει στην είσοδο και στην έξοδο του τροφοδοτικού είναι η πίεση του λαδιού και όχι η ποσότητα. Μπορεί λοιπόν κανείς, εύκολα, να παραλληλίσει το υδραυλικό τροφοδοτικό με μια ηλεκτρική μπαταρία, όπου και εκεί δεν ενδιαφέρει η ποσότητα των ηλεκτρονίων που κυκλοφορούν από και προς την μπαταρία, αλλά το δυναμικό που έχουν. Η ροή του λαδιού είναι συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής του υδραυλικού κινητήρα και όχι του έργου που καλείται να παράγει.

**II. ΗΛΕΚΤΡΟΎΔΡΑΥΛΙΚΗ ΣΕΡΒΟΒΑΛΒΙΔΑ.** Το σύνθετο όνομα της προέρχεται από γεγονός ότι αποτελείται από ένα ηλεκτρικό και ένα υδραυλικό τμήμα. Ο ρόλος της ηλεκτροϋδραυλικής σερβοβαλβίδας είναι να ρυθμίζει τις πιέσεις του λαδιού στους σωλήνες εισαγωγής-εξαγωγής του κινητήρα ή του εμβόλου. Για τον

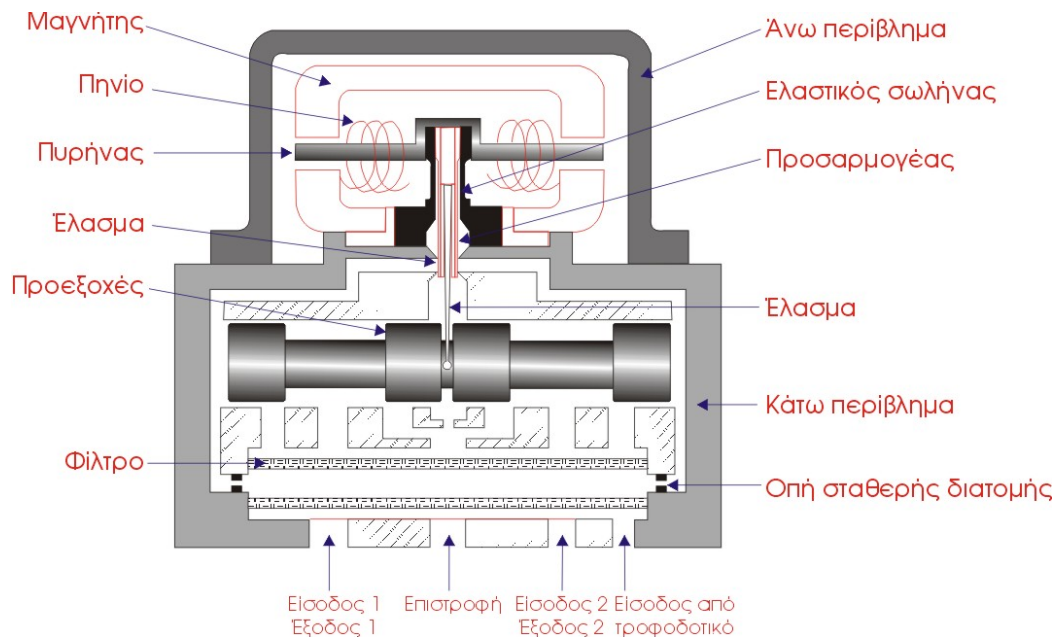


λόγο αυτό στην ηλεκτροϋδραυλική σερβοβαλβίδα συνδέονται δύο σωλήνες, που είναι η εξαγωγή και η εισαγωγή του λαδιού από το τροφοδοτικό και δύο σωλήνες που τροφοδοτούν τον κινητήρα ή το έμβολο.



Σχήμα 1. Υδραυλικό κύκλωμα σερβοβαλβίδας – Εμβόλου.

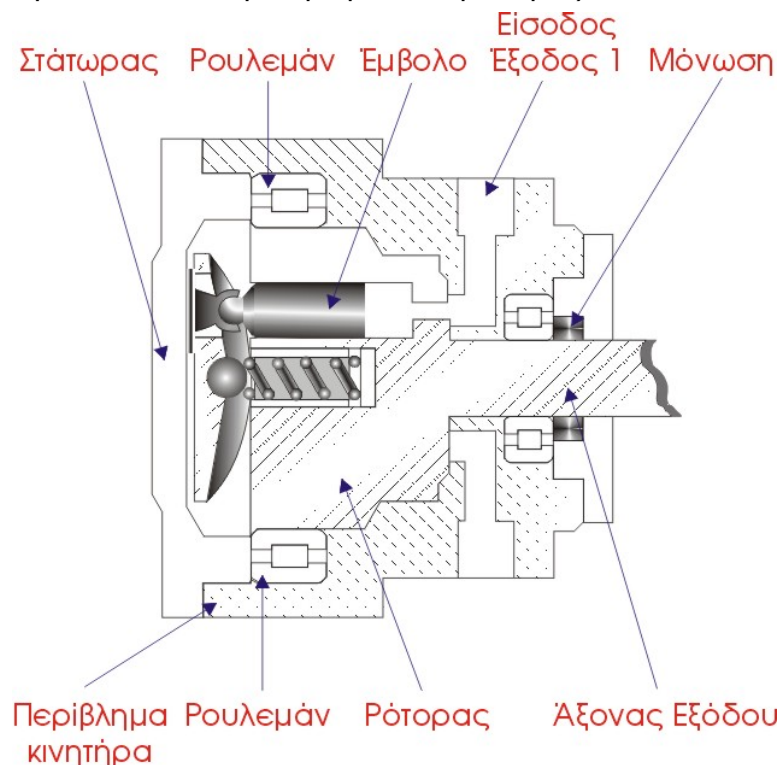
Οι σωλήνες αυτοί καταλήγουν σε ένα πολύπλοκο λαβύρινθο σωληνώσεων μέσα στην βαλβίδα όπου ένας άξονας, που έχει χόνδρους (εξογκώματα) ολισθαίνει σε διάφορες θέσεις μπρος-πίσω, με αποτέλεσμα να ανοίγει κάποια στόμια σωληνών, ενώ κάποια άλλα να τα κλείνει. Η κάθε θέση του άξονα αυτού αντιστοιχεί και σε διαφορετική διαφορά πιέσεων στους σωλήνες του κινητήρα.



Σχήμα 2. Τομή ηλεκτροϋδραυλικής σερβοβαλβίδας.

Η θέση του άξονα καθορίζεται από ένα ηλεκτρομαγνήτη. Ο άξονας παρασύρεται από ένα έλασμα, που είναι προέκταση του οπλισμού του ηλεκτρομαγνήτη. Ανάλογα με την ένταση και την φορά του ρεύματος το έλασμα θα κινηθεί δεξιά ή αριστερά, συμπαρασύροντας και τον άξονα με τους χόνδρους.

**III ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ.** Όπως και ο ηλεκτρομηχανικός κινητήρας αποτελείται από ένα στάτορα και ένα ρότορα. Η κατασκευή του στάτορα είναι πολύ απλή και αποτελείται από τις απολήξεις των σωλήνων εισόδου, εξόδου και τα κουζινέτα στήριξης. Αντίθετα η κατασκευή του ρότορα είναι πολύπλοκη. Αποτελείται από έναν άξονα πάνω στον οποίο βρίσκεται ένα τύμπανο με διαμπερείς θύλακες. Μέσα σε κάθε θύλακα υπάρχει ένα έμβολο. Η διάταξη των θυλάκων είναι κυκλική κοντά στην περιφέρεια του τυμπάνου. Οι απολήξεις των εξωτερικών σωληνώσεων βρίσκονται τοποθετημένες, διαμετρικά αντίθετες, στο ύψος που υπάρχει ένα ζεύγος από έμβολα. Ο σωλήνας με την μεγαλύτερη πίεση λαδιού αναγκάζει το αντίστοιχο έμβολο να κινηθεί ώστε να πιεσθεί πάνω σε ένα σταθερό κεκλιμένο επίπεδο, που βρίσκεται στο πίσω μέρος του κινητήρα. Το αποτέλεσμα είναι να 'γλιστρήσει' το έμβολο προς την διεύθυνση που του επιτρέπει το κεκλιμένο επίπεδο. Το έμβολο παρασύρει στην κίνησή του το τύμπανο του ρότορα και την θέση του μπροστά από τον σωλήνα με την μεγαλύτερη πίεση καταλαμβάνει το επόμενο έμβολο του τυμπάνου. Καθώς η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, το αποτέλεσμα είναι να περιστρέφεται ο ρότορας.

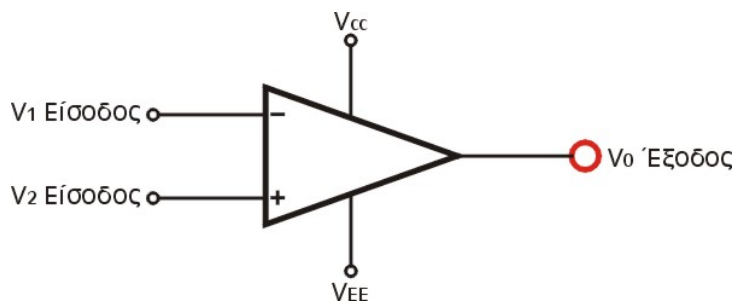


Σχήμα 3. Τομή υδραυλικού κινητήρα.

Στον θύλακα του κάθε εμβόλου που πιέζεται, εγκλωβίζεται όγκος λαδιού, ανάλογος με τον κενό όγκο του θύλακα. Από αυτό συμπεραίνεται ότι, η ροή του λαδιού είναι συνάρτηση του αριθμού των θυλάκων που δέχονται λάδι στην μονάδα του χρόνου και από τον κενό όγκο του κάθε θύλακα. Ο όγκος αυτός μπορεί να είναι πολύ μικρός και δεν έχει σχέση με το προσφερόμενο έργο. Το εγκλωβισμένο λάδι θα περάσει στον σωλήνα χαμηλής πίεσης όταν ο αντίστοιχος θύλακας θα βρίσκεται μπροστά από τη θέση του. Ακολουθώντας και μέσω της σερβοβαλβίδας θα επιστρέψει στο τροφοδοτικό για να ξαναπιεσθεί. Εάν οι πιέσεις στους σωλήνες αντιστραφούν τότε απλώς ο κινητήρας θα αλλάξει διεύθυνση περιστροφής. Αυτό συμβαίνει γιατί η μορφή του κεκλιμένου επιπέδου είναι τέτοια ώστε όταν υπάρχει μεγαλύτερη πίεση στον κάτω σωλήνα τα έμβολα να «γλιστρούν» προς αντίθετη διεύθυνση, από ότι προηγουμένως.

Στην περίπτωση που και στις δύο σωλήνες του κινητήρα υπάρχει η ίδια πίεση, είναι προφανές ότι τα δύο έμβολα, (τα επάνω και το κάτω), ασκούν την ίδια δύναμη στο τύμπανο του ρότορα, αλλά με αντίθετη διεύθυνση και το αποτέλεσμα είναι να μην κινείται ο ρότορας, άσχετα με το αν εφαρμόζεται ροπή αδράνειας ή άλλη δύναμη στον άξονά του. Στην πραγματικότητα εκείνο που κινεί τον άξονα είναι η διαφορά πιέσεων στους δύο σωλήνες. Κάθε φορά που πρέπει να παραχθεί μεγαλύτερο έργο αρκεί η διαφορά των πιέσεων να μεγαλώσει.

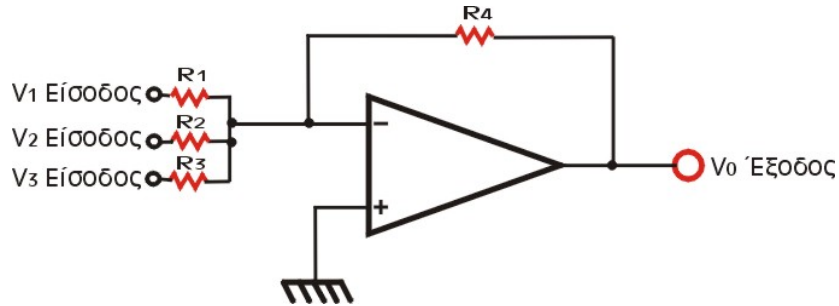
**IV. ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ.** Ο τελεστικός ενισχυτής είναι μια ηλεκτρονική διάταξη που αποτελείται από τρανζίστορ, σαν ενεργά στοιχεία, από αντιστάσεις και από πυκνωτές. Ο συμβολισμός του φαίνεται στο σχήμα 1. Υπάρχουν δύο εισοδοί  $V_1$  και  $V_2$ , μία έξοδος  $V_o$  και δύο γραμμές τροφοδοσίας  $V_{cc}$  και  $V_{ee}$ .



Σχήμα 4. Σύμβολο τελεστικού ενισχυτή.

Η γραμμή τροφοδοσίας  $V_{cc}$  είναι η θετική τάση τροφοδοσίας ενώ η  $V_{ee}$  είναι η αρνητική (σε άλλους τύπους τελεστικών ενισχυτών η  $V_{ee}$  είναι δυνατόν να είναι η γείωση). Χρειάζεται προσοχή κατά την σύνδεση των γραμμών τροφοδοσίας διότι διαφορετικά θα

καταστραφεί ο τελεστικός ενισχυτής. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1 η μία είσοδος ( $V_1$ ) έχει τον συμβολισμό '-' και η άλλη τον '+'. Η έννοια αυτών των συμβολισμών είναι 'αναστρέφουσα' και 'μη αναστρέφουσα' είσοδος αντιστοίχως. Τα σήματα που θα τροφοδοτούνται στην αναστρέφουσα είσοδο θα εμφανίζονται στην έξοδο  $V_0$  με διαφορά φάσεως 180 μοιρών ενώ τα σήματα που θα συνδέονται στην μη αναστρέφουσα είσοδο θα εμφανίζονται στην έξοδο με την ίδια φάση.



Σχήμα 5. Συνδεσμολογία ενισχυτή τάσεως.

Το θεωρητικό κύκλωμα που πρέπει να εφαρμοσθεί στην παρούσα άσκηση φαίνεται στο σχήμα 5.

Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι όλα τα σήματα εισόδου θα εμφανίζονται στην έξοδο με διαφορά φάσης 180 μοιρών. Οι αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  είναι οι αντιστάσεις εισόδου για τα σήματα  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  αντίστοιχα και η αντίσταση  $R_4$  είναι η αντίσταση ανατροφοδότησης. Από την θεωρία των τελεστικών ενισχυτών είναι γνωστό ότι η τάση  $V_1$  θα εμφανισθεί στην έξοδο του ενισχυτή με ανεστραμμένη φάση και πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή  $R_4/R_1$ .

Το ίδιο ισχύει και για την  $V_2$  και για την  $V_3$  μόνο που οι συντελεστές είναι  $R_4/R_2$  και  $R_4/R_3$  αντίστοιχως.

Ο συντελεστής αυτός θα αναφέρεται και σαν **συντελεστής ενίσχυσης K** στην διαδικασία της άσκησης.

Όταν συνδεθεί μόνο ένα σήμα στις εισόδους π.χ. το  $V_1$ , τότε η τάση της εξόδου δίδεται από την σχέση:

$$V_0 = V_1 \cdot R_4 / R_1$$

Όταν συνδεθούν όλες οι εισοδοί με αντίστοιχα σήματα τότε η τάση εξόδου δίδεται από την σχέση:

$$V_0 = V_1 \cdot R_4 / R_1 + V_2 \cdot R_4 / R_2 + V_3 \cdot R_4 / R_3$$

Όταν οι τάσεις εισόδου είναι ομόσημες θα έχουμε πρόσθεση και όταν είναι ετερόσημες αφαίρεση. Όπως θα φανεί από την διαδικασία της άσκησης, στα κλειστά ΣΑΕ είναι κανόνας απαράβατος τα σήματα εντολής και ανατροφοδότησης να έχουν αντίθετο πρόσημο δηλαδή να γίνεται αφαίρεση. Ο κόμβος που αποτελείται από τον τελεστικό ενισχυτή συμβολίζεται με το γράμμα  $\Sigma$  (διεθνώς) και η τοποθέτηση των συμβόλων '+' και '-' έχει την έννοια της αναγκαιότητας του διαφορετικού πρόσημου στα δύο σήματα και όχι την έννοια του ποιο πρέπει να είναι θετικό και ποιο αρνητικό.

**V. ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ.** Είναι μια ηλεκτρονική διάταξη που αποτελείται από τρανζίστορ αντιστάσεις και πυκνωτές. Παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση στην είσοδο και μικρή στην έξοδο. Μπορεί να παρέχει αρκετό ρεύμα για το φορτίο που είναι συνδεδεμένο στην έξοδο. Συνήθως το κέρδος του ενισχυτή ισχύος εκφράζεται σε ντεσιμπέλ ισχύος και όχι τάσεως (όπως συμβαίνει στον τελεστικό ενισχυτή). Όπως θα διαπιστωθεί από την εκτέλεση της άσκησης, το κέρδος του ενισχυτή ισχύος έχει την ίδια επίδραση στην συμπεριφορά του συστήματος που και το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή. Το συνολικό κέρδος μιας διάταξης τελεστικού ενισχυτή και ενισχυτή ισχύος είναι το άθροισμα των δύο κερδών.

**VI. ΒΟΛΤΟΜΕΤΡΟ** (15-0-15 Volts). Το βολτόμετρο θα πρέπει να είναι αναλογικό για να μπορεί να αναγνωσθεί η τιμή της τάσης ακόμη και αν μεταβάλλεται μικρομετρικά. Για να μην επηρεάζει το κύκλωμα στο οποίο συνδέεται θα πρέπει να έχει πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου και να μπορεί να μετρά και θετικές και αρνητικές τάσεις ταυτόχρονα. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να βρεθούν μόνο στα αναλογικά βολτόμετρα με κύκλωμα ενισχυτή.

**VII. ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΟ.** Θα χρειασθεί για να μετρηθεί ο αριθμός των στροφών ανά λεπτό του κινητήρα δηλαδή χρειάζεται για τη σωστή εκτίμηση του χρόνου.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

ΒΑΘΜΟΣ

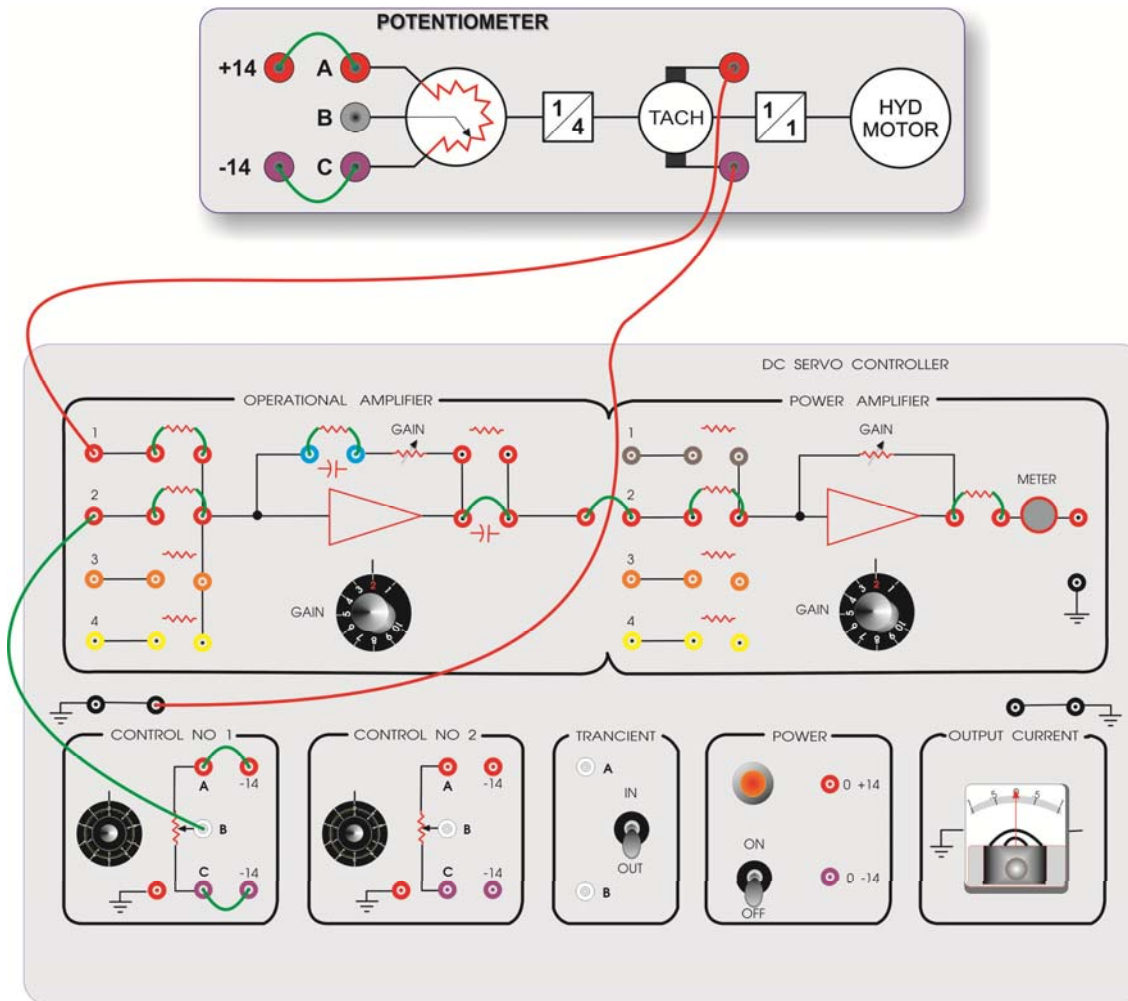
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
ΕΤΟΣ:
ΑΡ. ΜΗΤΡΩΟΥ:
ΟΜΑΔΑ:
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:

### **ΜΕΡΟΣ Α: ΗΛΕΚΤΡΟΪΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ**

#### **ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ:**

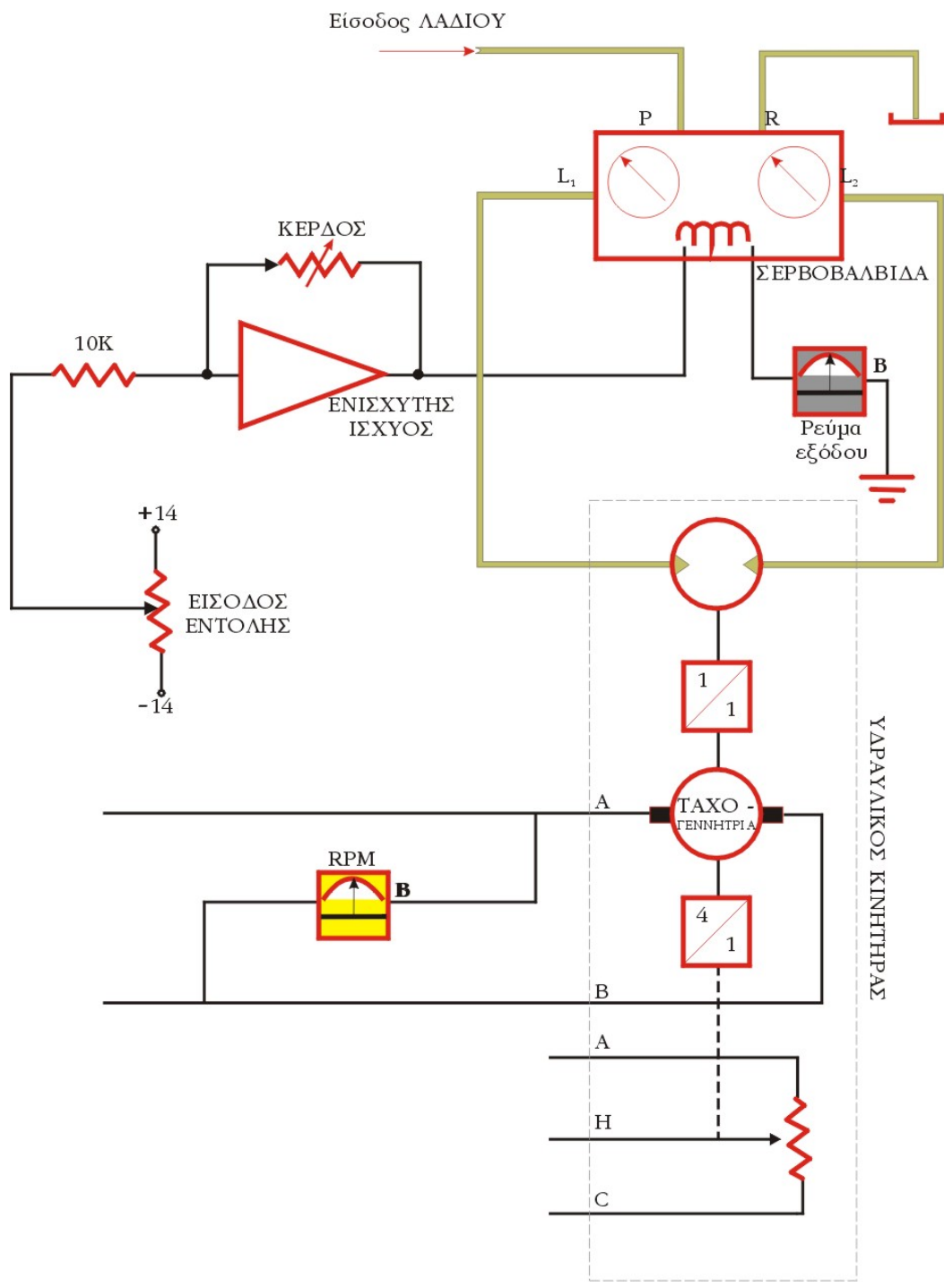
1. Με την βοήθεια του σχήματος 6 συνδέστε μία αντίσταση 10ΚΩ στην είσοδο 3 του τελεστικού ενισχυτή.
2. Συνδέστε τα άκρα του ποτενσιόμετρου που βρίσκεται στην θέση CONTROL NO. 1 στις πηγές τροφοδοσίας.
3. Συνδέστε το μεσαίο του ποτενσιόμετρου στην είσοδο 3 του τελεστικού ενισχυτή.
4. Βάλτε τον διακόπτη AUX στην θέση ON.
5. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο στην τιμή 5.5. Με το βολτόμετρο βεβαιωθείτε ότι η έξοδος του ποτενσιόμετρου είναι 0 Volt.
6. Τοποθετήστε τα βραχυκυκλώματα στην ανατροφοδότηση και στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή καθώς και στην έξοδο του ενισχυτή ισχύος.
7. Συνδέστε το καλώδιο της σερβοβαλβίδας στην έξοδο του ενισχυτή ισχύος. Βεβαιωθείτε ότι το συνδέσατε σωστά (ο ακροδέκτης A στην θέση A).
8. Ρυθμίστε το κέρδος του ενισχυτή ισχύος στο 1 και του τελεστικού ενισχυτή στο 3.
9. Συνδέστε έναν σωλήνα από το SUPPLY στο P της σερβοβαλβίδας και ένα σωλήνα από το RETURN στο R της σερβοβαλβίδας.
10. Συνδέστε ένα σωλήνα από το 1 της σερβοβαλβίδας στο 1 του κινητήρα και από το 2 της σερβοβαλβίδας στο 2 του κινητήρα.



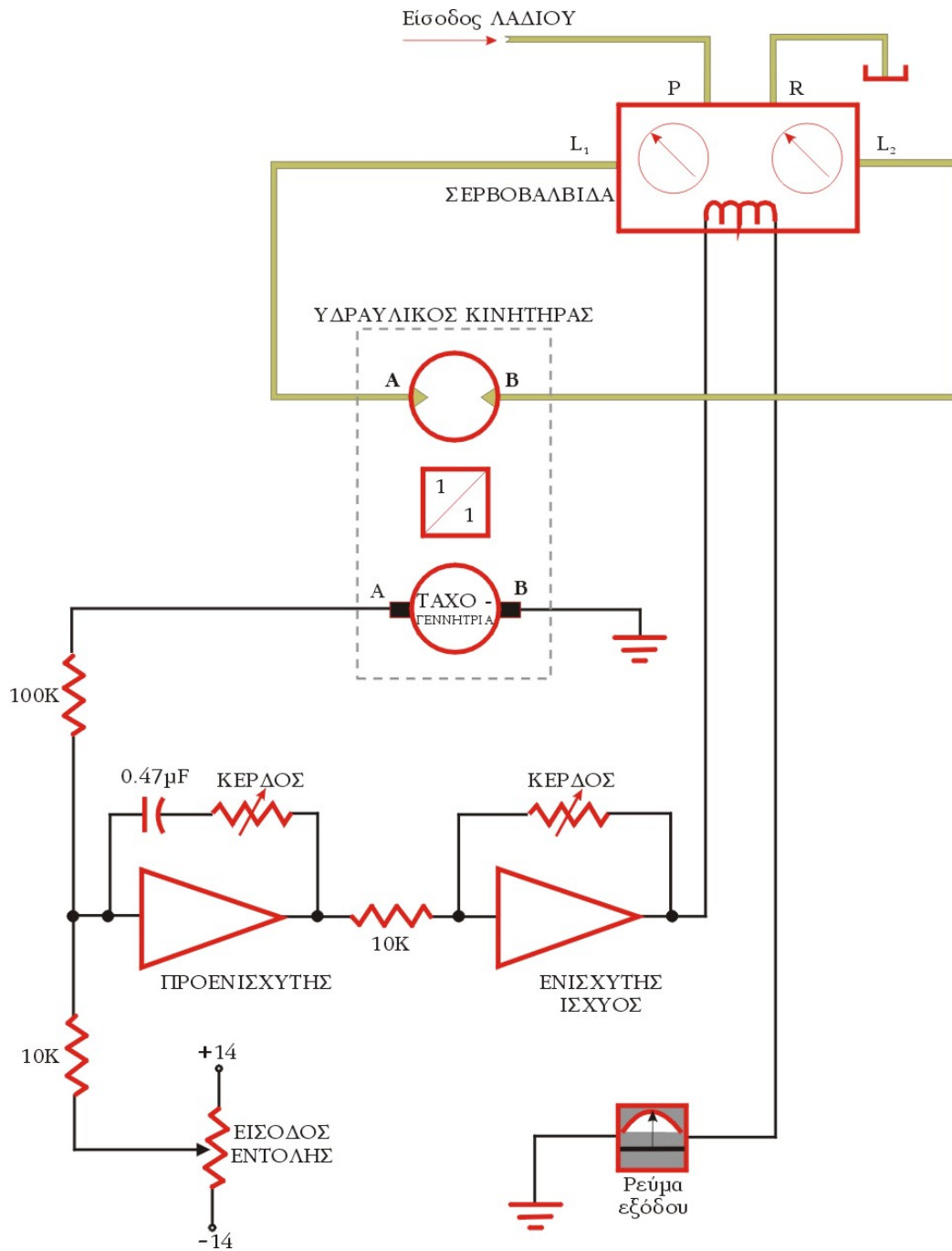
Σχήμα 6.





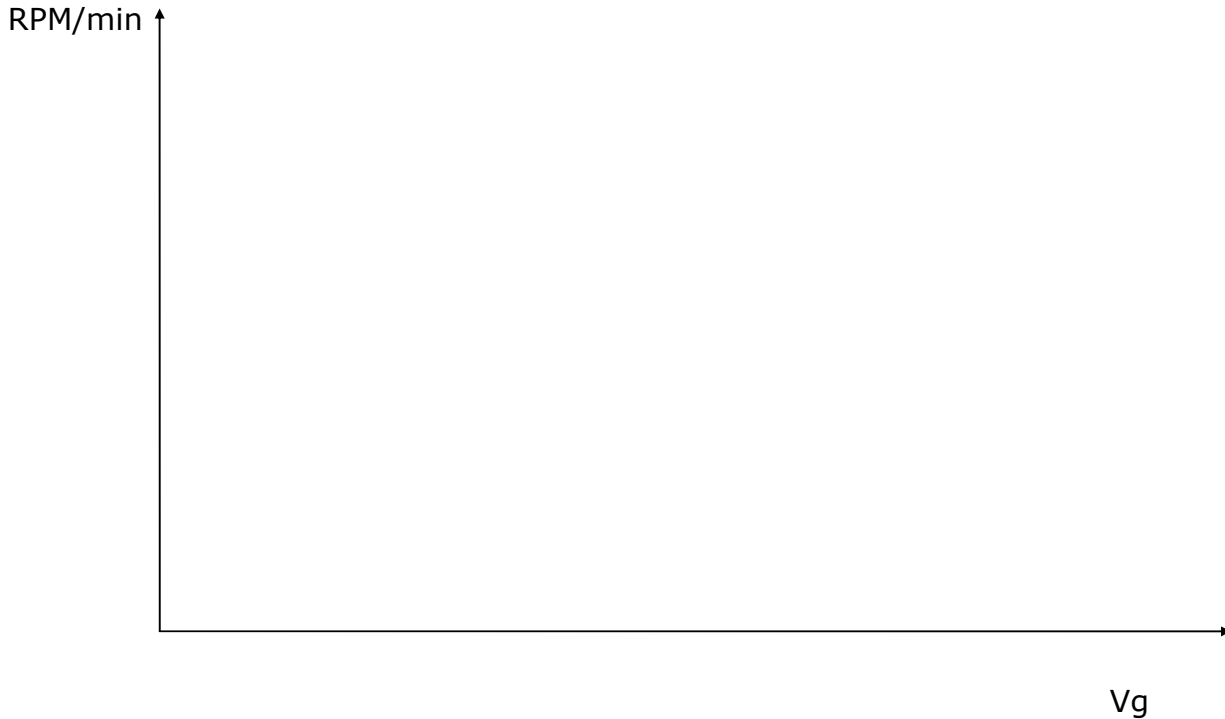


Σχήμα 7. Συνδεσμολογία ΣΑΕ ταχύτητας ανοιχτού βρόγχου.



Σχήμα 8. Συνδεσμολογία ΣΑΕ ταχύτητας κλειστού βρόγχου.

11. Βάλτε τον διακόπτη HYD στο ON.
12. Εάν ο κινητήρας περιστρέφεται ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο έως ότου σταματήσει.
13. Γράψτε σε ένα πίνακα την μικρομετρική ένδειξη του ποτενσιόμετρου, την τάση που μετράτε στο μεσαίο Vin και την τάση της ταχογεννήτριας Vg. Την τάση της ταχογεννήτριας θα την μετράτε στο A κάτω από το όργανο RPM αφού συνδέσετε το B στην γείωση.
14. Αυξήστε το ποτενσιόμετρο κατά μία μονάδα και μετρήστε τα Vin και Vg.
15. Μετρήστε με την βοήθεια χρονομέτρου τις στροφές του κινητήρα.
16. Επαναλάβετε για δύο ακόμη μονάδες και γράψτε τα αποτελέσματα σε ένα πίνακα.
17. Επιστρέψτε το ποτενσιόμετρο στην αρχική του θέση και επαναλάβετε τα βήματα 14, 15 και 16 αλλά μειώνοντας την ρύθμιση του ποτενσιόμετρου.
18. Βάλτε τους διακόπτες HYD και AUX στο OFF.
19. Από τις μετρήσεις που πήρατε σχεδιάστε την καμπύλη Vg και στροφές ανά λεπτό.



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

ΒΑΘΜΟΣ

## ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
ΕΤΟΣ:
ΑΡ. ΜΗΤΡΩΟΥ:
ΟΜΑΔΑ:
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:

**ΜΕΡΟΣ Β: ΗΛΕΚΤΡΟΪΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ****ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ:**

1. Κάνετε τις συνδέσεις που υπήρχαν στο ανοιχτό κύκλωμα.
2. Συνδέστε την επαφή Α της ταχογεννήτριας με την είσοδο 1 του τελεστικού ενισχυτή.
3. Συνδέστε την επαφή Β της ταχογεννήτριας στην γείωση (μαύρη επαφή).
4. Ρυθμίστε το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή στο 4 και του ενισχυτή ισχύος στο 3.
5. Βάλτε τον διακόπτη ΑΥΧ στο ΟΝ.
6. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο εισόδου στα 0 Volt με την βοήθεια του βολτομέτρου.
7. Βάλτε τον διακόπτη ΗΥΔ στο ΟΝ.
8. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο εισόδου ώστε ο κινητήρας να περιστρέφεται αργά (περίπου μεταξύ 5 και 10 στροφών το λεπτό).
9. Μετρήστε την τάση εισόδου ( $V_{in}$ ), την τάση στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή ( $V_e$ ) και την τάση της ταχογεννήτριας ( $V_g$ ).
10. Γράψτε αυτές τις μετρήσεις σε έναν πίνακα.

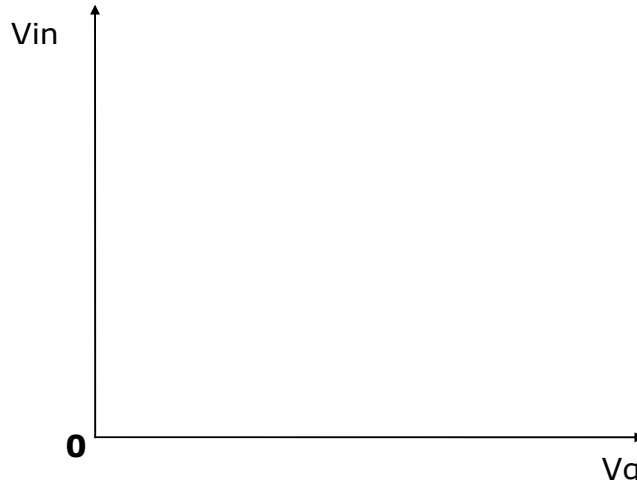
**ΠΙΝΑΚΑΣ Ι.**

ΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ $V_{in}$	ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΥ ΕΝΙΣΧΥΤΗ $V_e$	ΤΑΣΗ ΤΑΧΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ $V_g$	ΣΤΡΟΦΕΣ rev

11. Με το βολτόμετρο στην έξοδο της ταχογεννήτριας εφαρμόστε φρένο (ροπή αδράνειας) στον άξονα του κινητήρα. Παρατηρήστε

τι συμβαίνει στην  $V_e$  και απαντήστε στο ερώτημα γιατί συμβαίνει. Αφαιρέστε το φρένο.

12. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο εισόδου κατά μία μονάδα παραπάνω και γράψτε τις μετρήσεις όπως και στο 9.
13. Για ακόμη μία μονάδα παραπάνω στο ποτενσιόμετρο επαναλάβετε το βήμα 9.
14. Από τις μετρήσεις που πήρατε σχεδιάστε την καμπύλη  $V_{in}$ ,  $V_g$ , και απαντήστε στο ερώτημα εάν η σχέση τους είναι γραμμική ή όχι.



A large empty rectangular box for drawing the graph.

15. Ρυθμίστε το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή στο 6 και κάντε τις μετρήσεις του 9.
16. Συγκρίνετε την  $V_e$  με την  $V_e$  του 9 και εξηγήστε γιατί είναι διαφορετικές.

A large empty rectangular box for writing the answer to question 16.

17. Βάλτε τους διακόπτες HYD και AUX στο OFF.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

ΒΑΘΜΟΣ

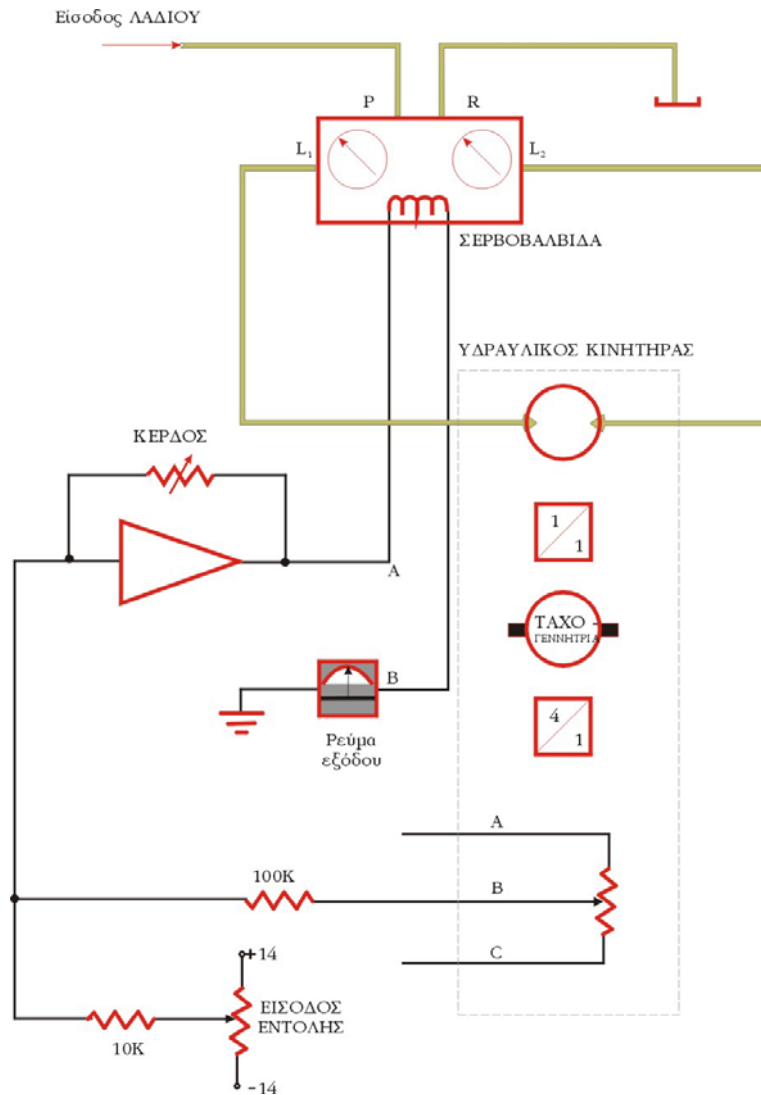
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

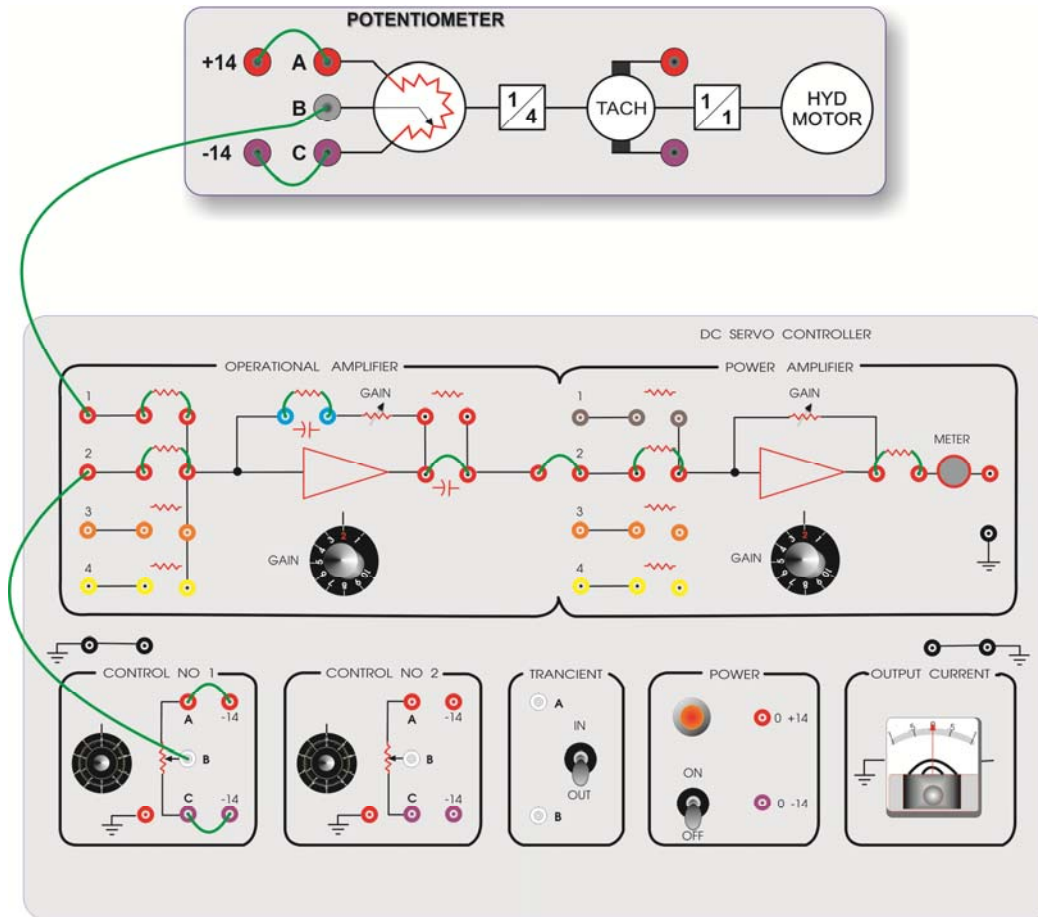
ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
ΕΤΟΣ:
ΑΡ. ΜΗΤΡΩΟΥ:
ΟΜΑΔΑ:
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:

**ΜΕΡΟΣ Γ: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΘΕΣΕΩΣ ΜΕ ΚΙΝΗΤΗΡΑ**

**ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ:**

1. Κάντε τις συνδέσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 9.





