

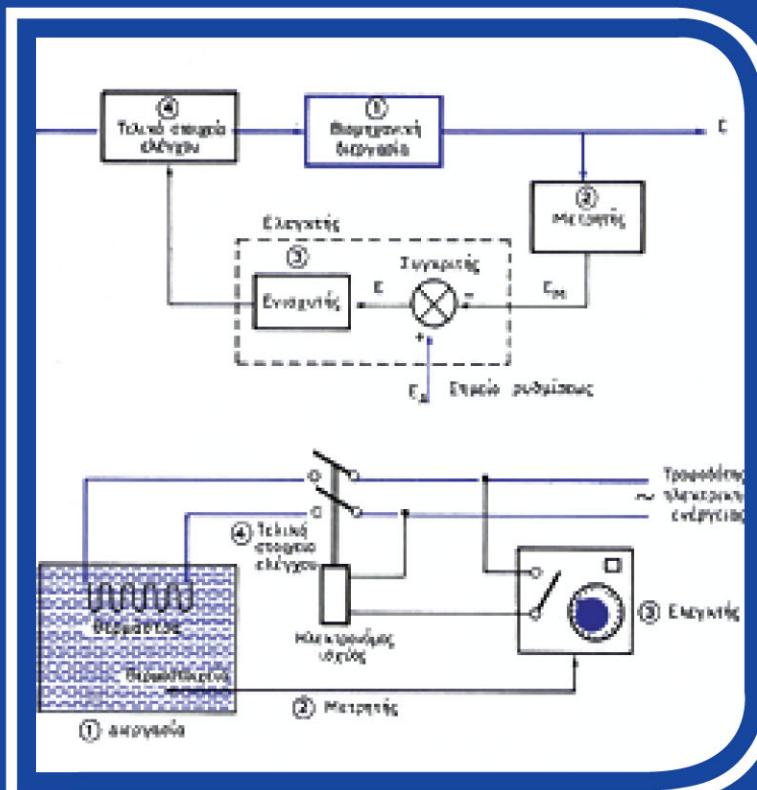


ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ

Σταματίου Ν. Παλαιοκρασσά

ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΔΡΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ





1954

ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ





ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Ο Ευγένιος Ευγενίδης, ο ιδρυτής και χορηγός του «Ιδρύματος Ευγενίδου», πολύ νωρίς πρόβλεψε και σχημάτισε την πεποίθηση ότι η άρτια κατάρτιση των τεχνικών μας, σε συνδυασμό με την εθνική αγωγή, θα ήταν αναγκαῖος και αποφασιστικός παράγοντας της πρόσδου του Έθνους μας.

Την πεποίθησή του αυτή ο Ευγένιδης εκδήλωσε με τη γενναιόφρονα πράξη ευεργεσίας, να κληροδοτήσει σεβαστό ποσό για τη σύσταση Ιδρύματος που θα είχε σκοπό να συμβάλλει στην τεχνική εκπαίδευση των νέων της Ελλάδας.

Έτσι το Φεβρουάριο του 1956 συστήθηκε το «Ίδρυμα Ευγενίδου», του οποίου τη διοίκηση ανέλαβε η αδελφή του κυρία Μαριάνθη Σίμου, σύμφωνα με την επιθυμία του διαθέτη.

Από το 1956 μέχρι σήμερα η συμβολή του Ιδρύματος στην τεχνική εκπαίδευση πραγματοποιείται με διάφορες δραστηριότητες. Όμως απ' αυτές η σημαντικότερη, που κρίθηκε από την αρχή ως πρώτης ανάγκης, είναι η έκδοση βιβλίων για τους μαθητές των τεχνικών σχολών.

Μέχρι σήμερα εκδόθηκαν εκατοντάδες τόμοι βιβλίων, που έχουν διατεθεί σε πολλά εκατομμύρια τεύχη και καλύπτουν ανάγκες όλων των βαθμίδων της Μέσης Τεχνικής και Επαγγελματικής Εκπαίδευσεως του Υπ. Παιδείας, των Σχολών του Οργανισμού Απασχολήσεως Εργατικού Δυναμικού (ΟΑΕΔ) και των Δημοσίων Σχολών Εμπορικού Ναυτικού.

Μοναδική φροντίδα του Ιδρύματος σ' αυτή την εκδοτική του προσπάθεια ήταν και είναι η ποιότητα των βιβλίων, από άποψη όχι μόνον επιστημονική, παιδαγωγική και γλωσσική, αλλά και από άποψη εμφανίσεως, ώστε το βιβλίο να αγαπηθεί από τους νέους.

Για την επιστημονική και παιδαγωγική ποιότητα των βιβλίων τα κείμενα υποβάλλονται σε πολλές επεξεργασίες και βελτιώνονται πριν από κάθε νέα έκδοση.

Ιδιαίτερη σημασία απέδωσε το Ίδρυμα από την αρχή στην ποιότητα των βιβλίων από γλωσσική άποψη, γιατί πιστεύει ότι και τα τεχνικά βιβλία, όταν είναι γραμμένα σε γλώσσα άρτια και ομοιόμορφη αλλά και κατάλληλη για τη στάθμη των μαθητών, μπορούν να συμβάλλουν στη γλωσσική διαπαιδαγώγηση των μαθητών.

Έτσι με απόφαση που πάρθηκε ήδη από το 1956 όλα τα βιβλία της Βιβλιοθήκης του Τεχνίτη, δηλαδή τα βιβλία για τις Κατώτερες Τεχνικές Σχολές, όπως αργότερα και για τις Σχολές του ΟΑΕΔ, ήταν γραμμένα σε γλώσσα δημοτική με βάση τη γραμματική του Τριανταφυλλίδη, ενώ όλα τα άλλα βιβλία ήταν γραμμένα στην απλή καθαρεύουσα. Σήμερα ακολουθείται η δημοτική γλώσσα, έτσι όπως έχει καθιερωθεί από το Υπουργείο Παιδείας. Η γλωσσική επεξεργασία των βιβλίων γίνεται από φιλολόγους του Ιδρύματος και έτσι εξασφαλίζεται η ενιαία σύνταξη και ορολογία κάθε κατηγορίας βιβλίων.



Το περιεχόμενο των βιβλίων, σύμφωνο πάντα με τα αναλυτικά προγράμματα των υπουργείων, εκσυγχρονίζεται σε κάθε νέα έκδοση, μια και τα τεχνικά βιβλία δεν πρέπει να μη παρακολουθούν την εξέλιξη.

Η ποιότητα του χαρτιού, το είδος των τυπογραφικών στοιχείων, τα σωστά σχήματα και η καλαίσθητη σελιδοποίηση, το εξώφυλλο και το μέγεθος του βιβλίου περιλαμβάνονται και αυτά στις φροντίδες του Ιδρύματος.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Μιχαήλ Γ. Αγγελόπουλος, καθηγητής ΕΜΠ, Πρόεδρος.

Αλέξανδρος Σταυρόπουλος, καθηγητής Α.Β.Σ. Πειραιώς, Αντιπρόεδρος.

Ιωάννης Τεγόπουλος, καθηγητής ΕΜΠ.

Γεώργιος Σταματίου, Διευθυντής Σπουδών Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσεως του ΥΠΕΠΘ.

Σταμάτιος Παλαιοκρασσάς, Σύμβουλος Παιδαγωγικού Ινστιτούτου.

Ιωάννης Μορφονίος, Τμηματάρχης Τμήματος Β' Διευθύνσεως Σπ. Δευτ. Εκπαίδευσεως.

Σύμβουλος επί των εκδόσεων του Ιδρύματος **Κώνστ. Α. Μανάφης**, καθηγητής Φιλοσοφικής Σχολής Παν/μίου Αθηνών.

Γραμματέας της Επιτροπής, **Γεώργιος Σ. Ανδρεάκος**.

Διατελέσαντα μέλη ή σύμβουλοι της Επιτροπής

Γεώργιος Κακριδής (1955 - 1959) Καθηγητής ΕΜΠ, **Άγγελος Καλογεράς** (1957 - 1970) Καθηγητής ΕΜΠ, **Δημήτριος Νιάνιας** (1957 - 1965) Καθηγητής ΕΜΠ, **Μιχαήλ Σπετσιέρης** (1956 - 1959), **Νικόλαος Βασιώτης** (1960 - 1967), **Θεόδωρος Κουζέλης** (1968 - 1976) Μηχ. Ηλ. ΕΜΠ, **Παναγιώτης Χατζηιωάννου** (1977 - 1982) Μηχ. Ηλ. ΕΜΠ, **Αλέξανδρος Ι. Παππάς** (1955 - 1983) Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ, **Χριστόστομος Καθουνίδης** (1955 - 1984) Μηχ. Ηλ. ΕΜΠ, **Γεώργιος Ρούσσος** (1970 - 1987) Χημ. - Μηχ. ΕΜΠ, **Θεοδόσιος Παπαθεοδοσίου** (1982-1984) Δρ. Μηχανολόγος - Μηχανικός.





Γ' ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ

ΤΕΥΧΟΣ Β'

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

ΣΤΑΜΑΤΙΟΥ Ν. ΠΑΛΑΙΟΚΡΑΣΣΑ
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ, ΔΡΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΑΘΗΝΑ
1989





ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διδασκαλία των Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου (ΣΑΕ) σε μαθητές της Γ' Λυκείου παρουσιάζει δύο βασικές δισκολίες. Πρώτο, ο τεχνολογικός αυτός τομέας είναι αρκετά ευρύς επειδή οι εφαρμογές του καλύπτουν όλους σχεδόν τους τεχνικούς τομείς. Σαν αποτέλεσμα, το αναλυτικό πρόγραμμα του αντίστοιχου μαθήματος χαρακτηρίζεται, στα εισαγωγικά τουλάχιστον κεφάλαια, από την ίδια ευρύτητα και δεν είναι δυνατό να καλυφθεί με πέντε ώρες την εβδομάδα για ένα μόδιο εξάμηνο που ορίζονται από το ωρολόγιο πρόγραμμα. Δεύτερο, η διδασκαλία των ενοτήτων που αφορούν έστω και στοιχεία αναλύσεως ΣΑΕ προσπατεί γνώσεις αναλυτικής γεωμετρίας και στοιχεία διαφορικού και ολοκληρωτικού λογισμού. Οι γνώσεις όμως αυτές για τους μαθητές της Γ' Λυκείου είναι κατά κανόνα περιορισμένες.

Παρά τις δύο παραπάνω δισκολίες κρίθηκε σκόπιμο να διδαχθεί το μάθημα των ΣΑΕ στο Τεχνικό Λύκειο, τουλάχιστον στους Ηλεκτρονικούς, γιατί διαφορετικά οι γνώσεις τους θα εμφάνιζαν μεγάλο κενό ως προς ένα σύγχρονο και πλατιά διαδεδομένο τεχνολογικό επίτευγμα.

Η συγγραφή του παρόντος βιβλίου ακολούθησε όσο το δυνατόν πιο πιστά το επίσημο αναλυτικό πρόγραμμα. Η δισκολία της ύλης αντιμετωπίστηκε με διάφορους τρόπους. Παρουσιάζεται η ύλη παραστατικά, χρησιμοποιούνται αρκετά παραδείγματα και σπάχσεις, αποφεύγονται οι δύσκολες μαθηματικές αναλύσεις και γίνονται αναλυτικότερες οι περιγραφές. Παραμένει όμως ένας βαθύς δισκολίας που δικαιολογείται από τη φύση του αντικειμένου.

Το βιβλίο είναι ογκωδέστερο από δ.τι θα ήταν παιδαγωγικά ορθό, αυτό όμως ήταν αναπόφευκτο λόγω των απαιτήσεων του αναλυτικού προγράμματος κυρίως στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο. Συμβουλεύομε τον καθηγητή του μαθήματος να προγραμματίσει προσεκτικά το χρόνο διδασκαλίας δίνοντας έμφαση στα εξαρτήματα και συστήματα που εφαρμόζονται πιο πολύ στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο. Ο περισσότερος χρόνος πρέπει να διατεθεί στη διδασκαλία του τέταρτου κεφαλαίου, το οποίο είναι το πιο δύσκολο και αναφέρεται στις αρχές που διέπουν τα ΣΑΕ όπως εφαρμόζονται στις βιομηχανικές διεργασίες. Το πέμπτο κεφάλαιο έρχεται δεύτερο σε προτεραιότητα για τη διάθεση χρόνου διδασκαλίας. Είναι κυρίως περιγραφικό και αναφέρεται σε πρακτικές εφαρμογές των μεθόδων ελέγχου που παρουσιάζονται σεωρητικά στο τέταρτο κεφάλαιο. Το κεφάλαιο αυτό μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τη σύνταξη ενός εργαστηριακού αναλυτικού προγράμματος για το μάθημα.

Επειδή οι ειδικοί όροι που αφορούν τα ΣΑΕ έχουν καθιερωθεί διεθνώς στην Αγγλική, κάθε φορά που χρησιμοποιείται ειδικός όρος έπειται ο Αγγλικός όρος μέσα σε παρένθεση, ενώ στο τέλος του βιβλίου περιέχεται Αγγλο- Ελληνικό γλωσσάριο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

1.1 Γενικά.

Ο όρος **αυτοματισμός** έχει διπλή σημασία: χρησιμοποιείται για μηχανές, οι οποίες «αυτοελέγχονται», έχουν δηλαδή την ικανότητα να διορθώνουν αυτόματα τη συμπεριφορά της λειτουργίας τους σύμφωνα με κάποια επιθυμητή συνθήκη και επίσης χαρακτηρίζει τις μεθόδους κατασκευής αυτομάτων μηχανών. Όπως ο όρος **μηχανοποίηση**, έτσι και ο όρος αυτοματισμός χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει μια νέα διαδικασία της βιομηχανικής παραγωγής. Όπως η μηχανοποίηση απάλλαξε τον εργάτη του εργοστασίου από τη μεγάλη φυσική καταπόνηση, έτσι και ο αυτοματισμός τον απάλλαξε από την επίμονη απασχόληση του χειρισμού και του περιοδικού ελέγχου των μηχανών.

Πολλοί θεωρούν τον αυτοματισμό τόσο σημαντικό επίτευγμα, ώστε τον χαρακτηρίζουν ως «Δεύτερη Βιομηχανική Επανάσταση». Και αυτό επειδή ο αυτοματισμός, εκτός από το ότι αυξάνει την παραγωγική αποδοτικότητα των εργοστασίων, όπως έγινε κατά την πρώτη βιομηχανική επανάσταση, τροποποιεί επίσης ριζικά και τη σχέση του ανθρώπου με τις μηχανές.

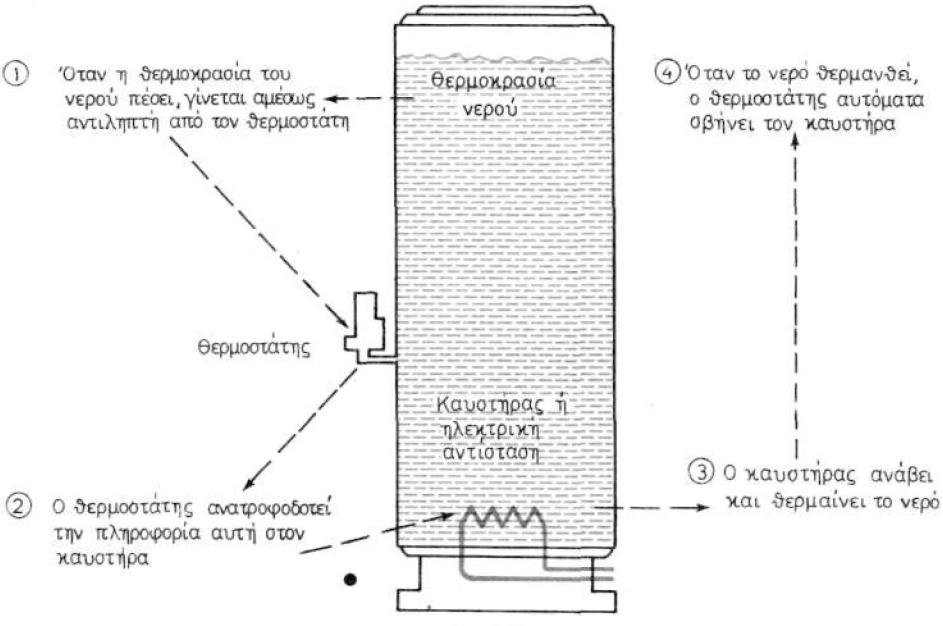
1.2 Η ένωσια της ανατροφοδοτήσεως.

Η βασικότερη διαφορά μεταξύ κοινών και αυτομάτων μηχανών είναι η **ανατροφοδότηση** (feedback). Ανατροφοδότηση επιτυγχάνεται όταν ένας μετρητής -επόπης παρακολουθεί συνεχώς τη λειτουργία της μηχανής και τη συγκρίνει με την επιθυμητή λειτουργία.

Η πληροφορία που προκύπτει από τη σύγκριση αυτή, **ανατροφοδοτείται** δια μέσου κάποιου ελεγκτή στη μηχανή και επιφέρει τις απαραίτητες μεταβολές για τη βελτίωση της λειτουργίας της.

Ένα απλό παράδειγμα ανατροφοδοτήσεως είναι ο συνήθης θερμοστάτης του συστήματος θερμάνσεως ενός σπιτιού. Έστω ότι έχομε ρυθμίσει το θερμοστάτη σε 23°C. Όταν η θερμοκρασία του δωματίου ξεπεράσει τους 23 βαθμούς, ο θερμοστάτης, που είναι μετρητής - επόπης της θερμοκρασίας, αντιλαμβάνεται τη διαφορά των δύο θερμοκρασιών και αυτόματα διακόπτει τη λειτουργία του καυστήρα. Ο καυστήρας παραμένει σβηστός, μέχρις ότου ο θερμοστάτης ανατροφοδοτήσει την πληροφορία ότι η θερμοκρασία του δωματίου έπεσε κάτω από τους επιθυμητούς 23 βαθμούς, οπότε ανάβει και πάλι αυτόματα.





Σχ. 1.2.

Η αυτόματη λειτουργία του θερμοσίφωνα.

Ένα άλλο παράδειγμα ανατροφοδοτήσεως είναι ο θερμοσίφωνας. Η αυτόματη λειτουργία του συστήματος αυτού φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 1.2.

1.3 Καπηγορίες αυτομάτων μηχανών.

Οι αυτόματες μηχανές κατατάσσονται στις εξής τέσσερις βασικές καπηγορίες:

α) Αυτόματα ελεγχόμενες εργαλειομηχανές.

Σπην καπηγορία αυτή ανήκουν εργαλειομηχανές, όπως τόρνοι, δράπιανα κ.ά., οι οποίες «προγραμματίζονται» για τη μαζική κατασκευή ενός εξαρτήματος, με μεγάλη ακρίβεια και σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται με ψηφιακό τρόπο με υπολογιστή, και η διαδικασία ονομάζεται **αριθμητικός έλεγχος** (numerical control).

β) Αυτόματα συστήματα χειρισμού και μετακίνησεως υλικών και εξαρτημάτων.

Σπην καπηγορία αυτή ανήκουν οι μηχανές που μετακινούν εξαρτήματα και συναρμολογούν αντικείμενα.

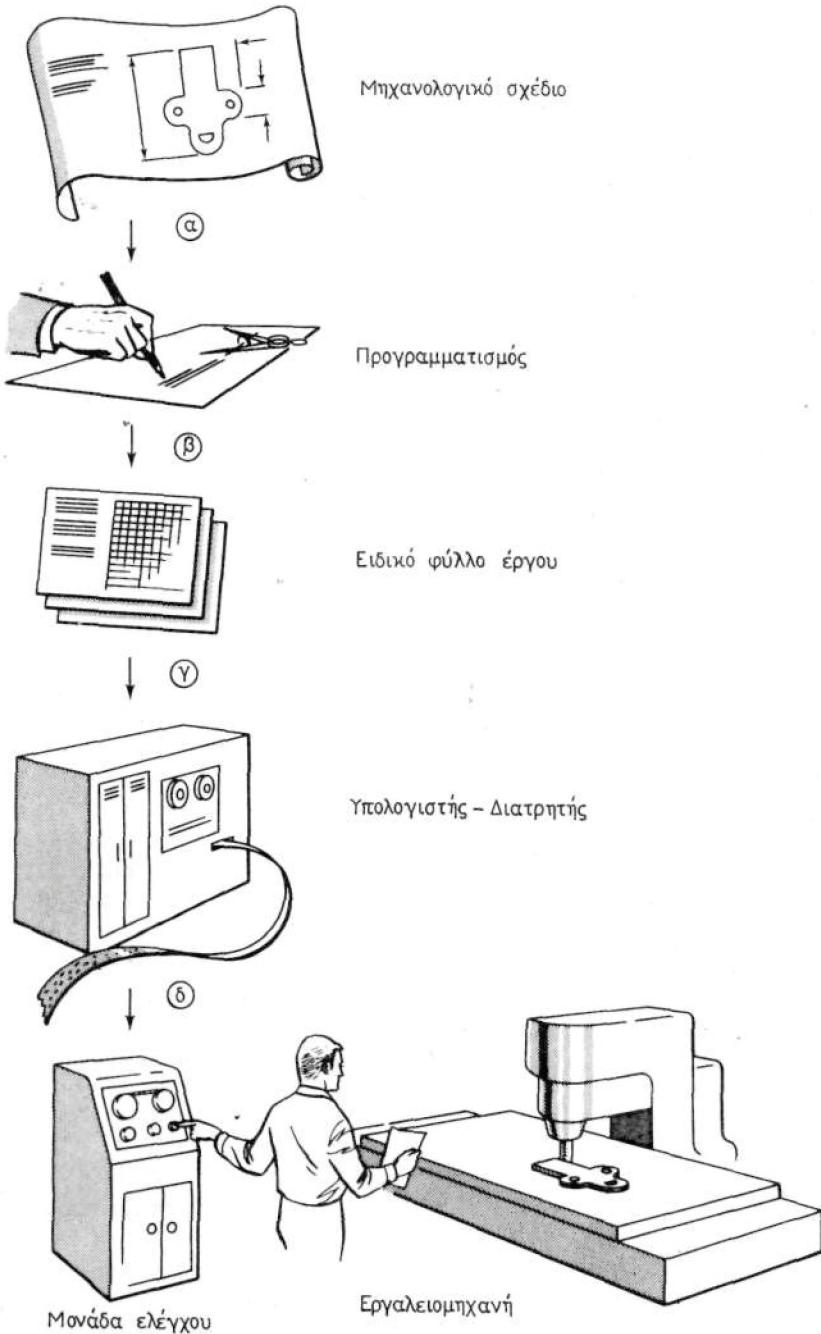
γ) Αυτόματα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται στη χημική και πετροχημική βιομηχανία.

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για το συνεχή ή περιοδικό έλεγχο των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών στα διάφορα στάδια της επεξεργασίας τους.

δ) Αυτόματες μηχανές ή αυτόματα συστήματα επεξεργασίας πληροφοριών.

Είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, μικροϋπολογιστές και μικροεπεξεργαστές.

Στο σχήμα 1.3 δίνονται τα κύρια στάδια της διαδικασίας του αριθμητικού ελέγχου (πρώτη κατηγορία των αυτομάτων μηχανών). Η διαδικασία αρχίζει από το μηχανολογικό σχέδιο που θα κατασκευασθεί. Στο σχέδιο προδια-



Σχ. 1.3.
Διαδικασία αριθμητικού ελέγχου.

γράφονται όλες οι λεπτομέρειες και οι ακριβείς διαστάσεις του αντικειμένου για την επιθυμητή κατασκευή (α). Ο **προγραμματιστής εξαρτημάτων** (part programmer), ο οποίος διαθέτει πείρα στις εργαλειομηχανές, προγραμματίζει τις διάφορες φάσεις κατεργασίας του υλικού που θα μορφοποιηθεί, προσδιορίζει την ταχύτητα των επεμβάσεων των εργαλειομηχανών στα διάφορα στάδια της επεξεργασίας, και καθορίζει τα κοπτικά εξαρτήματα. Από τα παραπάνω διαφαίνεται ότι ο ρόλος του τεχνίτη αυτού είναι το κλειδί της αποδοτικότητας της διαδικασίας του αριθμητικού ελέγχου. Όταν ο προγραμματιστής εξαρτημάτων (β) συλλέξει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες από το μηχανολογικό σχέδιο, τις μεταφέρει, μαζί με τις δικές του συμπληρώσεις, σε ειδικό φύλλο έργου (γ), στο οποίο οι πληροφορίες σημειώνονται με κωδική μορφή. Τα στοιχεία που συλλέγονται στο ειδικό αυτό φύλλο έργου τροφοδοτούνται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (δ), ο οποίος τα αναλύει μαθηματικά, τα ταξινομεί και τα διαμορφώνει σε συγκεκριμένες κοπτικές οδηγίες για την επέμβαση της εργαλειομηχανής. Οι οδηγίες αυτές καταγράφονται σε χάρτινη ταινία υπό μορφή κωδικών μικρών οπών από διατρητικό μηχάνημα που συνδέεται με τον υπολογιστή. Η διάτρητη ταινία μεταφέρεται στη μονάδα ελέγχου της εργαλειομηχανής (ε), στην οποία οι πληροφορίες μετατρέπονται σε κοπτικές κινήσεις της εργαλειομηχανής. Πριν αρχίσει η μαζική παραγωγή, γίνεται πάντοτε μια δοκιμή για να εντοπισθούν τυχόν λάθη.

Η δεύτερη κατηγορία αυτομάτων μηχανών έχει πολλές βιομηχανικές εφαρμογές και συναντάται συχνά στη χώρα μας. Στα εργοστάσιά μας χρησιμοποιούνται για πολλά χρόνια αυτόματες μηχανές για την επιτάχυνση της παραγωγής και την ελάττωση του κόστους. Αυτόματες μηχανές π.χ. γεμίζουν τα τσιγάρα με καπνό, τα «ρολάρουν» και τα τοποθετούν σε κουτιά. Με αυτόματες μηχανές αποστειρώνονται, γεμίζονται, σφραγίζονται και «σταμπάρονται» με αναγνωριστικές ταινίες τα μπουκάλια του κρασιού. Όλα τα σύγχρονα εργοστάσια χρησιμοποιούν τέτοιου είδους αυτόματες μηχανές για τη μαζική παραγωγή και συσκευασία των προϊόντων τους.

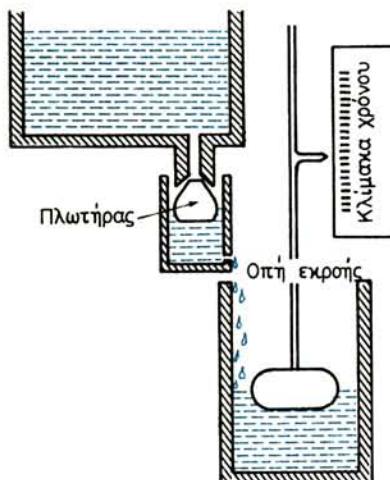
Η τρίτη κατηγορία συστημάτων αυτομάτου ελέγχου ίσως είναι λιγότερο γνωστή, επειδή συναντάται στις χημικές βιομηχανίες. Οι διατάξεις αυτές αποτελούνται κυρίως από **πνευματικά** και υδραυλικά συστήματα ελέγχου, τα οποία ρυθμίζουν διεργασίες μεταλλαγής των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των πρώτων υλών στα διάφορα στάδια επεξεργασίας.

Η τέταρτη κατηγορία αφορά τις συσκευές επεξεργασίας πληροφοριών σε μορφή ηλεκτρονικών σημάτων. Οι συσκευές αυτές αναπτύσσονται διαρκώς και έχουν υπεισέλθει σε κάθε είδους βιομηχανικές εφαρμογές. Τέτοιες συσκευές είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι μικροϋπολογιστές, και οι μικροεπεξεργαστές.

1.4 Σύντομη ιστορική αναδρομή.

Η χρησιμοποίηση του μηχανισμού της ανατροφοδοτήσεως για τον έλεγχο της λειτουργίας συστημάτων έχει μια ενδιαφέρουσα ιστορία. Οι πρώτες εφαρμογές ξεκίνησαν από το μηχανισμό αυτόματης ρυθμίσεως της στάθμης νερού σε δεξαμενές που χρησιμοποιήθηκαν από τους αρχαίους Έλληνες. Η χρήση του μηχανισμού αυτού πιστεύεται ότι διαδόθηκε σε μεγάλη κλίμακα κατά την Αλεξανδρινή και Ρωμαϊκή εποχή. Ο Αλεξανδρεύς (γ' αιώνα π.Χ.) χρησιμοποίησε το μηχανισμό αυτό, για να κατασκευάσει το περίφημο υδάτινο ρολόι του (σχ. 1.4a). Τον ίδιο μηχανισμό χρη-





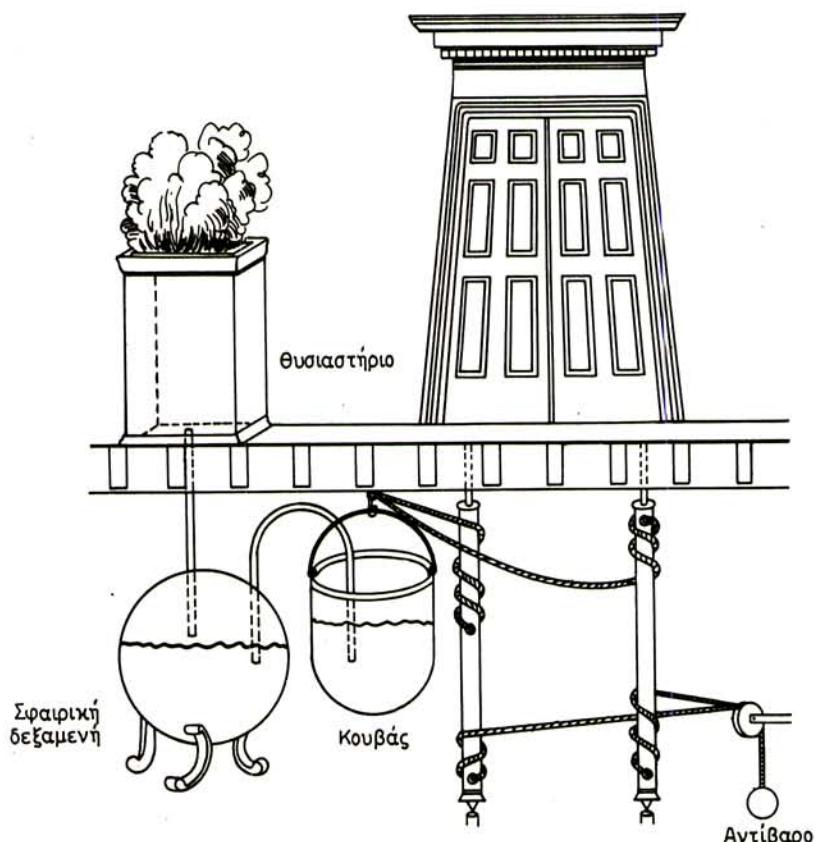
Σχ. 1.4α.

Αρχαίος μηχανισμός ρυθμίσεως της στάθμης του νερού στη δεξαμενή με τον πλωτήρα. Η σταθερή στάθμη εξασφάλιζε σταθερή εκροή νερού, με αποτέλεσμα η στάθμη στην τελευταία δεξαμενή να ανυψώνεται σταθερά και ομαλά. Έτσι ο δείκτης μετρούσε το χρόνο με σχετική ακρίβεια.

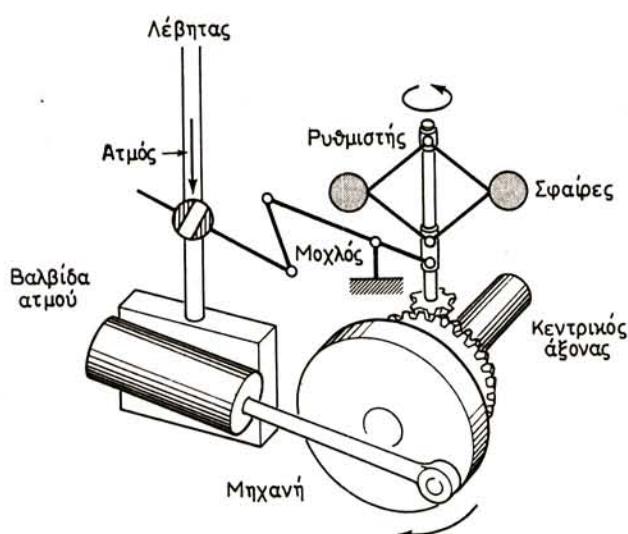
σιμοποίησε και ο Φίλων (25 π.Χ. - 40 μ.Χ.) για την κατασκευή μιας λάμπας λαδιού στην οποία η στάθμη του λαδιού ρυθμίζοταν αυτόματα. Ο Ήρων ο Αλεξανδρινός που έζησε κατά τον πρώτο αιώνα μ.Χ. στο βιβλίο του «Πνευματικά» περιγράφει διάφορα είδη μηχανισμών αυτομάτου ελέγχου, η λειτουργία των οποίων βασιζόταν σε φαινόμενα υδραυλικής πιέσεως. Ένα από τα πιο γνωστά συστήματα του Ήρωνα είναι ο αυτόματος μηχανισμός ανοίγματος και κλείσματος των θυρών ενός ναού. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο σχήμα 1.4β. Με το άναμμα της φωτιάς στό θυσιαστήριο, θερμαινόταν ο αέρας της σφαιρικής δεξαμενής και διαστελλόμενος, έσπρωχνε με πίεση το νερό μέσω του σωλήνα σ' ένα διπλανό μεγάλο κουβά. Όταν ο κουβάς γέμιζε με νερό γύριζε με το αυξημένο βάρος του τις κυλινδρικές τροχαλίες και άνοιγε τις θύρες ενώ, παράλληλα σήκωνε και το αντίβαρο. Για να κλείσουν τις θύρες έριχναν νερό στη φωτιά του θυσιαστηρίου, οπότε, με τη μείωση της πιέσεως στη σφαιρική δεξαμενή το νερό επέστρεφε από τον κουβά σ' αυτή. Έτσι το αντίβαρο, που γινόταν πια βαρύτερο από τον κουβά, γύριζε τις κυλινδρικές τροχαλίες προς την αντίθετη φορά και έκλεινε τις θύρες.

Ένα από τα πιο γνωστά συστήματα των νεωτέρων χρόνων στο οποίο χρησιμοποιήθηκε η ανατροφοδότηση, εφευρέθηκε από τον Ολλανδό Κορνήλιο Ντρέμπελ (1572 - 1633). Ήταν ένας αυτόματος ρυθμιστής θερμοκρασίας που λειτούργησε με επιτυχία. Το 1681 ο Νέννις Πάπεν (Papen) επινόησε τον αυτόματο ρυθμιστή πιέσεως για ατμολέβητες.

Το πρώτο σύστημα αυτομάτου ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε σε βιομηχανικές εφαρμογές και στην παραγωγή ήταν ο «ρυθμιστής με τις σφαίρες» (flyball governor), που κατασκευάσθηκε από τον James Watt το 1769, για να ρυθμίζει αυτόματα την ταχύτητα των ατμομηχανών. Ο μηχανισμός αυτός (σχ. 1.4γ) μετράει την ταχύτητα του κεντρικού άξονα μεταδόσεως της κινήσεως και αξιοποιεί τη φυγόκεντρη κίνηση των σφαιρών, για να ρυθμίζει το άνοιγμα της βαλβίδας και επομένως και την ποσότητα ατμού που εισέρχεται στη μηχανή. Όταν η ταχύτητα του



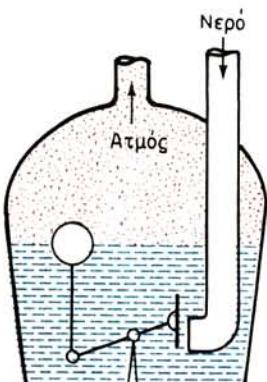
Σχ. 1.4β.
Οι αυτόματες θύρες του Ἡρωνα του Αλεξανδρινού.



Σχ. 1.4γ.
Η αυτόματη ατμομηχανή του Watt.

κεντρικού άξονα αυξάνεται, οι σφαίρες απομακρύνονται από τον άξονα περιστροφής τους και σηκώνουν το μοχλό, οποίος με τη σειρά του κλείνει τη βαλβίδα ατμού.

Το πρώτο σύστημα ανατροφοδοτήσεως που εφευρέθηκε από Σοβιετικό μηχανικό, ήταν το σύστημα ρυθμίσεως της στάθμης νερού σε ατμολέβητα (σχ. 1.4δ). Εφευρέτης του ήταν ο Ιβάν Πολζούνωβ, ο οποίος τελειοποίησε το μηχανισμό αυτό το 1765. Με τη μετατροπή του νερού σε ατμό η στάθμη του νερού κατέρχεται. Ταυτόχρονα ο πλωτήρας κινεί το μοχλό προς τα κάτω, με αποτέλεσμα το πώμα να απομακρύνεται από το στόμιο του τροφοδοτικού σωλήνα, γεγονός που επιτρέπει την εισροή νερού στο λέβητα.



Σχ. 1.4δ.

Αυτόματος ρυθμιστής στάθμης νερού σε ατμολέβητα.

Μέχρι το 1868, οι διάφορες καινοτομίες στον τομέα του Αυτοματισμού γίνονταν εμπειρικά, τους δε εφευρέτες δεν απασχολούσε καθόλου η μαθηματική περιγραφή της λειτουργίας των κατασκευών τους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το ότι δύλες οι προσπάθειες τελειοποίησεως των συστημάτων οδηγούσαν σε προβλήματα αστάθειας. Η λειτουργία δηλαδή του συστήματος κατέληγε να γίνει ασταθής, με αποτέλεσμα την καταστροφή της μηχανής όταν δεν επενέβαινε ο χειριστής. Έτσι οι μηχανικοί συνειδητοποίησαν ότι έπρεπε να ασχοληθούν συστηματικά με την ανάπτυξη της θεωρίας των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Την περίοδο αυτή ο Βισνεγκράντσκι (Vyshegradskii) ανάπτυξε τη μαθηματική θεωρία για αυτόματους ρυθμιστές.

Πριν από το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο σημαντική πρόοδος σημειώθηκε σ' αυτό τον τομέα στις ΗΠΑ χάρη στους πασίγνωστους επιστήμονες των εργαστηρίων της εταιρείας Bell Telephone, Μπόντι (Bode), Νάικουϊστ (Nyquist) και Μπλακ (Black). Αργότερα για να τιμηθεί η επιστημονική προσφορά τους δόθηκαν τα ονόματά τους σε ορισμένες θεωρίες που σχετίζονται με την ανάλυση συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

Οι επιστήμονες αυτοί ανάπτυξαν τις θεωρίες τους κατά τη δημιουργία του σύγχρονου τηλεφωνικού συστήματος, και των ηλεκτρονικών ενισχυτών με ανατροφοδότηση. Παράλληλα, διακεκριμένοι Ρώσοι μαθηματικοί συνέβαλαν στη θεωρία των συστημάτων ελέγχου. Σε αντίθεση με τους Αμερικανούς, οι οποίοι ασχολή-

Θηκαν με μαθηματικές αναλύσεις των συστημάτων στη περιοχή της σύχνότητας, οι Ρώσοι επιστήμονες εργάσθηκαν με συναρτήσεις στην περιοχή του χρόνου.

Στη διάρκεια του Β' Παγκόσμιου πόλεμου, ο τομέας των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου προωθήθηκε σχεδόν κατακόρυφα με εφαρμογές στις πολεμικές μηχανές. Από τις πιο γνωστές εφαρμογές είναι ο αυτόματος πιλότος στα αεροπλάνα, ο αυτόματος σκοπευτής στα πυροβόλα και το περίφημο αυτόματο σύστημα ανιχνεύσεως κινούμενων στόχων με το ραντάρ.

Στη δεκαετία του '50, με την εισαγωγή των αναλογικών και ψηφιακών υπολογιστών, τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου άρχισαν να χρησιμοποιούν τους υπολογιστές ως βασικά στοιχεία ελέγχου, γεγονός που συνέβαλε στην ακρίβεια της λειτουργίας τους.

Η έξοδος του ανθρώπου στο διάστημα έδωσε πολύ μεγάλη ώθηση στον τομέα αυτό με αποτέλεσμα να σχεδιάζονται εξαιρετικά πολύπλοκα και μεγάλης ακρίβειας συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα ήταν η ελαχιστοποίηση του πηλίκου «βάρος/εμβέλεια» στους πυραύλους και τα διαστημόπλοια. Επρεπε δηλαδή να σχεδιασθούν διαστημόπλοια που θα ήταν πρώτο ελαφρότερα και δεύτερο θα μπορούσαν να αποθηκεύσουν περισσότερα καύσιμα για να πραγματοποιήσουν μεγαλύτερα ταξίδια. Στα προβλήματα αυτά, οι επιστήμονες του αυτομάτου ελέγχου ανταποκρίθηκαν αποδοτικά, με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί μια νέα θεωρία: Η θεωρία της **αριστοποίησεως** (optimization) του αυτομάτου ελέγχου. Η θεωρία αυτή που βασίζεται σε μαθηματικές αναλύσεις στην περιοχή του χρόνου, είχε θεμελιώθει παλαιότερα (1892) από το επιστημονικό έργο των Λιαρπούνων (Liapunov) και Μινόρσκι (Minorski). Η εφαρμογή της όμως σε πραγματικά προβλήματα έγινε δυνατή μόνο μετά την τελειοποίηση μεγάλων και πολύ γρήγορων υπολογιστών, που χρησιμοποιήθηκαν για τις αριθμητικές λύσεις των πολύπλοκων μαθηματικών εξισώσεων. Οι τελευταίες εξελίξεις της θεωρίας της αριστοποίησεως του αυτομάτου ελέγχου είναι κυρίως αποτέλεσμα της προσφοράς δύο μεταγενέστερων διακεκριμένων επιστημόνων, του Ρώσου Ποντρυάκιν (Pontryagin) και του Αμερικανού Μπέλμαν (Bellman).

Κλείνοντας την ιστορική αναδρομή των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, σημειώνομε ότι σήμερα τα τελειότερα συστήματα χρησιμοποιούνται στα διαστημόπλοια, και στα επιβατικά και πολεμικά αεροσκάφη.

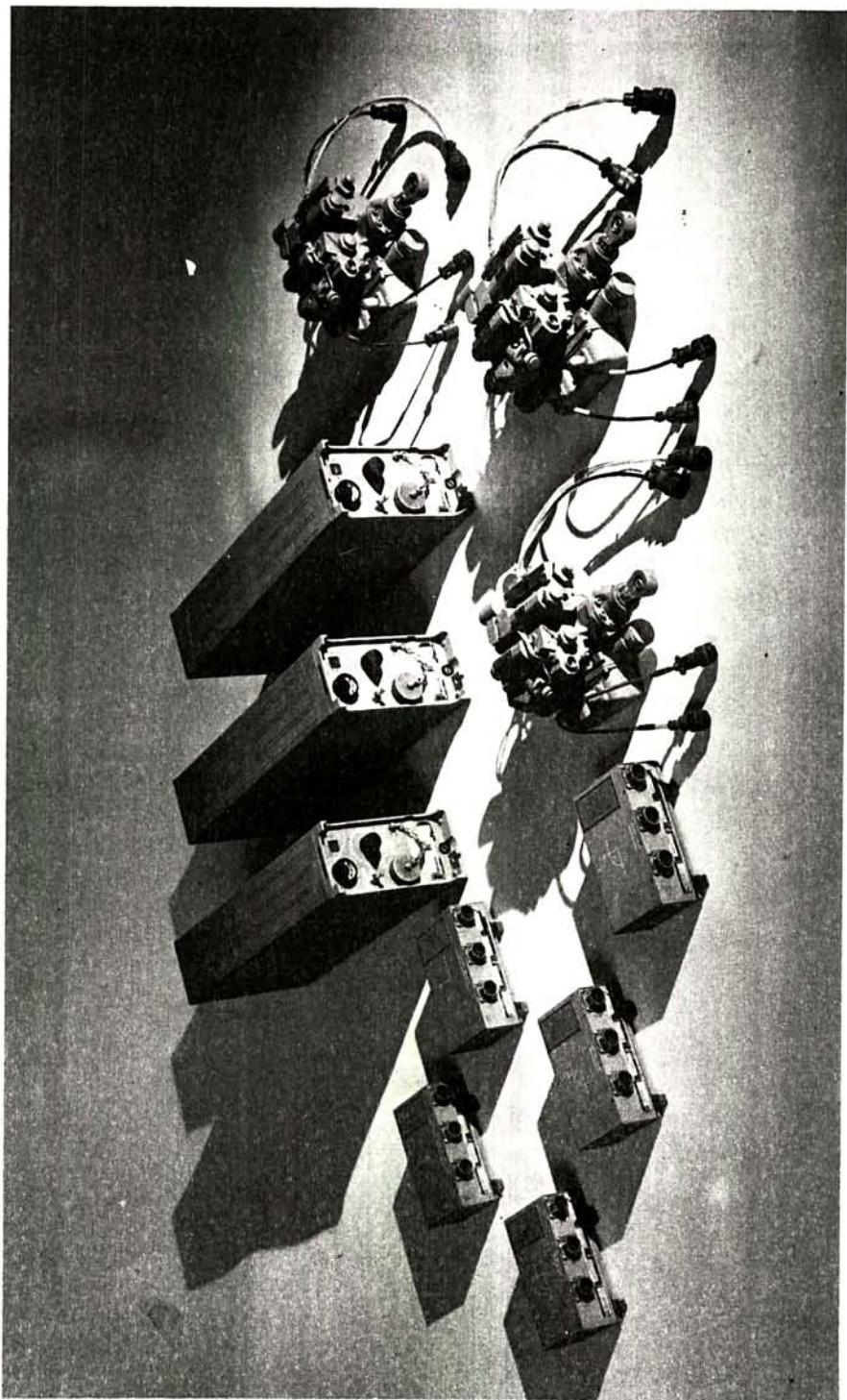
Η αυτόματη προσελήνωση του αμερικανικού διαστημόπλοιου το 1969 αποτελεί ένα πάρα πολύ μεγάλο επίτευγμα στον τομέα των συστημάτων ελέγχου.

Στο σχήμα 1.4ε φαίνεται το αυτόματο σύστημα πλοηγήσεως του αεροσκάφους F - 111. Στο σχήμα 1.4στ φαίνεται πρόσφατο πειραματικό σύστημα αυτόματης πλοηγήσεως για το αεροσκάφος της BOEING 737.

Το αμερικανικό διαστημικό λεωφορείο (Space Shuttle) χρησιμοποιεί σήμερα τα πιο τέλεια συστήματα αυτόματης πλοηγήσεως. Έτσι ο πιλότος του επεμβαίνει μό-



Σχ. 1.4στ.
Πειραματικό σύστημα αυτόματης πλοηγήσεως
για το αεροσκάφος Boeing 737.



Σχ. 1.4ε.
Αυτόματο σύστημα πλοηγήσεως για το αεροσκάφος F-111.

λις στα τελευταία δέκα δευτερόλεπτα με χειροκίνητο έλεγχο για να προσγειώσει το διαστημόπλοιο.

1.5 Γενική περιγραφή συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

Το σύστημα αυτομάτου ελέγχου είναι ένα σύνολο αλληλοσυνδεόμενων μηχανισμών και εξαρτημάτων που αποσκοπεί να πετύχει ένα επιθυμητό αποτέλεσμα (απόκριση).

Η βάση για την ανάλυση των συστημάτων ελέγχου είναι η θεωρία γραμμικών συστημάτων* η οποία προϋποθέτει ότι υπάρχει η σχέση «αιτίου - αποτελέσματος» μεταξύ των διαφόρων στοιχείων που αποτελούν το σύστημα. Η σχέση αυτή, είναι δυνατό να κατανοθεί ευκολότερα με τη βοήθεια του σχήματος 1.5α. Η **διεργασία** (process) που εκτελείται από ένα στοιχείο του συστήματος παριστάνεται συμβολικά με ένα κουτάκι (block). Αν π.χ. το σύστημα είναι ο θερμοσίφωνας, με το κουτάκι συμβολίζομε τη διεργασία που επιτελείται από το θερμοσίφωνα. Το αίτιο που ενεργοποιεί το θερμοσίφωνα ή **είσοδος του συστήματος** (system input) είναι η εντολή να θερμανθεί το νερό. Το σύστημα στη συνέχεια διεργάζεται αυτή την εντολή, με αποτέλεσμα να δουλέψει ο καυστήρας (που είναι ένα στοιχείο της διεργασίας) για κάποιο χρονικό διάστημα και να μας δώσει ως **έξοδο του συστήματος** (system output) ζεστό νερό.



Σχ. 1.5α.

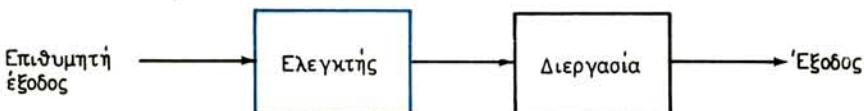
Σχηματικό διάγραμμα διεργασίας που θα αποτελέσει αντικείμενο ελέγχου.

Τα συστήματα ελέγχου διακρίνονται σε **ανοικτού βρόχου** (open loop) (χωρίς ανατροφοδότηση) και σε συστήματα ελέγχου **κλειστού βρόχου** (closed loop) (με ανατροφοδότηση). Στο σχήμα 1.5β φαίνεται σχηματικά ένα σύστημα ανοικτού βρόχου, το οποίο χρησιμοποιεί ένα **ελεγκτή** (controller). Ο ελεγκτής ελέγχει τη διεργασία για να διατηρείται η επιθυμητή έξοδος. Σε ένα σύστημα ελέγχου, η είσοδος που εφαρμόζεται είναι η επιθυμητή έξοδος. Στο παράδειγμα του θερμοσίφωνα, η επιθυμητή έξοδος (είσοδος) του συστήματος είναι το ζεστό νερό μιας ορισμένης θερμοκρασίας. Ο ελεγκτής είναι ένας θερμοστάτης, ο οποίος ρυθμίζει τη λειτουργία του καυστήρα (διεργασία).

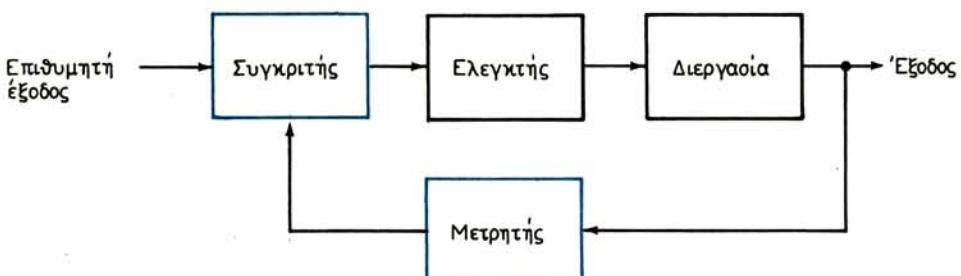
Το σύστημα ελέγχου **κλειστού βρόχου** (σχ. 1.5γ) χρησιμοποιεί δύο νέα στοιχεία: το **μετρητή** (detector), που μετράει την έξοδο, και το **συγκριτή** (comparator) ο οποίος συγκρίνει το σήμα του μετρητή με την είσοδο (ή αλλιώς) την επιθυμητή έ-

* Ένα σύστημα λέγεται γραμμικό, όταν η έξοδος του ακολουθεί την είσοδο του συστήματος με την εξής συνέπεια: α) όταν η είσοδος διπλασιάζεται ή τριπλασιάζεται, διπλασιάζεται ή τριπλασιάζεται επίσης και η έξοδος κ.ο.κ., και β) όταν η είσοδος αποτελείται από το άθροισμα δύο σημάτων τότε η έξοδος αποτελείται από το άθροισμα των εξόδων που αντιστοιχούν όταν τα σήματα εφαρμόζονται στο σύστημα ως ξεχωριστές είσοδοι. Ένα εξάρτημα που συμπεριφέρεται γραμμικά είναι η κοινή ηλεκτρική αντίσταση. Η ηλεκτρική δίοδος είναι ένα μη γραμμικό εξάρτημα.

Ξόδο. Το αποτέλεσμα της συγκρίσεως, ενεργοποιεί τον ελεγκτή, ο οποίος ρυθμίζει τη διεργασία ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Είναι φανερό, ότι **ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου χρησιμοποιεί ανατροφοδότηση για την επίτευξη του ελέγχου**. Επιστρέφοντας στο παράδειγμα του θερμοσίφωνα, αναγνωρίζομε ότι η είσοδος του συστήματος (επιθυμητή έξοδος) είναι η εντολή να παραχθεί ζεστό νερό 80°C . Άν την έξοδος (η θερμοκρασία του νερού μέσα στο θερμοσίφωνα) είναι 50°C ο μετρητής (θερμόμετρο ενσωματωμένο στο θερμοστάτη), μετράει αυτή τη θερμοκρασία, μετατρέπει την πληροφορία σε ηλεκτρικό σήμα και την ανατροφοδοτεί στο συγκριτή, όπου είναι καταγραμμένη, σε μορφή ηλεκτρικού σήματος η επιθυμητή θερμοκρασία των 80°C και ενεργοποιείται ο ελεγκτής (ένας διακόπτης σ' αυτή την περίπτωση) για να ανάψει τον καυστήρα ή την ηλεκτρική αντίσταση και να αρχίσει η παραγωγή θερμότητας μέχρις ότου η έξοδος φτάσει στους 80°C . Όταν αυτό συμβεί, το διαπιστώνει ο μετρητής, και ανατροφοδοτεί την πληροφορία στο συγκριτή. Το αποτέλεσμα της συγκρίσεως με την επιθυμητή έξοδο θα είναι 0 ($80^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C} = 0$). Τη στιγμή αυτή δίνεται αυτόματα η εντολή στον ελεγκτή να διακόψει την παραγωγή θερμότητας.



Σχ. 1.5β.
Σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου.



Σχ. 1.5γ.
Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου.

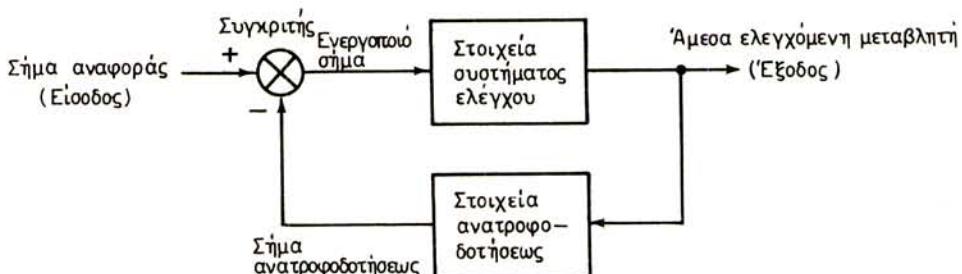
Έχει επικρατήσει διεθνώς τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου να λέγονται **συστήματα ελέγχου με ανατροφοδότηση** (feedback control systems).

Το σύστημα κλειστού βρόχου, όπου η έξοδος ανατροφοδοτείται και συγκρίνεται με την είσοδο, ώστε να μπορεί να παρακολουθεί κάθε φορά τις αλλαγές της εισόδου λέγεται σύστημα ελέγχου με ανατροφοδότηση ή σερβομηχανισμός*.

Στα σχήματα 1.5δ και 1.5ε φαίνονται δύο λειτουργικά διαγράμματα, τα οποία παριστάνουν με συμβολικό τρόπο κάθε σύστημα ελέγχου μέν ανατροφοδότηση (εί-

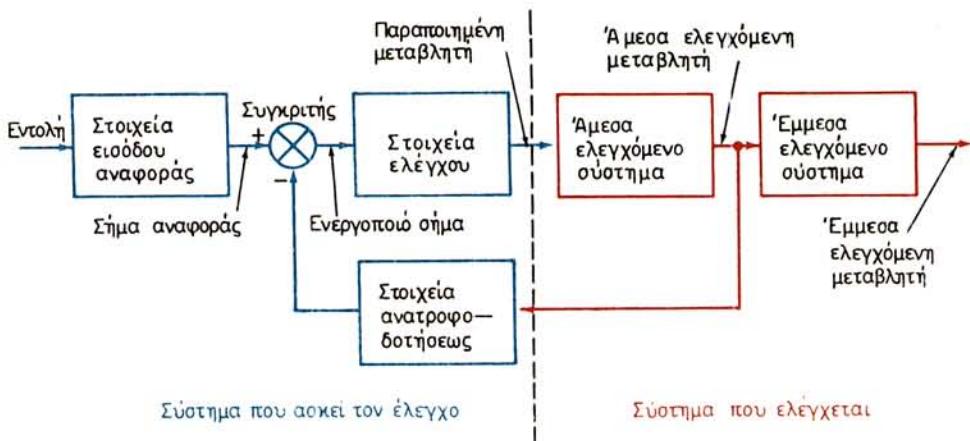
* Ο δρός σερβομηχανισμός χρησιμοποιείται κυρίως για συστήματα αυτομάτου ελέγχου, των οποίων η έξοδος είναι κάποια μετατόπιση, ταχύτητα ή επιτάχυνση.

τε αυτό είναι απλό είτε πολύπλοκο). Το σχήμα 1.5δ εικονίζει το γενικό λειτουργικό διάγραμμα ενός απλούστευμένου συστήματος ελέγχου με ανατροφοδότηση. Το παράδειγμα του σχήματος 1.5γ μπορεί να αναχθεί σ' αυτό του σχήματος 1.5δ. Στο σχήμα 1.5δ ο ελεγκτής και η διεργασία του συστήματος συμπτύσσονται σε ένα κουτί, ενώ το κουτί που συμβολίζει τη σύγκριση στο σχήμα 1.5γ, έχει αντικατασταθεί από το σύμβολο του συγκριτή. Όπως βλέπομε, ο συγκριτής συγκρίνει αλγεβρικά (+ και -) το σήμα της εισόδου με το σήμα ανατροφοδοτήσεως. Το λειτουργικό διάγραμμα του σχήματος 1.5δ περιγράφει ένα σύστημα με **αρνητική ανατροφοδότηση** (negative feedback), επειδή το σήμα της ανατροφοδοτήσεως **αφαιρείται** κατά τη σύγκριση του από το σήμα της εισόδου. Το αποτέλεσμα της συγκρίσεως είναι το **ενεργοποιό σήμα** (actuating signal), το οποίο ενεργοποιεί τον ελεγκτή της υπό έλεγχο διεργασίας. Η είσοδος ονομάζεται και **σήμα αναφοράς** (reference signal) η δε έξοδος λέγεται **άμεσα ελεγχόμενη μεταβλητή** (directly controlled variable).



Σχ. 1.5δ.

Γενική σχηματική περιγραφή συστήματος ελέγχου με ανατροφοδότηση.



Σχ. 1.5ε.

Γενική, αναλυτική σχηματική περιγραφή συστήματος ελέγχου με αρνητική ανατροφοδότηση.

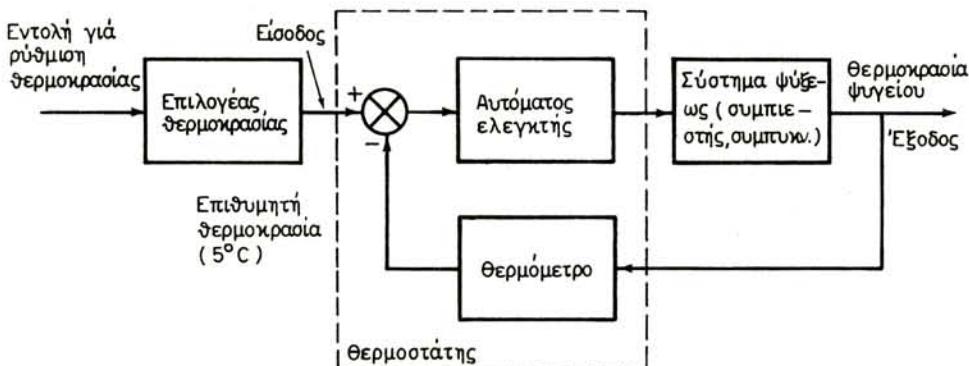
Αναλυτικότερα, το λειτουργικό διάγραμμα ενός συστήματος ελέγχου με αρνητική ανατροφοδότηση παρουσιάζεται στο σχήμα 1.5ε. Το σύστημα χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη: στο μέρος όπου γίνεται ο έλεγχος και στο μέρος της ελεγχόμενης εγκαταστάσεως.

Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, υπάρχει ενιαίος τρόπος περιγραφής των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, (σχ. 1.5δ και σχ. 1.5ε). Βέβαια για τα διάφορα στοιχεία και σήματα του διαγράμματος αυτού, χρησιμοποιούνται διάφορες ονομασίες.

Για να αποφευχθεί τυχόν σύγχυση, στα επόμενα κεφάλαια θα περιορισθούμε σε μία μόνο ονομασία για κάθε στοιχείο και σήμα.

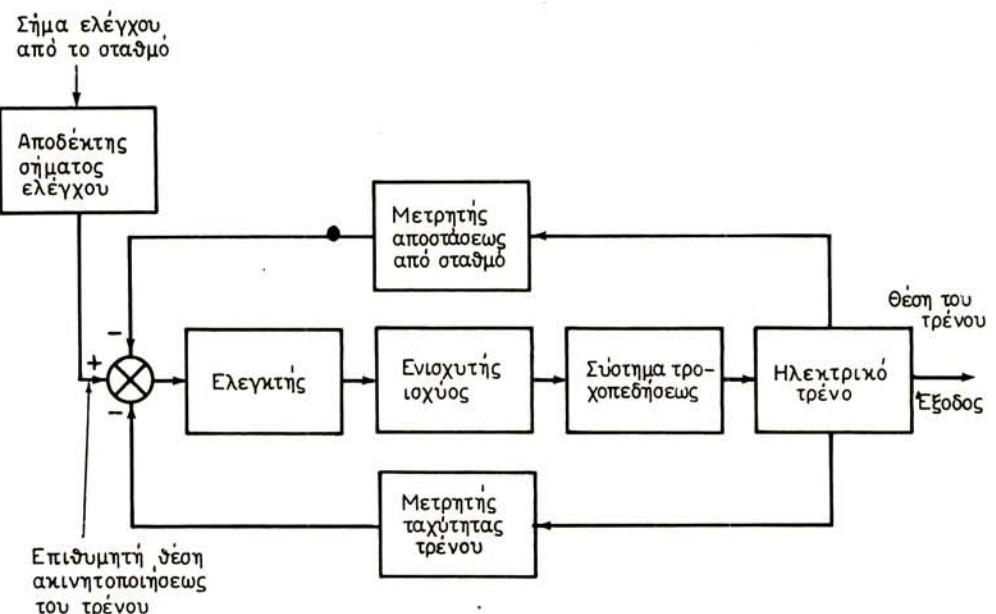
1.6 Παραδείγματα συστημάτων ελέγχου.

Οι εφαρμογές του αυτομάτου ελέγχου, που συναντάμε καθημερινά στο άμεσο περιβάλλον μας είναι πολλές. Μέσα στο σπίτι μας π.χ. υπάρχουν το ηλεκτρικό ψυγείο, ο ηλεκτρικός φούρνος, το θερμοσίφωνο, το σύστημα θερμάνσεως κ.ά. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν αρνητική ανατροφοδότηση. Στο σχήμα 1.6α περιγράφεται διαγραμματικά το ηλεκτρικό ψυγείο. Στο διάγραμμα αυτό μπορούμε να αναγνωρίσουμε όλα τα στοιχεία που ήδη περιγράψαμε στα λειτουργικά διαγράμματα των σχημάτων 1.5δ και 1.5ε.



Σχ. 1.6α.
Λειτουργικό διάγραμμα ηλεκτρικού ψυγείου.

Ένα άλλο ενδιαφέρον παράδειγμα αυτομάτου ελέγχου είναι εκείνο που σχεδιάσθηκε για την αυτόματη (χωρίς οδηγό) κίνηση των τρένων του μετρό της πόλης Σαν Φρανσίσκο των ΗΠΑ. Η διακίνηση των συρμών ελέγχεται από ένα κεντρικό σταθμό ελέγχου, στον οποίο έχει γίνει προγραμματισμός της κινήσεως των τρένων με μεγάλες ταχύτητες, ενώ διατηρείται μια χρονική απόσταση δύο λεπτών της ώρας μεταξύ τους. Ο αυτόματος έλεγχος στην περίπτωση αυτή εξασφαλίζει τη διατήρηση σταθερής ροής των τρένων, την άνετη επιτάχυνση, επιβράδυνση και ακινητοποίησή τους στους σταθμούς. Το σχετικό λειτουργικό διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 1.6β. Το σύστημα χρησιμοποιεί διπλή αρνητική ανατροφοδότηση στο συγκριτή, στον οποίο παρέχει πληροφορίες σχετικές με την ταχύτητα του τρένου

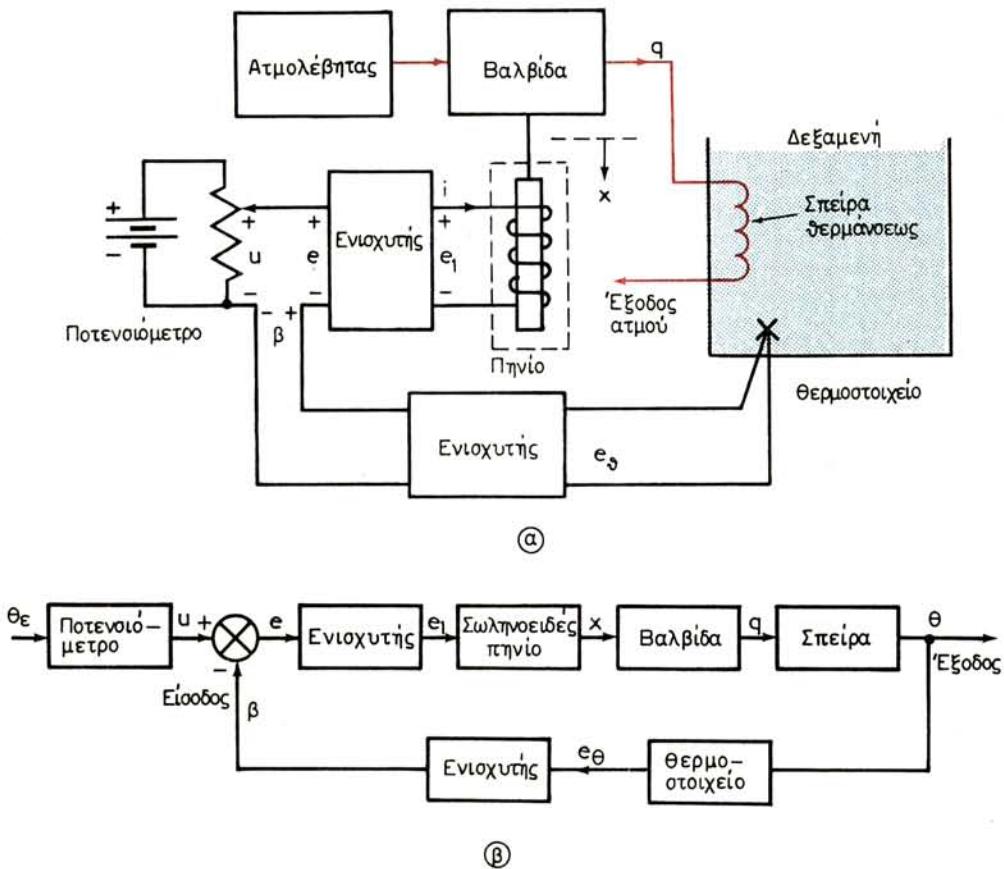


Σχ. 1.6β.
Σύστημα ελέγχου τροχοπέδης τρένου χωρίς οδηγό.

και την απόστασή του από το σταθμό. Οι ποσότητες αυτές συγκρίνονται με τις αντίστοιχες επιθυμητές τιμές της θέσεως, που πρέπει να έχει το τρένο στα διάφορα στάδια επιβραδύνσεως. Το αποτέλεσμα της συγκρίσεως δημιουργεί το ενεργοποιό σήμα, δια μέσου του ελεγκτή και του ενισχυτή ισχύος, το οποίο δρά στο σύστημα τροχοπεδήσεως.

Ένα άλλο παράδειγμα συστήματος αυτομάτου ελέγχου αποτελεί ο έλεγχος της θερμοκρασίας υγρού μέσα σε δεξαμενή μιας βιομηχανικής διεργασίας. Το σύστημα αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.6γ(α) και (β). Η τάση υ που παράγεται από το ποτενσιόμετρο, αντιπροσωπεύει την επιθυμητή θερμοκρασία θ_e του ρευστού της δεξαμενής. Η τάση αυτή είναι η είσοδος του συστήματος ελέγχου. Έξοδος του συστήματος είναι η πραγματική θερμοκρασία θ του υγρού της δεξαμενής, η οποία μετράται από θερμοστοιχείο που βρίσκεται μέσα στη δεξαμενή. Η τάση θ στην έξοδο του θερμοστοιχείου ενισχύεται στην τιμή β και ανατροφοδοτείται στον ενισχυτή. Στο σημείο αυτό γίνεται αλγεβρική σύγκριση των τάσεων θ και β , με αποτέλεσμα να παραχθεί το ενεργοποιό σήμα $\theta = u - \beta$. Η τάση θ ενισχύεται σε θ_1 και τροφοδοτείται στο σωληνοειδές πηνίο, όπου η παραγόμενη ένταση i του πηνίου παράγει δυνάμεις μαγνητικού πεδίου που επιδρούν στο σιδερένιο πυρήνα του πηνίου και τον κινούν. Ο πυρήνας συνδέεται με τη βαλβίδα ρυθμίσεως της παροχής του ατμού από τον ατμολέβητα, κατά συνέπεια η κίνησή του ελέγχει ανάλογα τη ροή ατμού πρός τη σπείρα θερμάνσεως της δεξαμενής. Η θερμοκρασία θ του υγρού στη δεξαμενή είναι ανάλογη προς τη ροή του ατμού μέσα στη σπείρα, με κάποια καθυστέρηση, της οποίας η διάρκεια εξαρτάται από την ειδική θερμότητα του υγρού και την ταχύτητα αναμίξεώς του.

Στο σχήμα 1.6δ(α) και (β) φαίνονται τα λειτουργικά διαγράμματα του ενισχυτή

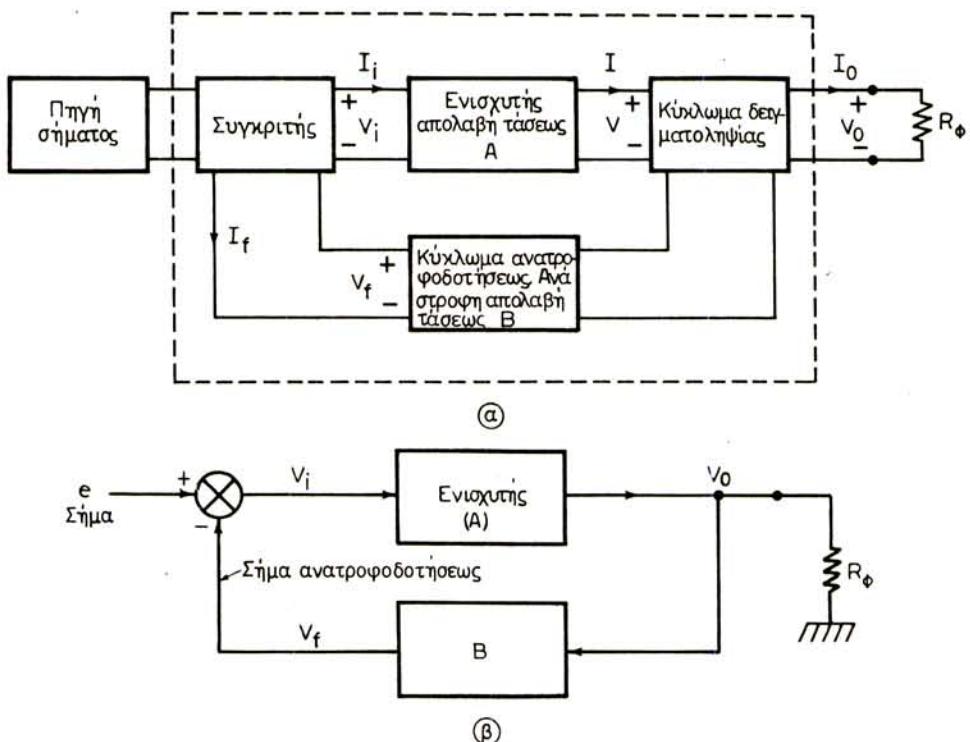


Σχ. 1.6γ.
Βιομηχανική διεργασία ελέγχου θερμοκρασίας.

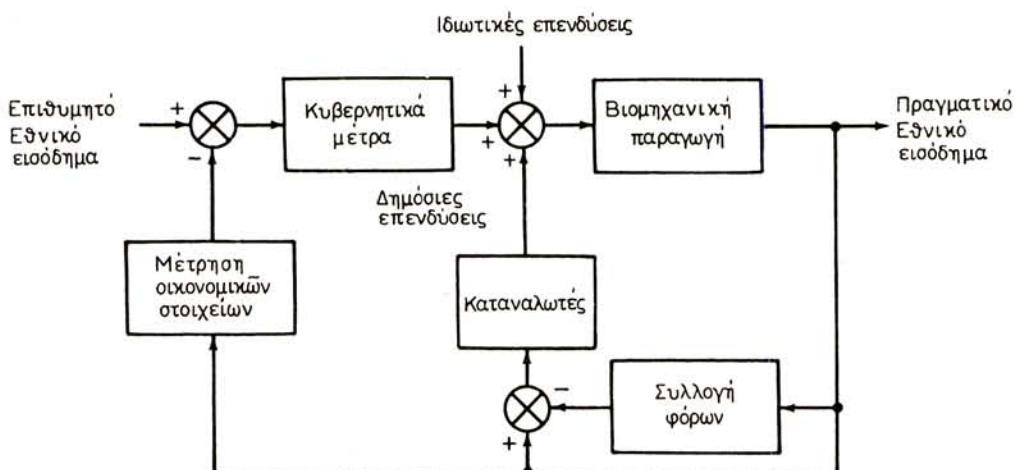
με ανατροφοδότηση, ο οποίος αποτελεί ηλεκτρονικό σύστημα αυτομάτου ελέγχου*.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, η θεωρία αναλύσεως των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου εφαρμόζεται και σε περιοχές μη τεχνικές, όπως στη γεωργία, στην ιατρική βιολογία, στην οικολογία καθώς και σε κοινωνικό - οικονομικά συστήματα. Στο σχήμα 1.6 φαίνεται το λειτουργικό διάγραμμα της οικονομίας μιας χώρας. Το διάγραμμα αυτό επιτρέπει τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων των διαφόρων παραγόντων στην οικονομία, όπως είναι π.χ. ο κυβερνητικός έλεγχος, καθώς και οι δυναμικές επιδράσεις των δημόσιων επενδύσεων. Παρά το ότι το σύστημα του σχήματος είναι υπεραπλουστευμένο, περιέχει τα βασικά χαρακτηριστικά της δυναμικής δομής του οικονομικού αυτού συστήματος.

* Βλέπε περιγραφή του συστήματος αυτού στο βιβλίο «Ηλεκτρονικά Κυκλώματα» σελ. 109.



Σχ. 1.6δ.
Ηλεκτρονικός ενισχυτής με ανατροφοδότηση.



Σχ. 1.6ε.
Μοντέλο συστήματος ελέγχου της εθνικής οικονομίας με ανατροφοδότηση.

1.7 Ασκήσεις.

1. Χάραξε το λειτουργικό διάγραμμα ενός πρακτικού συστήματος αυτομάτου ελέγχου και αναγνώρισε το κάθε στοιχείο του.
 2. Εξήγησε τι εννοούμε με τον όρο «επιθυμητή έξοδος». Ποια είναι η διαφορά της επιθυμητής εξόδου από την πραγματική έξοδο ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου με ανατροφοδότηση;
 3. Εξήγησε τι εννοούμε με τον όρο «καρνητική ανατροφοδότηση».
 4. Ποιός είναι ο ρόλος του συγκριτή σε ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου;
 5. Να βρεις ένα παράδειγμα συστήματος αυτομάτου ελέγχου χωρίς ανατροφοδότηση και ένα παράδειγμα με ανατροφοδότηση και να περιγράψεις τη λειτουργία τους.
 6. Να περιγράψεις με συντομία τη διαδικασία του αριθμητικού ελέγχου.
 7. Σε τι διαφέρει η λειτουργία των ηλεκτρικών «ματιών» μιας ηλεκτρικής κουζίνας από τη λειτουργία του φούρνου της;
 8. Ο νόμος της προσφοράς και ζήτησης είναι βασικός σε μια ελεύθερη οικονομία. Ο νόμος αυτός μπορεί να παρασταθεί με ένα λειτουργικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου, στο οποίο η έξοδος είναι η πραγματική τιμή ενός προϊόντος στην αγορά. Ο νόμος εκφράζει ότι η ζήτηση του προϊόντος μειώνεται, όταν η τιμή του αυξάνεται, και αντίστροφα, καθώς και ότι επιτυγχάνεται σταθερή τιμή στην αγορά, όταν η προσφορά είναι ίση με τη ζήτηση. Σχεδίασε το λειτουργικό διάγραμμα με ανατροφοδότηση, το οποίο να περιέχει τα εξής τέσσερα κουτιά: τροφοδότης προϊόντος (προσφέρων), καταναλωτής (ζητητής), καθοριστής τιμών και αγορά.
 9. Σχεδίασε το λειτουργικό διάγραμμα του αρχαίου ρολογιού του σχήματος 1.4a.
 10. Η μετάδοση γνώσεων και τεχνών από τον καθηγητή στο μαθητή είναι μια διαδικασία που περιέχει την έννοια της ανατροφοδότησης. Η επιθυμητή έξοδος είναι οι γνώσεις που έχει αφομιώσει ο μαθητής στο τέλος του μαθήματος. Η μέτρηση των γνώσεων γίνεται με τις εξετάσεις. Το ρόλο του ελεγκτή παίζει ο καθηγητής. Σχεδίασε ένα διάγραμμα που να περιγράφει τη διαδικασία αυτή, με τα εξής κουτιά: Καθηγητής, μαθητής, εξετάσεις.
-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΒΑΣΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

Μετά τη γενική περιγραφή των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, προχωρούμε στην ακόλουθη γενική περιγραφή των εξαρτημάτων που περιέχονται σ' ένα τέτοιο σύστημα:

α) «Αισθητήριοι» μηχανισμοί που μετρούν το μέγεθος και τη φορά μεταβολής φυσικών ποσοτήτων, που είτε ελέγχονται άμεσα είτε υποβοηθούν στον έλεγχο. Οι μηχανισμοί αυτοί λέγονται **μεταλλάκτες** (transducers) ή **μετρητές** (detectors).

β) Μηχανισμοί συγκρίσεως των σημάτων εισόδου και εξόδου. Οι μηχανισμοί αυτοί λέγονται **συγκριτές** (comparators) ή **μετρητές σφάλματος** (error detectors).

γ) Μηχανισμοί οι οποίοι ενισχύουν τη διαφορά των σημάτων που προαναφέρθηκαν και εξασφαλίζουν στο ενεργοποιό σήμα την απαιτούμενη ισχύ. Οι μηχανισμοί αυτοί λέγονται **ενισχυτές** (amplifiers).

δ) Μηχανισμοί που όταν δεχθούν στην είσοδό τους τη διαφορά των παραπάνω σημάτων δρούν με τρόπο που οδηγεί στο μηδενισμό του σφάλματος δηλαδή επιτυγχάνουν εξίσωση της επιθυμητής και της πραγματικής εξόδου του συστήματος. Οι μηχανισμοί αυτοί λέγονται **ενεργοποιητές** (actuators) ή **ελεγκτές** (controllers).

Οι παραπάνω μηχανισμοί αποτελούνται από απλά ή σύνθετα ηλεκτρομηχανολογικά εξαρτήματα ή και από ηλεκτρικά, ηλεκτρονικά, μηχανικά ή και πνευματικά υποσυστήματα.

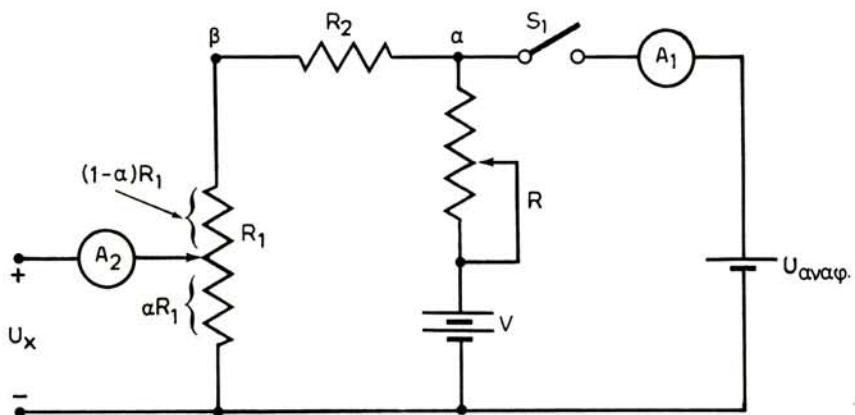
Στη συνέχεια εξετάζονται λεπτομερώς ορισμένα από τα βασικά εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου και που εντάσσονται στις παραπάνω τέσσερις κατηγορίες.

2.1 Ηλεκτρικά και ηλεκτρομηχανολογικά εξαρτήματα.

2.1.1 Ποτενσιόμετρα ως μετρητές τάσεως.

Η μέτρηση τάσεων στα συστήματα ελέγχου απαιτεί συχνά μεγάλη ακρίβεια, όταν η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος προς μέτρηση είναι υψηλή.

Για πολλά χρόνια, η μέτρηση τάσεων γινόταν με αξιόπιστο τρόπο, με τη βοήθεια **ποτενσιόμετρων** (potentiometer). Σήμερα για τη μέτρηση τάσεων υπάρχουν πολλά σύγχρονα κυκλώματα με ενεργά στοιχεία. Το κύκλωμα του ποτενσιόμετρου είναι ένας βαθμονομήμενος διαιρέτης τάσεων κινούμενου δρομέα που μετράει μια άγνωστη τάση με αντιστάθμιση. Την τεχνική αυτή μπορούμε να κατανοήσουμε με τη βοήθεια του σχήματος 2.1a. Ο διαιρέτης τάσεως κατασκευάζεται με δύο αντιστάσεις R_1 , R_2 σε σειρά, και μια τρίτη αντίσταση R που συνδέεται με τη μπαταρία V . Η αντίσταση R_2 είναι μεγάλης ακρίβειας και σταθερής τιμής, ενώ η R_1 είναι γραμμικά



Σχ. 2.1α.
Βασικό κύκλωμα ποτενσιομέτρου.

μεταβλητή αντίσταση, επίσης μεγάλης ακρίβειας. Η αντίσταση ρυθμίσεως R (η τιμή της οποίας δεν συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς), είναι μεταβλήτη, ενώ V είναι μια πηγή σταθερής τάσεως. Η τάση $U_{\text{ΑΝΑΦ}}$ προέρχεται από μια τυποποιημένη πηγή σταθερής τάσεως μεγάλης ακρίβειας (με γνωστή τιμή). Οι μετρητές A_1 και A_2 είναι γαλβανόμετρα ή βολτόμετρα με υψηλή σύνθετη αντίσταση. Τέλος, U_x είναι η προς μέτρηση τάση.

Το καλιμπράρισμα του διαιρέτη τάσεως γίνεται με κλείσιμο του διακόπτη S_1 , και ρύθμιση της μεταβλητής αντιστάσεως R μέχρι να μηδενισθεί το γαλβανόμετρο A_1 , οπότε $U_a = U_{\text{ΑΝΑΦ}}$. Η τάση U_a μοιράζεται έτσι στις αντιστάσεις ακρίβειας R_1 και R_2 . Η τάση του κάτω μέρους της αντιστάσεως R_1 μπορεί να λάβει τιμές από 0 Volts (όταν ο δρομέας βρίσκεται στο χαμηλότερο σημείο της R_1) μέχρι U_β Volts (όταν ο δρομέας βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο της R_1). Η τάση U_β δίνεται από τη σχέση:

$$U_\beta = \frac{R_1 U_a}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 U_{\text{ΑΝΑΦ}}}{R_1 + R_2} \quad (2.1)$$

Δηλαδή η τιμή της U_β εκφράζεται σε συνάρτηση με την τιμή της $U_{\text{ΑΝΑΦ}}$. Αν τώρα, ένα κλάσμα α της αντιστάσεως R_1 (μετρώντας από το μέρος της γειώσεως) διαχωρισθεί με την κίνηση του δρομέα, η αντίσταση που σχηματίζεται στο πάνω μέρος θα είναι $(1 - \alpha)R_1$, δηλαδή το α παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Αν π.χ. η τιμή της R_1 είναι 1.000Ω και ο δρομέας έχει τοποθετηθεί έτσι ώστε $\alpha = 0.2$, το κάτω μέρος της αντιστάσεως θα έχει αντίσταση $0.2 \times 1.000 = 200 \Omega$ και το επάνω μέρος της $(1 - 0.2) \times 1.000 = 800 \Omega$.