Σχήμα 9. Συνδεσμολογία ΣΑΕ θέσεως κλειστού βρόγχου.

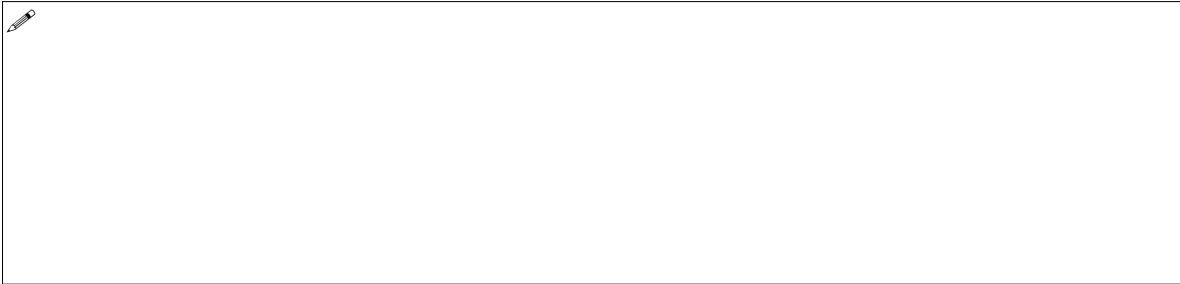
2. Βάλτε τον διακόπτη AUX στο ON.
3. Ρυθμίστε το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή στο 3 και του ενισχυτή ισχύος στο 4.
4. Βάλτε τον διακόπτη HYD στο ON.
5. Περιστρέψτε το ποτενσιόμετρο εισόδου σε τυχαία θέση και παρατηρήστε πόσο γρήγορα περιστρέφεται ο άξονας του κινητήρα στην καινούρια θέση.
6. Μετρήστε τις τάσεις  $V_{in}$  και  $V_{out}$  (στο μεσαίο του ποτενσιόμετρου ανατροφοδότησης) και παρατηρήστε εάν υπάρχει διαφορά και εξηγήστε γιατί.



7. Ρυθμίστε το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή στο 5 και περιστρέψτε το ποτενσιόμετρο εισόδου σε τυχαία θέση. Παρατηρήστε πόσο γρήγορα ακολουθεί ο άξονας του κινητήρα την περιστροφή του ποτενσιόμετρου.
8. Μετρήστε τις τάσεις Vin και Vout (στο μεσαίο του ποτενσιόμετρου ανατροφοδότησης) και παρατηρήστε εάν υπάρχει διαφορά και εξηγήστε γιατί.

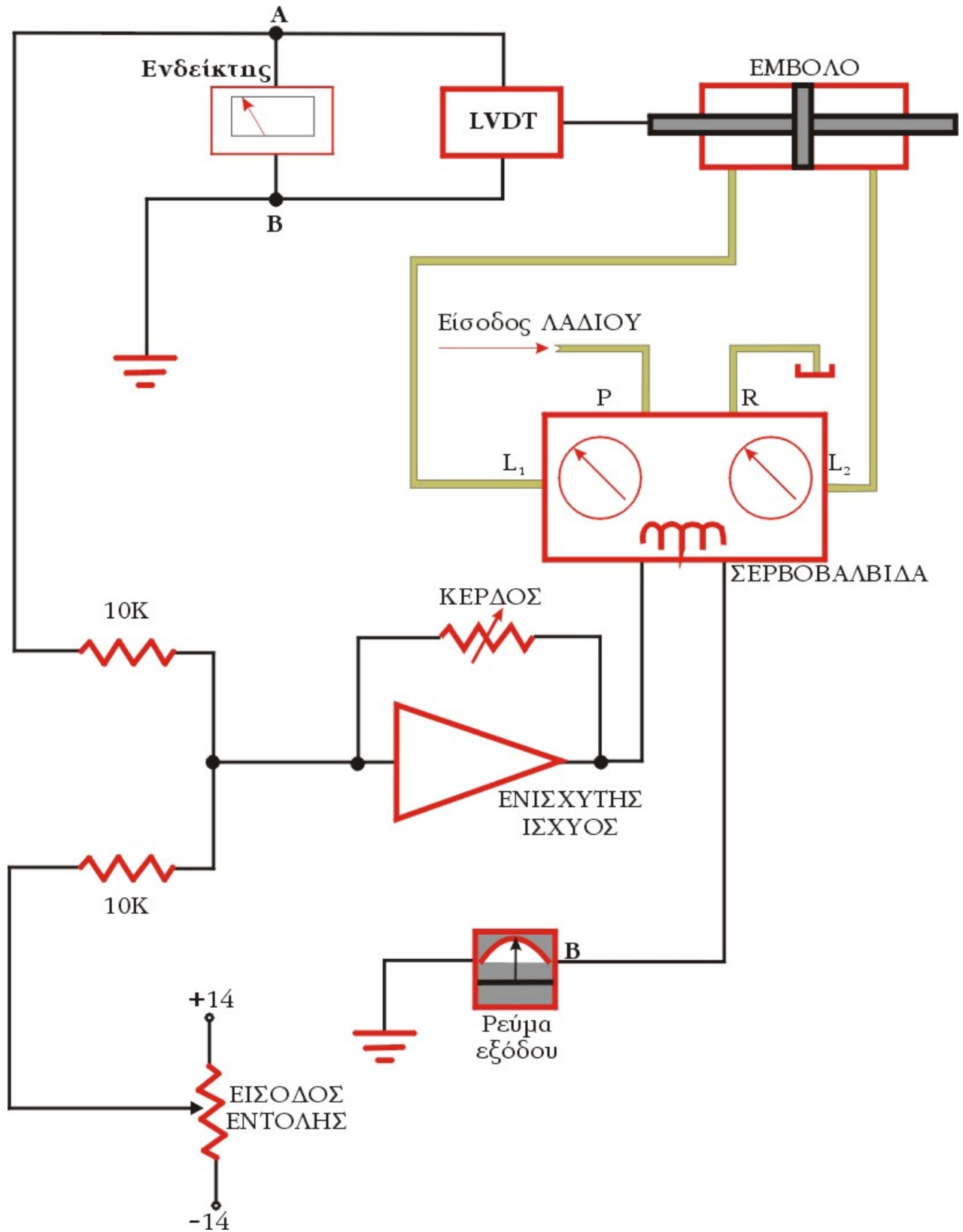


9. Ρυθμίστε το κέρδος του τελεστικού ενισχυτή στο 7 και περιστρέψτε το ποτενσιόμετρο εισόδου σε τυχαία θέση. Απαντήστε στο ερώτημα γιατί το σύστημα βρίσκεται σε αστάθεια.



10. Βάλτε τους διακόπτες HYD και AUX στο OFF.





Σχήμα 10. Συνδεσμολογία ΣΑΕ θέσεως κλειστού βρόγχου με χρήση εμβόλου.

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 3.

### **ΘΕΜΑ: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ**

(Ηλεκτρονική Προσομοίωση)

#### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ:**

Στον κόσμο της επιστήμης όπου εφαρμόζονται και δοκιμάζονται καινούριες ιδέες, εφαρμογές και βελτιώσεις δεν είναι δυνατόν πάντοτε το υπό μελέτη σύστημα (ή ομάδα συστημάτων) να είναι εύκολο ή ασφαλές να λειτουργεί χωρίς τα απαραίτητα κυκλώματα ελέγχου. Για να γίνει όμως γνωστή η συμπεριφορά τους κάτω από διάφορες συνθήκες θα πρέπει να βρεθεί ασφαλής τρόπος με τον οποίο να είναι δυνατόν να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα. Ο τρόπος αυτός είναι η **προσομοίωση**.

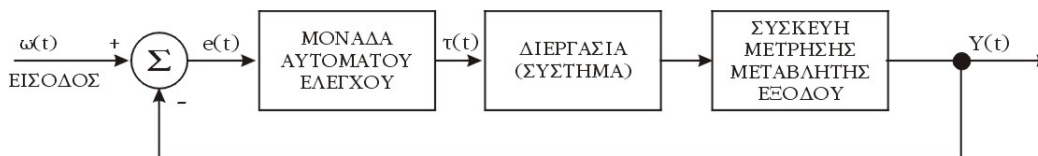
Η προσομοίωση είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την ανάλυση και την σχεδίαση συστημάτων αυτομάτου ελέγχου χημικών βιομηχανιών, χαλυβουργιών, σταθμών παραγωγής και διανομής ηλεκτρικού ρεύματος, αεροσκαφών, εκπαίδευση πιλότων κ.λ.π. Η προσομοίωση ενός συστήματος βασίζεται στον προσδιορισμό, κατασκευή και λειτουργία ενός άλλου συστήματος, η συμπεριφορά του οποίου μπορεί να περιγραφεί (στο πεδίο του χρόνου ή στο πεδίο της συχνότητας) με το ίδιο μαθηματικό πρότυπο με το οποίο περιγράφεται και το υπό μελέτη σύστημα. Τα δύο αυτά συστήματα ονομάζονται *ανάλογα συστήματα*.

Διάφορα μη ηλεκτρικά συστήματα, όπως μηχανικά, χημικά κ.λ.π., συνήθως έχουν ανάλογα ηλεκτρικά συστήματα. Ο φορέας που διατηρεί τα κοινά χαρακτηριστικά συμπεριφοράς στα ανάλογα συστήματα είναι η κοινή συνάρτηση μεταφοράς. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την προσομοίωση κάθε συστήματος με αντίστοιχες ηλεκτρονικές διατάξεις που έχουν χαμηλό κόστος είναι εύκολο να κατασκευασθούν και οποιαδήποτε βλάβη τους από άστοχη λειτουργία είναι πολύ εύκολο με χαμηλό κόστος να αποκατασταθεί. Με την βοήθεια των ηλεκτρονικών διατάξεων αυτών, είναι δυνατόν να μελετήσει κανείς τη δυναμική συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος και να προσδιορίσει χαρακτηριστικά και ιδιότητες όπως είναι η ευστάθεια, η ταχύτητα αποκρίσεως, το εύρος ζώνης κ.λ.π. Επί πλέον δίνει την δυνατότητα μελέτης της εφαρμογής της ανατροφοδότησης στο ανοιχτό σύστημα και τις επιπτώσεις στην συμπεριφορά του κλειστού συστήματος.

## ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου όπου η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι θερμοκρασία, πίεση, ροή, στάθμη υγρού ή pH είναι ένα σύστημα ελέγχου διεργασίας (process control). Τα συστήματα ελέγχου διεργασίας χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία και ένα απλό παράδειγμα αυτών είναι ο έλεγχος της θερμοκρασίας κλιβάνου που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα άσκηση. Η τιμή της θερμοκρασίας του κλιβάνου μπορεί να ρυθμίζεται με βάση ένα προκαθορισμένο πρόγραμμα (το οποίο μπορεί να είναι αποθηκευμένο σε έναν μικροεπεξεργαστή ή να είναι μια απλή εντολή από μια γεννήτρια παλμών), σύμφωνα με το οποίο η θερμοκρασία, κατά την έναρξη της λειτουργίας του κλιβάνου, ανυψώνεται σε μια προκαθορισμένη τιμή για ορισμένο χρονικό διάστημα και ύστερα ρυθμίζεται σε μια μικρότερη τιμή για κάποιο άλλο χρονικό διάστημα.

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα βαθμίδων συστήματος ελέγχου διεργασίας φαίνεται στο σχήμα 1 όπου  $\omega(t)$  είναι η είσοδος,  $\gamma(t)$  είναι η έξοδος,  $e(t)$  είναι το σφάλμα και  $\tau(t)$  είναι το σήμα ελέγχου.



Σχήμα 1

Όπου  $\omega(t)$ : είναι η **είσοδος** του συστήματος  
 $\gamma(t)$ : είναι η **έξοδος** του συστήματος  
 $e(t)$ : είναι το παραγόμενο **σφάλμα** ή **απόκλιση**  
 $\tau(t)$ : είναι το **σήμα ελέγχου**

Όταν μεταβληθεί η τιμή της εισόδου τότε από το  $\Sigma$  δημιουργείται το σφάλμα ή η απόκλιση και προέρχεται από την σύγκριση της εξόδου  $\gamma(t)$  και της εισόδου  $\omega(t)$ . Με την μονάδα αυτομάτου ελέγχου γίνεται μορφοποίηση του σφάλματος με σκοπό τον καλύτερο έλεγχο του συστήματος. Η μονάδα αυτή επιτρέπει την ρύθμιση της συμπεριφοράς του συστήματος ανεξάρτητα από την μορφή και το μέγεθος του σφάλματος. Έτσι το  $\tau(t)$  επιδρά πάνω στη διεργασία με αποτέλεσμα η απόκλιση να ελαττωθεί ή ακόμα και να μηδενισθεί. Για να παραχθεί το  $\tau(t)$  η μονάδα αυτομάτου ελέγχου εκτελεί μια σειρά από μαθηματικές πράξεις στη χρονική συνάρτηση του σφάλματος. Οι πιο συνηθισμένες πράξεις είναι η **ολοκλήρωση**, η **διαφόριση** και ο **πολλαπλασιασμός** με κάποια σταθερά.

Επειδή στην προσομοίωση δεν είναι γνωστή η συμπεριφορά του συστήματος εκ των προτέρων, πρέπει τα ανάλογα συστήματα να είναι εφοδιασμένα με μια μονάδα αυτομάτου ελέγχου που να έχει εφαρμογή σε όλα τα συστήματα ή τουλάχιστον στην πλειοψηφία αυτών. Θα πρέπει η μονάδα αυτή έστω και χονδρικά να μπορεί να ρυθμίσει την συμπεριφορά των συστημάτων. Βρέθηκε ότι η μονάδα αυτή στην βασική της μορφή είναι ένας ελεγκτής **τριών όρων** ή αλλιώς **ελεγκτής P.I.D.**

- Το **P** προέρχεται από τον αγγλικό όρο proportional (αναλογικός). Ο όρος αυτός παρέχει σήμα ανάλογο με αυτόν του σήματος σφάλματος. Στην περίπτωση αυτή ένας συντελεστής, αφού εκλεγεί κατάλληλα, **πολλαπλασιάζει** το σήμα του σφάλματος, ενισχύοντας ή εξασθενίζοντας την τιμή του. Λέμε ότι αυτή η δράση ελέγχου βασίζεται στο παρόν, δηλαδή στην τρέχουσα τιμή του σήματος σφάλματος.
- Το **I** προέρχεται από τον αγγλικό μαθηματικό όρο integral και εκτελεί την πράξη της **ολοκλήρωσης** πάνω στο σήμα του σφάλματος. Το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με κατάλληλο συντελεστή για να δώσει μια δράση ελέγχου ανάλογη του ολοκληρώματος του σφάλματος. Δηλαδή, αυτή η δράση ελέγχου βασίζεται στο παρελθόν, στις προηγούμενες δηλαδή τιμές του σήματος του σφάλματος.
- Το **D** προέρχεται από τον όρο differential και εκτελεί την πράξη της **διαφόρισης** πάνω στο σήμα του σφάλματος. Το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται με κατάλληλο συντελεστή για να δώσει μια δράση ελέγχου ανάλογη της παραγώγου του σφάλματος. Δηλαδή, αυτή η δράση ελέγχου, λόγω της παραγώγου, βασίζεται στην πρόβλεψη της μελλοντικής τιμής του σήματος του σφάλματος.

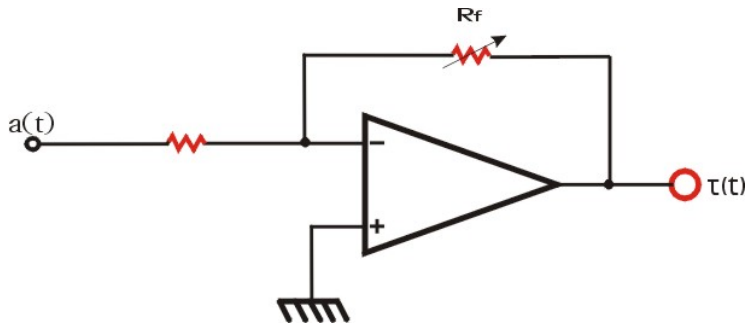
Ανάλογα με τους συνδυασμούς των παραπάνω όρων και τις εκτελούμενες πράξεις οι μονάδες ελέγχου διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

**❑ Μονάδα αναλογικού ελέγχου (Proportional – P controller).**

Η μαθηματική σχέση που συνδέει την έξοδο με την είσοδο της μονάδας αυτής είναι:

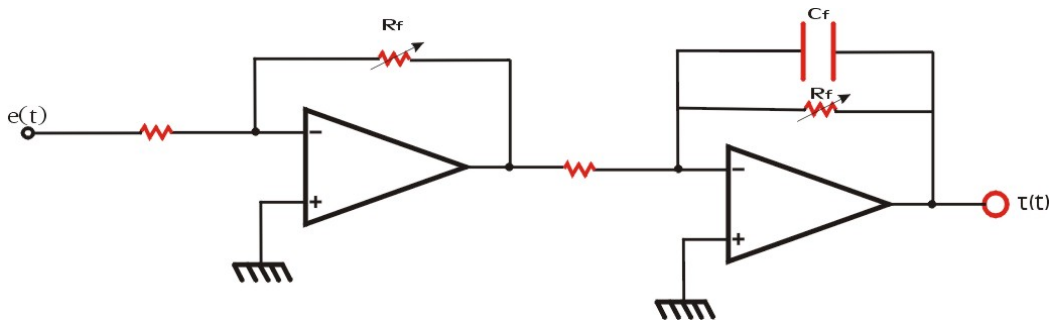
$$τ(t)=Kpε(t)$$

Όπου  $Kp$  είναι μια σταθερά την οποία μπορούμε να ρυθμίσουμε.



Σχήμα 2

□ Μονάδες αναλογικού ελέγχου και ελέγχου με ολοκλήρωση (PI controller).



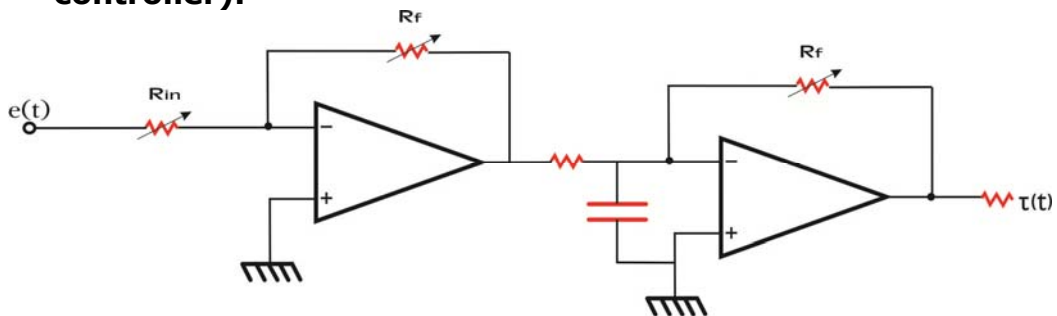
Σχήμα 3

Η μαθηματική σχέση που συνδέει τις ποσότητες  $\tau(t)$  και  $e(t)$  είναι:

$$\tau(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

όπου  $K_p$  σταθερά πολλαπλασιασμού όπως και προηγουμένως και  $T_i$  μια σταθερά ολοκληρωτικής δράσης, που συχνά αναφέρεται ολοκληρωτικός χρόνος δράσης. Για τη σημασία της παρατηρείστε ότι αν  $T_i = \infty$  ο ολοκληρωτικός όρος εξαφανίζεται.

□ Μονάδα αναλογικού ελέγχου και ελέγχου με διαφορίση (PD controller).



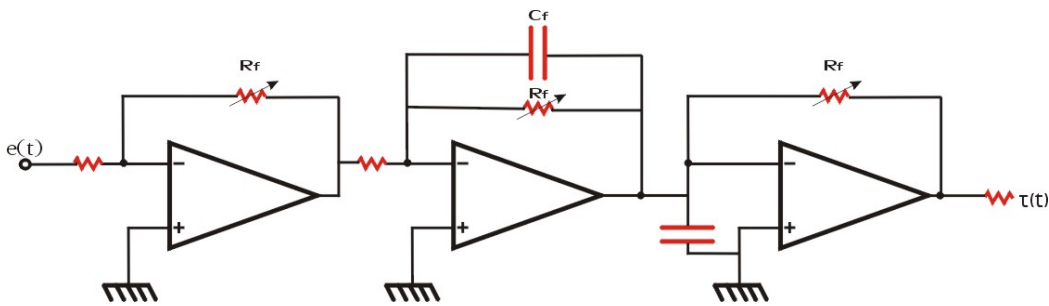
Σχήμα 4

Η μαθηματική σχέση που συνδέει την έξοδο  $\tau(t)$  και την είσοδο  $e(t)$  είναι:

$$\tau(t) = k_p e(t) + k_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

όπου  $K_p$  είναι η σταθερά του αναλογικού όρου και  $T_d$  μια σταθερά ενίσχυσης της διαφορικής δράσης, που συχνά διαφορικός χρόνος. Προφανώς μεγάλες τιμές του  $T_d$  αυξάνουν την επίδραση του διαφορικού όρου στο σήμα ελέγχου.

**□ Μονάδα ελέγχου τριών όρων (αναλογικού ελέγχου και ελέγχου με ολοκλήρωση και διαφορίση - PID controller).**



Σχήμα 5

Η μαθηματική σχέση που συνδέει τις ποσότητες  $\tau(t)$  και  $e(t)$  είναι:

$$\tau(t) = k_p e(t) + k_p T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

όπου  $K_p$ ,  $T_i$  και  $T_d$  όπως περιγράφηκαν προηγουμένως.