Συνδέομε τώρα την άγνωστη τάση U_x και ρυθμίζομε το δρομέα της R_1 μέχρι να μηδενισθεί το γαλβανόμετρο A_2 . Η τάση στο κάτω μέρος της αντιστάσεως R_1 θα είναι τότε ίση προς την άγνωστη τάση και θα δίνεται από τη σχέση:

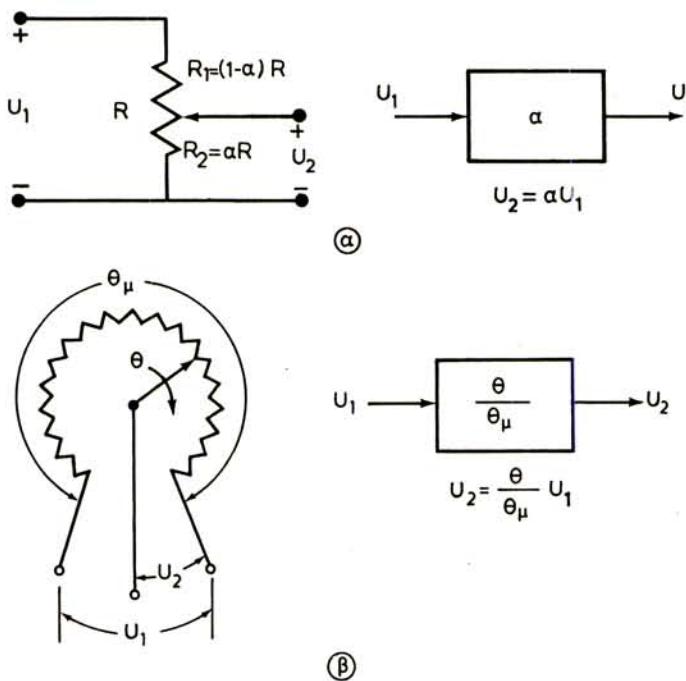
$$U_x = \alpha U_\beta$$

όπου $\alpha =$ το κλάσμα της R_1 , όταν το γαλβανόμετρο μηδενισθεί

$U_\beta =$ η τάση στο σημείο β , που δίνεται από τη σχέση (2.1).

Συνήθως η μεταβλητή αντίσταση R , είναι βαθμονομημένη, π.χ. σε 1.000 υποδιαιρέσεις. Στην περίπτωση αυτή το α είναι ο αριθμός των διαιρέσεων που απαιτούνται για το μηδενισμό του γαλβανομέτρου A_2 . Σημειώνομε ότι, μετά το καλιμπράρισμα του διαιρέτη τάσεων (ποτενσιόμετρο) η πηγή τάσεως $U_{\text{ANAΦ}}$ και το γαλβανόμετρο A_1 , απομακρύνονται από το κύκλωμα.

Συνοψίζοντας, μπορούμε λοιπόν νά πούμε ότι τα ποτενσιόμετρα χρησιμοποιούνται ως μετρητές τάσεων. Η σχηματική τους παράσταση και οι σχέσεις εισόδου - εξόδου δίνονται στα διαγράμματα του σχήματος 2.1β. Στην περίπτωση (α) η κίνηση του δρομέα γίνεται ευθύγραμμα, ενώ στη (β) η κίνηση είναι περιστροφική.



Σχ. 2.1β.

Σχηματικά διαγράμματα ποτενσιόμετρων.

α) Ποτενσιόμετρο με ευθύγραμμη κίνηση. β) Ποτενσιόμετρο με περιστροφική κίνηση.

2.1.2 Ποτενσιόμετρα ως μετρητές σφάλματος (συγκριτές).

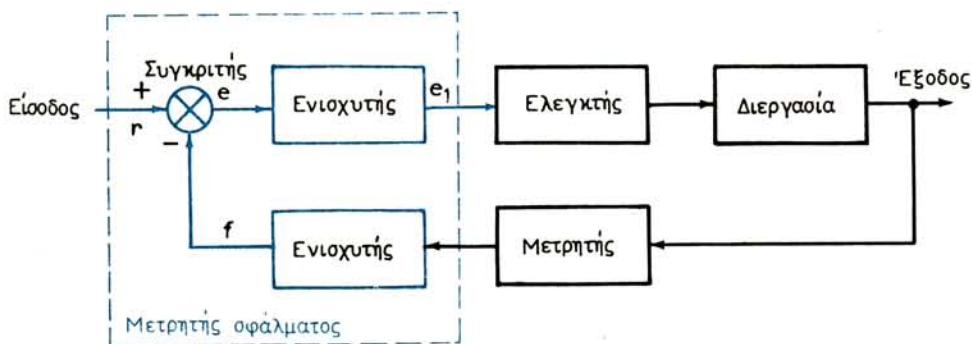
Τα ποτενσιόμετρα χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου και ως μετρητές σφάλματος ή συγκριτές.

Η λειτουργία του συγκριτή συνοψίζεται στο σχήμα 2.1γ, όπου εικονίζεται το λειτουργικό διάγραμμα ενός συστήματος ελέγχου με ανατροφοδότηση.

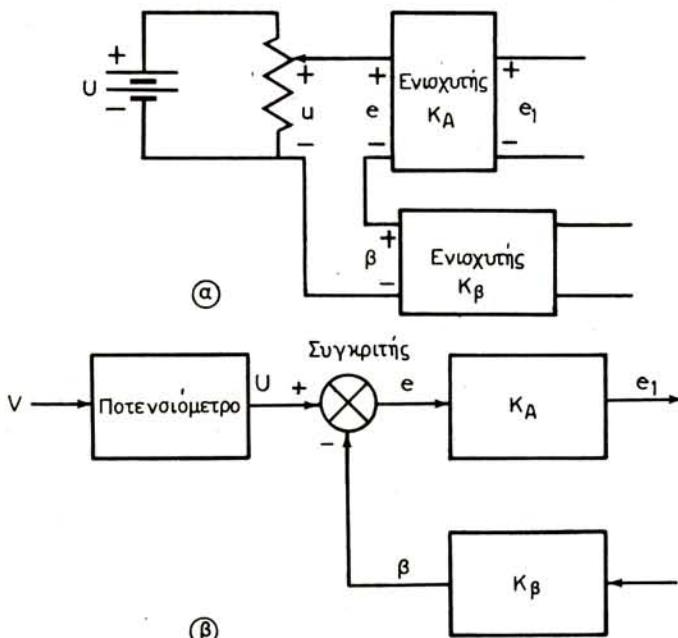
Ο μετρητής σφάλματος αποτελείται από το συγκριτή και δύο ενισχυτές, οι οποίοι ενισχύουν τα σήματα της ανατροφοδοτήσεως και της ενεργοποιήσεως.

Στο σχήμα 2.1δ φαίνεται η συνδεσμολογία του ποτενσιόμετρου για τη μέτρηση του σήματος σφάλματος.

Η σύγκριση των σημάτων u και β γίνεται με αλγεβρική επαλληλία των διαφο-



Σχ. 2.1γ.
Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου με ανατροφοδότηση.



Σχ. 2.1δ.
Λειτουργικό διάγραμμα μετρητού σφάλματος.

πών δυναμικού υ και β στο κύκλωμα του ποτενσιομέτρου και των δύο ενισχυτών.

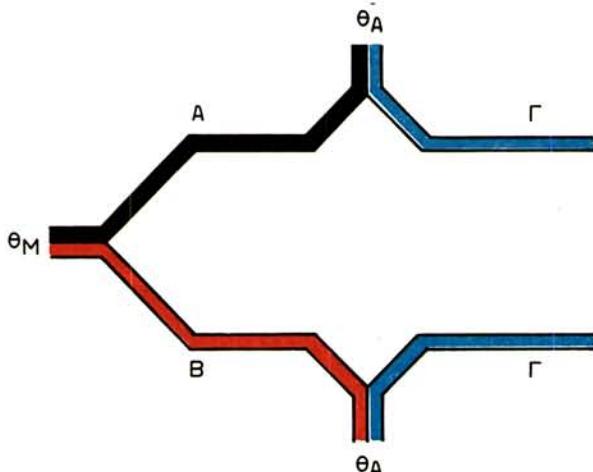
Με χρήση του νόμου του Κίρχοφ που διατυπώνει το γεγονός ότι το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων γύρω από ένα βρόχο ισούται με το μηδέν, έχουμε:

$$\beta + \epsilon - u = 0 \quad \text{ή} \quad u - \beta = \epsilon$$

$$(2.2)$$

Είναι φανερό δε, ότι η αλγεβρική σχέση (2.2) είναι πράγματι η σχέση που περιγράφει τη λειτουργία του συγκριτή.

στο περιβάλλον, του οποίου τη θερμοκρασία θ_M θέλομε να μετρήσουμε. Δύο άλλα ελάσματα από ένα τρίτο μέταλλο Γ συνδέονται με το σύστημα μετρήσεως. Τα σημεία «αναφοράς» διατηρούνται σε μία κοινή θερμοκρασία θ_A , η οποία μας είναι γνωστή. Η τάση ανοικτού κυκλώματος η οποία δημιουργείται μεταξύ των συρμάτων Γ είναι συνάρτηση της διαφοράς των θερμοκρασιών ($\theta_M - \theta_A$). Το μέγεθος της τάσεως αυτής εξαρτάται από τον απόλυτη τιμή της διαφοράς των θερμοκρασιών, η δε πολικότητά της από το ποια από τις δύο θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερη.



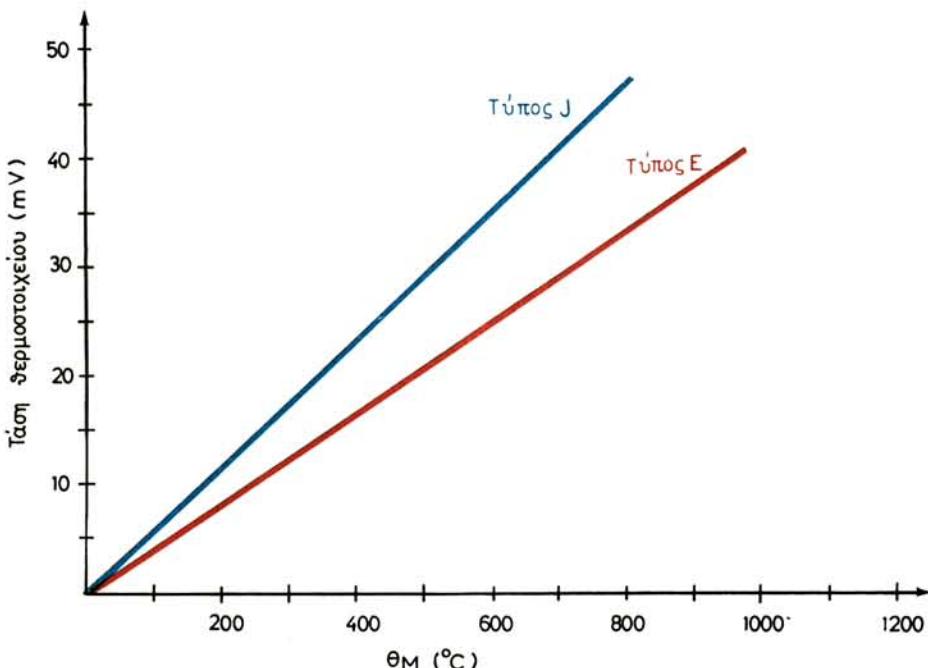
Σχ. 2.1η.
Σύστημα θερμικού μεταλλάκτη με τρία σύρματα.

Υπάρχουν πολλοί τύποι θερμοστοιχείων που χρησιμοποιούν διάφορα μέταλλα ή κράματα μετάλλων. Ο τύπος J π.χ., που χρησιμοποιεί σίδερο και ένα κράμα νικελίου (40) και χαλκού (60), λειτουργεί σε ένα πεδίο θερμοκρασιών από -190°C μέχρι 760°C . Ο τύπος E, που αποτελείται από νικέλιο, κράμα χρωμίου και το κράμα του προηγούμενου τύπου, λειτουργεί σε θερμοκρασίες μεταξύ -100°C και 1260°C . Το σχήμα 2.1θ δείχνει τη γραφική παράσταση της σχέσεως μεταξύ της τάσεως των δύο παραπάνω τύπων θερμοστοιχείου με τη θερμοκρασία θ_M . Η θερμοκρασία αναφοράς θ_A είναι 0°C .

Όπως φαίνεται, ο τύπος J έχει μεγαλύτερη ευαισθησία από τον τύπο E στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Π.χ. μια μεταβολή 100°C στον τύπο J, δημιουργεί μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού ($\sim 5 \text{ mV}$) από τον τύπο E, (όπου η διαφορά δυναμικού είναι γύρω στα 2.5 mV). Η μεγαλύτερη ευαισθησία του τύπου J εκδηλώνεται στη γραφική παράσταση από το ότι η αντίστοιχη ευθεία έχει μεγαλύτερη κλίση από την ευθεία του τύπου E.

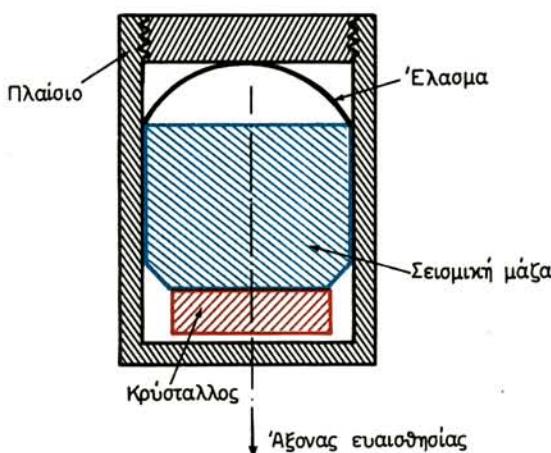
2.1.3.3 Πιεζοηλεκτρικοί μεταλλάκτες.

Οι μεταλλάκτες αυτοί μετατρέπουν μηχανική ενέργεια λόγω πιέσεως σε ηλεκτρική. Ένα κοινό παράδειγμα αποτελεί ο **πιεζοηλεκτρικός μετρητής επταχύνσεως** (piezoelectric accelerometer). Η λειτουργία του βασίζεται στην ιδιότητα που έχουν ορισμένοι κρύσταλλοι να παράγουν μια τάση όταν πιέζονται. Παραδείγματα



Σχ. 2.10.

Γραφικές παραστάσεις τάσεως ως προς θερμοκρασία για δύο τύπους θερμοστοιχείων.



Σχ. 2.11.

Πιεζοηλεκτρικός μετρητής επιταχύνσεως.

τέτοιων μεταλλακτών, είναι η κρυσταλλική βελόνα φωνογράφου και το κρυσταλλικό μικρόφωνο. Η μορφή του μετρητή επιταχύνσεως παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 2.11. Ο ξρύσταλλος βρίσκεται δίπλα σε μια μάζα, η οποία λέγεται **σεισμική μάζα** (seismic mass) και ασκεί πίεση στον κρύσταλλο. Με τη χρησιμοποίηση ενός ελάσματος η σεισμική μάζα ασκεί πάντοτε μια μικρή πίεση αναφοράς. Όταν το σύστημα υποβληθεί σε επιτάχυνση, η σεισμική μάζα πιέζει τον κρύσταλλο με δύναμη, η οποία εξαρτάται από την επιτάχυνση a , σύμφωνα με τη γνωστή σχέση $F = ma$, και παράγεται μια τάση μεταξύ των δύο άκρων του κρυστάλλου. Η τάση

αυτή είναι ανάλογη προς την επιτάχυνση. Ο κρύσταλλος μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή τάσεως με πολύ υψηλή σύνθετη αντίσταση. Επομένως, για να μετρήσομε την τάση αυτή χρειαζόμαστε ένα ηλεκτρονικό μετρητή χαμηλού θορύβου και υψηλής σύνθετης αντίστασεως εισόδου. Η τάση εξόδου του συστήματος είναι μεγέθους μερικών mV. Η ιδιοσυχνότητα των μετρητών αυτών μπορεί να υπερβεί τα 5 kHz καί επομένως οι μετρητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μετρήσεις δονήσεων αντίστοιχων συχνοτήτων.

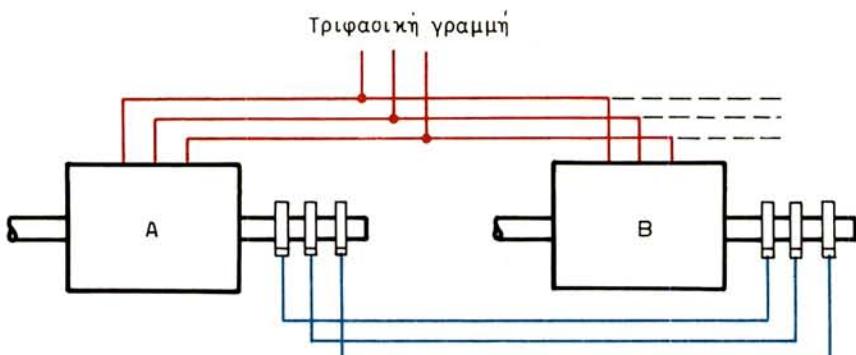
2.1.4 Συγχρονοσυστήματα.

Μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου αφορά τον έλεγχο θέσεως, όπως π.χ. στην περίπτωση που απαιτείται απόλυτος συγχρονισμός της γωνιακής θέσεως ενός άξονα με κάποιον άλλο, οπότε ο συγχρονισμός πρέπει να γίνει χωρίς τη φυσική σύνδεση των δύο αξόνων. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με τη βοήθεια ειδικών ηλεκτρικών μηχανών, οι οποίες ονομάζονται «αυτο-σύγχρονες μηχανές» και οι οποίες με συντομία λέγονται «**Σύγχρονα**» (Synchros).

Υπάρχουν τρεις τύποι τέτοιων συστημάτων:

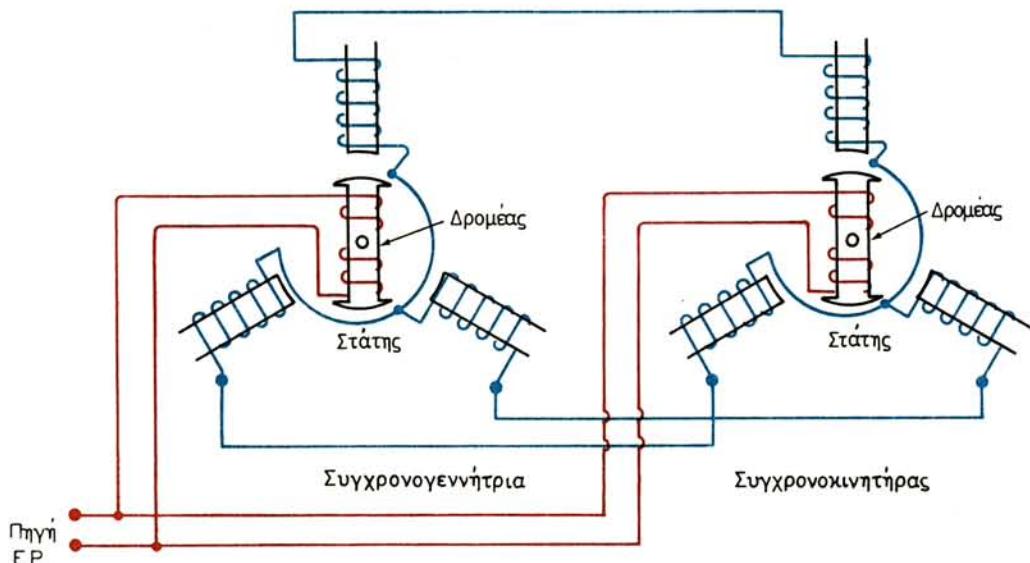
- τριφασικά σύγχρονα ισχύος για τη μετάδοση μεγάλων ροπών,
- μονοφασικά ή σύγχρονα ενδείξεως, που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις μεταδόσεως πολύ ελαφρών ροπών, και
- συστήματα γεννήτριας - μετασχηματιστή για την ένδειξη απευθυγραμμίσεως των αξόνων, υπό μορφή μεγέθους και πολικότητας τάσεων.

Ένα τριφασικό σύστημα συγχρονομηχανών φαίνεται στο σχήμα 2.1α. Τα πρωτεύοντα τυλίγματά τους διεγείρονται από την τριφασική γραμμή, ενώ τα αντίστοιχα δευτερεύοντα τυλίγματα συνδέονται μεταξύ τους. Όταν η μία από τις μηχανές περιστραφεί με τη βοήθεια κάποιου μηχανικού μέσου, προκαλεί περιστροφή και της άλλης μηχανής, με συγχρονισμό των δύο, σαν να ήταν ενωμένοι οι άξονές τους. Τέτοια συγχρονοσυστήματα χρησιμοποιούνται για να συγχρονίζουν π.χ. ανυψωτικούς κινητήρες γερανών που ανυψώνουν ταυτόχρονα τα δύο άκρα μεγάλων μεταλλικών δοκών. Επίσης, χρησιμοποιούνται για τη σύγχρονη κίνηση εξαρτημάτων σε τυπογραφικές πρέσες, καθώς και σε άλλες εφαρμογές που απαιτούν συγχρονισμένη κίνηση εξαρτημάτων.



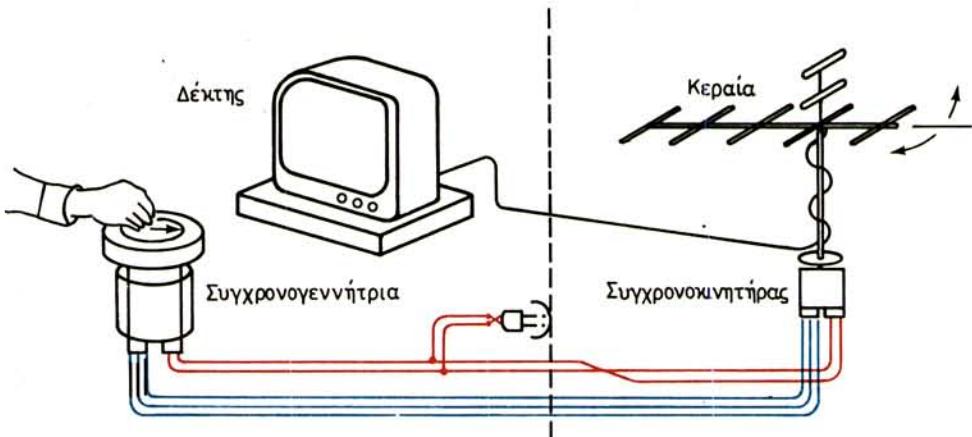
Σχ. 2.1α.
Σύστημα τριφασικών συγχρονομηχανών.

Ο συγχρονισμός δύο ηλεκτρικών μηχανών επιτυγχάνεται και με μονοφασικές μηχανές. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1β, τα τυλίγματα των δρομέων της γεννήτριας και του κινητήρα έχουν συνδεθεί με κοινή τροφοδοτική πηγή τάσεως εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ). Τα τυλίγματα των στατών, αποτελούνται από τρία τυλίγματα για κάθε στάτη, σε άξονες 120° μεταξύ τους και έχουν συνδεθεί αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα. Όταν το ρεύμα επιφέρει «διέγερση» στά τυλίγματα των δρομέων, παράγονται τάσεις εξ επαγωγής (όπως στην περίπτωση των μετασχηματιστών) στα τυλίγματα των στατών. Αν οι δύο δρομείς είναι στην ίδια θέση ως προς τα τυλίγματα των στατών (όπως στο σχήμα 2.1β), οι τάσεις που παράγονται στα τυλίγματα των στατών της γεννήτριας και του κινητήρα είναι ίσες, με αποτέλεσμα να μην κυκλοφορεί ρεύμα στα τυλίγματα αυτά και επομένως να μην αναπτύσσεται ροπή στρέψεως στους δρομείς.



Σχ. 2.1β.
Μονοφασικό σύστημα συγχρονογεννήτριας – συγχρονοκινητήρα.

Όταν όμως οι γωνιακές θέσεις των δύο δρομέων δεν είναι ίδιες, οι τάσεις που παράγονται στα τυλίγματα των στατών είναι άνισες και έτσι κυκλοφορεί αωφέλιμο ρεύμα. Το ρεύμα αυτό, σε συνδυασμό με τα μαγνητικά πεδία παράγει ροπές στρέψεως, που τείνουν να τοποθετήσουν τους δρομείς στην ίδια γωνία. Μια συνήθης εφαρμογή του παραπάνω συγχρονοσυστήματος είναι ο έλεγχος της γωνιακής θέσεως μιας περιστρεφόμενης κεραίας έγχρωμης τηλεοράσεως από το δωμάτιο όπου λειτουργεί ο δέκτης. Για την καλύτερη λήψη της έγχρωμης εικόνας είναι απαραίτητο να στραφεί η κεραία προς τη θέση του σταθμού εκπομπής. Προς το σκοπό αυτό, ο συγχρονοκινητήρας, που περιστρέφει την κεραία, συνδέεται μέσω καλωδίου με τη συγχρονογεννήτρια, η οποία στρέφεται με το χέρι στην επιθυμητή γωνία για το συγκεκριμένο σταθμό, και η οποία βρίσκεται μέσα στο δωμάτιο όπου είναι ο δέκτης. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο σχήμα 2.1γ. Για να περιστρέψουμε την κεραία προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, στρέφομε με το χέρι τον άξονα της



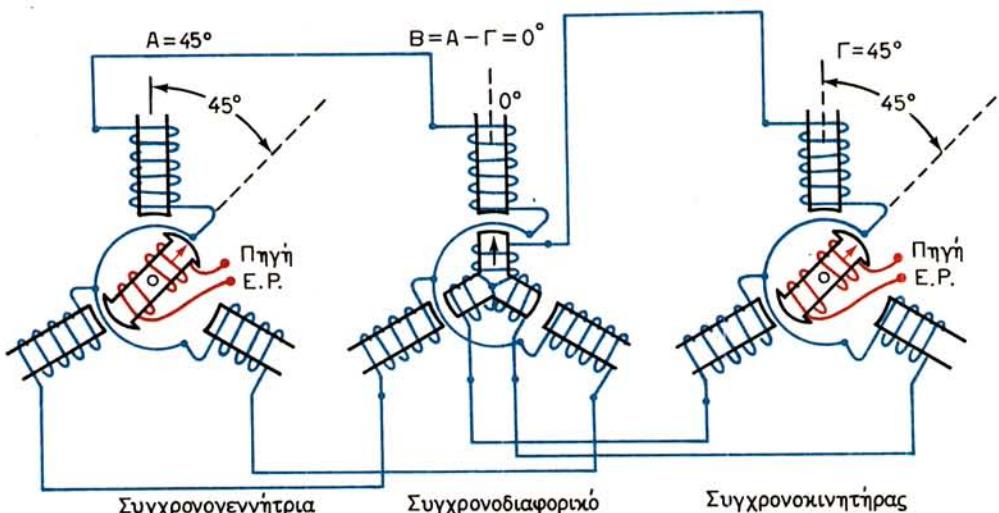
Σχ. 2.1η.

Εφαρμογή συγχρονοσυστήματος για την τηλερύθμιση κεραίας τηλεοράσεως.

συγχρονογεννήτριας κατά την επιθυμητή γωνία, και σε λίγα δευτερόλεπτα ο σύγχρονοκινητήρας περιστρέφει την κεραία κατά μια ίση γωνία και σταματάει σ' αυτή τη θέση. Για να στρέψουμε την κεραία προς άλλο σταθμό, δεν έχουμε παρα να περιστρέψουμε τη συγχρονογεννήτρια προς την επιθυμητή κατεύθυνση, και ο συγχρονοκινητήρας θα εκτελέσει την ίδια περιστροφή.

Μια παραλλαγή του συγχρονοσυστήματος του σχήματος 2.1ιβ πραγματοποιείται με την εισαγωγή ενός **συγχρονοδιαφορικού** (differential synchro). Στη διάταξη αυτή η περιστροφή του άξονα του διαφορικού είναι συνάρτηση της διαφοράς των περιστροφών των δύο άλλων αξόνων.

Στο σχήμα 2.1ιδ, το συγχρονοδιαφορικό ενεργεί σαν μια διαφορική γεννήτρια.



Σχ. 2.1ιδ.
Διαφορικό συγχρονοσύστημα.

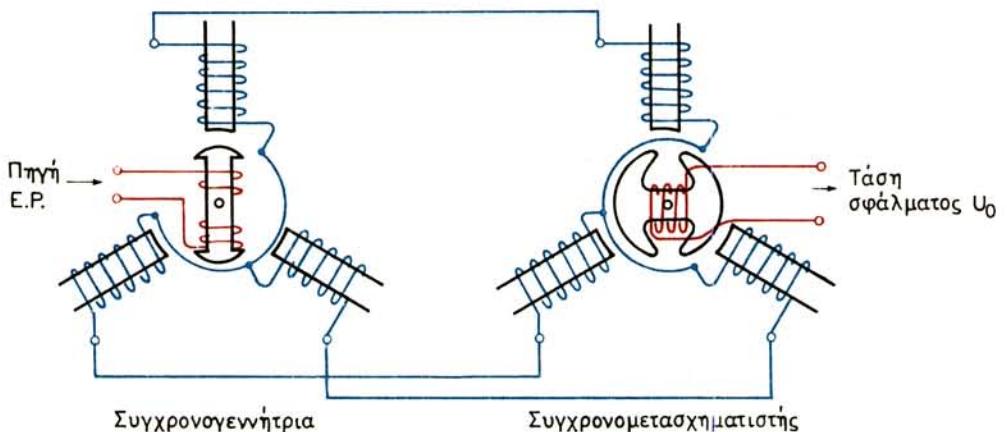
Οι τάσεις στα τυλίγματα του στάτη του παράγουν αντίστοιχες τάσεις εξ επαγωγής στα τυλίγματα του δρομέα του. Αν η συγχρονογεννήτρια και ο συγχρονοκινητήρας περιστραφούν κατά 45° , το συγχρονοδιαφορικό θα μείνει ακίνητο. Αν $A = 50^\circ$ και $\Gamma = 20^\circ$, το συγχρονοδιαφορικό θα περιστραφεί κατά μία γωνία $B = 50^\circ - 20^\circ = 30^\circ$.

Οι διαφορικές γεννήτριες έχουν συνήθως μία δέσμη τριών πυκνωτών, σε παράλληλη σύνδεση με τα πρωτεύοντα τυλίγματα του στάτη, που αποσκοπούν στη βελτίωση του συντελεστή ισχύος. Έτσι, μειώνονται οι απώλειες ενέργειας και αποφεύγεται η υπερθέρμανση του συστήματος.

Τα μονοφασικά συστήματα συγχρονισμού έχουν πολλές εφαρμογές σε περιπτώσεις μεταδόσεως πληροφοριών υπό μορφή γωνιακής θέσεως ενός άξονα. Τυπικό παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής είναι η τηλερύθμιση της θέσεως των επιφανειών ελέγχου (κινητών πτερυγίων) των αεροσκαφών. Τα μονοφασικά συστήματα επίσης χρησιμοποιούνται για να ανοίγουν και να κλείνουν αυτόματα διάφορες βαλβίδες. Μια συγχρονογεννήτρια μπορεί να κινεί σε συγχρονισμό πολλούς συγχρονοκινητήρες, ο συνολικός αριθμός των οποίων εξαρτάται από το μέγεθος της γεννήτριας, τις ισχείς των κινητήρων και το συνολικό σφάλμα που μπορεί να ανεχθεί ο σχεδιασμός του συστήματος.

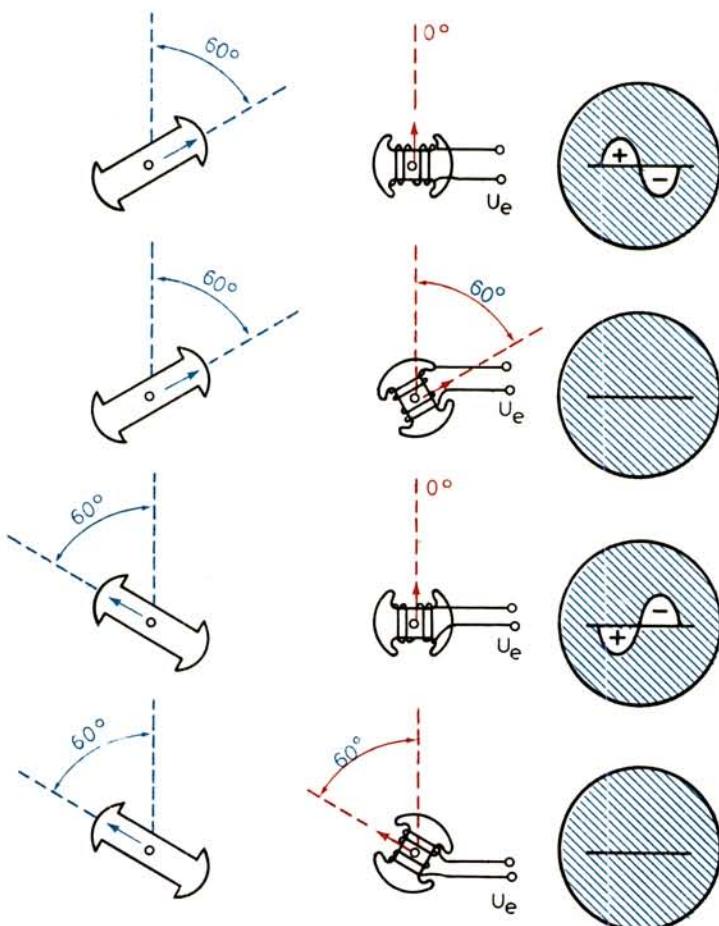
Σε ρυθμίσεις μεγάλης ακρίβειας της γωνιακής θέσεως ενός περιστρεφόμενου άξονα είναι απαραίτητο να αναπτύσσονται μεγάλες ροπές στρέψεως. Τα συγχρονοσυστήματα που παράγουν μεγάλες ροπές στρέψεως, έχουν μικρή ακρίβεια ως προς την επιθυμητή γωνιακή θέση του άξονα. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται ένα ειδικό συγχρονοσύστημα, στο οποίο παράγεται μια τάση, το πλάτος της οποίας είναι συνάρτηση της διαφοράς των γωνιακών θέσεων των δύο αξόνων και λέγεται **τάση σφάλματος** (error voltage), γιατί η παρουσία της σημαίνει ότι η ελεγχόμενη γωνιακή θέση παρουσιάζει σφάλμα. Η τάση αυτή χρησιμεύει για να ενεργοποιήσει άλλα εξαρτήματα του συστήματος, που διορθώνουν το σφάλμα. Η τάση σφάλματος αναφέρεται και ως **διαμορφωμένο σήμα σφάλματος** (error - modulated signal), δηλαδή ένα φέρον - κύμα, του οποίου το πλάτος είναι ανάλογο με το μέγεθος του σφάλματος, και η πολικότητά του προσδιορίζεται από το αλγεβρικό πρόσημο (θετικό ή αρνητικό) του σφάλματος.

Η βασική διάταξη παραγωγής της τάσεως σφάλματος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1ιε και περιλαμβάνει μια συγχρονογεννήτρια και μια άλλη περιστρεφόμενη μηχανή που ονομάζεται **συγχρονομετασχηματιστής ελέγχου** (synchro control transformer). Η «διέγερση» στο δρομέα της γεννήτριας, που παρέχεται από μια μονοφασική πηγή ΕΡ, δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στη γεννήτρια και τάσεις εξ επαγωγής στα τυλίγματα των στατών της γεννήτριας και του μετασχηματιστή. Αν αγνοηθούν οι διαφορές δυναμικού που παράγονται από το ρεύμα «διέγέρσεως», οι επαγωγικές τάσεις στα τυλίγματα των δύο στατών είναι ίσες. Επομένως, η κατανομή της μαγνητικής ροής γύρω από το στάτη του μετασχηματιστή είναι όμοια με την αντίστοιχη μαγνητική ροή γύρω από το στάτη της γεννήτριας. Ισοδύναμα, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα τυλίγματα των δύο δρομέων ανήκουν στο ίδιο μαγνητικό κύκλωμα, στο οποίο υπάρχει μία μεταβαλλόμενη αλληλεπαγωγική αντίσταση μεταξύ των τυλιγμάτων των δύο δρομέων, με το πρόσθετο διέλος ότι τα τυλίγματα αυτά είναι φυσικά διαχωρισμένα. Στο σχήμα 2.1ιστ παρουσιάζονται οι τάσεις σφάλματος U_e για τέσσερις βασικούς συνδυασμούς γωνιακών θέσεων των δρομέων της γεννήτριας και του μετασχηματιστή. Όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο, τα



Σχ. 2.1ie.

Ζεύγος συγχρονογεννήτριας-συγχρονομετασχηματιστή για την παραγωγή τάσεως σφάλματος.



Σχ. 2.1ist.

Τάση σφάλματος, όπως φαίνεται στον παλμογράφο για τέσσερις βασικούς συνδυασμούς γωνιακών θέσεων των δρομέων.

συγχρονοσυστήματα αναγνωρίσεως σφάλματος χρησιμοποιούνται παρά πολύ σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου γωνιακής θέσεως.

2.1.5 Σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, υπόκειται σε μια δύναμη, που είναι ανάλογη προς τη μαγνητική ροή, την ένταση του ρεύματος, το μήκος του αγωγού και το ημίτονο της γωνίας μεταξύ του αγωγού και της διευθύνσεως της μαγνητικής ροής.

Αν ο αγωγός βρίσκεται σε σταθερή απόσταση από ένα άξονα, γύρω από τον οποίο μπορεί να περιστραφεί, υπόκειται σε ροπή στρέψεως, η οποία είναι ανάλογη προς το γινόμενο της παραπάνω δυνάμεως και της ακτίνας περιστροφής.

Σε ένα κινητήρα η συνολική ροπή ισούται με το άθροισμα όλων των ροπών που αναπτύσσονται σε κάθε αγωγό. Στον κάθε κινητήρα μπορούν να ρυθμισθούν δύο ποσότητες: η μαγνητική ροή Φ και η ένταση του ρεύματος I_T που απορροφά το επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα. Η κινητήρια ροπή T_K δίνεται από τη σχέση:

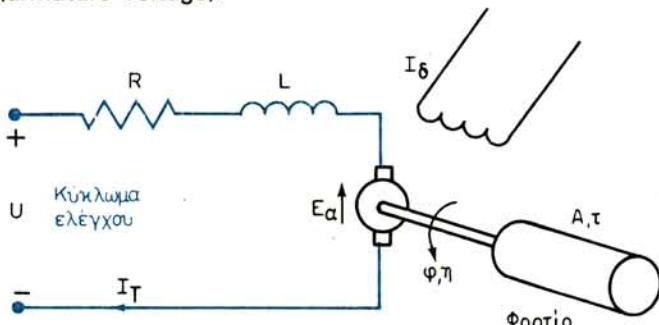
$$T_K = K_1 \Phi I_T \quad (2.7)$$

Υπάρχουν δύο τρόποι ελέγχου της λειτουργίας ενός **σερβοκινητήρα** (servomotor). Κατά τον πρώτο, διατηρείται σταθερό το ρεύμα διεγέρσεως του κινητήρα και ρυθμίζεται η τάση που εφαρμόζεται στο επαγωγικό τύμπανο. Κατά το δεύτερο, διατηρείται σταθερή η ένταση στο επαγωγικό τύμπανο I_T και ρυθμίζεται η τάση που εφαρμόζεται στο πεδίο διεγέρσεως.

2.1.5.1 Σερβοκινητήρες ελεγχόμενοι από το επαγωγικό τύμπανο.

Περιστρεφόμενα φορτία με μεγάλη αδράνεια απαιτούν ομαλή γωνιακή επιτάχυνση σε ένα ευρύ πεδίο ταχυτήτων. Ο έλεγχος αυτού του είδους των περιστρεφόμενων φορτίων επιτυγχάνεται με σερβοκινητήρες, η λειτουργία των οποίων ρυθμίζεται από την τάση του επαγωγικού τυμπάνου (ενώ το ρεύμα διεγέρσεως διατηρείται σταθερό).

Το σταθερό ρεύμα διεγέρσεως I_δ , του κινητήρα, παρέχεται συνήθως με μια χωριστή σταθερή πηγή συνεχούς ρεύματος. Στο σχήμα 2.1ιζ φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ενός σερβοκινητήρα που ελέγχεται από την **τάση του επαγωγικού τυμπάνου U** (armature voltage).



Σχ. 2.1ιζ.
Σερβοκινητήρας ΣΡ ελεγχόμενος από την τάση U .

Η μαγνητική ροή Φ στον κινητήρα είναι ανάλογη με το ρεύμα διεγέρσεως I_δ , δηλαδή

$$\Phi = K_\delta I_\delta \quad (2.8)$$

όπου K_δ = σταθερά.

Με συνδυασμό των σχέσεων (2.7) και (2.8) βρίσκομε

$$T_K = K_1 K_\delta I_\delta I_T \quad (2.9)$$

Επειδή τα K_1 , K_δ είναι σταθερές και το ρεύμα διεγέρσεως είναι επίσης σταθερό, η σχέση (2.9) μπορεί να απλοποιηθεί σε

$$T_K = K_K I_T \quad (2.10)$$

όπου $K_K = K_1 K_\delta I_\delta$ = σταθερά.

Η ένταση στο επαγωγικό τύμπανο I_T παράγεται από την τάση $U - E_a$, όπου E_a είναι η **αντηλεκτρεγερτική δύναμη** (back emf) του κινητήρα ή Α.Η.Ε.Δ. Δηλαδή, ένα μέρος της τάσης της πηγής που τροφοδοτεί τον κινητήρα διατίθεται για να υπερνικηθεί η αντίθετη αυτή τάση.

Η αντηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα είναι ανάλογη προς την ταχύτητα n του κινητήρα, δηλαδή:

$$E_a = K_a n \quad (2.11)$$

Γενικά η ροπή στρέψεως T_ϕ , που μεταφέρεται στο φορτίο, δεν είναι ίση με τη ροπή που παράγεται από τον κινητήρα T_K . Όταν υπάρχει **ροπή διαταραχής** T_Δ (disturbance torque), αυτή θα πρέπει να αφαιρεθεί από τη ροπή του κινητήρα, οπότε η ωφέλιμη ροπή είναι

$$T_\phi = T_K - T_\Delta \quad (2.12)$$

Όταν, π.χ. ο κινητήρας περιστρέφει μία παραβολική αντένα, ο άνεμος προβάλλει αντίσταση κατά την περιστροφή, στη δυσμενέστερη δε περίπτωση δημιουργείται αντίθετη ροπή διαταραχής, που πρέπει να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς του συστήματος ελέγχου της αντένας.

Η ταχύτητα n του περιστρεφόμενου φορτίου συνδέεται με τη ροπή T_ϕ του φορτίου, σύμφωνα με τη διαφορική εξίσωση

$$T_\phi = A \frac{dn}{dt} + \tau \quad (2.13)$$

όπου A = ροπή αδράνειας του φορτίου

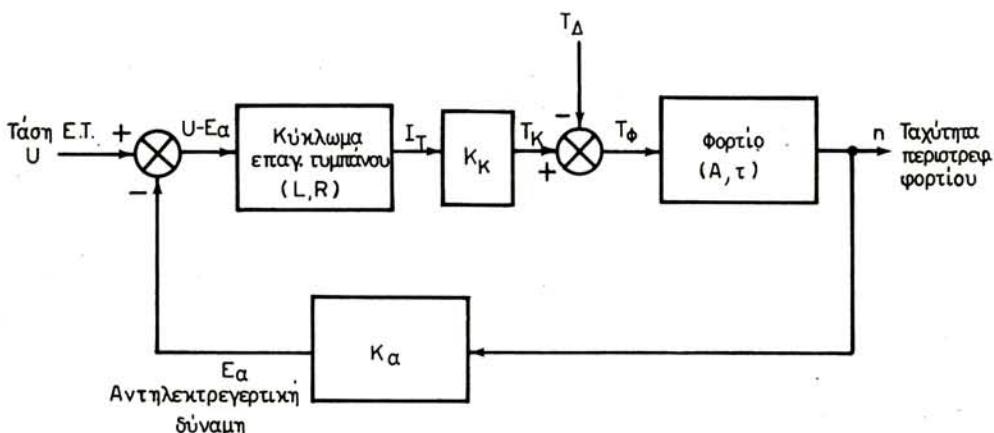
τ = συντελεστής περιστροφικής τριβής

dn/dt = γωνιακή επιτάχυνση του κινητήρα.

Στο σχηματικό διάγραμμα 2.1 ιη συνοψίζονται όλες οι δυναμικές σχέσεις που αφορούν τον σερβοκινητήρα που ελέγχεται από την τάση του επαγωγικού τυμπάνου.

2.1.5.2 Σερβοκινητήρες ελεγχόμενοι από το πεδίο διεγέρσεως.

Ο έλεγχος σερβοκινητήρων από το πεδίο διεγέρσεως προσφέρει τα εξής πλεο-



Σχ. 2.1η.

Λειτουργικό διάγραμμα σερβοκινητήρα ελεγχόμενου από την τάση του επαγωγικού τυμπάνου.

νεκτήματα:

- Ο έλεγχος είναι οικονομικός και απλός.
- Είναι σχετικά αποδοτικός, γιατί έχει μικρές απώλειες στο κύκλωμα του πεδίου (3 - 5% απώλειες).
- Παρέχει σχετικά ομαλό έλεγχο ταχύτητας, χωρίς διακοπές.

Στους σερβοκινητήρες που ελέγχονται από το πεδίο διεγέρσεως το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου διατηρείται σταθερό, μεταβάλλεται δε το ρεύμα διεγέρσεως I_δ .

Η σχέση (2.9) ισχύει και εδώ, δηλαδή:

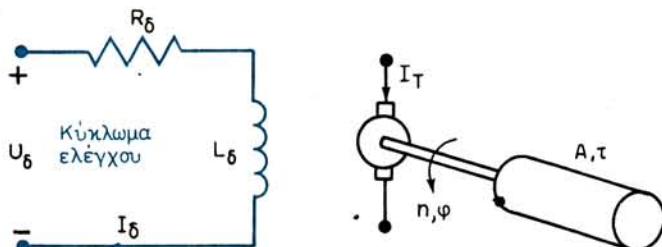
$$T_K = K_1 K_\delta I_T I_\delta \quad (2.14)$$

και

$$T_K = K_K I_\delta \quad (2.15)$$

όπου $K_K = K_1 K_\delta I_T$ = σταθερά.

Στο σχήμα 2.1θ δίνεται ένας σερβοκινητήρας που ελέγχεται από το πεδίο διεγέρσεως. Στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου παραμένει σταθερό και, κατά συνέπεια, δεν αναπτύσσεται αντηλεκτρεγερτική δύναμη. Το ρεύμα διεγέρσεως συνδέεται με τη τροφοδοτική τάση U_δ του πεδίου διεγέρσεως,



Σχ. 2.1θ.

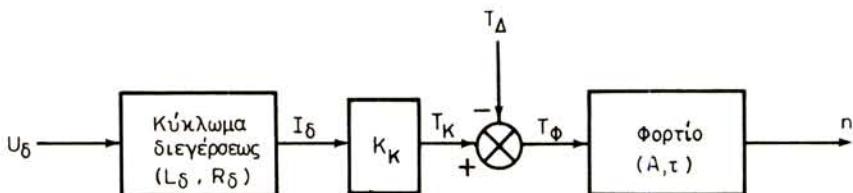
Σερβοκινητήρας ΣΡ ελεγχόμενος από το πεδίο διεγέρσεως.

σύμφωνα με τη διαφορική εξίσωση:

$$U_\delta = L_\delta \frac{dI_\delta}{dt} + R_\delta I_\delta \quad (2.16)$$

όπου dI_δ/dt = ταχύτητα μεταβολής του ρεύματος διεγέρσεως I_δ .

Στο σχήμα 2.1κ παραθέτομε το λειτουργικό διάγραμμα του σερβοκινητήρα Σ.Ρ. ελεγχόμενου πεδίου. Συγκρίνοντάς το με το αντίστοιχο διάγραμμα του σερβοκινητήρα Σ.Ρ. ελεγχόμενης τάσεως του επαγωγικού τυμπάνου, παρατηρούμε ότι στο σχήμα 2.1κ δεν υπάρχει ενδογενής ανατροφοδότηση, επειδή δεν αναπτύσσεται αντηλεκτρεγερτική δύναμη στο τύμπανο.



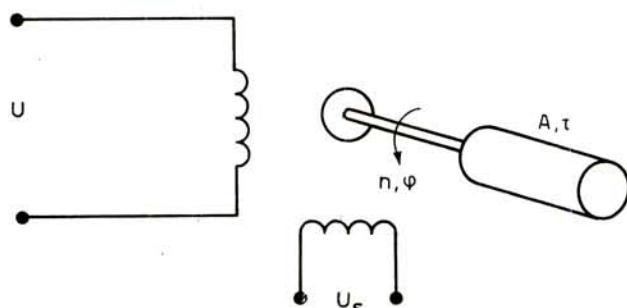
Σχ. 2.1κ.

Λειτουργικό διάγραμμα σερβοκινητήρα Σ.Ρ. που ελέγχεται από το πεδίο διεγέρσεως.

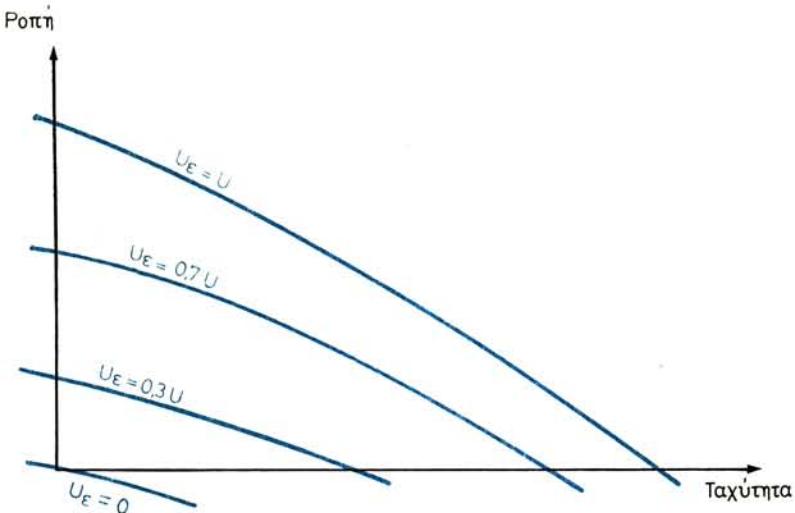
2.1.6 Σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ο σερβοκινητήρας Ε.Ρ. είναι ένας διφασικός επαγωγικός κινητήρας, ο οποίος έχει δύο ανεξάρτητα τυλίγματα στο στάτη του, τοποθετημένα σε γωνία 90° μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1κα. Στο διφασικό κινητήρα οι εναλλασσόμενες τάσεις U και U_e έχουν το ίδιο μέγεθος και διαφέρουν κατά μία γωνία φάσεως 90 ηλεκτρικών μοιρών. Ο διφασικός κινητήρας περιστρέφεται με ταχύτητα λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα, θεωρείται δε ως κινητήρας σταθερής ταχύτητας. Η σύγχρονη ταχύτητα εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων των τυλιγμάτων του στάτη και από τη συχνότητα της τάσεως που εφαρμόζεται στα τυλίγματα του στάτη.

Όταν ο διφασικός κινητήρας χρησιμοποιείται ως σερβοκινητήρας, η ταχύτητά του ρυθμίζεται με την τάση εισόδου U_e . Στην περίπτωση αυτή, η εναλλασσόμενη τάση U στο ένα από τα τυλίγματα είναι σταθερή, ενώ η άλλη τάση ελέγχου U_e



Σχ. 2.1κα.
Σερβοκινητήρας Ε.Ρ.



Σχ. 2.1κβ.
Χαρακτηριστικές καμπύλες σερβοκινητήρα EP.

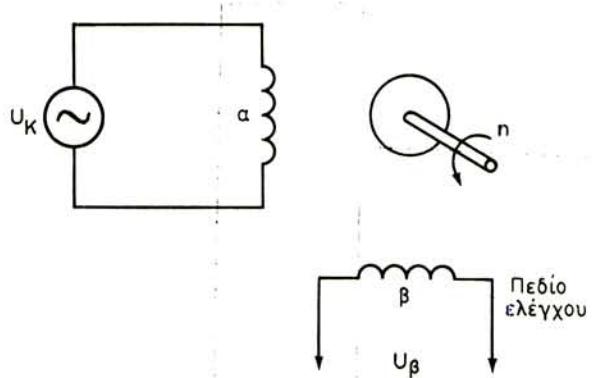
είναι μεταβλητή. Όταν η τάση ελέγχου U_e μεταβάλλεται, η ροπή και η ταχύτητα επίσης μεταβάλλονται. Στο σχήμα 2.1κβ παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του σερβοκινητήρα EP που δείχνουν τη σχέση ροπής - ταχύτητας, για διάφορες τάσεις ελέγχου. Όταν η τάση ελέγχου είναι ίση με το μηδέν, η καμπύλη περνάει από το σημείο τομής των δύο αξόνων, και έχει αρνητική κλίση. Αυτό σημαίνει ότι, όταν η τάση ελέγχου είναι μηδέν, ο κινητήρας αναπτύσσει επιβραδυντική ροπή και σταματάει. Για τιμές της $U_e \neq 0$, αναπτύσσεται μεγάλη ροπή, όταν η ταχύτητα είναι μηδέν. Αυτό σημαίνει ότι ο σερβοκινητήρας αυτός μπορεί να αναπτύξει ικανοποιητική επιτάχυνση γρήγορα και να λειτουργεί σε σχετικά μικρές ταχύτητες, αναπτύσσοντας μεγάλες ροπές.

2.1.7 Ταχύμετρα.

Το **ταχύμετρο** (tachometer), είναι μεταλλάκτης με πολλές εφαρμογές σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου θέσεως και ταχύτητας. Χρησιμοποιείται συχνά για να μετράμε την ταχύτητα ενός περιστρεφόμενου άξονα και να μετατρέπομε την πληροφορία αυτή σε τάση EP σταθερής συχνότητας.

Το ταχύμετρο περιέχει ένα μικρό διφασικό κινητήρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1κγ. Το τύλιγμα α δημιουργεί το σταθερό πεδίο ή πεδίο αναφοράς και τροφοδοτείται από μια πηγή EP με σταθερό πλάτος και συχνότητα. Μια άλλη τάση, u_β με την ίδια συχνότητα παράγεται στο βοηθητικό τύλιγμα β, ή στο πεδίο ελέγχου. Αυτή η τάση συνδέεται στην είσοδο ενός ενισχυτή με πολύ μεγάλη σύνθετη αντίσταση εισόδου, δηλαδή το τύλιγμα β μπορεί να θεωρηθεί ως ανοικτό κύκλωμα. Στην ιδανική περίπτωση το πλάτος του σήματος της τάσεως u_β είναι γραμμικά ανάλογο με την ταχύτητα του δρομέα. Έτσι, έχουμε ένα μεταλλάκτη που μετατρέπει περιστροφική ενέργεια σε ηλεκτρική, σύμφωνα με τη σχέση

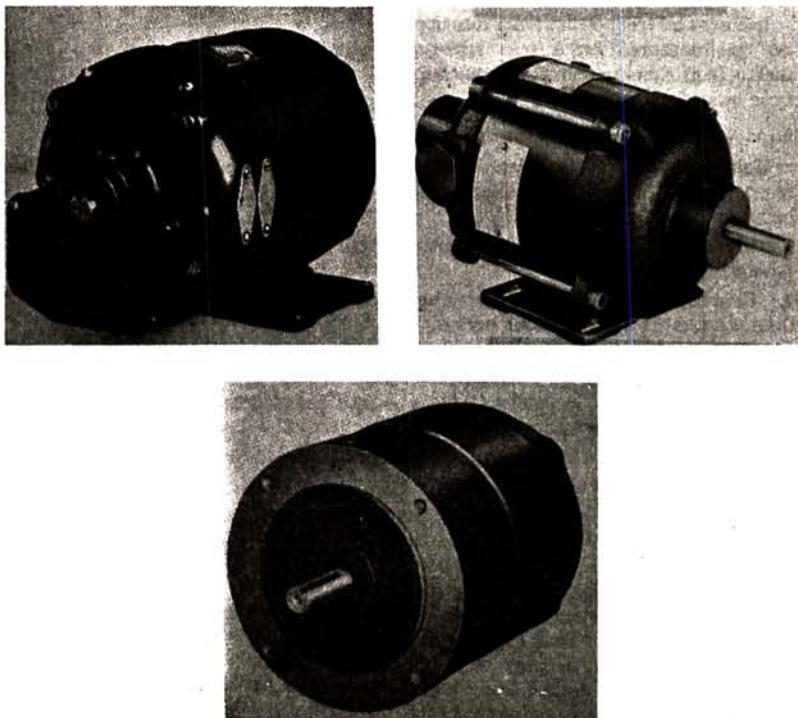
$$u_\beta = K_t n \quad (2.17)$$



όπου K_T = σταθερά

n = γωνιακή ταχύτητα του δρομέα.

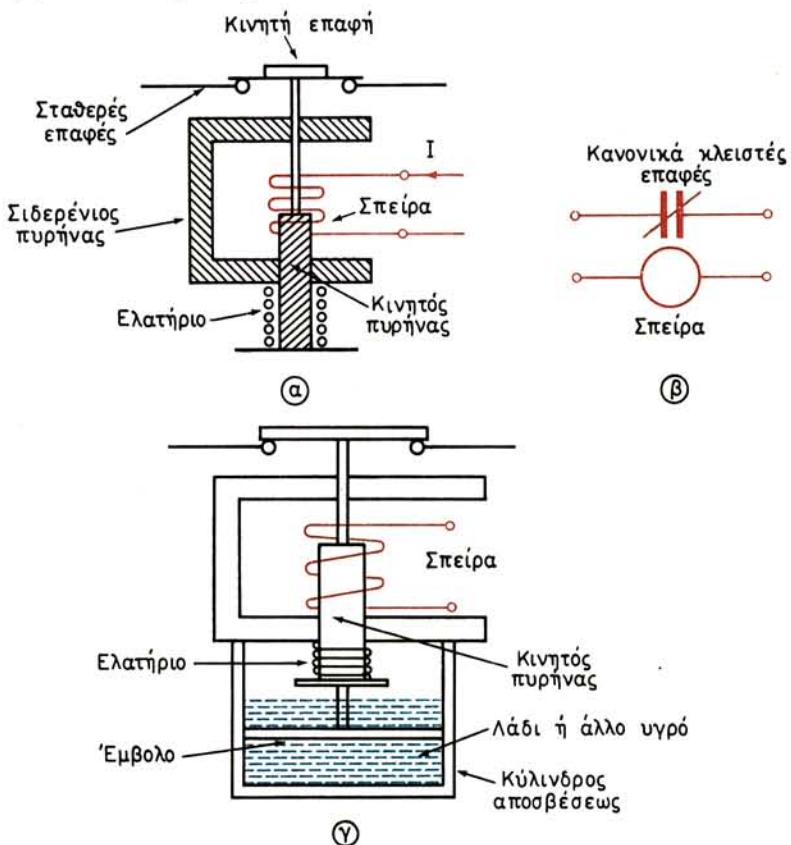
Στο σχήμα 2.1κδ φαίνονται τρεις τύποι ταχυμέτρων.



Σχ. 2.1κδ.
Τρεις διαφορετικοί τύποι ταχυμέτρων.

2.1.8 Ηλεκτρονόμοι υπερφορτώσεως.

Οι ηλεκτρονόμοι υπερφορτώσεως (overload relays) είναι αυτόματοι διακόπτες με σκοπό να προστατεύουν διάφορα ηλεκτρικά συστήματα (κυρίως κινητήρες), από καταστροφή, σε περίπτωση υπερφορτώσεως. Γενικά, η λειτουργία των ηλεκτρονόμων βασίζεται στα φαινόμενα του ηλεκτρομαγνητισμού. Στο σχήμα 2.1κε δίνονται δύο τύποι ηλεκτρονόμων υπερφορτώσεως. Ο πρώτος αντιδρά στιγμιαία σε μια απότομη αύξηση του ρεύματος, ενώ ο δεύτερος με κάποια χρονική καθυστέρηση (time - delay relay).



Σχ. 2.1κε.

Ηλεκτρονόμοι υπερφορτώσεως με κανονικά κλειστές επαφές.

- α) Ηλεκτρονόμος με στιγμιαία αντίδραση. β) Σύμβολα κυκλώματος. γ) Ηλεκτρονόμος με χρονική καθυστέρηση.

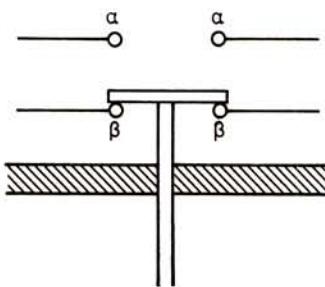
Στην κανονική κατάσταση λειτουργίας, ο κινητός πυρήνας με το βάρος του κρατάει τις επαφές κλειστές. Όταν το σύστημα ενεργοποιηθεί με τη διέλευση ρεύματος Ι από τη σπείρα, ο κινητός πυρήνας ανυψώνεται και ανοίγει τις επαφές. Παρατηρούμε ότι στον ηλεκτρονόμο του σχήματος 2.1κε(α) το άνοιγμα και κλείσιμο των επαφών γίνεται σχεδόν στιγμιαία με την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της σπείρας. Στη διάταξη του σχήματος 2.1κε(γ) υπάρχει μια χρονική καθυστέρηση στην αντίδραση του κινητού πυρήνα, λόγω της δυσκολίας κινήσεως του εμβόλου

μέσα στο υγρό. Ο τύπος αυτός του ηλεκτρονόμου, ονομάζεται **ηλεκτρονόμος αποσβέσεως** (dashpot relay) λόγω της αποσβέσεως της κινητικής ενέργειας του εμβόλου. Στο σχήμα 2.1κε(β) παρουσιάζονται τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται για τους ηλεκτρονόμους αυτούς σε σχέδια κυκλωμάτων. Για κάθε ηλεκτρονόμο χρησιμοποιούμε τουλάχιστον δύο σύμβολα:

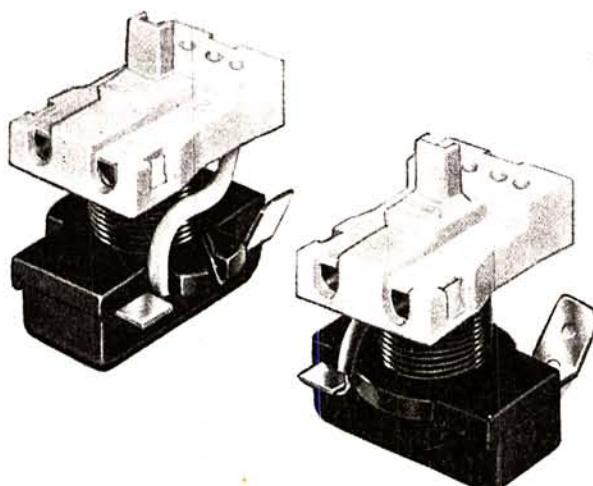
- το σύμβολο με τον κύκλο παριστάνει τη σπείρα του ηλεκτρονόμου με τους δύο ακροδέκτες της και
- το σύμβολο με τις κάθετες παράλληλες γραμμές τις επαφές του ηλεκτρονόμου.

Όταν οι επαφές είναι κλειστές και ο ηλεκτρονόμος δεν έχει ενεργοποιηθεί, τότε λέμε ότι οι επαφές του ηλεκτρονόμου είναι **κανονικά κλειστές** και το γεγονός αυτό το συμβολίζομε με την πρόσθετη πλάγια γραμμή στο σύμβολο των επαφών. Αντίστροφα, όταν οι επαφές είναι ανοικτές και ο ηλεκτρονόμος δεν έχει ενεργοποιηθεί, τότε λέμε ότι οι επαφές του ηλεκτρονόμου είναι **κανονικά ανοικτές**. Το σύμβολο των επαφών στο κύκλωμα δεν έχει την πρόσθετη πλάγια γραμμή.

Σε πολλές περιπτώσεις ένας ηλεκτρονόμος ελέγχει περισσότερους από ένα διακόπτες. Στο σχήμα 2.1κστ φαίνεται η διάταξη ενός κινητού πυρήνα, ο οποίος ελέγχει με την κίνησή του ταυτόχρονα δύο διακόπτες. Οι επαφές ββ είναι **κανονικά κλειστές** και στο κύκλωμα συμβολίζονται με  ενώ οι επαφές αα είναι **κανονικά ανοικτές** και συμβολίζονται με  . Δύο τύποι ηλεκτρονόμων που χρησιμοποιούνται για την εκκίνηση κινητήρων φαίνονται στο σχήμα 2.1κζ.



Σχ. 2.1κστ.
Ηλεκτρονόμος με δύο διακόπτες.



Σχ. 2.1κζ.
Ηλεκτρονόμος εκκινήσεως κινητήρων.

2.2 Ηλεκτρονικά εξαρτήματα.

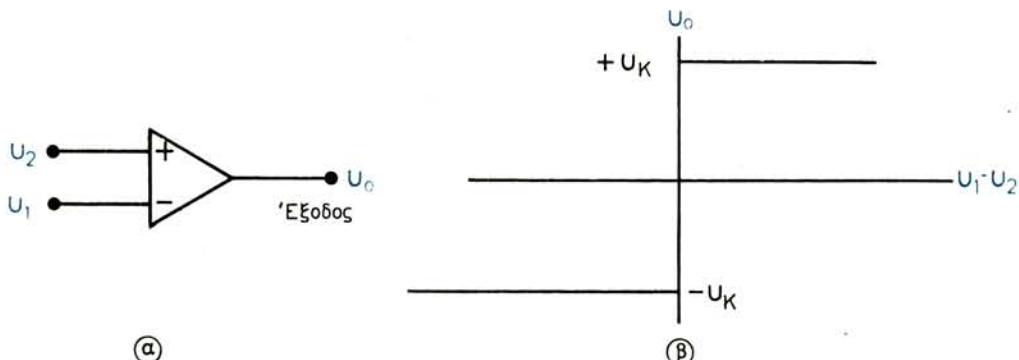
Στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου τα ηλεκτρονικά σήματα αποτελούν το κυ-

ριότερο μέσο μεταφοράς πληροφοριών από έξαρτημα σε έξαρτημα. Γενικά, τα σήματα αυτά είναι ανάγκη να υποστούν επεξεργασία με τη βοήθεια διαφόρων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Μερικά από τα κυκλώματα αυτά που συναντώνται συχνά στα συστήματα ελέγχου, είναι οι διαφόρων τύπων σερβοενισχυτές, οι διαφορικοί προενισχυτές, οι διαμορφωτές και αποδιαμορφωτές, τα διάφορα διορθωτικά κυκλώματα κ.ά.

Ένα ηλεκτρονικό στοιχείο, που έχει χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια σχεδόν σε κάθε κύκλωμα επεξεργασίας ηλεκτρονικών σημάτων, είναι ο **τελεστικός ενισχυτής** (operational amplifier ή op amp). Αρχικά κατασκευασμένος με λυχνίες, αργότερα με τρανζίστορς και σήμερα με **ολοκληρωμένα κυκλώματα** (IC), ο τελεστικός ενισχυτής είναι πολύ διαδεδομένος, γιατί είναι πάρα πολύ απλός στη χρήση του.

2.2.1 Χαρακτηριστικά τελεστικού ενισχυτή (T.E.).

Ο τελεστικός ενισχυτής περιγράφεται εδώ απλά ως σύστημα που επεξεργάζεται σήματα εισόδου και μας δίνει σήματα εξόδου. Στό σχήμα 2.2α δίνεται το σύμβολο του τελεστικού ενισχυτή και τα ιδανικά χαρακτηριστικά του.



Σχ. 2.2α.

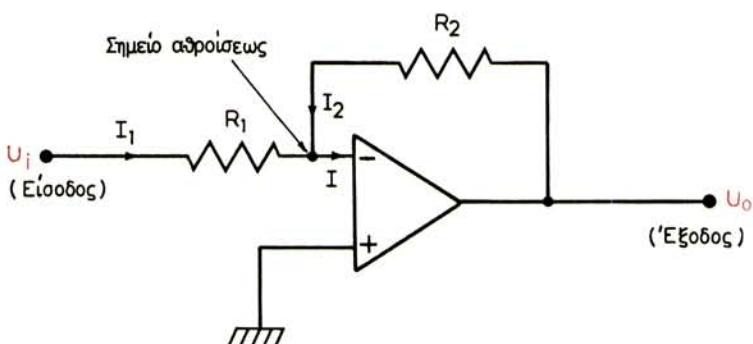
Σύμβολο και ιδανικά χαρακτηριστικά τελεστικού ενισχυτή.

α) Σύμβολο T.E. β) Σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου.

Η είσοδος με $(-)$ λέγεται **είσοδος αναστροφής** (inverting input) και η είσοδος με το $(+)$ **είσοδος χωρίς αναστροφή** (noninverting input). Για να περιγράψουμε τη λειτουργία ενός ιδανικού T.E., συμβολίζομε τις τάσεις εισόδου με U_1 και U_2 και την τάση εξόδου με U_o . Στην ιδανική περίπτωση, όταν η διαφορά τάσεων $U_1 - U_2$ είναι θετική ($U_1 > U_2$), η έξοδος U_o παίρνει τη θετική τιμή κόρου U_k . Όταν $U_1 - U_2$ είναι αρνητική ($U_1 < U_2$), η έξοδος παίρνει την αρνητική τιμή κόρου $-U_k$, δημοσιεύοντας στο σχήμα 2.2α(β). Ο ιδανικός ενισχυτής έχει άπειρη **απολαβή τάσεως** (gain), επειδή μια πολύ μικρή διαφορά μεταξύ U_1 και U_2 έχει σαν αποτέλεσμα να παίρνει η έξοδος τιμή κόρου. Άλλα χαρακτηριστικά ενός ιδανικού T.E. είναι ότι:

- η σύνθετη αντίσταση μεταξύ των δύο εισόδων τείνει στο άπειρο, και
- η σύνθετη αντίσταση της εξόδου τείνει στο μηδέν.

Ο ιδανικός δηλαδή T.E. έχει δύο δυνατές τιμές εξόδου $+U_k$ και $-U_k$. Στην πράξη ο T.E. χρησιμοποιείται με ανατροφοδότηση της εξόδου στην είσοδο, δημοσιεύοντας



Σχ. 2.2β.
Αναστροφικός Τ.Ε.

π.χ. φαίνεται στο σχήμα 2.2β. Η διάταξη αυτή περιγράφει ένα αναστροφικό Τ.Ε. Η αντίσταση R_2 χρησιμοποιείται για την ανατροφοδότηση της εξόδου στην αναστροφική είσοδο, και η αντίσταση R_1 συνδέει την είσοδο U_i στο ίδιο σημείο του Τ.Ε. Το κοινό σημείο συνδέσεως ονομάζεται **σημείο αθροίσεως** (summing point). Παρατηρούμε ότι, χωρίς ανατροφοδότηση και με το (+) γειωμένο όταν $U_i > 0$, η έξοδος παίρνει την αρνητική τιμή κόρου, ενώ όταν $U_i < 0$, παίρνει τη θετική τιμή κόρου. Με ανατροφοδότηση όμως, η έξοδος ρυθμίζεται ώστε:

α. Η τάση στο σημείο αθροίσεως παίρνει την τιμή της τάσεως στο (+) σημείο, που είναι μηδέν σ' αυτή την περίπτωση.

β. Δεν κυκλοφορεί ρεύμα στους ακροδέκτες της εισόδου, επειδή, στην ιδανική περίπτωση, η σύνθετη αντίσταση της εισόδου τείνει στο άπειρο. Δηλαδή $I = 0$.

Έτσι, το αλγεβρικό άθροισμα των εντάσεων στο σημείο αθροίσεως είναι μηδέν:

$$I_1 + I_2 = I = 0 \quad (2.18)$$

Χρησιμοποιώντας το νόμο του Ωμ, ξαναγράφομε τη σχέση (2.18) ως

$$\frac{U_i}{R_1} + \frac{U_o}{R_2} = 0 \quad (2.19)$$

Λύοντας ως προς U_o , βρίσκομε

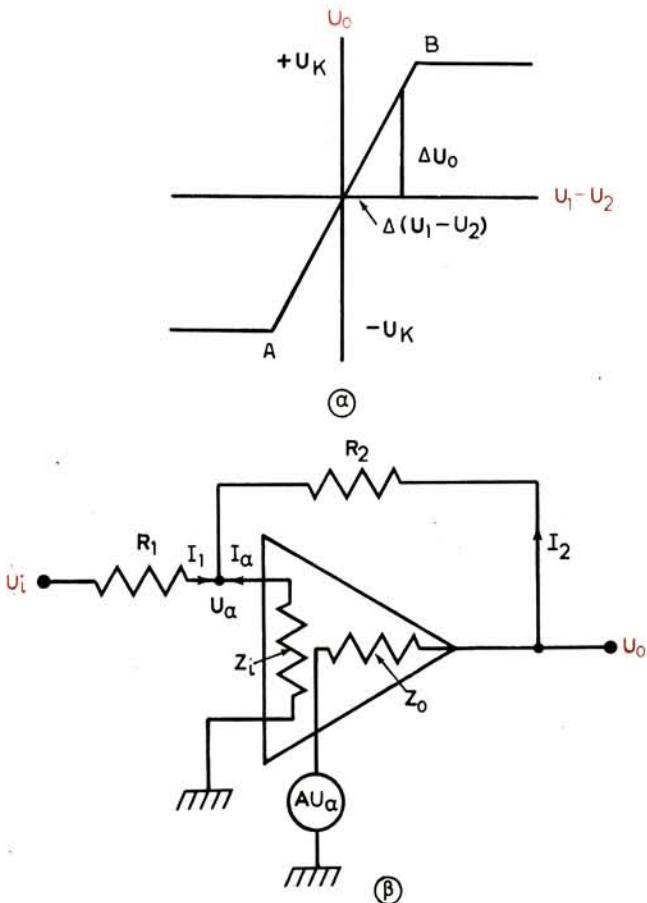
$$U_o = -\frac{R_2}{R_1} U_i \quad (2.20)$$

Παρατηρούμε ότι το κύκλωμα του σχήματος 2.2β αποτελεί ένα ιδανικό ενισχυτή αναστροφής με απολαβή R_2/R_1 . Όταν $R_2 < R_1$, το κύκλωμα αυτό επιφέρει **εξασθένηση** (attenuation).

Η μη ιδανική περίπτωση των πρακτικών Τ.Ε. εμφανίζεται με τα χαρακτηριστικά του σχήματος 2.2γ.

Στην περίπτωση αυτή, για την ανάλυση του κυκλώματος ενός μη ιδανικού τελεστικού ενισχυτή, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράμετροι:

1. Ένας πραγματικός Τ.Ε. δεν έχει άπειρα μεγάλη απολαβή τάσεως. Η **απολαβή τάσεως ανοικτού κυκλώματος** (voltage open loop gain) ορίζεται ως η κλίση της



Σχ. 2.2γ.

Μη ιδανικός Τ.Ε.

α) Μη ιδανικά χαρακτηριστικά Τ.Ε. β) Μη ιδανικό κύκλωμα Τ.Ε.

κεκλιμένης γραμμής AB που φαίνεται στο σχήμα 2.2γ(α). Ισούται δηλαδή με $\Delta U_0 / \Delta (U_1 - U_2)$, όπου ΔU παριστάνει μια μικρή μεταβολή της τάσεως.

2. Ένας πραγματικός Τ.Ε. δεν έχει άπειρα μεγάλη σύνθετη αντίσταση εισόδου. Επομένως υπάρχει μια μικρή ταση U_a μεταξύ των δύο εισόδων και ένα μικρό ρεύμα I_a που εισέρχεται στο σημείο αθροίσεως, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2γ(β).
3. Ένας πραγματικός Τ.Ε. έχει πολύ μικρή σύνθετη αντίσταση εξόδου, αλλά όχι ίση με το μηδέν. Αν ληφθούν υπ' όψη οι παραπάνω πρακτικές συνθήκες, η ανάλυση του κυκλώματος του Τ.Ε. έχει ως εξής:

$$I_1 + I_2 + I_a = 0 \quad (2.21)$$

Χρησιμοποιώντας το Νόμο του Ωμ, η σχέση (2.21) γράφεται

$$\frac{U_1 - U_a}{R_1} + \frac{U_0 - U_a}{R_2} - \frac{U_a}{Z_l} = 0 \quad (2.22)$$

όπου U_a η μικρή τάση μεταξύ των δύο εισόδων του Τ.Ε. και Z_i η σχετικά μεγάλη σύνθετη αντίσταση, μεταξύ των δύο εισόδων.

Στο κύκλωμα εξόδου, που περιέχει την εξαρτημένη πηγή τάσεως AU_a , τη σύνθετη αντίσταση εξόδου Z_0 και την τάση εξόδου U_0 [σχήμα 2.2γ(β)], αθροίζοντας αλγεβρικά τις τάσεις του κυκλώματος, βρίσκομε τη σχέση

$$U_0 = AU_a - \left(\frac{U_0 - U_a}{R_2} \right) Z_0 \quad (2.23)$$

όπου A η απολαβή τάσεως του ανοικτού κυκλώματος.

Λύοντας την εξίσωση (2.22) ως προς U_a και αντικαθιστώντας την U_a στην εξίσωση (2.23), έχομε

$$U_0 = - \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 - \mu} U_i \quad (2.24)$$

όπου

$$\mu = \frac{\left(1 + \frac{Z_0}{R_2} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{Z_i} \right)}{\left(A + \frac{Z_0}{R_2} \right)} \quad (2.25)$$

Παρατηρούμε ότι, στον ιδανικό Τ.Ε. έχομε $A = \infty$, $Z_0 = 0$ και $Z_i = \infty$ που συνεπάγεται $\mu = 0$, και η σχέση (2.24) συμπίπτει με τη σχέση (2.20) που βρήκαμε προηγουμένως.

Στην σχέση (2.25), ορισμένες τυπικές τιμές για ένα μη ιδανικό Τ.Ε. είναι π.χ. $R_2/R_1 = 100$, $A = 200.000$, $Z_0 = 75 \Omega$, $Z_i = 2 M\Omega$, και $R_2 = 100 K\Omega$. Η αντίστοιχη τιμή του μ είναι περίπου 0,0005, πράγμα που δείχνει ότι η ενίσχυση που παρέχει αυτός ο μη ιδανικός Τ.Ε. διαφέρει από την ενίσχυση του αντίστοιχου ιδανικού Τ.Ε. μόνο κατά 0,05%.

2.2.2 Μη αναστροφικός ενισχυτής.

Το κύκλωμα του μη αναστροφικού ενισχυτή περιγράφεται στο σχήμα 2.26. Έχομε από τους νόμους του Κίρχοφ και του Ωμ ότι

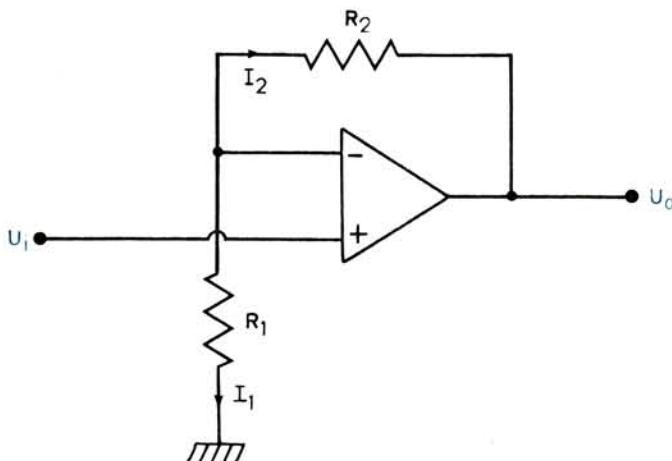
$$I_1 + I_2 = 0 \quad (2.26)$$

και

$$\frac{U_i}{R_1} + \frac{U_i - U_0}{R_2} = 0$$

$$\text{ή} \quad U_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) U_i \quad (2.27)$$

Παρατηρούμε ότι η ενίσχυση σε ένα μη αναστροφικό ενισχυτή εξαρτάται από το λόγο R_2/R_1 , και ότι η ενίσχυση αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξασθενηση τάσεως, λόγω της υπάρξεως της μονάδας στην εξίσωση (2.27). Επειδή δε η



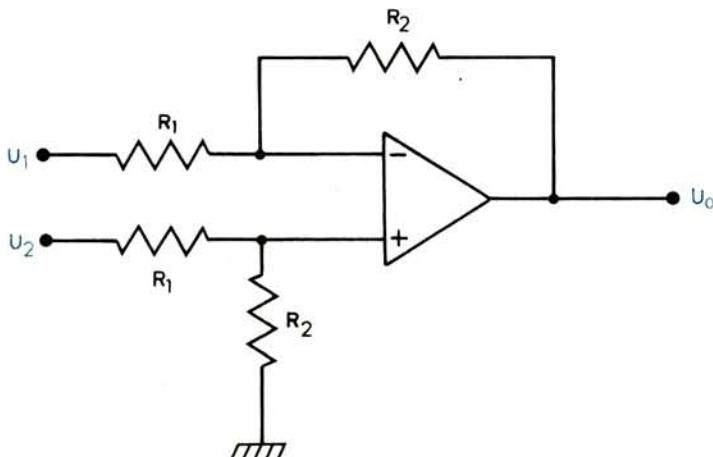
Σχ. 2.2δ.
Μη αναστροφικός Τ.Ε.

είσοδος συνδέεται κατ' ευθείαν με τη μη αναστρεφόμενη είσοδο του Τ.Ε., η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος είναι πολύ υψηλή, γιατί ισούται με την σύνθετη αντίσταση εισόδου του Τ.Ε.

2.2.3 Διαφορικός Ενισχυτής.

Στα συστήματα ελέγχου εμφανίζεται συχνά η ανάγκη ενισχύσεως της διαφοράς δύο τάσεων. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τους διαφορικούς ενισχυτές, το βασικό κύκλωμα των οποίων φαίνεται στο σχήμα 2.2ε. Η ανάλυση του κυκλώματος οδηγεί εύκολα στη σχέση

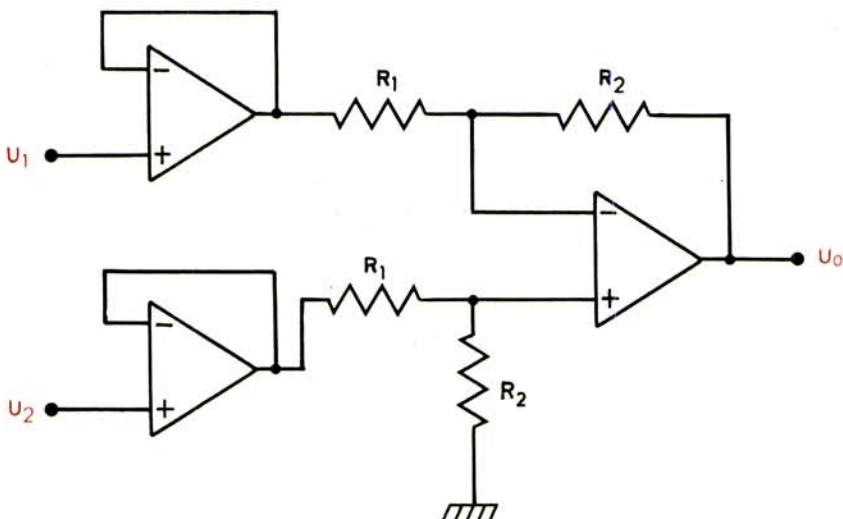
$$U_0 = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1) \quad (2.28)$$



Σχ. 2.2ε.
Διαφορικός ενισχυτής.