### **ΜΟΝΑΔΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ**

Στο εργαστηριακό πείραμα ηλεκτρονικής προσομοίωσης υπάρχει κάποια παράμετρος ρύθμισης του αναλογικού όρου στον ελεγκτή τριών όρων. Ονομάζεται αναλογική περιοχή και συμβολίζεται με P ή P%. Για λόγους που σχετίζονται με την κατασκευή του προσομοιωτή συνδέεται με την σταθερά  $K_p$  του αναλογικού όρου με την σχέση:

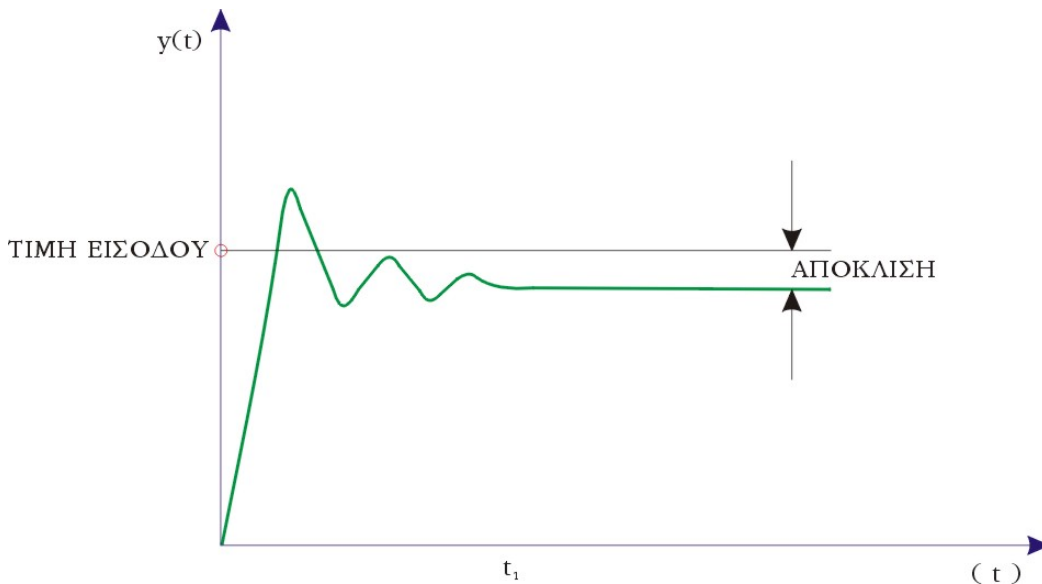
$$K_p = 100/P$$

Δύο είναι τα ζητούμενα από την μονάδα αναλογικού ελέγχου:

- α) Να παράγει σήματα τέτοια ώστε η μετρούμενη φυσική μεταβλητή του συστήματος να μπορεί να παρακολουθήσει τις επιβαλλόμενες μεταβολές της εισόδου με ελάχιστη απόκλιση, με μεγάλη ταχύτητα και όσο το δυνατόν μικρή υπερύψωση κατά την διάρκεια της μεταβατικής κατάστασης (περίοδος χρόνου από την εμφάνιση νέας εντολής στην είσοδο έως την μόνιμη κατάσταση της εξόδου).
- β) Θα πρέπει να μπορεί να διατηρεί σταθερή την τιμή της μετρούμενης φυσικής μεταβλητής (έξοδος του συστήματος) άσχετα με τις πιθανές αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας που οφείλονται σε επιδράσεις εξωτερικών αιτίων όπως είναι ο θόρυβος ή τα παράσιτα.

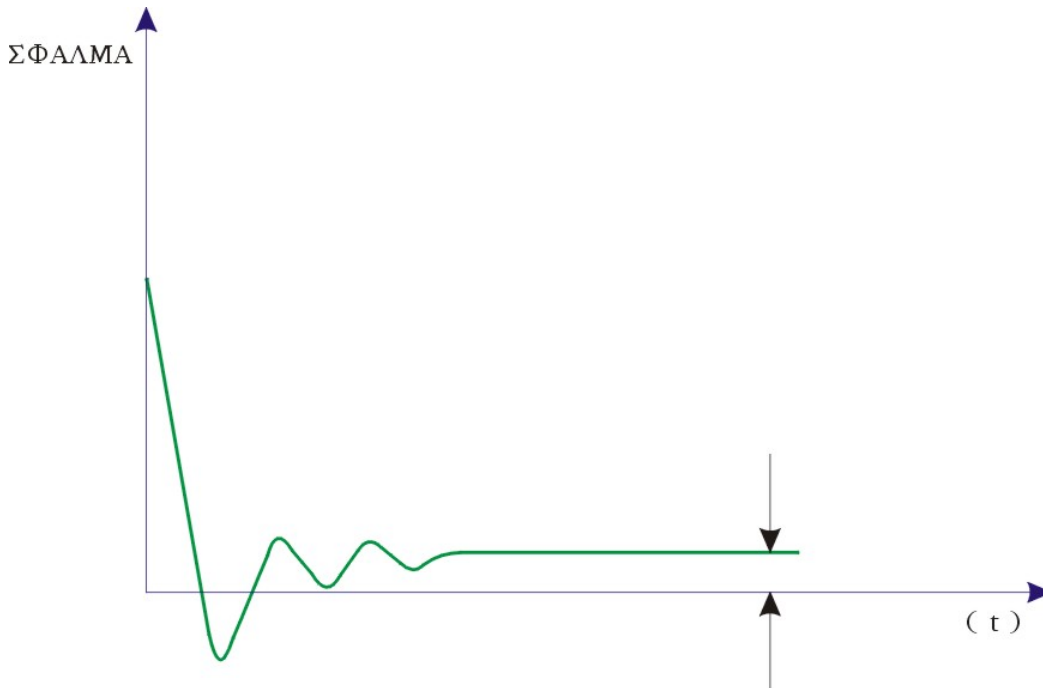
### ❑ Βηματική διέγερση.

Αν στο προσομοιωμένο σύστημα εφαρμόσουμε μόνο αναλογικό όρο και στην είσοδο εφαρμοσθεί βηματική συνάρτηση τότε παρατηρούμε ότι η έξοδος μεταβάλλεται αργά (με καθυστέρηση) και σταθεροποιείται (φθάνει σε μόνιμη κατάσταση) σε τιμή μικρότερη από την επιθυμητή. Κατά την μεταβατική όμως κατάσταση παρουσιάζει μειούμενες ταλαντώσεις με αποτέλεσμα κάποιες χρονικές στιγμές η έξοδος να είναι μεγαλύτερη και κάποιες φορές αρκετά μικρότερη από την επιθυμητή.



Σχήμα 6

Όταν το σύστημα είναι στην μόνιμη κατάσταση η τιμή του σφάλματος είναι μεγάλη.



Σχήμα 7

Αν ελαττώσουμε τον αναλογικό όρο  $P$  (αυτό σημαίνει αύξηση της ενίσχυσης ή αλλιώς κέρδους  $K_p$ ), τότε ελαττώνεται και η τιμή του σφάλματος στη μόνιμη κατάσταση. Μηδενισμό όμως του σφάλματος δεν είναι δυνατόν να πετύχουμε διότι το κέρδος του συστήματος θα πρέπει να αυξηθεί σε τέτοια τιμή που θα οδηγήσει το σύστημα σε **αστάθεια**. Στην πράξη η τιμή του αναλογικού όρου ρυθμίζεται σε μια μέση τιμή. Αυτό έχει σαν συνέπεια τα εξής:

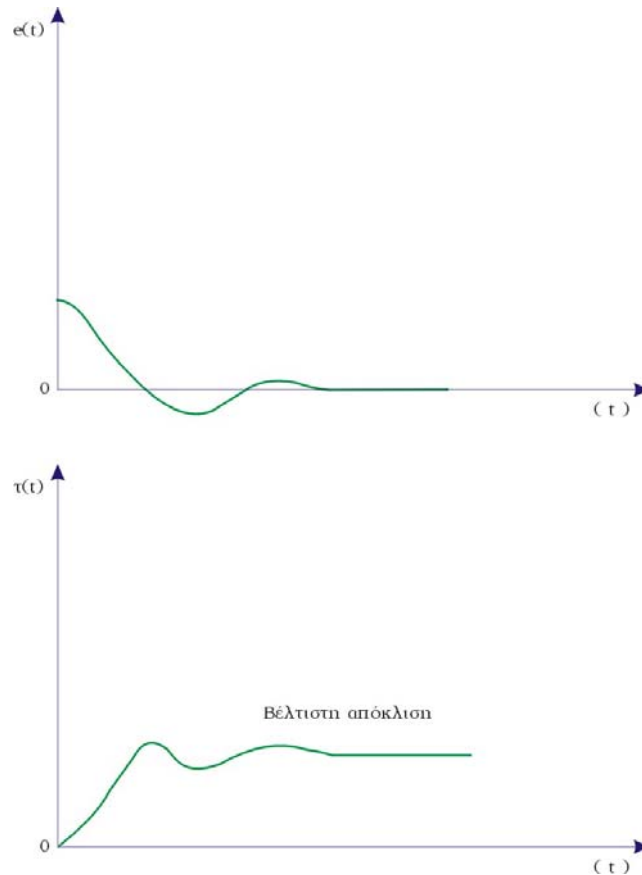
Στην **μεταβατική κατάσταση** το σύστημα αποκρίνεται σχετικά γρήγορα αλλά με μία ή περισσότερες υπερυψώσεις.

Στην **μόνιμη κατάσταση** η τιμή της μετρούμενης μεταβλητής παρουσιάζει απόκλιση από την τιμή της εισόδου (σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση).

### **ΜΟΝΑΔΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ**



Η απόκλιση της εξόδου στην μόνιμη κατάσταση μπορεί να ελαττωθεί αν χρησιμοποιήσουμε μαζί με τον αναλογικό έλεγχο και έλεγχο με ολοκλήρωση δηλαδή αν έχουμε αναλογικό όρο και όρο ολοκλήρωσης ταυτόχρονα. Σε αυτήν την περίπτωση το τμήμα του σήματος ελέγχου  $\tau(t)$  που οφείλεται στον ολοκληρωτικό όρο, σε κάθε χρονική στιγμή, είναι το εμβαδόν της επιφάνειας που περικλείεται από την κυματομορφή του σφάλματος και τους άξονες  $e(t)$  και  $t$  όπως φαίνεται στο σχήμα 8. Το σήμα ελέγχου  $\tau(t)$  έχει μία μη μηδενική τιμή όταν το σφάλμα  $e(t)$  είναι μηδέν.



Σχήμα 8

**Παρατήρηση.** Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η επίδραση του όρου ολοκλήρωσης έχει σαν αποτέλεσμα να μηδενίζεται το σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση αλλά αυξάνεται ο χρόνος της μεταβατικής κατάστασης και ελαττώνεται η ευστάθεια του συστήματος.

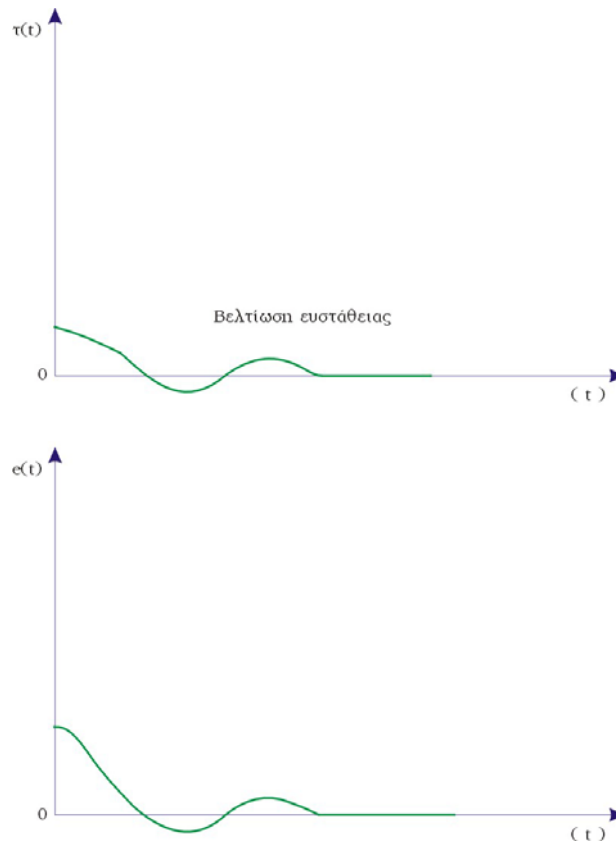
## ΜΟΝΑΔΑ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΙΣΗ

Για να βελτιώσουμε την λειτουργία του ελεγκτή προσθέτουμε και τον όρο της διαφόρισης. Η μονάδα της διαφόρισης βελτιώνει σημαντικά την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος. Το μεγάλο πλεονέκτημα του ελέγχου με την συμμετοχή του όρου διαφόρισης είναι ότι προβλέπεται η μελλοντική τιμή του σφάλματος από την κλίση της κυματομορφής του σφάλματος. Με τον τρόπο αυτό γίνεται η ανάλογη διόρθωση πριν το σφάλμα πάρει πολύ μεγάλη τιμή.

Ο έλεγχος με τον όρο διαφόρισης δεν επηρεάζει άμεσα το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση αλλά αυξάνει την ταχύτητα απόσβεσης του συστήματος όπως φαίνεται στο σχήμα 9.

Αυτό έχει δύο συνέπειες:

- Επιτρέπει την ελάττωση του αναλογικού όρου, άρα ελαττώνονται οι ταλαντώσεις που προέρχονται από υπερβολικές τιμές αναλογικού όρου και έτσι βελτιώνεται η ευστάθεια
- Η ελάττωση του αναλογικού όρου έχει και σαν συνέπεια την ελάττωση της απόκλισης στην μόνιμη κατάσταση.



Σχήμα 9

Το πρόβλημα που θα πρέπει να αντιμετωπισθεί είναι ποιες είναι οι τιμές των τριών αυτών όρων που εξασφαλίζουν την ευστάθεια του συστήματος και μειώνουν τις πιθανές διαταραχές (θόρυβος, παράσιτα), που μπορούν να επιδράσουν πάνω στη διαδικασία και να μεταβάλλουν την τιμή της εξόδου από την επιθυμητή.

Η εφαρμογή τυχαίων τιμών των τριών όρων είναι αδύνατο να γίνει στο φυσικό σύστημα στην πράξη τόσο για λόγους ασφαλείας του προσωπικού όσο και για λόγους αποφυγής πιθανής καταστροφής του συστήματος.

Για τον λόγο αυτό η διαδικασία προσομοιώνεται σε έναν αναλογικό ή ψηφιακό υπολογιστή. Στην περίπτωση που είναι δύσκολο να βρεθεί κατάλληλο υπολογιστικό σύστημα είναι δυνατόν να κατασκευασθεί ένας ηλεκτρονικός προσομοιωτής (δηλαδή ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα) που η συνάρτηση μεταφοράς του να είναι ίδια με της υπό μελέτη διαδικασίας.

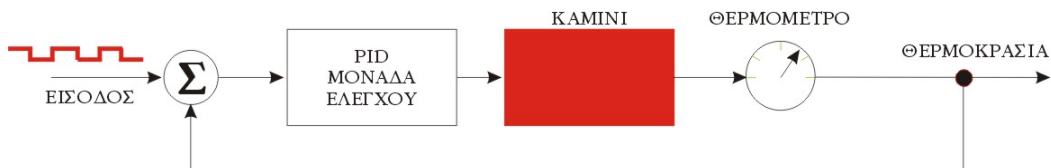
Ένας τέτοιος ειδικός προσομοιωτής είναι η μονάδα PCS-327 που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο.

Με την βοήθεια του προσομοιωτή μπορεί να μελετηθεί η ευστάθεια του συστήματος κλειστού βρόγχου του σχήματος 1.

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ PCS-327

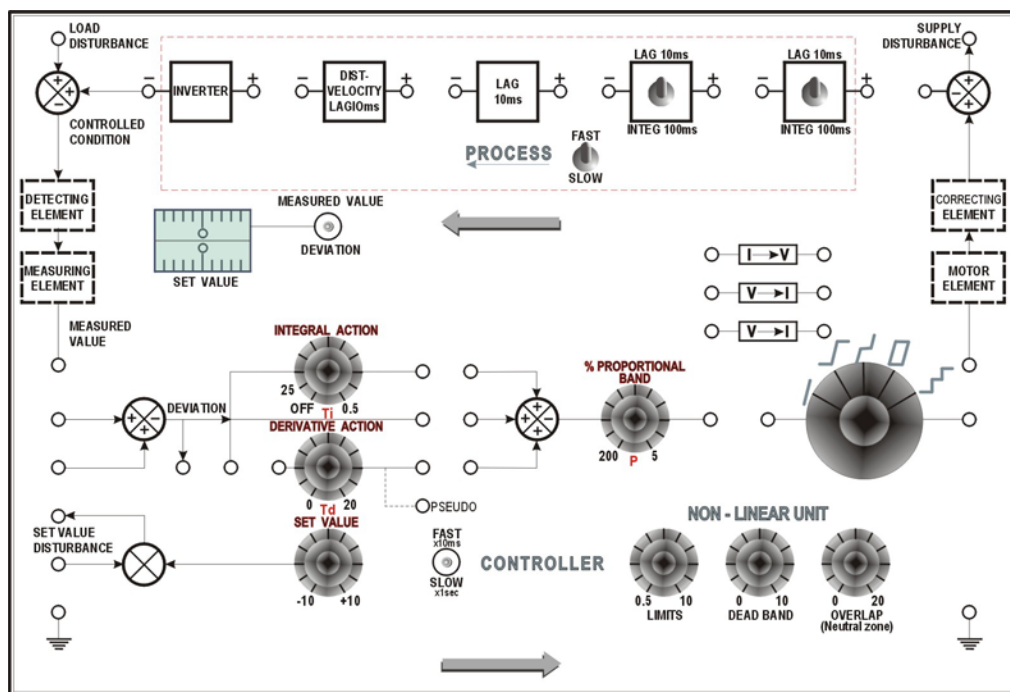
Μία συνηθισμένη βιομηχανική διαδικασία είναι η τήξη μετάλλων σε ηλεκτρικό φούρνο. Τα μέταλλα συνιστούν το φορτίο και η έξοδος του συστήματος είναι η θερμοκρασία στο εσωτερικό του φούρνου. Η συσκευή μέτρησης της εξόδου είναι ένα θερμόμετρο ενώ το σύστημα αποτελείται από την μονάδα αυτομάτου ελέγχου και τις αντιστάσεις που θερμαίνουν τον φούρνο.

Το γενικό διάγραμμα της διαδικασίας είναι:



Σχήμα 10

Για να μελετηθεί η **ευστάθεια** του συστήματος και για να ρυθμιστεί η μονάδα αυτομάτου ελέγχου με σκοπό να έχουμε **άριστη απόκριση** του συστήματος για είσοδο βηματική συνάρτηση, είναι αναγκαίο να γίνει προσομοίωση του συστήματος γιατί δεν είναι δυνατόν να γίνονται τυχαίες προσθήκες και δοκιμές στο πραγματικό σύστημα. Πρέπει λοιπόν να βρεθεί ένα ανάλογο ηλεκτρονικό κύκλωμα που η απόκρισή του να περιγράφεται από την ίδια συνάρτηση μεταφοράς που περιγράφεται και το φυσικό σύστημα. Το ηλεκτρονικό αυτό κύκλωμα υλοποιείται στην μονάδα PCS-327. Στο σχήμα 11 φαίνεται ο πίνακας συνδέσεων του προσομοιωτή που αποτελείται από:



Σχήμα 11

- **Τη διεργασία (PROCESS)**
- **Την μονάδα ελέγχου (CONTROLLER)**
- **Την μονάδα μη γραμμικών στοιχείων (NON LINEAR UNIT)**

Η μονάδα ελέγχου περιλαμβάνει τα εξής επί μέρους στοιχεία:

- Διάταξη ρύθμισης της πόλωσης της εισόδου (SET VALUE) η οποία λειτουργεί με ηλεκτρικά σήματα από +10 έως -10 Volts.
- Αθροιστή (COMPARING ELEMENT)
- Αναλογική μονάδα ελέγχου (% PROPORTIONAL BAND) της οποίας η επί τοις εκατό αναλογική περιοχή μπορεί να μεταβάλλεται από 4% έως 200%.
- Μονάδα ελέγχου με ολοκλήρωση (INTEGRAL ACTION) της οποίας ο χρόνος δράσεως  $T_i$  μπορεί να μεταβάλλεται από 5 ms έως 250 ms όταν ο διακόπτης FAST/SLOW βρίσκεται στην θέση FAST και από 0.5 ms έως 25 sec όταν ο διακόπτης βρίσκεται στη θέση SLOW.
- Μονάδα ελέγχου με διαφόριση (DERIVATIVE ACTION) της οποίας ο χρόνος δράσης  $T_d$  μπορεί να μεταβάλλεται από 0 έως 20 ms όταν ο διακόπτης FAST/SLOW βρίσκεται στη θέση FAST και από 0 έως 2 sec όταν βρίσκεται στη θέση SLOW.

Με τη μονάδα μη γραμμικών στοιχείων είναι δυνατόν να εισάγουμε μη γραμμικά χαρακτηριστικά στο σήμα σφάλματος όπως είναι η υστέρηση και η νεκρή ζώνη.

Το όργανο μέτρησης της συσκευής είναι διπλό και μπορεί να μετρήσει την τάση εισόδου (SET VALUE) και την τάση εξόδου του συστήματος (MEASURED VALUE) που είναι η θερμοκρασία.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

ΒΑΘΜΟΣ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
ΕΤΟΣ:
ΑΡ. ΜΗΤΡΩΟΥ:
ΟΜΑΔΑ:
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:

**ΘΕΜΑ: ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΡΙΩΝ ΟΡΩΝ**

ΣΥΣΤΗΜΑ: **ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΓΧΟΥ**  
ΕΙΣΟΔΟΣ: **ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΟΣ ΠΑΛΜΟΣ**

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση θα μελετηθεί η απόκριση ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου μιας διαδικασίας τήξεως μετάλλων σε ηλεκτρική κάμινο. Η μελέτη θα γίνει στο ανάλογο σύστημα αυτής της διαδικασίας το οποίο είναι προσομοιωμένο στην συσκευή PCS-327. Στην συσκευή αυτή υπάρχει η προσομοιωμένη διαδικασία στη θέση PROCESS και η μονάδα ελέγχου τριών όρων.

Τα σύστημα τήξεως των μετάλλων με όλους τους επί μέρους φυσικούς μηχανισμούς που το αποτελούν, έχει αντικατασταθεί, με την βοήθεια της συνάρτησης μεταφοράς από ένα απλό ηλεκτρονικό κύκλωμα. Το σημαντικό κέρδος στην προσομοίωση είναι ότι ο ερευνητής μπορεί να κάνει τις μελέτες του στο προσομοιωμένο σύστημα αντί στο πραγματικό. Έτσι χωρίς να κινδυνεύουν τίποτε άλλο εκτός από μερικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα, το προσομοιωμένο σύστημα μπορεί άφοβα να βρίσκεται σε αστάθεια, κρίσιμη ευστάθεια ή πλήρη ευστάθεια για οποιαδήποτε χρονική περίοδο.

Για την εύρεση των τιμών των τριών όρων (ώστε το σύστημα να είναι ευσταθές) που είναι:

- **Kp** (αναλογικός),
- **Ti** (ολοκλήρωσης) και
- **Td** (διαφόρισης)

έχουν αναπτυχθεί δύο εμπειρικές μέθοδοι ρύθμισης που βασίζονται στην περίοδο ταλάντωσης του συστήματος και στις τιμές των όρων που το σύστημα βρίσκεται σε ταλαντώσεις. Αυτά τα δύο είναι

χαρακτηριστικές ιδιότητες του κάθε συστήματος. Οι εμπειρικές αυτές μέθοδοι είναι:

- του ZEIGLER AND NICHOLS και
- του ATTKINSON.