Το σύστημα έχει μεταβλητή απολαβή που ισούται με το λόγο R_2/R_1 , και αποκρίνεται στη διαφορά των τάσεων που εφαρμόζονται στις δύο εισόδους. Σημαντικό μειονέκτημα της διατάξεως είναι η χαμηλή σύνθετη αντίσταση σε κάθε είσοδο, που είναι $R_1 + R_2$ στην είσοδο 2 και R_1 στην είσοδο 1. Όταν απαιτείται διαφορική ενίσχυση με υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου, προσθέτομε στις δύο εισόδους τις διατάξεις που φαίνονται στο σχήμα 2.2στ. Οι διατάξεις αυτές έχουν απολαβή ίση με 1 και πολύ υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου (μεγαλύτερη από $100 \text{ M}\Omega$). Η σύνθετη αντίσταση στην έξοδο τους είναι συνήθως μικρότερη από 100Ω .

Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται **ακόλουθοι τάσεως** (voltage followers), επειδή η έξοδος ακολουθεί την είσοδο σε περιοχή τιμών που ορίζεται από τις δύο τιμές τάσεων κόρου του Τ.Ε.



Σχ. 2.2στ.
Διαφορικός ενισχυτής με υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου.

2.2.4 Κύκλωμα μετατροπής τάσεως σε ρεύμα.

Στα συστήματα ελέγχου τα πλεκτρικά σήματα μεταδίδονται συχνά υπό μορφή ρεύματος που έχει τιμές μεταξύ 4-20 mA. Για τη μετατροπή τάσεων σε ρεύμα χρησιμοποιείται ένα γραμμικό κύκλωμα όπως αυτό του σχήματος 2.2ζ. Ένα τέτοιο κύκλωμα μπορεί να διοχετεύει ρεύμα σε ένα αριθμό διαφορετικών φορτίων χωρίς να αλλάζει τα χαρακτηριστικά της δημιουργούμενης πηγής ρεύματος.

Αναλύοντας το κύκλωμα αυτό, βρίσκομε ότι η σχέση του ρεύματος της εξόδου I με την τάση εισόδου U_1 είναι

$$I = \frac{R_2}{R_1 R_3} U_1 \quad (2.29)$$

με την προϋπόθεση ότι η επιλογή των αντιστάσεων είναι τέτοια, ώστε να ικανοποιείται η σχέση

$$R_1(R_3 + R_5) = R_2 R_4 \quad (2.30)$$

Η μέγιστη αντίσταση του φορτίου $R_{M\phi}$, και το μέγιστο ρεύμα I_M που διοχετεύεται στο φορτίο σχετίζονται με την τάση κόρου της εξόδου του ενισχυτή. Όταν η τάση εξόδου του ενισχυτή φθάσει την τιμή κόρου, με ανάλυση του κυκλώματος μπορεί να βρεθεί η σχέση της μέγιστης αντίστασεως φορτίου και της μέγιστης τιμής του ρεύματος στο φορτίο, που είναι

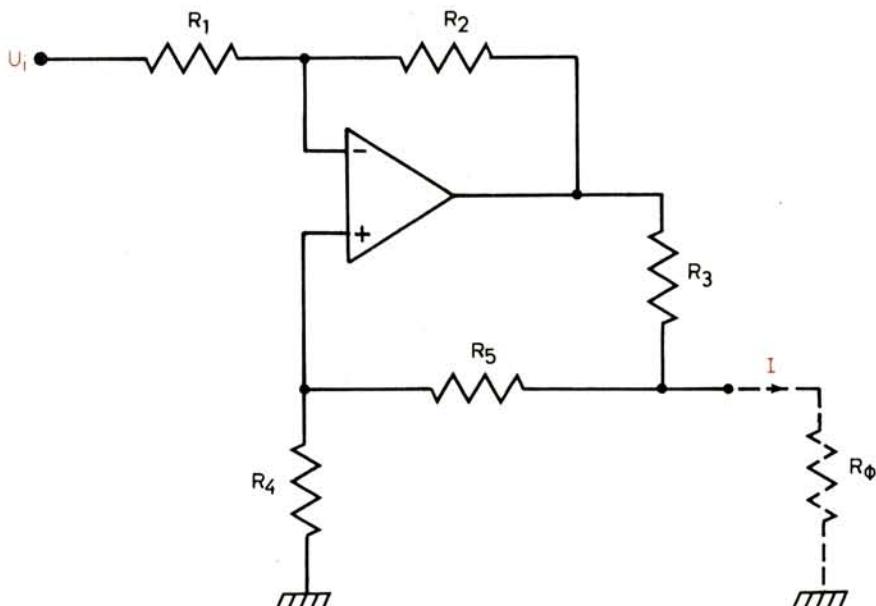
$$R_{M\phi} = \frac{(R_4 + R_5) \left[\frac{U_k}{I_M} - R_3 \right]}{R_3 + R_4 + R_5} \quad (2.31)$$

όπου: $R_{M\phi}$ = μέγιστη αντίσταση φορτίου

U_k = τάση κορεσμού της εξόδου του Τ.Ε.

I_M = μέγιστη τιμή ρεύματος στο φορτίο.

Από τη σχέση (2.31) είναι φανερό ότι η μέγιστη αντίσταση του φορτίου είναι πάντα μικρότερη του πηλίκου U_k/I_M . Η ελάχιστη αντίσταση φορτίου είναι μηδέν.

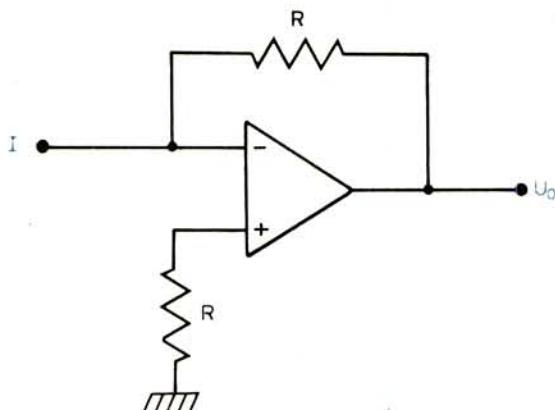


Σχ. 2.25.
Μετατροπέας τάσεως σε ρεύμα.

2.2.5 Κύκλωμα μετρατροπής ρεύματος σε τάση.

Για τη μετατροπή σημάτων ρεύματος σε σήματα τάσεως, χρησιμοποιούμε τη διάταξη του σχήματος 2.2η. Η ανάλυση του κυκλώματος μας δίνει τη σχέση.

$$U_o = RI \quad (2.32)$$



Σχ. 2.2η.

Μετατροπέας ρεύματος σε τάση.

2.2.6 Κύκλωμα ολοκληρώσεως.

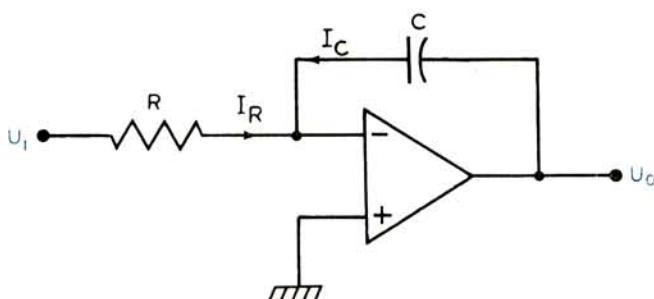
Μία πολύ διαδεδομένη διάταξη Τ.Ε. που χρησιμοποιείται πολύ σε συστήματα ελέγχου και που αποτελεί τη βασική συνιστώσα των **αναλογικών υπολογιστών** (analog computers), είναι το κύκλωμα ολοκληρώσεως. Η διάταξη αυτή είναι ιδιαίτερα απλή και εικονίζεται στο σχήμα 2.2θ. Όπως βλέπομε, η ανατροφοδότηση του σήματος εξόδου του Τ.Ε. γίνεται μέσω ενός πυκνωτή. Ακολουθώντας την προηγούμενη διαδικασία αναλύσεως, ξεκινάμε από το γεγονός ότι στο σημείο αθροίσεως του Τ.Ε. το αλγεβρικό άθροισμα των εντάσεων είναι ίσο με το μηδέν:

$$I_R + I_C = 0 \quad (2.33)$$

Αντικατάσταση των εκφράσεων των εντάσεων στη σχέση (2.33), οδηγεί στη

$$\frac{U_i}{R} + C \frac{dU_0}{dt} = 0 \quad (2.34)$$

όπου η παράγωγος dU_0/dt είναι η ταχύτητα μεταβολής της τάσεως U_0 . Λύοντας ως



Σχ. 2.2θ.

Κύκλωμα ολοκληρώσεως.

προς U_0 βρίσκομε

$$U_0 = -\frac{1}{RC} \int U_i dt \quad (2.35)$$

Δηλαδή, η έξοδος U_0 του κυκλώματος είναι ίση με μία σταθερά ($-1/RC$) επί το ολοκλήρωμα ως προς το χρόνο της τάσεως εισόδου. Η σταθερά ($-1/RC$) αποτελεί την απολαβή ολοκληρώσεως.

Το κύκλωμα της ολοκληρώσεως χρησιμοποιείται σε συστήματα ελέγχου όπου είναι απαραίτητη η ολοκλήρωση σημάτων, όπως π.χ. της εξόδου ενός μεταλλάκτη.

2.2.7 Άλλα ειδικά κυκλώματα.

Στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου χρησιμοποιούνται πολλά ειδικά ηλεκτρονικά κυκλώματα για την επεξεργασία των ηλεκτρονικών σημάτων. Τα κυκλώματα αυτά είναι είτε αναλογικά, είτε ψηφιακά. Τα συστήματα που περιέχουν και τις δύο, αυτές κατηγορίες κυκλωμάτων, χρησιμοποιούν τους αντίστοιχους μετατροπείς σημάτων από αναλογικά σε ψηφιακά (analog to digital converters) και από ψηφιακά σε αναλογικά (digital to analog converters).

2.3 Πνευματικά εξαρτήματα ελέγχου.

Είναι γεγονός, ότι τα αναλογικά και ψηφιακά ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου αντικαθιστούν τα πνευματικά. Εντούτοις, εξακολουθούν δύναμα να χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία σε μεγάλη κλίμακα, τα πνευματικά συστήματα. Επομένως, ο ειδικός των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου πρέπει να έχει ορισμένες βασικές γνώσεις πάνω στη δομή και λειτουργία τους.

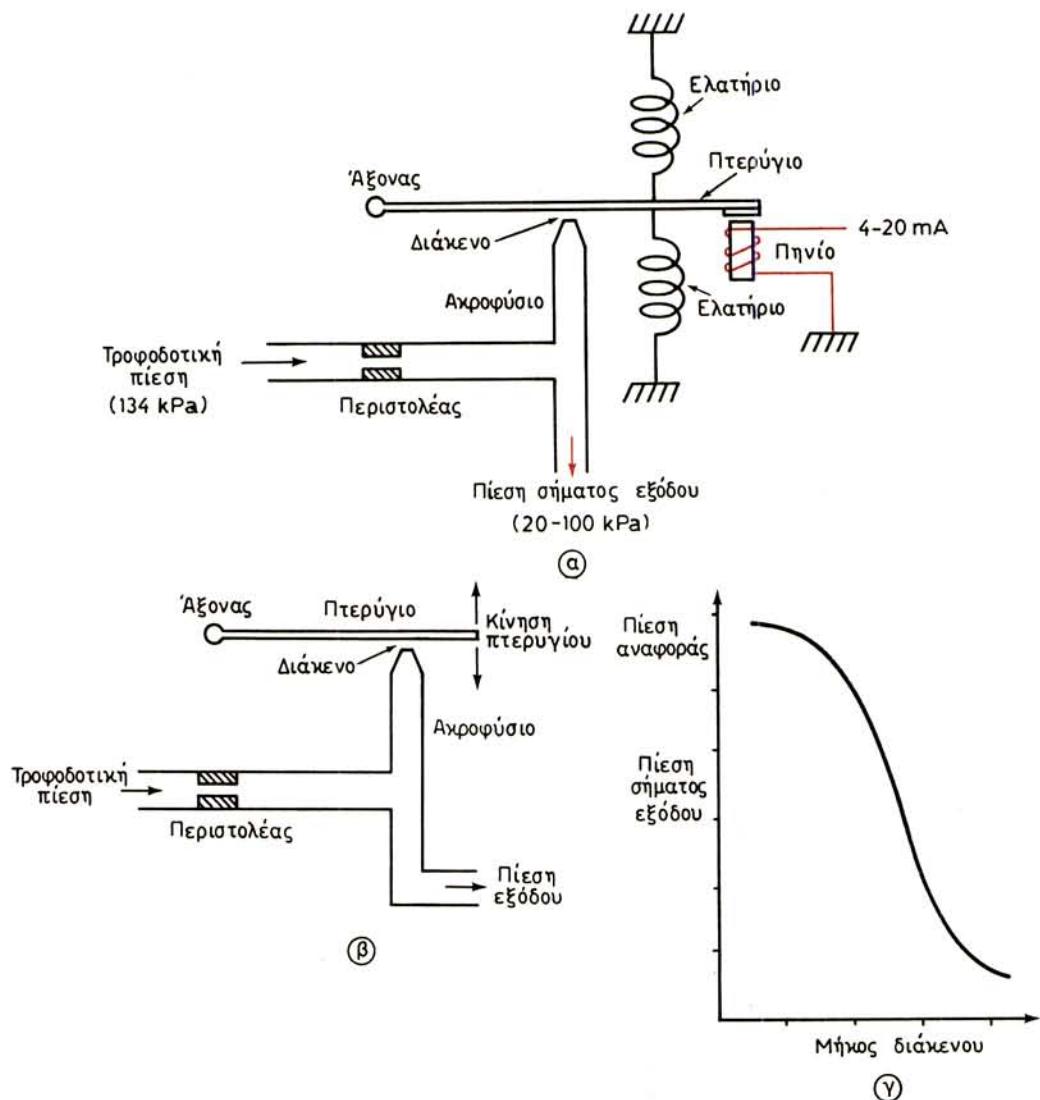
2.3.1 Μετατροπέας ρεύματος σε πίεση.

Σε πολλά συστήματα ελέγχου είναι συχνά απαραίτητο να μετατραπεί μια ένταση ρεύματος γύρω στα 4 - 20 mA, σε πίεση 20 - 100 kPa (3 - 15 psi). Αυτό επιτυγχάνεται με ένα μηχανισμό που λέγεται **μετατροπέας ρεύματος σε πίεση** (I to P converter).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3a(a), το σύστημα αποτελείται από ένα σωληνοειδές πηνίο, το οποίο ελέγχεται από ένα ηλεκτρικό σήμα εντάσεως 4 - 20 mA, ένα πτερύγιο το οποίο μετακινείται από το πηνίο και αυξομειώνει το διάκενο μεταξύ ακροφυσίου - πτερυγίου και από μια πνευματική διάταξη. Η κατανόηση της λειτουργίας του εξαρτήματος διευκολύνεται από το σχηματικό διάγραμμα του σχήματος 2.3a(β). Μια πηγή αέρα σταθερής πίεσεως (περίπου 100 kPa) τροφοδοτεί συμπιεσμένο αέρα δια μέσου του περιστολέα στο ακροφύσιο.

Το μήκος του διακένου ανάμεσα στο ακροφύσιο και το πτερύγιο ρυθμίζει το μέγεθος της εκροής, επομένως δε και την πίεση του αέρα που διοχετεύεται στο κάτω μέρος του σωλήνα, όπου είναι η έξοδος. Όταν το πτερύγιο κλείνει πλήρως το ακροφύσιο, η πίεση εξόδου είναι ίση με την πίεση της τροφοδοτικής πηγής. Η επισκόπηση στο σχήμα 2.3a(γ) δείχνει ότι, η πίεση εξόδου είναι αντίστροφα ανάλογη προς το μήκος του διακένου μεταξύ ακροφυσίου - πτερυγίου.

Η κίνηση του πτερυγίου ελέγχεται από το σωληνοειδές πηνίο, δηλαδή από την



Σχ. 2.3a.
Μετατροπέας ρεύματος σε πίεση.

ένταση του ρεύματος. Κατά συνέπεια, η ένταση του ρεύματος ελέγχει την πίεση εξόδου του αέρα.

2.3.2 Πνευματικός επενεργητής.

Ο **πνευματικός επενεργητής** (pneumatic actuator) μετατρέπει ένα ενεργοποιό σήμα πιέσεως σε δύναμη ή ροπή στρέψεως, που απαιτείται για την ενεργοποίηση ενός στοιχείου ελέγχου. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο ότι η πίεση ισούται αριθμητικά με τη δύναμη που ασκείται σε μοναδιαία επιφάνεια. Όταν μια διαφορά πιέσεως εφαρμόζεται πάνω σε ένα διάφραγμα εμβαδού A , η συνολική δύναμη στο

διάφραγμα είναι

$$F = (p_1 - p_2) A \quad (2.36)$$

όπου $p_1 - p_2$ = η διαφορά πιέσεως (Pa)

A = το εμβαδόν του διαφράγματος (m^2)

F = δύναμη (N).

Είναι λοιπόν φανερό ότι, για να διπλασιάσουμε τη δύναμη, με δεδομένη πίεση, αρκεί να διπλασιάσουμε το εμβαδόν του διαφράγματος. Έτσι μπορούν να δημιουργηθούν πολύ μεγάλες δυνάμεις με σχετικά μικρά σήματα πιέσεως γύρω στα 20 - 100 kPa.

Οι συνηθέστεροι πνευματικοί επενεργητές είναι αυτοί που σχετίζονται με **βαλβίδες ελέγχου** (control valves). Στο σχήμα 2.3β βλέπουμε ένα πνευματικό επενεργητή ορθής φοράς (direct). Στο μέρος (α) η βαλβίδα βρίσκεται σε θέση χαμηλής πιέσεως και η ατμοσφαιρική πίεση δια μέσου του ανοίγματος κρατάει το έμβολο ψηλά. Όταν η πίεση ελέγχου αυξηθεί, ασκείται στο διάφραγμα δύναμη από πάνω προς τα κάτω, η οποία πιέζει το ελατήριο και κινεί το έμβολο προς τα κάτω. Αυτή είναι η θέση υψηλής πιέσεως, και φαίνεται στο μέρος (β). Η κίνηση του εμβόλου ανοίγει ή κλείνει τη βαλβίδα, ανάλογα με το σύστημα ελέγχου. Η μαθηματική σχέση μεταξύ της μετατοπίσεως του εμβόλου και της πιέσεως που εφαρμόζεται στην είσοδο του συστήματος είναι:

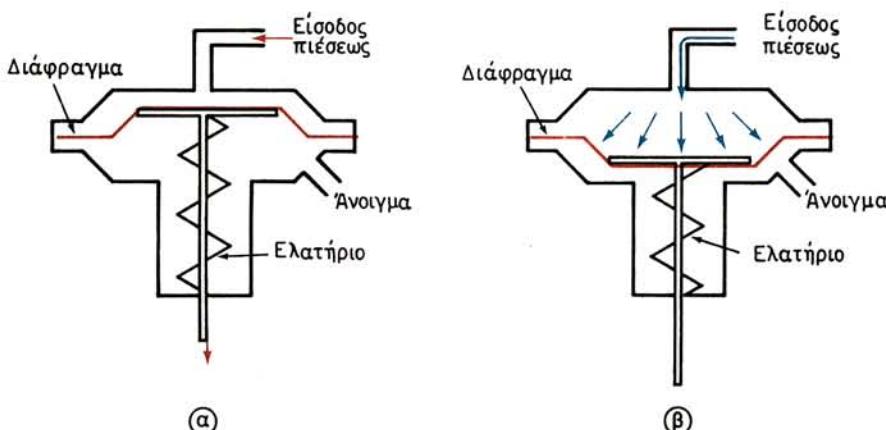
$$\Delta x = \frac{A}{K} \Delta p \quad (2.37)$$

όπου Δx = η μετατόπιση του εμβόλου (m)

Δp = η εφαρμοζόμενη πίεση (Pa)

A = το εμβαδόν του διαφράγματος (m^2).

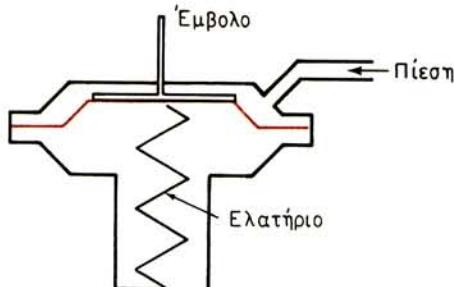
Σημειώνεται ότι υπάρχουν πνευματικοί επενεργητές αντίστροφης φοράς (reverse actuators), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3γ. Στα σχήματα 2.3δ και 2.3ε φαίνονται δύο τύποι πνευματικών επενεργητών.



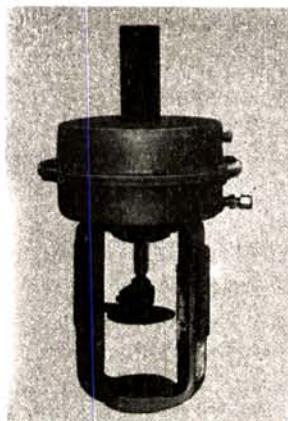
Σχ. 2.3β.

Πνευματικός επενεργητής.

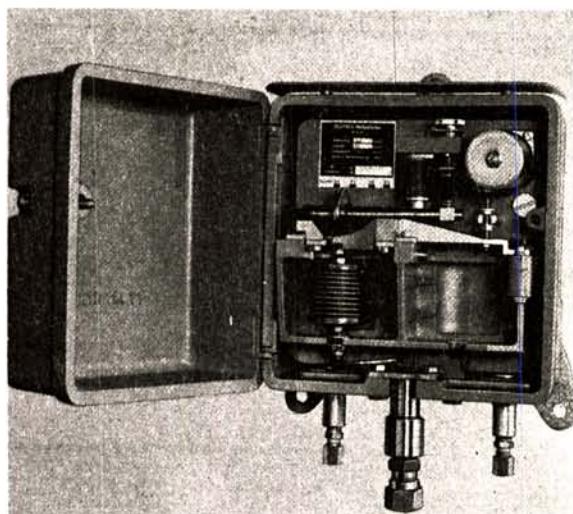
α) Θέση χαμηλής πιέσεως. β) Θέση υψηλής πιέσεως.



Σχ. 2.3γ.
Πνευματικός επενεργητής αντίστροφης φοράς.



Σχ. 2.3δ.
Πνευματικός επενεργητής.



Σχ. 2.3ε.
Πνευματικός επενεργητής με φυσούνες.

2.4 Μηχανικά εξαρτήματα ελέγχου.

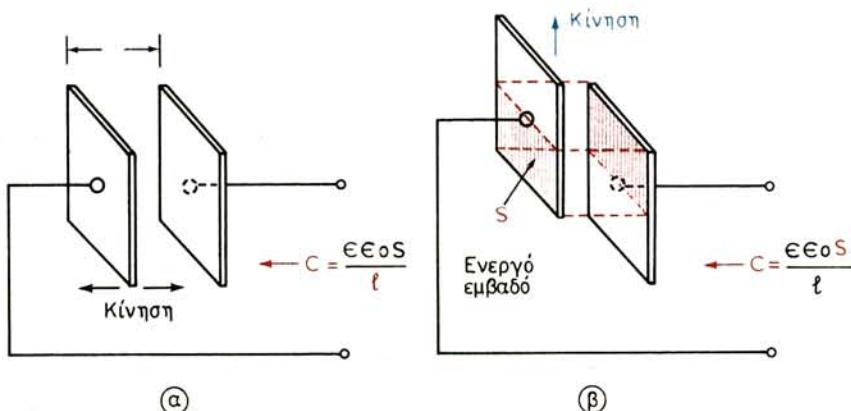
Τα μηχανικά εξαρτήματα ελέγχου περιλαμβάνουν μετρητές, μεταλλάκτες και επενεργητές. Στις περισσότερες εφαρμογές συναντώνται οι μεταλλάκτες μετατοπίσεως, οι μετρητές καταπονήσεως και επιταχύνσεως, οι μεταλλάκτες πιέσεως και ροής, οι υδραυλικοί σερβοκινητήρες και οι οδοντωτοί τροχοί.

2.4.1 Μεταλλάκτες μετατοπίσεως.

Ο πιο απλός μεταλλάκτης μετατοπίσεως είναι το ποτενσιόμετρο. Η μετατόπιση του δρομέα του ποτενσιομέτρου, ρυθμίζει την αντίσταση εξόδου και επομένως

την τάση εξόδου, έτσι δε μετατρέπει την ευθύγραμμη ή περιστροφική κίνηση σε ηλεκτρικό σήμα τάσεως.

Άλλοι τύποι μεταλλακτών μετατοπίσεως βασίζονται σε διατάξεις μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής χωρητικότητας ή μεταβαλλόμενης αυτεπαγωγής. Στην πρώτη περίπτωση, εφαρμόζεται η αρχή ότι η χωρητικότητα μιας διατάξεως, δημιουργούμενης από δύο επιφανειών του πυκνωτή και ανάλογη προς την ενεργό επιφάνεια S , δηλαδή $C = \epsilon\epsilon_0 S/l$. Όταν π.χ. με μετατόπιση της μιας επιφάνειας [σχ. 2.4a(a)] οι δύο επιφάνειες του πυκνωτή πλησιάσουν, η ηλεκτρική χωρητικότητα, μεγαλώνει. Αντίστροφα, η απομάκρυνση των δύο επιφανειών μειώνει τη χωρητικότητα του πυκνωτή. Μια παραλλαγή του συστήματος αυτού, χρησιμοποιεί την παράλληλη κίνηση των δύο επιφανειών του πυκνωτή, προκειμένου να μεταβάλλει τη χωρητικότητα, και κατ' επέκταση το ηλεκτρικό σήμα που προκύπτει όταν ο πυκνωτής συνδεθεί με ηλεκτρική πηγή [σχ. 2.4a(b)]. Στην περίπτωση αυτή το μεταβλητό μέγεθος είναι η ενεργός επιφάνεια.



Σχ. 2.4a.
Μεταλλάκτες μετατοπίσεως με μεταβαλλόμενη χωρητικότητα.

Άλλη περίπτωση μεταλλάκτη που μετατρέπει ευθύγραμμη ή περιστροφική κίνηση σε ηλεκτρικό σήμα, είναι εκείνη που χρησιμοποιεί τη μεταβαλλόμενη αυτεπαγωγή πηνίου με σιδηροπυρήνα. Στο σχήμα 2.4b φαίνονται δύο διατάξεις, η μια για ευθύγραμμη και η άλλη για περιστροφική κίνηση του σιδηροπυρήνα. Ο μαγνητικός διαπερατός σιδηροπυρήνας, μετακινούμενος μέσα στο πηνίο, μεταβάλλει την αυτεπαγωγή του πηνίου. Στη διάταξη του σχήματος 2.4b(a), όταν ο πυρήνας εισέρχεται στο πηνίο, αυξάνεται σημαντικά ο συντελεστής μαγνητικής διαπερατότητας μετατοπίσεως, με την αποτέλεση μετατροφής ευθύγραμμης κίνησης σε περιστροφική κίνηση.

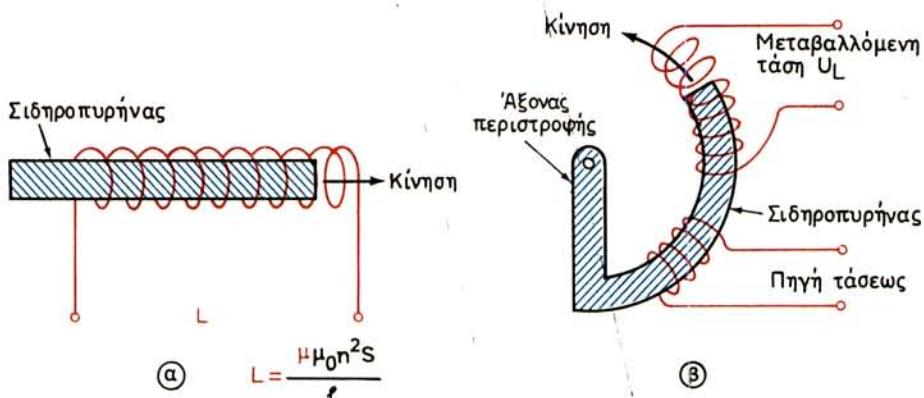
$$L = \frac{\mu\mu_0 n^2 S}{l} \quad (2.37a)$$

όπου μ_0 = μαγνητική σταθερά = $1,256 \times 10^{-6}$ Vs/Am
 n = αριθμός σπειρών του πηνίου

S = διατομή του πηνίου

I = ενεργό μήκος του πηνίου.

Η ίδια αρχή διέπει και τη λειτουργία της διατάξεως του σχήματος 2.4β(β). Η κίνηση του σιδηροπυρήνα είναι περιστροφική και ως έξοδος του συστήματος λαμβάνεται η μεταβαλλόμενη τάση U_L . Στις παραπάνω δύο περιπτώσεις τα άκρα του πηνίου συνδέονται με γέφυρα εναλλασσόμενου ρεύματος ή με άλλο ενεργό ηλεκτρονικό κύκλωμα που αποβλέπει στο σχηματισμό του επιδιωκόμενου ηλεκτρονικού σήματος.



Σχ. 2.4β.

Μεταλλάκτες μετατοπίσεως με μεταβαλλόμενη αυτεπαγωγή.

2.4.2 Μετρητής καταπονήσεων ή επιμηκυνσιόμετρο.

Ο μετρητής καταπονήσεων ή **επιμηκυνσιόμετρο** (strain gauge) είναι ίσως ο σημαντικότερος μηχανικός μεταλλάκτης. Πέρα από τις περιπτώσεις μετρήσεως μηχανικών τάσεων, έχει εφαρμογή και στη μέτρηση πιέσεων, επιταχύνσεων, ροών και πολλών άλλων φυσικών ποσοτήτων. Η αρχή της λειτουργίας του βασίζεται στο γεγονός ότι η ύπαρξη μηχανικής τάσεως μεταβάλλει την ηλεκτρική αντίσταση του μετρητή, ο οποίος είναι κατασκευασμένος είτε από λεπτό μεταλλικό σύρμα, είτε από λεπτό στρώμα ημιαγώγιμου υλικού. Η μορφή ενός επιμηκυνσιομέτρου φαίνεται στο σχήμα 2.4γ. Ο μετρητής αποτελείται από μια σχάρα με λεπτό σύρμα (διαμέτρου περίπου 50 μμ), η οποία είναι κολλημένη με ειδική κόλλα πάνω σε ένα ψιλό χαρτί. Το πίσω μέρος του μετρητή είναι κολλώδες, ώστε να μπορεί να προσκολλάται στην επιφάνεια του μετάλλου, του οποίου η τάση πρόκειται να μετρηθεί.

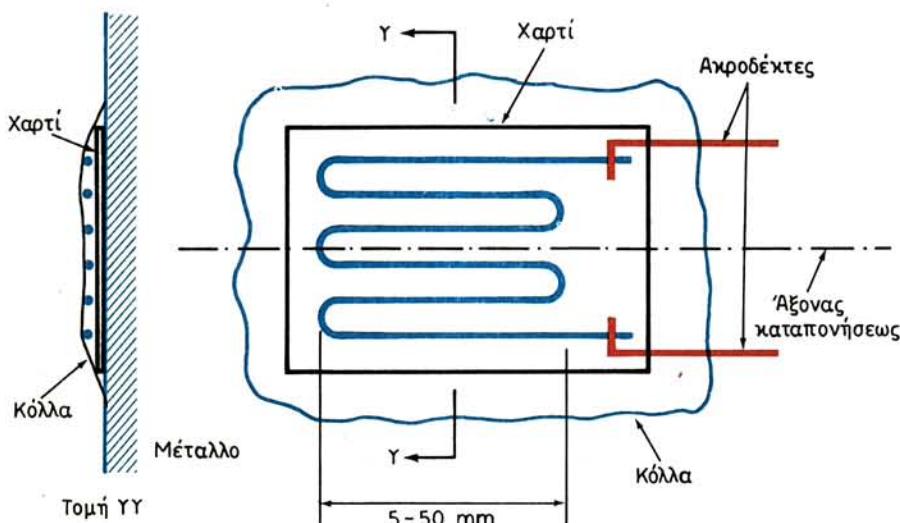
Όταν ένα ψιλό σύρμα εφελκύεται λόγω μηχανικής τάσεως αφ' ενός επιμηκύνεται και αφ' ετέρου η διατομή του συστέλλεται.

Όπως γνωρίζομε, η ηλεκτρική αντίσταση ενός σύρματος (που δεν έχει υποστεί συστολή) ορίζεται από τη σχέση

$$R_0 = \rho \frac{l_0}{A_0} \quad (2.38)$$

όπου R_0 = αντίσταση του αγωγού (Ω)

ρ = ειδική αντίσταση του μετάλλου του αγωγού ($\Omega \cdot \text{m}$)



Σχ. 2.4γ.

Εφαρμογή επιμηκυνσιομέτρου για τη μέτρηση της καταπονήσεως ενδιάμεσης μετάλλου.

$$l_0 = \text{το μήκος του αγωγού (m)}$$

$$A_0 = \text{το εμβαδόν της διατομής του αγωγού (m}^2\text{)}.$$

Όταν το μεταλλικό σύρμα καταπονηθεί από την εφαρμογή κάποιας δυνάμεως το δείγμα επιμηκύνεται κατά ένα μικρό μήκος Δl , δηλαδή το μήκος του δείγματος γίνεται $l = l_0 + \Delta l$. Γεωμετρική ανάλυση του φαινομένου παρέχει τη μεταβολή της αντιστάσεως του δείγματος ΔR .

$$\Delta R \simeq 2R_0 \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.39)$$

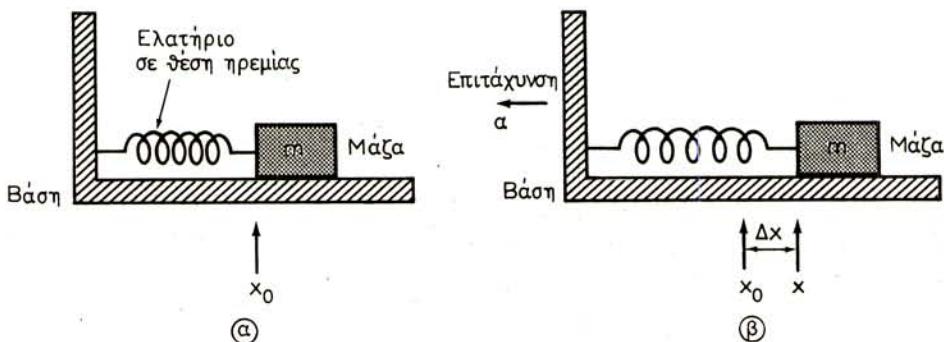
όπου το $\Delta l/l_0$ εκφράζει τη μηχανική τάση που ασκείται πάνω στο δείγμα και έχει μονάδες μπ ανά μέτρο.

Σημειώνεται ότι, επειδή η μεταβολή στην αντίσταση του μετρητή καταπονήσεων είναι σχετικά μικρή, η μέτρηση αυτή γίνεται με ειδικό κύκλωμα γέφυρας, το οποίο εξασφαλίζει μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση, εξουδετερώνοντας τυχόν σφάλματα λόγω μεταβολών θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και λόγω των πολύ μικρών τιμών του ηλεκτρικού σήματος που ενεργοποιεί το μετρητή της αντιστάσεως (βλέπε άσκηση 10, της παραγράφου 2.5).

2.4.3 Μετρητής επιταχύνσεως ή επιταχυνσιόμετρο.

Οι μετρητές επιταχύνσεως (accelerometers) εφαρμόζονται σε συστήματα ελέγχου στη ναυσιπλοΐα, στη δοκιμή προϊόντων, στην αναζήτηση πετρελαιοπηγών κλπ.

Όλοι σχεδόν οι τύποι μετρητών επιταχύνσεως λειτουργούν με βάση την αρχή του νόμου του Νεύτονα σε συνδυασμό με το νόμο του Χούκ. Ο τρόπος λειτουργίας τους γίνεται κατανοητός με τη διάταξη του σχήματος 2.4δ, δημοσιευμένη στην Ελληνική Έπος της Ακαδημίας της Ελληνικής Βιοτεχνολογίας το 1958.



Σχ. 2.46.

Βασική διάταξη μετρητή επιταχύνσεως.

α) Χωρίς επιτάχυνση. β) Με επιτάχυνση.

ρίου. Όταν το σύστημα επιταχυνθεί προς τα αριστερά η μάζα m προς στιγμή μένει ακίνητη λόγω του φαινομένου της αδρανείας. Συγχρόνως, το ελατήριο επιμηκύνεται κατά ένα μήκος Δx . Η δύναμη που ασκείται από το ελατήριο (νόμος του Χουκ) ισούται με $F_x = k\Delta x$. Η δύναμη αδρανείας (νόμος του Νεύτονα) είναι $F_N = ma$.

Όταν οι δύο αυτές δυνάμεις είναι ίσες, έχομε ισορροπία δηλαδή:

$$k\Delta x = ma \quad (2.40)$$

όπου k = η σταθερά του ελατηρίου (N/m)

Δx = η επιμήκυνση του ελατηρίου (m)

m = η μάζα (kg)

a = επιτάχυνση (m/s^2).

Λύοντας την εξίσωση (2.40) ως προς την επιτάχυνση έχομε

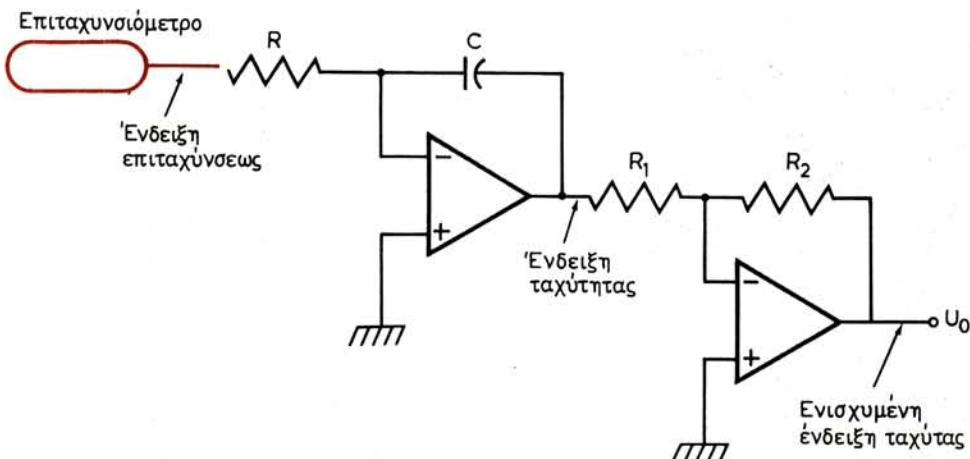
$$a = \frac{k}{m} \Delta x \quad (2.41)$$

Αν η ταχύτητα αλλάξει διεύθυνση, προκύπτει το ίδιο αποτέλεσμα, με τη διαφορά ότι το ελατήριο θα συμπιέζεται αντί να επιμηκύνεται.

Από τη σχέση (2.41) είναι φανερό ότι μετρώντας την επιμήκυνση Δx του ελατηρίου μετρούμε την επιτάχυνση a , (η σταθερά k/m είναι γνωστή), γιατί υπάρχει άμεση αναλογία μεταξύ των δυο ποσοτήτων. Η μάζα της διατάξεως που μετατρέπει την επιτάχυνση της μάζας m σε επιμήκυνση του ελατηρίου λέγεται **μάζα δοκιμής** (test mass) ή **σεισμική μάζα** (seismic mass).

Όταν σε συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούμε μετρητές επιταχύνσεως, δεν χρειαζόμαστε ακριβή μέτρηση της επιταχύνσεως, αλλά μια ένδειξη επιταχύνσεως σε μορφή συνήθως ηλεκτρικού σήματος. Για να μετατρέψωμε τη μετατόπιση της μάζας σε ηλεκτρικό σήμα, μαζί με το μετρητή χρησιμοποιούμε και ένα μεταλλάκτη: 'Ένα είδος είναι η μέθοδος του ποτενσιομέτρου, στην οποία η μάζα κινεί το κινητό μέρος του ποτενσιομέτρου' άλλο είδος είναι η μέθοδος της μεταβαλλόμενης αυτεπαγωγής ενός πηνίου, στην οποία η μάζα είναι ένας σιδηροπυρήνας που κινείται μέσα σ' ένα πηνίο' άλλο είδος είναι η μέθοδος που χρησιμοποιεί την πιεζοηλεκτρική αρχή. Και οι τρεις αυτές μέθοδοι αναλύθηκαν ήδη παραπάνω.

Ο μετρητής επιταχύνσεως μπορεί να μετατραπεί σε μετρητή ταχύτητας, με την



Σχ. 2.4ε.
Μετατροπή επιταχυνσιομέτρου σε μετρητή ταχύτητας.

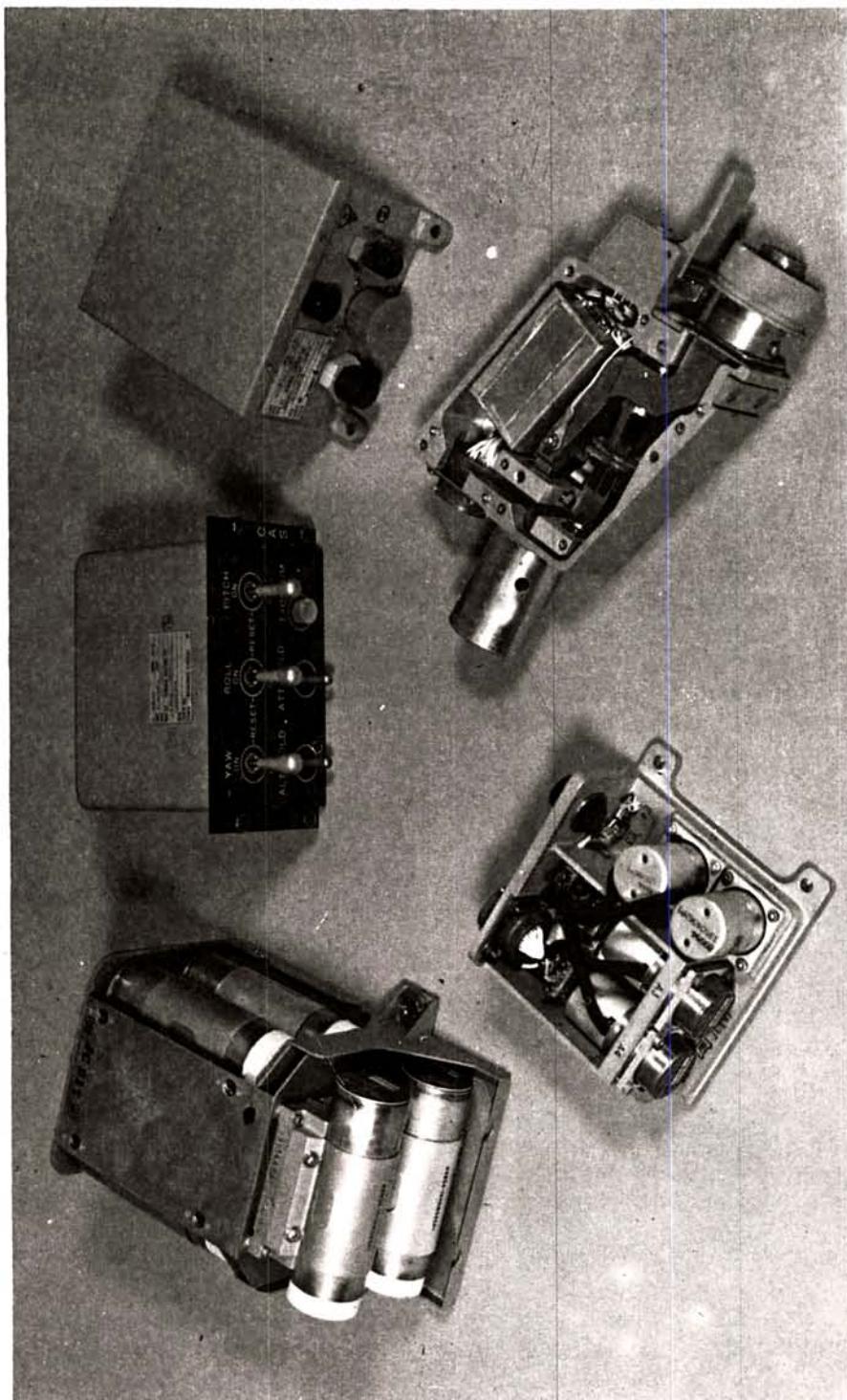
προσθήκη ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος με Τ.Ε. στην έξοδο του. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο σχήμα 2.4ε. Το ηλεκτρικό σήμα της εξόδου του επιταχυνσιομέτρου συνδέεται με την είσοδο ενός κυκλώματος ολοκληρώσεως, η έξοδος του οποίου συνδέεται στη συνέχεια με την είσοδο ενός ενισχυτή, για την τελική ενίσχυση του σήματος. Η χρήση του κυκλώματος ολοκληρώσεως είναι αναγκαία γιατί μεταξύ ταχύτητας και επιταχύνσεως υφίσταται η γνωστή σχέση

$$u = \int_0^t a dt \quad (2.42)$$



Σχ. 2.4στ.
Επιταχυνσιόμετρο.

Στο σχήμα 2.4στ φαίνεται ένα κοινό επιταχυνσιόμετρο και ένα άλλο, τεχνολογικά αναπτυγμένο, στο σχ. 2.4ζ.



Σχ. 2.45.
Επιτραχυσιδόμετρο για το σύστημα αυτόματης πλοηγήσεως του αεροσκάφους F-15.

2.4.4 Μεταλλάκτης πίεσεως (pressure transducer).

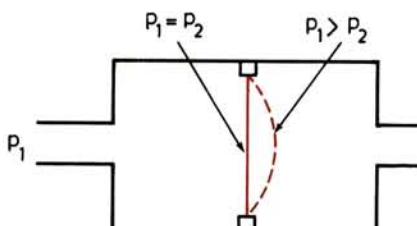
Οι περισσότεροι μεταλλάκτες πίεσεως που εφαρμόζονται σε συστήματα ελέγχου μετατρέπουν την πίεση σε μετατόπιση κάποιου εξαρτήματος.

Ένα εξάρτημα, που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση πίεσεων μεγαλύτερων της μιας ατμόσφαιρας, είναι το διάφραγμα. Το διάφραγμα τοποθετείται σε μια διάταξη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4η. Όταν η πίεση που ασκείται στο αριστερό μέρος του διαφράγματος είναι p_1 και στο δεξιό p_2 , η ωφέλιμη δύναμη που ασκείται στο διάφραγμα είναι:

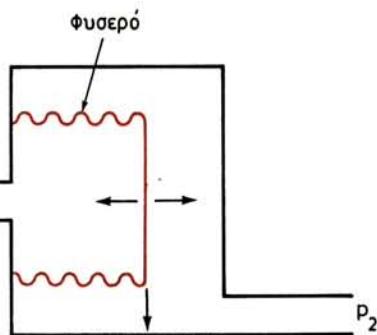
$$F = (p_1 - p_2)A \quad (2.43)$$

όπου A = εμβαδόν του διαφράγματος (m^2)

p_1, p_2 = πίεσεις ($N/m^2, Pa$).



Σχ. 2.4η.
Διάφραγμα.

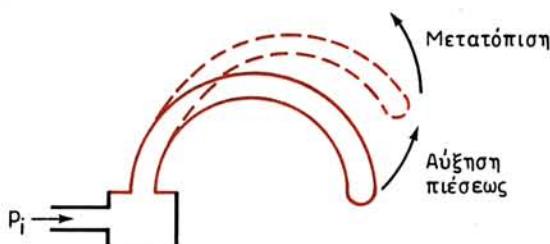


Σχ. 2.4θ.
Διάταξη φυσούνας.

Το διάφραγμα δρα ως ελατήριο και επομένως εφαρμόζεται ο νόμος του Χουκ. Στο σημείο ισορροπίας η εξίσωση των δυο δυνάμεων δίνει τη σχέση της μετατοπίσεως του διαφράγματος ως προς την πίεση που ασκείται στην επιφάνειά του.

Μια άλλη διάταξη που λειτουργεί με την ίδια αρχή είναι η διάταξη της φυσούνας (bellows), που φαίνεται στο σχήμα 2.4θ.

Μια ειδική διάταξη που μετατρέπει πίεσεις μεγαλύτερες από μια ατμόσφαιρα είναι ο σωλήνας του Μπουρντόν (Bourdon Tube). Η διάταξη αυτή φαίνεται στο σχήμα 2.4ι. Ο καμπυλωτός αυτός σωλήνας είναι κατασκευασμένος από ειδικό εύκαρπτο μέταλλο και μετατοπίζεται με την αύξηση της πίεσεως στο εσωτερικό του διαφράγματος.

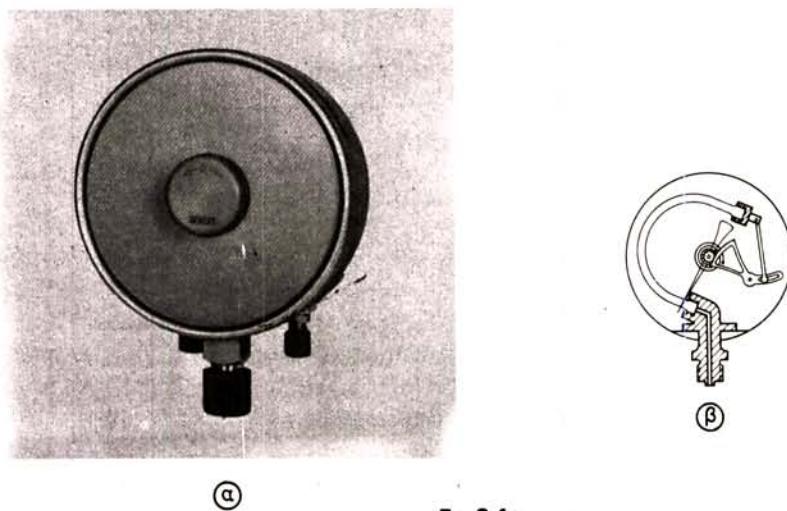


Σχ. 2.4ι.
Ο σωλήνας Μπουρντόν.

πως δείχνει το σχήμα 2.4ι. Η μετατόπιση που προκύπτει είναι ανάλογη προς την εσωτερική πίεση του σωλήνα.

Η μετατροπή της μετατόπισεως που παράγεται από τους μεταλλάκτες πιέσεως σε ηλεκτρικά σήματα γίνεται με ποτενσιόμετρα ή μετρητές καταπονήσεως, που έχουμε ήδη περιγράψει. Στο σωλήνα Μπουρντόν χρησιμοποιείται συχνά το σύστημα με επαγγελματική. Στο σχήμα 2.4ια φαίνεται ένας μεταλλάκτης «Μπουρντόν».

Σε μετρήσεις πιέσεων κάτω από μια ατμόσφαιρα χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ηλεκτρονικές μέθοδοι. Πιέσεις μέχρι ενός χιλιοστού της ατμοσφαίρας μετριούνται με συσκευές, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στην ιδιότητα ότι η ταχύτητα εκπομπής της θερμότητας που παράγεται σε νήμα λυχνίας εξαρτάται από την πίεση του αερίου μέσα στη λυχνία. Δηλαδή οι μεταλλάκτες αυτού του τύπου μετρητές πιέση σε θερμότητα. Η μέτρηση της θερμότητας γίνεται έμμεσα με μέτρηση της αντιστάσεως του νήματος. Για πιέσεις μεταξύ 10^{-3} καί 10^{-13} ατμοσφαίρας χρησιμοποιούνται μετρητές ιονισμού, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στην αρχή ότι η πυκνότητα των ιόντων είναι ανάλογη προς την πίεση του αερίου μέσα στο θάλαμο ιονισμού.

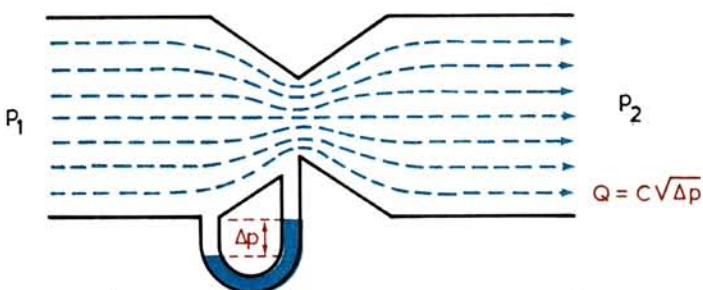


Σχ. 2.4ια.
Μεταλλάκτης «Μπουρντόν».

2.4.5 Μεταλλάκτης ροής.

Σε πολλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας πρώτων υλών υπό μορφή υγρού, τα αυτόματα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούν μετρήσεις της ροής του υγρού στους διάφορους σταθμούς επεξεργασίας. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται με τους μεταλλάκτες ροής. Η ροή μετράται είτε ως ταχύτητα υγρού (m/s) είτε ως παροχή δύκου (m^3/s) είτε ως παροχή μάζας (kg/s). Η μέθοδος μετρήσεως βασίζεται στην αρχή του Βεντούρι. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4ιβ, στο σωλήνα μέσα από τον οποίο ρέει το υγρό υπάρχει μια στένωση και έτσι δημιουργείται μια διαφορά πιέσεως ($p_2 - p_1$), η οποία μπορεί να μετρηθεί με τους μετρητές που περιγράψαμε (διάφραγμα, φυσούνα κλπ.) και είναι ανάλογη με την ταχύτητα ροής του υγρού.

Άλλοι τρόποι μετρήσεως ροής χρησιμοποιούν διάφορα εμπόδια στο δρόμο του υγρού (πλωτήρες, μικρές προπέλες, κ.ά.) και μετρούν τις προκύπτουσες διαφορές

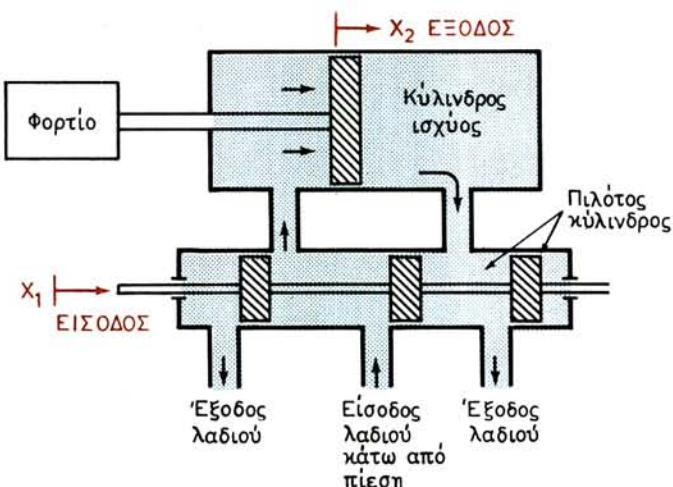


Σχ. 2.4ιβ.
Μετρητής ροής.

στη ροή του υγρού με ποτενσιόμετρα, ταχύμετρα κ.ά. Όταν το υγρό έχει ικανοποιητική ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μέτρηση της ροής μπορεί να γίνει με ηλεκτρονική μέθοδο. Δημιουργείται π.χ. ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από το σωλήνα ροής και μετράται η αναπτυσσόμενη διαφορά δυναμικού. Το τμήμα του σωλήνα στο οποίο γίνεται η μέτρηση κατασκευάζεται από ειδικό μονωτικό υλικό, δημιουργώντας το τεφλόν ή το γυαλί.

2.4.6 Υδραυλικός Σερβοκινητήρας.

Ο υδραυλικός σερβοκινητήρας είναι ένας υδραυλικός ενισχυτής που χρησιμοποιείται πολύ σε συστήματα ελέγχου αεροσκαφών (για την κίνηση πτερυγίων) και αυτοκινήτων (σύστημα φρένων, σύστημα τιμονιού κλπ.). Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4ιγ, ο «πιλότος» κύλινδρος συνδέεται με μια δεξαμενή λαδιού από την οποία τροφοδοτείται με λάδι υπό πίεση μέσω μιας αντλίας. Η είσοδος του συστήματος είναι η κίνηση X_1 του εμβόλου, π.χ. προς τα δεξιά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να τροφοδοτηθεί λάδι υψηλής πίεσεως στο αριστερό μέρος του κυλίνδρου ισχύος και



Σχ. 2.4ιγ.
Υδραυλικός σερβοκινητήρας.

να ωθήσει το έμβολο με το φορτίο δεξιά κατά μια απόσταση X_2 , η οποία είναι και η έξοδος του συστήματος. Η αντίστροφη κίνηση του πιλότου - έμβολου διοχετεύει λάδι υπό πίεση στο δεξιό μέρος του κυλίνδρου ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση του εμβόλου ισχύος προς τα αριστερά. Παρατηρούμε ότι για την κίνηση του πιλότου εμβόλου δεν χρειάζεται μεγάλη δύναμη. Αντίθετα, η δύναμη που αναπτύσσεται από το έμβολο ισχύος είναι αρκετά μεγάλη και εξαρτάται από την πίεση του λαδιού που παρέχεται από την αντλία και από τη διατομή του εμβόλου. Η διάταξη δηλαδή αυτή αποτελεί ένα υδραυλικό ενισχυτή, κατά τη λειτουργία του οποίου διατηρείται αναλογική σχέση μεταξύ των μεταβλητών X_1 και X_2 .

2.4.7 Οδοντωτοί τροχοί (γρανάζια).

Σε συστήματα ελέγχου όπου υπάρχουν περιστρεφόμενα φορτία, είναι συχνά ανάγκη να επιτυγχάνεται μια συγκεκριμένη ταχύτητα με μια ελάχιστη ροπή. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού κινητήρα και συστήματος οδοντωτών τροχών. Αν δηλαδή η ταχύτητα του κινητήρα είναι μικρότερη από την επιθυμητή, με το κατάλληλο σύστημα οδοντωτών τροχών μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη ταχύτητα. Το ίδιο μπορεί επίσης να γίνει για την επίτευξη της κατάλληλης ροπής. Ένα σύστημα (τρένο) οδοντωτών τροχών, μαζί με την ισοδύναμη διάταξη του φαίνονται στο σχ. 2.4ιδ. Οι ποσότητες T , Φ , n , r και N συμβολίζουν αντίστοιχα τη ροπή, γωνιακή θέση, γωνιακή ταχύτητα, ακτίνα τροχού και αριθμό δοντιών τροχού. Ο αριθμός δοντιών σε ένα τροχό είναι γραμμικά ανάλογος με την ακτίνα του. Έχομε επομένως τη σχέση

$$\frac{N_1}{r_1} = \frac{N_2}{r_2} \quad (2.44)$$

Οι γραμμικές αποστάσεις, που διανύονται από την περιστροφή των δυο τροχών λόγω της επαφής τους, είναι ίσες. Έχομε λοιπόν τη σχέση

$$\Phi_1 r_1 = \Phi_2 r_2 \quad (2.45)$$

Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σημείο επαφής είναι ίσες. Αυτό μας δίνει τη σχέση

$$\frac{T_1}{r_1} = \frac{T_2}{r_2} \quad (2.46)$$

Με συνδυασμό των (2.44), (2.45) και (2.46) βρίσκομε τις εξής χρήσιμες σχέσεις

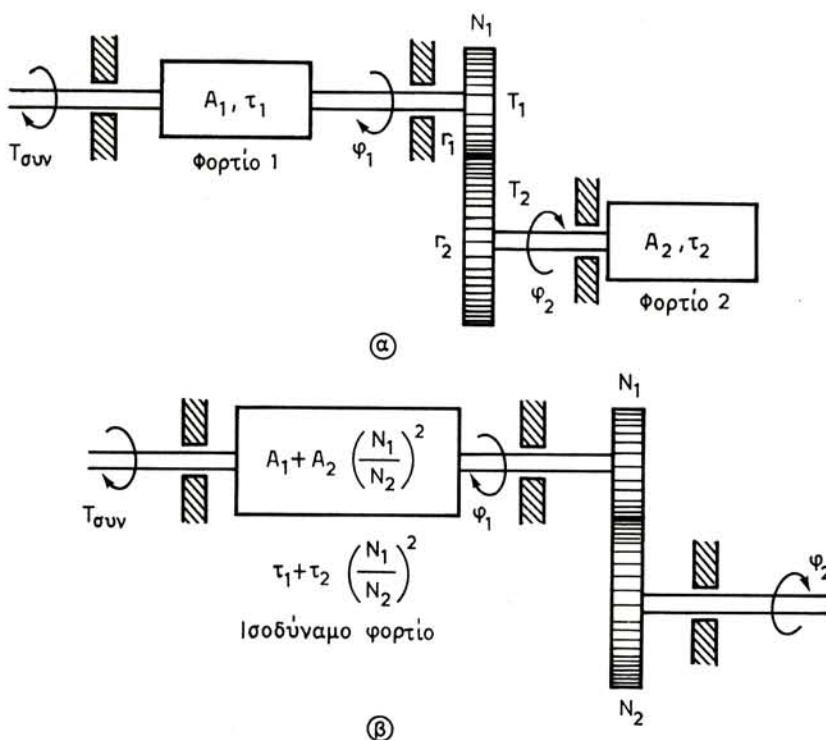
$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.47)$$

Αν δηλαδή ξέρομε το πηλίκο των αριθμών των δοντιών στους δυο τροχούς, μπορούμε να βρούμε τις σχέσεις μεταξύ των αντίστοιχων ταχυτήτων και ροπών.

Η ανάλυση του συστήματος του σχήματος 2.4ιδ(α) οδηγεί σε ένα ισοδύναμο σύστημα τροχών, το οποίο μας δίνει τη σχέση για τη συνολική ροπή $T_{συν}$ που απαιτείται για την περιστροφή των δυο φορτίων μέσω των οδοντωτών τροχών:

$$T_{συν} = A \frac{dn_1}{dt} + \tau n_1 \quad (2.48)$$





Σχ. 2.4δ.

Τρένο οδοντωτών τροχών και το ισοδύναμό του.

όπου η ισοδύναμη αδράνεια

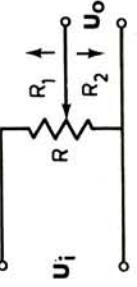
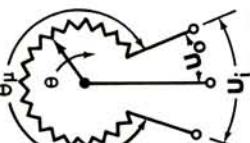
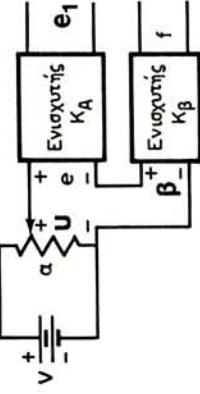
$$A = A_1 + A_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

και ο ισοδύναμος συντελεστής τριβής

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

Στον πίνακα 2.4.1 κάνομε μια συνοπτική απεικόνιση των δσων διδάχθηκαν σ' αυτό το Κεφάλαιο.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

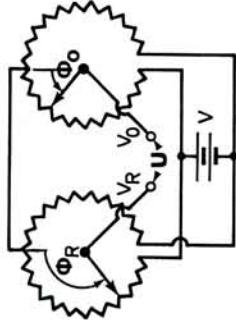
ΕΞΑΡΤΗΜΑ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΦΥΓΙΚΩΝ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
1. Ποτενσιόμετρα  	$U_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad U_i = \frac{R_2}{R} \quad U_i = \alpha U_i$ $\alpha = \frac{R_2}{R}$	<p>Μετατρέπει ευθύγραμη κίνηση ηλεκτρική τάσης.</p>
2. Μετρητές σφάλματος 	$U_o = \alpha U_i, \alpha = \frac{\theta}{\theta_u}$	<p>Μετατρέπει περιστροφική κίνηση σε ηλεκτρική τάση.</p> <p>Μετρητής σφάλματος για έξοπλή μάτα που κινούνται ευθύγραμμα.</p>

Μετρητής σφάλματος για εξαρτήματα που κινούνται περιστροφικά.

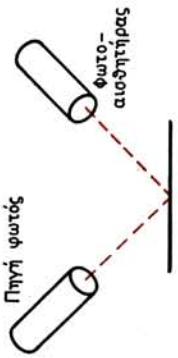
$$U = V_R - V_o$$

$$V_R = K_e \Phi_R, V_o = K_e \Phi_o$$

$$K_e = \frac{V}{\Phi_{\mu EY}}$$



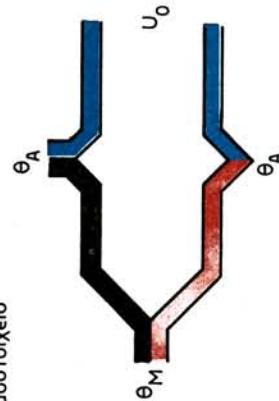
3. Οπτικοί Μεταλλάκτες



Πηγές:
Λαμπτήρες
ΕΜ Ακτινοβολία
Ηλακή Ακτινοβολία
Λέντζερ

Φωτοαισθητήρες:
Φωτοκύπταρα
Φωτοαντιστάσεις
Φωτοδιόδοι

4. Θερμικοί Μεταλλάκτες



Μετρητέουν ηλεκτρική ενέργεια σε οπική και αντιστροφα.

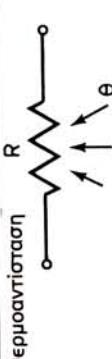
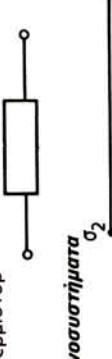
$$W = \frac{hc}{\lambda} (\text{J})$$

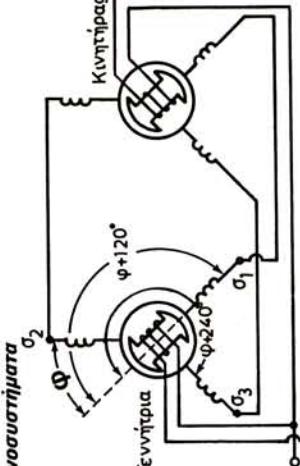
$$I = \frac{P}{A} \left(\frac{\text{Watt}}{\text{m}^2} \right)$$

$$U = U_0 \ln(I)$$

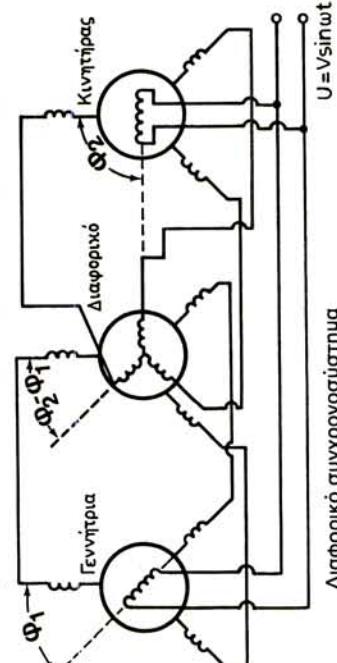
Μετρητέει θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική, και αντιστροφα. Περιοχή εφαρμογής -200°C - 1500°C.

$$U_0 = \alpha (\theta_M - \theta_A)$$

ΕΞΑΡΤΗΜΑ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΦΥΓΙΚΩΝ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
  <p>Θερμοαντίσταση R Θερμιστόρ</p> <p>Αύξηση της Θερμοκρασίας μειώνεται την αντίσταση.</p> <p>5. Συγχρονοσυστήματα</p>	$R(\theta) = R(\theta_0) [1 + \alpha (\theta_0) \Delta\theta]$ $\Delta\theta = \theta - \theta_0$	<p>Μικρή σχετικά ευαίσθησία σε αλλαγές Θερμοκρασίας.</p> <p>Πολύ μεγάλη ευαίσθησία σε αλλαγές Θερμοκρασίας.</p>



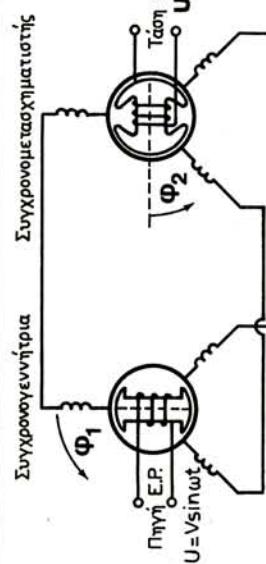
Μονοφασικό συγχρονοσύστημα
 $U = V \sin \omega t$



Διαφορικό συγχρονοσύστημα

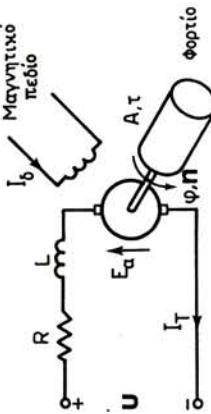
$$U = V \sin \omega t$$

Όταν οι δρομείς της γεννήτριας και του κινητήρα περιστρέφονται κατά την ίδια γωνία ($\Phi_1 = \Phi_2$), τότε ο δρομέας του διαφορικού ημερεί. Αν όμως οι δύο δρομείς περιστρέφονται κατά διαφορετικές γωνίες ($\Phi_1 \neq \Phi_2$), τότε ο δρομέας του διαφορικού στρέφεται κατά μια γωνία ίση με $(\Phi_2 - \Phi_1)$.

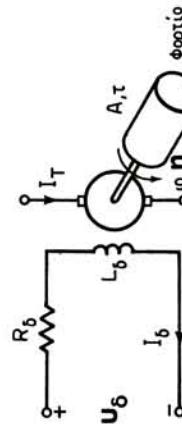


Συγχρονομετρητής σφάλματος

6. Σερβοκνητήρες ΣΡ



Ελεγχόμενος από το επαγγελματικό τύμπανο



Ελεγχόμενος από το πεδίο διεγέρσεως

Η τάση στο δρομέα του συγχρονομετρηματιστή είναι συνάρτηση της γνωνιακής διαφοράς των δύο δρομών.

$$U_o = KV \eta(\Phi_1 - \Phi_2) \eta(\omega t)$$

$$T_\phi = A \frac{d\eta}{dt} + \tau n$$

Μετατρέπεται τάση ΣΡ σε περιστροφική κίνηση φορτίων με μεγάλη ροπή αδρενείας. Προσθέτει ομαλή επιτάχυνση.

$$T_\phi = T_k - T_\Delta$$

$$T_k = K_k I_T$$

$$U = L \frac{dI_T}{dt} + RI_T$$

$$T_\phi = A \frac{d\eta}{dt} + \tau n$$

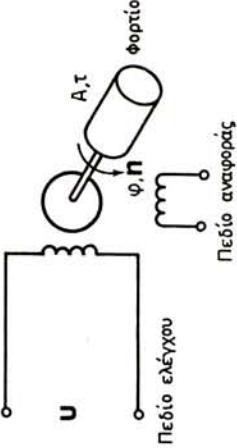
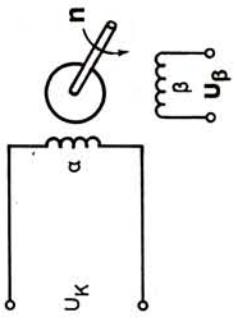
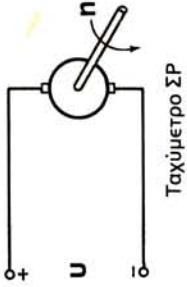
Μετατρέπεται τάση ΣΡ σε περιστροφική κίνηση φορτίων. Ομαλός έλεγχος ταχύτητας. Μικρές απώλειες στο μαγνητικό πεδίο.

$$T_\phi = T_k - T_\Delta$$

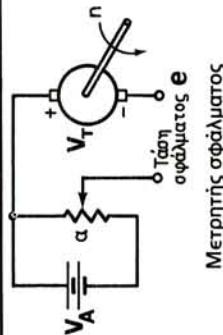
$$T_k = K_k I_\delta$$

$$U_\delta = L_\delta \frac{dI_\delta}{dt} + R_\delta I_\delta$$

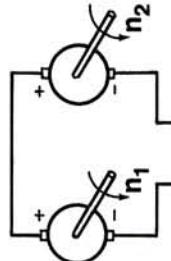
(συνεχίζεται)

ΕΞΑΡΤΗΜΑ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΦΥΓΙΚΩΝ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
7. Σερβοκινητήρες ΕΡ	 <p>Πεδίο ελέγχου</p> <p>Πεδίο αναφοράς</p> $\frac{A}{(t - m)} \frac{dn}{dt} + n = Km U$ <p>m = κλίση της καμπύλης. Ροτί ως προς ταχύτηρα άξονα.</p>	<p>Λειτουργούν σε μικρές ταχύτητες και αναπτύσσουν μεγάλες ροτές. Έχουν μεγάλη επιτάχυνση. Μετατόπισμα τάσης ΕΡ σε γωνιακή θέση.</p>
8. Ταχύμετρα	 <p>Ταχύμετρο ΕΡ</p> $U_\beta = K_t n$	<p>Μετατρέπει τάση ΕΡ σε γωνιακή ταχύτητα και αντιστροφα.</p>
	 <p>Ταχύμετρο ΣΡ</p> $U = K_t n$	<p>Μετατρέπει τάση ΣΡ σε γωνιακή ταχύτητα και αντιστροφα.</p>

$$\epsilon = \alpha V_A - V_T$$

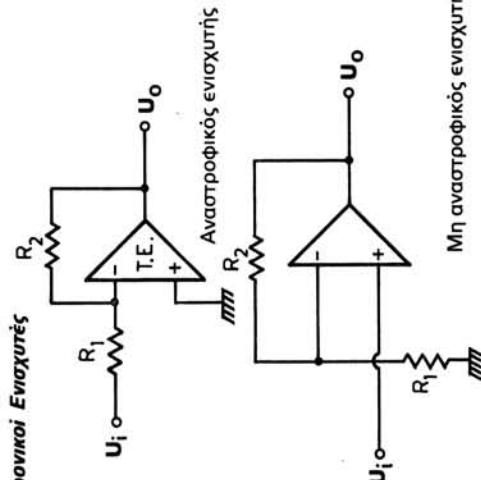


$$\epsilon = K_r (n_1 - n_2)$$



9. Ηλεκτρονικοί Ενισχυτές

Διαφορικό ταχύμετρο



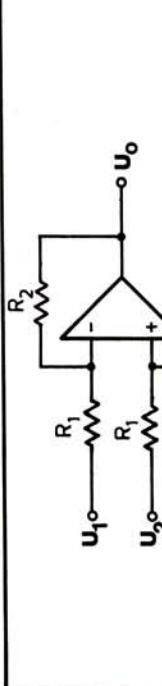
Συγκρίνει την τάση του ταχυμέτρου με μία τάση αναφοράς.

Μετατρέπει τη διαφορά δύο γωνιακών ταχυτήτων σε τάση Σ.Π.

Ενισχύει με απολαβή R_2/R_1 , και αντιστρέφει το αλγεβρικό σημείο της εισόδου.

Ενισχύει με απολαβή $1 + R_2/R_1$, χωρίς να αναστρέψει το αλγεβρικό σημείο της εισόδου. Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξασθένηση.

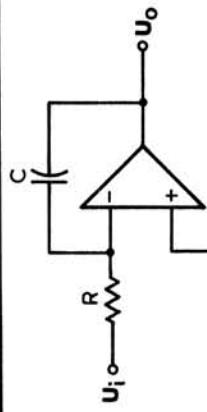
(συνεχίζεται)

ΕΞΑΡΤΗΜΑ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΦΥΓΙΚΩΝ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
	$U_o = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1)$ <p>Διαφορικός ενισχυτής</p>	<p>Αποκρίνεται στη διαφορά τάσεων που εφαρμόζονται στην είσοδο, με απολαβή R_2/R_1.</p> <p>Μετατρέπει σήμα τάσεως σε σήμα ρεύματος.</p> <p>$I = \frac{R_2}{R_1 R_3} U_i$</p> <p>$R_1 (R_3 + R_5) = R_2 R_4$</p> <p>Μετατρέπει σήμα ρεύματος σε σήμα τάσεως.</p>

(συνεχίζεται)

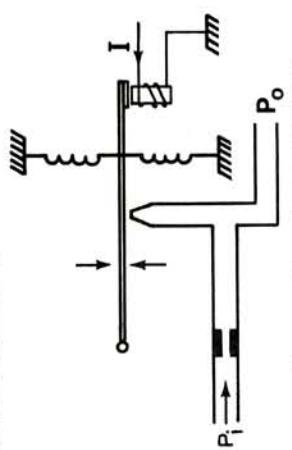
Ολοκληρώνεται το σήμα εισόδου και το ενισχύει με απολαβή $1/RC$. Αντιστρέφει το αλγεβρικό σήμα.

$$U_o = -\frac{1}{RC} \int U_i dt$$

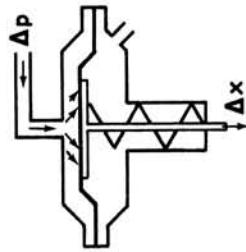


Κύκλωμα ολοκληρώσεως

10. Πνευματικοί μεταλλάκτες

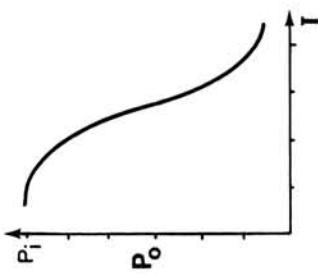


Μετατροπέας ρεύματος σε πίεση



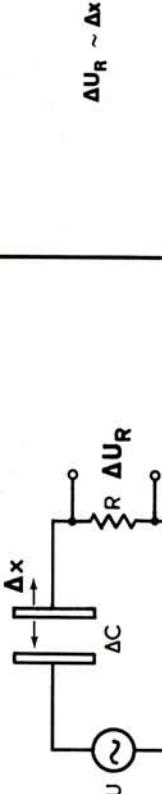
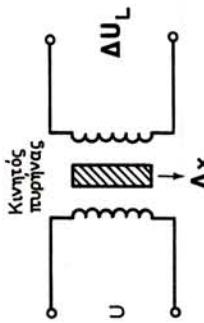
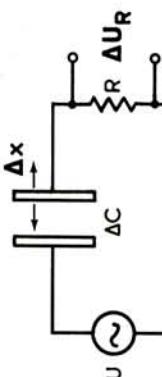
Πνευματικός επενεργητής

Μετατρέπει ρεύμα (4 - 20 mA) σε πίεση (20 - 100 kPa).



Μετατρέπει πίεση δέρα σε ευθύγραμμη μετατόπιση.

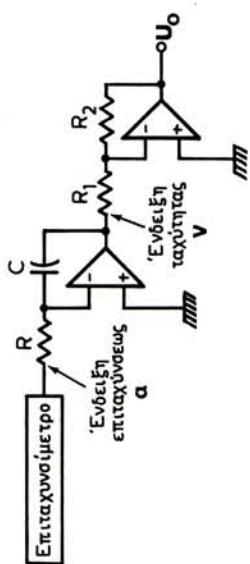
$$\Delta x = \frac{A}{K} \Delta p$$

ΕΞΑΡΤΗΜΑ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
<p>11. Μηχανικοί μεταλλάκτες</p>  <p>Σύστημα πυκνωτή</p> <p>Κινητός πυρηνας</p>  <p>Σύστημα αυτεπαγγής</p> <p>Διαλυτής</p>  <p>Σύστημα πυκνωτή</p> <p>$\Delta U_R \sim \Delta x$</p> <p>$\Delta U_L \sim \Delta x$</p> <p>$\Delta U_C \sim \Delta x$</p> <p>Μετατρέπει ευθύγραμμη μετατόπιση σε τάση.</p> <p>Μετατρέπει ευθύγραμμη μετατόπιση σε τάση.</p> <p>Μετατρέπει καταπόνηση μεταλλικού σύρματος σε τάση, μέσω πηγής μεταβολής αντοσάσεως.</p> <p>$\Delta R \simeq 2R_0 \frac{\Delta l}{l_0}$</p> <p>Μετρητής καταπόνησεως - επιμηκυνούμετρο</p>		

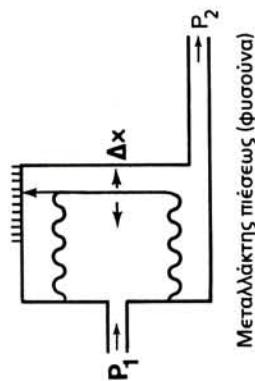


Μετατρέπει επιτάχυνση σε
ευθύγραμμη μετατόπιση.

Επιταχυντικόμετρο



Μετατρέπει επιτάχυνση σε τάση,
η οποία, με την προσθήκη του
κυκλώματος ολοκληρώσεως
αποτελεί ένδειξη ταχύτητας.

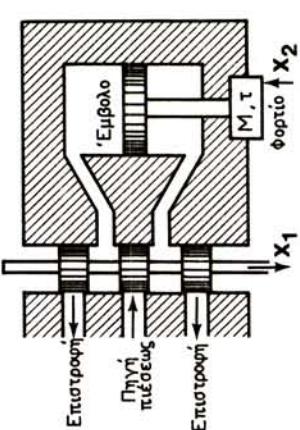
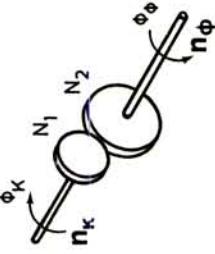


Μεταλλάκτης πίεσεως (φυσικά)

$$\Delta x = \frac{A}{K} \Delta p$$

Μετατρέπει πίεση σε
ευθύγραμμη μετατόπιση.

(συνεχίζεται)

ΕΞΑΡΤΗΜΑ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΦΥΓΙΚΩΝ ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
 <p data-bbox="396 713 621 784">$x_2 \sim x_1$</p> <p data-bbox="633 1164 658 1447">Υδραυλικός σερβοκινητήρας</p> <p data-bbox="409 1430 534 1505">Επιστροφή Πηγή τίτσεως Επιστροφή</p> <p data-bbox="459 1447 534 1505">Φορτίο x_1</p> <p data-bbox="446 731 471 784">Φορτίο x_2</p>	<p data-bbox="396 193 509 498">Χρησιμοποιείται ως υδραυλικός ενισχυτής. Μετατρέπει ευθύγραμμη κίνηση σε ισχυρό σήμα πίεσεως.</p> <p data-bbox="833 157 921 498">Μειώνει ή αυξάνει γυναική ταχύτητα, θέση και στρεπτική ροπή.</p>	$N_2 \Phi_\Phi = N_1 \Phi_\kappa$ $n_\Phi = n_\kappa \left(\frac{N_1}{N_2} \right)$  <p data-bbox="1033 1161 1058 1415">Τρένο σδοντωτών τροχών</p>

2.5 Ασκήσεις.

1. Ένα ποτενσιόμετρο έχει $R_1 = 1\text{K}\Omega$ με 1000 διαιρέσεις, $R_2 = 2.500\ \Omega$, και η τάση αναφοράς $U_{\text{ANAΦ}} = 1.00329\text{ V}$. Ο μηδενισμός επιτυγχάνεται όταν $a = 225$ διαιρέσεις. Να βρεις την άγνωστη τάση U_x (βλ. σχήμα 2.1a).

(Απάντηση: $U_x = 0,0645\text{ V}$)

2. Σχεδίασε ένα ποτενσιόμετρο, το οποίο να μπορεί να μετράει τάσεις από 0 – 100 mV με μια μεταβλητή αντίσταση 1 K Ω και με 1000 διαιρέσεις. Χρησιμοποίησε μπαταρία των 6V και πηγή αναφοράς των 1,35629 V.

(Απάντηση: $R_2 = 12.5629\text{ K}\Omega$, $I_{\text{Διαιρέτη}} = 0,1\text{ mA}$, $R = 50\text{ K}\Omega$)

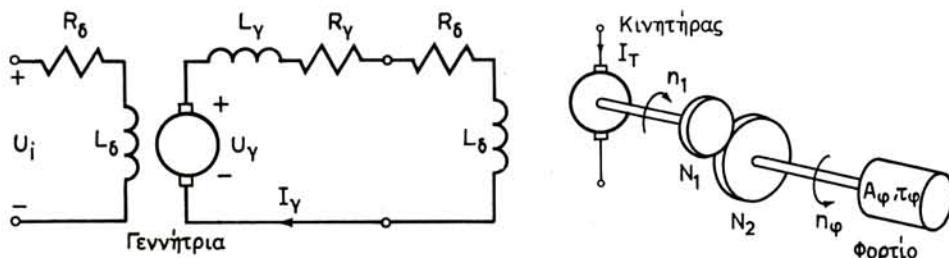
3. Ένα φωτοκύτταρο παράγει τάση ανοικτού κυκλώματος ίση με 0,33 V, όταν δέχεται ακτινοβολία με ένταση 10 W/m^2 . Με την ένταση αυτή, ρεύμα $2,2\text{ mA}$ περνάει από ένα φορτίο 100Ω . Να βρεις α) την εσωτερική αντίσταση της διατάξεως και β) την τάση ανοικτού κυκλώματος όταν η ένταση της ακτινοβολίας είναι ίση με 25 W/m^2 .