Στην άσκηση θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του **ZEIGLER AND NICHOLS**.

Η επιθυμητή λειτουργία του συστήματος είναι εκείνη κατά την οποία **η έξοδος ακολουθεί πιστά και γρήγορα την κυματομορφή της εισόδου**.

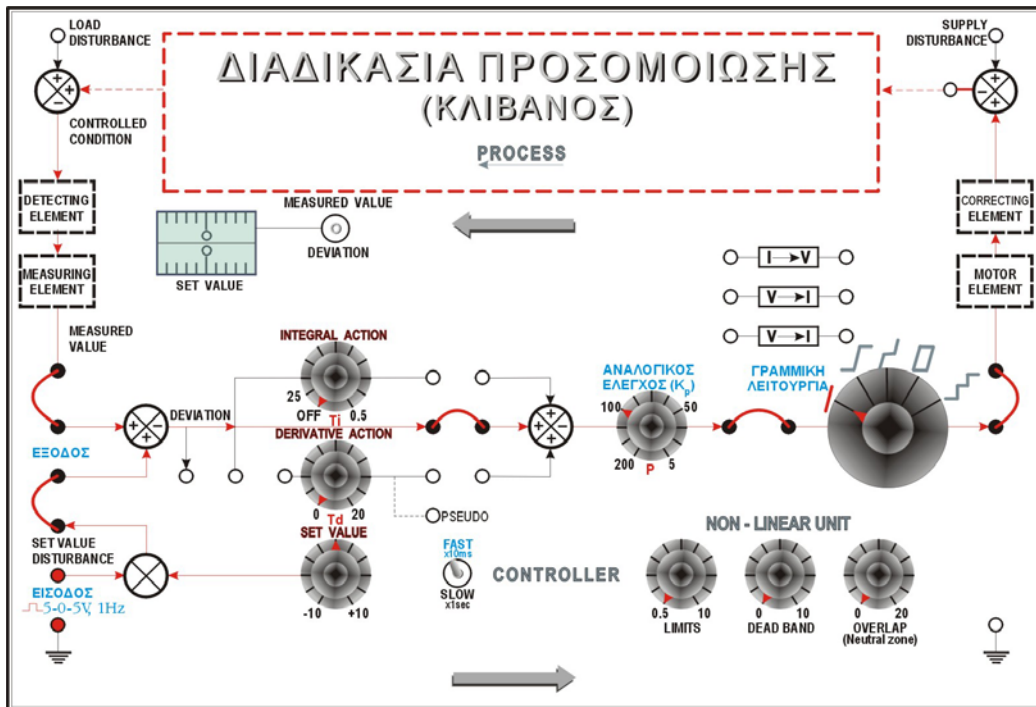
Δηλαδή όταν ο παλμός στην είσοδο γίνει 5 Volts θα πρέπει και η έξοδος να φθάσει στο ίδιο ύψος χωρίς ιδιαίτερη καθυστέρηση και (αν είναι δυνατόν) χωρίς ταλαντώσεις ή υπερυψώσεις κατά την διάρκεια της μεταβατικής κατάστασης.

Αντικειμενικός σκοπός αυτής της άσκησης είναι να διαπιστωθεί η επίδραση των τριών όρων κάθε ενός ξεχωριστά και κατόπιν όλων μαζί στην λειτουργία του συστήματος και να προσδιορισθούν οι τιμές των τριών όρων ώστε το σύστημα να είναι ευσταθές και σε ικανοποιητική λειτουργία από άποψη πιστότητας και ταχύτητας.

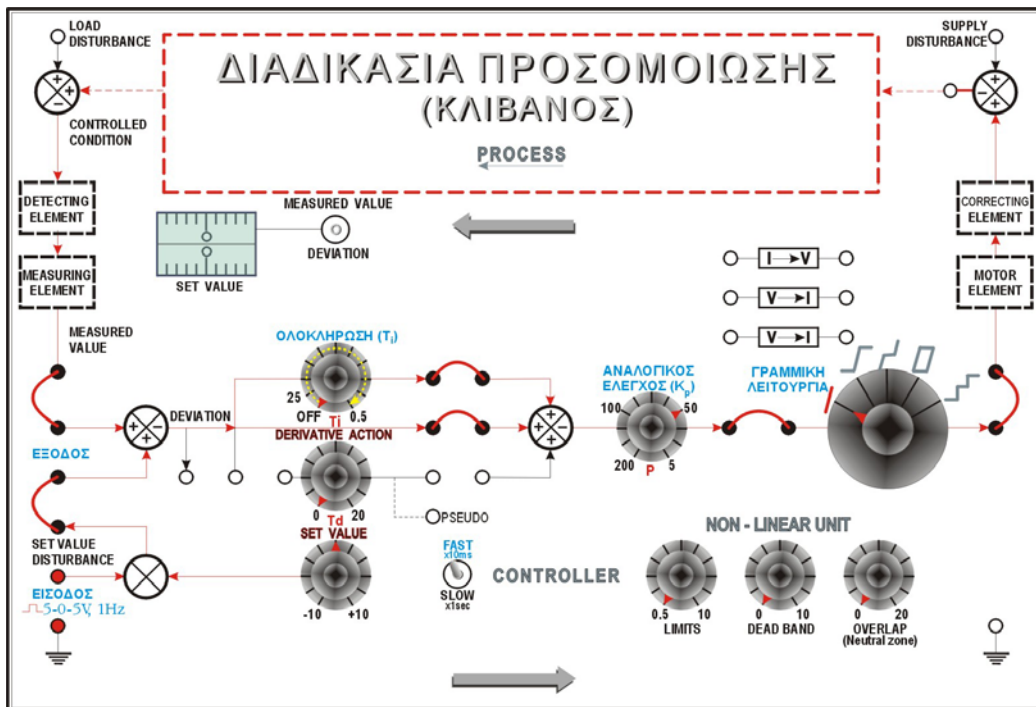
**ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ:**

1. Κάντε τις συνδέσεις στον πίνακα της μονάδας PCS-327 όπως φαίνονται στο σχήμα 12.
2. Βάλτε όλους τους διακόπτες και τα ποτενσιόμετρα όπως φαίνονται στο σχήμα 12.
3. Συνδέστε στην είσοδο του προσομοιωτή ένα σήμα τετραγωνικού παλμού ύψους 5 Volts. Το σήμα αυτό θα το πάρετε από γεννήτρια που είναι ρυθμισμένη σε συχνότητα 1 Hz και από την έξοδο της TTL.
4. Συνδέστε το ένα κανάλι παλμογράφου στο σήμα εισόδου και το άλλο κανάλι στην έξοδο του συστήματος (MEASURED VALUE).
5. Ρυθμίστε τις θέσεις των κυματομορφών στον παλμογράφο έτσι ώστε τα κάτω ίχνη των κυματομορφών να συμπίπτουν. Αυτό γίνεται για να διαπιστώνουμε με ευκολία την διαφορά της τιμής της εξόδου από αυτήν της εισόδου. Χρησιμοποιήστε τα ρυθμιστικά Position του παλμογράφου για κάθε ίχνος.
6. Επαναλάβετε το βήμα 4 για τιμές της αναλογικής περιοχής ίσες με 50% και 5% και σχεδιάστε τις κυματομορφές που παρατηρείτε στις περιπτώσεις αυτές. Γράψτε ποια είναι η διαφορά στην κυματομορφή της εξόδου στις δύο περιπτώσεις.
7. Κάντε τις συνδέσεις στον πίνακα της μονάδας όπως φαίνονται στο σχήμα 13.
8. Βάλτε όλους τους διακόπτες και τα ποτενσιόμετρα όπως φαίνονται στο σχήμα 13.
9. Σημειώστε τι είδους μονάδα ελέγχου έχετε (από το ποιους όρους χρησιμοποιείτε).





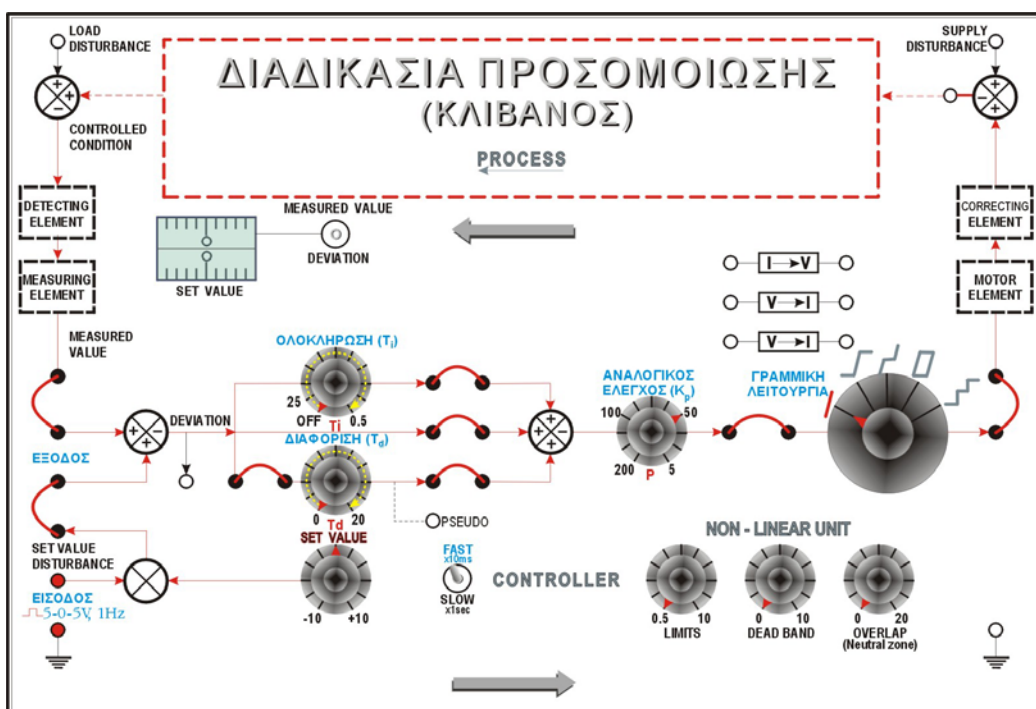
Σχήμα 12



Σχήμα 13

10. Εφαρμόστε τετραγωνική κυματομορφή στην είσοδο όπως και στο βήμα 3.

11. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο  $T_i$  προς τα δεξιά έως ότου το σύστημα πέσει σε αμείωτες ταλαντώσεις.
12. Στρέψτε προς τα αριστερά το ποτενσιόμετρο  $T_i$  έως ότου παρατηρηθούν μειούμενες ταλαντώσεις.
13. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο του αναλογικού όρου στο 50%.
14. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο  $T_i$  έως ότου μειωθούν οι ταλαντώσεις.
15. Από τους παραπάνω χειρισμούς γράψτε ποια είναι η συνδυασμένη επίδραση των δύο αυτών όρων στην συμπεριφορά του συστήματος.
16. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο P στην θέση 100%.
17. Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο  $T_i$  έως ότου το σύστημα γίνει ασταθές και σημειώστε αυτήν την τιμή.
18. Κάντε τις συνδέσεις στον πίνακα της μονάδας όπως φαίνονται στο σχήμα 14.



Σχήμα 14

19. Τοποθετήστε όλους τους διακόπτες και τα ποτενσιόμετρα στις θέσεις που φαίνονται στο σχήμα 14.
20. Σημειώστε τι είδους μονάδα ελέγχου πραγματοποιήσατε.
21. Εφαρμόστε στην είσοδο τετραγωνικό παλμό όπως στο βήμα 3. Ρυθμίστε το  $T_i$  έτσι ώστε το σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση να είναι μηδέν.
22. Αυξήστε αργά την ποσότητα  $T_d$  και παρατηρείστε τι επίδραση έχει στην απόκριση του συστήματος. Γράψτε τις παρατηρήσεις σας.

23. Τοποθετήστε τα ποτενσιόμετρα των  $T_i$  και  $T_d$  στην θέση OFF και 0 αντίστοιχα και το ποτενσιόμετρο P στην θέση 100%.
24. Εφαρμόστε στην είσοδο του συστήματος τετραγωνικό παλμό όπως στο βήμα 3.
25. Αρχίστε να ελαττώνετε αργά την αναλογική περιοχή έως ότου το σύστημα αρχίσει να ταλαντώνεται με αμείωτες ταλαντώσεις. Σημειώστε την τιμή του P σαν  $P_0$ . Μετρήστε την περίοδο των ταλαντώσεων και σημειώστε την σαν  $T_0$ .
26. Ρυθμίστε τα ποτενσιόμετρα των τριών όρων στις παρακάτω τιμές:  $P=1.67P_0$   $T_i=T_0/2$  και  $T_d=T_0/8$ .
27. Αν οι παραπάνω τιμές είναι έξω από την περιοχή ρύθμισης των ποτενσιόμετρων, διαιρέστε τις τιμές με το 10.
28. Παρατηρήστε στον παλμογράφο την απόκριση του συστήματος και σχεδιάστε την. Αυτή είναι η απόκριση που προέρχεται από την εφαρμογή της μεθόδου ZEIGLER AND NICHOLS.
29. Αν το σήμα της εξόδου δεν ομοιάζει με τετραγωνικό παλμό ή έχει υπερψώσεις, ρυθμίστε μικρομετρικά τα τρία ποτενσιόμετρα ώστε να βελτιώσετε την απόκριση όσο το δυνατόν περισσότερο. Επειδή η μέθοδος αυτή είναι εμπειρική δεν είναι δυνατόν να δίνει πάντα τις ακριβείς τιμές των τριών όρων και για τον λόγο αυτό χρειάζεται η μικρομετρική ρύθμιση. Απαντήστε εάν υπάρχει άλλος λόγος για τον οποίο προκύπτει διαφορετική ρύθμιση από την ιδανική και οφείλεται στην όλη διαδικασία ρύθμισης.
30. Σχεδιάστε την βέλτιστη απόκριση του συστήματος που παρατηρήσατε στον παλμογράφο.
31. Ανακεφαλαιώστε τις παρατηρήσεις και τα συμπεράσματά σας και γράψτε τα.

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 4.

### **ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ**

#### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

#### **Γενικά περί αναλογικών υπολογιστών**

Κατά την μελέτη των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου χρειάζεται να βρεθούν οι κατάλληλοι αντισταθμιστές ώστε ένα κλειστό σύστημα να συμπεριφέρεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές της σχεδίασης. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται την πλήρη μελέτη των παραμέτρων του φυσικού συστήματος κάτω από διάφορες συνθήκες. Όπου αυτό είναι δυνατό να γίνει χωρίς κίνδυνο η διαδικασία της μελέτης είναι μια σχετικά απλή υπόθεση. Σε πάρα πολλά όμως συστήματα δεν είναι δυνατόν να δίνουμε διεγέρσεις διαφόρων μορφών και να καταγράφουμε τις αποκρίσεις ενώ το σύστημα παραμένει ανοιχτό. Οι πιθανοί λόγοι μπορεί να είναι πολλοί π.χ. αδυναμία μεταφοράς του συστήματος σε εργασιακό χώρο όπου κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες θα γίνει η μελέτη του, επικινδυνότητα κατά την διάρκεια της ανεξέλεγκτης λειτουργίας του, ασύμφορη χρονικά ή οικονομικά λειτουργία και άλλα. Αυτό όμως περιορίζει, αν δεν απαγορεύει, την μελέτη του συστήματος και θα πρέπει να αντικατασταθεί από μια μέθοδο που να δίνει τουλάχιστον ικανοποιητικά αποτελέσματα αν όχι άριστα. Η μέθοδος αυτή είναι η **προσομοίωση**.

Είναι γνωστό από τη θεωρία συστημάτων ότι η δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια μιας ή περισσότερων διαφορικών εξισώσεων, ανάλογα με το πλήθος των μεταβλητών του συστήματος. Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά κάποιων φυσικών μεταβλητών του συστήματος σε συνάρτηση με τις εισόδους του ή και σε συνάρτηση με τις άλλες μεταβλητές του. Η λύση τους δίνει τη χρονική συμπεριφορά των μεταβλητών του συστήματος, δηλαδή, σε τελευταία ανάλυση, τη συμπεριφορά του συστήματος. Μια ισοδύναμη (εξωτερικά) παράσταση του συστήματος δίνεται στο χώρο της συχνότητας από τη συνάρτηση μεταφοράς. Η συνάρτηση μεταφοράς περιγράφει την (αναλογική) σχέση μεταξύ της εισόδου(ων) και της εξόδου(ων) του συστήματος, όταν αυτές εξετάζονται στο χώρο της συχνότητας. Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία συστημάτων η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος είναι μαθηματικά άμεσα συνδεδεμένη με τη διαφορική(ές) εξίσωση(ες) περιγραφής του ίδιου

συστήματος, αφού η πρώτη προκύπτει από τη δεύτερη ύστερα από την εφαρμογή του μετασχηματισμού Laplace.

Η θεωρητική μελέτη ενός συστήματος, όπως είναι γνωστό, βασίζεται στην εφαρμογή διαφόρων θεωρητικών μεθόδων ώστε να διαμορφωθεί τελικά ένα κλειστό (θεωρητικό πάντα) σύστημα που να συμπεριφέρεται σύμφωνα με τις ανάγκες της σχεδίασης. Η θεωρητική αυτή διαμόρφωση της αρχικής συνάρτησης μεταφοράς υπαγορεύει τις προσθήκες ή αλλαγές που πρέπει να γίνουν στο φυσικό σύστημα ώστε να συμπεριφέρεται σύμφωνα με τις ανάγκες της σχεδίασης. Μια τέτοια διαδικασία είναι επίπονη και χρονοβόρα ιδιαίτερα αν δεν γίνεται χρήση των ψηφιακών υπολογιστών. Το ερώτημα λοιπόν είναι εάν υπάρχει κάποιος τρόπος που να δίνει τα ίδια αποτελέσματα ευκολότερα και γρηγορότερα. Βρέθηκε ότι κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει αν μπορούσε να δημιουργηθεί ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα όπου με την βοήθεια διάφορων ρυθμιστικών να είναι δυνατόν να γίνεται συνεχώς ρύθμιση των διαφόρων παραμέτρων έως ότου παρατηρηθεί κάποια ικανοποιητική, αν όχι άριστη, συμπεριφορά του συστήματος.

Από την θεωρία της ηλεκτρονικής διαπιστώνουμε ότι είναι εύκολο να κατασκευάσουμε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που να είναι ανάλογο του φυσικού συστήματος, να προσομοιώνει δηλαδή τη συνάρτηση μεταφοράς του (δηλαδή οι μεταβολές των τάσεων σε κάποια σήματα του κυκλώματος να δίνουν γράφημα ανάλογο με το γράφημα των λύσεων της συνάρτησης μεταφοράς ή με την μεταβολή κάποιας παραμέτρου στο φυσικό σύστημα). Ιδιαίτερα με την χρήση τελεστικών ενισχυτών σε μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος ο όγκος αυτών των κατασκευών ως και η κατανάλωσή τους έχει περιορισθεί αισθητά. Είναι φυσικό ότι για κάθε συνάρτηση μεταφοράς είναι απαραίτητο ένα διαφορετικό κύκλωμα. Δηλαδή θα πρέπει για κάθε φυσικό σύστημα να κατασκευάζουμε και ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που να εξυπηρετεί μόνο εκείνη την συγκεκριμένη συνάρτηση μεταφοράς χωρίς να μπορεί να τροποποιηθεί εύκολα ώστε να είναι αναλογικό σύστημα μιας έστω και ελαφρά τροποποιημένης συνάρτησης μεταφοράς. Αυτό σημαίνει ότι και για κάθε αλλαγή ή μετατροπή στο φυσικό μας σύστημα θα πρέπει να κατασκευάζεται άλλο κύκλωμα ή τουλάχιστον να τροποποιείται το αρχικό.

Επειδή η διαδικασία της κατασκευής είναι χρονοβόρα αναζητήθηκαν μέθοδοι που θα ελαχιστοποιούσαν τον χρόνο αυτό. Η καλύτερη λύση βρέθηκε ότι είναι ο αναλογικός υπολογιστής. Αναπτύχθηκε πολύ νωρίτερα από τον ψηφιακό και δεν έχει καμιά ομοιότητα με αυτόν. Ο αναλογικός υπολογιστής αποτελείται από τελεστικούς ενισχυτές που λειτουργούν σαν αθροιστές ή σαν ολοκληρωτές. Προγραμματίζεται με καλώδια και έχει το πλεονέκτημα να δίνει συνεχείς λύσεις μέσα στον χρόνο.

Η προσομοίωση θα μπορούσε να γίνει με την βοήθεια ψηφιακών υπολογιστών όπου θα προγραμματισθούν οι συναρτήσεις μεταφοράς και αυτός θα αναλάβει την προβολή του γραφήματος των λύσεων. Ιδιαίτερα με την αυξανόμενη υπολογιστική ισχύ των επεξεργαστών η ψηφιακή προσομοίωση δείχνει όλο και περισσότερο εφάμιλλη της αναλογικής. Υπάρχει όμως μία ουσιαστική διαφορά μεταξύ τους που θα εξακολουθεί να υπάρχει για πάντα. Ένας ψηφιακός υπολογιστής χρειάζεται κάποιον χρόνο υπολογισμού από τότε που θα δοθούν οι νέες τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών έως ότου να έχουμε τις τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών είτε στην μνήμη του υπολογιστή είτε στην οθόνη. Δηλαδή η προσομοίωση με ψηφιακά μέσα δεν είναι συνεχής μέσα στον χρόνο σε αντίθεση με την αναλογική προσομοίωση.

Στην πράξη, σήμερα, χρησιμοποιούνται υβριδικοί υπολογιστές δηλαδή συνδυασμός αναλογικών και ψηφιακών υπολογιστών. Ο λόγος είναι ότι στα πολύπλοκα συστήματα και ιδιαίτερα στα συστήματα μεγάλης κλίμακας απαιτούνται μεγάλοι αναλογικοί υπολογιστές. Το κριτήριο του ποια τμήματα θα προσομοιωθούν στον αναλογικό και ποια στον ψηφιακό είναι η ταχύτητα μεταβολής των μεταβλητών και των παραμέτρων του συστήματος. Τα αργής ταχύτητας μπορούν να προσομοιωθούν στον ψηφιακό υπολογιστή χωρίς μεγάλο σφάλμα προσομοίωσης ενώ τα υψηλής ταχύτητας μεταβολής είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν στον αναλογικό υπολογιστή. Η σύνδεση μεταξύ τους γίνεται μέσω μετατροπών από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα και από ψηφιακό σε αναλογικό.