(Απάντηση: $R_{\text{εσωτ}} = 50\Omega$, $U_0 = 0,143\text{ V}$, $U = 0,46\text{ V}$)

4. Υπολόγισε την ηλεκτρεγερτική δύναμη Σήμπεκ για ένα συνδυασμό μετάλλων με $\alpha = 50\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, αν οι θερμοκρασίες στα άκρα του θερμοστοιχείου είναι 20°C και 100°C .

(Απάντηση: $\epsilon = 4\text{ mV}$)

5. Να σχεδιάσεις το λειτουργικό διάγραμμα του ηλεκτρομηχανικού συστήματος του παρακάτω σχήματος.



6. Σχεδίασε ένα ενισχυτή με υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου και απολαβή ίση με 42. Χρησιμοποίησε ένα μη αναστροφικό Τ.Ε. Ποιές θα είναι οι τιμές R_1 και R_2 ;

(Απάντηση: $R_1 = 1\text{ K}\Omega$, $R_2 = 41\text{ K}\Omega$)

7. Σχεδίασε ένα μετατροπέα ρεύματος σε τάση που να παρέχει ρεύμα από 0–10mA, όταν η τάση εισόδου παίρνει τιμές από 0–1V. Η τάση κόρου του Τ.Ε. είναι $\pm 10\text{V}$. Προσδιόρισε τη μέγιστη τιμή της αντιστάσεως φορτίου, καθώς και τις τιμές δόλων των άλλων αντιστάσεων.

(Απάντηση: $R_1 = R_2 = 1\text{ K}\Omega$, $R_3 = 100\Omega$, $R_5 = 0$, $R_4 = 100\Omega$, $R_{\mu\phi} = 450\Omega$)

8. Για να ανοίξει μια βαλβίδα νερού, χρειάζεται να εφαρμοσθεί μια συνολική δύναμη 400N . Ποιο πρέπει να είναι το εμβαδόν του διαφράγματος, αν η διαφορά πιέσεων μεταξύ των δύο επιφανειών του διαφράγματος είναι ίση με 70kPa .

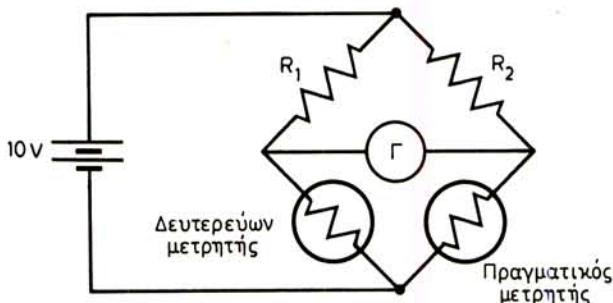
(Απάντηση: $A = 5,71 \times 10^{-3}\text{ m}^2$)

9. Κατά πόσα Ω αυξάνεται η αντίσταση ενός σύρματος με αντίσταση 12Ω , όταν καταπονείται από μία τάση $1000\text{ }\mu\text{m/m}$;

(Απάντηση: $\Delta R = 0,24\Omega$)

10. Ένας μετρητής καταπονήσεως με πηλίκο $\Delta R/R/\Delta l/l = 2,03$ και $R = 350\Omega$, χρησιμοποιείται σε μια μέτρηση με χρησιμοποίηση της γέφυρας του παρακάτω σχήματος όπου $R_1 = R_2 = 350\Omega$. Ο «δευτερεύων» μετρητής έχει μπει για να αντισταθμίσει τυχόν αλλαγές της αντιστάσεως του πραγματικού μετρητή λόγω θερμοκρασίας. Η αντίσταση του «δευτερεύοντος» μετρητή είναι 350Ω . Αν η καταπόνηση είναι $1.450\text{ }\mu\text{m/m}$ και η μπαταρία παρέχει τάση 10V , ποιά θα είναι η ένδειξη του γαλβανομέτρου σε V;

(Απάντηση: $-7,3\text{ mV}$)



11. Ένα επιταχυνσιόμετρο έχει σεισμική μάζα $0,06 \text{ kg}$, και σταθερά ελατηρίου $3 \times 10^3 \text{ N/m}$. Η μέγιστη μετατόπιση της μάζας είναι $\pm 0,02 \text{ m}$. Υπολόγισε τη μέγιστη επιτάχυνση που μπορεί να μετρηθεί από το σύστημα αυτό σε πολλαπλάσια του g ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$).
(Απάντηση: $a = 122,4g$)
12. Ένα επιταχυνσιόμετρο παράγει σήμα 14 mV ανά g . Σχεδίασε ένα σύστημα διαμορφώσεως σήματος (χρησιμοποιήσε το σχήμα 2.4ϵ), που να παρέχει: σήμα ενδείξεως ταχύτητας με κλίμακα $0,25V$ ανά m/s . Ποια απολαβή προκύπτει στο σύστημα και ποιες οι τιμές R_1 και R_2 ?
(Απάντηση: Απολαβή = $174,8$ και $R_1 = 1\text{K}\Omega$, $R_2 = 173,8 \text{ K}\Omega$)
-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΡΥΘΜΙΣΕΩΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή των βασικών συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, σκόπιμο είναι να θυμηθούμε το γενικό λειτουργικό διάγραμμα ενός συστήματος ελέγχου, το οποίο δείχνει την αλληλεξάρτηση των διαφόρων εξαρτημάτων που το συνθέτουν. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5ε το σύστημα αυτομάτου ελέγχου αποτελείται από δυο βασικά μέρη:

- α) Το τμήμα που ασκεί τον έλεγχο, και
- β) το τμήμα που είναι υπό έλεγχο.

Τα κύρια εξαρτήματα στο πρώτο μέρος του συστήματος είναι ο μετρητής σφάλματος ή συγκριτής, τα στοιχεία ανατροφοδοτήσεως και τα στοιχεία ελέγχου.

Ο **μετρητής σφάλματος** είναι εξάρτημα ελέγχου, το οποίο παράγει στην έξοδο του ένα σήμα ανάλογο προς την αλγεβρική διαφορά των δυο σημάτων εισόδου.

Όπως έδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι μετρητές σφάλματος είναι συνήθως ποτενσιόμετρα, συγχρονοσυστήματα και τελεστικοί ενισχυτές.

Τα **στοιχεία ανατροφοδοτήσεως** αποτελούνται βασικά από μετρητές - μεταλλάκτες, που έχουν σκοπό τη μέτρηση των τυχόν αποκλίσεων της εξόδου, και τη μετατροπή της πληροφορίας αυτής σε ηλεκτρικό σήμα, προκειμένου να την ανατροφοδοτήσουν στο μετρητή σφάλματος.

Γενικά, είναι όργανα ακριβείας, που δεν παράγουν ηλεκτρονικό θόρυβο, συνήθως δε είναι τα πιο ακριβά εξαρτήματα των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

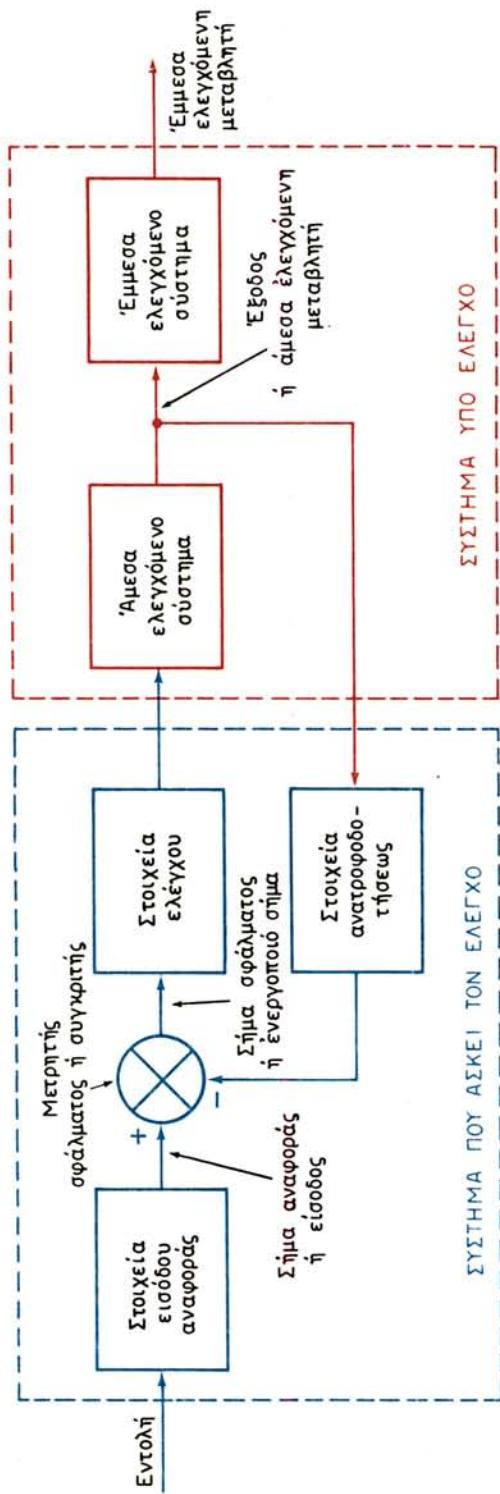
Τα **στοιχεία ελέγχου** περιλαμβάνουν ενισχυτές, που ενισχύουν το σήμα του μετρητή σφάλματος (ή ενεργοποιό σήμα), και το κύριο στοιχείο ελέγχου (ή στοιχείο ενεργοποιήσεως), το οποίο στο εξής θα λέγεται ελεγκτής.

Ο **ελεγκτής** είναι το εξάρτημα που επικοινωνεί άμεσα με το υπό έλεγχο σύστημα και επιφέρει τις απαραίτητες μεταβολές στη συμπεριφορά του συστήματος αυτού σύμφωνα με την εντολή που παίρνει από το μετρητή σφάλματος.

Τα εξαρτήματα αυτά π.χ., ανοιγοκλείνουν βαλβίδες, αυξομειώνουν τις τάσεις των μαγνητικών πεδίων κινητήρων και ενισχύουν ή εξασθενίζουν τάσεις και ρεύματα.

Όπως αναπτύσσεται παρακάτω, το υπό έλεγχο σύστημα μπορεί να είναι οποιαδήποτε διεργασία, ή να περιέχει απλές ή και σύνθετες διατάξεις εξαρτημάτων. Ο έλεγχος δε, μπορεί να ασκείται είτε σε μια μόνο φυσική ποσότητα, είτε ταυτόχρονα σε πολλές.

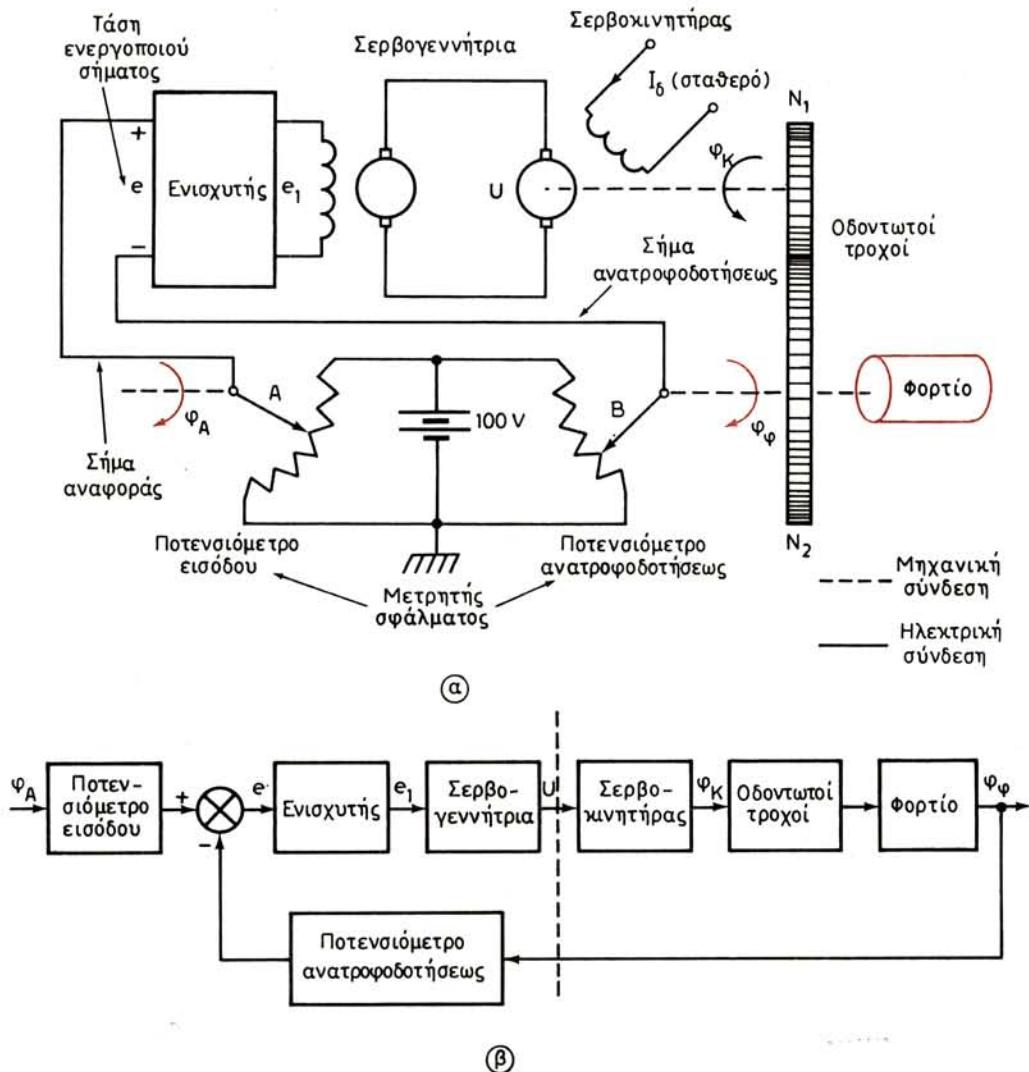




3.1 Συστήματα αυτομάτου ελέγχου θέσεως.

Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, ο δρός «σερβιομηχανισμός», ή απλά «σερβό», χρησιμοποιείται για συστήματα αυτομάτου ελέγχου με ανατροφοδότηση, στα οποία η μεταβλητή που ελέγχεται είναι γωνιακή θέση, ταχύτητα ή επιτάχυνση.

Το πρώτο σερβιούστημα, με το οποίο θα ασχοληθούμε, είναι εκείνο που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της γωνιακής θέσεως φορτίων. Το σύστημα αυτό και το λειτουργικό του διάγραμμα εικονίζονται στο σχήμα 3.1α (α) και 3.1α (β).



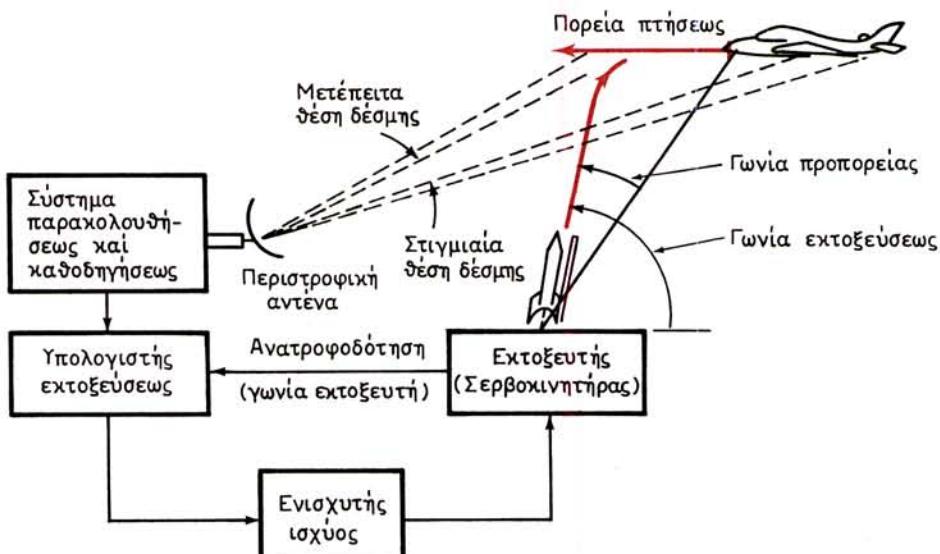
Σχ. 3.1α.
Σύστημα αυτομάτου ελέγχου θέσεως.

Το υπό έλεγχο σύστημα αποτελείται από το σερβοκινητήρα, το τρένο οδοντωτών τροχών και το φορτίο. Ελεγχόμενη μεταβλητή είναι η γυνιακή θέση του φορτίου Φ_f . Έστω δε ότι η επιθυμητή γυνιακή θέση του φορτίου ή γυνία αναφοράς είναι Φ_d . Οι δύο αυτές θέσεις μετρούνται και μετατρέπονται σε τάσεις από ένα σύστημα δύο ποτενσιομέτρων, το οποίο αποτελεί και το μετρητή σφάλματος. Με αλγεβρική σύγκριση των δύο τάσεων προκύπτει η τάση σφάλματος $e = K(\Phi_d - \Phi_f)$ η οποία ενισχύεται από τον ενισχυτή σε τάση e_1 , η οποία απαιτείται για να ρυθμίσει ανάλογα το ρεύμα διεγέρσεως της σερβογεννήτριας. Η σερβογεννήτρια παράγει τάση u , η οποία εφαρμόζεται στο επαγωγικό τύμπανο του σερβοκινητήρα, ο οποίος αναπτύσσει στρεπτική ροπή και περιστρέφει το φορτίο στη γυνιακή θέση Φ_f .

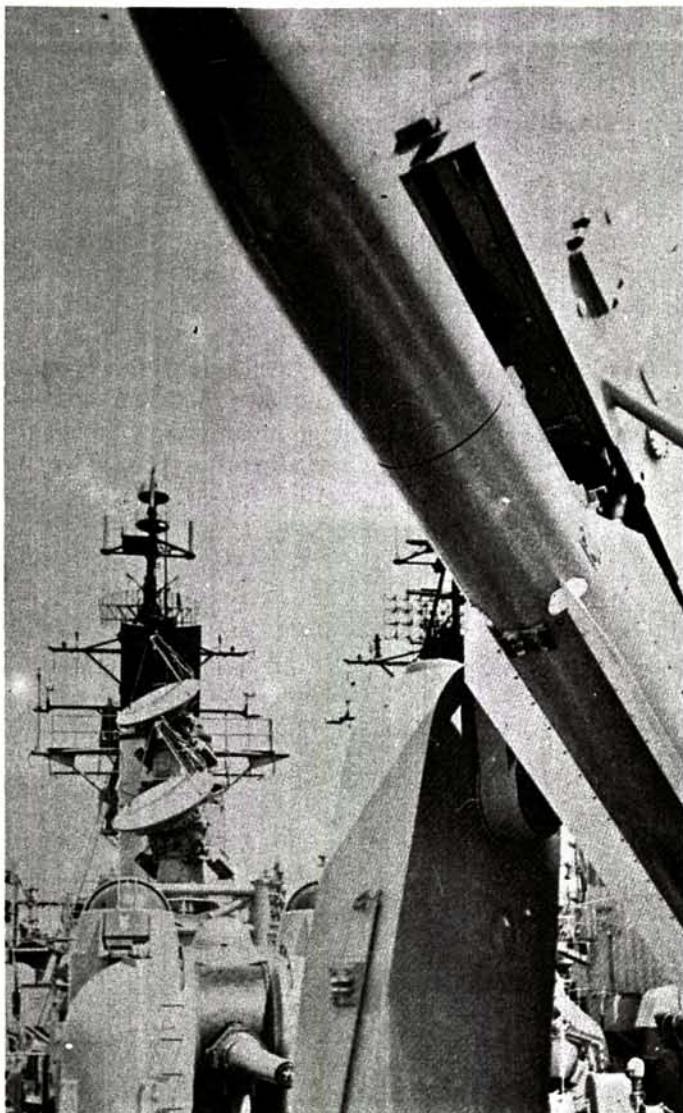
Για να αντιληφθούμε καλύτερα τη λειτουργία του συστήματος αυτού ας υποθέσουμε ότι η χαρακτηριστική σταθερά των ποτενσιομέτρων είναι $K = 100 \text{ V/ακτίνιο}$ και ότι η γυνιακή θέση του φορτίου είναι $\Phi_f = 0,5 \text{ ακτίνια}$. Η αντίστοιχη θέση του δρομέα B στο ποτενσιόμετρο δημιουργεί μια τάση $+50 \text{ V}$. Αν ο δρομέας A έχει μια θέση Φ_d που αντιστοιχεί σε $+50\text{V}$, το σήμα σφάλματος είναι $e = 100 \text{ V/ακτίν.} \times (0,5 - 0,5) \text{ ακτίνια} = 0\text{V}$. Η ροπή του σερβοκινητήρα είναι και αυτή μηδέν, έτσι δε το φορτίο παραμένει ακίνητο στη γυνιακή θέση $\Phi_f = 0,5 \text{ ακτίνια}$.

Αν τώρα θέλομε η θέση του φορτίου να γίνει $0,6 \text{ ακτίνια}$, το ποθετούμε το δρομέα A στη θέση που αντιστοιχεί σε $+60 \text{ V}$, ενώ η θέση του δρομέα B βρίσκεται στο σημείο των $+50\text{V}$. Η νέα κατάσταση δημιουργεί μια τάση σφάλματος $+10\text{V}$, που αντιπροσωπεύει την παρέκλιση της πραγματικής θέσεως του φορτίου από την επιθυμητή θέση. Το σήμα των 10V ενισχύεται κατάλληλα από τον ενισχυτή και εφαρμόζεται στο κύκλωμα διεγέρσεως της γεννήτριας, η οποία κινεί αντίστοιχα το σερβοκινητήρα και το φορτίο στη νέα θέση.

Οι εφαρμογές των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου θέσεως είναι πάρα πολλές.



Σχ. 3.1β.
Σύστημα εκτοξεύσεως και καθοδηγήσεως πυραύλου.



Σχ. 3.1γ.

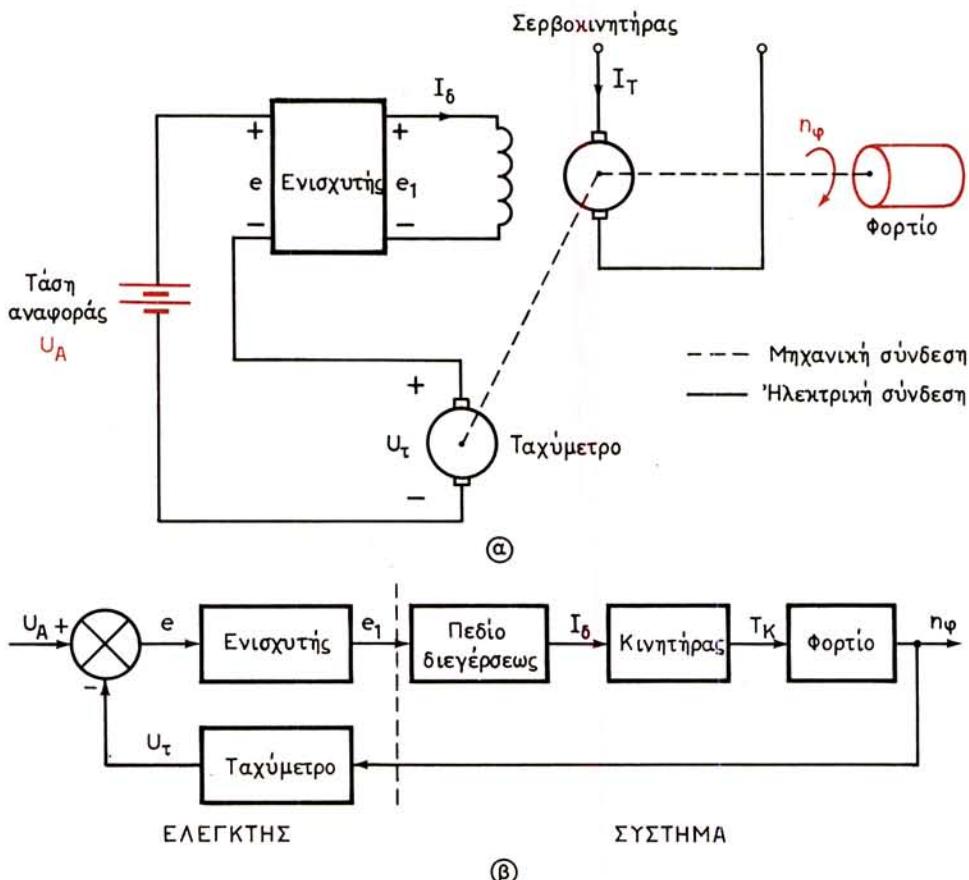
Σύστημα εκτοξεύσεως και καθοδηγήσεως πυραύλων πάνω σε φρεγάτα.

Μερικές από αυτές είναι οι αυτόματες εργαλειομηχανές, η ρύθμιση σταθερής τάσεως χαρτιού στις χαρτοβιομηχανίες, ο έλεγχος του πάχους ελασμάτων κατά την κυλινδροσυμπίεσή τους στις χαλυβδοβιομηχανίες, τα συστήματα παρακολουθήσεως κινητών στόχων με ραντάρ, τα συστήματα με τηλεκατευθυνόμενους πυραύλους κ.ά.

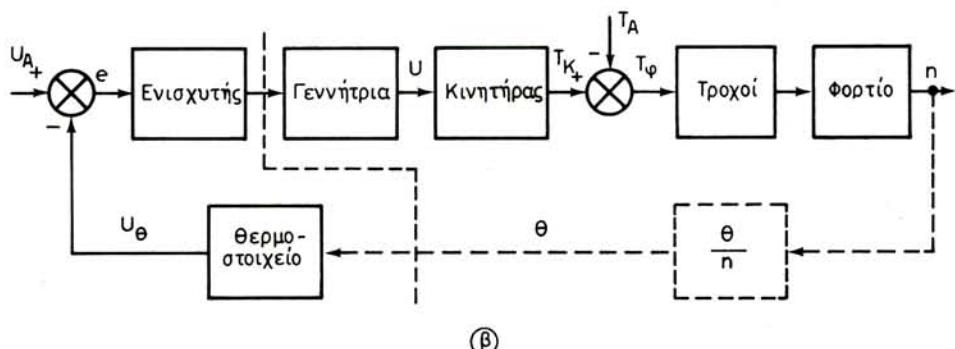
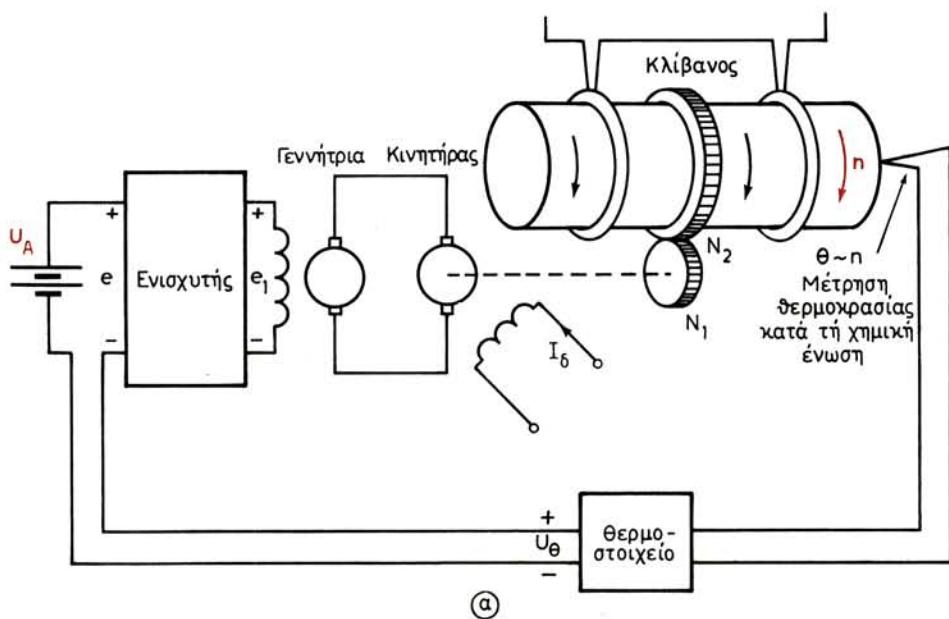
Στο σχήμα 3.1β παριστάνεται μια απλουστευμένη διάταξη συστήματος εκτοξεύσεως και τηλεκατευθύνσεως πυραύλου εναντίον αεροπλάνου, στο δε 3.1γ φαίνεται ένα σύστημα πάνω σε μια φρεγάτα.

3.2 Συστήματα αυτομάτου ελέγχου ταχύτητας.

Ένα απλό σύστημα αυτομάτου ελέγχου ταχύτητας είναι η διάταξη σερβομηχανισμού του σχήματος 3.2α. Στο παράδειγμα αυτό ο κινητήρας ΣΡ και το φορτίο αποτελούν το υπό έλεγχο σύστημα. Η ελεγχόμενη μεταβλητή ποσότητα (έξοδος), είναι η ταχύτητα περιστροφής του φορτίου. Η ταχύτητα αυτή μετράται από ένα ταχύμετρο (στοιχείο ανατροφοδοτήσεως), το οποίο παράγει μια τάση $U_T = K_T n$, ανάλογη με την πραγματική γωνιακή ταχύτητα n του φορτίου. Η τάση αυτή συγκρίνεται (αλγεβρικά αφαιρείται) με την τάση αναφοράς που αντιστοιχεί στην επιθυμητή ταχύτητα n_e . Η διαφορά των δυο τάσεων (σήμα σφάλματος) e , ενισχύεται από τον ενισχυτή σε μια μεγαλύτερη τάση, η οποία παράγει το ρεύμα διεγέρσεως I_d στον κινητήρα. Το ρεύμα αυτό ρυθμίζει την ταχύτητα του κινητήρα και κατά συ-



νέπεια του φορτίου. Ας υποθέσουμε ότι η επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής του φορτίου είναι 1.000 στροφές/λεπτό και ότι η ταχύτητα αυτή επιτυγχάνεται με μια τάση αναφοράς = 100 V. Υποθέτομε επίσης ότι η χαρακτηριστική σταθερά του ταχυμέτρου είναι $K_T = 0,01 \text{ V/στροφές}$ ανά λεπτό. Η τάση που παράγει το ταχύμετρο είναι $1.000 \times 0,01 = 10\text{V}$ και η τάση σφάλματος είναι $e = 100 - 10 = 90\text{V}$. Αν ξαφνικά ελαπτωθεί το φορτίο, η ταχύτητα του κινητήρα θα αυξηθεί. Επομένως θα μειωθεί η τάση σφάλματος, με επακόλουθη τη μείωση του ρεύματος διεγέρσεως του κινητήρα. Η μείωση του ρεύματος θα επιφέρει μείωση στη ροπή του κινητήρα, επομένως και στην ταχύτητα. Έτσι, η ταχύτητα τείνει να επανέλθει στην επιθυμητή της τιμή.



Σχ. 3.2β.

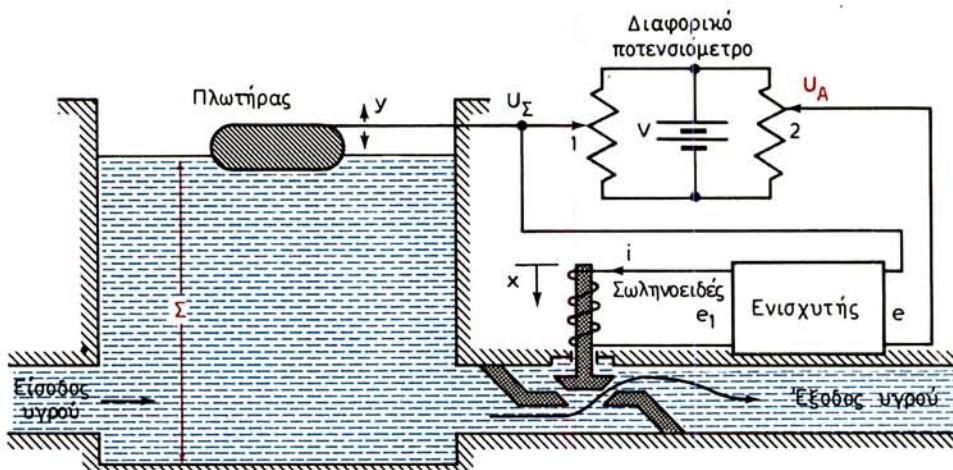
Βιομηχανικός κλίβανος για χημικές ενώσεις στερεών.

Μια εφαρμογή του ελέγχου ταχύτητας απαντάται στους βιομηχανικούς κλιβάνους, όπου γίνονται χημικές ενώσεις στερεών υλικών. Ανάλογα με την απαιτούμενη θερμοκρασία για κάποια χημική ένωση, ο κλίβανος περιστρέφεται με συγκεκριμένη ταχύτητα. Στο σχήμα 3.2β παρουσιάζεται η διάταξη και το λειτουργικό διάγραμμα ενός βιομηχανικού κλιβάνου.

Επειδή το φορτίο παρουσιάζει μεγάλη αδράνεια, χρησιμοποιείται σερβοκινητήρας ελεγχόμενος από την τάση του επαγωγικού τυμπάνου. Η εμφανιζόμενη ροπή διαταραχής υπάρχει στο στάδιο της εκκινήσεως, αλλά όταν η ταχύτητα φθάσει μια σταθερή τιμή, παύει να υφίσταται. Η πραγματική έξοδος του κλιβάνου είναι η θερμοκρασία θ των υλικών που παίρνουν μέρος στη χημική αντίδραση μέσα στον κλίβανο, η οποία όμως είναι ανάλογη προς την ταχύτητα περιστροφής π. Η θερμοκρασία αυτή μετράται από το θερμοστοιχείο και μετατρέπεται σε τάση U_θ η οποία με τη σειρά της συγκρίνεται (αλγεβρικά αφαιρέται) με την τάση αναφοράς U_A , που έχει κατάλληλα ρυθμισθεί, ώστε να αντιστοιχεί στην επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής, και κατά συνέπεια, στην επιθυμητή θερμοκρασία του χημικού μίγματος στον κλίβανο.

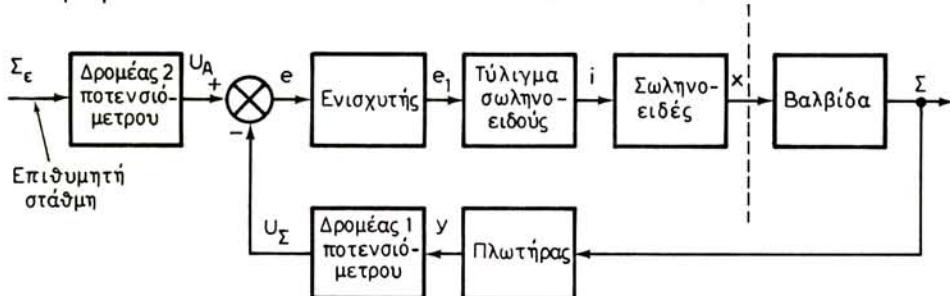
3.3 Συστήματα αυτομάτου ελέγχου στάθμης υγρού.

Στο κλασσικό σύστημα αυτομάτου ελέγχου στάθμης υγρού, του σχήματος 3.3α χρησιμοποιείται ένας πλωτήρας, ένα διαφορικό ποτενσιόμετρο, ένας ενισχυτής τάσεως και ένα σωληνοειδές σύστημα βαλβίδας ροής. Η επιθυμητή στάθμη του υγρού στη δεξαμενή Σ , αντιστοιχεί σε τάση αναφοράς U_Σ στο διαφορικό ποτενσιόμετρο. Όταν η πραγματική στάθμη του υγρού στη δεξαμενή είναι ίση με την επιθυμητή, ο πλωτήρας τοποθετεί το δρομέα του ποτενσιόμετρου στη θέση που αντιστοιχεί σε τάση $U_\Sigma = U_A$, με αποτέλεσμα η τάση σφάλματος $e = U_A - U_\Sigma$ να είναι ίση με το μηδέν. Με μηδενικό ρεύμα, το σωληνοειδές κλείνει τη βαλβίδα με το βάρος του πυρήνα που είναι συνδεμένος με το βάκτρο της βαλβίδας. Όταν η βαλβίδα κλείσει, η εκροή του υγρού σταματάει. Με εισροή



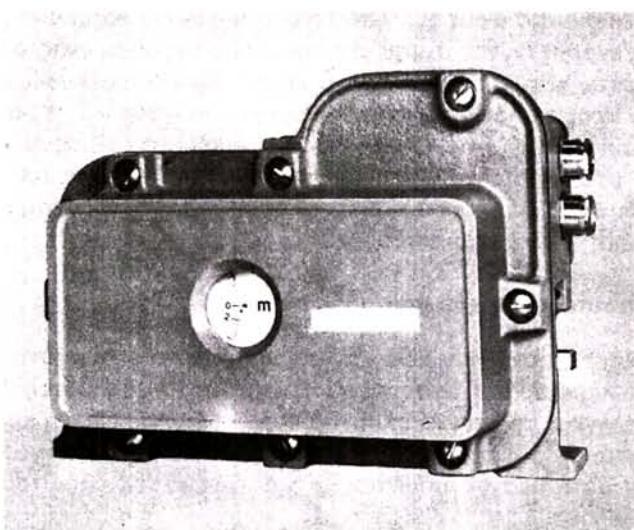
Σχ. 3.3α.
Αυτόματος ρυθμιστής στάθμης υγρού.

υγρού στην είσοδο της δεξαμενής, η στάθμη θα ανέβει πάνω από το επιθυμητό ύψος, ο πλωτήρας θα κινήσει ανάλογα το δρομέα του ποτενσιομέτρου, θα δημιουργηθεί μια τάση U_Δ μεγαλύτερη από την τάση αναφοράς U_A και η τάση σφάλματος ϵ που δεν θα είναι πια μηδέν, θα ενισχυθεί και θα ενεργοποιήσει το σωληνοειδές να ανοίξει τη βαλβίδα. Η εκροή ορισμένης ποσότητας υγρού από τη δεξαμενή θα επαναφέρει τη στάθμη της δεξαμενής στο επιθυμητό ύψος. Το λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος δίνεται στο σχήμα 3.3β, στο δε σχήμα 3.3γ φαίνεται ένας σύγχρονος μετρητής στάθμης, ο οποίος βασίζεται στη μέθοδο των ποτενσιομέτρων.



Σχ. 3.3β.

Λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος του σχήματος 3.3α.



Σχ. 3.3γ.

Μετρητής στάθμης με τη μέθοδο των ποτενσιομέτρων.

Η αυτόματη ρύθμιση της στάθμης υγρού μέσα σε μια δεξαμενή μπορεί να επιτευχθεί με τη ρύθμιση της εκροής του υγρού από μια οπή στον πυθμένα της δεξαμενής, όπως στη διάταξη του σχήματος 3.3δ. Όπως είναι γνωστό, η υδροστατική πίεση του υγρού στον πυθμένα της δεξαμενής είναι άμεσα ανάλογη με το ύψος της στάθμης του. Η ροή δε του υγρού στην έξοδο της δεξαμενής εξαρτάται από την υδροστατική πίεσή του στο σημείο της εξόδου και κατά συνέπεια από το ύψος της

Έστω ότι π.χ. επιθυμούμε η αναλογία Q_A προς Q_B να είναι 3,5 προς 1. Χρησιμοποιούμε τον ηλεκτρονικό αθροιστή, του σχήματος 3.4δ με την προδιαγράφη η έξοδός του να είναι ίση με μηδέν, όταν ο λόγος των δυο εισόδων του είναι ίσος με 3,5. Στη διάταξη αυτή η τάση εξόδου εκφράζεται ως

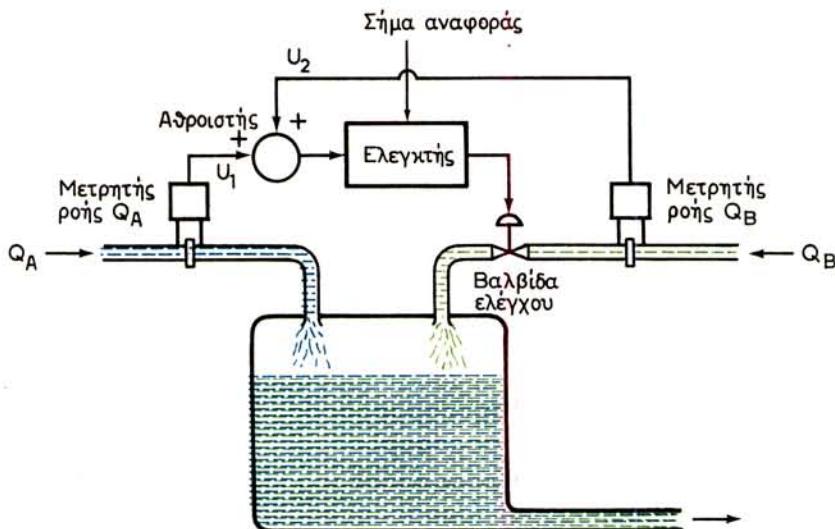
$$U_0 = -\frac{R}{R_1} U_1 - \frac{R}{R_2} U_2 \quad (3.1)$$

Όταν $U_0 = 0$ η σχέση (3.1) μας δίνει

$$\frac{U_1}{U_2} = -\frac{R_1}{R_2} \quad (3.2)$$

Αυτό σημαίνει ότι η μια τάση εισόδου πρέπει να είναι αρνητική (γιατί δεν μπορούμε να έχομε αρνητική αντίσταση), η δε σχέση μεταξύ των δυο αντιστάσεων πρέπει να είναι

$$R_1 = 3,5 R_2 \quad (3.3)$$



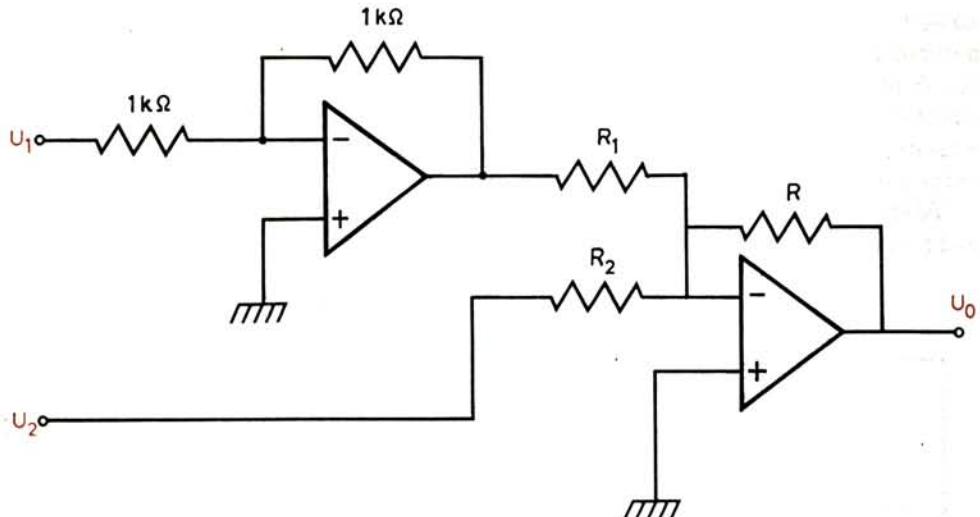
Σχ. 3.4γ.
Σύνθετο σύστημα ελέγχου ροής δύο υγρών.

Αφού δεν προδιαγράφεται η απολαβή του ενισχυτή μπορούμε να επιλέξουμε $R = R_1$. Έτσι η διάταξη του σχήματος 3.4δ ανταποκρίνεται στην αρχική μας απάτηση με $R = R_1 = 3,5 \text{ K}\Omega$ και $R_2 = 1 \text{ K}\Omega$. Σύμφωνα με τη σχέση (3.1), έχομε:

$$U_0 = -\left(\frac{3,5 \text{ K}\Omega}{3,5 \text{ K}\Omega}\right)(-U_1) - \left(\frac{3,5 \text{ K}\Omega}{1 \text{ K}\Omega}\right) U_2$$

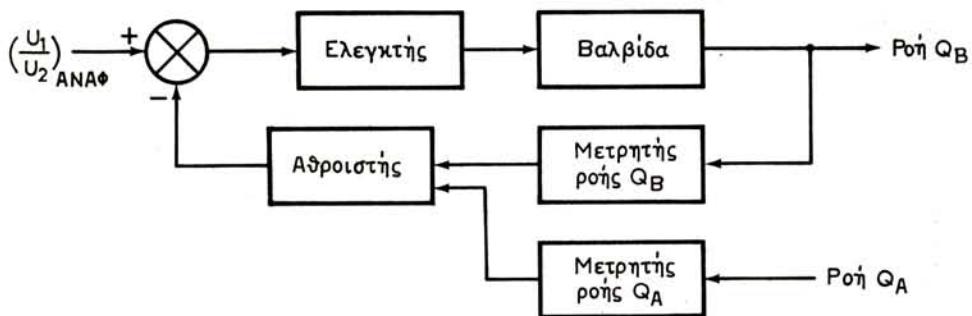
$$\text{ή } U_0 = U_1 - 3,5 U_2$$

που σημαίνει ότι, δταν $U_1 = 3,5 U_2$, η έξοδος $U_0 = 0$.



Σχ. 3.4δ.

Διάταξη ηλεκτρονικού αθροιστή για τη ρύθμιση του λόγου U_1/U_2 .



Σχ. 3.4ε.

Λειτουργικό διάγραμμα για το σύστημα του σχήματος 3.4γ.

Το λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του σχήματος 3.4γ δίνεται στο σχήμα 3.4ε.

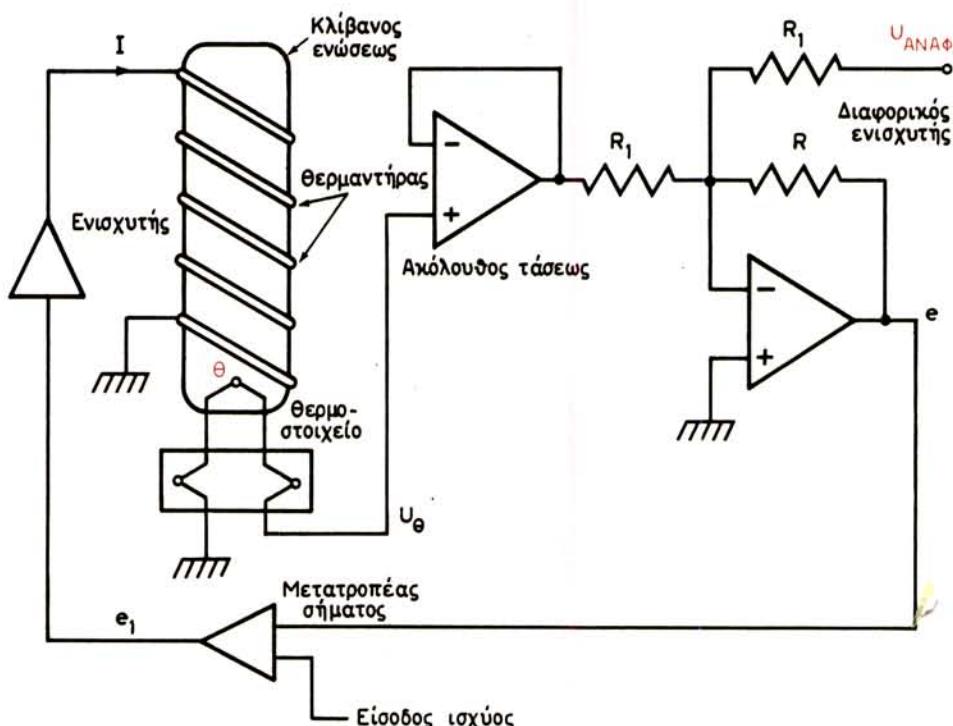
Όπως είδαμε στην παράγραφο 3.3 ένας άλλος τρόπος για τον έλεγχο ροής υγρού που προέρχεται από εκροή από δεξαμενή, είναι ο έλεγχος της στάθμης του υγρού μέσα στη δεξαμενή.

3.5 Συστήματα αύτομάτου έλέγχου θερμοκρασίας.

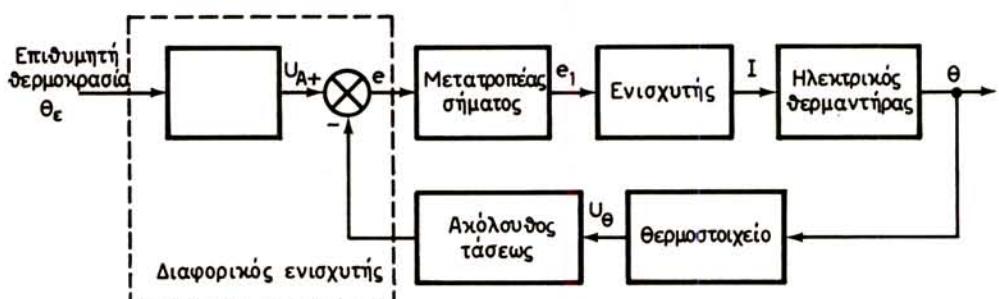
Σε βιομηχανικές έφαρμογές, η θερμοκρασία συνήθως έλέγχεται με την χρησιμοποίηση ηλεκτρικών θερμαντήρων, όπως π.χ. στο σύστημα του σχήματος 3.5α. Η θερμοκρασία θ στον κλίβανο, αύξομειώνεται με τον ηλεκτρικό θερμαντήρα, μετράται από το θερμοστοιχείο και μετατρέπεται σε σήμα τάσεως U_0 . Η τάση αυτή, δια μέσου του άκολουθου τάσης, συνδέεται με το διαφορικό ένισχυτή, όπου συγ-

κρίνεται άλγεβρικά με την τάση άναφοράς U_A , η οποία έχει ρυθμισθεί να αντιστοιχεί στην τιμή της έπιθυμητής θερμοκρασίας θ_e στον κλίβανο. Η έξοδος του διαφορικού ένισχυτή παποτελεί το σήμα σφάλματος e , το οποίο μετατρέπεται κατάλληλα, ένισχύεται και ένεργοποιεί τον ηλεκτρικό θερμαντήρα που ρυθμίζει τη θερμοκρασία στον κλίβανο. Το λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος αύτού φαίνεται στο σχήμα 3.5β.

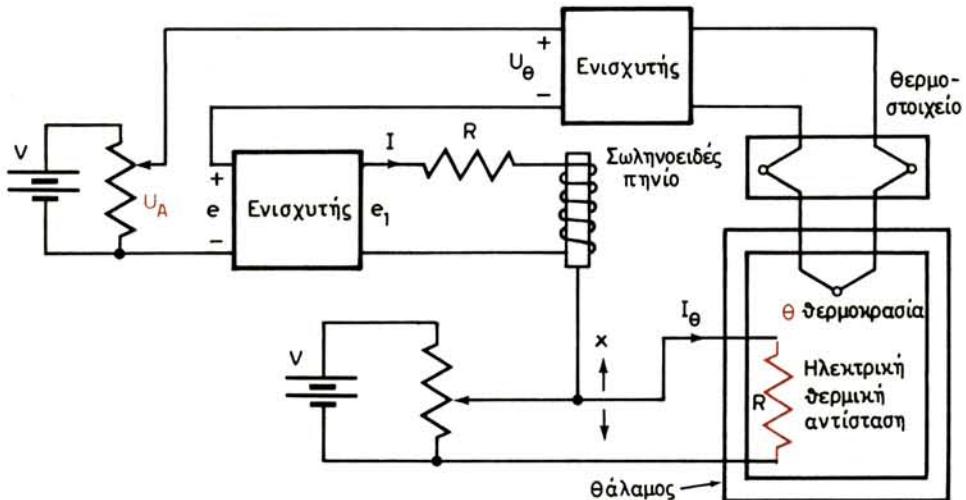
Άλλο παράδειγμα συστήματος αυτομάτου έλέγχου θερμοκρασίας για βιομηχανικές έφαρμογές είναι αύτό που άναλύθηκε στο πρώτο κεφάλαιο (παράγραφος



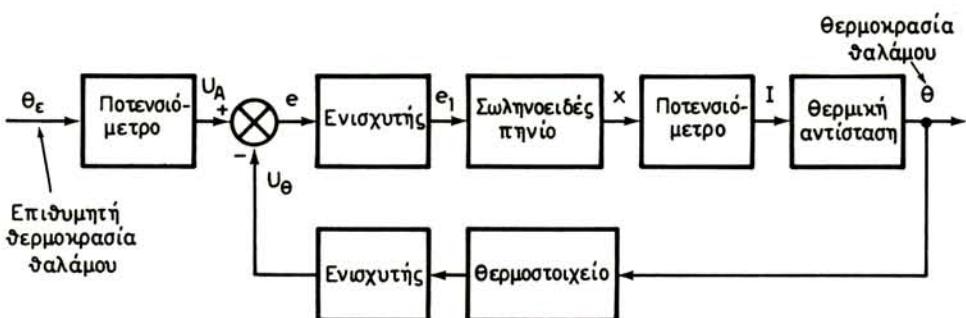
Σχ. 3.5α.
Σύστημα αυτομάτου ελέγχου θερμοκρασίας σε κλίβανο ενώσεως.



Σχ. 3.5β.
Λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου θερμοκρασίας του σχήματος 3.5α.



Σχ. 3.5γ.
Σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας βιομηχανικού θαλάμου.



Σχ. 3.5δ.
Λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος του σχήματος 3.5γ.

1.5) και που άφορά την αύτοματη ρύθμιση της θερμοκρασίας ύγρου μέσα σε δεξαμενή.

Μια άλλη έφαρμογή συστήματος αύτομάτου έλέγχου θερμοκρασίας παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5γ. Έδω έλέγχεται η θερμοκρασία ενός θαλάμου, δηλαδή ο διαμέσου των τοιχωμάτων του χάνει σταδιακά θερμότητα προς το έξωτερικό του περιβάλλον. Η θερμοκρασία του θαλάμου θ, μετράται άπό το θερμοστοιχείο, μετατρέπεται σε τάση και ένισχύεται στην τιμή U_θ , η οποία στη συνέχεια συγκρίνεται άλγεβρικά με την τάση και άναφοράς U_A στο ποτενσιόμετρο. Η διαφορά $e = U_A - U_\theta$ είναι το σήμα σφάλματος, το οποίο ένισχύεται σε τάση e_1 . Η τάση αύτή δημιουργεί ρεύμα I που κυκλοφορεί στο τύλιγμα του σωληνοειδούς πηνίου και κινεί τον πυρήνα προς τα πάνω ή κάτω, και συμπαρασύρει το δρομέα του ποτενσιόμετρου, δηλαδή ρυθμίζει το ρεύμα I_θ που κυκλοφορεί στη θερμική άντισταση του θαλάμου. Με τον τρόπο αύτό αύξομειώνεται άναλογα η θερμότητα

στο θάλαμο και διατηρείται ή έπιθυμητή θερμοκρασία θ_ε. Στο σχήμα 3.56 παρουσιάζεται το λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος.

Άλλες, μη βιομηχανικές έφαρμογές συστημάτων έλεγχου θερμοκρασίας είναι αύτές που άφορούν τα συστήματα κλιματισμού (κεντρικά ή τοπικά) και τα συστήματα οικιακών συσκευών (ήλεκτρικά ψυγεία, θερμάστρες κ.ά.). Τα συστήματα αύτά δεν διαφέρουν πολύ μεταξύ τους και η σχεδίαση των διατάξεων και των λειτουργικών διαγραμμάτων τους προτείνεται ώς άσκηση για το μαθητή.

3.6 Αυτοματισμοί για την έκκινηση, τον έλεγχο λειτουργίας και την προστασία κινητήρων.

Για τη λειτουργία κινητήρων ΣΡ ή ΕΡ χρησιμοποιούμε ένα σύνθετο κύκλωμα, που άποτελείται από δύο βασικά κυκλώματα:

- α) Κυκλώματα Ισχύος και
- β) κυκλώματα έλεγχου.

Τα πρώτα χρησιμεύουν για την τροφοδότηση των άκροδεκτῶν του κινητήρα με ήλεκτρική ένέργεια. Για να ξεχωρίζουμε τα κυκλώματα αύτά από τα κυκλώματα έλεγχου, συνήθως τα σχεδιάζουμε με παχύτερες γραμμές. Στο βιβλίο αύτό τα παρουσιάζουμε με κόκκινες γραμμές.

Τα κυκλώματα έλεγχου έλεγχουν τη μεταφορά της ισχύος από την τροφοδοτική πηγή στο φορτίο, που στην περίπτωση αυτή είναι ο κινητήρας. Στο βιβλίο αύτό τα παρουσιάζουμε με μπλε γραμμές.

3.6.1 Αυτοματισμοί εκκινήσεως κινητήρων ΣΡ.

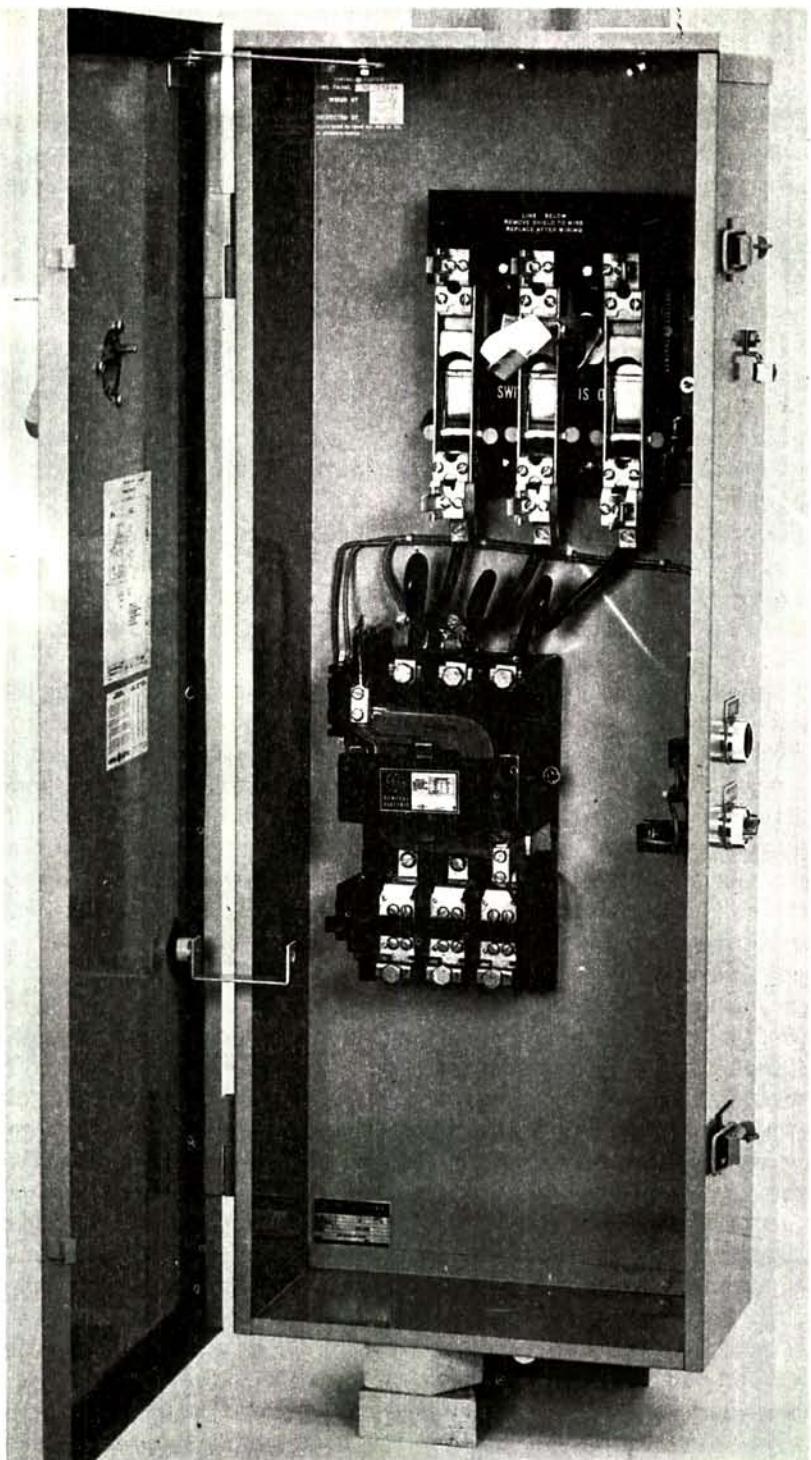
Οι αυτοματισμοί εκκινήσεως κινητήρων ΣΡ επιδιώκουν να απαλλάξουν το χειριστή από τη χειροκίνητη εκκίνηση. Παρ' όλο που η εκκίνηση κινητήρων με το χέρι έχει σε μερικές περιπτώσεις ορισμένα πλεονεκτήματα, τα πλεονεκτήματα της αυτόματης εκκινήσεως είναι σημαντικότερα:

- α) Οι αυτόματοι εκκινητές απαλλάσσουν το χειριστή από τη μεγάλη φυσική καταπόνηση κατά τη διάρκεια διαδοχικών κύκλων εκκινήσεως - σταματήματος των κινητήρων.
- β) Με τους αυτόματους εκκινητές δεν χρειάζεται φυσική δύναμη από πλευράς χειριστή. Οι τυχόν επεμβάσεις περιορίζονται μόνο στο πάτημα κουμπιών.
- γ) Ο χειριστής και ο σταθμός έλεγχου της λειτουργίας των κινητήρων μπορούν να βρίσκονται μακριά από τις μηχανές και επομένως σε ασφαλές σημείο σε περίπτωση ατυχήματος.
- δ) Ο κίνδυνος για εσωτερικές βλάβες είναι μικρότερος με αυτόματους εκκινητές. Επίσης, οι απαιτήσεις αερισμού είναι μικρότερες.
- ε) Δεν υπάρχει ο κίνδυνος του ανθρώπινου σφάλματος. Επίσης ο κινητήρας είναι δυνατό να τεθεί σε κίνηση ακόμη και από ένα σχετικά άπειρο χειριστή σε ελάχιστο χρονικό διάστημα.

Στο σχήμα 3.6α φαίνεται ένα σύστημα αυτόματης εκκινήσεως και προστασίας κινητήρων.

Όπως σε όλους τους αυτοματισμούς, έτσι και στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο μορφές λειτουργίας:

- ανοικτού βρόχου (χωρίς ανατροφοδότηση) και



Σχ. 3.θα.

Αυτόματο σύστημα εκκινήσεως και προστασίας κινητήρων.

— κλειστού βρόχου (με ανατροφοδότηση).

Οι αυτόματοι εκκινητές της πρώτης κατηγορίας λέγονται **εκκινητές επιταχύνσεως καθορισμένου χρόνου** (definite - time - acceleration starter) και της δεύτερης **εκκινητές επιταχύνσεως με περιορισμό ρεύματος** (current - limit - acceleration starter).

Ένα παράδειγμα αυτομάτου εκκινητή ανοικτού βρόχου φαίνεται στο σχήμα 3.6β. Ο κινητήρας με παράλληλη διέγερση δεν είναι δυνατό να τεθεί σε κίνηση κατ' ευθείαν από τις τροφοδοτικές γραμμές ΤΓ1 και ΤΓ2. Έτσι, το επαγωγικό τύμπανο (ET) επιταχύνεται με τη βοήθεια μιας κοχλιωτής αντιστάσεως η οποία συνδέεται μάζι του σε σειρά και τίθεται, όπως θα δούμε, σε λειτουργία βαθμιαία, σε τρία στάδια.

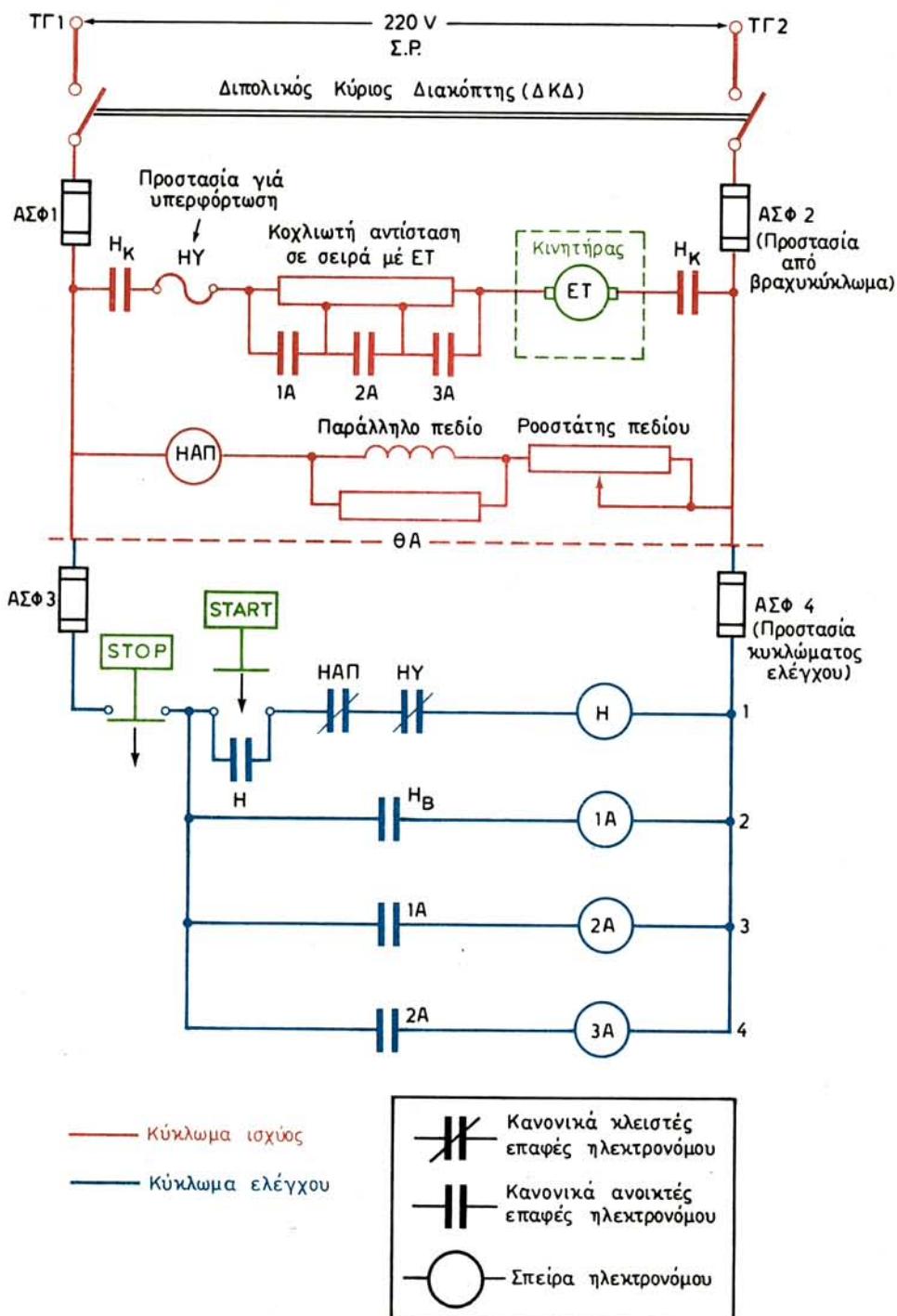
Η προστασία από βραχυκυκλώματα παρέχεται από τις ασφάλειες ΑΣΦ 1, 2, 3 και 4 και η προστασία από υπερφόρτωση επιτυγχάνεται με τους ηλεκτρονόμους υπερφορτώσεως (HY).

Οι τροφοδοτικές γραμμές ΤΓ1 και ΤΓ2 συνδέονται με το κύκλωμα ισχύος (κόκκινες γραμμές) μέσω προστατευτικών ασφαλειών ΑΣΦ1 και ΑΣΦ2. Η σπείρα εκκίνησεως του ηλεκτρονόμου Η διατηρεί ανοικτή και από τις δύο πλευρές, τη γραμμή που συνδέει τις τροφοδοτικές γραμμές με το ET του κινητήρα, όταν ο διπολικός κύριος διακόπτης ΔΚΔ είναι κλειστός.

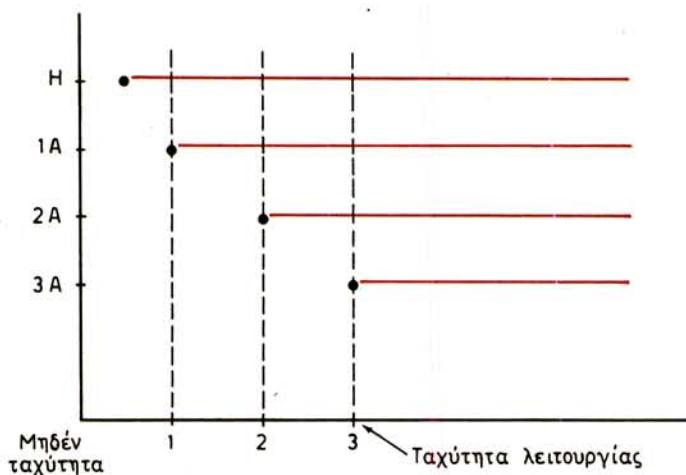
Ο κινητήρας τίθεται σε κίνηση με την πίεση του κουμπιού εκκίνησης (START). Οι κύριες επαφές του ηλεκτρονόμου Η_κ, που κανονικά είναι ανοικτές, και η βοηθητική επαφή Η_Β κλείνουν και επιτρέπουν τη ροή ενέργειας στις γραμμές του κυκλώματος 1 και 2 και στο κύκλωμα του επαγωγικού τυμπάνου, όπου παρεμβάλλεται δόλη η κοχλιωτή αντίσταση. Όταν κλείσει ο διακόπτης ΔΚΔ ενεργοποιείται το κύκλωμα του μαγνητικού πεδίου για να δώσει κίνηση στον κινητήρα με την ενεργοποίηση ολόκληρου του πεδίου. (Το κύκλωμα ενός επαγωγικού πεδίου χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να δημιουργήσει τη μέγιστη μαγνητική ροή από το χρόνο που χρειάζεται για τον ίδιο σκοπό το κύκλωμα του επαγωγικού τυμπάνου το οποίο έχει υψηλή αντίσταση).

Το επαγωγικό τύμπανο αρχίζει να περιστρέφεται με μια επιτάχυνση, η διάρκεια της οποίας εξαρτάται από τον ηλεκτρονόμο 1Α (τύπου αποσβεστήρα ταλαντώσεων dashpot) που λειτουργεί με κάποια χρονική καθυστέρηση. Μετά από αυτή τη χρονική καθυστέρηση ο ηλεκτρονόμος 1Α κλείνει τις επαφές του (οι οποίες στην κανονική τους κατάσταση είναι ανοικτές), βραχυκυκλώνοντας το ένα τρίτο της αντιστάσεως σε σειρά με το ET, και ταυτόχρονα ενεργοποιεί τη γραμμή 3 του κυκλώματος ελέγχου. Μετά από μια ίσης διάρκειας καθυστέρηση, ο ηλεκτρονόμος 2Α κλείνει τις επαφές του, βραχυκυκλώνοντας ακόμη ένα τρίτο της συνολικής κοχλιωτής αντιστάσεως και ταυτόχρονα ενεργοποιεί τη γραμμή 4 του κυκλώματος ελέγχου. Μετά από μια ίση χρονική καθυστέρηση, ο ηλεκτρονόμος 3Α κλείνει τις επαφές του βραχυκυκλώνοντας και το υπόλοιπο ένα τρίτο της αντιστάσεως. Με την τελευταία δράση ο κινητήρας επιταχύνεται πια στην τελική του ταχύτητα.

Κάθε φορά που αφαιρείται ένα τμήμα της αντιστάσεως με τον παραπάνω τρόπο από το κύκλωμα του ET, το ET αναπτύσσει περισσότερο ρεύμα και ροπή, με αποτέλεσμα να επιταχύνεται σε μεγαλύτερη ταχύτητα, παράγοντας ταυτόχρονα μεγαλύτερη αντηλεκτρεγερτική δύναμη. Η σειρά μὲ την οποία ενεργοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι παρουσιάζεται στο απλοποιημένο σχήμα 3.6γ. Πριν πιέσουμε το κουμπί εκκίνησεως, κανένας ηλεκτρονόμος δεν έχει ενεργοποιηθεί. Όταν πιέσουμε



Σχ. 3.6β.
Εκκινητής κινητήρα ΣΡ ανοικτού κυκλώματος.



Σχ. 3.8γ.
Σειρά χρονικών καθυστέρησεων των ηλεκτρονόμων.

το κουμπί, ενεργοποιείται πρώτα ο ηλεκτρονόμος H , και ακολουθείται από τους ηλεκτρονόμους $1A$, $2A$ και $3A$ με προκαθορισμένη καθυστέρηση. Όταν ο κινητήρας αποκτήσει τη προκαθορισμένη κανονική ταχύτητα, οι τέσσερις ηλεκτρονόμοι έχουν ενεργοποιηθεί. Όταν, στη συνέχεια, πατήσουμε το κουμπί STOP για να σταματήσει ο κινητήρας, δύοι οι ηλεκτρονόμοι αποενεργοποιούνται ταυτόχρονα και επιστρέφουν στην κανονική τους κατάσταση με τις επαφές τους ανοικτές.

Όπως δείχνει το σχήμα 3.6β στο σύστημα εκκινήσεως υπάρχουν δύο πρόσθετα προστατευτικά εξαρτήματα. Το ένα είναι η αντίσταση ΘΑ (thyrite resistance), η οποία έχει υψηλή τιμή όταν η τάση είναι χαμηλή και μικρή τιμή όταν η τάση είναι υψηλή. Έτσι, όταν ανοίγομε τον κύριο διακόπτη ΔΚΔ ή τις επαφές του ηλεκτρονόμου H , η τάση που εφαρμόζεται στο πεδίο καταναλώνεται από αυτή την αντίσταση και όχι από τις επαφές του διακόπτη ή του ηλεκτρονόμου. Το άλλο προστατευτικό εξάρτημα ΗΑΠ είναι ένας ηλεκτρονόμος απώλειας πεδίου (field - loss relay), που προστατεύει τον κινητήρα σε περίπτωση που θα χαθεί το πεδίο, όταν π.χ. κοπεί το τύλιγμα ή χαλάσει ο ροοστάτης του πεδίου. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει κίνδυνος να καταστραφεί ο κινητήρας από υπερβολική ταχύτητα (runaway). Έτσι, ο ηλεκτρονόμος αυτός απενεργοποιεί τις επαφές του στη γραμμή 1 του κυκλώματος ελέγχου (οι οποίες στην κανονική τους κατάσταση είναι κλειστές) και τις ανοίγει όταν ο κύριος διακόπτης ΔΚΔ είναι κλειστός. Ο κινητήρας μπορεί να σταματήσει με τους εξής τρόπους:

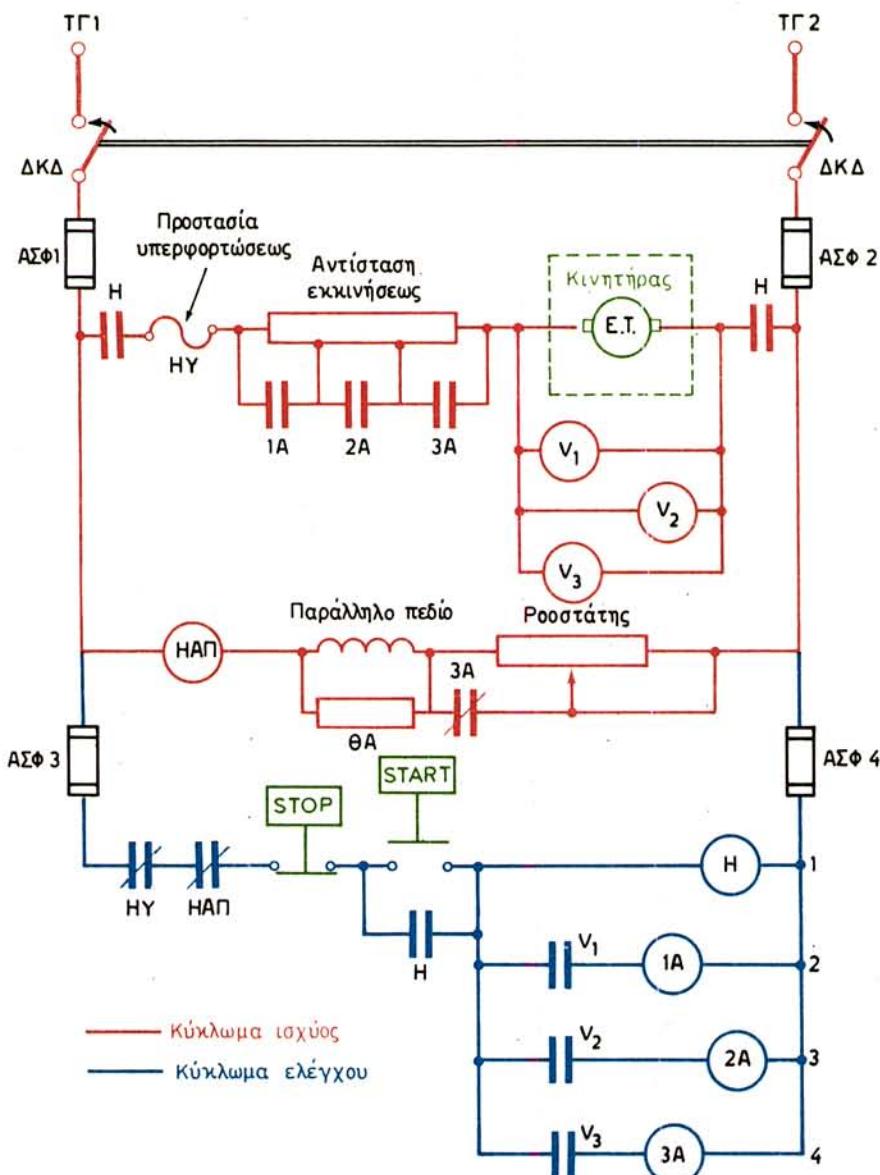
- Πιέζοντας το κουμπί STOP.
- Ανοίγοντας τον κύριο διακόπτη ΔΚΔ.
- Διατηρώντας κατάσταση υπερφορτώσεως (overload) για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να λειτουργήσει ο θερμικός ηλεκτρονόμος υπερφορτίσεως ΗΥ ανοίγοντας τις επαφές του στη γραμμή 1, οι οποίες κανονικά είναι κλειστές.
- Ανοίγοντας το κύκλωμα πεδίου, οπότε ο ηλεκτρονόμος ΗΑΠ, του οποίου οι

- επαφές είναι κλειστές όταν ο ΔΚΔ είναι κλειστός. Θα ανοίξει τις επαφές του.
- ε. Με βραχυκύκλωμα στα κυκλώματα του ΕΤ ή του πεδίου, οπότε θα ανοίξουν οι ασφάλειες ΑΣΦ1 και ΑΣΦ2.
- στ. Με βραχυκύκλωμα σε οποιεσδήποτε από τις παράλληλες γραμμές ελέγχου, οπότε θα ανοίξουν οι ασφάλειες ΑΣΦ3 και ΑΣΦ4.
- ζ. Με χαμηλότερη από την κανονική τάση (*undervoltage*), οπότε η σπείρα του ηλεκτρονόμου Η θα απενεργοποιηθεί.
- η. Από ελαπτωματικές ή καταστρεμμένες επαφές των ηλεκτρονόμων και κυρίως του Η.

Οι εκκινητές ανοικτού βρόχου (χωρίς ανατροφοδότηση) έχουν το μειονέκτημα ότι η χρονική σειρά της διαδικασίας εκκινήσεως είναι ανεξάρτητη από το φορτίο ρεύματος και την ταχύτητα του κινητήρα. Έτσι, όταν ο κινητήρας είναι υπερφορτωμένος, μπορεί να επιταχυνθεί πάρα πολύ γρήγορα. Αντίθετα, όταν ο κινητήρας έχει μικρό ή καθόλου φορτίο η εκκίνησή του πάρνει πολύ χρόνο και χάνεται έτσι πολύτιμος χρόνος εις βάρος της βιομηχανικής παραγωγής.

Το μειονέκτημα αυτό αντιμετωπίζεται με την εισαγωγή ανατροφοδότησεως, η οποία επιτυγχάνεται με τη σύνδεση «αισθητήριων» ηλεκτρονόμων V_1 , V_2 και V_3 παράλληλα με το επαγωγικό τύμπανο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6δ. Οι επαφές V_1 , V_2 , V_3 , είναι κανονικά ανοικτές και ελέγχουν τη χρονική σειρά με την οποία ενεργοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι των γραμμών ελέγχου 2,3 και 4. Η βασική διαφορά μεταξύ εκκινητών ανοικτού και κλειστού βρόχου είναι ότι, στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούμε μια προκαθορισμένη χρονική σειρά ενεργοποιήσεως των ηλεκτρονόμων στο κύκλωμα ισχύος, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η σειρά αυτή δεν είναι προκαθορισμένη αλλά καθορίζεται με ανατροφοδότηση από τους «αισθητήριους» ηλεκτρονόμους, ανάλογα με τη στιγμιαία κατάσταση του κινητήρα. Ο εκκινητής με ανατροφοδότηση πού φαίνεται στο σχήμα 3.6δ καί λέγεται **εκκινητής επιταχύνσεως μέ περιορισμό ρεύματος**, λειτουργεί ως εξής:

- Πιέζοντας τό κουμπί START ξεκινάει ο κινητήρας με εφαρμογή όλου του πεδίου και εισαγωγή όλης της αντιστάσεως σε σειρά με το Ε.Τ., μόλις κλείσουν οι κύριες και βοηθητικές επαφές Η. Ο κινητήρας επιταχύνεται από την πλήρη ακινησία, με μέγιστη τάση στην αντίσταση και σχεδόν μηδενική τάση στο Ε.Τ. Με την επιτάχυνση του Ε.Τ., η δημιουργούμενη αντηλεκτρεγερτική δύναμη και η τάση στο Ε.Τ. αυξάνουν με την ταχύτητα ($E_a = K\Phi t$). Ο ηλεκτρονόμος V_1 , σχεδιασμένος να κλείνει τις κανονικά ανοικτές επαφές του με την εφαρμογή του 50% της μέγιστης τάσης, δεν κλείνει και επομένως ο κινητήρας επιταχύνεται μέχρι που η ταχύτητα, με ολόκληρη τη μαγνητική ροή του πεδίου, αναπτύσσει αντηλεκτρεγερτική δύναμη τουλάχιστο αυτής της τιμής. Επιπλέον για να φθάσει η αντηλεκτρεγερτική δύναμη αυτή την τιμή, το ρεύμα πρέπει να περιορισθεί αρκετά, ώστε να μειωθεί η τάση στην αντίσταση εκκινήσεως και επομένως να αυξηθεί η τάση στο Ε.Τ.
- Όταν ο ηλεκτρονόμος V_1 κλείσει τις επαφές του στη γραμμή 2 του κυκλώματος ελέγχου, ο ηλεκτρονόμος ελέγχου 1A ενεργοποιείται, βραχυκύκλωντας το πρώτο κομμάτι της αντιστάσεως εκκινήσεως. Το ρεύμα αυξάνεται, ο κινητήρας επιταχύνεται και αναπτύσσεται μεγαλύτερη αντηλεκτρεγερτική δύναμη. Όταν φθάσει στο 70% της μέγιστης τιμής της, ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος V_2 .



Σχ. 3.86.
Εκκινητής κινητήρων ΣΡ με ηλεκτρονόμους Α.Η.Ε.Δ.

3. Όταν ο ηλεκτρονόμος V_2 κλείσει τις επαφές του στη γραμμή 3 του κυκλώματος ελέγχου, ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος 2Α, βραχυκυκλώνοντας και το δεύτερο κομμάτι της αντιστάσεως εκκίνησεως. Η αύξηση του ρεύματος επιταχύνει ακόμη τον κινητήρα, αναπτύσσοντας μεγαλύτερη αντηλεκτρεγερτική δύναμη. Όταν αυτή φθάσει το 85% της μέγιστης τιμής της, ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος V_3 .