### **Παράδειγμα.**

Η προσομοίωση μιας πτήσης αεροπλάνου, με όλα τα όργανα ελέγχου στην παρατήρηση του χειριστή, μπορεί να γίνει σε ψηφιακό υπολογιστή όταν πρόκειται για παιχνίδι ή σε αρχικά στάδια εκπαίδευσης. Στα στάδια όμως της αξιολόγησης ενός πιλότου είναι απαραίτητη η χρήση υβριδικών υπολογιστών.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς αντιστοιχούν κατά κανόνα σε διαφορικές εξισώσεις άρα ο αναλογικός υπολογιστής πρέπει να περιλαμβάνει τελεστικούς ενισχυτές που λειτουργούν σαν ολοκληρωτές διότι όταν περάσει από έναν ολοκληρωτή το σήμα ενός νιοστού διαφορικού στην έξοδο θα έχουμε το διαφορικό τάξης  $v-1$ . Οι απλοί τελεστικοί ενισχυτές που δεν κάνουν ολοκλήρωση χρησιμοποιούνται σαν πολλαπλασιαστές ή σαν αλγεβρικοί αθροιστές ή σαν διαιρέτες.

## Περιγραφή των τμημάτων και της λειτουργίας του αναλογικού υπολογιστή EAI-1000

Στο Εργαστήριο Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου της Πολυτεχνικής του Δ. Π. Θ. υπάρχει για εκπαιδευτικούς σκοπούς ο αναλογικός υπολογιστής EAI-1000. Είναι ένας μικρός αναλογικός υπολογιστής που δέχεται επέκταση και είναι κατάλληλος για μικρού και μεσαίου μεγέθους προσομοιώσεις. Διακρίνεται σε τέσσερα μέρη:

### A) Την **μονάδα ενδείξεων**.

Η μονάδα αυτή βρίσκεται στην επάνω πλευρά της συσκευής και αποτελείται από το δεξιό μέρος που είναι μια μονάδα μετρήσεων που είναι ένα βολτόμετρο με μέγιστη ένδειξη + ή - 1.000 και αντιστοιχεί στα 10 Volts και από το αριστερό μέρος που αποτελείται από διόδους LED. Κάθε διάδος LED αντιστοιχεί σε ένα δομικό στοιχείο κάθε διάτρητου πίνακα και όταν κάποια από τις διόδους εκπέμπει φως τότε σημαίνει ότι η έξοδος του αντίστοιχου δομικού στοιχείου δεν είναι γραμμική (υπερφόρτωση).

### B) Το **κύκλωμα χρονισμού**

Βρίσκεται στο κάτω μέρος της συσκευής και είναι ρυθμιζόμενο. Ορίζει την χρονική διάρκεια κατά την οποία θα λειτουργεί ο αναλογικός υπολογιστής (δηλαδή πόσο χρόνο θα εξελίσσεται η διαδικασία που προσομοιώθηκε) και με ποιόν ρυθμό (συχνότητα) θα γίνεται η παρατήρηση της ίδιας διαδικασίας. Υπάρχει χονδρική και μικρομετρική ρύθμιση του χρόνου.

Στη μονάδα χρονισμού διακρίνουμε:

- Δύο λογικούς διακόπτες S0 και S1. Οι διακόπτες αυτοί έχουν τρεις θέσεις την μεσαία, την κάτω και την επάνω. Στην μεσαία θέση δίνουν λογικό 0 και στις άλλες δύο λογικό 1. Τα λογικά σήματα μπορούμε να τα παρατηρήσουμε στις επαφές S0 και S1.
- Δύο ενδεικτικές φωτοεκπέμπουσες διόδους (LED). Οι διόδοι αυτές ανάβουν όταν εμφανισθεί λογικό 1 στις επαφές L0 και L1.
- Δύο ρυθμιστικά κουμπιά στη γεννήτρια χρονισμού. Το επάνω κουμπί ρυθμίζει την τάξη μεγέθους του χρόνου και το κάτω κάνει μικρομετρική ρύθμιση της διάρκειας της περιόδου επανάληψης της προσομοιωμένης διαδικασίας.

Τα λογικά έχουν τιμές 0 Volt για το 0 και 10 Volts για το 1.

### Γ) Το **χειριστήριο εντολών και διευθύνσεων**

Είναι ένα αλφαριθμητικό χειριστήριο που συνδέεται σε έναν μικροελεγκτή (είναι το μόνο ψηφιακό κομμάτι της συσκευής) ο οποίος συνδέει μέσω αναλογικών διακοπών την μονάδα μέτρησης των ενδείξεων σε μία από τις εξόδους των μονάδων της συσκευής. Επίσης δίνει την δυνατότητα να τοποθετεί ο χειριστής την συσκευή σε κατάσταση αρχικών συνθηκών (IC) ή σε απλή ή σε επαναλαμβανόμενη λειτουργία.

Έτσι όταν πατηθεί το κουμπί IC τότε η συσκευή βρίσκεται σε κατάσταση αρχικών συνθηκών, δηλαδή οι ολοκληρωτές θα εμφανίζουν στη έξοδό τους την τάση που έχει εφαρμοσθεί στην ειδική είσοδο IC των ολοκληρωτών.

Όταν πατηθεί το κουμπί OP, τότε η γεννήτρια χρονισμού δίνει σήμα στους ολοκληρωτές ώστε να επιτραπεί η λειτουργία τους και θα συνεχίσει έως ότου αλλάξουμε την κατάσταση της συσκευής.

Όταν πατηθεί το κουμπί HLD (HOLD) τότε οι ολοκληρωτές σταματούν την λειτουργία και η τάση στην έξοδό τους είναι εκείνη που είχαν όταν πατήθηκε το κουμπί, δηλαδή σταματά η χρονική εξέλιξη της διαδικασίας στο χρονικό σημείο που πατήθηκε το κουμπί.

Όταν πατηθεί το κουμπί REP (REPETITION), τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται με συχνότητα που ορίζεται από την γεννήτρια χρονισμού.

**Παράδειγμα μέτρησης με την βοήθεια του ενσωματωμένου βολτομέτρου.** Έστω ότι θέλουμε να μετρήσουμε την τάση στον δρομέα του ποτενσιόμετρου P3 του πεδίου 0.

Πατάμε το P για να επιλέξουμε την κατηγορία των ποτενσιόμετρων. Παρατηρούμε ότι ανάβει το LED στο γράμμα P που βρίσκεται στην μονάδα ενδείξεων.

Πατάμε το 0 για να επιλέξουμε το πεδίο 0 (FIELD 0). Στο πρώτο ανεξάρτητο ψηφίο εμφανίζεται το 0.

Πατάμε το 3 για να επιλεγεί το P3. Στο δεύτερο ανεξάρτητο ψηφίο εμφανίζεται το 3.

Στην μονάδα ένδειξης θα εμφανισθεί ένας αριθμός μεταξύ -1.000 και +1.000. Η μονάδα αντιστοιχεί στα 10 Volts. Άρα είναι εύκολο να συμπεράνουμε την πραγματική τάση στο σημείο που επιλέξαμε.

Ειδικά για τα ποτενσιόμετρα που η είσοδός τους δεν είναι συνδεδεμένη σε τάση, άρα δεν θα μετρηθεί καμία τάση στην έξοδο, θα πρέπει να πατηθεί το κουμπί PS. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να συνδεθεί η τάση τροφοδοτικού +10 Volts στις εισόδους όλων των ποτενσιόμετρων για να είναι δυνατή η μέτρηση τάσης στις εξόδους των. Από το μέγεθος της τάσης συμπεραίνουμε την θέση στην οποία βρίσκεται ο δρομέας του ποτενσιόμετρου. Κατά τον τρόπο αυτό ρυθμίζονται οι τιμές των αρχικών συνθηκών ή των συντελεστών που χρησιμοποιούμε με την βοήθεια των ποτενσιόμετρων.

Αν θέλουμε να μετρήσουμε την τάση στην έξοδο ενός αθροιστή ή ενός ολοκληρωτή ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με την διαφορά ότι αντί για το γράμμα P χρησιμοποιούμε το S για τους αθροιστές και το I για τους ολοκληρωτές.

#### Δ) Δύο διάτρητους πίνακες

Κάθε διάτρητος πίνακας ονομάζεται πεδίο (Field). Έχει την δυνατότητα να αποσπάται από την συσκευή. Αυτή η δυνατότητα είναι πολύ χρήσιμη όταν θέλει κανείς να έχει διαφορετικά προγράμματα σε διάφορους πίνακες και να τα εναλλάσσει ώστε να μη χάνει χρόνο. Ακόμη είναι δυνατόν ο προγραμματισμός να γίνεται

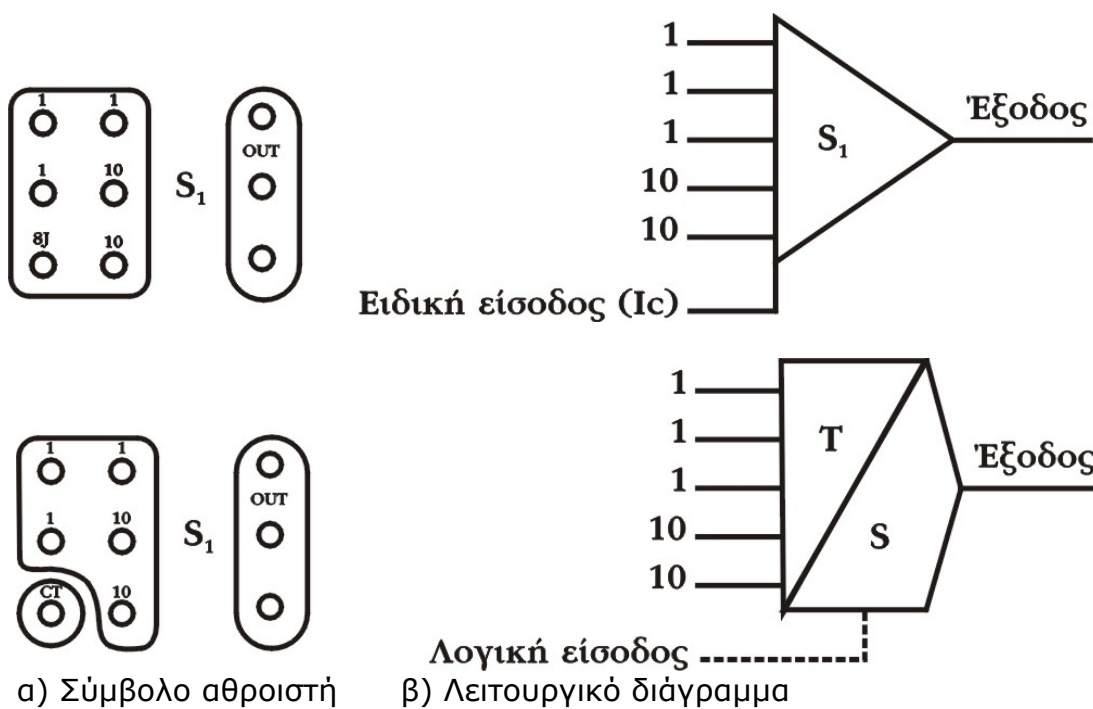


χωρίς να απασχολείται η συσκευή του αναλογικού υπολογιστή ή σε άλλο χώρο βολικό για τον προγραμματιστή. Οι διάτρητοι πίνακες έχουν ηλεκτρικές επαφές ομαδοποιημένες κατά τέτοιον τρόπο ώστε να είναι εύκολη η αναγνώριση της κάθε επαφής ως προς το που ανήκει και τι είδους είναι. Ο προγραμματισμός του αναλογικού υπολογιστή γίνεται με καλώδια και όταν χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα δύο διάτρητοι πίνακες τότε η γεφύρωση μεταξύ των δύο πινάκων γίνεται με την βοήθεια των επαφών που βρίσκονται στα άκρα των πινάκων (σημειώνονται με κίτρινο χρώμα και την ένδειξη TRUNKS) και έχουν αριθμητική αντιστοιχία μεταξύ τους.

Τα δομικά στοιχεία σε κάθε πίνακα είναι τα παρακάτω:

**Αθροιστές.**

Σημειώνονται με το γράμμα S και είναι οι S0, S1, S2 και S3 είναι τελεστικοί ενισχυτές και έχουν 6 εισόδους και μία έξοδο που εμφανίζεται σε 3 επαφές βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους. Όλες οι επαφές των εισόδων είναι ανεξάρτητες και χαρακτηρίζονται οι 3 με το 1 που σημαίνει ενίσχυση με κέρδος ενίσχυσης 1, οι δύο με το 10 που σημαίνει κέρδος 10 και την SJ που είναι μία είσοδος ειδικής χρήσης και χρησιμοποιείται συνήθως όταν είναι επιθυμητή μία διαφορετική ενίσχυση άλλη από το 1 ή 10 ή μία μεταβλητή ενίσχυση με την βοήθεια ποτενσιόμετρου. Οι αθροιστές S4 και S5 αντί για την ειδική είσοδο έχουν στην θέση αυτή μία λογική είσοδο που όταν εφαρμοσθεί λογικό 1 τότε η έξοδος είναι ενεργή ενώ όταν εφαρμοσθεί λογικό 0 η έξοδος του αθροιστή αποσυνδέεται από τις επαφές του πίνακα. Παρακάτω φαίνονται τα σχήματα των αθροιστών όπως εμφανίζονται στον πίνακα και τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά σύμβολα.

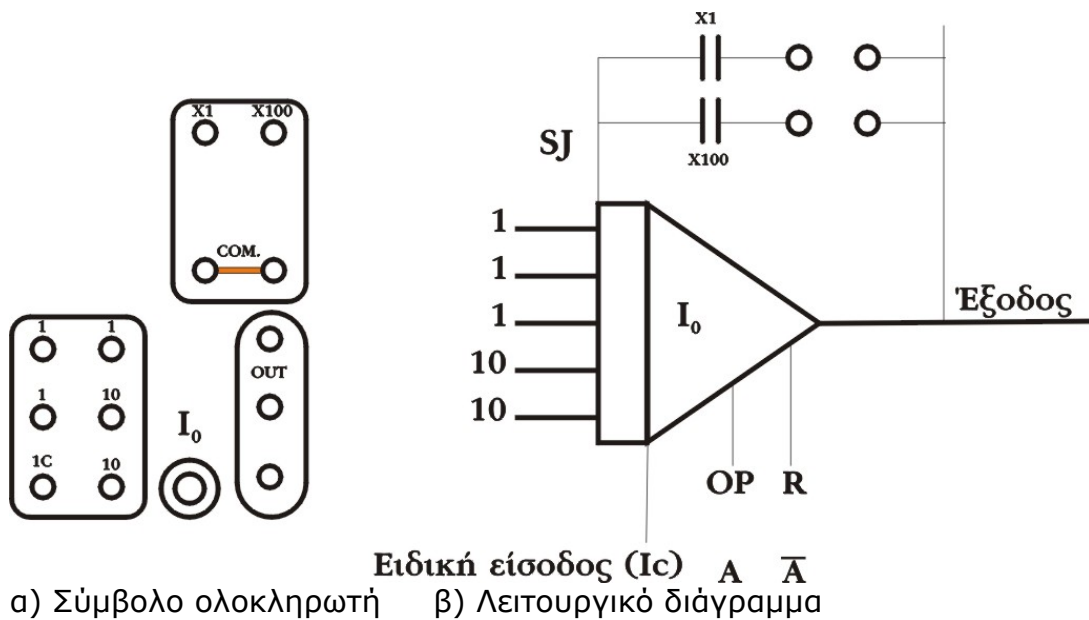


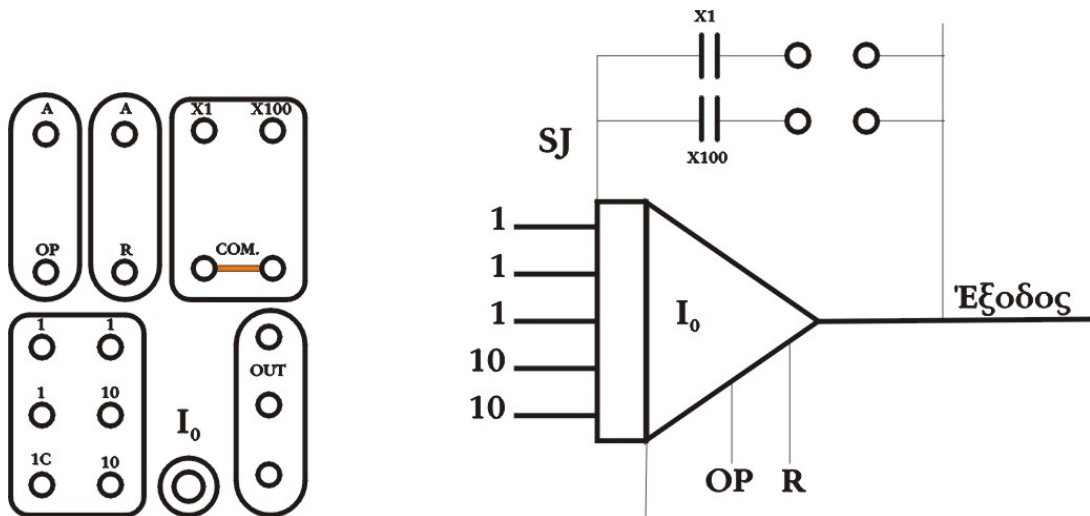
α) Σύμβολο αθροιστή

β) Λειτουργικό διάγραμμα

### ❑ Ολοκληρωτές.

Είναι τελεστικοί ενισχυτές που με την βοήθεια πυκνωτών στην ανατροφοδότηση λειτουργούν σαν ολοκληρωτές δηλαδή στην έξοδο εμφανίζεται το αθροισμένο σήμα των εισόδων το οποίο όμως έχει υποστεί ολοκλήρωση. Διαθέτουν τρεις εισόδους με κέρδος 1, δύο εισόδους με κέρδος 10 και μία ειδική είσοδο την IC όπου εφαρμόζεται μία τάση που αντιστοιχεί στις αρχικές συνθήκες δηλαδή σε ποια τιμή βρίσκεται η μεταβλητή κατά την χρονική στιγμή  $t=0$ . Η ταχύτητα ολοκλήρωσης εξαρτάται από την τιμή του πυκνωτή στην ανατροφοδότηση του τελεστικού ενισχυτή και υπάρχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ δύο πυκνωτών με τις ενδείξεις  $x1$  που είναι η αργή ταχύτητα και  $x100$  που είναι η γρήγορη ταχύτητα. Η επιλογή της ταχύτητας εξαρτάται από την επιλογή χρόνου της περιόδου στην γεννήτρια χρονισμού. Οι ολοκληρωτές έχουν τέσσερις καταστάσεις λειτουργίας που ορίζονται από την γεννήτρια χρονισμού μέσω δύο λογικών σημάτων και είναι: (1) αρχικές συνθήκες (IC), (2) ολοκλήρωση σε καθορισμένο χρόνο (OP), (3) διακοπή ολοκλήρωσης (HOLD) και (4) επαναλαμβανόμενη ολοκλήρωση με καθορισμένη περίοδο (REP). Οι ολοκληρωτές I0 και I3 έχουν την δυνατότητα να δέχονται εξωτερικό χρονισμό διαφορετικής περιόδου από της εσωτερικής γεννήτριας χρονισμού. Στα επόμενα σχήματα φαίνονται τα σύμβολα και τα λειτουργικά διαγράμματα των ολοκληρωτών.



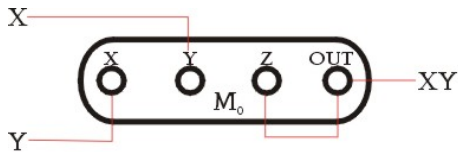


Ειδική είσοδος (Ic) A  $\bar{A}$

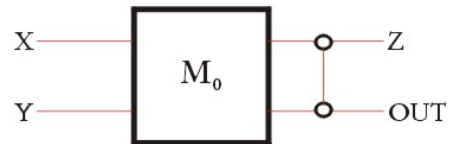
α) Σύμβολο ολοκληρωτή β) Λειτουργικό διάγραμμα

**Πολλαπλασιαστές.**

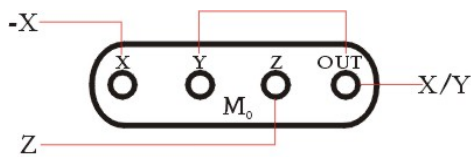
Οι εισοδοί είναι οι επαφές X, Y, Z και η έξοδος η επαφή OUT. Ανάλογα με την συνδεσμολογία τους είναι δυνατόν να γίνουν οι πράξεις του πολλαπλασιασμού, της διαίρεσης και η εξαγωγή της τετραγωνικής ρίζας. Οι συνδεσμολογίες φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



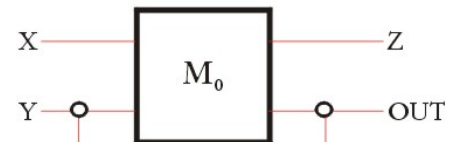
α) Σύμβολο πολλαπλασιαστή



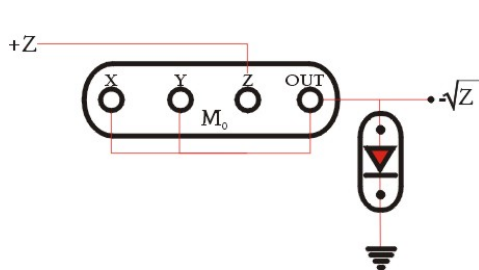
β) Λειτουργικό διάγραμμα



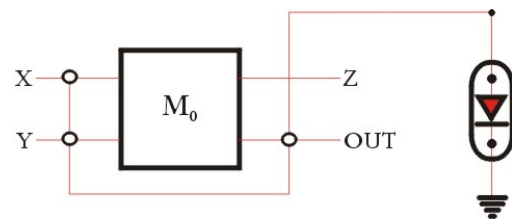
α) Σύμβολο διαιρέτη



β) Λειτουργικό διάγραμμα



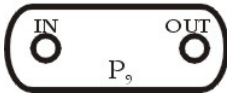
α) Σύμβολο τετραγωνικής ρίζας



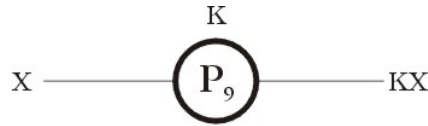
β) Λειτουργικό διάγραμμα

**□ Ποτενσιόμετρα.**

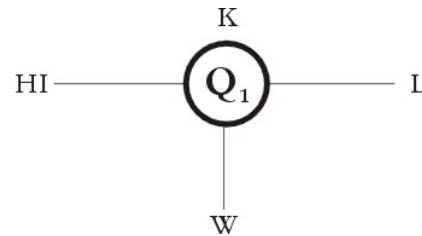
Το σύμβολο και το λειτουργικό διάγραμμα των ποτενσιόμετρων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Υπάρχουν δύο ειδών ποτενσιόμετρα, αυτά που βρίσκονται τοποθετημένα επάνω στον πίνακα και έχουν και τα τρία άκρα τους ελεύθερα και αυτά που βρίσκονται δίπλα από τον πίνακα και έχουν το ένα άκρο τους μόνιμα συνδεδεμένο στην γείωση.



α) Ποτενσιόμετρο με γείωση



α) Ποτενσιόμετρο χωρίς γείωση

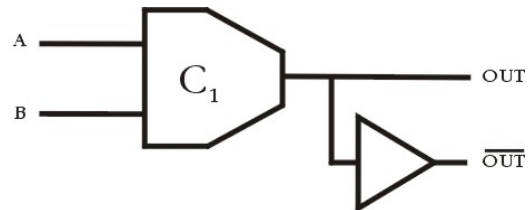


**□ Συγκριτές.**

Κάθε συγκριτής έχει δύο εισόδους τις A και B. Όταν το σήμα στην είσοδο A είναι μεγαλύτερο εκείνου της εισόδου B τότε στην έξοδο OUT εμφανίζεται λογικό 1 και όταν  $B > A$  τότε λογικό 0. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το σύμβολο και το λειτουργικό διάγραμμα.

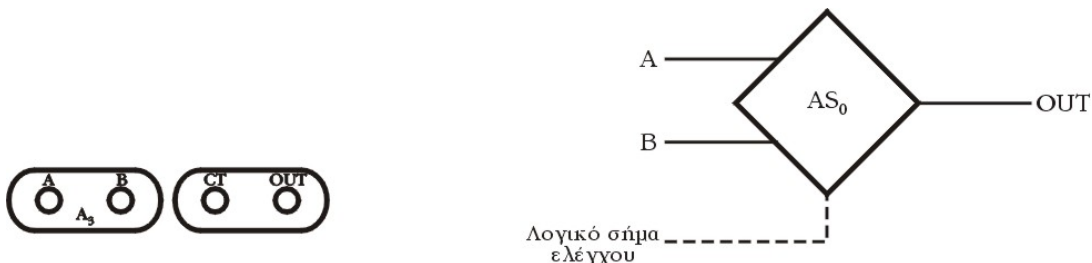


α) Σύμβολο συγκριτή



**Αναλογικοί διακόπτες.**

Υπάρχουν δύο εισοδοι A και B. Όταν στην ειδική εισοδο CT εφαρμοσθεί λογικό 1 τότε το σήμα της εισόδου A εμφανίζεται στην έξοδο OUT και όταν το λογικό στην CT είναι 0 τότε εμφανίζεται το της εισόδου B. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το σύμβολο και το λειτουργικό διάγραμμα.



α) Σύμβολο αναλογικού διακόπτη      β) Λειτουργικό διάγραμμα

**Πύλες AND ή NAND.**

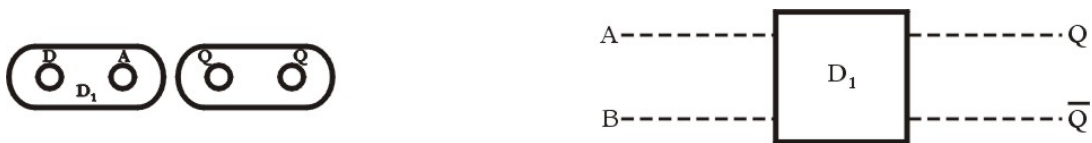
Οι πύλες αυτές είναι λογικές πύλες δύο εισόδων. Η έξοδος C δίνει το αποτέλεσμα από την AND ενώ η αντίστροφη έξοδος από την NAND. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το σύμβολο και το λειτουργικό διάγραμμα.



α) Σύμβολο πύλης AND ή NAND      β) Λειτουργικό διάγραμμα

**Πολυδονητές.**

Είναι τύπου D και στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το σύμβολο και το λειτουργικό διάγραμμα.



α) Σύμβολο πολυδονητή      β) Λειτουργικό διάγραμμα

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

ΒΑΘΜΟΣ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ:
ΕΤΟΣ:
ΑΡ. ΜΗΤΡΩΟΥ:
ΟΜΑΔΑ:
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

#### ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ:

Παρακάτω θα δοθεί ένα παράδειγμα προσομοίωσης για την εξοικείωση με τον προγραμματισμό του αναλογικού υπολογιστή. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται σε οποιοδήποτε μοντέλο οποιασδήποτε εταιρίας με πολύ μικρές διαφορές.

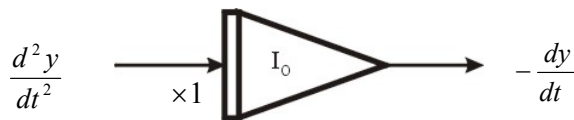
Έστω ότι πρέπει να προσομοιωθεί μία διαφορική εξίσωση δευτέρου βαθμού. Θα μπορούσε να είναι η δυναμική εξίσωση ενός ελατηρίου ή ενός εκκρεμούς.

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + k \frac{dy}{dt} + y = 0$$

1. Γράφουμε στο αριστερό μέρος της εξίσωσης το μεγαλύτερης τάξεως διαφορικό κανονικοποιώντας τον συντελεστή του στη μονάδα και όλα τα υπόλοιπα στο δεξιό μέρος. Έτσι θα έχουμε:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -k \frac{dy}{dt} - y \quad \text{ή} \quad \frac{d^2 y}{dt^2} = -(k \frac{dy}{dt} + y)$$

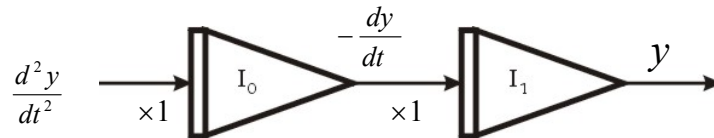
#### Απλή ολοκλήρωση



2. Έστω ότι κατά κάποιο τρόπο, π.χ. από μια γεννήτρια έχουμε το σήμα του δεύτερου διαφορικού. Αν πράγματι κάτι τέτοιο είναι δυνατό τότε η εισαγωγή του στην είσοδο ενός ολοκληρωτή θα μας έδινε το διαφορικό πρώτης τάξεως στην έξοδο.

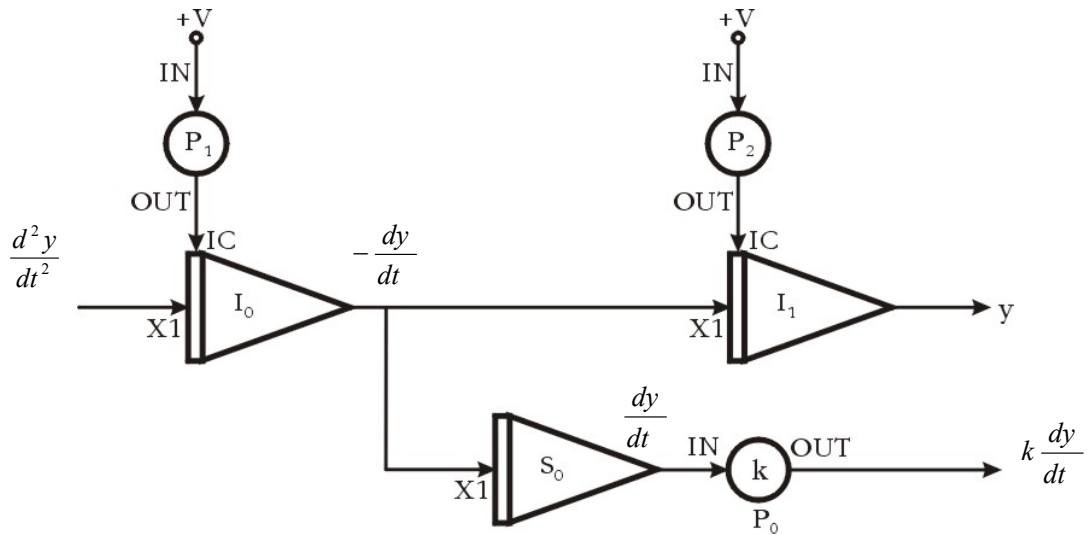
3. Εάν τώρα το σήμα που προκύπτει τροφοδοτηθεί στην είσοδο άλλου ολοκληρωτή τότε στην έξοδο θα έχουμε την μεταβλητή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

### Διπλή ολοκλήρωση

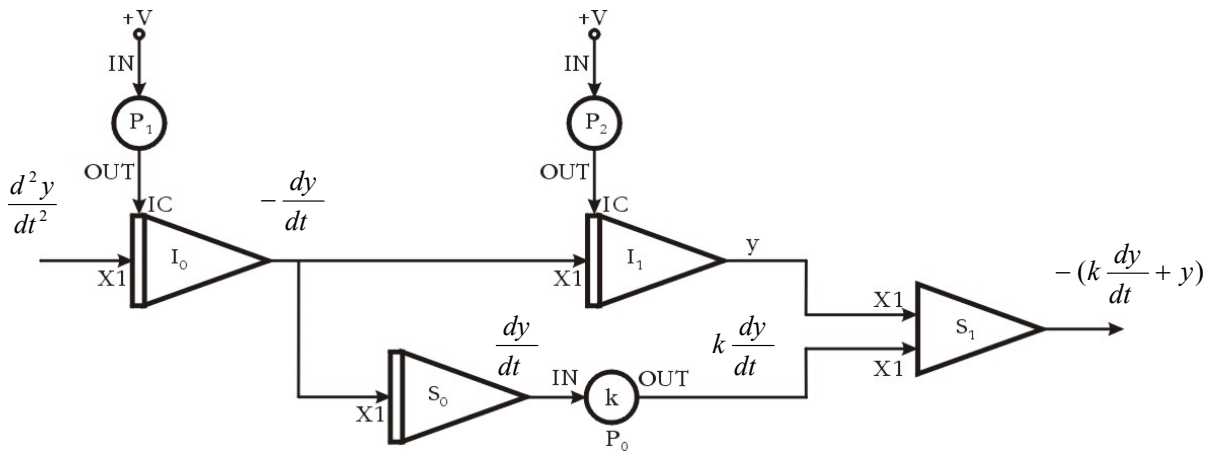


4. Έστω ότι οι αρχικές συνθήκες  $y^0(0)$  και  $y^{(1)}(0)$  δεν είναι μηδενικές. Δηλαδή θα πρέπει οι ολοκληρωτές να αρχίζουν την ολοκλήρωση από κάποια ορισμένη τιμή τάσης η οποία ονομάζεται αρχική συνθήκη (IC) και δίνεται από τα δεδομένα του προβλήματος. Οι αρχικές συνθήκες τοποθετούνται ως εξής: για θετική τιμή θα χρησιμοποιηθεί η σταθερή τάση +10 Volts που είναι οι επαφές που χαρακτηρίζονται με κόκκινο κύκλο. Για αρνητική τιμή θα χρησιμοποιηθεί η σταθερή τάση -10 Volts που είναι οι επαφές που χαρακτηρίζονται από άσπρο κύκλο. Η επαφή αυτή θα συνδεθεί με την επαφή IN ενός ποτενσιόμετρου. Η επαφή OUT του ποτενσιόμετρου θα συνδεθεί στην επαφή IC του αντίστοιχου ολοκληρωτή. Είναι προφανές ότι η τιμή της τάσης αυτής μπορεί να ρυθμιστεί με την βοήθεια της μονάδας ενδείξεων και ότι είναι δυνατόν να αλλάξει ανά πάσα χρονική στιγμή αλλά η νέα τιμή της θα γίνει αντιληπτή από το κύκλωμα μόνο κατά την χρονική στιγμή που ο ολοκληρωτής βρίσκεται σε κατάσταση αρχικών συνθηκών.
5. Συνδέουμε το σήμα  $-\frac{dy}{dt}$  (έξοδος του  $I_0$ ) στην είσοδο  $\times 1$  του αθροιστή  $S_0$ . Στην έξοδο του αθροιστή θα εμφανισθεί το σήμα  $\frac{dy}{dt}$ .
6. Για να δημιουργηθεί ο όρος  $k \frac{dy}{dt}$  θα πρέπει να συνδεθεί η έξοδος του  $S_0$  στην είσοδο ενός ποτενσιόμετρου (έστω του  $P_0$ ) οπότε στην έξοδο εμφανίζεται ο επιθυμητός όρος. Το  $k$  εκφράζεται από την τιμή του ποτενσιόμετρου.

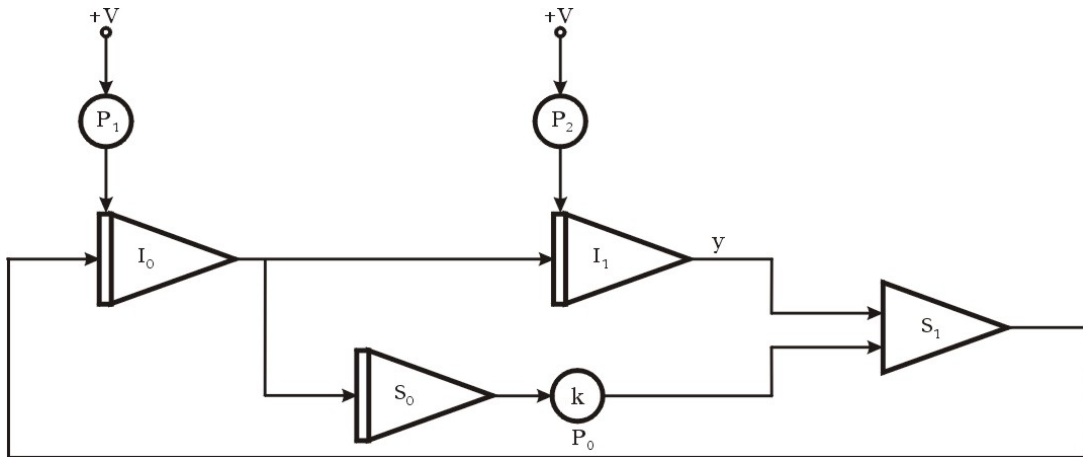




7. Τώρα τα σήματα  $k \frac{dy}{dt}$  και  $y$  θα συνδεθούν σε δύο εισόδους του αθροιστή  $S_1$ . Στην έξοδο θα έχουμε το σήμα  $-(k \frac{dy}{dt} + y)$ .



8. Επειδή η έξοδος του  $S_1$  που είναι το  $-(k \frac{dy}{dt} + y)$  είναι (λόγω της εξίσωσης) ίσο με την δεύτερη παράγωγο μπορούμε να βραχυκυκλώσουμε την έξοδο του  $S_1$  με την είσοδο του  $I_0$ . Στο σημείο αυτό έχουν πραγματοποιηθεί όλες οι συνδέσεις του προγραμματισμού του αναλογικού υπολογιστή για τη δυναμική εξίσωση που δόθηκε αρχικά. Οι συνδέσεις αυτές φαίνονται ολοκληρωμένες στο παρακάτω σχήμα.



9. Για  $k=0.5$  ρυθμίστε το  $P_0$  στην τιμή  $+.500$ . Για αρχικές συνθήκες του  $I_0$  ίσες με  $0.7$ , ρυθμίστε το  $P_1$  στην τιμή  $+.700$  και για αρχικές συνθήκες του  $I_1$  ίσες με  $0.65$ , ρυθμίστε το  $P_2$  στην τιμή  $+.650$ .
10. Έστω ότι η εξέλιξη του φαινομένου θα είναι αργή οπότε τοποθετούμε τους βραχυκυκλωτήρες ταχύτητας των ολοκληρωτών στην θέση  $x1$  και την γεννήτρια χρονισμού στα  $10 \text{ sec}$ .
11. Για να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα οι έξοδοι των ολοκληρωτών συνδέονται στα δύο κανάλια ενός παλμογράφου.
12. Πατάμε το πλήκτρο REP στο χειριστήριο και παρατηρούμε την μεταβολή τους στον παλμογράφο.
13. Θέτουμε τον παλμογράφο σε λειτουργία XY και παρατηρούμε τα δύο σήματα σε επίπεδο φάσεων.
14. Δίνουμε διαφορετικές τιμές στο  $k$  και παρατηρούμε την επίδραση του συντελεστή αυτού στο διάγραμμα των φάσεων.
15. Δίνουμε διαφορετικές τιμές στα ποτενσιόμετρα αρχικών συνθηκών και παρατηρούμε την επίδρασή τους στο διάγραμμα των φάσεων.
16. Σχεδιάστε τις ποιο αντιπροσωπευτικές καμπύλες που παρατηρήσατε και γράψτε τις παρατηρήσεις σας για την κατάσταση λειτουργίας του προσομοιωμένου συστήματος που συμπεραίνετε.
17. Για να παρατηρήσετε την εξέλιξη του φαινομένου σε γρήγορη ταχύτητα αρκεί να τοποθετήσετε τους βραχυκυκλωτήρες των ολοκληρωτών στο  $x100$  και την γεννήτρια χρονισμού στο  $0.1 \text{ sec}$ .



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ – ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ

#### **(ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ)**

Οι τελεστικοί ενισχυτές (Τ.Ε.) είναι γνωστοί και ως υπολογιστικοί ενισχυτές εξαιτίας της ικανότητάς τους να υλοποιούν εύκολα συνήθεις υπολογιστικές λειτουργίες όπως πρόσθεση, ολοκλήρωση και διαφόριση. Μιγαδικές συναρτήσεις μπορούν να υλοποιηθούν συνδυάζοντας στοιχεία εν σειρά ή παράλληλα. Ο αναλογικός υπολογιστής βασίζεται σε τελεστικούς ενισχυτές και παρόλο που έχει εκτοπιστεί από τον ψηφιακό υπολογιστή σε πολλές γενικές εφαρμογές, διατηρεί έναν σημαντικό ρόλο στις προσομοιώσεις που απαιτούν ταχύτατη απόκριση σε πραγματικό χρόνο, όπως οι εξομοιωτές.

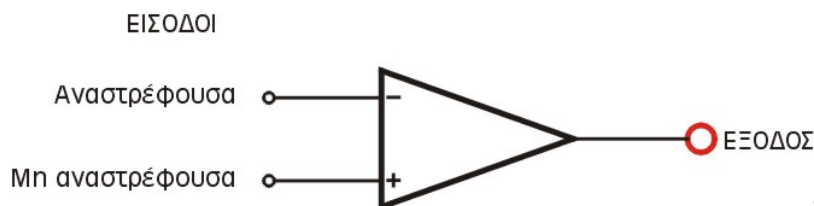
Οι Τ.Ε. χρωστούν τη δημοτικότητά τους στο γεγονός ότι στις περισσότερες εφαρμογές τα χαρακτηριστικά του τελικού κυκλώματος εξαρτώνται μόνο από τις ιδιότητες των παθητικών στοιχείων (αντιστάσεις, πυκνωτές, κλπ.) και όχι από τις ιδιότητες του ενισχυτή. Είναι πολύ πιο εύκολο να βρεθούν σε χαμηλή τιμή ευσταθή παθητικά στοιχεία με μεγάλη ακρίβεια, παρά ενεργητικά στοιχεία μεγάλης ακρίβειας. Παρά την εκτεταμένη "ψηφιοποίηση" του ελέγχου των μηχανικών συστημάτων, οι τελεστικοί ενισχυτές παραμένουν σημαντικά στοιχεία για την προσαρμογή μηχανικών συστημάτων. Αποτελούν τα καθιερωμένα δομικά στοιχεία προκειμένου για αναλογική επεξεργασία σήματος σε μέτρια επίπεδα ισχύος, δηλαδή για την επεξεργασία που λαμβάνει χώρα μετά από το πρώτο στάδιο ενίσχυσης της εξόδου των χαμηλής ισχύος μεταλλακτών και πριν τον ενισχυτή ισχύος του σταδίου επενέργειας. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές βαθμίδων απομόνωσης, φιλτραρίσματος σημάτων, υλοποίησης μη γραμμικών συναρτήσεων όπως ανόρθωση, ως ανιχνευτές μεγίστων τιμών, συγκριτές και μετατροπείς τάσης σε ρεύμα.

## I) ΤΕΛΕΣΤΙΚΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ

### A. ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ

Ένας τελεστικός ενισχυτής είναι ένας ενισχυτής συνεχούς ρεύματος υψηλού κέρδους με διαφορετικές εισόδους και, συνήθως, μοναδική έξοδο. Συνήθως λειτουργεί με διπολική εξισορροπημένη παροχή ισχύος, δίνοντας ένα εύρος εξόδου που καλύπτει θετικές και αρνητικές τάσεις. Ο κυκλωματικός συμβολισμός ενός τελεστικού ενισχυτή εικονίζεται στο Σχήμα 1. Στο σχήμα φαίνονται μόνο οι γραμμές των σημάτων. Οι συνδέσεις μέσω των οποίων παρέχεται η ισχύς παραλείπονται. Εσωτερικά, ένας τελεστικός ενισχυτής αποτελείται από έναν ενισχυτή τρανζίστορ πολλών σταδίων. Η εσωτερική περιγραφή του τελεστικού ενισχυτή δεν αποτελεί αντικείμενο αυτών των σημειώσεων, διδάσκεται όμως στο μάθημα της ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ. Εμάς μας απασχολούν τα εξωτερικά χαρακτηριστικά του, τα οποία αναφέρονται παρακάτω και τα οποία συνδυαζόμενα με τα κατάλληλα εξωτερικά κυκλώματα καθιστούν τους Τ.Ε. εξαιρετικά χρήσιμους.

Με τη μορφή που εικονίζεται στο σχήμα 1, ένας τελεστικός ενισχυτής δεν είναι πολύ χρήσιμος. Έχει ένα κέρδος της τάξης του  $10^5$  ή ακόμα περισσότερο, και έτσι μια τάση εισόδου περίπου 0.1mV θα αναγκάσει τον ενισχυτή να δώσει τη μέγιστη έξοδό του. Αυτό το υπερβολικά μεγάλο κέρδος όμως δεν αποτελεί αξιόπιστη παράμετρο, με την έννοια ότι η πραγματική τιμή του κέρδους μπορεί να μεταβάλλεται. Για το λόγο αυτό ο ενισχυτής σε αυτή τη μορφή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ενισχυτής υψηλού κέρδους σε μετρητικά όργανα.