4. Όταν ο ηλεκτρονόμος V_3 κλείσει τις επαφές του στη γραμμή 4 του κυκλώματος ελέγχου, ο ηλεκτρονόμος ελέγχου 3A βραχυκυκλώνει και το τελευταίο κομμάτι της αντιστάσεως εκκινήσεως και ταυτόχρονα ανοίγει το ροοστάτη του πεδίου για την επίτευξη της προκαθορισμένης ταχύτητας. Έτσι, ο κινητήρας επιταχύνεται για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του φορτίου, με το επαγγεικό τύμπανο απ' ευθείας συνδεδεμένο με τις τροφοδοτικές γραμμές.

3.6.2 Αυτοματισμοί εκκινήσεως κινητήρων EP.

Όπως και οι διατάξεις εκκινήσεως κινητήρων SP, και τα συστήματα εκκινήσεως κινητήρων EP διακρίνονται σε συστήματα ελέγχου ανοικτού βρόχου και σε συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου. Γενικά, τα συστήματα ανοικτού βρόχου χρησιμοποιούνται συχνότερα σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Τα περισσότερα από τα συστήματα εκκινήσεως κινητήρων EP, χρησιμοποιούν ηλεκτρονόμους EP οι οποίοι βασίζονται στις ίδιες αρχές λειτουργίας των ηλεκτρονόμων SP. Σε πολλά συστήματα όμως χρησιμοποιούνται **επαφείς** (contactors) επιταχύνσεως και ελέγχου SP, λόγω του πλεονεκτήματος ότι έχουν ισχυρότερο και ασφαλέστερο μαγνητικό κλείσιμο και μικρότερη πιθανότητα για κραδασμούς.

Στα κυκλώματα ελέγχου συνηθίζεται επίσης η χρησιμοποίηση χαμηλότερων τάσεων κατά την εκκίνηση κινητήρων EP που λειτουργούν με υψηλές τάσεις. Στις περιπτώσεις αυτές στο κύκλωμα ελέγχου χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές οι οποίοι μειώνουν την τάση σε 220V.

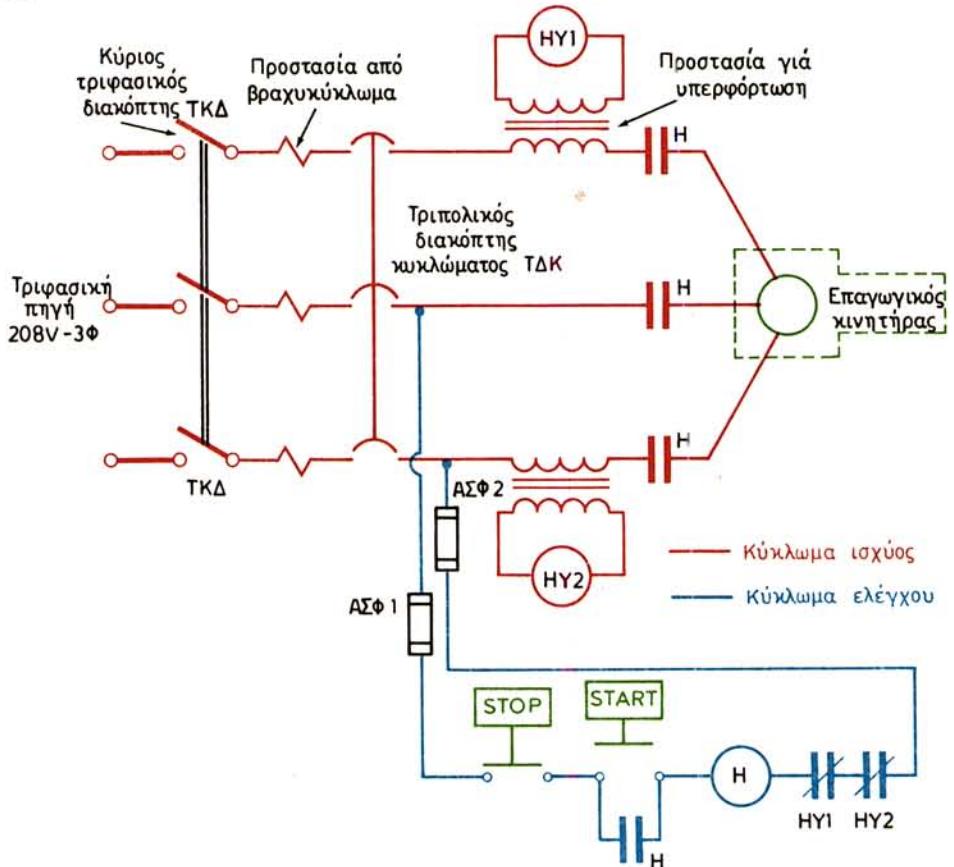
Ένας απλός αυτοματισμός εκκινήσεως για κινητήρες EP χωρίς ανατροφοδότηση, φαίνεται στο σχήμα 3.6. Υπάρχουν δύο βασικά κυκλώματα:

- το κύκλωμα ελέγχου (με μπλέ γραμμές) που τροφοδοτείται μέσω των ασφαλειών ΑΣΦ1 και ΑΣΦ2 και
- το τριφασικό κύκλωμα ισχύος (με κόκκινες γραμμές), που τροφοδοτείται μέσω του κύριου τριφασικού διακόπτη ΤΚΔ και του τριπολικού διακόπτη κυκλώματος ΤΔΚ.

Το κύκλωμα ελέγχου ενεργοποιείται όταν κλείσουν οι δύο παραπάνω διακόπτες ΤΚΔ και ΤΔΚ, και πιέσομε το κουμπί εκκινήσεως START. Ενεργοποιείται τότε ο ηλεκτρονόμος H που κλείνει τις επαφές του στις τροφοδοτικές γραμμές ισχύος και στο κύκλωμα ελέγχου. Με τον τρόπο αυτό ο ηλεκτρονόμος H εξασφαλίζει στο κύκλωμα προστασία από χαμηλότερες του κανονικού τάσεις στις τροφοδοτικές γραμμές και ενεργεί ως τριπολικός διακόπτης στις τροφοδοτικές γραμμές και ως διακόπτης του κινητήρα, είτε με το χέρι είτε αυτόμata, σε περίπτωση υπερφορτώσεως.

Η εκκίνηση του κινητήρα πραγματοποιείται με την πίεση του κουμπιού START, το οποίο κλείνει τις επαφές του ηλεκτρονόμου H. Η βοηθητική επαφή στο κύκλωμα ελέγχου χρησιμεύει για να διατηρεί το κύκλωμα κλειστό, όταν παύσομε να πιέζομε το κουμπί START. Η εκκίνηση δηλαδή γίνεται με απ' ευθείας σύνδεση του κινητήρα και όλων των προστατευτικών συσκευών στις τροφοδοτικές γραμμές. Ο κινητήρας μπορεί να σταματήσει με ένα από τους παρακάτω τρόπους:

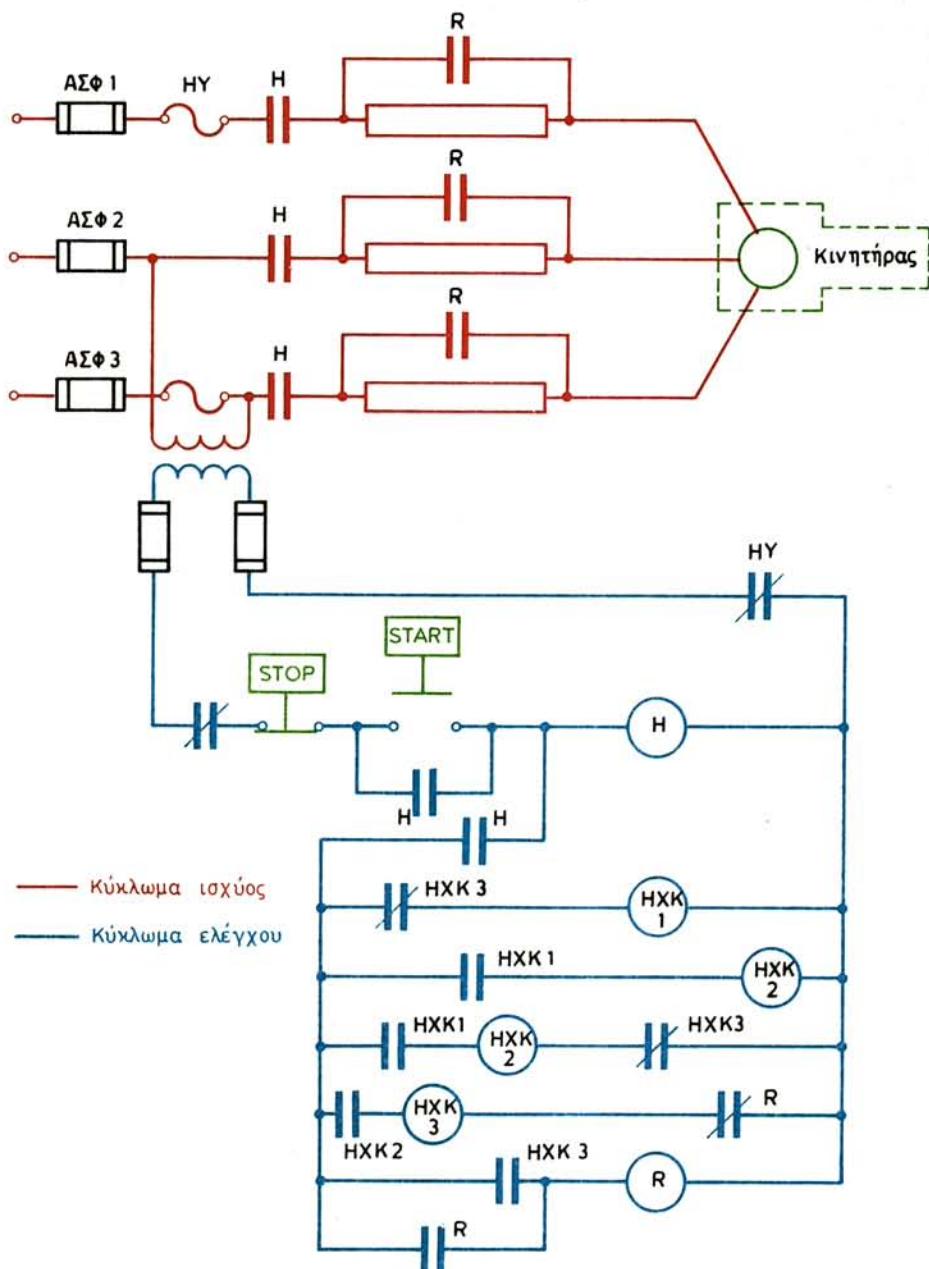
1. Με πίεση του κουμπιού STOP.
2. Όταν υπάρχει κατάσταση υπερφορτώσεως ενεργοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι HY1 και HY2 που ανοίγουν τις επαφές τους στο κύκλωμα ελέγχου και



Σχ. 3.8ε.
Αυτοματισμός εκκίνησεως κινητήρα EP.

απενεργοποιείται η σπείρα του ηλεκτρονόμου Η που ανοίγει τις επαφές του στις τροφοδοτικές γραμμές.

3. Όταν βραχυκυκλωθεί ο κινητήρας, οι σπείρες του ΤΔΚ τον αποσυνδέουν από τις τροφοδοτικές γραμμές. Ταυτόχρονα απενεργοποιείται η σπείρα του ηλεκτρονόμου Η, ο οποίος επαναφέρει τις επαφές του στις κανονικές τους θέσεις.
4. Ύπαρξη βραχυκυκλώματος ή υπερφορτώσεως στο κύκλωμα ελέγχου προκαλεί άνοιγμα των ασφαλειών ΑΣΦ1 και ΑΣΦ2.
5. Όταν η τάση παραμένει χαμηλότερη του κανονικού, η σπείρα του Η απενεργοποιείται.
6. Άνοιγμα του κεντρικού διακόπτη ΤΚΔ.
7. Όταν ο κινητήρας γίνει μονοφασικός (από ελαπτωματική επαφή του Η), δημιουργείται υπερφόρτωση ($\sqrt{3}$ φορές το κανονικό ρεύμα φορτίου). Έτσι ενεργοποιούνται οι δύο ηλεκτρονόμοι υπερφορτώσεως HY1 και HY2, οι οποίοι ανοίγουν τις επαφές τους στο κύκλωμα ελέγχου και αναγκάζουν τον κύριο ηλεκτρονόμο Η να ανοίξει τις επαφές του στις τροφοδοτικές γραμμές.



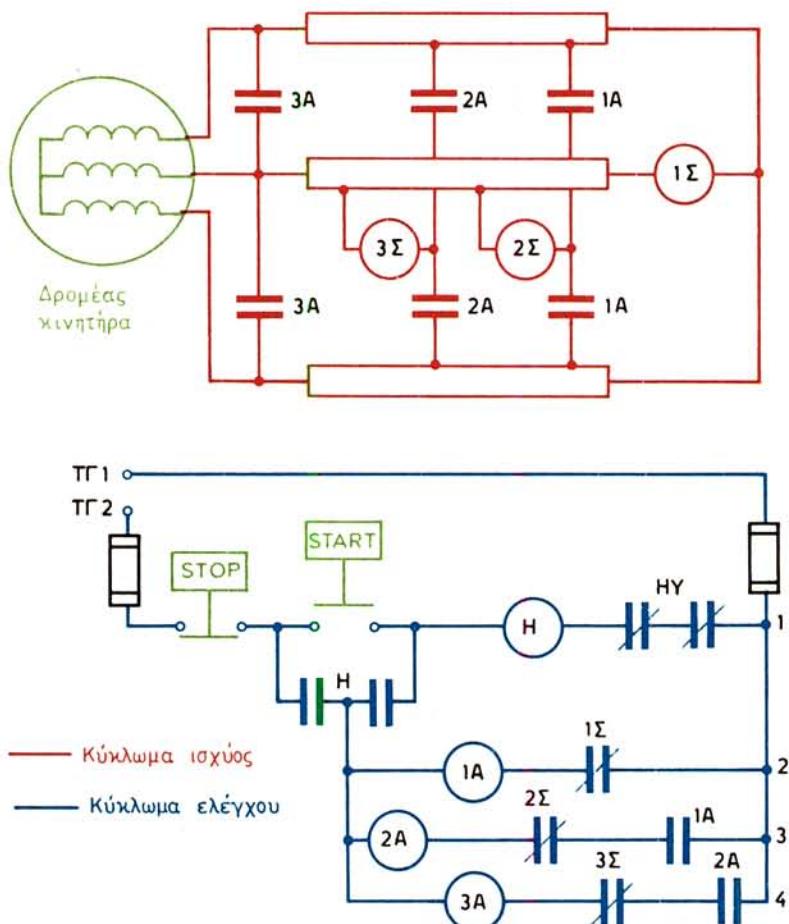
Σχ. 3.8στ.

Σύστημα εκκίνησεως κινητήρων EP με ηλεκτρονόδους χρονικής καθυστερήσεως.
(Time delay relays).

και να αποσυνδέσει τον κινητήρα.

Ένα άλλο σύστημα εκκινήσεως κινητήρων EP φαίνεται στο σχήμα 3.6στ. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί στις τροφοδοτικές γραμμές αντιστάσεις, οι οποίες κατά την εκκίνηση εμποδίζουν τη ροή υψηλού ρεύματος στον κινητήρα. Με τη σταδιακή επιτάχυνση του κινητήρα οι αντιστάσεις αυτές αφαιρούνται βαθμιαία από τους ηλεκτρονόμους χρονικής καθυστερήσεως ΗΧΚ. (Η περαιτέρω ανάλυση του συστήματος προτείνεται ως άσκηση).

Το σύστημα εκκινήσεως που εικονίζεται στό σχήμα 3.6ζ, αφορά πάλι κινητήρα



Σχ. 3.6ζ.

Αυτόματο σύστημα (με ανατροφοδότηση) εκκινήσεως τριφασικού κινητήρα με δακτύλιους.

EP, αλλά διαθέτει ανατροφοδότηση. Στό σύστημα αυτό χρησιμοποιούνται ηλεκτρονόμοι ταχείας αντιδράσεως HTA (fast reacting relays) που μπορούν να ανιχνεύσουν γρήγορα απότομες και μεγάλες αυξήσεις ρευμάτων που αναπτύσσονται στις αντιστάσεις του δρομέα κατά τη διάρκεια της εκκινήσεως και επιταχύνσεως

του κινητήρα. Οι ηλεκτρονόμοι HTA αντιδρούν πολύ γρηγορότερα από τους συνθισμένους ηλεκτρονόμους και μπορούν να ανοίγουν και κλείνουν τις επαφές τους σε ελάχιστο χρονικό διάστημα.

Η διαδικασία εκκινήσεως του συστήματος είναι η εξής:

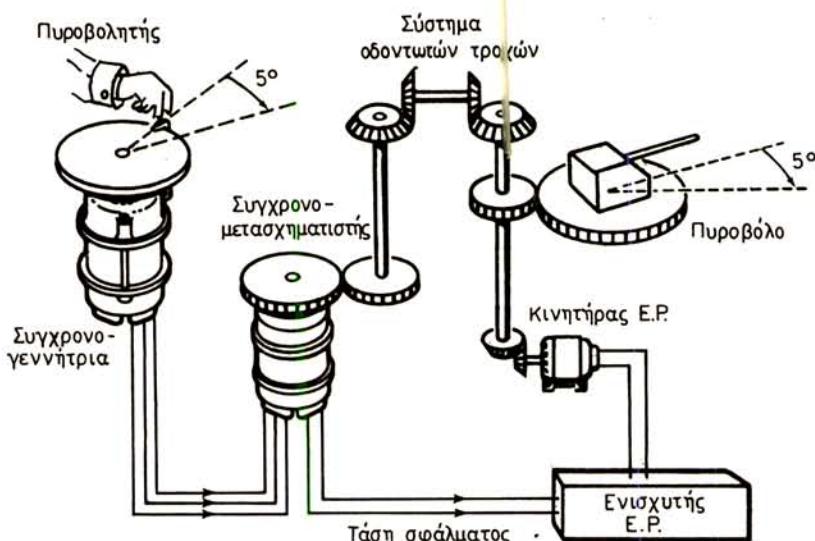
1. Με την πίεση του κουμπιού START ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος H, και ξεκινάει ο κινητήρας με εφαρμογή δλης της αντιστάσεως του δρομέα στο βοηθητικό του κύκλωμα. Με την απότομη αύξηση του ρεύματος στη σπείρα του ηλεκτρονόμου 1Σ, απενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος 1Α που βρίσκεται στο κύκλωμα ελέγχου (γραμμή 2) πριν προλάβει να λειτουργήσει, αφού ο πρώτος ηλεκτρονόμος αντιδρά πιο γρήγορα από το δεύτερο. Ο κινητήρας περιστρέφεται με τη μέγιστη αντίσταση του δρομέα του συνδεδεμένη και επιταχύνεται αργά στην ταχύτητα που καθορίζεται από το φορτίο και την ολίσθηση των δακτυλίων.
2. Ο ηλεκτρονόμος 1Σ απενεργοποιείται όταν το ρεύμα πέσει αρκετά χαμηλά, και υποχρεωθούν τα ισχυρά ελατήριά του να ανοίξουν τις επαφές. Ανάλογα με τη φύση του φορτίου, ο χρόνος λειτουργίας του ηλεκτρονόμου 1Σ ποικίλλει ο δε κινητήρας επιταχύνεται μόνο όταν το μεγάλο ρεύμα εξαφανισθεί και ο ηλεκτρονόμος 1Σ απενεργοποιηθεί.
3. Οι επαφές του 1Σ επανέρχονται στην κανονική τους θέση, δηλαδή κλείνουν και έτσι ενεργοποιούν τον ηλεκτρονόμο 1Α, ο οποίος βραχυκυκλώνει το πρώτο τμήμα της αντιστάσεως του δρομέα μέσω των επαφών των ηλεκτρονόμων 1Α και 2Σ. Ο ταχύτερος ηλεκτρονόμος 2Σ ανοίγει τη γραμμή ελέγχου 3 πριν μπορέσει να αντιδράσει ο ηλεκτρονόμος 2Α και ο κινητήρας επιταχύνεται σε μία νέα ταχύτητα, η οποία καθορίζεται επίσης από το φορτίο και την ολίσθηση των δακτυλίων.
4. Ο ηλεκτρονόμος 2Σ απενεργοποιείται, όταν τα ρεύματα στο δρομέα μειώθουν αρκετά, οπότε τα βαριά ελατήριά του ανοίγουν τις επαφές. Στην κατάλληλη στιγμή, ο ηλεκτρονόμος 2Σ απενεργοποιείται, και η γραμμή ελέγχου 3 ενεργοποιείται μέσω των επαφών 2Σ και 1Α.
5. Ο ενεργοποιημένος ηλεκτρονόμος EP 2Α επιταχύνει τον κινητήρα ακόμα περισσότερο, βραχυκυκλώνοντας τις επαφές του 2Α στο κύκλωμα του δρομέα μέσω του ηλεκτρονόμου 3Σ. Ο ηλεκτρονόμος αυτός αντιδρά γρήγορα και ανοίγει τη γραμμή ελέγχου 4, πριν αντιδράσει ο ηλεκτρονόμος 3Α. Ο κινητήρας επιταχύνεται μέχρι να ελαπτωθούν τα ρεύματα του δρομέα αρκετά, ώστε να απενεργοποιηθεί ο ηλεκτρονόμος EP 3Σ.
6. Όταν απενεργοποιηθεί ο 3Σ, κλείνει τη γραμμή ελέγχου 4 και ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος 3Α, ο οποίος βραχυκυκλώνει και το τελευταίο μέρος των αντιστάσεων του δρομέα. Ο κινητήρας επιταχύνεται στη μεγίστη ταχύτητα ως κινητήρας με συνεχή ανακύκλωση (squirl - cage).

3.7 Συστήματα ελέγχου εναλλασσόμενης τάσεως.

Μέχρι τώρα ασχοληθήκαμε κυρίως με συστήματα ελέγχου συνεχούς τάσεως. Στα συστήματα αυτά τα σήματα τάσεων είναι συνεχή είτε βρίσκονται στο μέρος του συστήματος που ασκεί τον έλεγχο (σήμα αναφοράς, σήμα ανατροφοδοτήσεως, σήμα σφάλματος κλπ.) είτε βρίσκονται στο υπό έλεγχο σύστημα (σήμα εξόδου).

Τα συστήματα ελέγχου εναλλασσόμενης τάσεως περιέχουν εξαρτήματα που δέχονται στην είσοδό τους σήματα εναλλασσόμενης τάσεως και παράγουν στην έξοδό τους σήματα της ίδιας μορφής. Στα συστήματα ελέγχου, τα διάφορα σήματα μεταφέρουν πληροφορίες απαραίτητες για τη συστή λειτουργία του συστήματος. Η μετάδοση των σημάτων ΕΡ γίνεται με κατάλληλη διαμόρφωση (π.χ. πλάτους), όταν δε είναι ανάγκη να ενεργοποιηθεί κάποιος μηχανισμός γίνεται η αντίστοιχη αποδιαμόρφωση. Η διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση των σημάτων πραγματοποιείται με κατάλληλους διαμορφωτές και αποδιαμορφωτές *. Η συχνότητα του φέροντος κύματος είναι συνήθως 50 ή 60 Hz και σε ειδικές περιπτώσεις 400 Hz (συστήματα ελέγχου πολεμικών αεροσκαφών και πυραύλων).

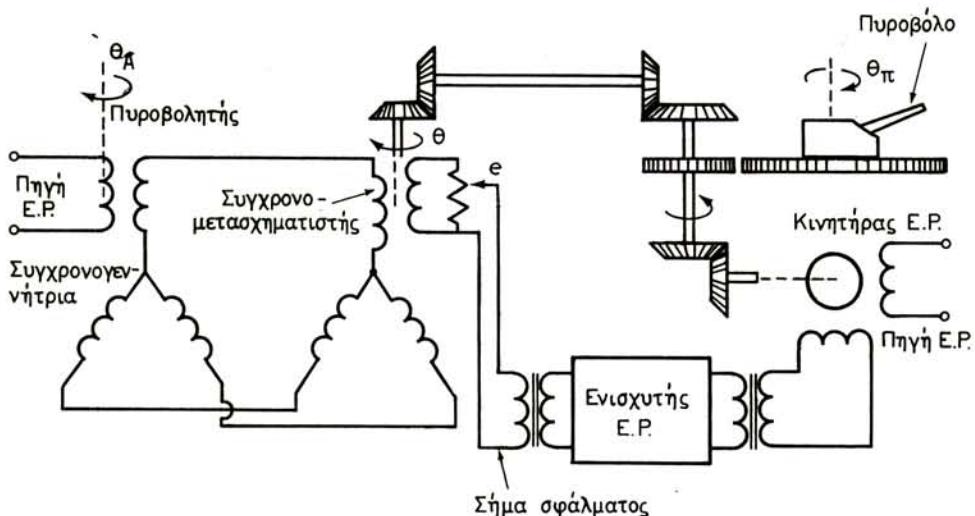
Εκτός από τα συστήματα ελέγχου, τα οποία αποτελούνται αποκλειστικά από εξαρτήματα ΕΡ υπάρχουν και περιπτώσεις μικτών συστημάτων, τα οποία χρησιμοποιούν στοιχεία τόσο συνεχούς όσο και εναλλασσόμενων ρευμάτων. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα συστήματα τηλεκατευθύνσεως, όπως π.χ. τηλεκατευθυνόμενων πυραύλων. Εξετάζομε παρακάτω δύο συστήματα ελέγχου, από τα οποία το πρώτο αποτελείται αποκλειστικά από συστήματα ΕΡ. Περιέχει επίσης και συγχρονούσυστήματα, των οποίων τη λειτουργία περιγραφαμε στο δεύτερο κεφάλαιο. Το πρώτο σύστημα (σχήμα 3.7a) αφορά ένα αυτόματο πυροβόλο πολεμικού πλοίου.



Σχ. 3.7a.
Αυτόματο πυροβόλο πολεμικού πλοίου.

Ο κινητήρας ΕΡ, μεγάλης ιπποδυνάμεως περιστρέφει τη βάση του πυροβόλου μέσω ενός συστήματος οδοντωτών τροχών. Ο πυροβολητής καθορίζει με το χέρι το σήμα αναφοράς, που σ' αυτή την περίπτωση είναι η γωνιακή θέση του δρομέα

* Για την περιγραφή και λειτουργία των διαμορφωτών και αποδιαμορφωτών αυτών βλ. στο βιβλίο «Τηλεπικοινωνίες» του Ιδρύματος Ευγενίδου.

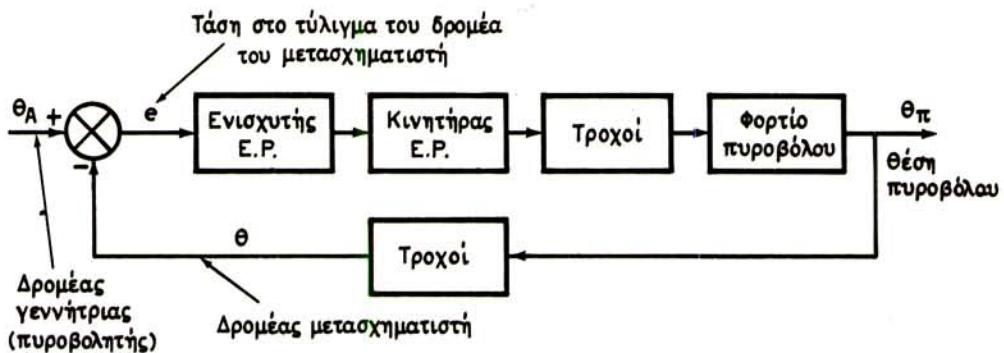


Σχ. 3.7β.

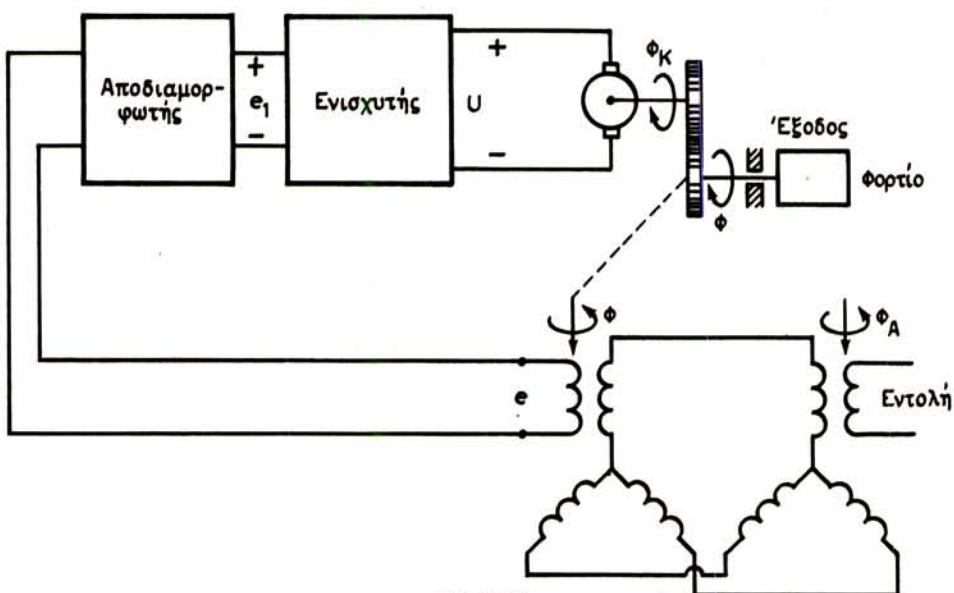
Αναλυτικό διάγραμμα αυτόματου πυροβολητή.

μιας συγχρονογεννήτριας. Η συγχρονογεννήτρια συνδέεται με ένα συγχρονομετασχηματιστή, όπως περιγράφηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, και μαζί αποτελούν ένα συγχρονομετρητή σφάλματος. Η γωνιακή θέση του δρομέα του συγχρονομετασχηματιστή καθορίζεται από τη θέση της βάσεως του πυροβόλου, μέσω του συνδυασμού των οδοντωτών τροχών, που αποτελούν το σύστημα ανατροφοδοτήσεως της εξόδου. Το σχηματικό διάγραμμα του ίδιου συστήματος φαίνεται στο σχήμα 3.7β. Έστω ότι ο πυροβολητής θέλει να περιστρέψει το πυροβόλο κατά μία γωνία $\theta_{π} = 5^\circ$. Για το σκοπό αυτό περιστρέφει το δρομέα της συγχρονογεννήτριας κατά $\theta_A = 5^\circ$. Ο δρομέας του συγχρονομετασχηματιστή, ο οποίος πριν από αυτή την ενέργεια του πυροβολητή είχε γωνιακή θέση συγχρονισμένη με την αντίστοιχη θέση του δρομέα της συγχρονογεννήτριας, βρίσκεται ασυγχρόνιστος κατά 5° . Στο τύλιγμά του αναπτύσσεται τάση ανάλογη με τη γωνιακή αυτή διαφορά, η οποία αποτελεί την τάση σφάλματος e . Η τάση αυτή, που έχει μορφή EP, ενισχύεται από τον ενισχυτή EP και στη συνέχεια ενεργοποιεί τον κινητήρα EP, ο οποίος περιστρέφει μέσω των τροχών το πυροβόλο κατά 5° . Με το σύστημα των οδοντωτών τροχών περιστρέφεται ταυτόχρονα και ο δρομέας του συγχρονομετασχηματιστή κατά 5° . Αυτό σημαίνει ότι η διαφορά των γωνιακών θέσεων $\theta_A - \theta$ γίνεται μηδέν ($5^\circ - 5^\circ = 0$) και, κατά συνέπεια, γίνεται μηδέν και η τάση σφάλματος, η οποία είναι ανάλογη της διαφοράς αυτής. Έτσι, ο κινητήρας EP σταματάει και το πυροβόλο ακινητοποιείται στην επιθυμητή θέση. Το λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 3.7γ. Τέλος, σημειώνομε ότι ένα παρόμοιο σύστημα ελέγχου θέσεως κινεί το πυροβόλο πάνω και κάτω.

Κλείνομε το κεφάλαιο με την περιγραφή ενός μικτού συστήματος αυτομάτου ελέγχου της γωνιακής θέσεως ενός φορτίου, στο οποίο ορισμένα εξαρτήματα λειτουργούν με συνεχές ρεύμα και άλλα με εναλλασσόμενο. Η διάταξη του συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 3.7δ. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει ένα συγχρο-



Σχ. 3.7γ.
Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος αυτομάτου ελέγχου θέσεως πυροβόλου.

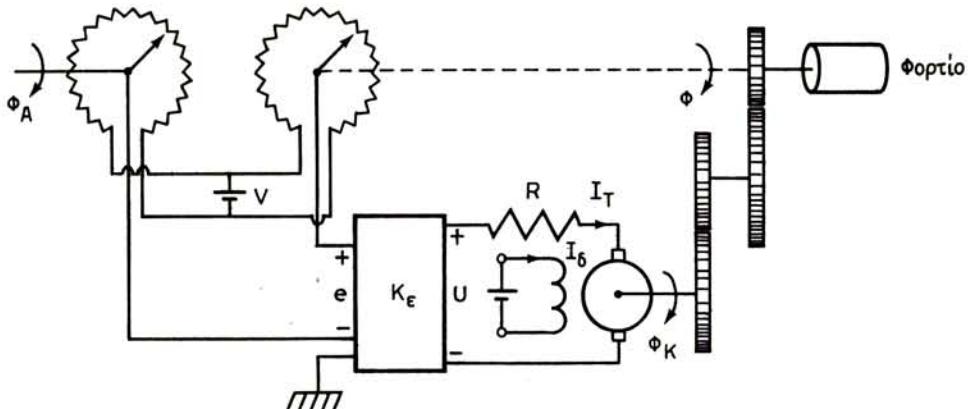


μετρητή σφάλματος (εξάρτημα που λειτουργεί με ΕΡ) και ένα κινητήρα ΣΡ. Ένας αποδιαμορφωτής συνδέει τα δύο αυτά εξαρτήματα. Η γωνιακή θέση αναφοράς Φ_A (επιθυμητή γωνιακή θέση του φορτίου) ρυθμίζεται με το χέρι. Η έξοδος του συγχρονομετασχηματιστή, είναι η τάση σφάλματος e , η οποία αποδιαμορφώνεται από τον αποδιαμορφωτή σε σήμα ΣΡ. Το σήμα αυτό ενισχύεται από τον ενισχυτή ΣΡ σε τάση e_1 , η οποία περιστρέφει τον κινητήρα ΣΡ και μέσω των τροχών τοποθετεί το φορτίο στην επιθυμητή γωνιακή θέση ϕ . Τότε, το σήμα $\Phi_A - \phi = 0$, η τάση σφάλματος μηδενίζεται και το σύστημα απενεργοποιείται.

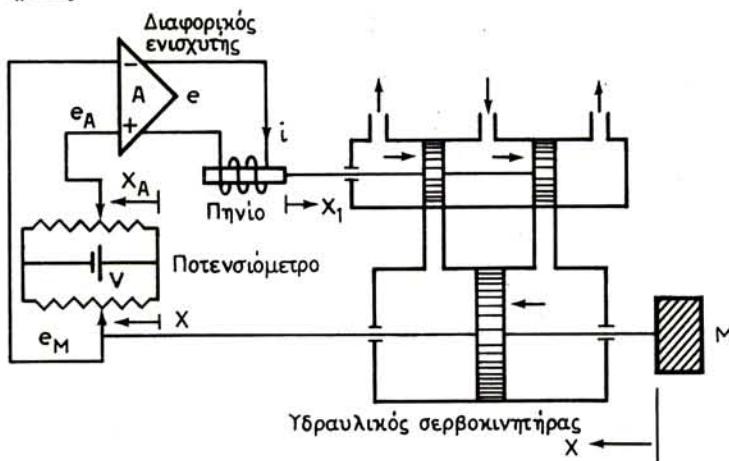
Από τα δύο αυτά παραδείγματα, καθώς και από τα άλλα του κεφαλαίου αυτού, είναι φανερό ότι δεν υπάρχουν βασικές διαφορές στη λειτουργία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου που λειτουργούν με συνεχές ή με εναλλασσόμενο ρεύμα ή και με συνδυασμό των δύο.

3.8 Ασκήσεις.

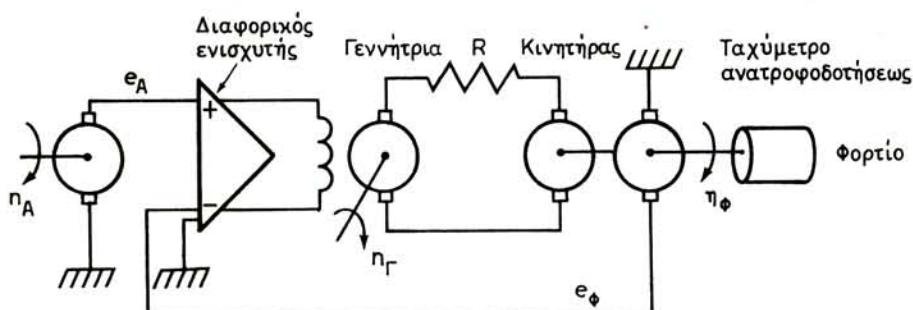
1. Στο παρακάτω σχήμα εικονίζεται ένας σερβομηχανισμός ελέγχου θέσης φ του φορτίου ελέγχεται από το σερβοκινητήρα (ο οποίος ελέγχεται από την τάση του επαγγεικού τυμπάνου) σε συνδυασμό με τον ποτενσιομετρικό μετρητή σφάλματος και τον ενισχυτή. Περίγραψε τη λειτουργία του συστήματος με τη βοήθεια ενός λειτουργικού διαγράμματος.



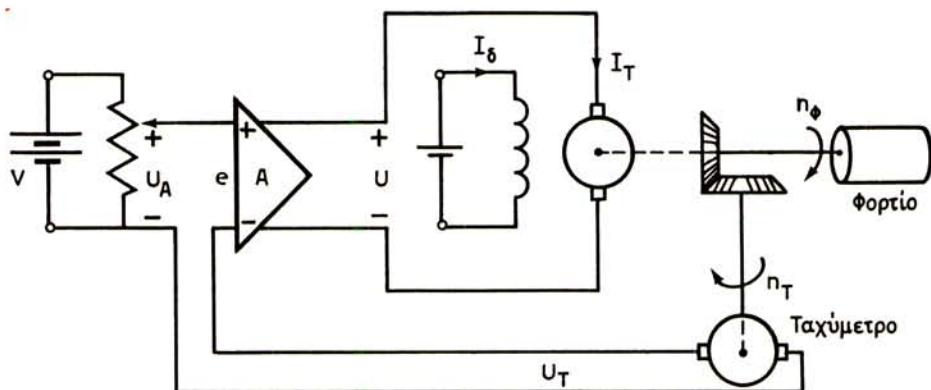
2. Το ηλεκτροϋδραυλικό σύστημα ελέγχου θέσεως που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ελέγχει αυτόματα τη θέση X της μάζας M. Σχεδίασε το λειτουργικό διάγραμμα και περίγραψε τη λειτουργία του συστήματος.



3. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει ένα σύστημα ελέγχου ταχύτητας η_ϕ ενός περιστρεφόμενου φορτίου. Περίγραψε τη λειτουργία του με τη βοήθεια ενός λειτουργικού διαγράμματος.

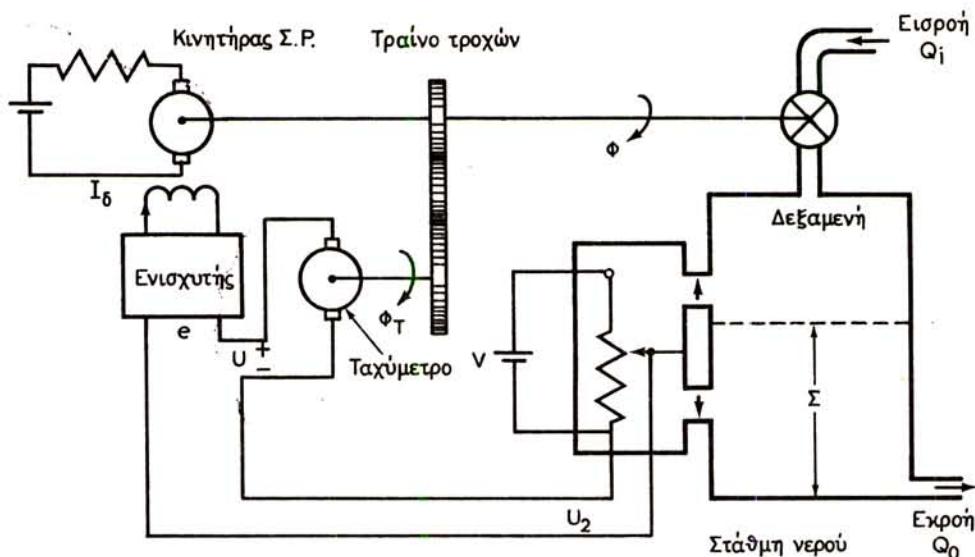


4. Σχεδίασε το λειτουργικό διάγραμμα και περίγραψε τη λειτουργία του συστήματος ελέγχου ταχύτητας που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

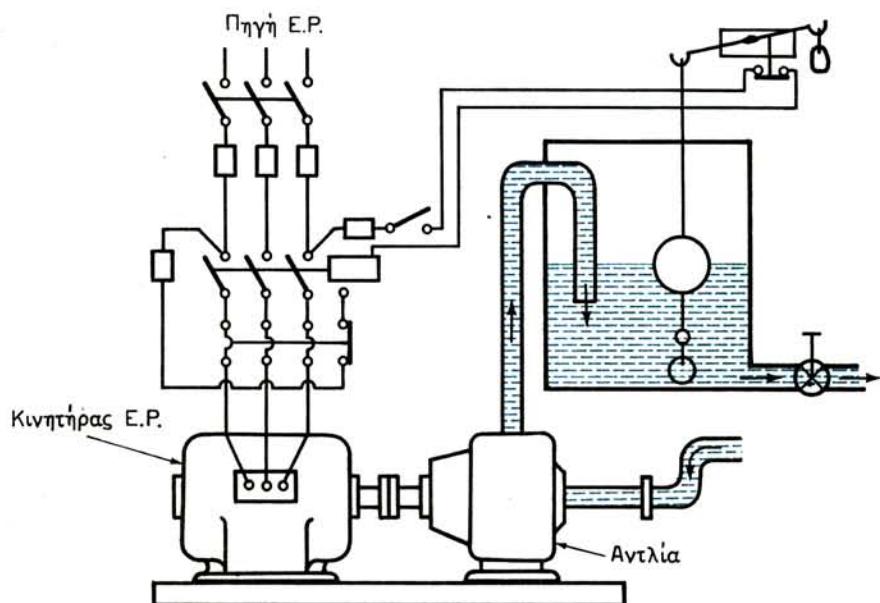


5. Μια μέθοδος για τη διατήρηση σταθερής έκροής από μία δεξαμενή νερού εικονίζεται στο σύστημα του παρακάτω σχήματος .

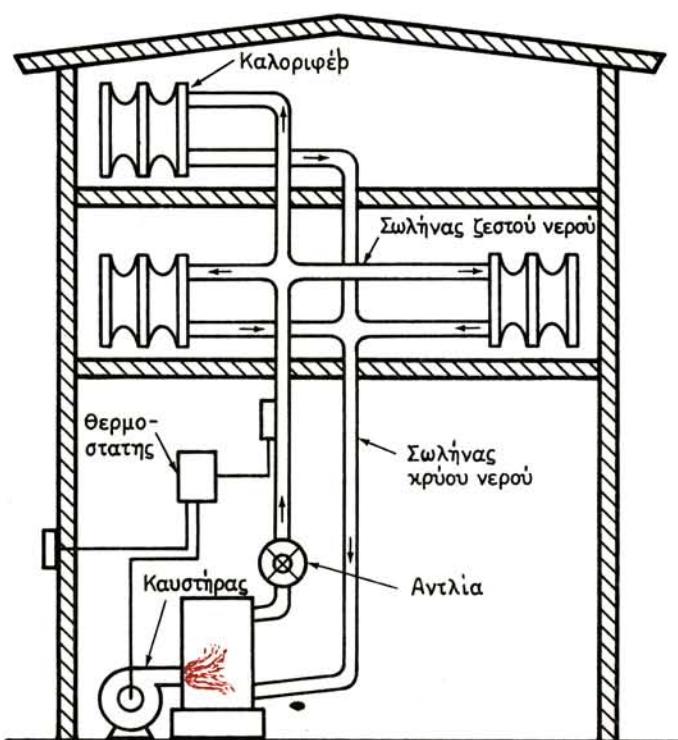
Η έκροή $Q_0 = 4\Sigma$, όπου Σ = στάθμη του νερού, και $Q_i = 10$ φ. Επίσης η στάθμη του νερού Σ είναι ανάλογη με τη διαφορά $Q_i - Q_0$. Σχεδίασε ένα λειτουργικό διάγραμμα για το σύστημα αυτό.



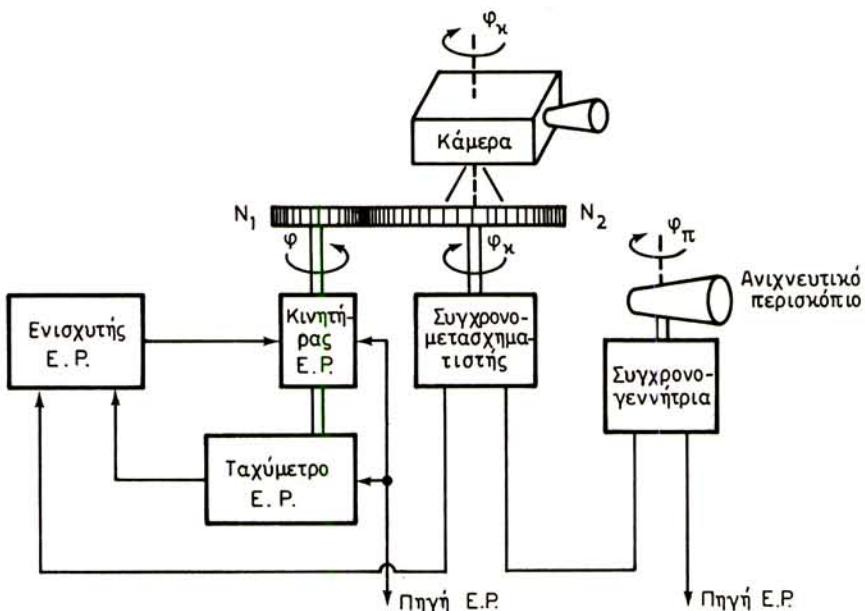
6. Το σύστημα που φαίνεται στο σχήμα της σελίδας 109 είναι ένα αντλητικό συγκρότημα με αυτοματισμούς. Περίγραψε τη λειτουργία του και σχεδίασε το λειτουργικό διάγραμμα.



7. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα σύστημα κεντρικής θερμάνσεως. Περίγραψε τη λειτουργία του με τη βοήθεια ενός λειτουργικού διαγράμματος.



8. Περιγραψε τη λειτουργία του συστήματος εκκινήσεως κινητήρων Ε.Ρ. που φαίνεται στο σχήμα 3.6στ.
9. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μία τηλερυθμιζόμενη κάμερα τηλεοράσεως, η οποία ρυθμίζεται με ένα ανιχνευτικό περισκόπιο. Σχεδίασε το λειτουργικό διάγραμμα και περιγραψε τη λειτουργία του συστήματος.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΑΡΧΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

4.1 Ορισμοί στοιχείων βιομηχανικού ελέγχου.

Στα προηγούμενα κεφάλαια εξετάσαμε διάφορα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου και περιγράψαμε τη λειτουργία ορισμένων βασικών διατάξεων συστημάτων αυτοματισμού. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύομε τις θεμελιώδεις αρχές, που διέπουν τη λειτουργία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, τα οποία εφαρμόζονται σε βιομηχανικές διεργασίες.

Για διευκόλυνση της αναλύσεως των συστημάτων βιομηχανικού ελέγχου υιοθετούμε ένα κάπως διαφορετικό λειτουργικό διάγραμμα, το οποίο στην ουσία είναι μια παραλλαγή του διαγράμματος που χρησιμοποιήσαμε προηγουμένως. Το διάγραμμα αυτό φαίνεται στο (α) μέρος του σχήματος 4.1α.

Η κατανόηση του διαγράμματος αυτού διευκολύνεται με το απλό παράδειγμα βιομηχανικού ελέγχου της θερμοκρασίας υγρού μέσα σε δεξαμενή, που παρουσιάζεται στο (β) μέρος του σχήματος 4.1α.

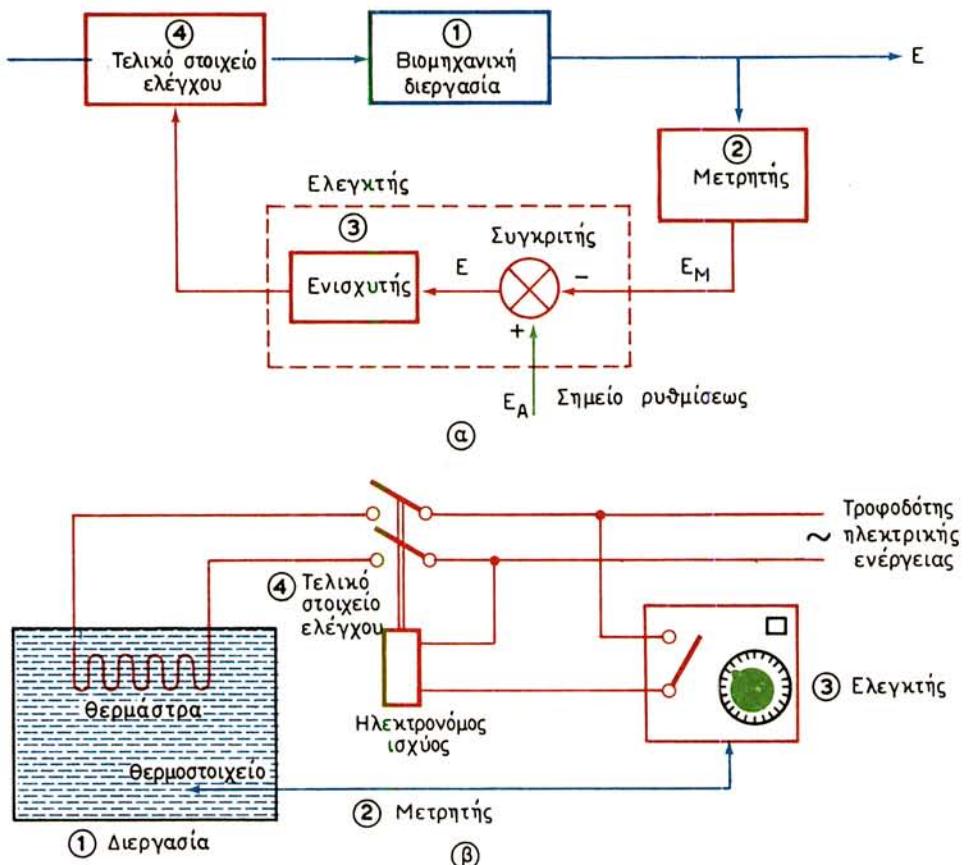
Με βάση το σχήμα 4.1α υποδιαιρούμε το σύστημα αυτομάτου ελέγχου (**ΣΑΕ**) σε τέσσερα βασικά στοιχεία:

- 1) Τη διεργασία
- 2) τη μέτρηση
- 3) την αξιολόγηση και
- 4) το τελικό στοιχείο ελέγχου.

Η **διεργασία** αποτελεί το σύνολο των φυσικών ενέργειών που γίνονται μέσα σε μια εγκατάσταση με σκοπό τη μετατροπή της ύλης ή της ενέργειας για χάρη της παραγωγής του βιομηχανικού προϊόντος. Το προϊόν της διεργασίας είναι η ελεγχόμενη μεταβλητή E η οποία μπορεί να είναι θερμοκρασία, πίεση, ροή, στάθμη υγρού, ταχύτητα, τάση, κλπ. αποτελεί δε την έξοδο του συστήματος αυτομάτου ελέγχου (**ΣΑΕ**). Κύριος στόχος του **ΣΑΕ** είναι η διατήρηση μιας προκαθορισμένης επιθυμητής τιμής (*desired value*) E_D για την ελεγχόμενη μεταβλητή και η συνεχής εξουδετέρωση διαφόρων διάταραχών που εμποδίζουν την ομαλή εξέλιξη της διεργασίας.

Η **μέτρηση** στα **ΣΑΕ** παρέχει την πραγματική στιγμιαία τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής E . Η τιμή αυτή μετατρέπεται συχνά σε κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα E_M και διαβιβάζεται στο μέρος του συστήματος όπου γίνεται η αξιολόγηση του ελέγχου.

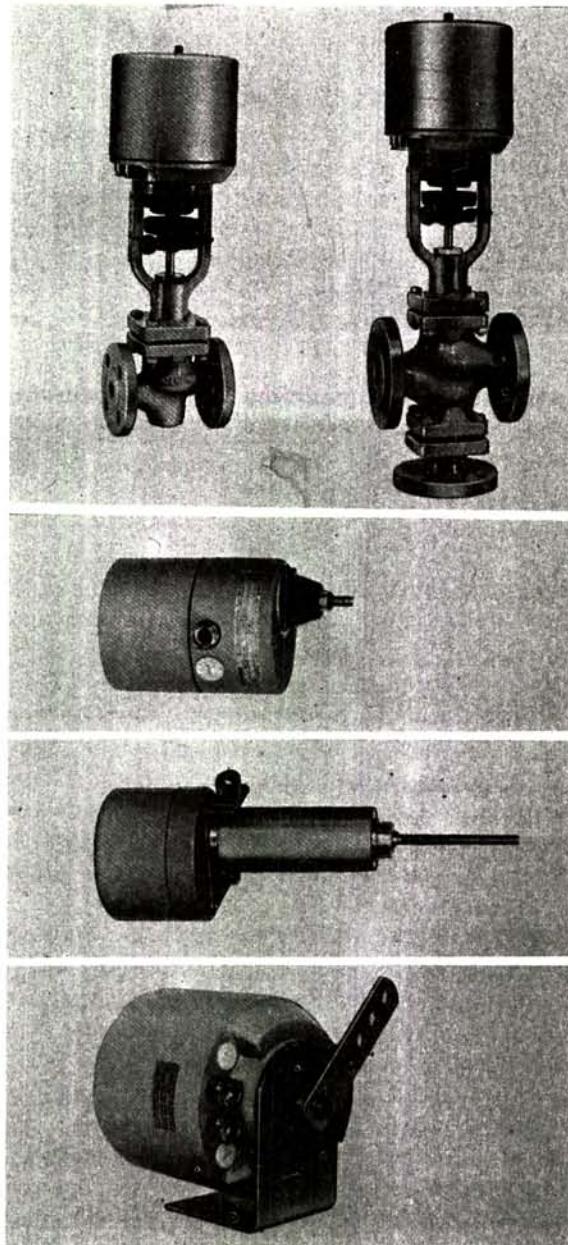
Η **αξιολόγηση** του ελέγχου αφορά την εμφάνιση της **διαφοράς ή αποκλίσεως** (*deviation*) της μετρήσεως E_M από την επιθυμητή τιμή E_D . Η διαφορά αυτή παράγεται από το συγκριτή και αποτελεί το σφάλμα (*error*) ε του συστήματος. Ο **ελεγκτής** (*controller*) δέχεται στην είσοδό του το σφάλμα που προκύπτει από τη



σύγκριση και, ανάλογα με το μέγεθος και την πολικότητα, ενεργοποιεί το τελικό στοιχείο ελέγχου (final control element).

Το **τελικό στοιχείο ελέγχου**, είναι το εξάρτημα που επηρεάζει άμεσα τη διεργασία και επιφέρει τις απαραίτητες αλλαγές, ώστε η ελεγχόμενη μεταβλητή να πάρει την επιθυμητή τιμή. Στο σχήμα 4.1β φαίνεται μία σειρά τελικών στοιχείων ελέγχου για βιομηχανικές εφαρμογές, τα οποία είναι βαλβίδες και σερβοκινητήρες.

Στο παράδειγμα του μέρους (β) του σχήματος 4.1α η διεργασία περιλαμβάνει τη θέρμανση του υγρού στη δεξαμενή με παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τον τροφοδότη. Η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι η θερμοκρασία του υγρού. Η μέτρηση της θερμοκρασίας και η μετατροπή της σε ηλεκτρικό σήμα γίνεται από το θερμοστοιχείο που τοποθετείται μέσα στη δεξαμενή. Ο ελεγκτής συγκρίνει την πληροφορία αυτή με την επιθυμητή τιμή, η οποία ρυθμίζεται εκ των προτέρων με το χέρι (πράσινη ροδέλα), ανάλογα δε με το μέγεθος και την πολικότητα της αποκλίσεως, ενεργοποιεί το τελικό στοιχείο ελέγχου, που στην περίπτωση αυτή είναι ένας ηλεκτρονόμος ισχύος. Έτσι, όταν το σφάλμα είναι αρνητικό (επιθυμητή τιμή \leq με-



Σχ. 4.1β.
Τελικά στοιχεία ελέγχου.

τρούμενη τιμή), ο ηλεκτρονόμος διακόπτει την παροχή ρεύματος στην ηλεκτρική αντίσταση που θερμαίνει το υγρό. Αντίστροφα, όταν το σφάλμα είναι θετικό, (επιθυμητή τιμή \geq μετρούμενη τιμή), ο ηλεκτρονόμος κλείνει τις επαφές του και τροφοδοτείται ρεύμα προς την αντίσταση.

4.2 Αξιολόγηση ΣΑΕ.

Η αξιολόγηση της επιδόσεως ενός ΣΑΕ επιτρέπει τον προσδιορισμό του βαθμού επιτυχίας του συστήματος στη ρύθμιση της ελεγχόμενης μεταβλητής της διεργασίας. Ο βαθμός της επιτυχίας προσδιορίζεται από δυο βασικά κριτήρια: το **σφάλμα συστήματος** (system error) και τη **δυναμική απόκριση** (dynamic response) του συστήματος σε διαταραχές στη διεργασία ή σε μεταβολές της επιθυμητής τιμής.

4.2.1 Κριτήρια αξιολογήσεως των ΣΑΕ.

Σφάλμα συστήματος. Το σφάλμα συστήματος ϵ , είναι η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής τιμής E_A και της πραγματικής τιμής E της ελεγχόμενης μεταβλητής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Σύμφωνα με τον ορισμό, έχομε τη σχέση

$$\epsilon = E_A - E \quad (4.1)$$

Είναι ενδεχόμενο παρά τη διορθωτική δράση του συστήματος ελέγχου, το σφάλμα να μη μηδενίζεται απόλυτα, γιατί η τιμή του εξαρτάται από όλα τα σφάλματα που παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία του κάθε στοιχείου του ΣΑΕ. Για να ελαχιστοποιήσουμε το σφάλμα συστήματος, επιλέγομε για το ΣΑΕ στοιχεία υψηλής ποιότητας. Αυτό βέβαια συνεπάγεται αύξηση του κόστους του ΣΑΕ. Ιδιαίτερη φροντίδα χρειάζεται στην επιλογή του μετρητή - μεταλλάκτη, γιατί αυτό το στοιχείο έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στο σφάλμα συστήματος. Όπως θα δούμε παρακάτω, μία ένδειξη του σφάλματος συστήματος είναι η **απόκλιση** (deviation) της μετρούμενης από το μετρητή τιμής της ελεγχόμενης μεταβλητής από την επιθυμητή τιμή. Η απόκλιση αυτή εκφράζεται συνήθως ως ποσοστιαία απόκλιση της E από την E_A .

Σημείο ρυθμίσεως. Στη βιομηχανία έχει επικρατήσει ο όρος σημείο ρυθμίσεως (set point) αντί του όρου επιθυμητή τιμή. Για τη μεταβλητή αυτή χρησιμοποιούνται επίσης και οι εκφράσεις «τιμή αναφοράς», και «τιμή εντολής» (command value). Η τελευταία χρησιμοποιείται από τους ειδικούς που ασχολούνται με συστήματα ελέγχου στην αστροναυτική ή στην αεροπορική βιομηχανία. Το σημείο ρυθμίσεως βρίσκεται στον ελεγκτή και ρυθμίζεται με το χέρι από τον υπεύθυνο στην αίθουσα ελέγχου (control room). Το σημείο ρυθμίσεως είναι ηλεκτρικό σήμα και συγκρίνεται στο συγκριτή με τη μετρημένη τιμή E της ελεγχόμενης μεταβλητής η οποία έχει επίσης μορφή ηλεκτρικού σήματος. Έτσι ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται συνήθως για τη χειροκίνητη ρύθμιση του σημείου ρυθμίσεως είναι το ποτενσιόμετρο.

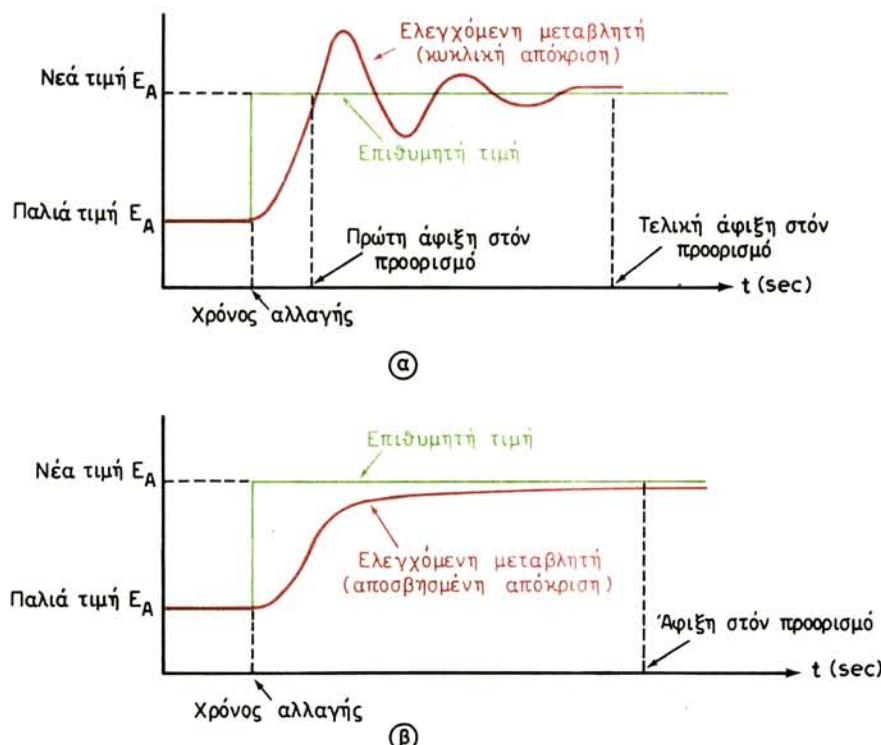
Δυναμική απόκριση. Η δυναμική απόκριση (dynamic response) του συστήματος είναι το βασικό κριτήριο με το οποίο αξιολογούμε την επίδοση του ΣΑΕ. Σκοπός του ελέγχου είναι να διατηρεί την ελεγχόμενη μεταβλητή κοντά στην επιθυμητή τι-

μή και να προλαμβάνει τυχόν μεγάλες αποκλίσεις. Σε μεταβολές δηλαδή που προέρχονται από τυχαίες διαταραχές ή από σκόπιμες μεταβολές του σημείου ρυθμίσεως ο έλεγχος επιδρά διορθωτικά. Η δυναμική απόκριση είναι μια ένδειξη του τρόπου με τον οποίο το ΣΑΕ αντιδρά, στην περιοχή του χρόνου, κατά τη διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων, προκειμένου να επαναφέρει την παρεκτραπείσα ελεγχόμενη μεταβλητή στην επιθυμητή τιμή.

Στιγμιαία αλλαγή του σημείου ρυθμίσεως. Σε πολλές περιπτώσεις είναι ανάγκη να αλλάξουμε στιγμιαία την τιμή του σημείου ρυθμίσεως. Σε μια τέτοια μεταβολή, το ΣΑΕ αντιδρά όπως στην περίπτωση που η τιμή του σημείου ρυθμίσεως είναι σταθερή, αλλά υπεισέρχεται στο σύστημα κάποια διαταραχή, η οποία απομακρύνει την ελεγχόμενη μεταβλητή από την επιθυμητή τιμή. Ο ελεγκτής δρα στη διεργασία και υποχρεώνει την ελεγχόμενη μεταβλητή να ταυτισθεί με τη νέα επιθυμητή τιμή. Ανάλογα με τη φύση της διεργασίας, η ρύθμιση του ΣΑΕ μπορεί να γίνει, ώστε η δυναμική απόκριση του συστήματος να έχει μία από τις ακόλουθες βασικές μορφές:

- **απόκριση κυκλική** (cyclic response) ή
- **απόκριση αποσβησμένη** (damped response).

Στο (a) μέρος του σχήματος 4.2a φαίνεται μια απόκριση κυκλική ενός συστήματος που υπόκειται σε στιγμιαία αλλαγή της τιμής του σημείου ρυθμίσεως, ενώ στο (b) μέρος του σχήματος παρουσιάζεται μια απόκριση αποσβησμένη. Όπως είναι

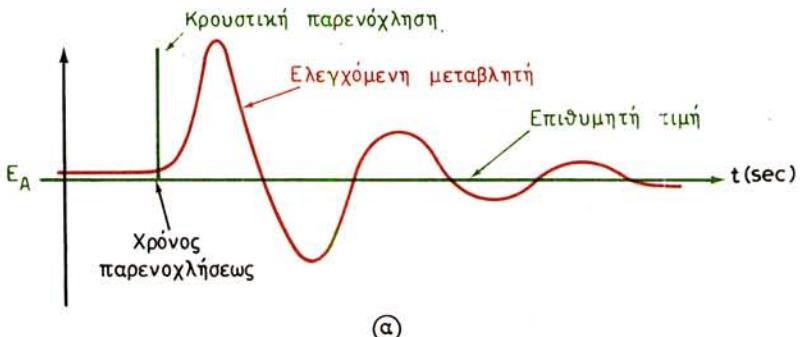


Σχ. 4.2a.

Κυκλική και αποσβησμένη απόκριση σε στιγμιαία αλλαγή του σημείου ρυθμίσεως.

φανερό στην κυκλική απόκριση η ελεγχόμενη μεταβλητή φθάνει γρήγορα στη νέα επιθυμητή τιμή, την υπερβαίνει, φθάνει σε μια μέγιστη τιμή, αρχίζει να μειώνεται περνώντας πάλι από την επιθυμητή τιμή, συνεχίζει την πτώση της με αργότερο ρυθμό, φθάνει σε μια ελάχιστη τιμή, αρχίζει πάλι να ανέρχεται κ.ο.κ. Μετά από κάποιο αριθμό ταλαντώσεων, σταθεροποιείται κοντά στην επιθυμητή τιμή. Χαρακτηριστικό της κυκλικής απόκρισεως είναι η ταλάντωση της ελεγχόμενης μεταβλητής. Αντίθετα, στην αποσβησμένη απόκριση δεν υπάρχουν ταλαντώσεις, αλλά η ελεγχόμενη μεταβλητή φθάνει στη νέα επιθυμητή τιμή ομαλά, χωρίς ποτέ να την υπερβεί καί με σχετικά αργό ρυθμό. Μια τέτοιου τύπου απόκριση επιδιώκεται π.χ., σε μια βιομηχανική διεργασία, όπου η θερμοκρασία, ως ελεγχόμενη μεταβλητή, δεν επιτρέπεται να υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο. Όταν βέβαια η υπέρβαση της επιθυμητής τιμής είναι ανεκτή και επιθυμούμε η ελεγχόμενη μεταβλητή να έχει μια «πρώτη άφιξη» στη νέα επιθυμητή τιμή σε σύντομο χρονικό διάστημα, ρυθμίζομε το ΣΑΕ ώστε η απόκριση να είναι κυκλική.

Κρουστική απόκριση. Όπως έχομε τονίσει, ο βασικός σκοπός των ΣΑΕ είναι να διατηρούν την ελεγχόμενη μεταβλητή κοντά σε μια προκαθορισμένη επιθυμητή τιμή. Χωρίς τα ΣΑΕ, οι διάφοροι εξωτερικοί παράγοντες (παρένοχλήσεις) θα επέφεραν ανεξέλεγκτες μεταβολές στη μεταβλητή αυτή. Η κρουστική απόκριση (impulse response) είναι μια ένδειξη της ικανότητας του συστήματος να συνέρχεται ύστερα από μια απότομη και στιγμιαία (κρουστική) παρενόχληση στη διεργασία. Στο (a) μέρος του σχήματος 4.2β δίνεται η κυκλική απόκριση ενός συστήματος στο οποίο, η δράση του ελέγχου σε μια κρουστική παρενόχληση προκαλεί ταλαντωτική



Σχ. 4.2β.
Κρουστική απόκριση.
α) Κυκλική. β) Αποσβησμένη.

προσέγγιση της μεταβλητής στην επιθυμητή τιμή E_A .

Είναι επίσης δυνατό ένα ΣΑΕ να ρυθμισθεί ώστε να αντιδρά σε κρουστική παρενόχληση με τρόπο που επαναφέρει την ελεγχόμενη μεταβλητή στην επιθυμητή τιμή ομαλά, χωρίς ταλαντώσεις, σύμφωνα με το (β) μέρος του σχήματος 4.2β. Η μορφή αυτή ονομάζεται αποσβησμένη κρουστική απόκριση.

4.2.2 Κριτήρια αξιολογήσεως της δυναμικής αποκρίσεως συστημάτων.

Βασική προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία ενός ΣΑΕ είναι η **ευστάθεια** (stability). Ένα ΣΑΕ που δεν έχει ευστάθεια όχι μόνο δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του ελέγχου, αλλά μπορεί να οδηγηθεί σε αυτοκαταστροφή, αν δεν επέμβομε έγκαιρα για να διακόψωμε τη λειτουργία του.

Η έλλειψη ευστάθειας εκδηλώνεται με την ανεξέλεγκτη συμπεριφορά κάποιας δυναμικής μεταβλητής. Στο σχήμα 4.2γ παρουσιάζονται δύο παραδείγματα αποκρίσεων ενός ευσταθούς και ενός ασταθούς συστήματος. Η εκτίμηση του βαθμού ευστάθειας ενός ΣΑΕ επιτυγχάνεται με την εξέταση διαφόρων κριτηρίων, τα οποία σχετίζονται με τη δυναμική απόκριση του συστήματος. Γενικά, η ελαχιστοποίηση των κριτηρίων αυτών δίνει τη βέλτιστη ή άριστη (optimum) απόκριση.



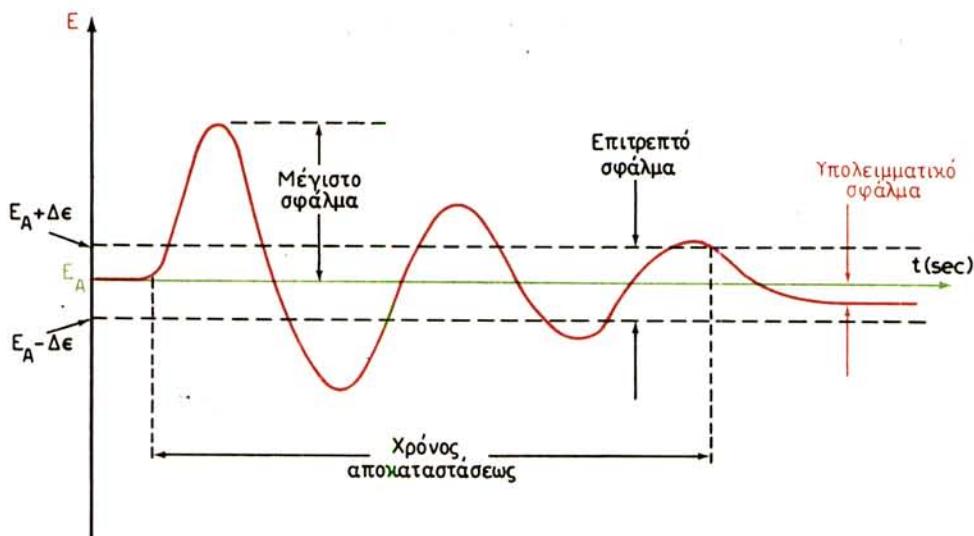
Σχ. 4.2γ.

Παραδείγματα ευσταθούς και ασταθούς λειτουργίας ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου θερμοκρασίας.

Χρόνος αποκαταστάσεως. Είναι γνωστό ότι η επιθυμητή τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής ορίζεται από το σημείο ρυθμίσεως. Γενικά οι αποδεκτές τιμές της ελεγχόμενης μεταβλητής μπορούν να περιγραφούν από μια ζώνη, η οποία ορίζεται από δύο παράλληλες ευθείες που βρίσκονται σε σχετικά μικρή απόσταση, Δε, πάνω και κάτω από τη γραμμή του σημείου ρυθμίσεως, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2δ. Ο χρόνος αποκαταστάσεως (settling time) ορίζεται με τη βοήθεια μιας κρουστικής αποκρίσεως και είναι το χρονικό διάστημα που χρειάζεται το σύστημα ελέγχου για να επαναφέρει τη ελεγχόμενη μεταβλητή Ε μέσα στην επιτρεπτή ζώνη $E_A \pm \Delta e$.

Μέγιστο σφάλμα. Η μέγιστη απόκλιση της ελεγχόμενης μεταβλητής Ε από την τιμή του σημείου ρύθμισης E_A , λέγεται μέγιστο σφάλμα (peak error) και φαίνεται στο σχήμα 4.2δ.

Υπολειμματικό σφάλμα. Μετά την απόσβεση του μεταβατικού φαινομένου, που οφείλεται σε παρενοχλήση, η ελεγχόμενη μεταβλητή παίρνει την τελική της τιμή, η

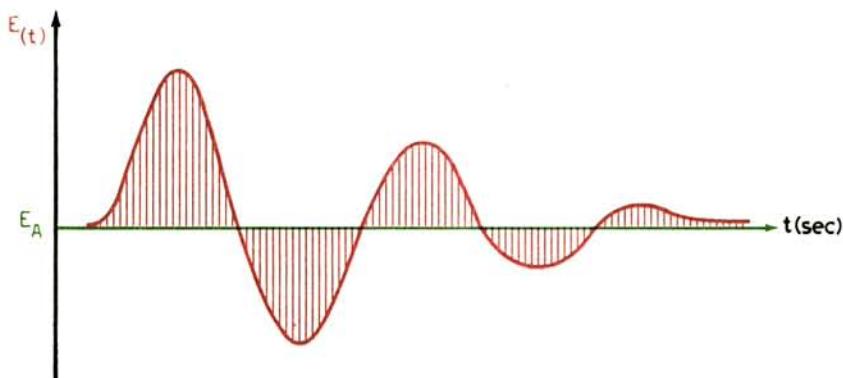


Σχ. 4.26.
Προδιαγραφές της δυναμικής αποκρίσεως.

οποία, αν και πολύ κοντά στην τιμή του σημείου ρυθμίσεως, μπορεί να διαφέρει από αυτήν κατά μία μικρή ποσότητα. Η διαφορά αυτή λέγεται **υπολειμματικό σφάλμα** (residual error) και φαίνεται στο σχήμα 4.2δ. Το σφάλμα αυτό μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με ρύθμιση ορισμένων παραμέτρων του ελεγκτή.

Κυκλικότητα. Γενικά, το πλάτος της ταλαντωτικής (φθίνουσας) αποκρίσεως ενός ΣΑΕ πρέπει να ελαχιστοποιείται με κατάλληλο σχεδιασμό του ελεγκτή. Σε ορισμένες δε περιπτώσεις, τέτοιου είδους συμπεριφορά δεν είναι καθόλου επιτρεπτή. Για το λόγο αυτό, κατά το σχεδιασμό ενός ΣΑΕ υπάρχει ο περιοριστικός παράγοντας **ελάχιστης κυκλικότητας** (minimum cycling). Με τον όρο αυτό, εννοείται ότι το ΣΑΕ πρέπει να σχεδιασθεί έτσι, ώστε, μετά από μία κρουστική παρενόχληση, η ελεγχόμενη μεταβλητή να επιστρέψει στην επιθυμητή τιμή με δύο το δυνατό λιγότερες ταλαντώσεις.

Ελάχιστο εμβαδό σφάλματος. Η δυναμική απόκριση ενός ΣΑΕ, μετά από κάθε κρουστική παρενόχληση παρουσιάζει αποκλίσεις της ελεγχόμενης μεταβλητής από την επιθυμητή τιμή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η χρονική διάρκεια και το μέγεθος των αποκλίσεων αυτών συντελούν στην κατασκευή κακών προϊόντων (όταν πρόκειται για σύστημα μαζικής παραγωγής) ή τουλάχιστον στην κατασκευή προϊόντων έξω από τις σωστές προδιαγραφές. Αυτό συνεπάγεται ανάλογες οικονομικές επιπτώσεις, αφού τα προϊόντα αυτά θα πρέπει να αχρηστευθούν. Για να προληφθούν τέτοιες καταστάσεις, το ΣΑΕ σχεδιάζεται έτσι, ώστε νά ελαχιστοποιείται ταυτόχρονα η χρονική διάρκεια και το μέγεθος των αποκλίσεων αυτών. Αυτό επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση ένός εμβαδού, το οποίο ορίζεται από την καμπύλη της κρουστικής αποκρίσεως και του οριζόντιου άξονα του χρόνου. Το εμβαδόν αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.2ε' και ονομάζεται **εμβαδόν σφάλματος** (error area).



Σχ. 4.2ε.

Το κριτήριο του ελάχιστου εμβαδού σφάλματος.

Αν $E(t)$ είναι η στιγμιαία τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής και E_A το σημείο ρυθμίσεως (ή επιθυμητή τιμή), το σφάλμα $\epsilon(t)$ για κάθε χρόνο t δίνεται από τη σχέση

$$\epsilon(t) = E_A - E(t) \quad (4.2)$$

Το εμβαδόν, που ορίζεται από την καμπύλη $\epsilon(t)$ και τον άξονα του χρόνου t , στο χρονικό διάστημα $[0, T]$ κατά το οποίο υφίσταται απόκλιση, δίνεται από τη σχέση

$$A = \int_0^T |\epsilon(t)| dt \quad (4.3)$$

Το εμβαδόν δηλαδή αυτό (χρωματισμένο με κόκκινο στο σχήμα 4.2ε) είναι ίσο με το ολοκλήρωμα* της απόλυτης τιμής (για να ληφθούν υπ' όψη και τα μέρη του εμβαδού που βρίσκονται κάτω από άξονα) της χρονικής συναρτήσεως του σφάλματος $\epsilon(t)$. Το κριτήριο του εμβαδού απαιτεί η ποσότητα A , δηλαδή ορίζεται από τη σχέση (4.3), να έχει την ελάχιστη δυνατή τιμή. Έτσι, ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες μεγάλης υλικής και επομένως οικονομικής ζημιάς στην παραγωγή, διατηρώντας μεγάλης ποσότητας παραγωγής.

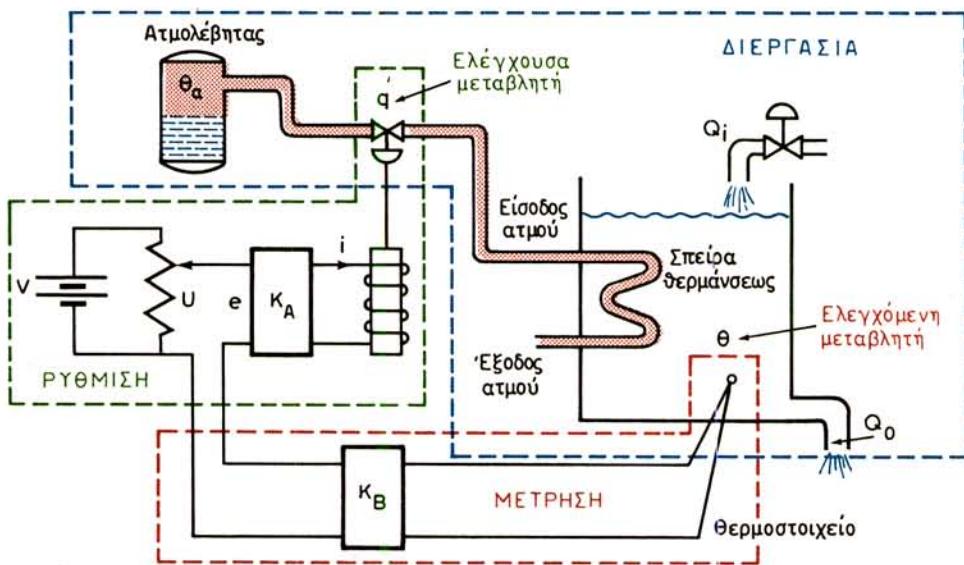
4.3 Ορισμός Διεργασίας.

Στα ΣΑΕ, ο έλεγχος ασκείται πάνω στη διεργασία. Έτσι, η διεργασία είναι εκείνη που προδιαγράφει τις απαιτήσεις του προβλήματος ελέγχου. Είναι λοιπόν λογικό να εξετάσουμε τα κύρια χαρακτηριστικά της διεργασίας, πριν περάσουμε στην ανάλυση της δράσεως του πλήρους συστήματος ελέγχου. Πρός το σκοπό αυτό, παραθέτομε μερικούς βασικούς ορισμούς που αφορούν τη διεργασία.

Βασικό χαρακτηριστικό της διεργασίας είναι η **ελεγχόμενη μεταβλητή** (control-

* Το ολοκλήρωμα μιας συναρτήσεως εκφράζει το συνολικό εμβαδόν που περιέχεται μεταξύ της καμπύλης της συναρτήσεως και του άξονα της ανεξάρτητης μεταβλητής. Για αναλυτικότερη επεξήγηση, βλ. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ ('Έκδοση Ιδρύματος Ευγενίδου').

ιεδ variable), η οποία είναι μια δυναμική μεταβλητή (dynamic variable). Η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι η φυσική ποσότητα της διεργασίας που θέλουμε να ελέγξουμε, η οποία συνήθως εξαρτάται από πολλές παραμέτρους της διεργασίας. Η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την ελεγχόμενη μεταβλητή επιλέγεται συνήθως ως **ελέγχουσα παράμετρος** (controlling parameter). Η ελέγχουσα παράμετρος παίζει το ρυθμιστικό ρόλο, γιατί μεταβάλλεται αυτόμata προς την κατεύθυνση που επιφέρει τη διόρθωση, όταν εμφανισθεί απόκλιση της ελεγχόμενης μεταβλητής από την επιθυμητή τιμή. Ως παράδειγμα, θεωρούμε την απλή βιομηχανική διεργασία του σχήματος 4.3. Ελεγχόμενη μεταβλητή είναι η θερμοκρασία θ του υγρού στη δεξαμενή. Η θερμοκρασία αυτή εξαρτάται από πολλές παραμέτρους της διεργασίας, όπως τη θερμοκρασία του ατμού θ_a , την ταχύτητα ροής του ατμού q και τις ταχύτητες εισροής και εκροής του υγρού στη δεξαμενή Q_i και Q_o . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, ως ελέγχουσα παράμετρος έχει επιλεγεί η ταχύτητα ροής του ατμού q στη σπείρα. Όταν μία (ή περισσότερες) από τις άλλες παραμέτρους που αναφέραμε μεταβληθεί, θα μεταβληθεί και η θερμοκρασία του υγρού στη δεξαμενή. Για να επανέλθει η θερμοκρασία του υγρού στην επιθυμητή τιμή, θα πρέπει να ρυθμισθεί ανάλογα η ταχύτητα ροής του ατμού.



Σχ. 4.3.
Βιομηχανική διεργασία και έλεγχος θερμοκρασίας.

Συνήθως, οι διάφορες παραμέτροι της διεργασίας έχουν γνωστές ονομαστικές τιμές, η δέ τιμή της ελέγχουσας παραμέτρου ρυθμίζεται με βάση τις τιμές αυτές. Η τιμή αυτή καθορίζει το αναγκαίο σημείο ρυθμίσεως για την ελεγχόμενη μεταβλητή. Το **φορτίο της διεργασίας** (process load) είναι το σύνολο όλων των παραμέτρων της διεργασίας, με εξαίρεση την ελεγχόμενη μεταβλητή. Όταν προσδιορισθούν οι ονομαστικές τιμές όλων των παραμέτρων που συνθέτουν το φορτίο της διεργασίας, μπορεί να προσδιορισθεί το **ονομαστικό της φορτίο** (nominal load).