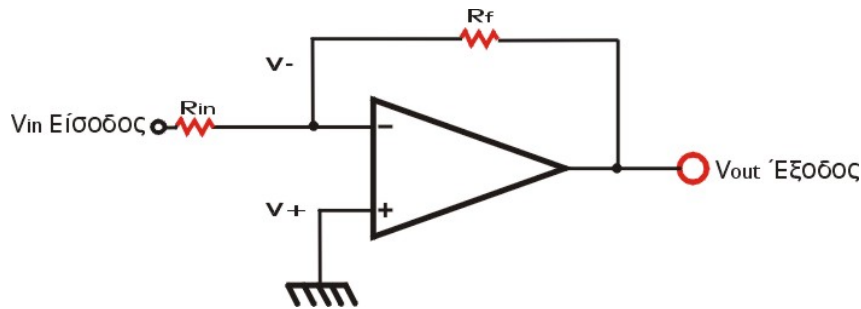
Σχήμα 1. Τελεστικός ενισχυτής

Γίνεται όμως χρήσιμος με την προσθήκη στοιχείων ανάδρασης στο κύκλωμα κατά τρόπο ώστε να μειώνουν το κέρδος. Αυτή η φαινομενικά ανώμαλη ενέργεια αποτελεί το τέχνασμα που δίνει στον τελεστικό ενισχυτή τα γνωστά χαρακτηριστικά του. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός απλού κυκλώματος τελεστικού ενισχυτή (στις περισσότερες εφαρμογές των τελεστικών ενισχυτών δεν απαιτούνται

παρά απλά κυκλώματα) μπορούν να εξαχθούν αρχίζοντας με τα χαρακτηριστικά ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή:

- Άπειρο κέρδος ανοιχτού βρόχου
- Άπειρη φαινόμενη αντίσταση εισόδου (δεν απορροφά καθόλου ρεύμα)
- Μηδενική φαινόμενη αντίσταση εξόδου (η τάση είναι ανεξάρτητη του φορτίου)

Το Σχήμα 2 παριστάνει ένα κύκλωμα στο οποίο χρησιμοποιείται η αναστρέφουσα είσοδος, με μια αντίσταση εισόδου και μια αντίσταση ανάδρασης. Η εφαρμογή αυτών των ιδανικών χαρακτηριστικών οδηγεί στο σημαντικό συμπέρασμα ότι η  $V_-$  πρέπει να είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Αυτό είναι μια συνέπεια του υψηλού κέρδους. Αν η έξοδος είναι σε μια λογική τάση, που πρέπει να είναι αφού δεν μπορεί να υπερβεί την τάση παροχής, η διαφορά μεταξύ των εισόδων πρέπει να είναι πολύ μικρή. Καθώς η  $V_+$  είναι γειωμένη, η  $V_-$  πρέπει να είναι πολύ κοντά στο δυναμικό της γείωσης. Οι ροές ρεύματος στον βρόχο ανάδρασης και στην είσοδο μπορούν τώρα να υπολογιστούν ως εξής:



Σχήμα 2 Αναστρέφων ενισχυτής

⇒

$$i_f = \frac{V_{out}}{R_f} \quad (1)$$

$$i_{in} = \frac{V_{in}}{R_{in}} \quad (2)$$

Επειδή ο ιδανικός ενισχυτής δεν απορροφά ρεύμα στις εισόδους, αυτά τα ρεύματα πρέπει να είναι ίσα και αντίθετα, δηλαδή:

$$i_f = -i_{in} \quad (3)$$

Επομένως, με αντικατάσταση και πράξεις προκύπτει ότι:

$$V_{out} = \frac{R_f}{R_{in}} V_{in} \quad (4)$$

Αυτή η εφαρμογή καταδεικνύει τα τυπικά χαρακτηριστικά των συστημάτων τελεστικών ενισχυτών. Η αντίσταση στον κλάδο ανάδρασης προσφέρει αρνητική ανάδραση που μειώνει το συνολικό κέρδος. Εξαιτίας του μηδενικού ρεύματος στην αναστρέφουσα είσοδο, η οποία επίσης αναφέρεται και ως κόμβος αθροίσεως, οποιοσδήποτε μικρές αλλαγές στην τάση εξόδου θα προκαλέσουν μια ανισορροπία στον κόμβο άθροισης. Αυτό, μέσω του υψηλού κέρδους ανοιχτού βρόχου του ενισχυτή, θα προκαλέσει με τη σειρά του μια μεγάλη αλλαγή στην τάση εξόδου που θα οδηγήσει το ρεύμα προς την αντίθετη κατεύθυνση.

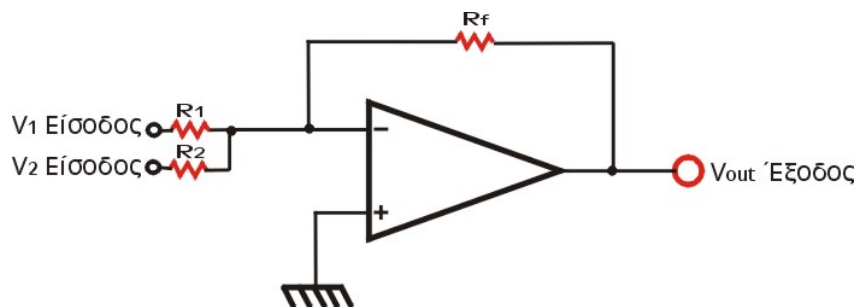
Οι συνολικές ιδιότητες του κυκλώματος είναι πράγματι ανεξάρτητες των χαρακτηριστικών του ενισχυτή. Οι τιμές των αντιστάσεων από μόνες τους καθορίζουν την συμπεριφορά του κυκλώματος, τουλάχιστον στην ιδανική περίπτωση. Ένα άλλο κοινό χαρακτηριστικό των κυκλωμάτων υπολογιστικού τύπου, συχνά ενοχλητικό, είναι ότι η τάση εξόδου είναι η αντίθετη της τάσης εισόδου. Τα χαρακτηριστικά φαινόμενης αντίστασης εισόδου-εξόδου του κυκλώματος καθορίζονται, στην μεν πλευρά της εισόδου από το μέγεθος της χρησιμοποιούμενης αντίστασης εισόδου, στη δε πλευρά της εξόδου από τη φαινόμενη αντίσταση εξόδου του ενισχυτή. Συνηθίζονται αντιστάσεις εισόδου από 10KΩ έως 1MΩ και έτσι η φαινόμενη αντίσταση εισόδου είναι αρκετά μεγάλη. Σήματα από συσκευές υψηλής φαινόμενης αντίστασης (δηλ. όργανα τα οποία δεν είναι σε θέση να παρέχουν πολύ ρεύμα) ίσως χρειαστούν κάποια ενίσχυση πριν τροφοδοτήσουν έναν ενισχυτή αυτού του είδους. Η φαινόμενη αντίσταση εξόδου είναι συνήθως αρκετά μικρή και δεν αποτελεί πρόβλημα. Όταν ένας τελεστικός ενισχυτής χρησιμοποιείται σε αυτή τη διάταξη, η αναστρέφουσα είσοδος λέγεται εικονική γείωση. Με την + (μη αναστρέφουσα) είσοδο γειωμένη, η (αναστρέφουσα) είσοδος θα έχει δυναμικό πολύ κοντά στο δυναμικό της γείωσης. Δεν ισούται όμως ακριβώς με το δυναμικό της γείωσης. Η μικρή διαφορά δυναμικού ως προς τη γείωση, (διαφορά που το μέγεθός της καθορίζεται από το κέρδος του ενισχυτή) είναι αυτή που επιτρέπει στο κύκλωμα να λειτουργήσει.

## **Β. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΣΤΡΕΦΟΝΤΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ**

### **Στατικές Γραμμικές Συναρτήσεις**

Ένας αναστρέφων ενισχυτής που υλοποιεί ένα κέρδος, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, μπορεί να επεκταθεί ώστε να λειτουργεί ως αθροιστής. Η αρχή λειτουργίας ενός αθροιστή έγκειται στο γεγονός ότι τα ρεύματα στην αναστρέφουσα είσοδο, του κόμβου αθροίσεως, πρέπει να έχουν άθροισμα μηδέν. Στην πράξη οποιοσδήποτε αριθμός ρευμάτων εισόδου πρέπει να αντισταθμίζει το ρεύμα που διέρχεται από την αντίσταση ανάδρασης. Για ένα κύκλωμα της μορφής του Σχήματος 3, η εξίσωση των ρευμάτων είναι:

$$i_f = -(i_1 + i_2) \quad (5)$$



Σχήμα 3. Αθροιστής

Επειδή ο κόμβος άθροισης παραμένει υπό δυναμικό σχεδόν μηδενικό, αυτά τα ρεύματα υπολογίζονται εύκολα ως εξής:

$$i_f = -\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}\right) \quad (6)$$

και η τάση εξόδου είναι:

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_1}V_1 - \frac{R_f}{R_2}V_2 \quad (7)$$



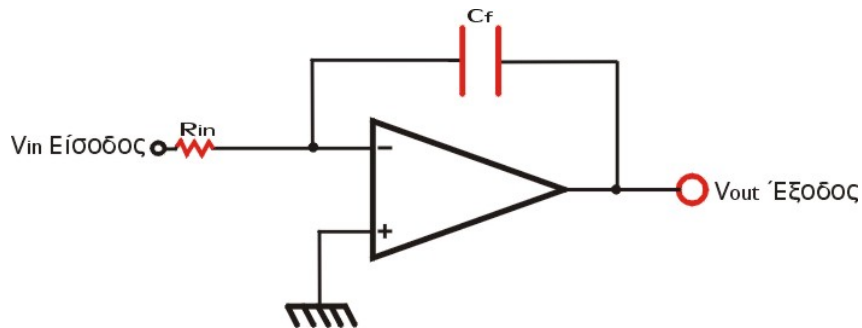
Με τον ίδιο τρόπο μπορεί να αθροιστεί οποιοσδήποτε αριθμός εισόδων.

### **Δυναμικές Γραμμικές Συναρτήσεις**

Στις διατάξεις κέρδους και αθροιστή χρησιμοποιήθηκαν μόνο αντιστάσεις στους κλάδους εισόδου και ανάδρασης. Οι αντιστάσεις είναι στατικά στοιχεία (δηλ. δεν συσσωρεύουν ενέργεια) και έτσι τα κυκλώματα που προκύπτουν έχουν στατικά χαρακτηριστικά. Σε ένα στατικό σύστημα, οι έξοδοι εξαρτώνται αποκλειστικά από τις τρέχουσες τιμές των εισόδων.

Οι δυναμικές συναρτήσεις είναι συναρτήσεις των οποίων οι έξοδοι εξαρτώνται και από την προηγούμενη ιστορία των εισόδων. Μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας και στοιχεία συσώρευσης ενέργειας μαζί με τις αντιστάσεις στα κυκλώματα ανάδρασης και / ή εισόδου. Συνήθως χρησιμοποιούνται πυκνωτές επειδή είναι διαθέσιμοι σε μεγαλύτερο βαθμό από τα πηνία και είναι πολύ φθηνότεροι.

Στο Σχήμα 4 δείχνεται ένα κύκλωμα με έναν πυκνωτή στο κλάδο ανάδρασης. Η ανάλυση ακολουθεί την ίδια πορεία όπως προηγουμένως: εφαρμόζεται η εξίσωση (3), που είναι η εξίσωση άθροισης των ρευμάτων, όπως επίσης και η εξίσωση (2) που αφορά το ρεύμα στον κλάδο εισόδου. Το ρεύμα ανάδρασης μπορεί να υπολογιστεί από τη θεμελιώδη εξίσωση του πυκνωτή,



Σχήμα 4. Ολοκληρωτής

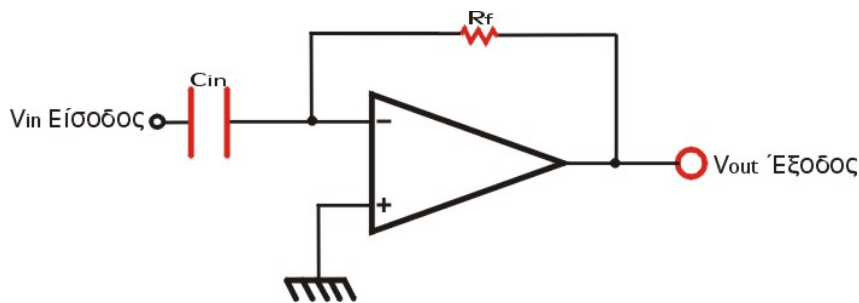
$$i_f = C_f \frac{dV_{out}}{dt} \quad (8)$$

Για να επιλυθεί η παραπάνω εξίσωση ως προς την τάση εξόδου, η διαφορίση πρέπει να αντιστραφεί και να εκφραστεί ως ολοκλήρωση, δηλαδή:

$$V_{out} = -\frac{1}{R_{in}C_f} \int V_{in} dt \quad (9)$$

Επομένως, αυτό το κύκλωμα συμπεριφέρεται ως ολοκληρωτής (με την αντιστροφή σήματος να είναι και εδώ παρούσα), του οποίου η τάση εξόδου εξαρτάται από το ολοκλήρωμα της τάσης εισόδου υπό κλίμακα που ρυθμίζεται από τις τιμές της αντίστασης και της χωρητικότητας. Παρατηρούμε πάλι ότι τα λειτουργικά χαρακτηριστικά καθορίζονται από τις τιμές των ιδιοτήτων των παθητικών στοιχείων. Το γεγονός ότι το κύκλωμα αυτό είναι δυναμικό φαίνεται από τη συμπεριφορά του ολοκληρωτή, του οποίου η έξοδος εξαρτάται από όλη την προηγούμενη ιστορία της τάσης εισόδου.

Αν στη συνέχεια αντιστραφεί η θέση του πυκνωτή και της αντίστασης και ο πυκνωτής τοποθετηθεί στον κλάδο εισόδου ενώ η αντίσταση στον κλάδο ανάδρασης (Σχήμα 5), η τάση εξόδου θα είναι:



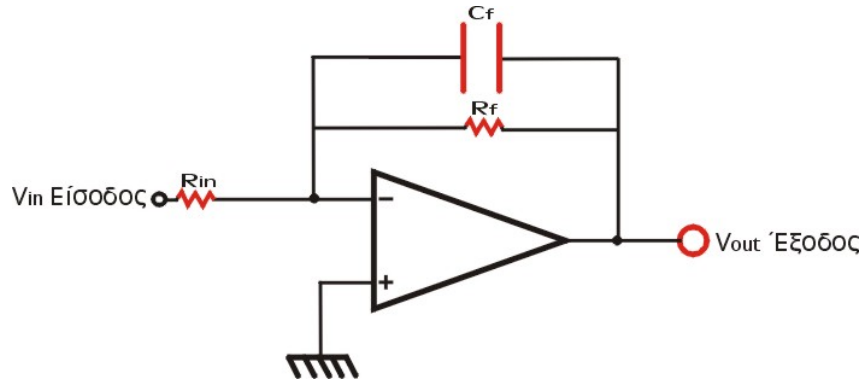
Σχήμα 5. Διαφοριστής

$$V_{out} = -R_f C_{in} \frac{dV_{in}}{dt} \quad (10)$$

Αυτό το κύκλωμα συμπεριφέρεται ως διαφοριστής, με τάση εξόδου την αντίθετη της παραγώγου της εισόδου. Οι διαφοριστές πρέπει να

χρησιμοποιούνται με προσοχή όμως, γιατί είναι πολύ ευαίσθητοι στο θόρυβο (έχουν την τάση να ενισχύουν το θόρυβο εις βάρος του αρχικού σήματος).

Δεν υπάρχει περιορισμός ως προς τη χρήση απλών στοιχείων στους κλάδους ανάδρασης ή εισόδου. Το κύκλωμα του Σχήματος 6 χρησιμοποιεί στον κλάδο ανάδρασης έναν πυκνωτή παράλληλα με μια αντίσταση. Το ρεύμα ανάδρασης σε αυτό το κύκλωμα είναι:



Σχήμα 6. Κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή που υλοποιεί ένα βαθυπερατό φίλτρο

$$i_f = \frac{V_{out}}{R_f} + C_f \frac{dV_{out}}{dt} \quad (11)$$

Εξισώνοντας το ρεύμα αυτό με το αντίθετο του ρεύματος εισόδου, λαμβάνουμε μια διαφορική εξίσωση για την τάση εξόδου,

$$\frac{dV_{out}}{dt} + \frac{V_{out}}{R_f C_f} = -\frac{V_{in}}{R_{in} C_f} \quad (12)$$

η οποία αντιστοιχεί στη συνάρτηση μεταφοράς,

$$V_{out}(s) = \frac{-\frac{1}{R_{in} C_f}}{s + \frac{1}{R_f C_f}} V_{in}(s) \quad (13)$$

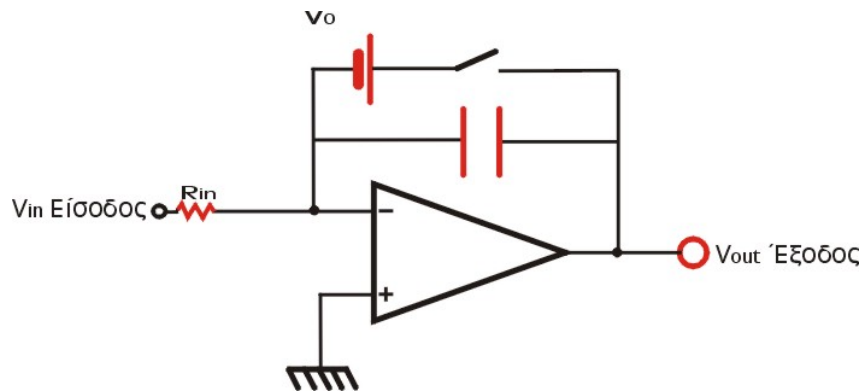
Αυτή η διαφορική εξίσωση περιγράφει ένα βαθυπερατό φίλτρο πρώτης τάξης. Το σήμα εξόδου θα είναι παρόμοιο με το σήμα εισόδου, μόνο που οι υψίσυχνες συνιστώσες θα έχουν απομακρυνθεί. Ένα τέτοιο φίλτρο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα ως φίλτρο αντιεπικάλυψης (antialiasing) σε έναν αναλογοψηφιακό μετατροπέα. Το εύρος των δυναμικών συναρτήσεων που μπορούν να υλοποιηθούν κατά αυτόν τον τρόπο περιορίζεται μόνο από τη φαντασία του σχεδιαστή. Με κατάλληλο σχεδιασμό, τα κυκλώματα εισόδου και ανάδρασης θα περιγράφουν επακριβώς τη συμπεριφορά του κυκλώματος, όπως συμβαίνει με τα κυκλώματα που εξετάστηκαν μέχρι το σημείο αυτό.

## II) ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ

Οι αναλογικοί υπολογιστές χρησιμοποιούνται για να λύσουν διαφορικές εξισώσεις συνδυάζοντας αθροιστές, ολοκληρωτές και πιθανώς μη γραμμικά στοιχεία.

Το κύριο στοιχείο ενός αναλογικού υπολογιστή είναι ένας ολοκληρωτικός ενισχυτής, με ένα επιπλέον κύκλωμα που προστίθεται για να μπορεί να ελέγχεται η αρχική διαφορά δυναμικού στα άκρα του πυκνωτή (Σχήμα 7).

Τη χρονική στιγμή "μηδέν" ο διακόπτης ανοίγει και οι ολοκληρωτές αρχίζουν να λειτουργούν για να δώσουν τη λύση της διαφορικής εξίσωσης.



Σχήμα 7. Ολοκληρωτής αναλογικού υπολογιστή με αρχική συνθήκη

Προκειμένου να προετοιμαστούν για λύση μέσω αναλογικού υπολογιστή, οι διαφορικές εξισώσεις βαθμού ανώτερου της μονάδας πρέπει να εκφραστούν ως σύνολο πεπλεγμένων διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης, ως εξής:

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1, x_2, \dots, t) \quad (14)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(x_1, x_2, \dots, t) \quad (15)$$

Κ.Ο.Κ.

Το επόμενο βήμα είναι να τεθούν οι εξισώσεις υπό κλίμακα. Ο αναλογικός υπολογιστής χρησιμοποιεί τάσεις για όλες τις

εξαρτημένες μεταβλητές, ενώ ο χρόνος είναι ανεξάρτητη μεταβλητή. Οι αφηρημένες μεταβλητές σε αυτές τις εξισώσεις πρέπει να αντικατασταθούν από νέες μεταβλητές στις μονάδες που είναι διαθέσιμες στον αναλογικό υπολογιστή.

Κάθε μία από τις εξαρτημένες μεταβλητές ( $x_i$ ) αντικαθίσταται από μια μεταβλητή σε μονάδες volt και η ανεξάρτητη μεταβλητή ( $t$ ) αντικαθίσταται από μια νέα μεταβλητή σε μονάδες πραγματικού χρόνου.

Οι παράγοντες κλιμάκωσης που θα εισαχθούν πρέπει να δίνουν ένα κύκλωμα αναλογικού υπολογιστή με λογικές τιμές για τα στοιχεία του (αντιστάσεις και πυκνωτές), με σεβασμό στο επιτρεπόμενο εύρος τάσεων. Επιπλέον, η κλιμάκωση πρέπει να γίνει κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην καθιστά καμία από τις μεταβλητές τόσο μικρή που να υπερκαλύπτεται από το θόρυβο στο κύκλωμα. Η κλιμάκωση είναι ιδιαίτερα δύσκολη όταν χρησιμοποιούνται μη γραμμικά στοιχεία.

Η διαδικασία κλιμάκωσης κατά την επίλυση μέσω αναλογικού υπολογιστή είναι πολύ παρόμοια με τη διαδικασία κλιμάκωσης που γίνεται προκειμένου για πράξεις ακεραίων σε έναν ψηφιακό υπολογιστή. Κατόπιν, η κλιμακωθείσα εξίσωση υλοποιείται μέσω ενός κυκλώματος. Η μαθηματική πολυπλοκότητα του αρχικού συστήματος αντικατοπτρίζεται στο μέγεθος του προκύπτοντος κυκλώματος.

Σε αντίθεση με την ψηφιακή επίλυση, η ταχύτητα υπολογισμού είναι ανεξάρτητη της πολυπλοκότητας του προβλήματος. Όλα τα στοιχεία λειτουργούν ταυτόχρονα και έτσι γίνεται παράλληλη επίλυση. Καθώς όμως τα μη γραμμικά στοιχεία γενικώς είναι δύσκολο να υλοποιηθούν αναλογικά, η ψηφιακή επίλυση χρησιμοποιείται πλέον σχεδόν αποκλειστικά για αμιγώς υπολογιστικά προβλήματα.

Οι αναλογικοί υπολογιστές μπορούν παρολαυτά να φανούν χρήσιμοι σε υβριδικές λειτουργίες, όπου ο αναλογικός υπολογιστής χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τον ψηφιακό ώστε να αξιοποιηθεί η δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας και η μεγάλη υπολογιστική του ταχύτητα, όπως επίσης και σε εξομοιωτές πραγματικού χρόνου που χρησιμοποιούνται πολύ συχνά για εκπαίδευση.