Μία άλλη παράμετρος που εμφανίζεται στις διεργασίες είναι η **υστέρηση διερ-**

γαστιάς (process lag). Είναι γεγονός ότι, ο έλεγχος των διεργασιών είναι πρόβλημα που αφορά μεταβολές ως προς το χρόνο. Έστω ότι μια αλλαγή του φορτίου διεργασίας, σε κάποια χρονική στιγμή, επιφέρει μια μεταβολή στην ελεγχόμενη μεταβλητή. Το σύστημα ελέγχου αρχίζει να αντιδρά αμέσως και, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, η ελεγχόμενη μεταβλητή επανέρχεται στην επιθυμητή τιμή που έχει τεθεί από το σημείο ρυθμίσεως. Το χρονικό διάστημα που περνάει μέχρις ότου αποκατασταθεί η τελική τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής, αποτελεί τη χρονική καθυστέρηση με την οποία αντιδρά το σύστημα.

Ένα τμήμα της καθυστέρησεως αυτής οφείλεται στην αδράνεια της διεργασίας και ονομάζεται υστέρηση διεργασίας.

Αν, π.χ. στο σύστημα του σχήματος 4.3 η ταχύτητα εισροής υγρού στη δεξαμενή Ω₁ διπλασιασθεί, θα μεταβληθεί αντίστοιχα το φορτίο διεργασίας, με συνέπεια να μειωθεί σημαντικά η θερμοκρασία Θ του υγρού. Το σύστημα ελέγχου αντιδρά ανοίγοντας τη βαλβίδα ατμού, οπότε περνάει περισσότερος ατμός στη σπείρα, και επομένως περισσότερη θερμότητα στο υγρό της δεξαμενής. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, η θερμοκρασία Θ του υγρού επανέρχεται στην επιθυμητή τιμή της. Η κύρια αιτία της καθυστέρησεως είναι η θερμική αδράνεια της σπείρας και του υγρού της διεργασίας. Αντίθετα, ο μετρητής και ο ελεγκτής αντιδρούν ταχύτατα κατά τη λειτουργία τους. Η μεγάλη δηλαδή χρονική καθυστέρηση οφείλεται στην ίδια τη διεργασία και όχι στο τμήμα που επιτελεί τον έλεγχο του συστήματος. Το παράδειγμα αυτό δείχνει, ότι είναι ανώφελο να προσπαθούμε να βελτιώσουμε το χρόνο αντιδράσεως του ελεγκτή, όταν η αδράνεια της διεργασίας είναι σημαντική.

4.4 Παράμετροι ελέγχου.

4.4.1 Σφάλμα.

Μετά την εξέταση των χαρακτηριστικών της διεργασίας ασχολούμαστε με τις γενικές ιδιότητες του συστήματος ελέγχου. Στο σχήμα 4.4α το σφάλμα του συστήματος είναι $\epsilon = E_A - E$, όπου E_A είναι η επιθυμητή τιμή και E η πραγματική τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής. Στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, η πραγματική τιμή της μεταβλητής E συνήθως δεν είναι γνωστή. Έτσι, αντικαθίσταται από την τιμή μετρήσεως E_M , η οποία είναι το σήμα εξόδου του μετρητή που μετράει την ελεγχόμενη μεταβλητή E .

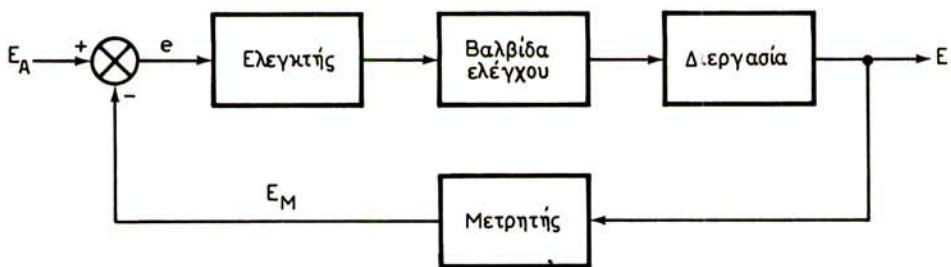
Η φύση του σήματος E_M εξαρτάται από το είδος του ελεγκτή που χρησιμοποιείται στο ΣΑΕ. Αν ο ελεγκτής είναι ηλεκτρονικός, το σήμα E_M είναι επίσης ηλεκτρονικό, αν είναι πνευματικός το σήμα E_M είναι πνευματικό, κ.ο.κ. Στο σχήμα 4.4α φαίνεται το λειτουργικό διάγραμμα για το παράδειγμα του σχήματος 4.3.

Ο ελεγκτής έχει ως είσοδο το **σήμα σφάλματος ϵ** , που πρόερχεται από την έξοδο του συγκριτή. Το σήμα σφάλματος ϵ που λέγεται και απόκλιση (deviation) δίνεται από τη σχέση

$$\epsilon = E_A - E_M \quad (4.4)$$

όπου E_A = σημείο ρυθμίσεως (ή επιθυμητή τιμή) της ελεγχόμενης μεταβλητής,
 E_M = τιμή μετρήσεως της ελεγχόμενης μεταβλητής.

Η σύγκριση του ορισμού (4.4) με τη σχέση (4.1) που ορίζει το σφάλμα συστή-



Σχ. 4.4a.
Λειτουργικό διάγραμμα βιομηχανικού ελέγχου.

ματος, φανερώνει ότι το σήμα σφάλματος (ή η απόκλιση) δεν είναι το ίδιο με το σφάλμα συστήματος. Είναι δύναμη μια ένδειξη του σφάλματος και θα χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος ελέγχου στην ανάλυση που θα ακολουθήσει. Για πρακτικούς λόγους, η σχέση (4.4) εκφράζεται συνήθως σε **ποσοστό της πλήρους κλίμακας της αποκλίσεως**. Το ποσοστιαίο σφάλμα ορίζεται ως

$$\theta_{\pi} = \left[\frac{E_M - E_{\text{ελαχ}}}{E_{\mu\text{εγ}} - E_{\text{ελαχ}}} - \frac{E_A - E_{\text{ελαχ}}}{E_{\mu\text{εγ}} - E_{\text{ελαχ}}} \right] \times 100$$

ή μετά τις αλγεβρικές απλοποιήσεις

$$\theta_{\pi} = \left[\frac{E_M - E_A}{E_{\mu\text{εγ}} - E_{\text{ελαχ}}} \right] \times 100 \quad (4.5)$$

όπου θ_{π} = σφάλμα σε ποσοστό πλήρους κλίμακας της αποκλίσεως

E_M = τιμή μετρήσεως της ελεγχόμενης μεταβλητής

E_A = σημείο ρυθμίσεως της μεταβλητής

$E_{\mu\text{εγ}}$ = μέγιστη τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής

$E_{\text{ελαχ}}$ = ελάχιστη τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής.

Αν π.χ. η μεταβλητή κυμαίνεται μέσα σε μια κλίμακα 4-20mA και το σημείο ρυθμίσεως της έχει ορισθεί σε 9mA, τότε μια τιμή μετρήσεως 11mA αντιστοιχεί σε σφάλμα

$$\theta_{\pi} = \left[\frac{11\text{mA} - 9\text{mA}}{20\text{mA} - 4\text{mA}} \right] \times 100 = \frac{2}{16} \times 100 = 12.5\%$$

Στη σχέση (4.5), η επιθυμητή τιμή E_A αφαιρείται από την ελεγχόμενη τιμή E_M . Στις σχέσεις (4.1) και (4.4) γίνεται το αντίθετο. Σημειώνεται δηλαδή ότι, σε πρακτικές εφαρμογές, όταν το σφάλμα είναι αρνητικό, υπονοείται ότι $E_A > E_M$, σύμφωνα με τη σχέση (4.5).

Παράδειγμα 4.1.

Η Θερμοκρασία θ του υγρού στη δεξαμενή (σχήμα 4.3) κυμαίνεται σε μια κλίμακα 300 – 400°C, ενώ το σημείο ρυθμίσεως είναι τοποθετημένο στην τιμή 380°C. Ποιο είναι το σφάλμα του συστήματος σε ποσοστό πλήρους κλίμακας της αποκλίσεως, όταν το θερμοστοιχείο στη δεξαμενή δείχνει 370°C;

Λύση.

$$\epsilon_{\pi} = \left[\frac{E_M - E_A}{E_{μεγ} - E_{ελαχ}} \right] \times 100 = \frac{370 - 380}{400 - 300} \times 100 = -10\%$$

Το αρνητικό σφάλμα σημαίνει ότι η τιμή μετρήσεως είναι μικρότερη της τιμής του σημείου ρυθμίσεως.

4.4.2 Πεδίο μεταβλητής.

Μια παράμετρος που υπεισέρχεται και στον ορισμό του σφάλματος συστήματος είναι το **πεδίο μεταβλητής** (variable range). Το πεδίο αυτό, όπως είδαμε προηγουμένως, ορίζεται από τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής. Στο πεδίο μεταβλητής βρίσκεται τοποθετημένη η τιμή του σημείου ρυθμίσεως.

4.4.3 Πεδίο παραμέτρου ελέγχου.

Μια άλλη παράμετρος ελέγχου σχετίζεται με την έξοδο του ελεγκτή και ορίζεται από τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή που παίρνει το σήμα εξόδου του ελεγκτή. Συνήθως η τιμή της εξόδου του ελεγκτή εκφράζεται σε ποσοστό της μέγιστης τιμής της. Στο παράδειγμα π.χ. του σχήματος 4.3, όταν η βαλβίδα του ατμού (το στοιχείο ελέγχου) είναι τελείως ανοικτή, έχουμε 100% έξοδο ελεγκτή. Αντίστροφα, 0% έξοδος ελεγκτή συνήθως σημαίνει ότι η βαλβίδα είναι τελείως κλειστή. Είναι επίσης δυνατό να ρυθμίσουμε τον ελεγκτή έτσι, ώστε το 0% της εξόδου του να αντιστοιχεί σε θέση βαλβίδας κατά το ένα τέταρτο ανοικτής.

Η έξοδος του ελεγκτή εκφράζεται ως ποσοστό της πλήρους κλίμακας του **πεδίου παραμέτρου ελέγχου** (control parameter range), σύμφωνα με τη σχέση

$$\Sigma = \left[\frac{T_{εξ} - T_{ελαχ}}{T_{μεγ} - T_{ελαχ}} \right] \times 100 \quad (4.6)$$

όπου Σ = έξοδος ελεγκτή σε ποσοστό πλήρους κλίμακας

$T_{εξ}$ = τιμή εξόδου ελεγκτή

$T_{μεγ}$ = μέγιστη τιμή της παραμέτρου ελέγχου

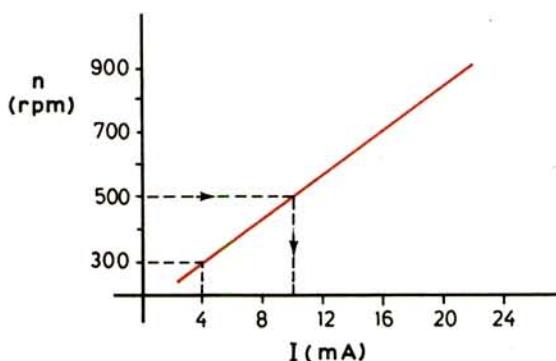
$T_{ελαχ}$ = ελάχιστη τιμή της παραμέτρου ελέγχου.

Παράδειγμα 4.2.

Η έξοδος ενός ελεγκτή έχει τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 4mA και 20mA (ΣΡ). Το ρεύμα αυτό ρυθμίζει την ταχύτητα ενός κινητήρα, η οποία με τη σειρά της κυμαίνεται μεταξύ 300 και 800 στροφών ανά λεπτό. Η σχέση μεταξύ του ρεύματος I και της ταχύτητας του κινητήρα η είναι γραμμική και δίνεται γραφικά στο διάγραμμα του σχήματος 4.4β. Υπολόγισε το ρεύμα που αντιστοιχεί σε ταχύτητα 500 στροφών ανά λεπτό, ως ποσοστό της κλίμακας του ελεγκτή.

Λύση.

Από τη γραφική παράσταση βρίσκομε ότι, όταν η ταχύτητα του κινητήρα είναι 500 rpm, η έξοδος του ελεγκτή είναι 10 mA. Επομένως, κάνοντας χρήση του τύ-



Σχ. 4.4b.

που (4.6), υπολογίζομε διτή η τιμή αυτή, ως ποσοστό της πλήρους κλίμακας 4-20 mA, είναι

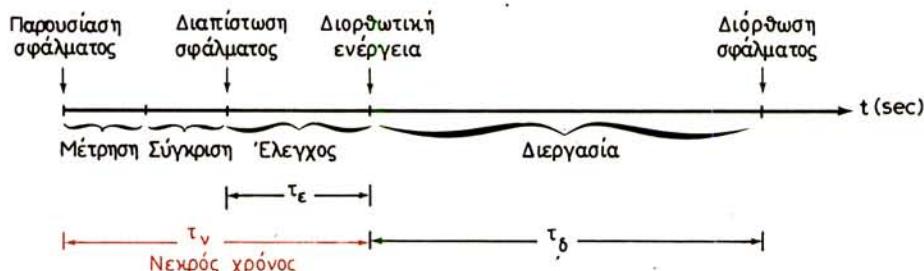
$$\Sigma = \left[\frac{10 - 4}{20 - 4} \right] \times 100 = \frac{6}{16} \times 100 = 37.5\%$$

4.4.4 Υστέρηση ελέγχου.

Στην παράγραφο 4.3 περιγράψαμε τα κύρια χαρακτηριστικά των διεργασιών. Αν υποτεθεί διτή η ελεγχόμενη μεταβλητή αλλάξει τιμή, το ΣΑΕ επισημαίνει αυτή τη μεταβολή και επαναφέρει την ελεγχόμενη μεταβλητή στην επιθυμητή τιμή. Η δόλη διαδικασία αποκαταστάσεως της τιμής της εξόδου απαιτεί κάποιο χρόνο, ο οποίος διαφέρει από σύστημα σε σύστημα. Ένα μέρος αυτού του χρόνου, συνήθως το μεγαλύτερο, είδαμε διτή οφείλεται στην αδράνεια της διεργασίας που λέγεται υστέρηση διεργασίας. Ένα άλλο μέρος του χρόνου καθυστέρησεως ενός ΣΑΕ, οφείλεται στην καθυστέρηση της διαδικασίας ελέγχου και γι' αυτό λέγεται **υστέρηση ελέγχου** (control lag). Η τελευταία είναι συνήθως πολύ μικρότερη από την υστέρηση της διεργασίας.

4.4.5 Νεκρός χρόνος.

Μια άλλη παράμετρος, που υπεισέρχεται στα βιομηχανικά ΣΑΕ είναι ο χρόνος



τ_e = Υστέρηση ελέγχου

τ_d = Υστέρηση διεργασίας

τ_v = Νεκρός χρόνος συστήματος

Σχ. 4.4γ.

*Χρονική σειρά των διαδικασιών ενός ΣΑΕ.

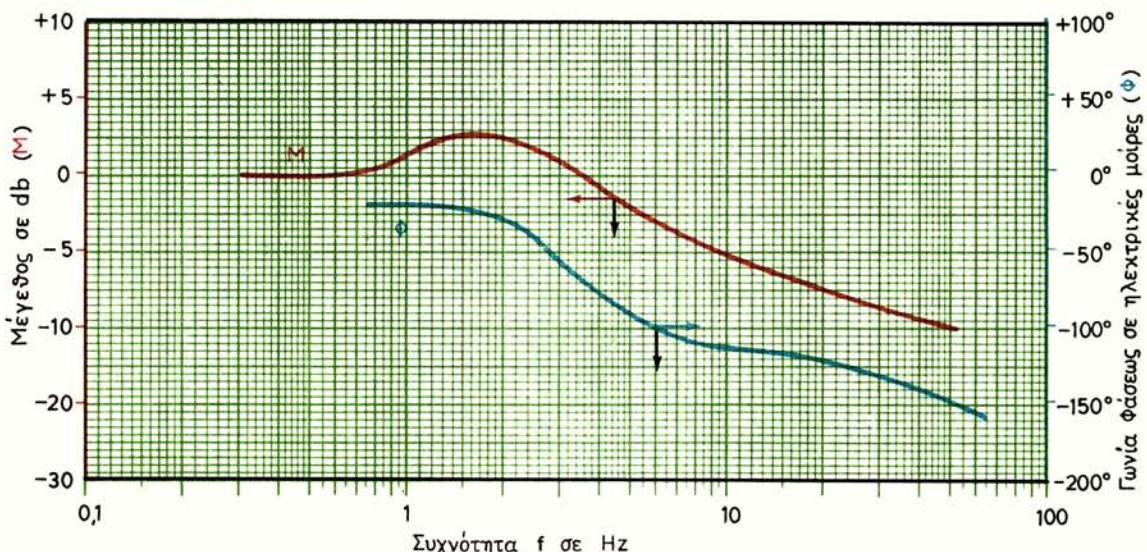
που περνάει από τη στιγμή που δημιουργείται το σφάλμα μέχρι τη στιγμή που ξεκινάει η πρώτη διορθωτική δράση στη διεργασία. Το διάστημα αυτό λέγεται **νεκρός χρόνος** (*dead time*) του συστήματος, επειδή κατά τη διάρκεια αυτή το σύστημα δεν αντιδρά αλλά παραμένει αδρανές. Στο σχήμα 4.4γ παρουσιάζεται η ακολουθία των διαδικασιών από την έναρξη μέχρι το πέρας της αντιδράσεως του ΣΑΕ, δηλαδή από τη στιγμή που εμφανίζεται απόκλιση στην έξοδο της διεργασίας μέχρι τη στιγμή που ολοκληρώνεται η διόρθωση.

4.5 Αρμονική απόκριση.

Η **αρμονική απόκριση** (*frequency response*) αποτελεί μέθοδο αναλύσεως και συνθέσεως των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Το αποτέλεσμα της αρμονικής απόκρισεως ενός συστήματος απεικονίζεται με δύο γραφικές παραστάσεις που δίνουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά του συστήματος όταν στην είσοδο του εφαρμόζονται ημιτονοειδή σήματα. Οι πληροφορίες αυτές δίνονται στο πεδίο των συχνοτήτων για αυτό και έχει επικρατήσει ο όρος «**αρμονική απόκριση**», που όπως ξέρομε, σχετίζεται με ημιτονοειδείς ταλαντώσεις.

4.5.1 Γραφικές παραστάσεις.

Στο σχήμα 4.5α δίνονται οι δύο γραφικές παραστάσεις της αρμονικής απόκρισεως ενός συστήματος. Η μια παράσταση λέγεται γραφική **παράσταση μεγέθους**

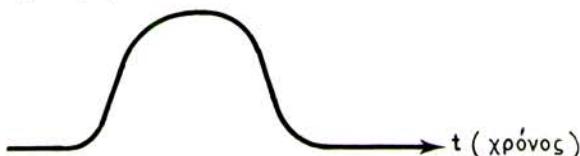


Σχ. 4.5α.
Αρμονική απόκριση συστήματος.

(*magnitude graph*) και δίνει πληροφορίες για το μέγεθος της αποκρίσεως του συστήματος σε σχέση με το μέγεθος του ημιτονοειδούς σήματος της εισόδου. Στο σχήμα, η παράσταση φέρει το σύμβολο M και προσδιορίζεται από τον αριστερό κάθετο άξονα και τον οριζόντιο άξονα. Η άλλη γραφική παράσταση λέγεται **παρά-**

σταση φάσεως (phase graph) και δίνει πληροφορίες για την καθυστέρηση με την οποία το σύστημα αποκρίνεται σε κάθε ημιτονοειδή είσοδο. Η παράσταση αυτή, στο σχήμα φέρει το σύμβολο Φ και προσδιορίζεται από το δεξιό κάθετο άξονα και τον οριζόντιο άξονα.

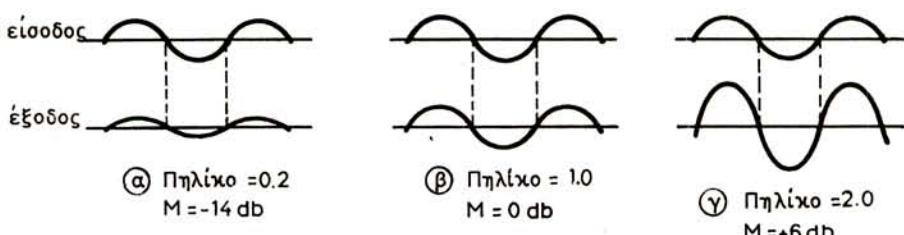
Για να αντιληφθούμε τη χρησιμότητα της αρμονικής αποκρίσεως, ας υποθέσουμε ότι το σύστημά μας διεγέρεται από ένα σήμα που έχει τη μορφή του σχήματος 4.5β. Από τα μαθηματικά είναι γνωστό ότι τέτοια σήματα μπορούν να εκφρασθούν ως συνδυασμός πολλών συναρτήσεων, ημιτονοειδούς μορφής με διαφορετικά πλάτη και συχνότητες.



Σχ. 4.5β.
Υποθετικό σήμα παρενοχλήσεως.

Ετσι το σύστημα «βλέπει» το σήμα αυτό σαν ένα συνδυασμό ταλαντώσεων, π.χ., με υψηλή, μέση και χαμηλή συχνότητα. Για να δούμε πώς αντιδρά το σύστημα στην παρενοχληση αυτή, μπορούμε να εξετάσουμε πώς αντιδρά στα μεμονωμένα ημιτονοειδή σήματα που έχουν αυτές τις συχνότητες. Μας ενδιαφέρει η αντίδραση του συστήματος ως προς το μέγεθος και τη φάση της.

Ας εξετάσουμε πρώτα την αντίδραση του συστήματος σε ένα σήμα χαμηλής συχνότητας. Στο σχήμα 4.5γ βλέπομε τρεις δυνατότητες των αντίστοιχων μεγεθών του σήματος παρενοχλήσεως και του σήματος αποκρίσεως του συστήματος. Παρατηρούμε ότι, όταν το μέγεθος του σήματος αποκρίσεως είναι π.χ. 5 φορές μικρότερο από το μέγεθος του σήματος παρενοχλήσεως, έχουμε **πηλίκο μεγέθους** (magnitide ratio) ίσο με 0,2. Όταν τα δύο μεγέθη είναι ίσα, έχουμε πηλίκο μεγέ-



Σχ. 4.5γ.

Σύγκριση μεγεθών παρενοχλήσεως και αποκρίσεως και αντίστοιχο μέγεθος σε db.

θους 1,0 και όταν το μέγεθος της αποκρίσεως είναι διπλάσιο του μεγέθους της παρενοχλήσεως, το πηλίκο μεγέθους είναι 2,0. Το μέγεθος της αρμονικής αποκρίσεως μετράται με μονάδες **ντεσιμπέλ** (decibel) όπου, το μέγεθος M σε decibel ή db είναι

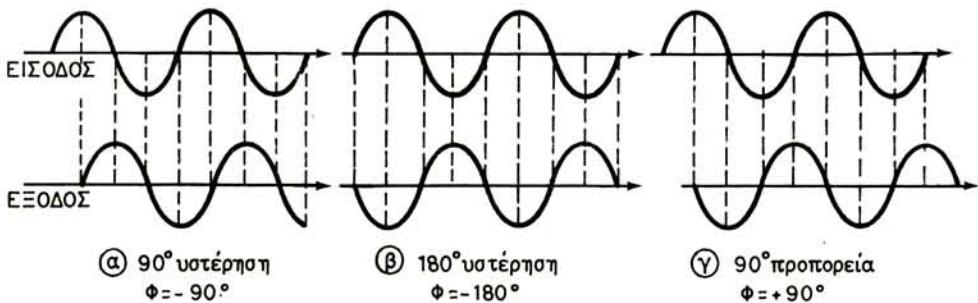
$$M_{db} = 20 \log_{10} \frac{\text{Μέγεθος εξόδου}}{\text{Μέγεθος εισόδου}} = 20 \log_{10} (\text{πηλίκο μεγέθους}) \quad (4.7)$$

Με βάση τον παραπάνω τύπο, όταν το πηλίκο μεγέθους είναι 0,2, το μέγεθος M σε ντεσιμπέλ είναι ίσο με

$$20 \log_{10} (0,2) = 20 \log_{10} \frac{2}{10} = 20 (\log_{10} 2 - \log_{10} 10) = \\ = 20 (0,3) - 20 (1) = 6 - 20 = -14 \text{db}$$

Με τον ίδιο τύπο βρίσκομε ότι στο πηλίκο μεγέθους που είναι ίσο με 1,0 αντιστοιχούν 0 db, και σε πηλίκο μεγέθους ίσο με 2,0 αντιστοιχούν +6 db.

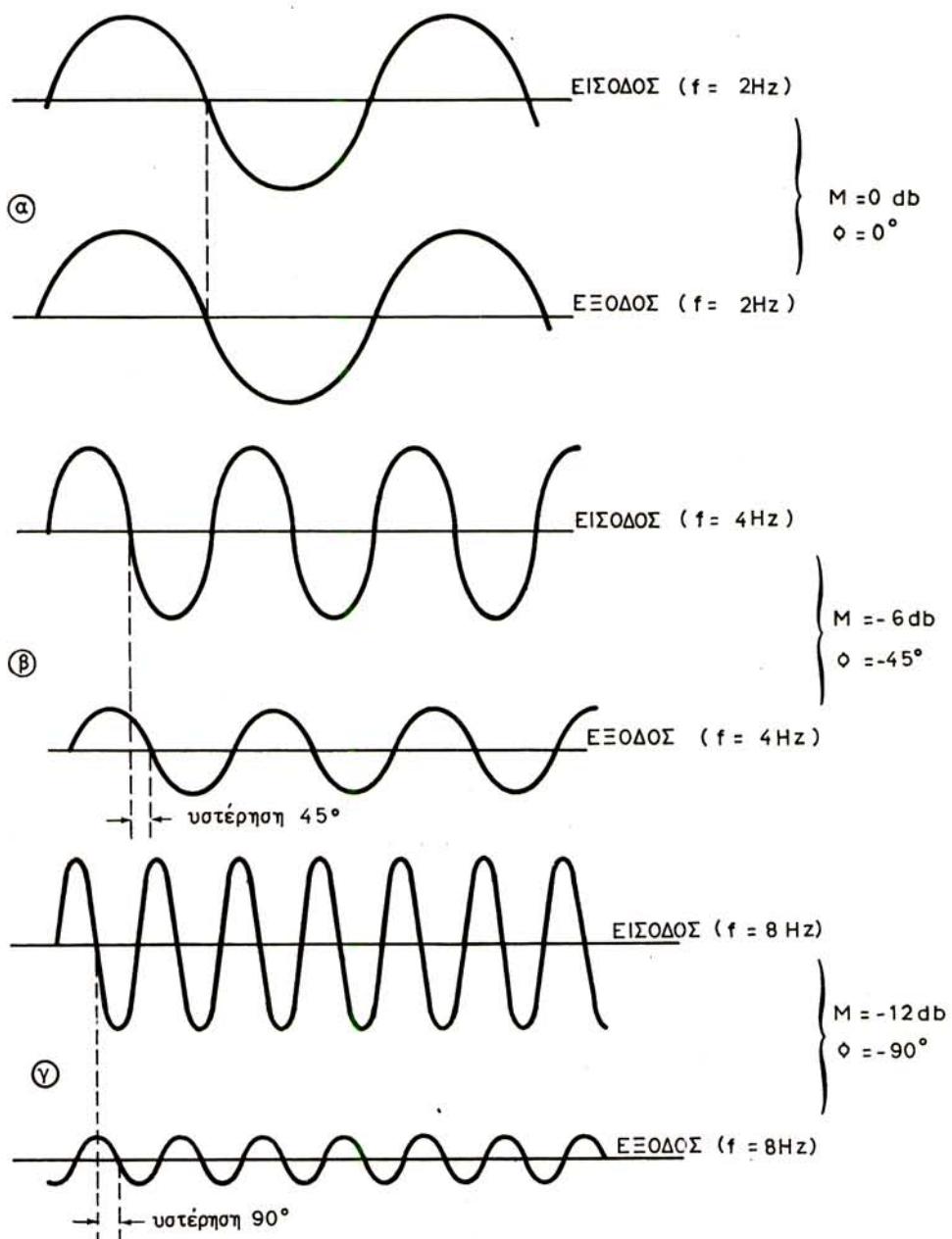
Εξετάζομε τώρα, για την ίδια συχνότητα, τη φάση της αποκρίσεως του συστήματος, συγκρίνοντας τα σήματα παρενοχλήσεως και αποκρίσεως, ως προς τη σχετική θέση τους στον άξονα του χρόνου. Στο σχήμα 4.56 βλέπομε τρεις δυνατότητες. Στην πρώτη, η απόκριση είναι καθυστερημένη ως προς το σήμα παρενοχλήσεως, κατά 90° . Επομένως, το σύστημα έχει **υστέρηση φάσεως** (phase lag) και $\Phi = -90^\circ$. Στη δεύτερη, το σήμα αποκρίσεως (έξοδος) υστερεί κατά 180° του σήματος παρενοχλήσεως (είσοδος), δηλαδή έχομε $\Phi = -180^\circ$. Στην τρίτη, η έξοδος προπορεύεται από την είσοδο κατά 90° , δηλαδή το σύστημα έχει **προπορεία φάσεως** (phase lead) και $\Phi = +90^\circ$. Γενικά, όταν η έξοδος είναι καθυστερημένη ως προς την είσοδο, η γωνία φάσεως Φ είναι αρνητική. Όταν η έξοδος προπορεύεται της εισόδου η γωνία φάσεως Φ είναι θετική.



Σχ. 4.56.

Παραδείγματα τριών διαφορών φάσεως μεταξύ εισόδου και εξόδου.

Με βάση την παραπάνω ανάπτυξη, είναι εύκολο να κατασκευασθούν οι δύο γραφικές παραστάσεις της αρμονικής αποκρίσεως. Ως εφαρμογή, προσδιορίζομε τρία σημεία των καμπυλών μεγέθους και φάσεως στο παράδειγμα του σχήματος 4.5e. Έστω ότι θέλομε να βρούμε το μέγεθος σε db και τη γωνία φάσεως στις συχνότητες $f = 2 \text{ Hz}$, $f = 4 \text{ Hz}$ και $f = 8 \text{ Hz}$. Υποθέτομε ότι, όταν παρενοχλήσομε το σύστημα με ημιτονοειδή σήματα αυτών των συχνοτήτων, προκύπτουν οι αποκρίσεις του σχήματος 4.5e. Όταν η είσοδος έχει συχνότητα $f = 2 \text{ Hz}$ το πλάτος της εξόδου ισούται προς αυτό της εισόδου, ενώ η φάση της εξόδου δεν παρουσιάζει υστέρηση ή προπορεία. Δηλαδή, στη συχνότητα αυτή, το πηλίκο μεγέθους είναι ίσο με 1 και το μέγεθος 0 db, η δε γωνία φάσεως είναι ίση με μηδέν. Δηλαδή, όταν $f = 2 \text{ Hz}$, $M = 0 \text{ db}$ και $\Phi = 0^\circ$. Όταν η είσοδος έχει συχνότητα $f = 4 \text{ Hz}$, το πλάτος της εξόδου είναι το μισό του πλάτους της εισόδου και η έξοδος υστερεί κατά 45° της εισόδου. Όταν δηλαδή $f = 4 \text{ Hz}$, $M = -6 \text{ db}$ και $\Phi = -45^\circ$. Τέλος, όταν

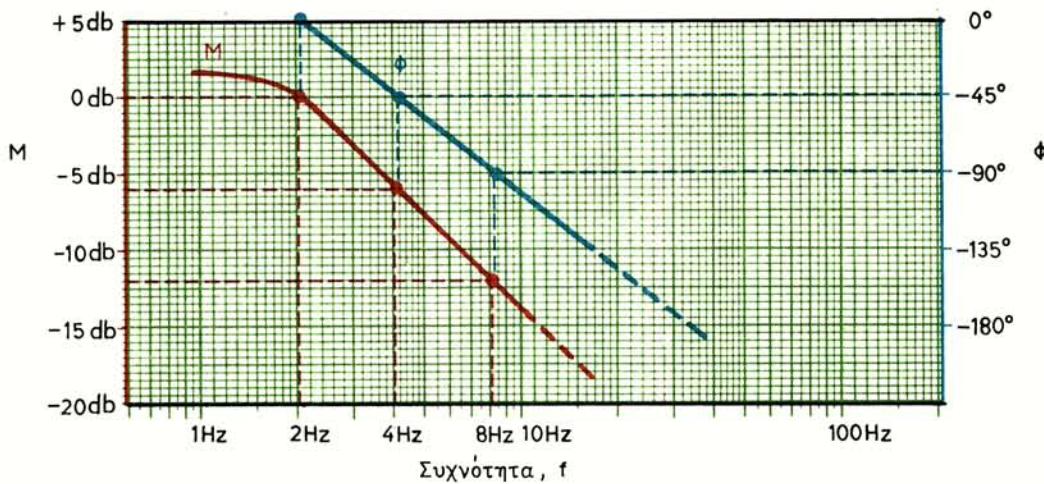


Σχ. 4.5ε.

Σύγκριση σημάτων εξόδου και εισόδου για τρεις διαφορετικές συχνότητες.

$f = 8 \text{ Hz}$, το πλάτος της εξόδου είναι τέσσερις φορές μικρότερο από το πλάτος της εισόδου και η έξοδος υστερεί χρονικά της εισόδου κατά 90° . Δηλαδή, όταν $f = 8 \text{ Hz}$, $M = -12 \text{ db}$ και $\Phi = -90^\circ$. Αν επαναλάβομε την ίδια διαδικασία για πε-

ρισσότερες συχνότητες, μπορούμε να σχεδιάσουμε τη γραφική παράσταση της αρμονικής αποκρίσεως του συστήματος. Στο σχήμα 4.5στ. έχει χαραχθεί το μέρος της αρμονικής αποκρίσεως που περιλαμβάνει τα παραπάνω τρία σημεία. Παρατηρούμε ότι, για να μπορούμε να καλύψουμε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων στις γραφικές παραστάσεις των αρμονικών αποκρίσεων, χρησιμοποιούμε λογαριθμική κλίμακα στον οριζόντιο άξονα.



Σχ. 4.5στ.
Αρμονική απόκριση με βάση τα δεδομένα του σχήματος 4.5ε.

4.5.2 Χρησιμότητα αρμονικής αποκρίσεως.

Οι πληροφορίες τις οποίες μπορούμε να πάρομε από την αρμονική απόκριση ενός συστήματος εκτίθενται παρακάτω.

Τελική περίοδος. Μια από τις σημαντικές πληροφορίες που δίνει η αρμονική απόκριση ενός συστήματος είναι η **τελική περίοδος** Π_T (ultimate period). Η γραφική παράσταση της γωνίας φάσεως Φ είναι ενδεχόμενο να συμπεριλαμβάνει ένα σημείο, όπου η φάση είναι -180° . Η γωνία των 180° έχει μεγάλη σημασία στην **ευστάθεια** (stability) του συστήματος. Όταν η χρονική απόκριση ενός συστήματος ταλαντεύεται με σταθερό πλάτος, η συχνότητα ταλαντώσεως είναι εκείνη που αντιστοιχεί στη φάση -180° . Στο σύστημα, π.χ. με την αρμονική απόκριση του σχήματος 4.5ζ η συχνότητα αυτή είναι ίση με 20 Hz . Η περίοδος που αντιστοιχεί σ' αυτή τη συχνότητα είναι η τελική περίοδος, δηλαδή

$$\Pi_T = \frac{1}{f(\Phi = -180^\circ)} \quad (4.8)$$

Επομένως, στο παράδειγμα η τελική περίοδος του συστήματος είναι $(1/20) \text{ λεπτά}$, ή 3 δευτερόλεπτα .

Χρόνος αποκαταστάσεως. Από τη συχνότητα που αντιστοιχεί στη γωνία φάσεως -140° , είναι δυνατό να εκτιμήσουμε το **χρόνο αποκαταστάσεως** T_a (settling time) που ορίσαμε στην παράγραφο 4.2.2. Η σχέση μεταξύ T_a και $f(\Phi = -140^\circ)$ είναι

$$T_a = \frac{2}{f(\Phi = -140^\circ)} \quad (4.9)$$

Επίσης, η ίδια συχνότητα σχετίζεται και με το χρόνο που χρειάζεται η χρονική απόκριση του συστήματος να φθάσει για πρώτη φορά στην επιθυμητή τιμή της (βλ. σχήμα 4.2α). Ο χρόνος αυτός λέγεται **χρόνος ανυψώσεως** T_u (rise time) και μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση

$$T_u = \frac{1}{2f(\Phi = -140^\circ)} \quad (4.10)$$

Στο σύστημα η αρμονική απόκριση του οποίου δίνεται στο σχήμα 4.5ζ, υπολογίζομε ότι

$$T_u = \frac{2}{4\text{Hz}} = 0,5 \text{ λεπτά ή } 30 \text{ δευτερόλεπτα.}$$

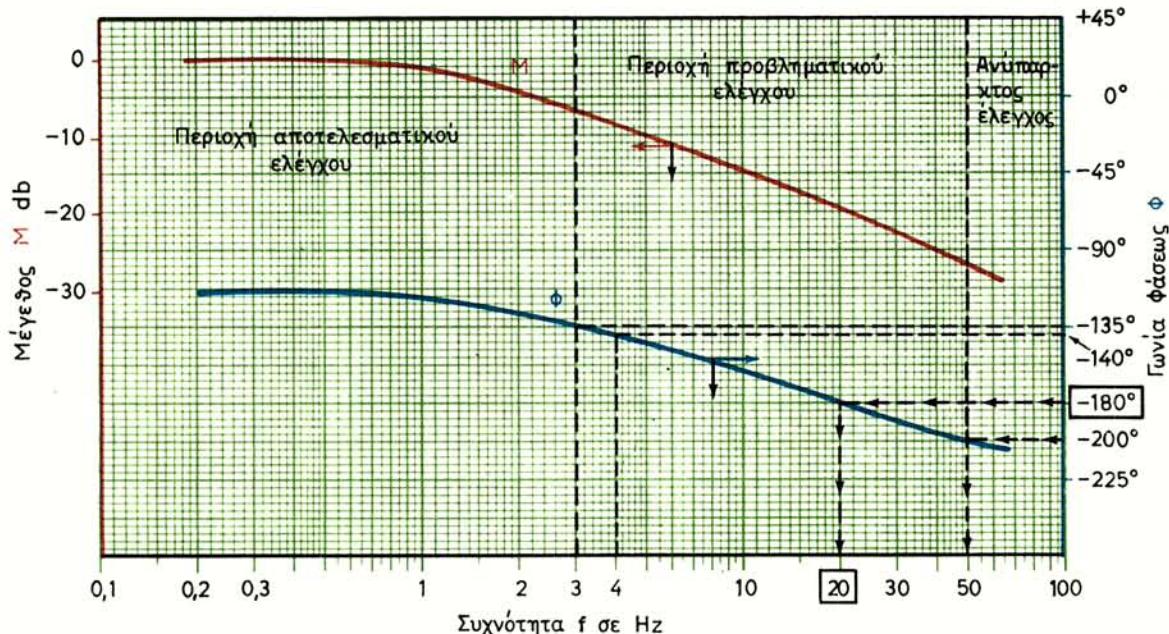
Επίσης, ο χρόνος ανυψώσεως

$$T_u = \frac{1}{2 \times 4 \text{Hz}} = 0,13 \text{ λεπτά ή } 7,5 \text{ δευτερόλεπτα.}$$

Νεκρός χρόνος. Όταν ο νεκρός χρόνος (dead time) του συστήματος είναι μεγαλύτερος του ($0,1$) P_T , θα παρουσιασθεί μια ασυνέπεια περίπου 35° στη συχνότητα $f(\Phi = -180^\circ)$, με αποτέλεσμα να επηρεασθεί η ακρίβεια του συστήματος ελέγχου. Αυτή η ασυνέπεια επηρεάζει σοβαρά την κλίση της γραφικής παραστάσεως της φάσεως, και τη συχνότητα $f(\Phi = -180^\circ)$. Η αρμονική απόκριση παρέχει πληροφορία σχετικά με το νεκρό χρόνο του συστήματος.

Διάγνωση προβληματικών παρενοχλήσεων. Η αρμονική απόκριση ενός συστήματος βοηθάει στο να επισημάνουμε τυχόν παρενοχλήσεις που μπορούν να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα στη λειτουργία του συστήματος. Επειδή ορισμένα **συστήματα ελέγχου** έχουν συχνά την τάση να υπερδιογκώνουν τα σήματα εισόδου σε συχνότητες που αντιστοιχούν στο φάσμα φάσεων μεταξύ -135° και -200° συμπεραίνουμε ότι πρέπει να αποφεύγονται τέτοιες παρενοχλήσεις σ' αυτές τις συχνότητες. Επειδή δε επίσης ένα σύστημα ελέγχου δεν μπορεί να ελέγξει αποτελεσματικά τα παρενοχλητικά σήματα σε συχνότητες μεγαλύτερες της $f(\Phi = -200^\circ)$ θα πρέπει να αποκλείσουμε τις παρενοχλήσεις αυτές κατά τη λειτουργία του συστήματος. Στο σχήμα 4.5ζ σημειώνονται οι περιοχές των συχνοτήτων, όπου, σύμφωνα με τα παραπάνω, ο έλεγχος είναι αποτελεσματικός, λίγο αποτελεσματικός ή καθόλου αποτελεσματικός.

Τέλος, η αρμονική απόκριση χρησιμεύει για να διαγνώσουμε την προβληματική λειτουργία ενός οργάνου ή εξαρτήματος μέσα στο πλήρες σύστημα ελέγχου. Το πρόβλημα παρουσιάζεται ως μια μικρή ή μεγάλη διόγκωση (ανάλογα με τη σοβαρότητα του προβλήματος), κάτι σαν ένας «λοφίσκος» στη γραφική παράσταση του μεγέθους. Η διόγκωση δε αυτή θα παρουσιασθεί στη συχνότητα λειτουργίας του οργάνου ή εξαρτήματος που έχει το πρόβλημα. Έτσι, όταν βρούμε μια τέτοια διόγκωση του μεγέθους της αρμονικής αποκρίσεως σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, διερωτόμαστε αμέσως ποιο εξάρτημα του συστήματος λειτουργεί σ' αυτή τη συχνότητα ώστε να το ελέγχουμε και να το απομονώσουμε.



Σχ. 4.5z.

Αρμονική απόκριση ενός συστήματος.

4.5.3 Ευστάθεια συστήματος.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου είναι η ευστάθεια (stability). Στο σχήμα 4.2γ είδαμε ότι η αστάθεια (Instability) εκδηλώνεται με μια ανεξέλεγκτη και συνεχή αύξηση της δυναμικής αποκρίσεως του συστήματος.

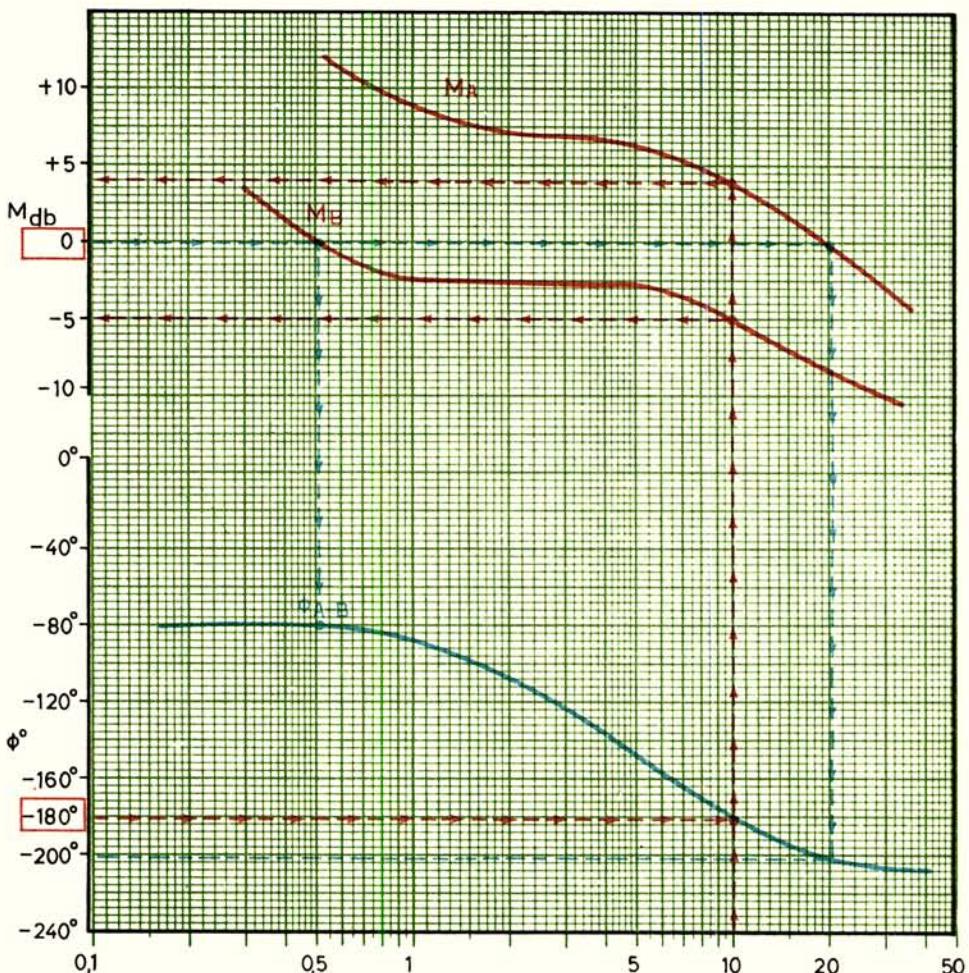
Για τη διερεύνηση της ευστάθειας ή αστάθειας ενός συστήματος, του οποίου γνωρίζομε την αρμονική απόκριση, υπάρχουν οι ακόλουθοι δύο κανόνες:

Κανόνας Α: Το σύστημα είναι ευσταθές, όταν, στη συχνότητα η οποία αντιστοιχεί σε πηλίκο μεγέθους ίσο με τη μονάδα (0 db), η υστέρηση φάσεως είναι μικρότερη των 180° .

Κανόνας Β: Το σύστημα είναι ευσταθές, όταν, στη συχνότητα, η οποία αντιστοιχεί σε υστέρηση φάσεως 180° , το πηλίκο μεγέθους είναι μικρότερο της μονάδας (δηλαδή το μέγεθος M έχει αρνητική τιμή σε db).

Ως παράδειγμα θεωρούμε τις αρμονικές αποκρίσεις δύο συστημάτων A και B που φαίνονται στο σχήμα 4.5η. Η παράσταση της γωνίας φάσεως Φ_{A-B} είναι κοινή στα δύο συστήματα. Οι παραστάσεις μεγέθους δύμας M_A και M_B είναι διαφορετικές.

Εφαρμόζοντας τους δύο κανόνες, διαπιστώνομε ότι το σύστημα A είναι ασταθές, επειδή η τιμή $M_A = 0\text{db}$, στη συχνότητα $f = 20\text{ Hz}$, αντιστοιχεί σε υστέρηση φάσεως -200° , που είναι μεγαλύτερη των (-180°) . Επίσης, στη συχνότητα που αντιστοιχεί στη φάση -180° ($f = 10\text{ Hz}$), το μέγεθος $M_A = +4\text{ db}$ δηλαδή το πηλίκο μεγέθους είναι μεγαλύτερο της μονάδας. Αντίθετα το σύστημα B είναι ευσταθές, γιατί η αρμονική του απόκριση ικανοποιεί τους κανόνες που προαναφέραμε.



Σχ. 4.5η.

Αρμονική απόκριση ενός ευσταθούς και ενός ασταθούς συστήματος.

Περιθώριο μεγέθους και φάσεως. Οι κανόνες ευστάθειας που προαναφέραμε αντιπροσωπεύουν το δριό της ευστάθειας. Δίνουν δηλαδή απάντηση με απόλυτο τρόπο, στο ερώτημα κατά πόσο το σύστημα είναι ευσταθές ή ασταθές. Συχνά όμως πρέπει να ξέρομε και το βαθμό ευστάθειας του συστήματος δηλαδή το περιθώριο ασφάλειας. Δύο εμπειρικοί κανόνες που εξασφαλίζουν ικανοποιητικά περιθώρια ευστάθειας είναι οι εξής:

Κανόνας A: Το σύστημα είναι ευσταθές, όταν η υστέρηση φάσεως είναι μικρότερη των 140° στην συχνότητα που αντιστοιχεί σε πηλίκο μεγέθους ίσο με μονάδα, το δε περιθώριο φάσεως (*phase margin*), από την οριακή τιμή των 180° είναι 40° .

Κανόνας B: Το σύστημα είναι ευσταθές, όταν το μέγεθος M είναι -5db (πηλίκο μεγέθους περίπου $0,32$) στη συχνότητα που αντιστοιχεί σε υστέρηση φάσεως ίση

με 180° το δε περιθώριο μεγέθους (*gain margin*), από την οριακή τιμή *Odb* είναι $5db$.

4.6 Μέθοδοι ελέγχου.

Όπως διαπιστώσαμε, για να ενεργοποιηθεί ο ελεγκτής ενός ΣΑΕ, πρέπει να παρουσιασθεί σφάλμα στο σύστημα. Αυτό σημαίνει, ότι η στιγμιαία τιμή της ελεγχόμενη μεταβλητής διαφέρει από την επιθυμητή τιμή, την οποία ορίσαμε ως σημείο ρυθμίσεως. Η σχέση μεταξύ του σφάλματος και του διορθωτικού σήματος που στέλνει ο ελεγκτής στο τελικό στοιχείο ελέγχου, προσδιορίζει τη μέθοδο ελέγχου που εφαρμόζεται στο σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος ελέγχου προσδιορίζεται από τη σχέση μεταξύ των παραμέτρων θ_p (σφάλμα σε ποσοστό της πλήρους κλίμακας αποκλίσεως από το σημείο ρυθμίσεως) και Σ (στιγμιαία έξοδος ελεγκτή σε ποσοστό της πλήρους κλίμακας εξόδου του ελεγκτή). Οι μέθοδοι ελέγχου κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες: **διακεκομένος έλεγχος** (*discontinuous control*) και **συνεχής έλεγχος** (*continuous control*).

Η διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών είναι ότι, στο διακεκομένο έλεγχο, το τελικό στοιχείο ελέγχου ρυθμίζεται κατά βαθμίδες, ενώ στο συνεχή έλεγχο μπορεί να πάρει οποιαδήποτε θέση μεταξύ των δύο ακραίων θέσεων (π.χ. τελείως ανοικτή καί τελείως κλειστή βαλβίδα). Αυτό σημαίνει ότι η διορθωτική δράση στο συ-

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6
Σύγκριση γενικών μεθόδων διακεκομένου και συνεχούς ελέγχου.

Μέθοδοι Ελέγχου	Δύο βαθμίδων (ON - OFF)	Διακεκομένος πολυβαθμιδικός	Συνεχής
	Άνοικτή Κλειστή	[Diagram showing a staircase-like waveform starting at zero, rising in discrete steps, and then dropping sharply to zero again.]	ON OFF
Γενική Αρχή (Διορθωτικές θέσεις)	Τελείως ανοικτή ή τελείως κλειστή δυνατή θέση	Διακεκριμένες ενδιάμεσες βαθμίδες μεταξύ της ανοικτής και της κλειστής θέσεως	Οποιαδήποτε θέση είναι δυνατή μεταξύ της ανοικτής και της κλειστής θέσεως
Υστέρηση ελεγκτή, από τελείως κλειστή μέχρι τελείως ανοικτή θέση	1 1000 sec	60 sec	λίγα δευτερόλεπτα
Εφαρμογή	Σχετικά αργές διεργασίες που δεν αντιδρούν στην παλμική τροφοδότηση ενέργειας	Σχετικά αργές διεργασίες που δεν αντιδρούν σε ξαφνι- κές και μικρής διάρκειας παρενο- χλήσεις	Ταχείες διεργασίες και διεργασίες που είναι ευαίσθητες σε ταχείες, μικρής διάρκειας παρενοχλήσεις και σε παλμική τροφοδότηση ενέργειας
Τύπος τελικού στοιχείου ελέγχου	Αέρια και Υγρά	Μαγνητική Βαλβίδα	Πνευματική βαλβίδα Ηλεκτρο-υδραυλικός επενεργητής
	Ηλεκτρική Ενέργεια	Διακόπτης ισχύος	Μονάδα με θυρίστορ

νεχή έλεγχο είναι πιο ευαίσθητη σε εξωτερικές μεταβολές και, κάτω από ορισμένες συνθήκες, πιο ακριβής. Ως ακραία περίπτωση διακεκομένου ελέγχου θεωρείται ο **έλεγχος δύο βαθμίδων ή έλεγχος δύο θέσεων** (two-step control). Πρόκειται για την περίπτωση που το τελικό στοιχείο ελέγχου παίρνει δύο ακραίες θέσεις ρυθμίσεως: Τελείως ανοικτή ή τελείως κλειστή, όταν πρόκειται για βαλβίδα, ή όταν πρόκειται για ηλεκτρικό στοιχείο, κύκλωμα ή διακοπή κυκλώματος. Μια άλλη ονομασία αυτής της μεθόδου ελέγχου, που έχει πάρα πολλές εφαρμογές στα σπίτια μας (θερμοσίφωνας, σύστημα κλιματισμού, ψυγείο κ.ά.), είναι «ON-OFF» έλεγχος. Στον Πίνακα 4.8 γίνεται σύγκριση μεταξύ των γενικών μεθόδων ON-OFF, διακεκομένου και συνεχούς ελέγχου.

4.6.1 Έλεγχος δύο βαθμίδων (ON-OFF).

Ο παλαιότερος και ο πιο στοιχειώδης τύπος ελέγχου είναι ο έλεγχος δύο βαθμίδων (two-step control), ο οποίος συχνά ονομάζεται **έλεγχος «ON-OFF» ή και έλεγχος δύο θέσεων**. Παρ' όλο ότι σήμερα, η μέθοδος «ON-OFF» θεωρείται ξεπερασμένη και ποιοτικά κατώτερη για βιομηχανικές εφαρμογές, συγκριτικά με τις σύνθετες μεθόδους ελέγχου, εξακολουθεί να έχει εφαρμογή, λόγω του σχετικά χαμηλού αρχικρύ κόστους.

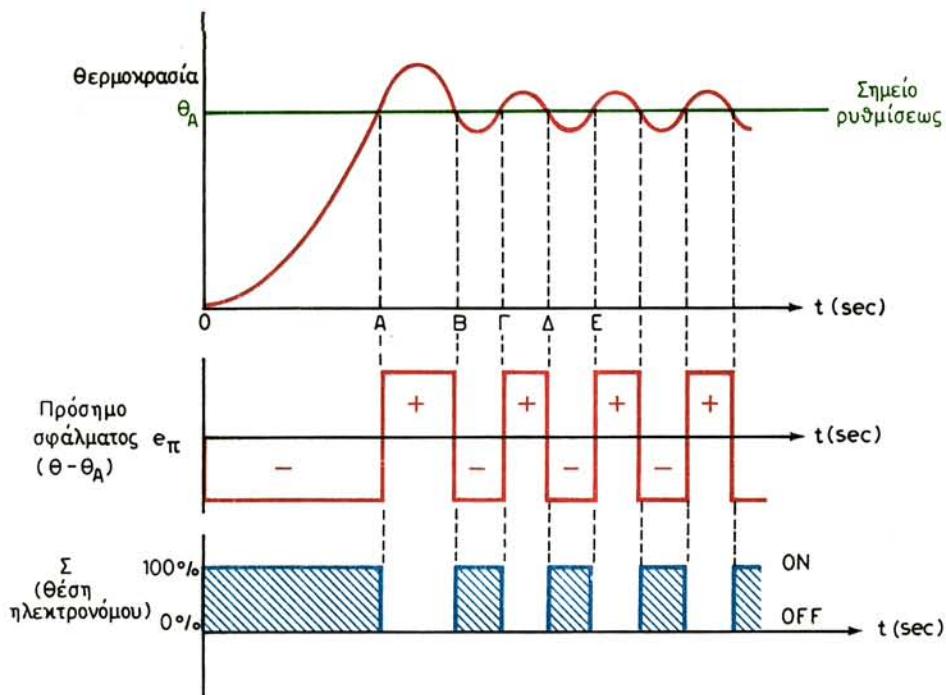
Στη μέθοδο αυτή, η σχέση μεταξύ των παραμέτρων ελέγχου θ_{π} και Σ δίνεται από την εξίσωση

$$\Sigma = \begin{cases} 100\% \text{ όταν } \theta_{\pi} < 0 \\ 0\% \text{ όταν } \theta_{\pi} > 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Στο σχήμα 4.6a φαίνεται η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσεως κατά τον έλεγχο του συστήματος θερμοκρασίας που περιγράφηκε στο σχήμα 4.1a.

Όπως βλέπουμε, από την έναρξη της διαδικασίας παροχής θερμότητας στο σύστημα μέχρι το χρόνο A , η θερμοκρασία του συστήματος θ (κόκκινη γραμμή) υποτερεί της επιθυμητής θερμοκρασίας θ_D , την οποία έχουμε ορίσει ως σημείο ρυθμίσεως. Στο χρονικό διάστημα $O-A$ το σφάλμα του συστήματος είναι αρνητικό, ($\theta = \theta - \theta_D$). Κατά το ίδιο χρονικό διάστημα, ο ελεγκτής διατηρεί τον ηλεκτρονόμο ελέγχου στο «100%» σημείο, με κλειστές επαφές, και έτσι διοχετεύεται ηλεκτρική ενέργεια στο θερμαντήρα του υγρού στη δεξιαμενή. Κατά το χρονικό διάστημα $A-B$, η θερμοκρασία θ υπερβαίνει την επιθυμητή τιμή θ_D , το σφάλμα παίρνει θετική τιμή και ο ηλεκτρονόμος ανοίγει τις επαφές του, διακόπτοντας έτσι την παροχή ενέργειας στο θερμαντήρα. Κατά το χρονικό διάστημα $B-G$, το σφάλμα παίρνει πάλι αρνητική τιμή και ο ηλεκτρονόμος ξανακλείνει τις επαφές του. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται και στα υπόλοιπα χρονικά διαστήματα συντείνοντας έτσι στην κυκλικότητα του συστήματος.

Όπως διαπιστώνομε, κύριο χαρακτηριστικό της εξόδου ενός ΣΑΕ το οποίο ελέγχεται με τη μέθοδο ON-OFF είναι η ταλάντωση γύρω από την επιθυμητή τιμή. Σε ορισμένες διεργασίες (μηχανές πλαστικών, φούρνοι ρευστοποιήσεως γυαλιού κ.ά.), η ταλάντωση αυτή δεν είναι επιτρεπτή, γεγονός που οδήγησε στην επινόηση της μεθόδου ελέγχου «τριών βαθμίδων» που επεκτάθηκε κατόπιν σε «πολυβαθμιδικό» έλεγχο.



Σχ. 4.6a.

'Ελεγχος Θερμοκρασίας με τη μέθοδο ON-OFF.

4.6.2 «Πολυβαθμιδικός» έλεγχος.

Ο «**πολυβαθμιδικός**» έλεγχος (multi-step control) ανήκει στην κατηγορία του διακεκομένου ελέγχου, σύμφωνα δε μ' αυτόν, το τελικό στοιχείο παίρνει περισσότερες από δύο διακεκριμένες θέσεις μεταξύ των ακραίων θέσεων ON και OFF.

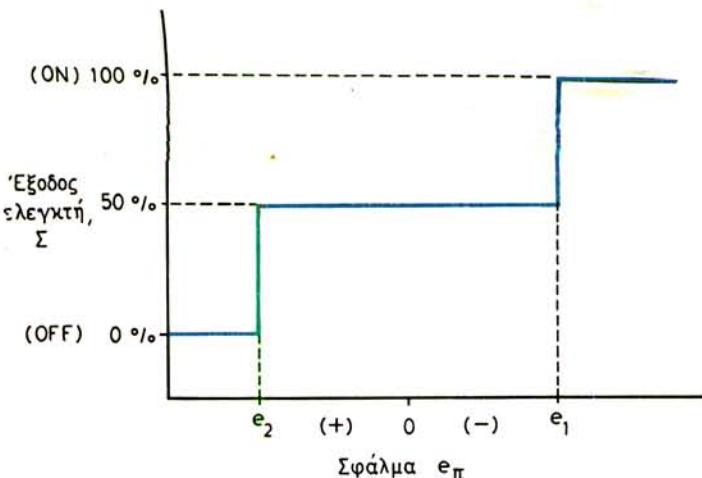
Στη μέθοδο αυτή, η μαθηματική σχέση μεταξύ σφάλματος και εξόδου του ρυθμιστή είναι

$$\Sigma = \Sigma_i \text{ όταν } e_\pi > e_i, \text{ δηλαδή } i = 1, 2, 3 \dots n \quad (4.12)$$

Η σχέση αυτή δηλώνει ότι το διορθωτικό στοιχείο (τελικό στοιχείο ελέγχου) παίρνει προκαθορισμένες, συγκεκριμένες θέσεις Σ_i που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές σφάλματος e_i . Στην περίπτωση **ελέγχου «τριών βαθμίδων»** (three-step control), η σχέση (4.12) γίνεται

$$\Sigma = \begin{cases} 100\%, & \text{όταν } e_\pi < e_1, \\ 50\%, & \text{όταν } e_2 > e_\pi > e_1, \\ 0\%, & \text{όταν } e_\pi > e_2 \end{cases} \quad (4.13)$$

Η γραφική παράσταση της σχέσεως (4.13) παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6β. Από το σχήμα αυτό και από τη σχέση (4.13) είναι φανερό ότι, όταν το σφάλμα e_π παίρνει τιμές θετικές ή αρνητικές, μεταξύ e_2 και e_1 , η θέση του ελεγκτή βρίσκεται στο 50% της πλήρους κλίμακάς του. Όταν το σφάλμα είναι αρνητικό και ξεπεράσει

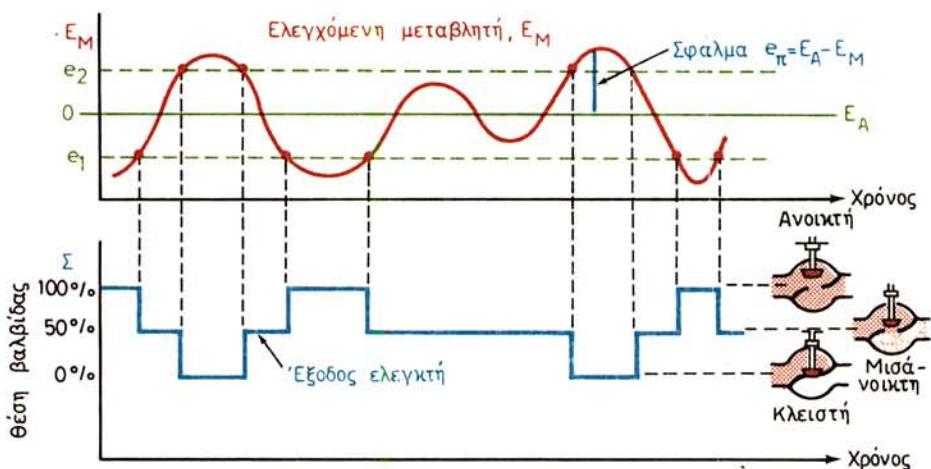


Σχ. 4.6β.

Έξοδος ελεγκτή κατά τον έλεγχο «τριών βαθμίδων».

την τιμή e_1 , η θέση του ελεγκτή παίρνει την ακραία τιμή 100%. Αντίθετα, όταν το σφάλμα λάβει θετικές τιμές μεγαλύτερες από e_2 , η θέση του ελεγκτή παίρνει την ακραία τιμή 0%.

Στο σχήμα 4.6γ βλέπομε αναλυτικά τη λειτουργία του ελέγχου «τριών βαθμίδων». Έστω ότι η ελεγχόμενη μεταβλητή, E_M , είναι στάθμη υγρού. Η επιθυμητή στάθμη του υγρού είναι E_A και αντιστοιχεί σε σφάλμα $e_\pi = E_A - E_M$. Το αρνητικό δριό του σφάλματος είναι e_1 , και το θετικό δριό e_2 . Όταν η μετρούμενη στάθμη E_M (κόκκινη γραμμή) βρίσκεται μεταξύ των δύο ορίων, η έξοδος του ρυθμιστή, Σ , βρίσκεται στο 50% δηλαδή η βαλβίδα είναι κατά 50% ανοικτή. Όταν η στάθμη ξεπερνά το θετικό δριό σφάλματος e_2 , η έξοδος του ρυθμιστή, Σ , πέφτει



Σχ. 4.6γ.

Παράδειγμα ελέγχου «τριών βαθμίδων».

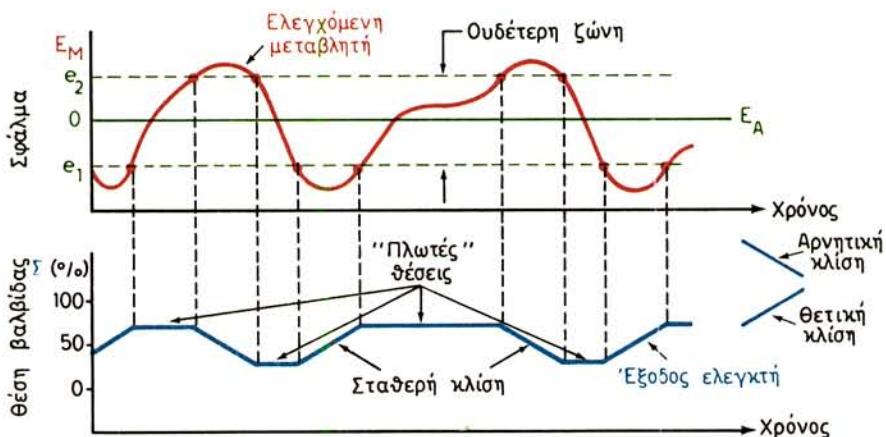
στο 0% που αντιστοιχεί σε κλείσιμο της βαλβίδας και παύση της ροής του υγρού στη δεξαμενή. Αντίθετα, όταν η στάθμη πέσει κάτω από το αρνητικό όριο σφάλματος θ, ο ελεγκτής ανοίγει πλήρως τη βαλβίδα, στη θέση που αντιστοιχεί στο 100% της πλήρους κλίμακας της εξόδου του.

4.6.3 «Πλωτός» έλεγχος.

Κατά την εξέλιξη των μεθόδων ελέγχου δύο και τριών βαθμίδων σε πολυβαθμιδικό έλεγχο, ο διακεκομένος έλεγχος έχασε την απλότητά του και το πλεονέκτημα του σχετικά μικρού κόστους. Επί πλέον ο πολυβαθμιδικός έλεγχος έχει το σύμφωνο μειονέκτημα της ταλαντώσεως της ελεγχόμενης μεταβλητής. Για τους λόγους αυτούς, οι μηχανικοί ελέγχου άρχισαν να στρέφονται προς μεθόδους ελέγχου, στις οποίες ο ελεγκτής και το τελικό στοιχείο ελέγχου ενεργούν κατά συνεχή τρόπο. Στην περίπτωση π.χ., που το στοιχείο ελέγχου είναι βαλβίδα, το στέλεχός της κινείται με συνεχή τρόπο (και με αργό ρυθμό) μεταξύ της πλήρως κλειστής ή της πλήρως ανοικτής θέσεως, ανάλογα με το αν το σφάλμα είναι θετικό ή αρνητικό. Στη μέθοδο αυτή του συνεχούς ελέγχου, όταν το σφάλμα μηδενισθεί, η έξοδος του ελεγκτή «πλέει», δηλαδή αδρανοποιείται στη θέση που βρίσκοταν πριν από το μηδενισμό του σφάλματος. Έχει επικρατήσει η μέθοδος αυτή να ονομάζεται «*πλωτός* έλεγχος (floating control). Υπάρχουν δύο τύποι «πλωτού» ελέγχου: μιας και πολλών ταχυτήτων.

«Πλωτός» έλεγχος μιας ταχύτητας.

Όπως στην περίπτωση του ελέγχου τριών βαθμίδων, έτσι και στον «πλωτό» έλεγχο, υπάρχει μία ουδέτερη ζώνη που περικλείεται από ένα θετικό και ένα αρνητικό όριο σφάλματος, στη μέση της οποίας βρίσκεται η επιθυμητή τιμή. Η ζώνη αυτή λέγεται **ουδέτερη** (neutral zone), γιατί, όταν η τιμή του σφάλματος περιέχεται στη ζώνη, η έξοδος του ελεγκτή αδρανεί ή «πλέει». Όταν το σφάλμα ξεφύγει από την ουδέτερη ζώνη, η έξοδος του ελεγκτή μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο και με συγκεκριμένο ρυθμό. Η ταχύτητα με την οποία μεταβάλλεται η έξοδος του ελεγκτή έχει σταθερό ρυθμό (constant rate) που εκφράζεται σε μονάδες %/sec. Θεωρούμε το παράδειγμα «πλωτού» ελέγχου μιας ταχύτητας του συστήματος που περιγράφεται στο σχήμα 4.3. Υποθέτομε ότι το βάκτρο της βαλβίδας, που ελέγχει τη ροή του ατμού προς τη δεξαμενή, δεν μετακινείται από το πηνίο, αλλά από ένα μικρό σερβοκινητήρα, ο οποίος μπορεί να περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα είτε προς τη μία είτε προς την άλλη φορά και να ανοιγοκλείνει τη βαλβίδα ανάλογα με τη φορά και το μέγεθος του σφάλματος. Στο σχήμα 4.6δ φαίνεται γραφικά η σχέση μεταξύ του σφάλματος και της εξόδου του ελεγκτή ή, κατ' επέκταση, της θέσεως της βαλβίδας. Όταν η ελεγχόμενη μεταβλητή, Εμ, βρίσκεται μέσα στην ουδέτερη ζώνη η έξοδος του ελεγκτή Σ, διατηρείται σε μια από τις «πλωτές» θέσεις, οι οποίες καθορίζονται από την τιμή που έχει η έξοδος, τη στιγμή που η μεταβλητή εισέρχεται στην ουδέτερη ζώνη. Μόλις η μεταβλητή ξεφύγει από την ουδέτερη ζώνη, η έξοδος του ελεγκτή αλλάζει με σταθερή ταχύτητα προς τη μία ή την άλλη φορά σύμφωνα με το πρόσημο του σφάλματος. Στη γραφική παράσταση της εξόδου του ελεγκτή του σχήματος 4.6δ, η ταχύτητα αυτή εκφράζεται από την κλίση των κεκλιμένων γραμμών. Η τιμή της κλίσεως είναι η ίδια, πότε θετική πότε αρνητική, ανάλογα με τη φορά της διορθωτικής δράσεως.



Σχ. 4.66.
«Πλωτός» έλεγχος μιας ταχύτητας.

«Πλωτός» έλεγχος πολλών ταχυτήτων.

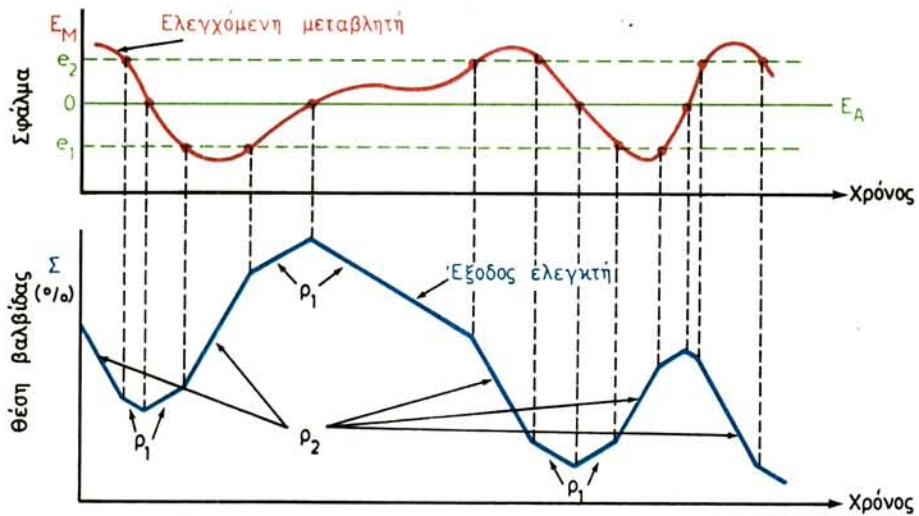
Στον τύπο αυτό του «πλωτού» έλεγχου, η έξοδος του ελεγκτή παίρνει τιμές τέτοιες, που το στέλεχος της βαλβίδας μπορεί να κινείται με πολλές ταχύτητες. Γενικά, όσο πιο μεγάλο είναι το σφάλμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα με την οποία ο ελεγκτής κινεί το στέλεχος της βαλβίδας και διορθώνει το σφάλμα. Ο ελεγκτής βέβαια ενεργεί με περιορισμένο αριθμό ταχυτήτων ανάλογα με τον τύπο έλεγχου. Σε έλεγχο δύο ταχυτήτων, το τελικό στοιχείο δρα με δύο δυνατές ταχύτητες. Σε έλεγχο τριών ταχυτήτων χρησιμοποιείται διορθωτικό στοιχείο που μπορεί και κινείται με τρεις ταχύτητες κ.ο.κ. Ως παράδειγμα θεωρούμε το απλό σύστημα δύο ταχυτήτων του σχήματος 4.6ε. Το διορθωτικό στοιχείο αντιδρά με δύο δυνατές ταχύτητες ρ_1 και ρ_2 , όταν το σφάλμα υπερβαίνει τα προκαθορισμένα όρια. Όταν το σφάλμα είναι θετικό, αλλά μέσα στο όριο e_2 , το διορθωτικό στοιχείο κινείται με ταχύτητα $-\rho_1$ (κεκλιμένη γραμμή 30°). Όταν η τιμή του σφάλματος ξεπέρασει το θετικό όριο e_2 , το διορθωτικό στοιχείο κινείται με τη μεγαλύτερη ταχύτητα $-\rho_2$ (κεκλιμένη γραμμή 60°). Αντίστοιχα, όταν το σφάλμα είναι αρνητικό και μέσα στο όριο e_1 , το διορθωτικό στοιχείο κινείται με ταχύτητα $+\rho_1$ (κεκλιμένη γραμμή 30° αναρριχώμενη), όταν δε το σφάλμα ξεπέρασει το αρνητικό όριο e_1 , το διορθωτικό στοιχείο κινείται με ταχύτητα $+\rho_2$ (κεκλιμένη γραμμή 60° αναρριχώμενη) προς έλεγχο του συστήματος.

4.6.4 Βασικές μέθοδοι συνεχούς έλεγχου.

Στον έλεγχο συνεχούς δράσεως, σε αντιδιαστολή με τον έλεγχο διακεκομμένης δράσεως, ο ελεγκτής δρα στο τελικό στοιχείο έλεγχου (π.χ. στη βαλβίδα) κατά συνεχή τρόπο και έτσι η διόρθωση επέρχεται επίσης κατά συνεχή τρόπο.

Στις βιομηχανικές εφαρμογές, υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι συνεχούς έλεγχου, οι οποίες εμφανίζονται συνήθως σε διάφορους συνδυασμούς μεταξύ τους. Οι μέθοδοι αυτές είναι:

- Αναλογικός έλεγχος (proportional control).



Σχ. 4.6ε.
«Πλωτός» έλεγχος δύο ταχυτήτων, p_1 και p_2 .

- Έλεγχος επανατάξεως* (reset control).
- Έλεγχος ρυθμού** (rate control).

4.6.4.1 Αναλογικός έλεγχος.

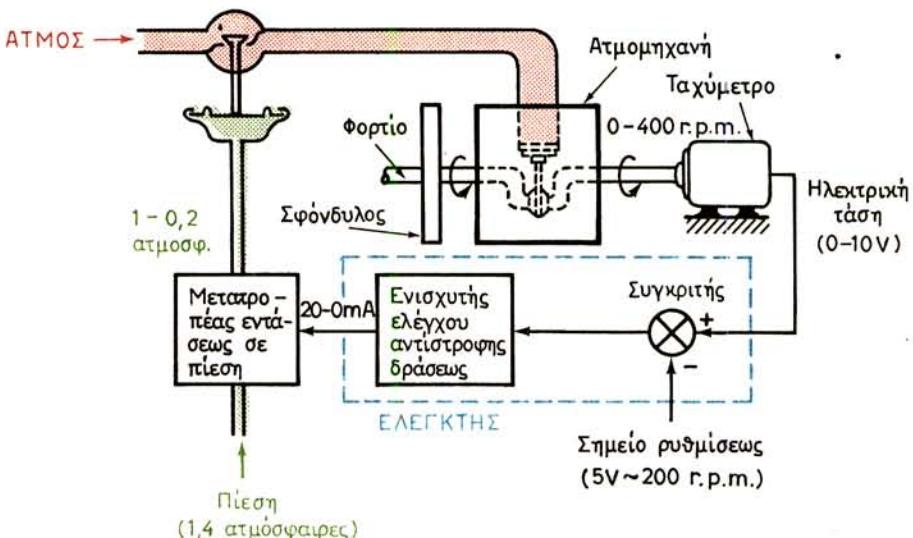
Αποτελεί βασικότατη μέθοδο ελέγχου σε βιομηχανικές εφαρμογές, αλλά κατά κανόνα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις άλλες μορφές ελέγχου που περιγράφονται παρακάτω.

Για να αναλύσουμε τη μέθοδο του αναλογικού ελέγχου, χρησιμοποιούμε το παράδειγμα ελέγχου της ταχύτητας μιας ατμομηχανής, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.6στ. Η ταχύτητα του άξονα της μηχανής επισημαίνεται από το ταχύμετρο, το οποίο παράγει μια ηλεκτρική τάση ανάλογη της ταχύτητας. Κατόπιν, το ηλεκτρικό σήμα του ταχυμέτρου συγκρίνεται αλγεθρικά με την τάση του σημείου ρυθμίσεως, η οποία μπορεί να ρυθμισθεί με το χέρι σε οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 0 - 10 V. Όταν η ταχύτητα της μηχανής (ή το ανάλογο ηλεκτρικό σήμα του ταχυμέτρου) δεν συμπίπτει με την επιθυμητή τιμή (την τάση του σημείου ρυθμίσεως) ο ελεγκτής παράγει ένα διορθωτικό σήμα, το οποίο μετακινεί το στέλεχος της πνευματικής βαλβίδας σε μια νέα θέση. Υποθέτομε ότι ο ελεγκτής είναι σέ θέση να παράγει ένα ρεύμα εξόδου μεταξύ 0 και 20 mA.

Υποθέτομε επίσης ότι η επιθυμητή ταχύτητα της μηχανής είναι 200 στροφές ανά λεπτό (r.p.m.) και ότι η μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα είναι 400 r.p.m. Κανονίζομε το σημείο ρυθμίσεως να αντιστοιχεί σε 200 r.p.m. Όταν δηλαδή η έξοδος του ταχυμέτρου και το σημείο ρυθμίσεως συμπίπτουν (μηδέν απόκλιση), η έξοδος του ελεγκτή ρυθμίζεται να είναι 10 mA. Η τιμή αυτή επιλέγεται στη μέση της κλίμακας, ώστε να υπάρχει αρκετό περιθώριο διορθωτικής δράσεως και προς τις δύο

* Ο έλεγχος αυτός αναφέρεται και ως **αλογικός** (integral control).

** Αναφέρεται και ως **διαφορικός** έλεγχος (derivative control).



Σχ. 4.8στ.

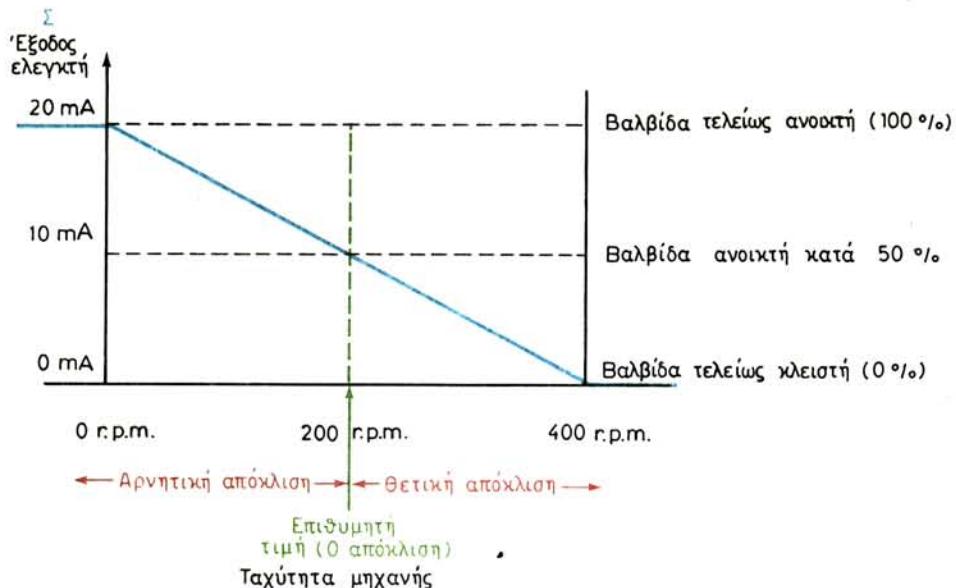
Σύστημα ελέγχου ταχύτητας ατμομηχανής.

διευθύνσεις. Η ένταση των 10 mA μετατρέπεται σε σήμα πιέσεως 0,6 ατμοσφαιρών, από ένα μετατροπέα εντάσεως σε πίεση, το οποίο χρησιμοποιείται για να τοποθετήσει την πνευματική βαλβίδα στο σημείο 50% του συνολικού ανοίγματος. Αν το φορτίο της μηχανής αυξηθεί, η ταχύτητα μειώνεται, το ταχύμετρο παράγει μικρότερη τάση και ο ελεγκτής θα δεχθεί μία αρνητική τάση. Έτσι, θα τροφοδοτήσει το διορθωτικό στοιχείο με ένα σήμα εξόδου αυξημένης εντάσεως, το οποίο προκαλεί αύξηση της πιέσεως στη βαλβίδα. Αποτέλεσμα είναι να ανοίξει περισσότερο η βαλβίδα, να υπάρξει μεγαλύτερη ροή ατμού προς τη μηχανή και επομένως αύξηση της ταχύτητας. Πριν προχωρήσουμε σε περαιτέρω ανάλυση, υπογραμμίζομε δύο ενδιαφέροντα σημεία:

1) Η λειτουργία του ελεγκτή στο παράδειγμα είναι τέτοια, ώστε όταν μειώνεται το σήμα στην είσοδό του το σήμα στην έξοδό του αυξάνεται και λέγεται **αντίστροφη δράση** (reverse action). Σε άλλες εφαρμογές είναι δυνατό να ισχύει το αντίθετο. Δηλαδή, όταν αυξάνεται η είσοδος του ελεγκτή, αυξάνεται και το σήμα της εξόδου του και λέγεται **ορθή δράση** (direct action). Υπάρχουν ελεγκτές, που είναι σε θέση να λειτουργούν είτε με τον ένα είτε με τον άλλο τρόπο λειτουργίας, η δραστηριοποίηση του καθενός δε, γίνεται με ένα απλό διακόπτη.

2) Η πνευματική βαλβίδα είναι κατασκευασμένη έτσι, ώστε να είναι κλειστή όταν ο ελεγκτής αδρανεί. Το χαρακτηριστικό αυτό, αποτελεί επί πλέον προστασία του συστήματος σε περίπτωση βλάβης του ελεγκτή.

Ο παραπάνω ελεγκτής ονομάζεται **αναλογικός**, γιατί παράγει έξοδο **ανάλογη** με το μέγεθος της εισόδου του (απόκλιση). Στο σχήμα 4.6ζ περιγράφεται αναλυτικά η λειτουργία του αναλογικού ελεγκτή. Η κεκλιμένη ευθεία που παριστάνει την έξοδο του ελεγκτή, περνάει από το σημείο (10 mA, 200 rpm) στο οποίο η απόκλιση (ή σφάλμα) είναι μηδέν (ταχύτητα μηχανής = επιθυμητή ταχύτητα). Στην περίπτωση αυτή, η θέση της βαλβίδας είναι στο 50% δηλαδή στο μισό της μέγιστης τιμής της εξόδου του ελεγκτή. Όταν η ταχύτητα αυξηθεί, η απόκλιση ως προς το σημείο



ρυθμίσεως είναι θετική και η έξοδος του ελεγκτή μειώνεται (αντίστροφη δράση). Όταν η ταχύτητα μειωθεί, η απόκλιση είναι αρνητική και η έξοδος του ελεγκτή αυξάνεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση, τόσο περισσότερο απομακρύνεται η τιμή του σήματος εξόδου του ελεγκτή από την τιμή 10mA. Επιβεβαιώνομε δηλαδή, ότι η έξοδος του ελεγκτή μεταβάλλεται **ΑΝΑΛΟΓΑ** προς την απόκλιση από το σημείο ρυθμίσεως.

Στο παράδειγμα του σχήματος 4.6ζ είδαμε ότι στη μέγιστη ταχύτητα (400 rpm) ο ελεγκτής κλείνει τελείως τη βαλβίδα ατμού. Στην ονομαστική (επιθυμητή) ταχύτητα των 200 rpm ο ελεγκτής τοποθετεί τη βαλβίδα στο 50% (μισάνοικτη) και δύναται η ταχύτητα πέσει σε 0 rpm την ανοίγει τελείως.

Υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας είναι δυνατό να ρυθμίζομε τη μετατόπιση του βάκτρου ώστε η βαλβίδα να είναι τελείως κλειστή δύναται η ταχύτητα είναι 300 rpm και τελείως ανοικτή δύναται η ταχύτητα είναι 100 rpm. Στην περίπτωση αυτή, η έξοδος του ελεγκτή θα είναι 0 mA δύναται η ταχύτητα είναι 300 rpm και 20 mA δύναται η ταχύτητα είναι 100 rpm. Έτσι η χαρακτηριστική του ελεγκτή (μπλε γραμμή) είναι μία κεκλιμένη ευθεία με μεγαλύτερη κλίση (σχήμα 4.6η) από αυτή του σχήματος 4.6ζ. Το ευθύγραμμο δηλαδή τμήμα που σχηματίζεται από την προβολή της κεκλιμένης γραμμής πάνω στον οριζόντιο άξονα Z_A , έχει μειωθεί κατά το ήμισυ. Το ευθύγραμμο αυτό τμήμα που ορίζει την περιοχή των δυνατών τιμών του σφάλματος γύρω από το σημείο ρυθμίσεως, η οποία αντιστοιχεί σε δύο τις δυνατές θέσεις της εξόδου του ελεγκτή (από 0% μέχρι 100%) λέγεται **ζώνη αναλογίας** (proportional band).

Σε άλλες εφαρμογές σκόπιμο είναι η βαλβίδα να μη κλείνει τελείως ούτε να ανοίγει τελείως. Π.χ. η έξοδος του ελεγκτή θα μπορούσε να είναι 15mA για ταχύτητα 0 r.p.m. και 5mA για μέγιστη ταχύτητα, δηλαδή 400 r.p.m. Στην περίπτωση

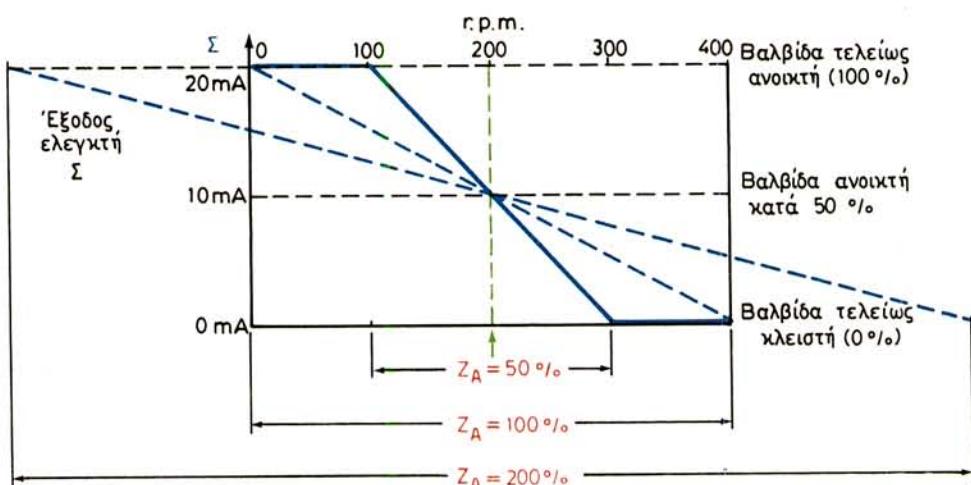
αυτή βλέπομε από το σχήμα 4.6η ότι η ζώνη αναλογίας Z_A είναι διπλάσια από εκείνη του παραδείγματος του σχήματος 4.6ζ και τετραπλάσια της ζώνης αναλογίας του προηγούμενου παραδείγματος.

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει τον αναλογικό έλεγχο είναι

$$\Sigma = \pm \rho_a e_{\pi} + \Sigma(0) \quad (4.14)$$

με πρόσημο ($-$) όταν ο ελεγκτής είναι αντίστροφης δράσεως και ($+$) όταν είναι ορθής δράσεως. Είναι δε ρ_a = σταθερά αναλογίας και $\Sigma(0)$ = η έξοδος του ελεγκτή όταν το σφάλμα e_{π} είναι μηδέν. Είναι φανερό ότι η σταθερά αναλογίας ισούται με την κλίση της κεκλιμένης γραμμής. Έτσι η ζώνη αναλογίας Z_A υπολογίζεται από τη σχέση

$$Z_A = \frac{100}{\rho_a} \quad (4.15)$$



Σχ. 4.6η.
Αναλογικός έλεγχος με διάφορες ζώνες αναλογίας.

Η σχέση (4.15) φανερώνει ότι, δύο πιο μικρή είναι η ζώνη αναλογίας (μεγάλη κλίση της κεκλιμένης γραμμής) τόσο πιο απότομη είναι η αντίδραση του ελεγκτή στις τυχόν αποκλίσεις. Αυτό ευνοεί την αστάθεια του συστήματος (ταλαντώσεις της ελεγχόμενης μεταβλητής) γιατί δύο μεγαλύτερη είναι η κλίση της κεκλιμένης γραμμής, τόσο πλησιάζομε τον «ON - OFF» έλεγχο. Αντίθετα, δύο μεγαλύτερη είναι η ζώνη αναλογίας, τόσο περισσότερο ευσταθής είναι η συμπεριφορά.

Η τιμή $\Sigma(0)$ στη σχέση (4.14) επιλέγεται στο 50%, ώστε ο ελεγκτής να έχει την ίδια ευχέρεια δράσεως για αρνητικές και για θετικές τιμές σφάλματος.

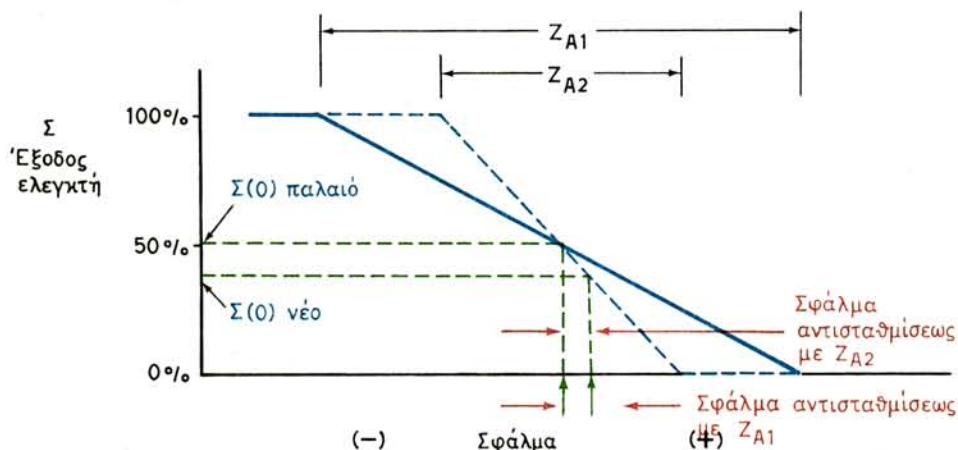
Σφάλμα αντισταθμίσεως.

Ένα σοβαρό μειονέκτημα του συστήματος με αναλογικό έλεγχο, είναι η αδυναμία εξουδετερώσεως των μεταβολών του φορτίου διέργασίας. Σε τέτοιες περιπτώσεις εμφανίζεται στην ελεγχόμενη μεταβλητή ένα **υπολειμματικό σφάλμα** (residual

error) όταν το σύστημα συνέλθει από τη διαταραχή του φορτίου.

Αυτό το υπολειμματικό σφάλμα λέγεται **σφάλμα αντισταθμίσεως** (offset error) και μπορεί να μειωθεί με επιλογή μεγάλων τιμών της σταθεράς αναλογίας ρ_a , που σημαίνει μικρότερη ζώνη αναλογίας Z_A . Η λύση βέβαια αυτή, δημιουργεί έξοδο που διαφέρει από την ζώνη αναλογίας Z_A .

Ο μηχανισμός δημιουργίας του σφάλματος αντισταθμίσεως είναι: Υποθέτομε ότι ένα σύστημα λειτουργεί με ονομαστικό φορτίο τέτοιο, που η έξοδος του ελεγκτή είναι στο 50% όταν το σφάλμα είναι μηδέν (σχ. 4.6θ). Όταν στο σύστημα παρουσιασθεί μια παρενόχληση φορτίου το φορτίο διεργασίας αλλάζει και, κατά συνέπεια, χρειάζεται να ξαναρυθμίσουμε το $\Sigma(0)$ του ελεγκτή. Αυτό δημιουργεί δυνατό να γίνει, γιατί ήδη προϋπάρχει αντιστοιχία τιμών μία προς μία της εξόδου του ελεγκτή και του σφάλματος. Αναπόφευκτα λοιπόν το σύστημα εμφανίζει σφάλμα αντισταθμίσεως το οποίο είναι μόνιμο.



Σχ. 4.6θ.
Σφάλμα αντισταθμίσεως.

Παράδειγμα 4.3.

Η βαλβίδα που ελέγχει τη ροή υγρού μέσα σε μια δεξαμενή λειτουργεί γραμμικά με παροχή $10m^3/min$, ανά εκατοστιαίο ποσόστο της εξόδου του ελεγκτή. Η έξοδος του ελεγκτή είναι στο 50% της πλήρους κλίμακας όταν το σφάλμα είναι μηδέν και η σταθερά αναλογίας $\rho_a = 10\%$. Η εκροή του υγρού από τη δεξαμενή, μέσω μιας άλλης βαλβίδας, μεταβάλλεται ξαφνικά από $500 m^3/min$ σε $600 m^3/min$, δηλαδή μεταβάλλεται στιγμιαία το ονομαστικό φορτίο διεργασίας. Υπολόγισε τη νέα έξοδο του ελεγκτή και το σφάλμα αντισταθμίσεως.

Λύση.

Όταν η βαλβίδα εκροής αδειάζει τη δεξαμενή με παροχή $600 m^3/min$, η άλλη βαλβίδα η οποία ελέγχει το γέμισμα της δεξαμενής, πρέπει να εξασφαλίζει παροχή

γεμίσματος ίση με $600 \text{ m}^3/\text{min}$. Διαφορετικά, η δεξαμενή θα αδειάσει τελείως ή θα ξεχειλίσει. Η παροχή αυτή επιτυγχάνεται με μια νέα έξοδο του ελεγκτή Σ, η οποία δίνεται από την εξίσωση

$$600 \text{ m}^3/\text{min} = \left(\frac{10 \text{ m}^3/\text{min}}{\%} \right) (\Sigma\%)$$

$$\text{επομένως, } \Sigma\% = \frac{600}{10} = 60\%$$

Επειδή ο έλεγχος είναι αναλογικός και ο ελεγκτής είναι αντίστροφης δράσεως, έχουμε:

$$\begin{aligned} \Sigma &= -\rho_a e_{\pi} + \Sigma(0) \\ e_{\pi} &= \frac{\Sigma(0) - \Sigma}{\rho_a} = \frac{50 - 60}{10} = -1\% \end{aligned}$$

Δηλαδή, η αλλαγή στο φορτίο διεργασίας δημιουργεί σφάλμα αντισταθμίσεως ίσο με -1% .

Η ύπαρξη του σφάλματος αντισταθμίσεως περιορίζει τις εφαρμογές του αναλογικού έλεγχου στις περιπτώσεις που αναμένονται μικρές μεταβολές στο φορτίο διεργασίας ή όταν η υστέρηση διεργασίας είναι σχετικά μικρή. Στη δεύτερη περίπτωση, είναι δυνατό να μειωθεί η ζώνη αναλογίας (με αύξηση της σταθεράς αναλογίας) και επομένως να μειωθεί σημαντικά το σφάλμα αντισταθμίσεως.

4.6.4.2 Έλεγχος επανατάξεως.

Στον έλεγχο επανατάξεως (reset control) το μέγεθος της εξόδου του ελεγκτή είναι ανάλογο προς την ολοκλήρωση της αποκλίσεως. Η διορθωτική δράση δηλαδή συνεχίζεται και όταν η απόκλιση γίνει στιγμιαία μηδενική. Η δράση σταματάει όταν η απόκλιση μηδενισθεί και παραμένει μόνιμα μηδέν. Επειδή στην πράξη ο απόλυτος μηδενισμός του σφάλματος δεν επιτυγχάνεται, ο ελεγκτής επανατάξεως παράγει διορθωτικά σήματα για πολύ μικρά σφάλματα, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συνεχείς διακυμάνσεις στην ελεγχόμενη μεταβλητή. Για το λόγο αυτό η μέθοδος αυτή έλεγχου δεν χρησιμοποιείται αυτούσια, αλλά πάντα σε συνδυασμό με αναλογικό έλεγχο ή με αναλογικό και με έλεγχο ρυθμού.

4.6.4.3 Έλεγχος αναλογικός + επανατάξεως.

Όπως είδαμε η χρησιμοποίηση του αναλογικού έλεγχου προκαλεί σφάλμα αντισταθμίσεως κάθε φορά που μεταβάλλεται το φορτίο διεργασίας. Αυτό συμβαίνει, γιατί το σύστημα δεν μπορεί να επαναφέρει την έξοδο του ελεγκτή στο 50%, ώστε να μηδενισθεί η απόκλιση που δημιουργήθηκε από την αλλαγή του φορτίου.

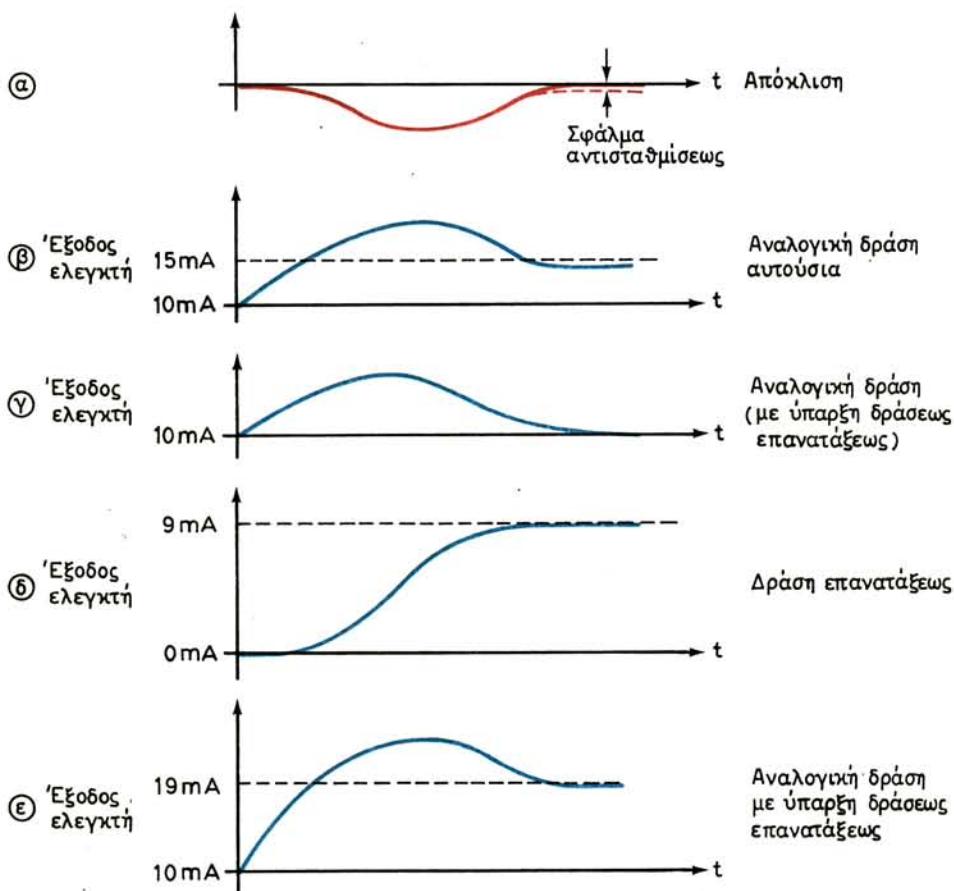
Αναλυτικότερα, το πρόβλημα του αναλογικού ελεγκτή είναι ως εξής: Έστω ότι το φορτίο της μηχανής αυξάνεται απότομα, γεγονός που συνεπάγεται άμεση μείωση της ταχύτητας. Η μείωση της ταχύτητας προκαλεί αρνητική απόκλιση, η οποία δραστηριοποιεί τον ελεγκτή να ανοίξει τη βαλβίδα που διοχετεύει περισσότερο ατμό στη μηχανή. Μόλις αυξηθεί η ταχύτητα της μηχανής και πριν φθάσει στην επιθυμητή τιμή της, η απόκλιση μειώνεται και ο ελεγκτής αρχίζει να μειώνει τη διορ-

Θωτική δράση. Τελικά η λειτουργία της μηχανής σταθεροποιείται σε μια ταχύτητα μικρότερη από την επιθυμητή τιμή των 200 r.p.m. δημιουργώντας έτσι σφάλμα αντισταθμίσεως.

Όταν, όμως εισαχθεί στο σύστημα και ένας ελεγκτής επανατάξεως το μέγεθος του διορθωτικού σήματος που επιδρά στη βαλβίδα ελέγχου αυξάνεται, με αποτέλεσμα να απαλείψει το σφάλμα αντισταθμίσεως.

Στη συνέχεια περιγράφουμε πως γίνεται αυτό, χρησιμοποιώντας το παράδειγμα του σχήματος 4.6στ. Ας υποθέσουμε ότι η αύξηση του φορτίου της μηχανής δημιουργεί ένα σφάλμα αντισταθμίσεως, το οποίο, για να εξουδετερωθεί, απαιτεί ένα διορθωτικό σήμα 19 mA.

Στο σχήμα 4.6ι(α) φαίνεται η απόκλιση που δημιουργείται από την αύξηση του φορτίου στη μηχανή. Όταν στο σύστημα υπάρχει μόνο αναλογικός έλεγχος [σχήμα 4.6ι(β)], η έξοδος του ελεγκτή επιχειρεί να σταθεροποιηθεί στα 19mA. Είδαμε όμως ότι δεν το κατορθώνει και έτσι σταθεροποιείται ας πούμε γύρω στα 15 mA, τιμή που υστερεί για τη διόρθωση του σφάλματος αντισταθμίσεως. Η διαφορά των 4 mA, εκδηλώνεται ως απόκλιση της ταχύτητας της μηχανής κατά 30 r.p.m.



Σχ. 4.6ι.
Αναλογικός έλεγχος επανατάξεως.

Η μονάδα ελέγχου με δράση επανατάξεως επισημαίνει την απόκλιση και παράγει μια ένταση που αρχίζει από 0 mA και αυξάνεται σταδιακά μέχρις ότου φθάσει τη μέγιστη τιμή των 9 mA [σχήμα 4.6i(δ)], όταν η απόκλιση παύει να υφίσταται. Συγκρίνοντας τις καμπύλες (α) και (δ) διαπιστώνομε ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση, τόσο γρηγορότερα αυξάνει η τιμή της εντάσεως που παράγεται από τον ελεγκτή επανατάξεως.

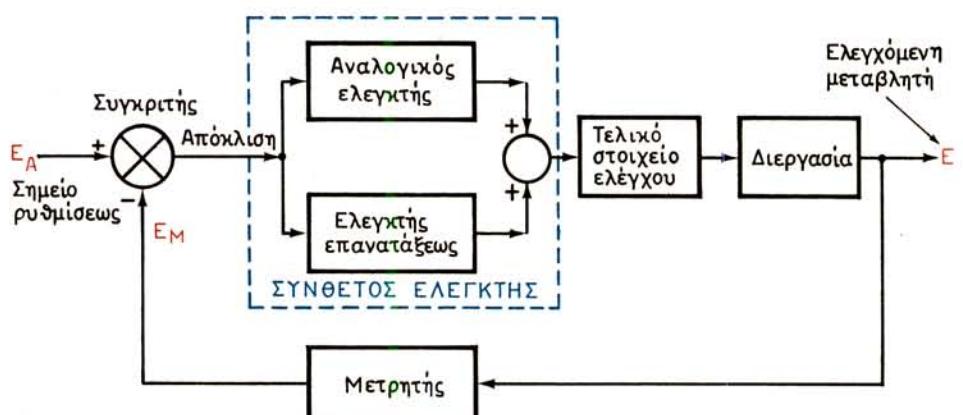
Η πρόσθετη ένταση που παράγεται από τον ελεγκτή επανατάξεως ανοίγει τη βαλβίδα περισσότερο με αποτέλεσμα να αυξηθεί η ταχύτητα της μηχανής και να μειωθεί η απόκλιση. Η ύπαρξη της δράσεως επανατάξεως συντελεί στη μείωση της εντάσεως στην έξοδο του αναλογικού ελεγκτή, γεγονός που την επαναφέρει στην ονομαστική τιμή των 10 mA [σχήμα 4.6i(γ)] όταν το σφάλμα αντισταθμίσεως εξαφανισθεί. Παράλληλα, ο ελεγκτής επανατάξεως αυξάνει σταθερά την ένταση της εξόδου του μέχρις ότου φθάσει γύρω στα 9 mA. Μόλις η μηχανή αποκτήσει την επιθυμητή ταχύτητα (200 r.p.m.), η ένταση της εξόδου του ελεγκτή επανατάξεως παύει να αυξάνει και σταθεροποιείται στην τιμή των 9 mA. Το άθροισμα των δύο εντάσεων που παράγονται από τους δύο ελεγκτές είναι τότε 19mA, τιμή που δταν επενεργήσει στη βαλβίδα, επιφέρει αποτελεσματικό έλεγχο με το νέο φορτίο της μηχανής.

Ανακεφαλαιώνοντας, παρατηρούμε ότι, σε περίπτωση αλλαγής του φορτίου διεργασίας:

1) Ο αναλογικός ελεγκτής επιχειρεί να διορθώσει την κατάσταση άμεσα και ανάλογα με το μέγεθος της αποκλίσεως, χωρίς δώμας να το επιτυγχάνει τελείως.

2) Ο ελεγκτής επανατάξεως παρέχει συνεχώς αυξανόμενη ένταση, εφόσο υπάρχει έστω και μικρή απόκλιση. Όσο μεγαλύτερη η απόκλιση, τόσο πιο γρήγορη η αύξηση της εντάσεως αυτής. Έτσι, ο ελεγκτής αυτός προσφέρει ακριβώς την πρόσθετη ένταση, που είναι απαραίτητη για να διορθωθεί το αντισταθμισμα, το οποίο δημιουργείται από την ξαφνική αλλαγή του φορτίου διεργασίας.

Στο σχήμα 4.6ia φαίνεται η διάταξη του σύνθετου ελεγκτή, που περιλαμβάνει ένα αναλογικό ελεγκτή και ένα ελεγκτή επανατάξεως. Όπως φαίνεται στο σχήμα οι εντάσεις που παράγονται ξεχωριστά από κάθε ελεγκτή αθροίζονται σε κοινό κόμ-



Σχ. 4.6ia.

Λειτουργικό διάγραμμα συστήματος αναλογικού + ελέγχου επανατάξεως.

βο (Νόμος Κίρχωφ), και έτσι δημιουργούν το συνολικό διορθωτικό σήμα που δρα στο τελικό στοιχείο ελέγχου (βαλβίδα).

4.6.4.4 Έλεγχος ρυθμού.

Κατά την εκκίνηση βιομηχανικών διεργασιών, η απόκλιση της ελεγχόμενης μεταβλητής από την επιθυμητή τιμή μεταβάλλεται ραγδαία, κατά συνέπεια δε και η διορθωτική δράση του ελεγκτή πρέπει να είναι ταχεία. Στην περίπτωση αυτή, η διορθωτική δράση του σύνθετου ελεγκτή που μελετήσαμε προηγουμένως είναι σχετικά αργή και δεν προσφέρει αποτελεσματικό έλεγχο. Χρειάζεται λοιπόν ένας άλλος τύπος ελεγκτή η έξοδος του οποίου να εξαρτάται από το ρυθμό (ταχύτητα) με τον οποίο μεταβάλλεται η απόκλιση. Ο έλεγχος αυτός λέγεται **έλεγχος ρυθμού** (rate control) ή **διαφορικός έλεγχος** (differential control). Ο τύπος αυτός ελέγχου προβλέπει και προλαμβάνει ενδεχόμενες μεταβολές της αποκλίσεως γι' αυτό δε ονομάζεται και **προληπτικός έλεγχος** (anticipatory control). Ο ελεγκτής ρυθμού αδρανεί όταν η απόκλιση είναι σταθερή ή μηδέν, για να δράσει δε, πρέπει η απόκλιση να μεταβάλλεται με κάποιο ρυθμό. Για το λόγο αυτό η μέθοδος αυτή ελέγχου δεν χρησιμοποιείται αυτοτελώς, αλλά συνδυάζεται με αναλογικό έλεγχο, ή, συχνότερα με αναλογικό και έλεγχο επανατάξεως.

Στον ελεγκτή ρυθμού, η τιμή του διορθωτικού σήματος στην έξοδό του δίνεται από τη σχέση

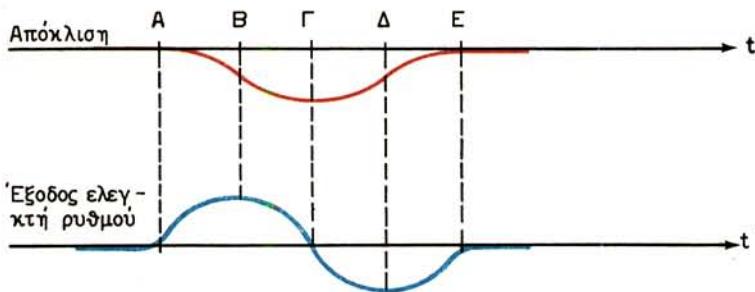
$$\Sigma = \pm \rho_p \times [\text{ρυθμός μεταβολής του } e_{\pi} \text{ ως προς τη μονάδα χρόνου}] + \Sigma(0) \quad (4.16)$$

όπου ρ_p = σταθερά απολαβής διαφορικού (% - sec/%)

και $\Sigma(0)$ = διορθωτικό σήμα του ελεγκτή όταν $e_{\pi} = 0$.

Ας δούμε πώς η παρουσία ενός ελεγκτή ρυθμού βελτιώνει τη συμπεριφορά του συστήματος με έλεγχο επανατάξεως όταν παρουσιάζονται ξαφνικές και μεγάλου μεγέθους παρενοχλήσεις, όπως κατά την εκκίνηση της διεργασίας. Στο παράδειγμα της ατμομηχανής παρατηρούμε ότι, όταν η ταχύτητά της είναι πολύ μικρότερη από τη επιθυμητή (200 g.r.p.m.), αφελεί να ανοίξομε κατά ένα πρόσθετο ποσοστό τη βαλβίδα, για να επιταχύνουμε τη διαδικασία. Η ενέργεια αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη διέλευση περισσότερου ατμού στη μηχανή, την γρήγορη επιτάχυνσή της και την ταχύτερη επίτευξη της επιθυμητής ταχύτητας. Βέβαια η επιτάχυνση αυτή πρέπει να διαρκέσει μικρό χρονικό διάστημα, γιατί διαφορετικά η ταχύτητα της μηχανής μπορεί να ξεπεράσει την επιθυμητή τιμή κατά πολύ και να εμφανισθεί «υπερψώση» (overshoot).

Η πρόσθετη δράση που επιταχύνει τη διαδικασία του ελέγχου εκεί όπου χρειάζεται, επιτυγχάνεται με τον ελεγκτή ρυθμού, ο οποίος ενεργεί μόνο όταν στην έξοδό του επισημανθεί αύξηση ή μείωση της αποκλίσεως. Δηλαδή ο ελεγκτής αυτός δεν ενεργοποιείται από το μέγεθος της αποκλίσεως, όπως συμβαίνει με τους άλλους δύο τύπους ελέγχου, αλλά από το ρυθμό (ταχύτητα) μεταβολής της αποκλίσεως. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μεταβολής της εισόδου, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του διορθωτικού σήματος στην έξοδο του ελεγκτή. Στο σχήμα 4.6ιβ βλέπομε γραφικά τη συμπεριφορά του ελεγκτή ρυθμού, σε σχέση με την απόκλιση της ελεγχόμενης μεταβλητής. Στα σημεία Α,Γ και Ε, όπου η απόκλιση είναι σταθερή, η έξοδος του ελεγκτή είναι μηδέν. Στα σημεία Β και Δ δημος, όπου η απόκλιση μεταβάλλεται με τη μεγαλύτερη ταχύτητα, το διορθωτικό σήμα του

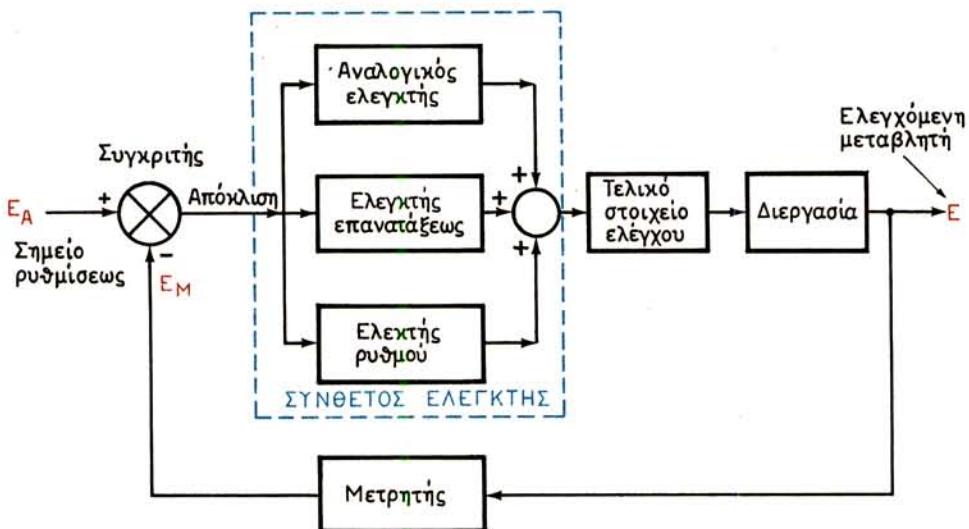


Σχ. 4.6β.
Διορθωτική δράση ελεγκτή ρυθμού.

ελεγκτή παίρνει τις μέγιστες τιμές (θετική και αρνητική αντίστοιχα).

4.6.4.5 Έλεγχος αναλογικός + επανατάξεως + ρυθμού.

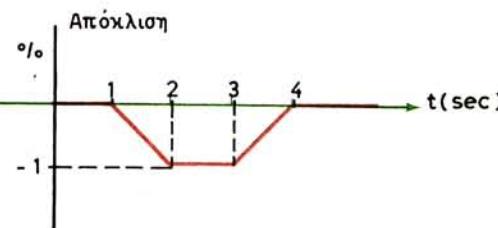
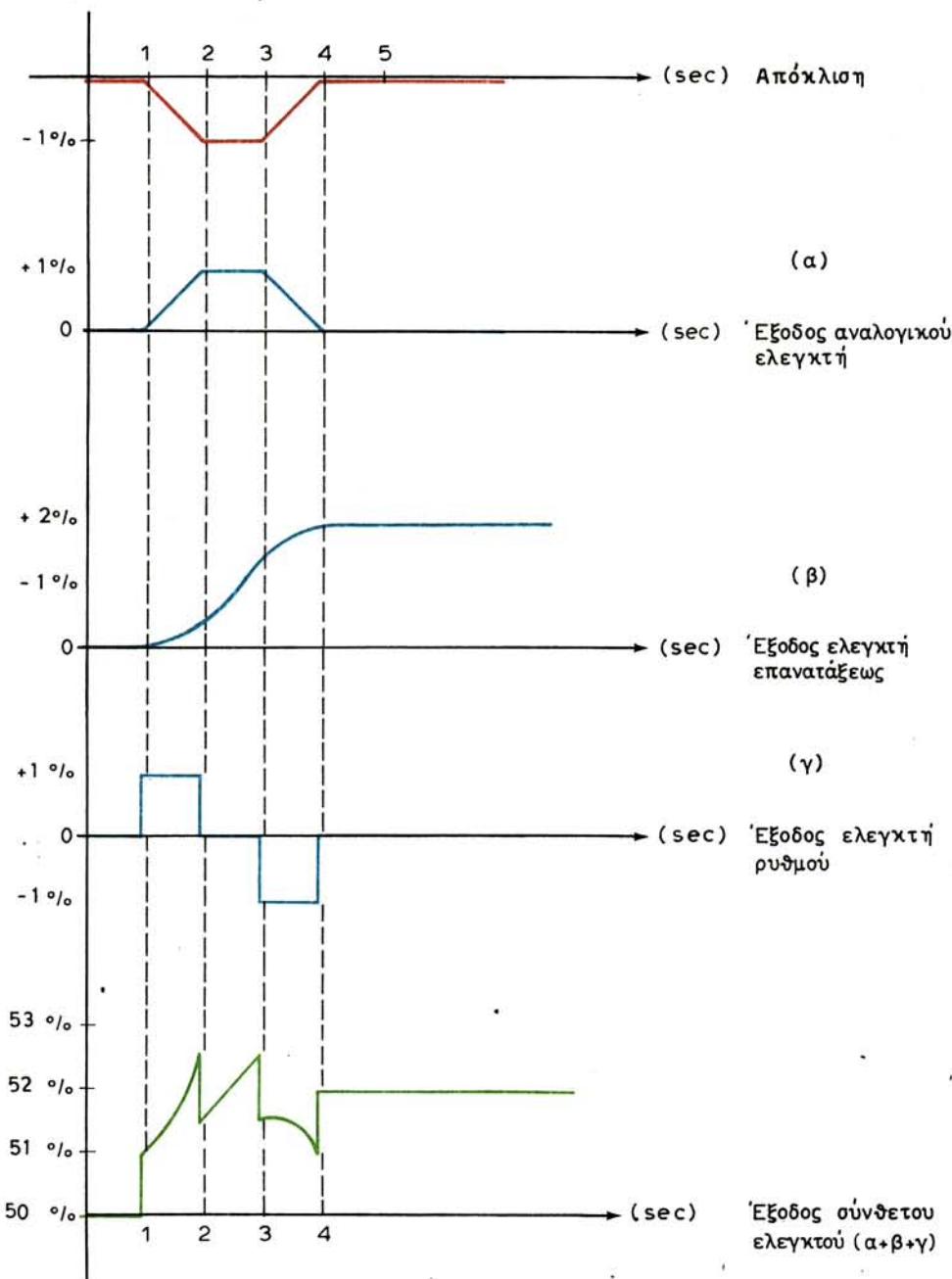
Στο σχήμα 4.6γ φαίνεται ένα σύνθετο σύστημα ελέγχου, το οποίο χρησιμοποιεί τους τρεις τύπους ελεγκτών που έχουμε περιγράψει. Από την προηγούμενη ανάλυση, είναι φανερό ότι ο κάθε ελεγκτής αντιδρά κατά διαφορετικό τρόπο, όταν παρουσιάζεται απόκλιση στην είσοδο του, το συνολικό δε σήμα ελέγχου είναι η επαλληλία των τριών σημάτων.



Σχ. 4.6γ.
Έλεγχος αναλογικός + επανατάξεως + ρυθμού.

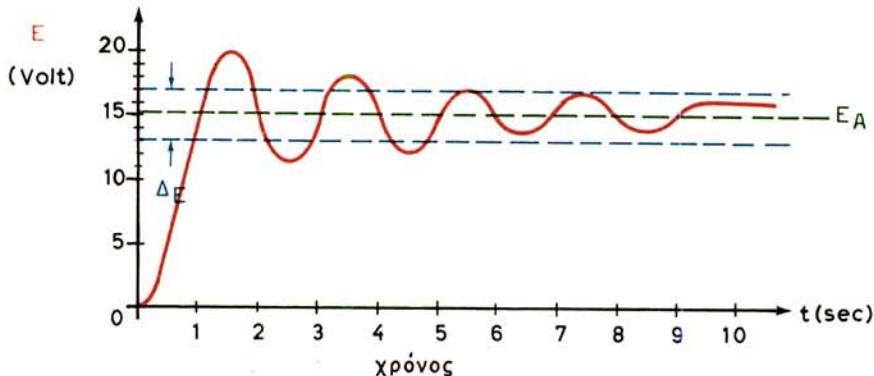
Παράδειγμα 4.4.

Σχεδίασε την έξοδο ενός σύνθετου ελεγκτή με αντίστροφη δράση, σύμφωνα με το σχήμα 4.6γ όταν η απόκλιση μεταβάλλεται όπως φαίνεται παρακάτω. Όλες οι σταθερές για τους ελεγκτές ισούνται με τη μονάδα και $\Sigma(0) = 50\%$.

**Λύση.**

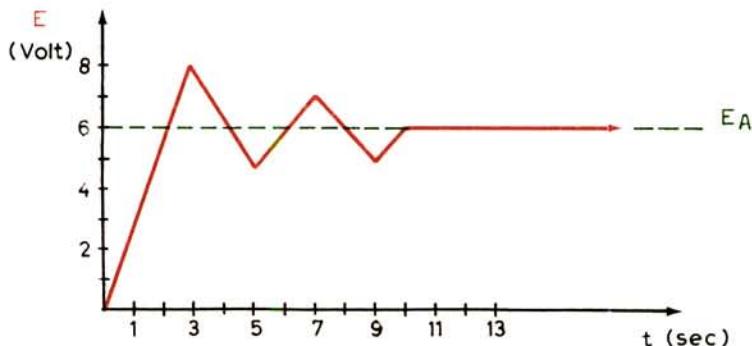
4.7 Ασκήσεις.

1. Η δυναμική απόκριση ενός συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Υπολόγισε α) τη συχνότητα της κυκλικότητας σε Hz, β) το χρόνο αποκαταστάσεως, γ) το μέγιστο σφάλμα και δ) το υπολειμματικό σφάλμα.



(Απάντηση: α) 0,5 Hz, β) 5 sec, γ) 5 volt, δ) 1 volt)

2. Η δυναμική απόκριση ενός συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Υπολόγισε το εμβαδόν σφάλματος.



(Απάντηση: 11 volt - sec)

3. Η ταχύτητα ενός συστήματος ελέγχου ταχύτητας κυμαίνεται μεταξύ 220 - 460 mm/sec. Το σημείο ρυθμίσεως είναι τοποθετημένο στη τιμή 327 mm/sec και η ένδειξη του μετρητή είναι 294 mm/sec. Υπολόγισε το σφάλμα σε ποσοστό πλήρους κλίμακας της αποκλίσεως.

(Απάντηση: - 13,75%)

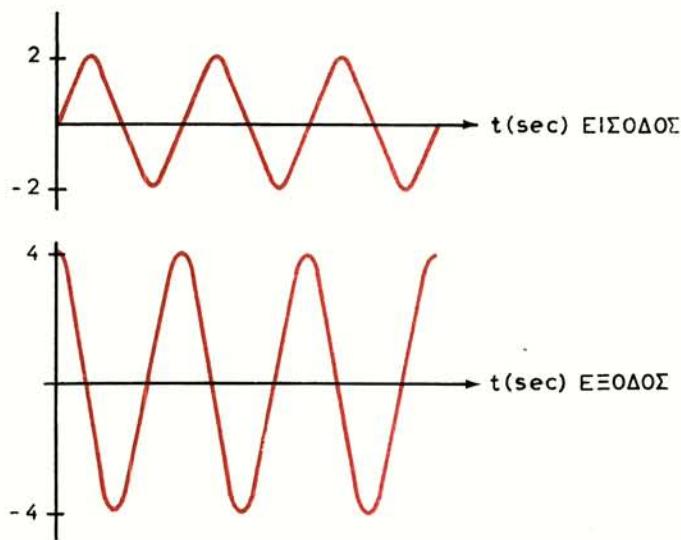
4. Παράμετρος ελέγχου σε ένα σύστημα είναι η ταχύτητα ενός πλεκτρικού κινητήρα που κυμαίνεται μεταξύ 800 στροφές/min και 1750 στροφές/min. Η ταχύτητα του κινητήρα ελέγχεται από ένα σήμα τάσεως το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 25-50 volt. Σε ποια ταχύτητα αντιστοιχούν 38 volt, και πόσο είναι το ποσοστό πλήρους κλίμακας της αποκλίσεως για την ταχύτητα αυτή;

(Απάντηση: 1294 στροφές/min και 52%)

5. Το πολικό μεγέθους για τη συχνότητα $f = 10 \text{ Hz}$ είναι 0,6. Υπολόγισε το μέγεθος σε μονάδες db για τη συχνότητα αυτή.

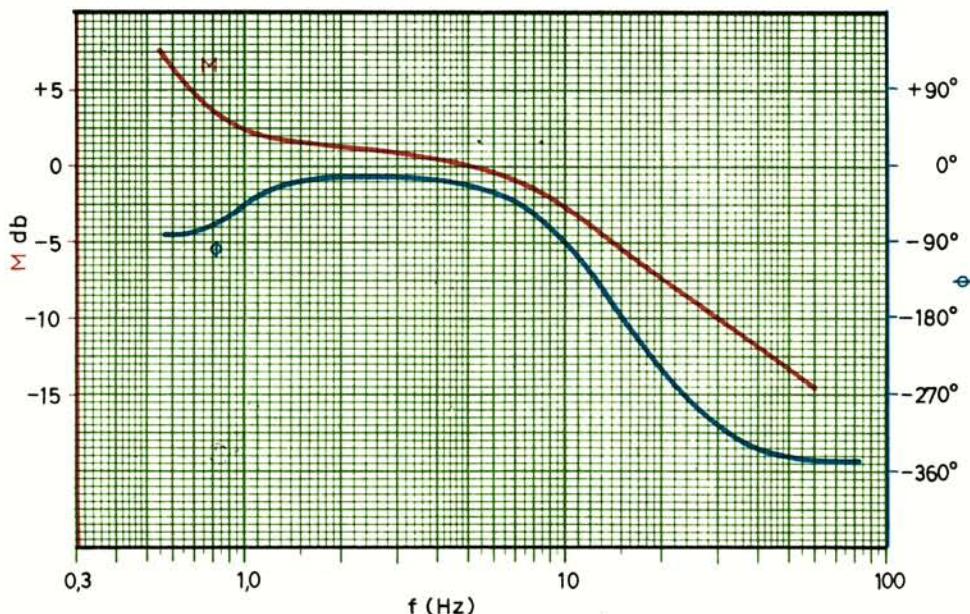
(Απάντηση: - 4,4db)

6. Η είσοδος και έξοδος ενός συστήματος φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Υπολόγισε το μέγεθος της αρμονικής αποκρίσεως και τη γωνία φάσεως στη συχνότητα αυτή.

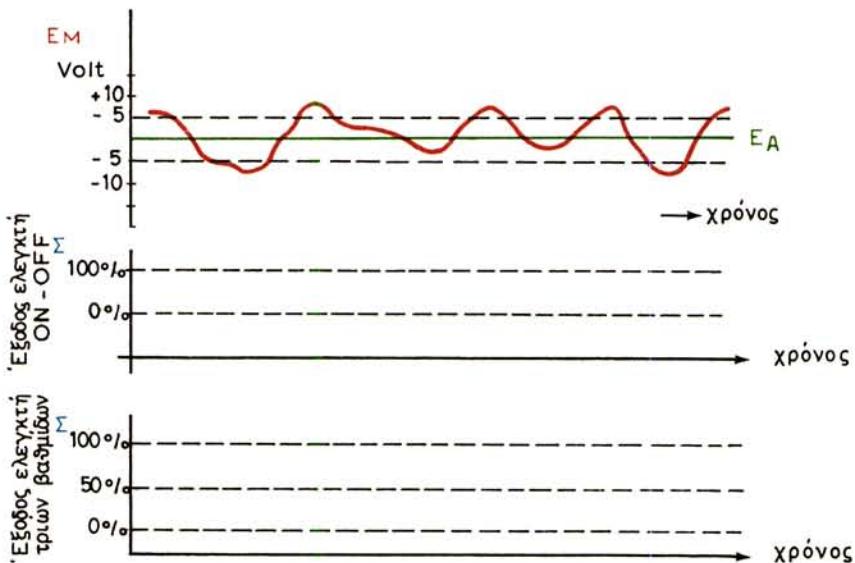


(Απάντηση: $M = + 6 \text{ db}$, $\Phi = - 270^\circ$)

7. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η αρμονική απόκριση ενός συστήματος. Να βρεθούν α) η συχνότητα ταλαντώσεως της δυναμικής αποκρίσεως, β) η τελική περιόδος, γ) ο χρόνος αποκαταστάσεως. Σε ποιο πεδίο συχνοτήτων το σύστημα α) ελέγχεται αποτελεσματικά, β) ελέγχεται προβληματικά και γ) δεν ελέγχεται καθόλου. Ποια είναι τα περιθώρια μεγέθους και φάσεως;



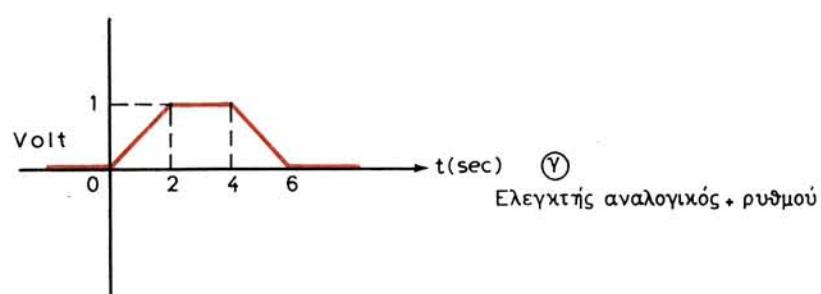
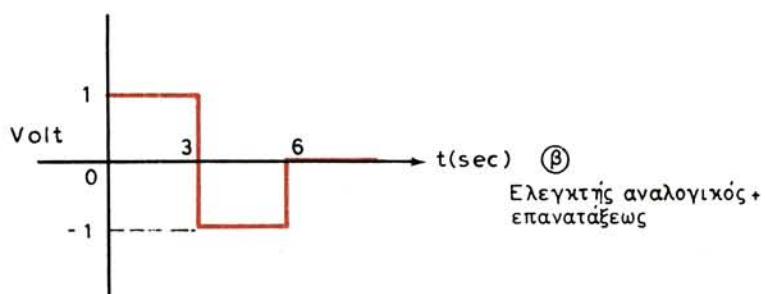
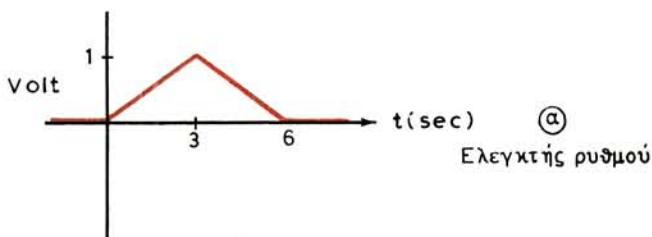
8. Ένα σύστημα ελέγχεται με μέθοδο ON - OFF. Η καμπύλη της ελεγχόμενης μεταβλητής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Σχεδίασε την έξοδο του ελεγκτή. Σχεδίασε την έξοδο του ελεγκτή για την περίπτωση που ο έλεγχος είναι «τριών βαθμίδων» με περιθώρια σφάλματος $\theta_2 = +5 \text{ volt}$ και $\theta_1 = -5 \text{ volt}$.



9. Στο σύστημα του προβλήματος 8, σχεδίασε την έξοδο του ελεγκτή για την περίπτωση που ο έλεγχος είναι «πλωτός» με μία ταχύτητα. Επανάλαβε την δίσκη για «πλωτό» έλεγχο δύο ταχυτήτων.
10. Σε ένα αναλογικό ελεγκτή, η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι θερμοκρασία που κυμαίνεται μεταξύ $50 - 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ και με σημείο ρυθμίσεως $73,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, που αντιστοιχεί σε 50% έξοδο του ελεγκτή. Να βρεις το αντιστάθμισμα που θα παρουσιασθεί, όταν η έξοδος του ελεγκτή γίνει 55%, αν η σταθερά αναλογίας είναι ίση με 2,0.

(Απάντηση: 2,5%)

11. Σχεδίασε την έξοδο ενός ελεγκτή με αντίστροφη δράση για τις παρακάτω περιπτώσεις αποκλίσεως και μεθόδου ελέγχου.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΕΛΕΓΚΤΕΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάσαμε τις βασικές αρχές ελέγχου των βιομηχανικών διεργασιών. Υπάρχουν, όπως είδαμε, διάφορες μέθοδοι ελέγχου, από τις οποίες ορισμένες είναι δυνατό να εφαρμοσθούν αυτούσιες, ενώ άλλες χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλους τύπους ελέγχου, σύμφωνα με τα προβλήματα της συγκεκριμένης διεργασίας που πρέπει να αντιμετωπίσουν.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζομε διάφορες μεθόδους και τεχνικές για τη σχεδίαση και την κατασκευή των ελεγκτών. Θα εξετάσομε ηλεκτρονικούς, ηλεκτρικούς, πνευματικούς και υδραυλικούς ελεγκτές. Ιδιαίτερα θα μας απασχολήσουν οι ηλεκτρονικοί ελεγκτές, γιατί έχουν τη μεγαλύτερη εφαρμογή. Η κατασκευή τους γίνεται κυρίως με **τελεστικούς ενισχυτές** (Operational Amplifiers - Op Amps) σε **ολοκληρωμένα κυκλώματα** (Integrated Circuits - IC).

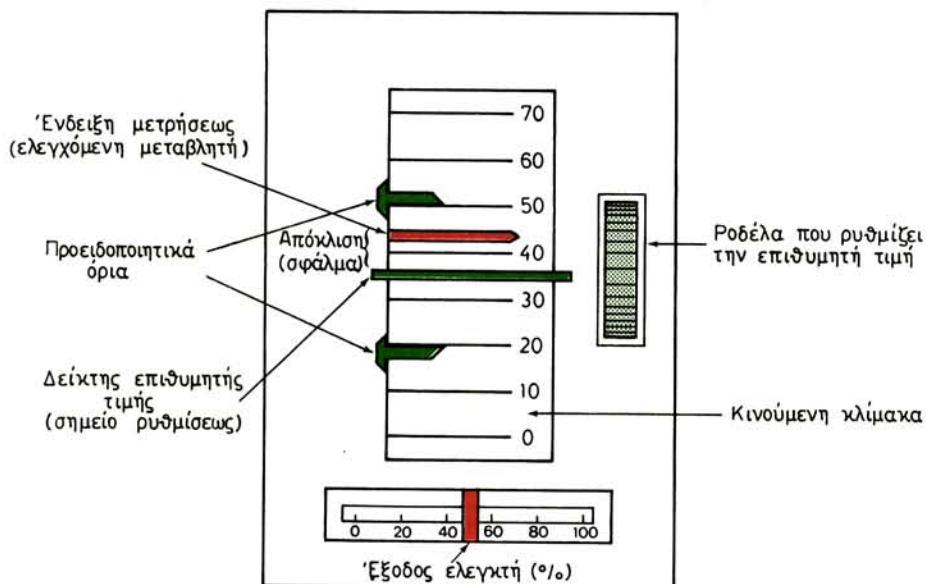
Τέλος, θα εξετάσομε και ελεγκτές που χρησιμοποιούν **ψηφιακές συσκευές** (digital devices), **ψηφιακούς υπολογιστές** και **μικροεπεξεργαστές** (microprocessors).

5.1 Ηλεκτρονικοί ελεγκτές.

Τη μεγαλύτερη εφαρμογή στα ΣΑΕ σήμερα έχουν οι ηλεκτρονικοί ελεγκτές, οι οποίοι λειτουργούν με τελεστικούς ενισχυτές ή με ψηφιακούς υπολογιστές. Εδώ θα εξετάσομε τους τρόπους κατασκευής διαφόρων τύπων ελεγκτών με τελεστικούς ενισχυτές.

5.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά.

Οι συνηθισμένοι ελεγκτές πού χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές, έχουν στήν «κονσόλα» ελέγχου μία ή περισσότερες διατάξεις, όπως αυτή του σχήματος 5.1a. Η διάταξη αυτή συνήθως περιέχει όργανα για τη συνεχή παρακολούθηση της διεργασίας και ένα μηχανισμό με τον οποίο καθορίζομε το σημείο ρυθμίσεως (ή επιθυμητή τιμή) της ελεγχόμενης μεταβλητής. Στο κάτω μέρος του πλαισίου, υπάρχει ένα όργανο με την ένδειξη της εξόδου του ελεγκτή σε κλίμακα 0 – 100%. Η ίδια ένδειξη είναι δυνατό σε άλλες διατάξεις να παρουσιάζεται ψηφιακά. Η επιθυμητή τιμή καθορίζεται με το γύρισμα μιας ροδέλας, η οποία μετακινεί πάνω-κάτω ένα λεπτό δείκτη (πράσινος). Με τον τρόπο αυτό, ο δείκτης τοποθετείται απέναντι από ένα σχετικό αριθμό ο οποίος βρίσκεται πάνω σε μια κινούμενη ποσοστιαία κλίμακα (βλ. σχήμα 5.1a). Όπως σημειώθηκε προηγουμένως, η ελεγχόμενη μεταβλητή εκφράζεται ως ηλεκτρικό ρεύμα σε κλίμακα 4 – 20 mA. Έτσι και το σημείο ρυθμίσεως (ή επιθυμητή τιμή) ορίζεται σε ένα επιθυμητό ποσοστό της ίδιας κλίμακας.



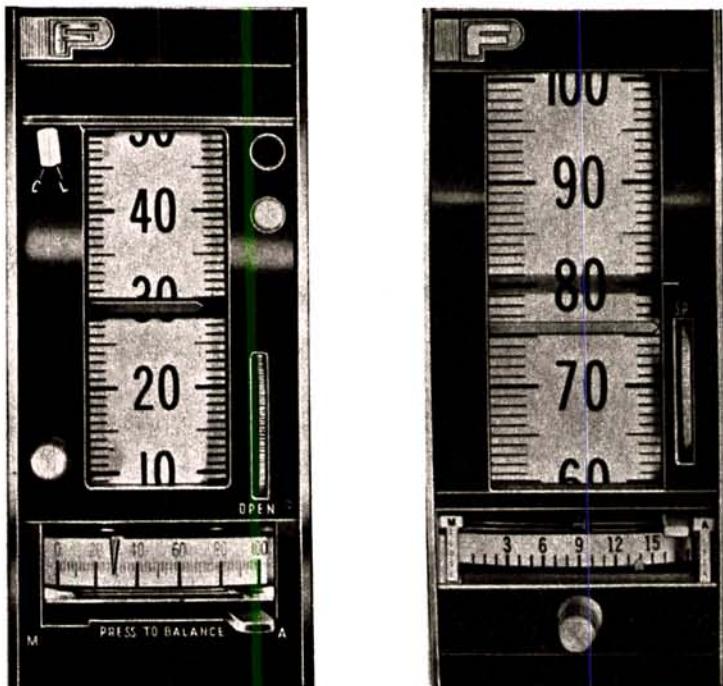
Σχ. 5.1α.
Εξωτερικό πλαίσιο ενός τυπικού ελεγκτή.

Στην ίδια διάταξη, υπάρχει επίσης ένας μετρητής ο οποίος παρέχει τη στιγμιαία τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής, πάλι σε ποσοστό. Η ένδειξη αυτή (θέση της κόκκινης βελόνας) συγκρίνεται με το δείκτη του σημείου ρυθμίσεως (λεπτός πράσινος σταθερός δείκτης) και προκύπτει έτσι μια στιγμιαία ένδειξη του σφάλματος, (ή αποκλίσεως) της ελεγχόμενης μεταβλητής από την επιθυμητή τιμή. Υπάρχουν επίσης δύο δείκτες (πράσινοι), οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν (με το χέρι συνήθως) πάνω και κάτω από το σημείο ρυθμίσεως και χρησιμεύουν ως όρια προειδοποίησεως της τιμής του σφάλματος. Όταν το σφάλμα υπερβεί τα όρια ενεργοποιείται κάποιο κουδούνι που ειδοποιεί τον υπεύθυνο τεχνικό να επέμβει αποτελεσματικά και να προλάβει τυχόν ζημιές στη διεργασία.

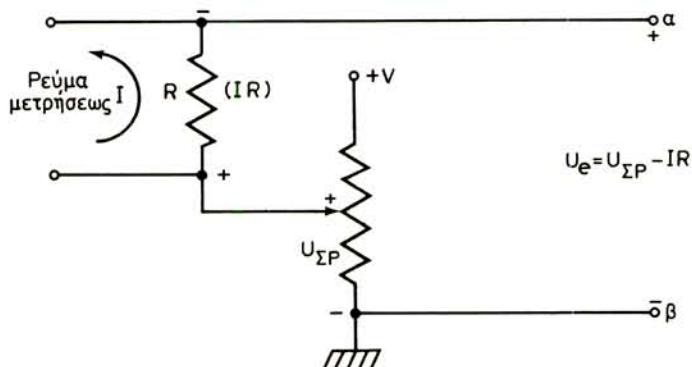
Σε άλλες διατάξεις, υπάρχει και ένας διακόπτης, με τον οποίο η διαδικασία ελέγχου μπορεί να μετατραπεί από αυτόματη σε χειρορυθμιζόμενη. Οι πιο προηγμένες διατάξεις περιλαμβάνουν επίσης επιλογές για τη ρύθμιση της ζώνης αναλογίας και των παραμέτρων που σχετίζονται με τις υπόλοιπες μεθόδους ελέγχου. Όταν ο έλεγχος γίνεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή, υπάρχει ειδική είσοδος για το σήμα του υπολογιστή, το οποίο μεταφέρει τις εκάστοτε εντολές ελέγχου. Στο σχήμα 5.1β εικονίζεται ένα πραγματικό πλαίσιο ελεγκτή.

5.1.2 Ηλεκτρονικό σήμα σφάλματος

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο ελεγκτής ενεργοποιείται από το σήμα σφάλματος που παράγεται από το συγκριτή. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι για την παραγωγή ενός ηλεκτρονικού σήματος σφάλματος. Ο απλούστερος είναι με χρησιμοποίηση αποκλειστικά ηλεκτρικών αντιστάσεων. Στο σχήμα 5.1γ φαίνεται η διάταξη παραγωγής ηλεκτρονικού σήματος σφάλματος με αντιστάσεις. Η



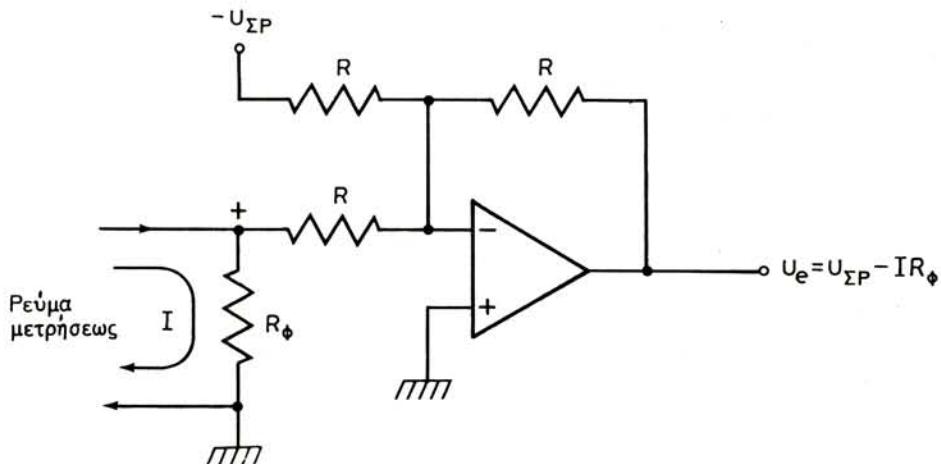
Σχ. 5.1β.



Σχ. 5.1γ.
Μετρητής σφάλματος μέ αντιστάσεις.

διάταξη αυτή συγκρίνει δύο σήματα τάσεων: την τάση που προέρχεται από τη μέτρηση της ελεγχόμενης μεταβλητής με την τάση του σημείου ρυθμίσεως. Συνήθως το σήμα από τη μέτρηση είναι ένα ηλεκτρικό ρεύμα I , το οποίο μετατρέπεται σε τάση, περνώντας από μια αντίσταση R . Η τάση του σημείου ρυθμίσεως $U_{\Sigma P}$ ρυθμίζεται από το δρομέα του ποτενσιομέτρου. Με τον κανόνα του Κίρχοφ διαπιστώνεται ότι η τάση σφάλματος εμφανίζεται στους ακροδέκτες α - β , και είναι $U_e = U_{\Sigma P} - IR$.

Ένας άλλος τρόπος για τον προσδιορισμό του ηλεκτρονικού σήματος σφάλμα-



Σχ. 5.1δ.

Μετρητής σφάλματος με τελεστικό ενισχυτή.

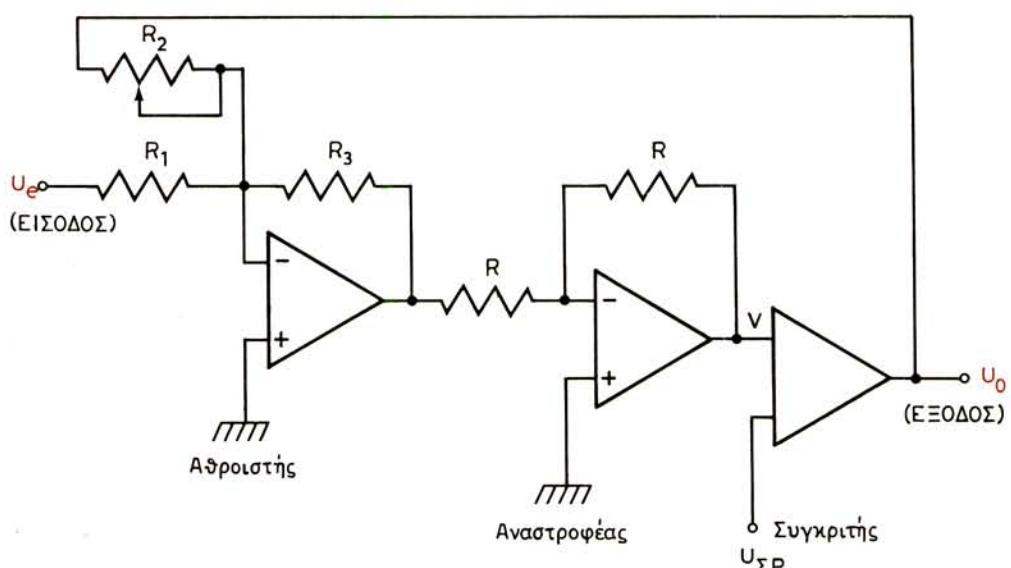
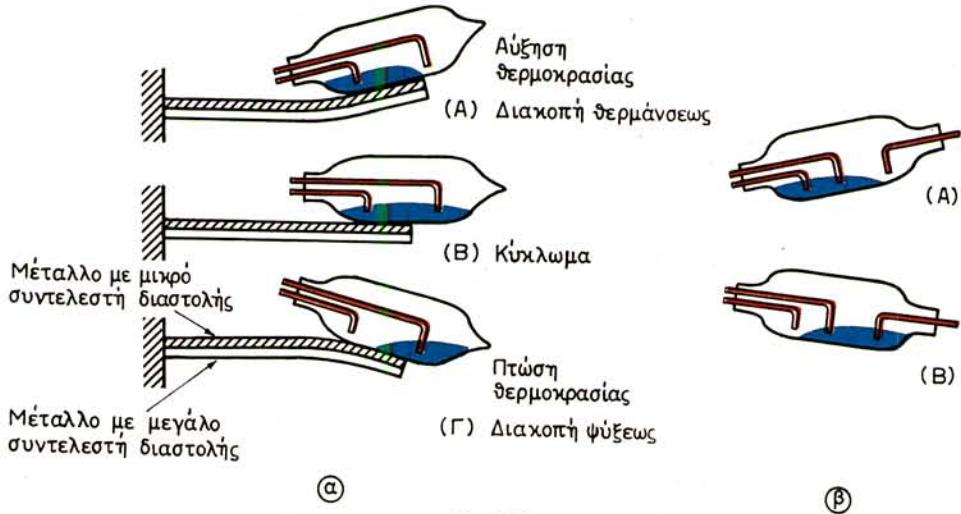
τος είναι με χρήση ενός κυκλώματος τελεστικού ενισχυτή. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο σχήμα 5.1δ. Με απλή ανάλυση της διατάξεως αυτής (βλέπε δεύτερο κεφάλαιο) προκύπτει ότι η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή είναι $U_e = U_{\Sigma P} - IR_\phi$, με την προϋπόθεση ότι η αντίσταση R είναι τουλάχιστον χίλιες φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση R_ϕ , ώστε το ρεύμα I που προέρχεται από το μετρητή να περάσει μόνο από την αντίσταση R_ϕ .

5.1.3 Ελεγκτές ON-OFF.

Ο ελεγκτής ON-OFF (ή ελεγκτής δύο βαθμίδων) εφαρμόζεται πολύ σε κοινά συστήματα αυτομάτου ελέγχου της καθημερινής χρήσεως. Τα περισσότερα σπίτια και γραφεία έχουν συστήματα κλιματισμού (θερμάνσεως – ψύξεως), τα οποία λειτουργούν με ελεγκτές δύο βαθμίδων. Οι περισσότεροι ελεγκτές του τύπου αυτού χρησιμοποιούν το σύστημα της **διμεταλλικής ράβδου** (bimetallic strip) σε συνδυασμό με ένα **διακόπτη υδραργύρου** (mercury switch), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1ε.

Στο (α) μέρος του σχήματος εικονίζεται ένας διακόπτης με δύο ακροδέκτες και στο (β) μέρος ένας διακόπτης με τρεις ακροδέκτες. Οι τύποι αυτοί χρησιμοποιούνται σε οικιακές εφαρμογές. Ο διμεταλλικός ελεγκτής χρησιμοποιείται μόνο σε συστήματα ελέγχου θερμοκρασίας περιβάλλοντος και λειτουργεί ως εξής: Η διμεταλλική ράβδος είναι ένας μεταλλάκτης, ο οποίος αποτελείται από δύο ενσωματωμένα μέταλλα με μεγάλη διαφορά συντελεστών θερμικής διαστολής μεταξύ τους. Σε κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας λόγω των διαφορετικών συντελεστών διαστολής των μετάλλων, επέρχεται μια καμπυλόγραμμη παραμόρφωση της διατάξεως όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1ε(α). Όταν το μέταλλο με το μεγάλο συντελεστή διαστολής βρίσκεται από κάτω, με την πτώση της θερμοκρασίας, η ράβδος κάμπτεται προς τα κάτω, ενώ, με αύξηση της θερμοκρασίας, κάμπτεται προς τα πάνω. Ο συνδυασμός του μεταλλάκτη αυτού με το διακόπτη υδραργύρου, αποτελεί τον ελεγκτή «δύο βαθμίδων» ή «ON-OFF».

Ελεγκτής «ON-OFF» επίσης είναι και ο ελεγκτής με δύο τελεστικούς ενισχυτές



(ένα αθροιστή και ένα αναστροφέα) και ένα συγκριτή που φαίνεται στο σχήμα 5.1στ. Η μεταβλητή αντίσταση R_2 επιτρέπει τη ρύθμιση του εύρους της ουδέτερης ζώνης. Το σήμα εισόδου είναι η τάση σφάλματος που κυμαίνεται γύρω από τις τιμές ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ U_K και ΔΙΑΚΟΠΗΣ U_D . Το σήμα εξόδου U_0 είναι δυαδικό, δηλαδή παίρνει τις τιμές 0 ή U_0 . Ο συγκριτής αλλάζει το σήμα στην έξοδό του κάθε φορά που το σήμα V θα γίνει στην είσοδό του ίσο με την τιμή του σταθερού σήματος της άλλης εισόδου, η οποία είναι η τάση του σημείου ρυθμίσεως U_{SP} .

Η ανάλυση της διατάξεως του σχήματος 5.1 στ γίνεται ως εξής:

$$V = \frac{R_3}{R_1} U_e + \frac{R_3}{R_2} U_0 \quad (5.1)$$

Επειδή ο συγκριτής στο τέλος της διατάξης αλλάζει την τιμή της εξόδου του κάθε φορά που $V = U_{SP}$, η σχέση (5.1) μπορεί να γραφεί

$$U_{SP} = \frac{R_3}{R_1} U_e + \frac{R_3}{R_2} U_0 \quad (5.2)$$

Είναι γνωστό ότι, όταν $U_e = U_K$, η $U_0 = 0$. Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στη σχέση (5.2), βρίσκομε

$$U_{SP} = \frac{R_3}{R_1} U_K \quad \text{ή} \quad U_K = \frac{R_1}{R_3} U_{SP} \quad (5.3)$$

σχέση που εκφράζει την τάση κυκλώματος U_K ως προς τις παραμέτρους του κυκλώματος R_1 , R_3 και την τάση του σημείου ρυθμίσεως U_{SP} .

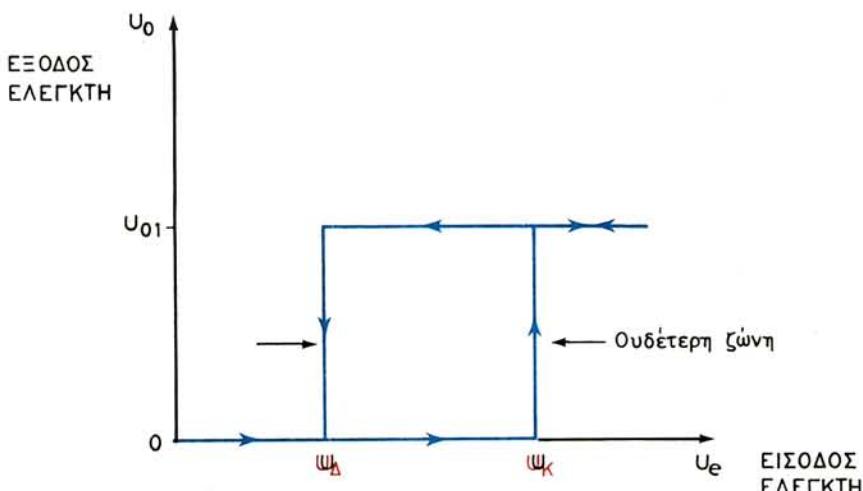
Η άλλη δυνατή τιμή της εξόδου του συγκριτή είναι $U_0 = U_{01}$, όταν $U_e = U_\Delta$, όπου U_{01} είναι μια συγκεκριμένη τιμή τάσεως. Αν αντικαταστήσομε τις τιμές αυτές στη σχέση (5.2), έχομε τη νέα σχέση.

$$U_{SP} = \frac{R_3}{R_1} U_\Delta + \frac{R_3}{R_2} U_{01} \quad (5.4)$$

Λύοντας την εξίσωση αυτή ως προς U_Δ , έχομε

$$U_\Delta = U_{SP} \frac{R_1}{R_3} - \frac{R_1}{R_3} \frac{R_3}{R_2} U_{01}$$

που απλουστεύεται στη σχέση



Σχ. 5.1ζ.
Απόκριση ελεγκτή «δύο βαθμίδων».

$$U_{\Delta} = \frac{R_1}{R_3} [U_{\Sigma P} - \frac{R_3}{R_2} U_{01}] \quad (5.5)$$

Στο σχήμα 5.1ζ φαίνεται γραφικά η σχέση εισόδου - εξόδου του ελεγκτή του σχήματος 5.1στ. Το πλάτος της ουδέτερης ζώνης μεταξύ των τιμών U_{Δ} και U_K μπορεί να ρυθμισθεί με τη μεταβλητή αντίσταση R_2 . Η θέση της ουδέτερης ζώνης στον άξονα U_e ρυθμίζεται από την τιμή του σημείου ρυθμίσεως $U_{\Sigma P}$.

Παράδειγμα 5.1.

Θέλομε να σχεδιάσουμε ένα ελεγκτή «δύο βαθμίδων» (ON-OFF) με βάση το σχήμα 5.1στ. Η τάση εισόδου U_e κυμαίνεται μεταξύ 0 – 2,5 Volt και η έξοδος παίρνει δύο πιθανές τιμές 0 ή 10 Volt. Η τάση κυκλώματος είναι 1,5 Volt και η τάση διακοπής 0,5 Volt.

Λύση.

Δίνονται: $U_{01} = 10 V$, $U_{\Delta} = 0,5 V$, $U_K = 1,5 V$.

Αν αντικαταστήσουμε τις τιμές αυτές στις εξισώσεις (5.3) και (5.5), έχουμε

$$1,5 = \frac{R_1}{R_3} U_{\Sigma P} \quad \text{καὶ} \quad 0,5 = \frac{R_1}{R_3} [U_{\Sigma P} - (\frac{R_3}{R_2}) 10]$$

δηλαδή, έχουμε δύο εξισώσεις με τέσσερις άγνωστους. Έτσι, επιλέγομε τιμές αυθαίρετα (εφικτές όμως) για δύο από τους άγνωστους, π.χ. $R_3 = 10 K\Omega$ και $U_{\Sigma P} = 5V$. Έχουμε τότε

$$1,5 = \frac{R_1}{10} (5) \quad \text{ή} \quad R_1 = 3 K\Omega$$

Επίσης έχουμε

$$0,5 = \frac{3}{10} [5 - (\frac{10}{R_2}) 10] \quad \text{ή} \quad R_2 = 30 K\Omega$$

Η τιμή της αντιστάσεως R του αναστροφέα Τ.Ε. είναι ελεύθερη, αρκεί να είναι μέσα στα δρια λειτουργίας του Τ.Ε.

5.1.4 Σύνθετοι ελεγκτές.

Όπως περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι σύνθετοι ελεγκτές κατασκευάζονται με παράλληλο συνδυασμό ενός αναλογικού ελεγκτή με ένα ελεγκτή επανατάξεως ή και με ένα ελεγκτή ρυθμού. Υπογραμμίσαμε ότι σχεδόν ποτέ δεν χρησιμοποιείται αυτοτελώς ούτε ο ελεγκτής επανατάξεως ούτε ο ελεγκτής ρυθμού.

5.1.4.1 Αναλογικός ηλεκτρονικός ελεγκτής.

Η σχέση που χαρακτηρίζει τη δράση του αναλογικού ελεγκτή είναι

$$\Sigma = \rho_a \theta_{\pi} + \Sigma(0) \quad (5.6)$$

όπου Σ = έξοδος του ελεγκτή από 0 - 100%



ρ_a = σταθερά αναλογίας

e_π = σφάλμα σε ποσοστό πλήρους κλίμακας

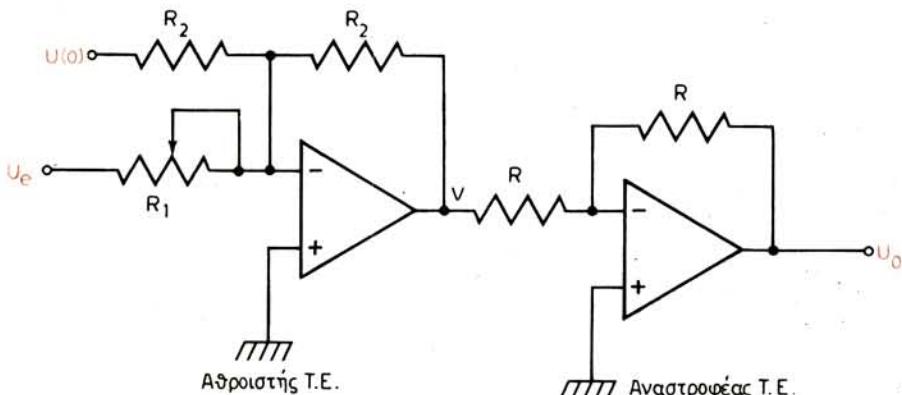
$\Sigma (0)$ = έξοδος του ελεγκτή όταν το σφάλμα είναι μηδέν.

Η σχέση αυτή ισοδυναμεί με την εξής ανάλογη (analogue) σχέση τάσεων

$$U_0 = \frac{R_2}{R_1} U_e + U(0) \quad (5.7)$$

Η νέα αυτή σχέση εκφράζει ένα αλγεβρικό άθροισμα τάσεων και είναι πραγματοποιήσιμη με ένα αθροιστή T.E., όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1η. Ο αναστροφέας T.E. εξασφαλίζει θετικό αλγεβρικό σημείο στην έξοδο. Στο πρώτο μέρος της διατάξεως η έξοδος του αθροιστή T.E., V , είναι

$$V = -\frac{R_2}{R_1} U(0) - \frac{R_2}{R_1} U_e \quad (5.8)$$



Σχ. 5.1η.
Ηλεκτρονικός αναλογικός ελεγκτής.

Από το δεύτερο μέρος της διατάξεως με τον αναστροφικό T.E. έχουμε

$$U_0 = -\frac{R}{R} V \quad (5.9)$$

Αντικαθιστώντας το δεξιό σκέλος της εξισώσεως (5.8) στη σχέση (5.9), προκύπτει η επιθυμητή σχέση (5.7).

Η σχεδίαση του ελεγκτή στο παραπάνω κύκλωμα γίνεται με τρόπο που η τάση έξοδου να κυμαίνεται μεταξύ $0 - U_{μεγ}$, που αντιστοιχεί στην κλίμακα $0 - 100\%$ του στοιχείου ελέγχου ή σε σήμα ελέγχου μεταξύ $4 - 20mA$. Το ίδιο επιδιώκεται και για την κλίμακα της τάσεως εισόδου, η οποία δέχεται το σήμα σφάλματος. Η ζώνη αναλογίας ρυθμίζεται από τη σταθερά (R_2/R_1) , με τρόπο που η μέγιστη τιμή της ζώνης του σφάλματος, να αντιστοιχεί στην τάση κόρου της έξοδου του T.E.

Παράδειγμα 5.2.

Πρόκειται να σχεδιάσομε ένα αναλογικό ελεγκτή με βάση τη διάταξη του σχή-

ματος 5.1η. Η κλίμακα της τάσεως εξόδου είναι 0 – 10 Volt και αντιστοιχεί σε κλίμακα 0 – 100% της εντολής του ελεγκτή προς το τελικό στοιχείο ελέγχου. Αν $R_2 = 5 \text{ K}\Omega$ και η αναμενόμενη μέγιστη τιμή του σφάλματος είναι 10 Volt, να βρεθούν οι τιμές της τάσεως $U(0)$ και της αντιστάσεως R_1 , ώστε το σύστημα να λειτουργήσει με ζώνη αναλογίας 40% γύρω από ένα $\Sigma(0) = 50\%$.

Λύση.

Η τιμή $U(0)$ στη σχέση (5.7) είναι 50% κλίμακας της εξόδου 0 – 10 Volt, δηλαδή $(0,50)(10 \text{ Volt}) = 5 \text{ Volt}$. Επομένως, όταν το σφάλμα είναι ίσο με μηδέν η έξοδος του ελεγκτή είναι $U_0 = U(0) = 5 \text{ Volt}$. Για να έχουμε ζώνη αναλογίας 40%, πρέπει, όταν η είσοδος του ελεγκτή αυξηθεί κατά 20%, η έξοδος να αυξηθεί από το σημείο 50% στο 100%. Από τη σχέση (5.7) παρατηρούμε ότι, όταν το σφάλμα αυξηθεί κατά 20% των 10 Volt, δηλαδή κατά 2 Volt, θα έχουμε τη μέγιστη τιμή εξόδου, δηλαδή 10 Volt.

$$\text{Επομένως, } \frac{R_2}{R_1} = \frac{U_0 - U(0)}{U_e} = \frac{10 - 5}{2} = 2,5$$

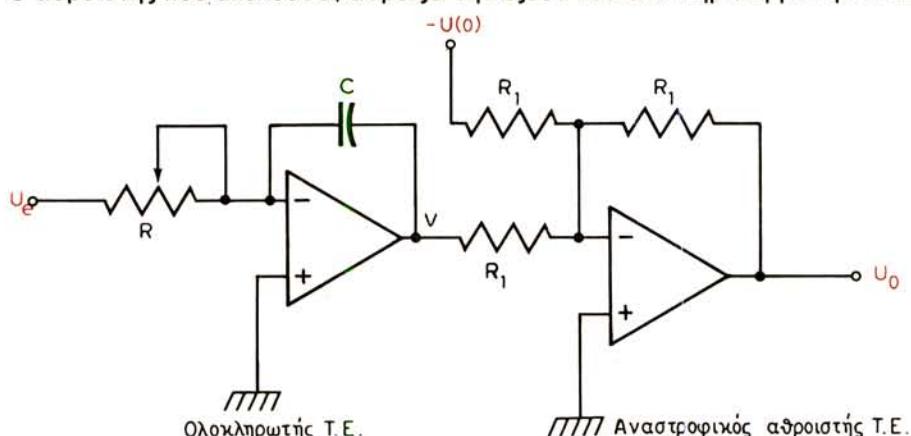
Έτσι, αν $R_2 = 5 \text{ K}\Omega$, τότε $R_1 = 2 \text{ K}\Omega$.

5.1.4.2 Ηλεκτρονικός ελεγκτής επανατάξεως.

Ένα τυπικό κύκλωμα ηλεκτρονικού ελεγκτή επανατάξεως φαίνεται στο σχήμα 5.1θ. Αποτελείται από ένα κύκλωμα ολοκληρώσεως (βλ. περιγραφή στο δεύτερο κεφάλαιο) και από ένα αναστροφικό αθροιστή. Ο ολοκληρωτής Τ.Ε. «ολοκληρώνει» το σφάλμα στο χρόνο κατά τον οποίο αυτό διαρκεί. Η σταθερά ολοκληρώσεως είναι ίση με RC . Η έξοδος δηλαδή του ολοκληρωτή δίνεται από τη σχέση

$$V = -\frac{1}{RC} [\text{ολοκλήρωμα του } U_e] \quad (5.10)$$

Ο αθροιστής που ακολουθεί, αθροίζει την έξοδο του ολοκληρωτή με την τάση



Σχ. 5.1θ.
Ηλεκτρονικός ελεγκτής επανατάξεως.

— $U(0)$ και αντιστρέφει το αλγεβρικό τους σημείο, δηλαδή

$$\begin{aligned} U_0 &= -\left(-\frac{1}{RC}\left[\begin{array}{l} \text{ολοκλήρωμα } U_e \text{ ως} \\ \text{προς το χρόνο} \end{array}\right] - U(0)\right) \\ &= \frac{1}{RC}\left[\begin{array}{l} \text{ολοκλήρωμα } U_e \text{ ως} \\ \text{προς το χρόνο} \end{array}\right] + U(0) \quad (5.11) \end{aligned}$$

Οι τιμές της αντιστάσεως R και του πυκνωτή C ρυθμίζονται έτσι, ώστε ο ρυθμός μεταβολής της εξόδου του ελεγκτή, όταν το σφάλμα παραμένει σταθερό, να είναι ο επιθυμητός για την κάθε περίπτωση ελέγχου. Άν η τιμή του $1/RC$ είναι πολύ μεγάλη (πράγμα που σημαίνει ότι το γινόμενο RC είναι πολύ μικρότερο από τη μονάδα), η έξοδος του ελεγκτή αυξάνει με γρήγορο ρυθμό, δημιουργείται **υπερύψωση** (overshoot) ως προς την επιθυμητή τιμή και η απόκριση καταλήγει σε ταλάντωση (ή κυκλικότητα).

5.1.4.3 Ηλεκτρονικός ελεγκτής ρυθμού.

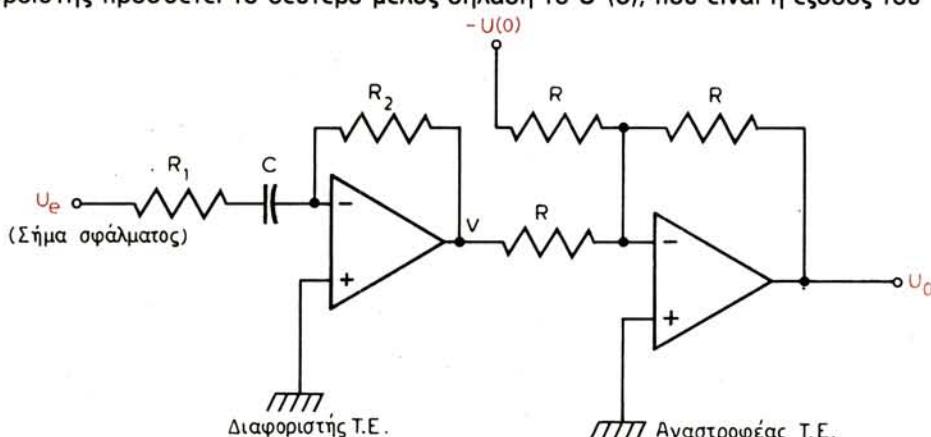
Ο ελεγκτής ρυθμού, όπως είδαμε, περιγράφεται από τη σχέση

$$\Sigma = \pm p_p \left[\begin{array}{l} \text{ρυθμό μεταβολής του } U_e \\ \text{ως προς το χρόνο} \end{array} \right] + \Sigma(0)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να υλοποιηθεί με το ηλεκτρονικό κύκλωμα του σχήματος 5.1i. Η εξίσωση του ελεγκτή για το ηλεκτρονικό αυτό κύκλωμα γράφεται

$$U_0 = \pm R_2 C \left[\begin{array}{l} \text{ρυθμό μεταβολής του } U_e \\ \text{ως προς το χρόνο} \end{array} \right] + U(0) \quad (5.12)$$

όπου $R_2 C$ είναι η **σταθερά παραγώγου** (derivative constant). Ο **διαφοριστής** (differentiator) T.E. υλοποιεί το πρώτο μέρος της σχέσεως (5.12). Ο αναστροφέας - αθροιστής προσθέτει το δεύτερο μέλος δηλαδή το $U(0)$, που είναι η έξοδος του



Σχ. 5.1i.
Ηλεκτρονικός ελεγκτής ρυθμού.

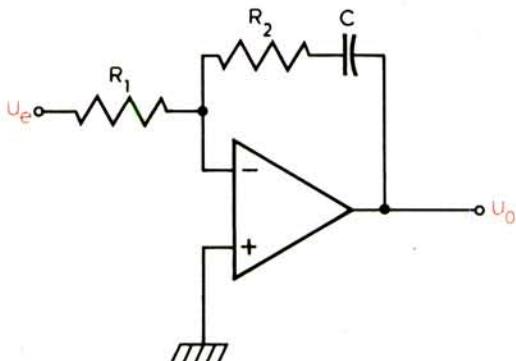
ελεγκτή όταν το σήμα σφάλματος είναι $U_e = 0$. Σκοπός της αντιστάσεως R_1 , στην είσοδο της διατάξεως είναι η εξασφάλιση ευστάθειας στο δύο κύκλωμα, όταν το σήμα σφάλματος U_e μεταβάλλεται ραγδαία. Η τιμή της επιλέγεται κατά τρόπο, ώστε, για μεγάλες συχνότητες f το γινόμενο $2\pi f R_1 C \ll 1$.

5.1.4.4 Ηλεκτρονικός ελεγκτής αναλογικός + επανατάξεως.

Ένας σύνθετος ελεγκτής αναλογικός + επανατάξεως κατασκευάζεται όπως δείχνει το ηλεκτρονικό κύκλωμα του σχήματος 5.1α. Η ανάλυση της διατάξεως αυτής οδηγεί στη σχέση:

$$\begin{aligned} U_o &= + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) U_e + \frac{1}{R_1 C} [\text{ολοκλήρωμα του } U_e] \\ &= + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) U_e + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{1}{R_2 C} \right) [\text{ολοκλήρωμα του } U_e] \quad (5.13) \end{aligned}$$

Η ζώνη αναλογίας ρυθμίζεται από το πηλίκο R_2/R_1 και η σταθερά ολοκληρώσεως από το πηλίκο $1/R_2 C$.



Σχ. 5.1α.
Ηλεκτρονικός ελεγκτής (αναλογικός + επανατάξεως).

Παράδειγμα 5.3.

Με βάση το σχήμα 5.1α πρέπει να σχεδιάσουμε ένα ελεγκτή με ζώνη αναλογίας 50% και με σταθερά ολοκληρώσεως 10 sec. Το σήμα σφάλματος κυμαίνεται μεταξύ 0 - 5 Volt και η έξοδος του ελεγκτή μεταξύ 0 - 10 Volt. Να υπολογισθούν οι τιμές των R_1 , R_2 και C .

Λύση.

Ζώνη αναλογίας 50% σημαίνει ότι, όταν η είσοδος του ελεγκτή αλλάζει κατά 50%, δηλαδή κατά (0,50) (5 Volt) = 2,5 Volt, η έξοδος γίνεται 100% ή 10 Volt. Επομένως, από τη σχέση

$$\rho_a = \frac{R_2}{R_1} = \frac{U_o}{U_e} \quad \text{έχομε,} \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{10}{2,5} = 4$$

Επίσης, όταν η σταθερά ολοκληρώσεως $R_2C = 10 \text{ sec}$, τότε το πηλίκο $1/R_2C = 0,1 \text{ sec}^{-1}$.

Αν επιλέξουμε ένα πυκνωτή $C = 100\mu\text{F}$, τότε $R_2 = 10/10^4 = 100 \text{ K}\Omega$.

$$\text{Έτσι, } R_1 = \frac{R_2}{4} = \frac{100 \text{ K}\Omega}{4} = 25 \text{ K}\Omega$$

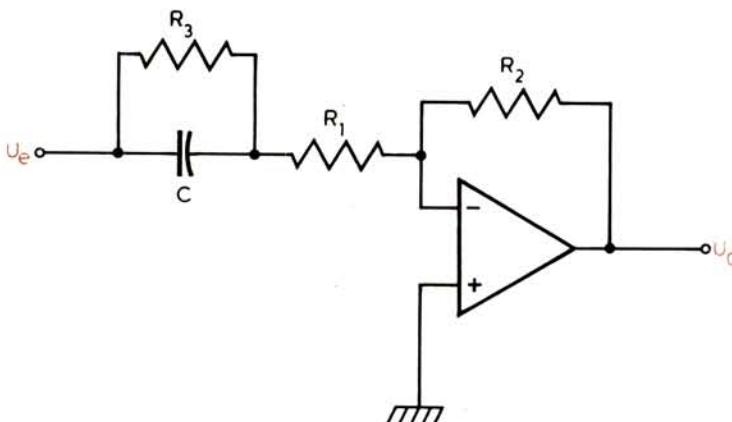
5.1.4.5 Ηλεκτρονικός ελεγκτής (αναλογικός + ρυθμού).

Ένας ελεγκτής αναλογικός + ρυθμού είναι δυνατό να προσομοιωθεί ηλεκτρονικά με τη διάταξη του σχήματος 5.1ιβ. Με βάση τη διάταξη αυτή είναι δυνατό να αποδείξουμε (το αποφεύγομε σκόπιμα εδώ), ότι ο ελεγκτής του τύπου αυτού περιγράφεται από τη σχέση

$$U_0 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_3} \right) U_e + \left(\frac{R_2}{R_1 + R_3} \right) R_3 C \frac{dU_e}{dt} \quad (5.14)$$

υπό την προϋπόθεση ότι

$$\left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} \right) R_3 C = \frac{0.1}{2\pi} T \quad (5.15)$$



Σχ. 5.1ιβ.
Ηλεκτρονικός ελεγκτής (αναλογικός + ρυθμού).

Η προϋπόθεση της σχέσεως (5.15) εξασφαλίζει ευσταθή λειτουργία του ελεγκτή. Ο όρος T συμβολίζει την ταχύτερη δυνατή χρονική μεταβολή που μπορεί να παρατηρηθεί στη διεργασία.

Παράδειγμα 5.4.

Ένας ελεγκτής που πραγματοποιείται με βάση τη διάταξη του σχήματος 5.1ιβ, είναι απαραίτητο να έχει ζώνη αναλογίας 40% και σταθερά ρυθμού $R_3C = 10 \text{ sec}$. Η κλίμακα της εισόδου είναι ίδια με την κλίμακα της εξόδου: 0 – 10 Volt. Η ταχύτερη δυνατή χρονική μεταβολή στη διεργασία είναι 1 sec. Να υπολογισθούν οι σταθερές R_3 , R_1 , R_2 και R_1 .

Λύση.

Επιλέγομε κατ' αρχή την τιμή του πυκνωτή επειδή έχομε συγκεκριμένες κατηγορίες πυκνωτών, ενώ υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία αντιστάσεων. Έστω λοιπόν ότι $C = 100 \mu F$. Από τη χρονική σταθερά $R_3 C = 10 \text{ sec}$ βρίσκομε ότι:

$$R_3 = 10/10 \times 10^{-6} = 10^6 \Omega \text{ ή } 0,1 \text{ M}\Omega.$$

Βρίσκομε κατόπιν ότι η σταθερά αναλογίας είναι,

$$\rho_a = \frac{100\%}{40\%} = 2,5$$

Από τη σχέση (5.14) αναγνωρίζομε ότι η σταθερά αναλογίας για τον ελεγκτή του τύπου αυτού είναι $R_2/(R_1 + R_3)$. Έχομε έτσι:

$$2,5 = \frac{R_2}{R_1 + R_3}$$

όπου άγνωστοι είναι οι R_1 και R_2 . Τον άγνωστα R_1 , τον βρίσκομε από τη σχέση (5.15) γιατί ξέρομε ότι $T = 1 \text{ sec}$.

$$\left(\frac{R_1}{R_1 + 10^6} \right) 10 = \frac{0,1}{2\pi} (1 \text{ sec})$$

Η λύση της εξισώσεως αυτής μας δίνει $R_1 \cong 159 \Omega$.

Τέλος, η αντίσταση R_2 προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση

$$2,5 = \frac{R_2}{R_1 + R_3}$$

Λύοντας ως προς R_2 , έχομε

$$R_2 \cong 2,5 R_3 = (2,5) \times 0,1 \text{ M}\Omega = 0,25 \text{ M}\Omega$$

5.1.4.6 Ηλεκτρονικός ελεγκτής (αναλογικός + επανατάξεως + ρυθμού).

Ο ελεγκτής αυτός είναι δυνατό να προσομοιωθεί ηλεκτρονικά με τη διάταξη του σχήματος 5.1γ. Χωρίς να επεκταθούμε στην ανάλυση της διατάξεως αυτής, παραθέτομε τις τρεις σταθερές (αναλογίας, ολοκληρώσεως και παραγώγου), οι οποίες ορίζονται από τις εξής σχέσεις:

$$\text{σταθερά αναλογίας} = \frac{R_2}{R_1}$$

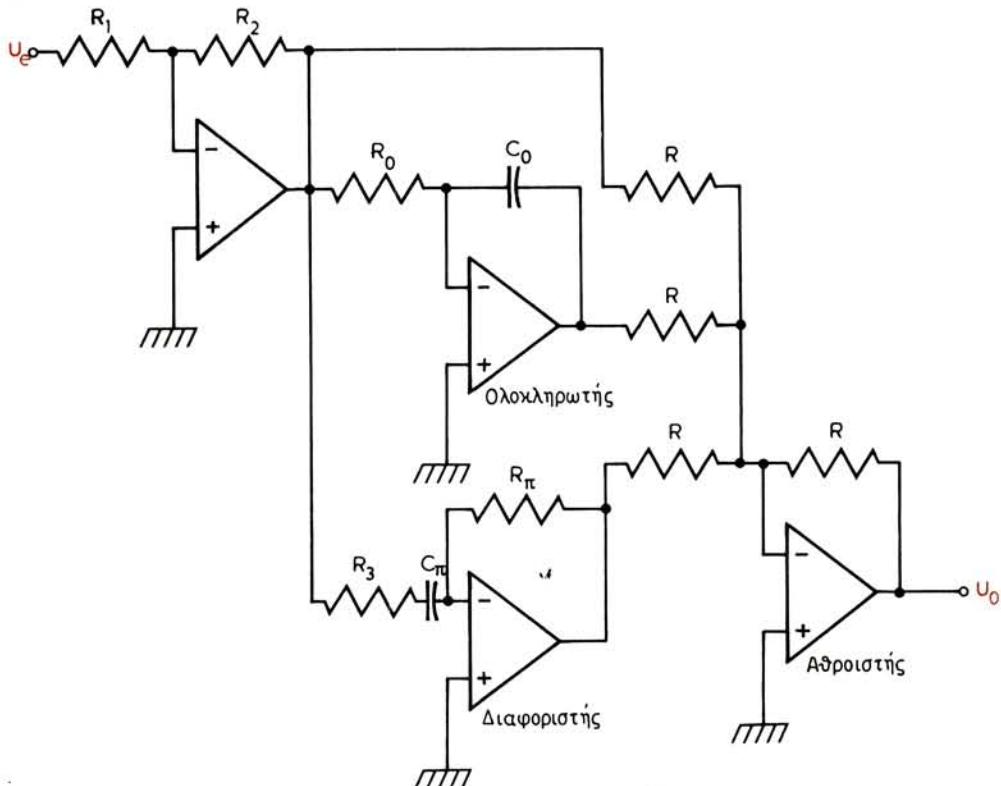
$$\begin{aligned} \text{σταθερά παραγώγου} &= R_\Pi C_\Pi \\ \text{σταθερά ολοκληρώσεως} &= R_0 C_0 \end{aligned} \tag{5.16}$$

Υπογραμμίζεται ότι, για ευσταθή λειτουργία, η τιμή της αντιστάσεως R_3 πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση $2\pi R_3 C_\Pi << 1$.

5.2 Ηλεκτρικοί ελεγκτές.

Οι ηλεκτρικοί ελεγκτές είναι εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται πάρα πολύ στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Ο χειρισμός τους γίνεται με το χέρι, με την κίνηση





Σχ. 5.1γ.
Ηλεκτρονικός ελεγκτής αναλογικός + επανατάξεως + ρυθμού.

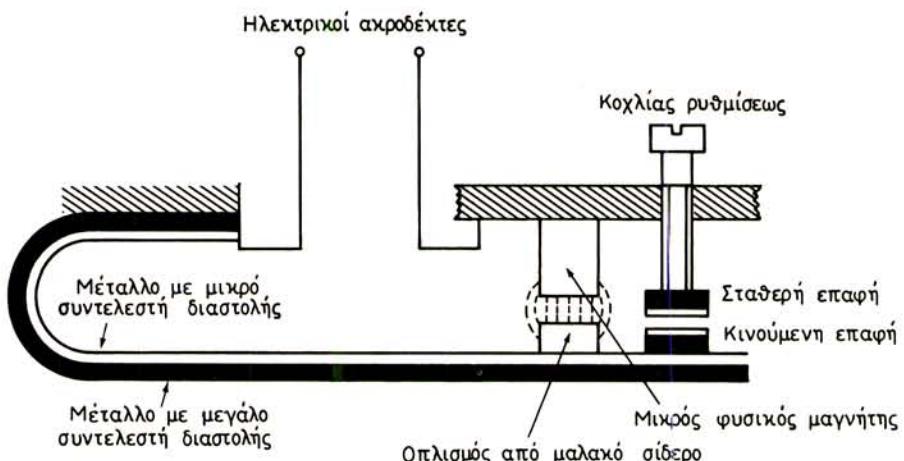
κάποιου μηχανικού εξαρτήματος, με κάμψη μιας διμεταλλικής ράβδου ή με κάποιο ηλεκτρομαγνήτη.

5.2.1 Ηλεκτρικοί ελεγκτές ON-OFF.

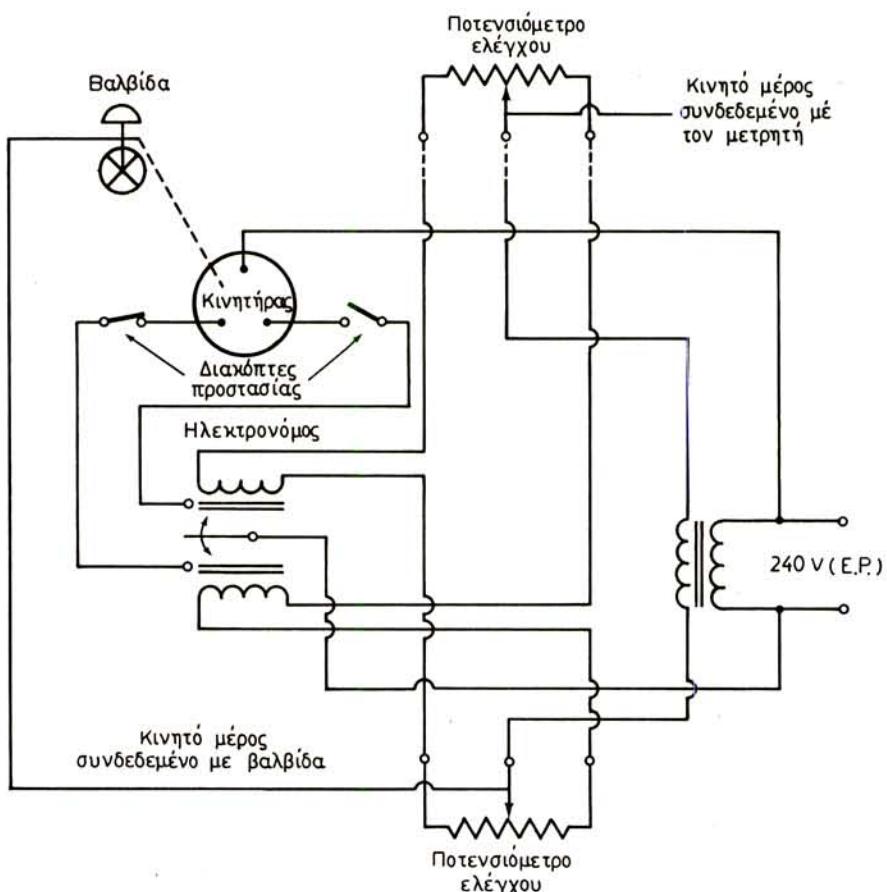
Ένας απλός ηλεκτρικός ελεγκτής δύο βαθμίδων (ON-OFF) που χρησιμοποιείται στον έλεγχο της θερμοκρασίας δωματίου φαίνεται στο σχήμα 5.2α. Αποτελείται από ένα διμεταλλικό έλασμα, το ένα άκρο του οποίου είναι σταθερό το δε άλλο ελεύθερο να κινείται πάνω-κάτω, ανάλογα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Η διάταξη ρυθμίζεται έτσι, ώστε οι επαφές να είναι κλειστές όταν το περιβάλλον έχει την επιθυμητή θερμοκρασία. Η ρύθμιση αυτή επιτυγχάνεται με τον κοχλία ρυθμίσεως. Όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξηθεί, το διμεταλλικό έλασμα κάμπτεται πρός τα κάτω και ανοίγει τις επαφές. Ο μικρός φυσικός μαγνήτης εξασφαλίζει την απότομη και σύγουρη κίνηση του έλασματος κατά το άνοιγμα και το κλείσιμο των επαφών, ώστε να μην φθείρονται από τη δημιουργία ηλεκτρικών εκφορτίσεων.

5.2.2 Ηλεκτρικοί αναλογικοί ελεγκτές.

Ένας ηλεκτρικός αναλογικός ελεγκτής απλής μορφής φαίνεται στο σχήμα 5.2β.



Σχ. 5.2α.
Διμεταλλικός θερμοστάτης. Απλός ηλεκτρικός ελεγκτής δύο βαθμίδων.



Σχ. 5.2β.
Ηλεκτρικός αναλογικός ελεγκτής.

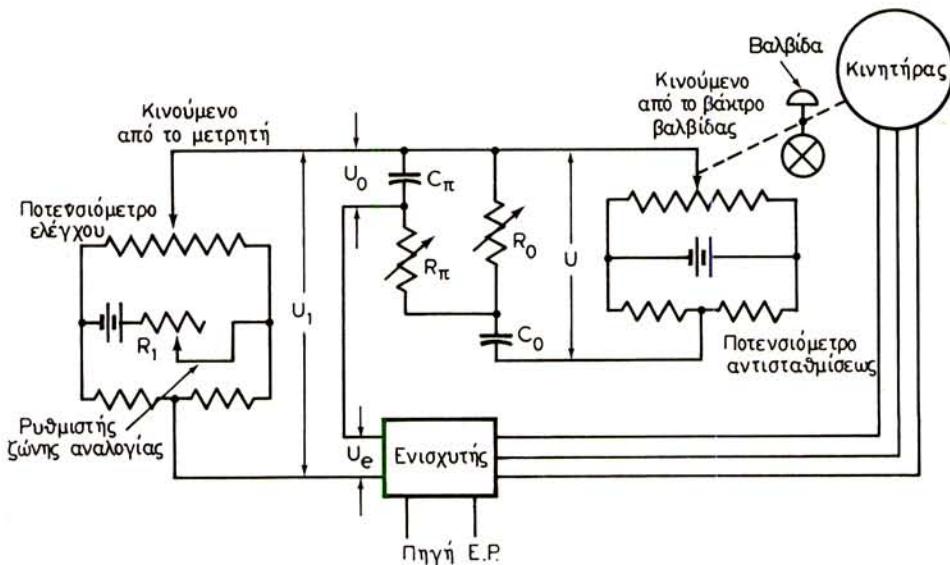
Αποτελείται από δύο ποτενσιόμετρα με ένα τροφοδότη ΕΡ σε σύνδεση τύπου γέφυρας. Η διάταξη συμπληρώνεται με ένα ηλεκτρονόμο, ο οποίος μετράει το υπάρχον σφάλμα και με ένα μονοφασικό κινητήρα, ο οποίος κινεί το βάκτρο μιας βαλβίδας.

Τό σύστημα λειτουργεί ως εξής: Όταν επισημανθεί κάποια απόκλιση (από το μετρητή), το κινητό μέρος του ποτενσιομέτρου ελέγχου μετακινείται και διαταράζεται η ηλεκτρική ισορροπία στη γέφυρα. Έτσι, περνάει περισσότερο ρεύμα από τη μία σπείρα του ηλεκτρονόμου, με αποτέλεσμα το κινητό μέρος του να κλείσει τις αντίστοιχες επαφές. Το κλείσιμο του κυκλώματος θέτει σε λειτουργία τον κινητήρα, ο οποίος κινεί το βάκτρο προς τη διεύθυνση που διορθώνει την απόκλιση. Ταυτόχρονα, με την κίνηση του βάκτρου της βαλβίδας μετακινείται και ο δρομέας του ποτενσιομέτρου αντισταθμίσεως που είναι συνδεδεμένος με το βάκτρο. Με τον τρόπο αυτό επέρχεται ηλεκτρική ισορροπία στη γέφυρα, ο ηλεκτρονόμος επανέρχεται στην ουδέτερη θέση του και ο κινητήρας αδρανεί. Αν δημιουργηθεί απόκλιση προς την αντίθετη διεύθυνση ο ηλεκτρονόμος κλείνει τις άλλες επαφές και ο κινητήρας περιστρέφεται ανάστροφα. Έτσι, η διάταξη αυτή εξασφαλίζει μια συγκεκριμένη θέση της βαλβίδας για κάθε τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής, πράγμα πού εξασφαλίζει αναλογικό έλεγχο.

Η ζώνη αναλογίας ρυθμίζεται με δύο τρόπους. Ο ένας είναι να τροποποιήσουμε τη σύνδεση μεταξύ του ποτενσιομέτρου ελέγχου και του μετρητή ή τη σύνδεση μεταξύ του ποτενσιομέτρου αντισταθμίσεως και της βαλβίδας. Ο δεύτερος τρόπος είναι να διαμορφώσουμε το κύκλωμα με τρόπο που να τροφοδοτούνται διαφορετικές τάσεις στα ποτενσιόμετρα. Αν π.χ. η τάση που εφαρμόζεται στο ποτενσιόμετρο ελέγχου είναι διπλάσια από την τάση που εφαρμόζεται στο ποτενσιόμετρο αντισταθμίσεως, η ζώνη αναλογίας είναι 50%.

5.2.3 Σύνθετοι ηλεκτρικοί ελεγκτές.

Ένα μειονέκτημα του συστήματος που περιγράψαμε είναι η μέτρια επίδοσή του λόγω μικρής «ευαισθησίας» του ηλεκτρονόμου κατά την εμφάνιση μικρών αποκλίσεων. Επίσης, η ύπαρξη «νεκρής ζώνης» κατά τη λειτουργία του ηλεκτρονόμου δημιουργεί πρόσθετα προβλήματα στο σύστημα. Βελτίωση της ευαισθησίας του συστήματος σε αποκλίσεις μικρού μεγέθους επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση του ηλεκτρονόμου από ένα ηλεκτρονικό ενισχυτή. Στο σχήμα 5.2γ εικονίζεται η διάταξη ενός σύνθετου ηλεκτρικού ελεγκτή, στόν οποίο η απόκλιση ενεργοποιεί ένα ηλεκτρονικό ενισχυτή που στη συνέχεια δημιουργεί το διορθωτικό σήμα. Στη διάταξη αυτή, η απόκλιση από την επιθυμητή τιμή παράγει μια τάση U_1 . Αν η τάση αυτή δεν αντισταθμισθεί από την τάση U_0 , θά δημιουργηθεί μία τάση σφάλματος U_e , η οποία θα κινήσει τον κινητήρα προς μια διεύθυνση ανάλογη προς το αλγεβρικό σημείο της τάσεως. Ο κινητήρας θέτει σε κίνηση το βάκτρο της βαλβίδας για να επιφέρει τη διόρθωση, ενώ ταυτόχρονα μεταβάλλει την τάση U_0 μέσω του ποτενσιομέτρου αντισταθμίσεως, μέχρις ότου αντισταθμισθεί η τάση σφάλματος και επέλθει ηλεκτρική ισορροπία στο σύστημα. Ο συνδυασμός R_0C_0 είναι η σταθερά ολοκληρώσεως που εξασφαλίζει έλεγχο επανατάξεως στο σύστημα, ο οποίος, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, εξουδετερώνει το μόνιμο σφάλμα αντισταθμίσεως. Η απόκλιση από το σημείο ρυθμίσεως παράγει μια τάση U_1 , που πρέπει να αντισταθμισθεί από την τάση U_0 για να μηδενισθεί η τάση σφάλμα-



Σχ. 5.2γ.

Σύνθετος ηλεκτρικός ελεγκτής (αναλογικός + επανατάξεως + ρυθμού).

τος U_e . Αυτό επιτυγχάνεται, όταν η ένταση που περνάει από την αντίσταση R_0 , είναι σταθερή. Η συνθήκη δε αυτή μπορεί να ικανοποιηθεί όταν η τάση U μεταβάλλεται κατά συνεχή τρόπο, πράγμα που εξασφαλίζεται βέβαια με τη συνεχή κίνηση του βάκτρου της βαλβίδας. Η κίνηση του βάκτρου της βαλβίδας διαρκεί μέχρις ότου μηδενισθεί η απόκλιση από την επιθυμητή τιμή. Η σταθερά ολοκληρώσεως ρυθμίζεται με τη μεταβλητή αντίσταση R_0 .

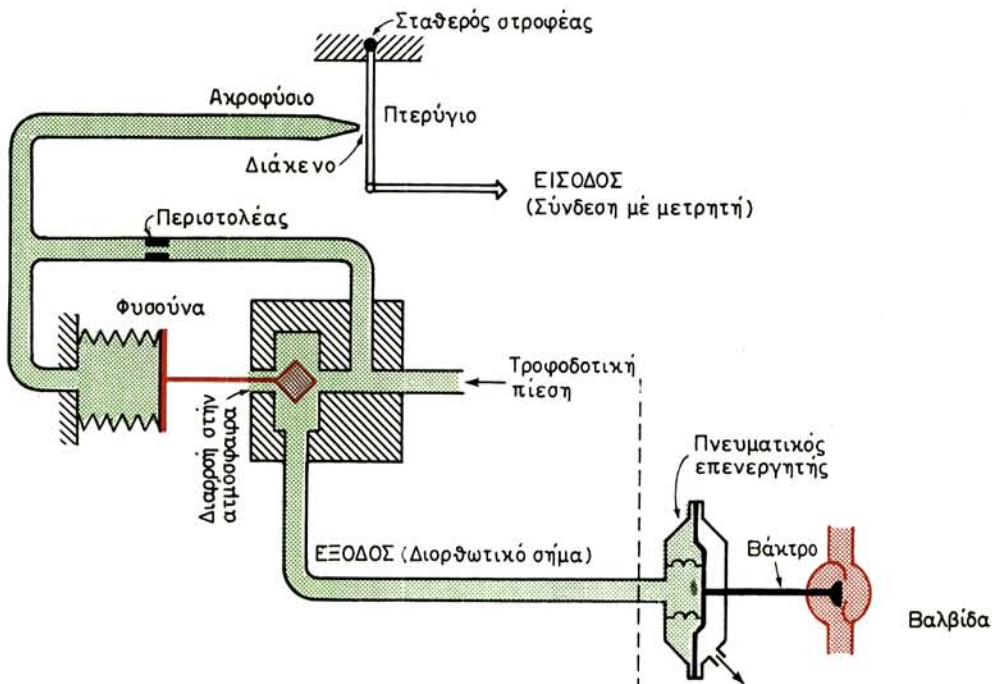
Ο έλεγχος ρυθμού πραγματοποιείται με το συνδυασμό $R_\pi C_\pi$. Όταν η απόκλιση μεταβάλλεται με σταθερό ρυθμό, το βάκτρο της βαλβίδας κινείται ανάλογα, παράγοντας μια μεταβαλλόμενη τάση στην αντίσταση R_0 . Όσο η τάση αυτή μεταβάλλεται, το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση R_π φορτίζει τον πυκνωτή C_π . Η τάση U_0 είναι μικρότερη από την πώση τάσεως στην αντίσταση R_0 , λόγω της πτώσεως τάσεως στην αντίσταση R_π . Έτσι, το βάκτρο της βαλβίδας, και κατ' επέκταση ο δρομέας του ποτενσιομέτρου, μετακινείται για τη διόρθωση, όσο υπάρχει μεταβολή στην απόκλιση ως προς το χρόνο. Η σταθερά παραγωγίσεως ρυθμίζεται με τη μεταβλητή αντίσταση R_π .

5.3 Πνευματικοί και υδραυλικοί ελεγκτές.

Για τον έλεγχο των βιομηχανικών διεργασιών, χρησιμοποιούνται συχνά ελεγκτές με πεπιεσμένο αέρα. Η χρήση πεπιεσμένου αέρα χαμηλής πιέσεως ως μέσου ελέγχου είναι ασφαλής και οικονομική. Τα βασικά εξαρτήματα που υπεισέρχονται στην κατασκευή των πνευματικών ελεγκτών, έχουν περιγραφεί εκτενώς στο δεύτερο κεφάλαιο. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε διάφορες διατάξεις πνευματικών και υδραυλικών ελεγκτών.

5.3.1 Πνευματικοί ελεγκτές «ON – OFF».

Ο απλούστερος τύπος πνευματικού ελεγκτή είναι ο τύπος δύο βαθμίδων



Σχ. 5.3α.
Πνευματικός ελεγκτής «ON-OFF».

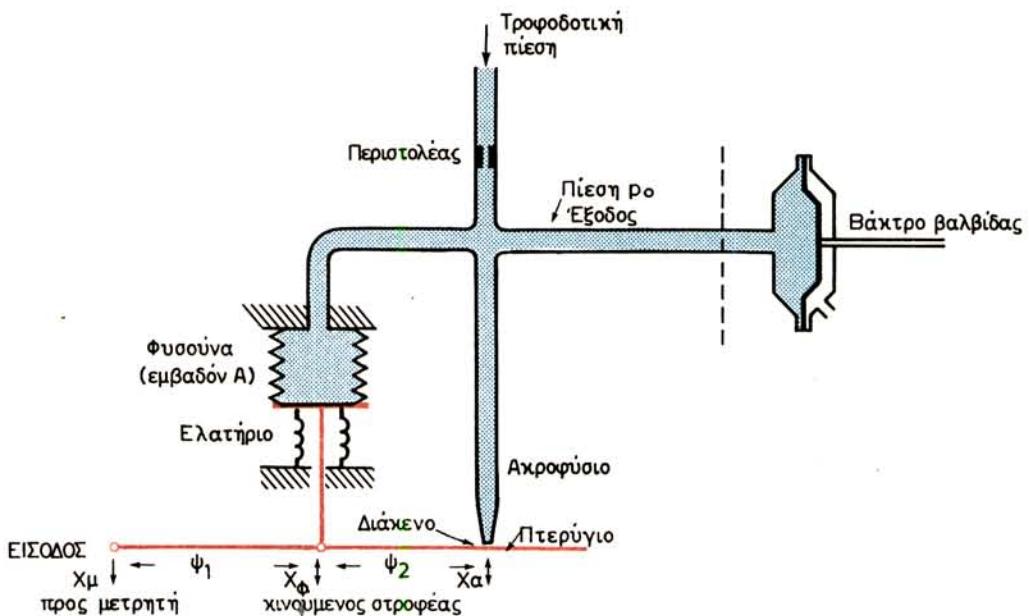
ή «ON – OFF». Στο σχήμα 5.3α βλέπομε ένα πνευματικό ελεγκτή «ON – OFF». Η λειτουργία του είναι η εξής: Υποθέτομε ότι μια απόκλιση της ελεγχόμενης μεταβλητής προκαλεί μετατόπιση του πτερυγίου από το ακροφύσιο, με αποτέλεσμα να μεγαλώσει το διάκενο. Η πίεση στο ακροφύσιο πέφτει και η φυσούνα συσπειρώνεται, κλείνοντας το στόμιο διαρροής προς την ατμόσφαιρα. Με τον τρόπο αυτό, η τροφοδοτική πίεση διοχετεύεται με όλη της την ένταση προς την έξοδο, παράγεται το κατάλληλο διορθωτικό σήμα που κινεί το βάκτρο της βαλβίδας μέσω του πνευματικού επενεργητή και μηδενίζεται η απόκλιση. Επειδή μια μικρή κίνηση του πτερυγίου παράγει σχετικά μεγάλη διορθωτική πίεση στον επενεργητή, η διάταξη του σχήματος 5.3α μπορεί να θεωρηθεί ως αναλογικός ελεγκτής με πολύ μικρή ζώνη αναλογίας.

5.3.2 Πνευματικός αναλογικός ελεγκτής.

Στον παραπάνω πνευματικό ελεγκτή «ON – OFF» ο στροφέας του πτερυγίου είναι σταθερός, με αποτέλεσμα η κίνηση του πτερυγίου, που ελέγχει τη διορθωτική πίεση στον επενεργητή, να μην είναι συνεχής. Στις περισσότερες περιπτώσεις βιομηχανικού ελέγχου, απαιτείται μεγαλύτερη ευαισθησία του συστήματος ελέγχου, πράγμα που εξασφαλίζεται με τη συνεχή κίνηση του πτερυγίου. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη αρνητικής ανατροφοδοτήσεως μέσω ενός ελεύθερου στροφέα, πτερυγίου.

Στο σχήμα 5.3β φαίνεται μια τέτοια διάταξη, η οποία όπως θα αποδείξουμε παρέχει αναλογικό έλεγχο.

Το διάκενο X_a εξαρτάται αφ' ενός από το σήμα του μετρητή, X_m , και αφ' ετέρου



Σχ. 5.38.
Πνευματικός αναλογικός ελεγκτής.

από την κίνηση λόγω της αρνητικής ανατροφοδοτήσεως, X_ϕ της φυσούνας. Η μαθηματική σχέση μεταξύ της πιέσεως του διορθωτικού σήματος p_0 και της κίνησης του πτερυγίου στο ακροφύσιο, X_a , είναι

$$p_0 = aX_a + \beta \quad (5.17)$$

όπου a και β είναι σταθερές. Αν οι αποστάσεις y_1 και y_2 είναι ίσες, έχουμε την πρόσθετη σχέση

$$X_\mu - 2X_\phi = -X_a \quad (5.18)$$

Για τη φυσούνα, έχουμε τη σχέση

$$A p_0 = K X_\phi \quad (5.19)$$

όπου A είναι το εμβαδόν της φυσούνας και K η σταθερά ελατηρίου της. Λύομε την εξίσωση (5.19) ως προς X_ϕ , αντικαθιστούμε το αποτέλεσμα στη σχέση (5.18) και βρίσκομε τη σχέση

$$X_a = 2 \left(\frac{A p_0}{K} \right) - X_\mu \quad (5.20)$$

Τέλος, συνδυάζοντας τις σχέσεις (5.20) και (5.17), βρίσκομε την σχέση

$$p_0 = \frac{K a}{(2 a A - K)} X_\mu - \frac{\beta K}{(2 a A - K)} \quad (5.21)$$

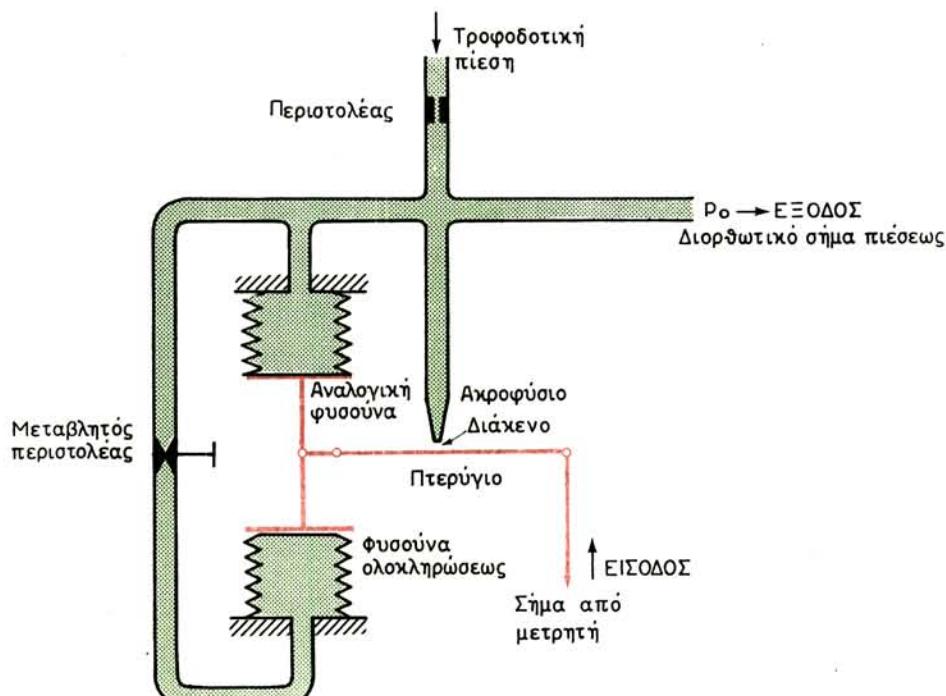
η οποία φανερώνει ότι η διορθωτική πίεση p_0 είναι ανάλογη με την κίνηση του πτερυγίου, X_μ , στο σημείο όπου εισέρχεται το σήμα από το μετρητή.

Η ζώνη αναλογίας μπορεί να ρυθμισθεί με δυό τρόπους:

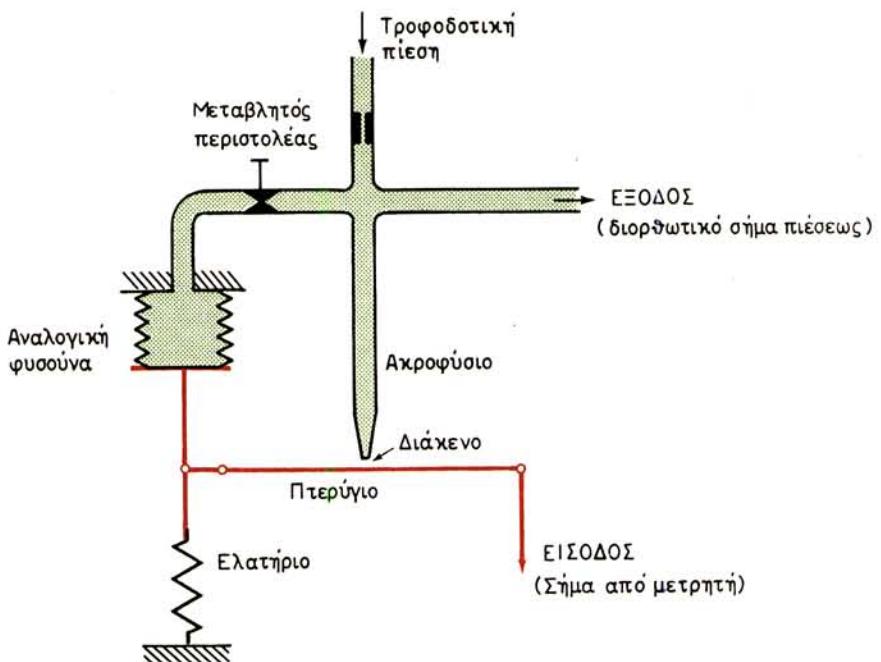
Είτε με μεταβολή του λόγου γ_1/γ_2 , ο οποίος στην παραπάνω περίπτωση τέθηκε ίσος με τη μονάδα, είτε με επιλογή άλλης φυσούνας με διαφορετική σταθερά K.

5.3.3 Σύνθετοι πνευματικοί ελεγκτές.

Στο σχήμα 5.3γ, φαίνεται ένας σύνθετος πνευματικός ελεγκτής, ο οποίος παρέχει έλεγχο αναλογικό και επανατάξεως. Ο πρώτος τύπος ελέγχου επιτυγχάνεται με τη διάταξη του σχήματος 5.3β. Ο δεύτερος τύπος ελέγχου επιτυγχάνεται με τήν προσθήκη μιας επί πλέον φυσούνας, η οποία τροφοδοτείται με πίεση μέσω ενός μεταβλητού περιστολέα. Η δεύτερη αυτή φυσούνα ενεργεί ως πυκνωτής, ο οποίος «φορτίζεται» με πεπιεσμένο αέρα μέσω του μεταβλητού περιστολέα. Ο ρυθμός μεταβολής της πιέσεως στον πνευματικό πυκνωτή είναι ανάλογος με τη διαφορά της πιέσεως, πριν και μετά τον περιστολέα. Η φυσούνα «ολοκληρώσεως» τοποθετείται απέναντι από την «αναλογική» φυσούνα και ο μεταβλητός περιστολέας μεταξύ τους, πράγμα που καθιστά εύκολη τη ρύθμιση της σταθεράς ολοκληρώσεως. Όταν η απόκλιση είναι μηδέν, οι πιέσεις στις δύο φυσούνες είναι ίσες. Όταν δημιουργείται απόκλιση, π.χ. λόγω ελαπτώσεως της πιέσεως εξόδου, διαρρέει αέρας από τη φυσούνα «ολοκληρώσεως» μέσω του μεταβλητού περιστολέα και η φυσούνα συστέλλεται. Το πτερύγιο απομακρύνεται από το ακροφύσιο, και η πίεση εξόδου μειώνεται ακόμη περισσότερο. Η κατάσταση αυτή συνεχίζεται, μέχρις ότου η ελεγχόμενη μεταβλητή επιστρέψει στην επιθυμητή τιμή, και εξισώθουν οι πιέσεις στις δύο φυσούνες.



Σχ. 5.3γ.
Πνευματικός ελεγκτής (αναλογικός + επανατάξεως).

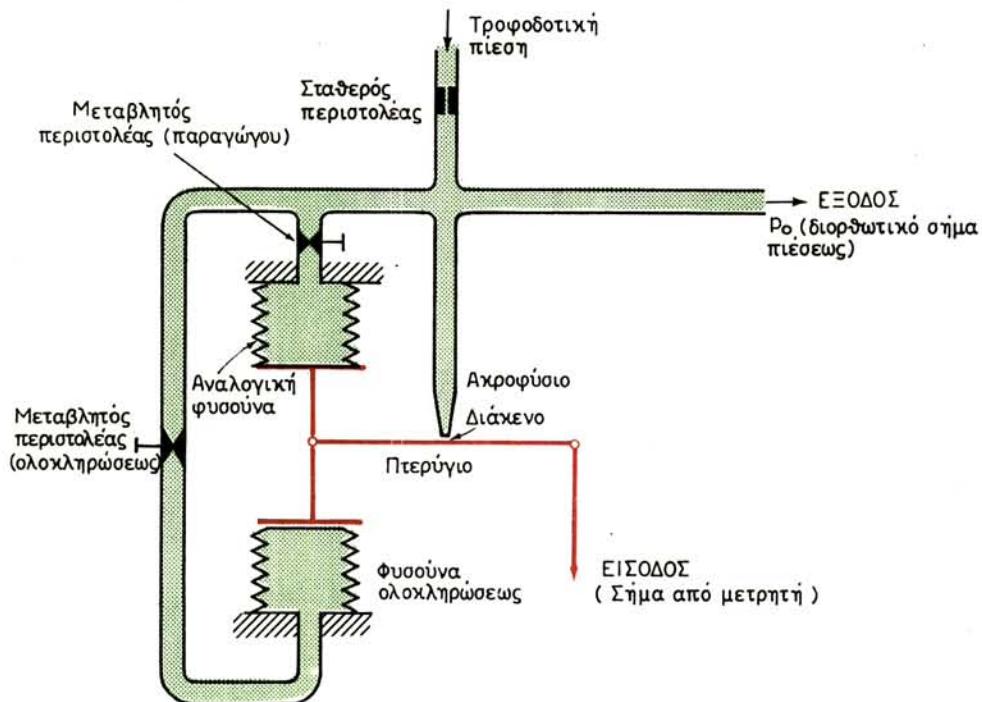


Σχ. 5.3δ.
Πνευματικός ελεγκτής (αναλογικός + ρυθμού).

Στο σχήμα 5.3δ παρουσιάζεται ένας πνευματικός ελεγκτής (αναλογικός + ρυθμού). Η έξοδος του ελεγκτή αυτού είναι ανάλογη προς την απόκλιση αλλά και προς το ρυθμό μεταβολής της αποκλίσεως. Η ύπαρξη του ρυθμιζόμενου περιστολέα πριν από την «αναλογική» φυσούνα προκαλεί καθυστέρηση των μεταβολών της πιέσεως στη φυσούνα. Έτσι, όταν το πτερύγιο κινηθεί γρήγορα προς το ακροφύσιο, η μεν πίεση στην έξοδο αυξάνεται γρήγορα, η δε πίεση στη φυσούνα με αργό ρυθμό. Με τον τρόπο αυτό, η υψηλή πίεση διατηρείται στην έξοδο, μέχρις ότου η πίεση στη φυσούνα αυξηθεί, στα ίδια επίπεδα. Μόλις το πτερύγιο καταλήξει να κινείται αργά ή παύσει να κινείται, η πίεση στη φυσούνα παρακολουθεί την πίεση στην έξοδο του ελεγκτή χωρίς αισθητή καθυστέρηση και ο έλεγχος ρυθμού παύει να υφίσταται. Η σταθερά παραγόντος ρυθμίζεται μέσω του ρυθμιζόμενου περιστολέα.

5.3.4 Πνευματικός ελεγκτής τριών δράσεων.

Ο σύνθετος πνευματικός ελεγκτής του σχήματος 5.3ε περιέχει τρεις τύπους δράσεων, δηλαδή αναλογική, επανατάξεως και ρυθμού. Η περιγραφή της λειτουργίας του προτείνεται ως άσκηση στο μαθητή, δεδομένου ότι ο ελεγκτής αποτελείται από εξαρτήματα, των οποίων τη λειτουργία έχομε ήδη περιγράψει. Σημειώνεται ότι στο εμπόριο οι σύνθετοι πνευματικοί ελεγκτές είναι αυτής της κατηγορίας.

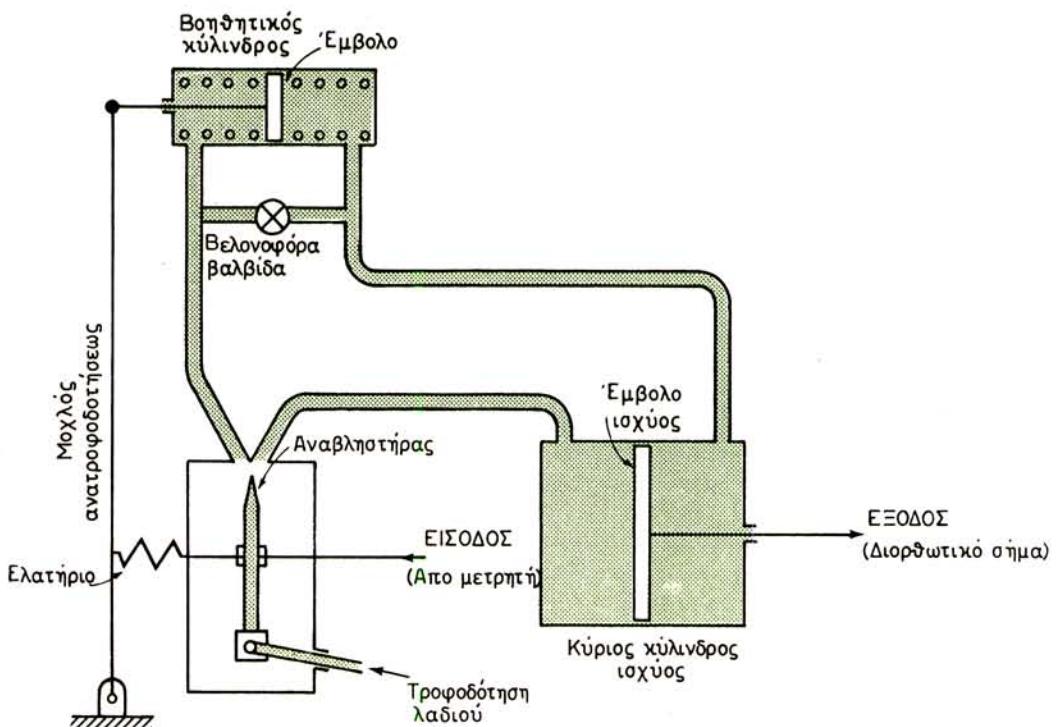


Σχ. 5.3ε.
Πνευματικός ελεγκτής (αναλογικός + επανατάξεως + ρυθμού).

5.3.5 Υδραυλικοί ελεγκτές.

Σε εφαρμογές όπου απαιτείται ισχυρή δύναμη για να ενεργοποιηθεί το τελικό στοιχείο ελέγχου, χρησιμοποιούνται υδραυλικοί ελεγκτές, οι οποίοι παράγουν διορθωτικά σήματα υψηλής ισχύος. Η μεγάλη ισχύς παράγεται από ένα υδραυλικό σερβοκινητήρα, που λειτουργεί με λάδι υψηλής πιέσεως. Ένας γνωστός ελεγκτής του τύπου αυτού είναι ο **ρυθμιστής** (regulator) ASKANIA, το σχηματικό διάγραμμα του οποίου φαίνεται στο σχήμα 5.3στ.

Ο ρυθμιστής αυτός λειτουργεί ως εξής: Όταν δημιουργηθεί απόκλιση από την επιθυμητή τιμή, ο μετρητής στέλνει σήμα και μετακινεί τον αναβλυστήρα, π.χ. προς τα δεξιά. Τότε, λάδι υπό πίεση περνάει στον κύριο κύλινδρο ισχύος, ο οποίος μετακινεί το έμβολο ισχύος και παράγει το διορθωτικό σήμα στον επενεργητή του τελικού στοιχείου ελέγχου. Η δράση αυτή επαναφέρει την ελεγχόμενη μεταβλητή στην επιθυμητή τιμή. Ο βοηθητικός κύλινδρος περιέχει ένα έμβολο το οποίο συγκρατείται με ελατήρια σε μια θέση ισορροπίας. Ο βοηθητικός κύλινδρος συνδέεται με τον κύριο κύλινδρο ισχύος κατά τρόπο ώστε, όταν ο αναβλυστήρας κινείται προς τα δεξιά, το βοηθητικό έμβολο κινείται προς τα αριστερά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της δυνάμεως του ελατηρίου διαμέσου του μοχλού ανατροφοδοτήσεως που παράγει την αναλογική δράση. Η διαφορά πιέσεων που επικρατεί μεταξύ των δύο πλευρών του βοηθητικού έμβολου δημιουργεί διαρροή μέσω της βελονοφόρας βαλβίδας, μέχρις ότου οι δύο πιέσεις εξισωθούν. Το έμβολο



Σχ. 5.3στ.
Υδραυλικός ρυθμιστής ΑΣΚΑΝΙΑ.

επανέρχεται έτσι στην αρχική του θέση, περίπου στη μέση του κυλίνδρου, αντισταθμίζοντας έτσι το σήμα της ανατροφοδοτήσεως που ασκείται από το μοχλό. Το αντιστάθμισμα αυτό αθεί τον αναβλυστήρα ακόμη δεξιότερα, με επακόλουθο την περαιτέρω κίνηση του εμβόλου ισχύος προς τα δεξιά και την περάτωση της διορθώσεως. Μετά το μηδενισμό της αποκλίσεως, τα έμβολα ακινητοποιούνται και ο αναβλυστήρας επανέρχεται στην κεντρική του θέση. Η δράση επανάτξεως επιτυγχάνεται με το αντιστάθμισμα της ανατροφοδοτήσεως. (Ο συνολικός όγκος λαδιού που εισέρχεται στον κύλινδρο ισχύος είναι ανάλογος του εύρους και της χρονικής διάρκειας της αποκλίσεως).

5.4 Ηλεκτρονικό ψηφιακό ελεγκτές.

Η ραγδαία εξέλιξη των ψηφιακών ηλεκτρονικών υπολογιστών στις δύο τελευταίες δεκαετίες, κύρια χαρακτηριστικά των οποίων είναι η μεγάλη ταχύτητα, η αξιοπιστία, το μικρό μέγεθος και το χαμηλό κόστος, είχε ως αποτέλεσμα τη μεγάλη ώθηση των εφαρμογών ψηφιακών υπολογιστών στην έλεγχο των βιομηχανικών διεργασιών. Οι αρχικές εφαρμογές κάλυπταν προβλήματα **καταγραφής δεδομένων** (data logging), ο δε υπολογιστής συνέλεγε και «αποθήκευε» στη μνήμη του διάφορα αποτελέσματα μετρήσεων, τα οποία ο μηχανικός μπορούσε να εμφανίσει σε ειδικά όργανα στο «καντράν» ελέγχου. Έτσι, σε κάθε χρονική στιγμή ο μηχανικός ελέγχου μπορούσε να έχει μια ακριβή εικόνα της λειτουργίας της διεργασίας.

Αργότερα, ο υπολογιστής εξελίχθηκε ώστε να επεξεργάζεται τα δεδομένα που συνέλεγε από τους μετρητές και υποδείκνυε στο χειριστή τις απαραίτητες διορθωτικές επεμβάσεις. Η εξέλιξη του ηλεκτρονικού υπολογιστή ελέγχου προχώρησε μάλιστα σε σημείο, ώστε να ρυθμίζει αυτόματα τις διάφορες επιθυμητές τιμές (σημεία ρυθμίσεως) στους βρόχους ελέγχου και παράλληλα να παρακολουθεί τις παραμέτρους της διεργασίας. Αυτό το σύστημα ελέγχου αναφέρεται ως **εποπτικός έλεγχος με υπολογιστή** (supervisory computer control).

Σήμερα, οι εφαρμογές υπολογιστών στον έλεγχο των βιομηχανικών διεργασιών έχουν φθάσει σε σημείο όπου ο ηλεκτρονικός υπολογιστής χρησιμοποιείται ως ελεγκτής. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται **συστήματα άμεσου ψηφιακού ελέγχου** (Direct Digital Control systems) και αναφέρονται συνοπτικά ως **συστήματα DDC**.

5.4.1 Καταγραφή δεδομένων με υπολογιστή.

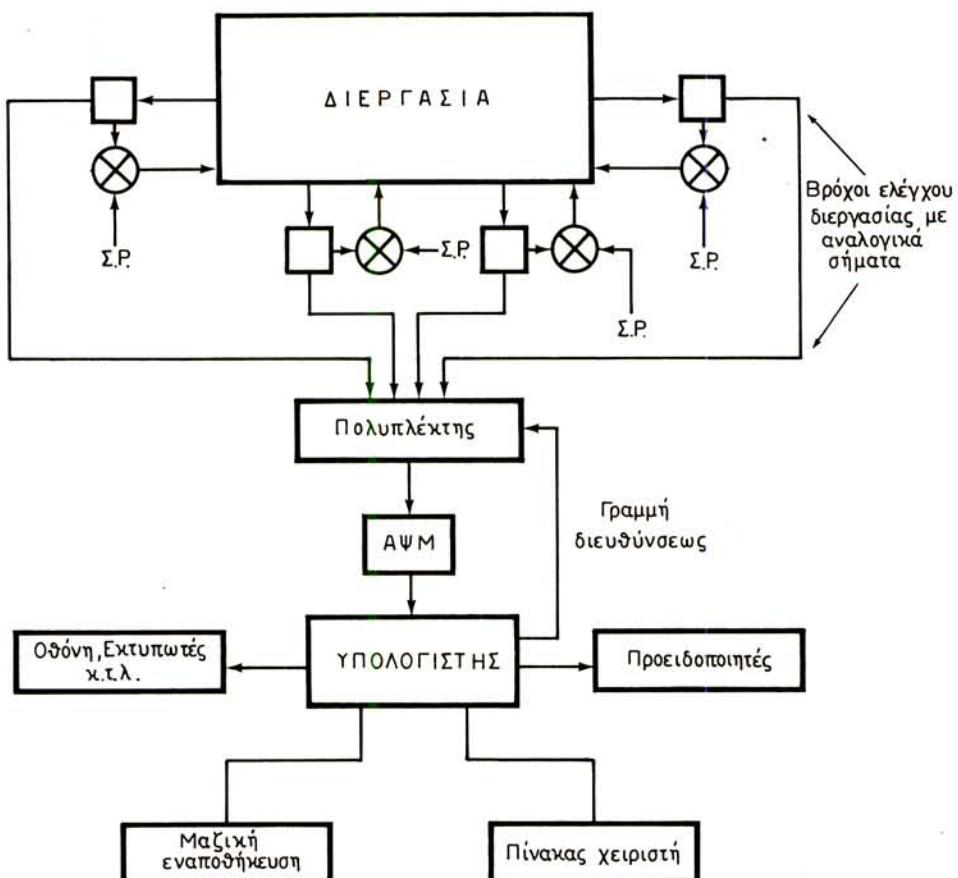
Για να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα της παραγωγής σε ένα εργοστάσιο, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε λεπτομερώς την αλληλεξάρτηση πολλών σημαντικών παραγόντων όπως π.χ. του ρυθμού παραγωγής, του κόστους των πρώτων υλών, των προδιαγραφών των προϊόντων και της αποδοτικότητας του ελέγχου. Την εποχή που δεν υπήρχαν φθηνοί και τελειοποιημένοι ως προς την ταχύτητα ηλεκτρονικοί υπολογιστές, η ανάλυση αυτή γινόταν από τους μηχανικούς παραγωγής μετά από κάθε κύκλο παραγωγής, με αποτέλεσμα οι διάφορες διορθωτικές βελτιώσεις να γίνονται στους μελλοντικούς κύκλους παραγωγής.

Στο σχήμα 5.4α φαίνεται η γενική διάταξη ενός συστήματος που χρησιμοποιεί υπολογιστή για την καταγραφή δεδομένων ελέγχου. Στο παράδειγμα του σχήματος αυτού υπάρχουν τέσσερις βρόχοι ελέγχου, με τέσσερις συγκριτές και αντίστοιχα σημεία ρυθμίσεως (S.P.). Οι τέσσερις ελεγχόμενες μεταβλητές εποπτεύονται συνεχώς από μετρητές, τα σήματα των οποίων εισάγονται σε ένα **πολυπλέκτη** (multiplexer). Ο πολυπλέκτης με εντολές, από τον υπολογιστή μέσω της γραμμής διευθύνσεως (address line) ενεργεί ως «τροχονόμος» και κατευθύνει τα διάφορα σήματα από τους μετρητές προς τον υπολογιστή. Επειδή η μορφή των σημάτων είναι αναλογική, παρεμβάλλεται μεταξύ του πολυπλέκτη και του υπολογιστή ένας **αναλογικός – ψηφιακός μετατροπέας** (A/D), ο οποίος μετατρέπει τα αναλογικά σήματα σε ψηφιακά, για να μπορέσει στη συνέχεια να τα δεχθεί και να τα επεξεργασθεί ο ψηφιακός υπολογιστής.

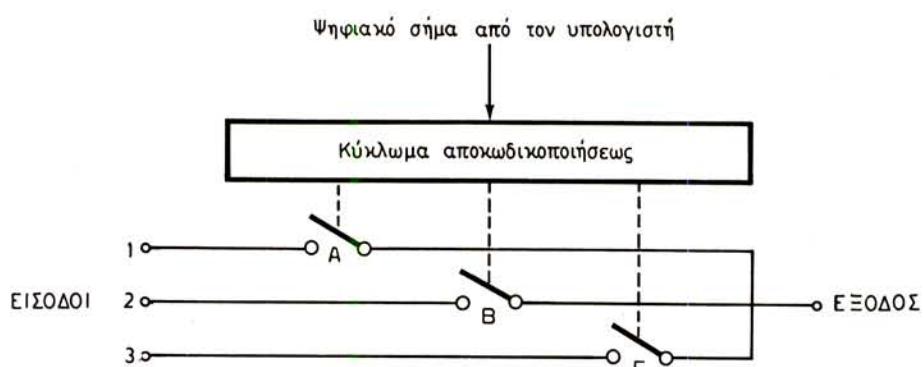
Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφομε τη λειτουργία των βασικών συνιστώσων του συστήματος της διατάξεως του σχήματος 5.4α.

Ο ψηφιακός υπολογιστής εκτελεί διαδοχικά και με μεγάλη ταχύτητα διάφορες εργασίες. Υπάρχουν βέβαια περιπτώσεις, στις οποίες ο υπολογιστής πρέπει να εκτέλεσει ορισμένες εργασίες σχεδόν ταυτόχρονα, πράγμα που σημαίνει ότι πολλοί είσοδοι σημάτων πρέπει να δειγματοληφθούν με κάποια σειρά. Η δειγματοληψία αυτή επιτυγχάνεται από τον **αναλογικό πολυπλέκτη**, ο οποίος αποτελείται από ένα αριθμό διακοπών που δρουν με κατ' ευθείαν εντολή από τον υπολογιστή, μέσω της γραμμής διευθύνσεως.

Στο σχήμα 5.4β φαίνεται η διάταξη ενός απλού πολυπλέκτη με τρεις διακόπτες. Ο υπολογιστής απευθύνεται με ειδικό σήμα εντολής στον κάθε ένα διακόπτη. Αν π.χ. είναι ανάγκη να ληφθεί δείγμα από την είσοδο 2, ο υπολογιστής στέλνει εντολή στον πολυπλέκτη να κλείσει το διακόπτη B. Στη σημερινή τεχνολογία, η ταχύτητα με την οποία ένας σύγχρονος πολυπλέκτης (πού αποτελείται από ολοκληρωμέ-



Σχ. 5.4α.
Γενική διάταξη συστήματος καταγραφής δεδομένων με υπολογιστή.



Σχ. 5.4β.
Αναλογικός πολυπλέκτης με τρεις εισόδους.

να κυκλώματα) μπορεί να πάρνει δείγματα από διάφορες εισόδους, φθάνει στα 5.000 δείγματα το δευτερόλεπτο!

Ο αναλογικός πολυπλέκτης συνδέεται με τον ψηφιακό υπολογιστή μέσω ενός αναλογικού – ψηφιακού μετατροπέα. Ο μετατροπέας αυτός πρέπει να λειτουργεί με μεγάλη ταχύτητα για να μπορεί να παρακολουθεί τη μεγάλη ταχύτητα του πολυπλέκτη.

Μία ομάδα συνιστώσων που είναι σημαντικές στην καταγραφή των δεδομένων από τον υπολογιστή, είναι οι προειδοποιητές. Ο ρόλος τους είναι να παρακολουθούν τις τιμές των εισόδων, όταν δε αυτές υπερβούν τα επιτρεπτά όρια, θέτουν σε λειτουργία διάφορα συστήματα συναγερμού.

Τέλος, υπάρχουν και οι **περιφερειακές μονάδες** (peripheral units), οι οποίες υποστηρίζουν και ολοκληρώνουν την λειτουργία του συστήματος. Σ' αυτές περιλαμβάνονται ο πίνακας του χειριστή, από όπου αυτός επεμβαίνει όταν είναι ανάγκη να δώσει εντολές στον υπολογιστή, και το **σύστημα μαζικής εναποθήκευσεως δεδομένων** (mass storage system). Στον πίνακα του χειριστή υπάρχει συνήθως μια καθοδική οθόνη και μια ταχεία γραφομηχανή. Τα συστήματα αυτά αποτελούν τις περιφερειακές εισόδους και εξόδους του υπολογιστή για το χειριστή.

Το σύστημα μαζικής εναποθήκευσεως δεδομένων περιλαμβάνει μαγνητικές ταινίες και χρησιμεύει για την εναποθήκευση όλων των δεδομένων που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται αργότερα για την ανάλυση της αποδοτικότητας της παραγωγής.

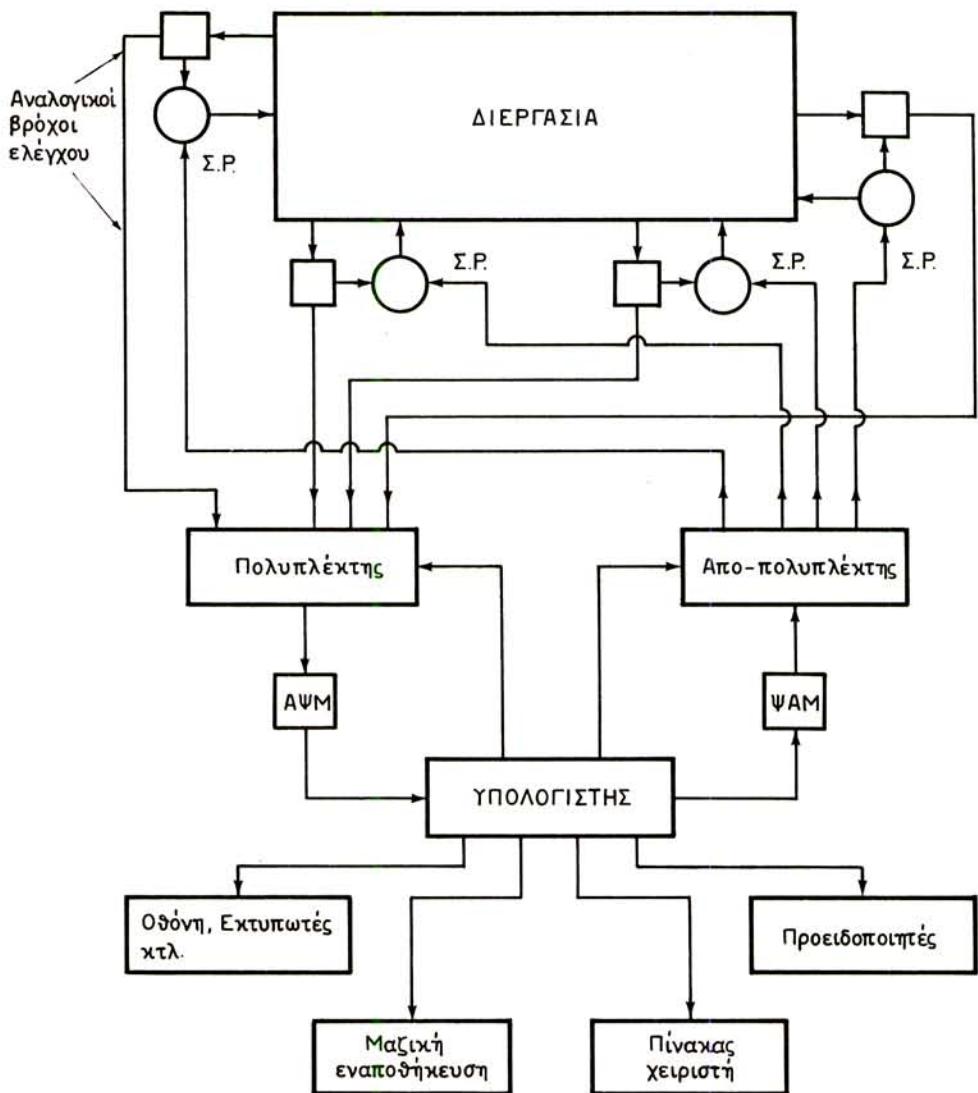
5.4.2 Εποπτικός έλεγχος με υπολογιστή.

Στην περίπτωση της καταγραφής δεδομένων, ο υπολογιστής δεν έχει άμεσα ενεργό ρόλο στον έλεγχο, γιατί συλλέγει τις διάφορες πληροφορίες τις οποίες επεξεργάζεται αργότερα. Οι ενδεικνυόμενες διορθωτικές ενέργειες γίνονται από το χειριστή. Ωστόσο, ο υπολογιστής μπορεί να έχει ενεργό ρόλο στον έλεγχο, να παράγει διορθωτικά σήματα και να έχει τη δυνατότητα ρυθμίσεως των διαφόρων σημείων ρυθμίσεως (Σ.Ρ.). Η διαδικασία αυτή λέγεται **εποπτικός έλεγχος με υπολογιστή** (Computer Supervisory Control).

Διευκρινίζεται ότι όλες οι διορθωτικές επεμβάσεις του υπολογιστή γίνονται από το πρόγραμμα ελέγχου, το οποίο έχει σχεδιασθεί εκ των προτέρων για να αντιμετωπίζει όλες τις πιθανές καταστάσεις. Στο σχήμα 5.4γ φαίνεται η διάταξη εποπτικού ελέγχου με υπολογιστή. Παρατηρούμε ότι έχει προστεθεί ένας **απο-πολυπλέκτης** (de-multiplexer), ο οποίος με εντολές από τον υπολογιστή, μέσω ενός ψηφιακού-αναλογικού μετατροπέα (ΨΑΜ), κανονίζει τα σημεία ρυθμίσεως (Σ.Ρ.) στους βρόχους ελέγχου.

5.4.3 Άμεσος ψηφιακός έλεγχος.

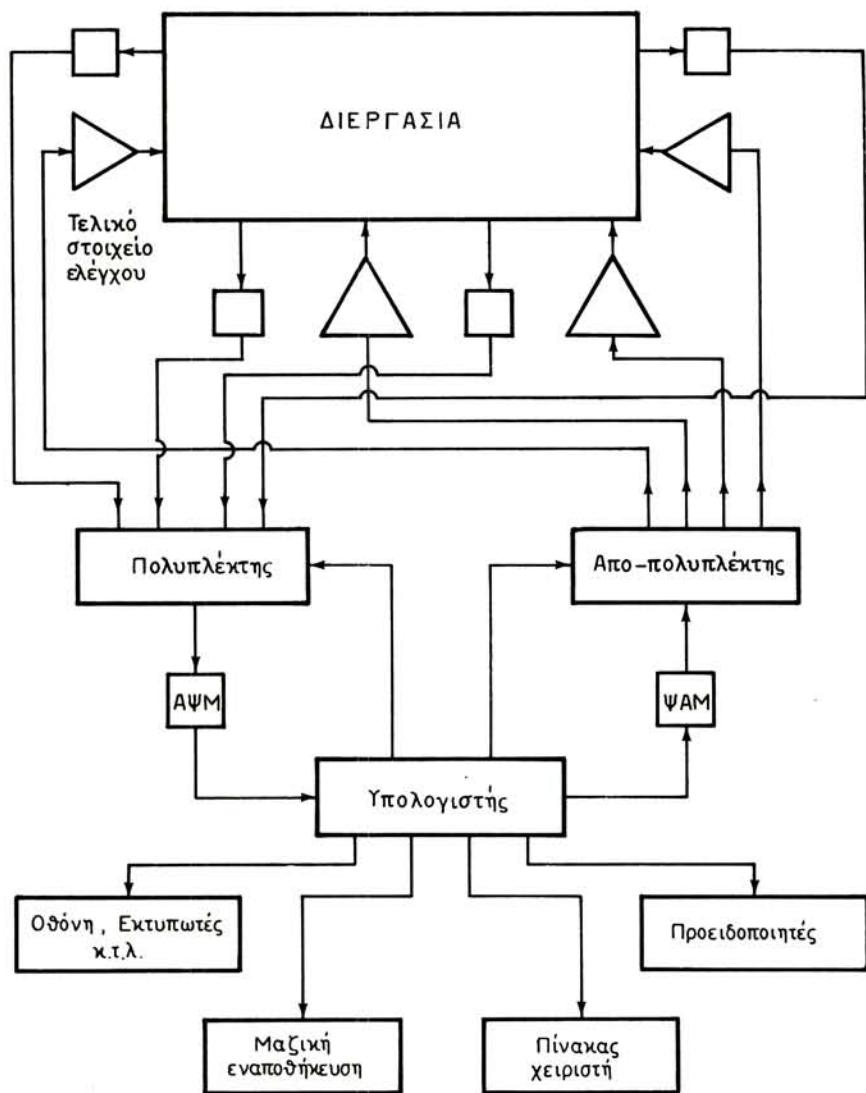
Στην περιγραφή των ηλεκτρονικών ελεγκτών είδαμε ότι, με τη βοήθεια αναλογικών τελεστικών ενισχυτών μπορούν να κατασκευασθούν διατάξεις, που να εκτελούν τις μαθηματικές πράξεις, όπως πρόσθεση, αφαίρεση, ολοκλήρωση και παραγώγιση. Οι πράξεις αυτές μπορούν κάλλιστα να γίνουν και από τον ηλεκτρονικό ψηφιακό υπολογιστή, όταν οι είσοδοι έχουν ψηφιακό χαρακτήρα. Η μετατροπή των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά γίνεται με αναλογικούς – ψηφιακούς μετατροπείς. Η μετατροπή αυτή οδηγεί στην ιδέα της χρησιμοποιήσεως ενός ηλεκτρο-



Σχ. 5.4γ.
Διάταξη εποπτικού ελέγχου με υπολογιστή.

νικού υπολογιστή ως ελεγκτή.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί τον **άμεσο ψηφιακό ελέγχο** (DDC). Οι ψηφιακές είσοδοι, που αντιπροσωπεύουν τις μεταβλητές της διεργασίας, συγκρίνονται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με τις προκαθορισμένες στο πρόγραμμα ελέγχου επιθυμητές τιμές και, με βάση τις λύσεις των εξισώσεων ελέγχου για κάθε περίπτωση, εκπέμπονται διορθωτικά σήματα μέσω του απο-πολυπλέκτη στα τελικά στοιχεία ελέγχου. Στο σχήμα 5.4δ παρουσιάζεται η διάταξη του άμεσου ψηφιακού ελέγχου. Οι αναλογικοί βρόχοι ελέγχου δεν υπάρχουν πια (σε σύγκριση με τη διά-



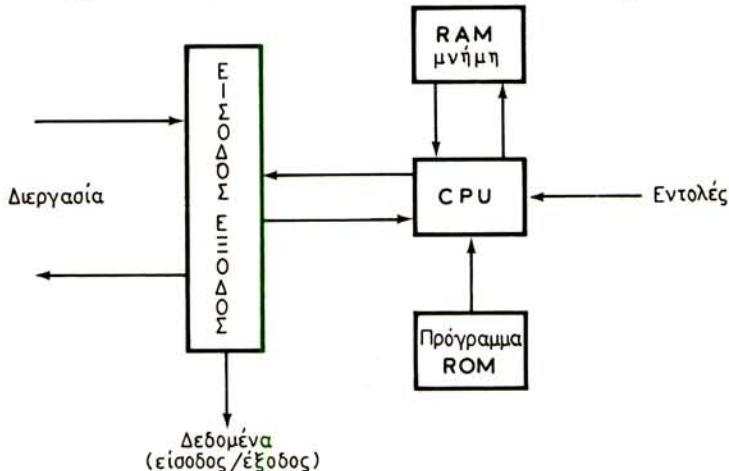
Σχ. 5.46.
Διάταξη άμεσου ψηφιακού ελέγχου (DDC).

ταξη του εποπτικού ελέγχου), τα δε σημεία ρυθμίσεως έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα ελέγχου μέσα στον υπολογιστή, όπου συγκρίνονται με τις μετρούμενες δυναμικές μεταβλητές.

5.4.4 Άμεσος ψηφιακός έλεγχος με μικρο-υπολογιστές.

Η τελευταία λέξη στον ηλεκτρονικό ψηφιακό έλεγχο είναι οι **μικρο-υπολογιστές** (micro-computers), των οποίων κεντρική μονάδα είναι ο **μικρο-επεξεργαστής**

(micro-processor). Οι μικρο-υπολογιστές κατασκευάζονται με τυπωμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα σε ένα πλαίσιο που έχει μέγεθος 20 cm x 20 cm. Η βασική τους συνιστώσα που αποτελείται από ένα μικρο-επεξεργαστή, ονομάζεται **κεντρική μονάδα επεξεργασίας** (Central Processing Unit) ή CPU. Η μονάδα αυτή συνδέεται με δύο άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα, το ROM και το RAM δύπως φαίνεται στο σχήμα 5.4ε. Τα δύο αυτά εξαρτήματα αποτελούν τις μνήμες του μικρο-υπολογιστή. Η μνήμη ROM (Read Only Memory) περιέχει το πρόγραμμα, με βάση το οποίο λειτουργεί ο μικρο-υπολογιστής. Η μνήμη RAM (Random Access Memory) χρησιμοποιείται για να «αποθηκεύονται» τα στοιχεία και δεδομένα που εισέρχονται στον μικρο-υπολογιστή, τα αποτελέσματα υπολογισμών και τα στοιχεία, πριν διοχετευθούν προς την έξοδο του μικρο-υπολογιστή. Τα στοιχεία ΕΙΣΟΔΟΥ-ΕΞΟΔΟΥ αποτελούνται από διάφορα «λογικά» κυκλώματα τα οποία συνδέουν τη CPU με οθόνες, εκτυπωτές και άλλες συσκευές εισόδου - έξόδου.



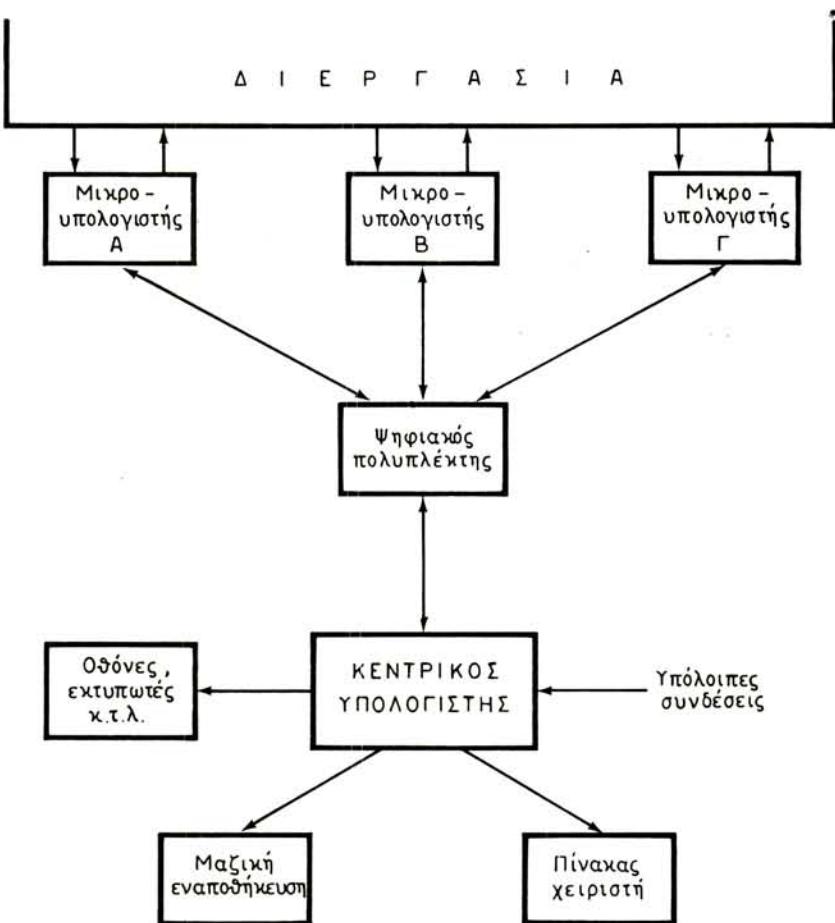
Σχ. 5.4ε.
Διάταξη μικρο-υπολογιστή.

Στο σχήμα 5.4στ φαίνεται η διάταξη του άμεσου-ψηφιακού ελέγχου με μικρο-υπολογιστές. Σε σύγκριση με τη διάταξη του σχήματος 5.4δ, παρατηρούμε ότι οι μικρο-υπολογιστές έχουν αντικαταστήσει τα τελικά στοιχεία ελέγχου σε κάθε βρόχο ελέγχου. Οι μικρο-υπολογιστές συνδέονται με ένα κεντρικό υπολογιστή, ο οποίος εποπτεύει και συντονίζει τη λειτουργία του όλου συστήματος. Κάθε μικρο-υπολογιστής αποτελεί ανεξάρτητη μονάδα ελέγχου, που μπορεί να εργάζεται και αυτοτελώς, όταν π.χ. η κεντρική μονάδα παύσει να λειτουργεί. Μεγάλο πλεονέκτημα του σχηματισμού αυτού είναι η δυνατότητα της άμεσης αντικαταστάσεως του μικρο-υπολογιστή όταν παρουσιασθεί πρόβλημα στη λειτουργία του.

5.5 Ασκήσεις.

- Σχεδίασε ένα ηλεκτρονικό ελεγκτή «ON-OFF» με βάση το σχήμα 5.1στ. Η τάση σφάλματος στην είσοδο U_g κυμαίνεται μεταξύ 0 – 5 Volt και η έξοδος παίρνει τιμές 0 ή 10 Volt. Η τάση κυκλώματος $U_K = 4$ Volt και η τάση διακοπής $U_D = 1$ Volt. Ποιές τιμές πρέπει να δώσουμε στις αντιστάσεις R_1 , R_2 και R ;

(Απάντηση: $R_1 = 8 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 26,66 \text{ K}\Omega$, $R = 10 \text{ K}\Omega$)

**Σχ. 5.4στ.**

'Αμεσος ψηφιακός έλεγχος με μικρο-υπολογιστές.

2. Σχεδίασε ένα αναλογικό ελεγκτή με βάση τη διάταξη του σχήματος 5.1η. Η κλίμακα της τάσεως U_0 είναι $0 - 10$ Volt. Av $R_2 = 10$ KΩ και η μέγιστη τιμή του σφάλματος μπορεί να φθάσει τα 10 Volt, να βρεθούν οι τιμές της τάσεως $U(0)$ και της αντιστάσεως R_1 , ώστε το σύστημα να λειτουργήσει με 20% ζώνη αναλογίας γύρω από ένα $\Sigma(0) = 50\%$.
(Απάντηση: $U(0) = 5$ V, $R_1 = 2$ KΩ)
3. Σχεδίασε ένα ελεγκτή αναλογικό + επανατάξεως με βάση το σχήμα 5.1α. Η ζώνη αναλογίας είναι 30% και η σταθερά ολοκληρώσεως 10 sec. Το σήμα σφάλματος κυμαίνεται μεταξύ $0 - 2$ Volt και η τάση εξόδου μεταξύ $0 - 10$ Volt. Υπολόγισε τις τιμές R_1 , R_2 και C .
(Απάντηση: $R_1 = 6$ KΩ, $R_2 = 100$ KΩ, $C = 100 \mu F$)
4. Σχεδίασε ένα ελεγκτή αναλογικό + ρυθμού με βάση το σχήμα 5.1β. Η ζώνη αναλογίας είναι 20% και η σταθερά ρυθμού (R_3C) = 18 sec. Οι τάσεις εισόδου και εξόδου κυμαίνονται μεταξύ $0 - 10$ Volt και η ταχύτερη χρονική μεταβολή στη διεργασία είναι 1 sec. Υπολόγισε τις σταθερές R_3 , R_1 , R_2 και ρ_a .
(Απάντηση: $R_3 = 0,36$ MΩ, $R_1 = 318$ Ω, $R_2 = 1,8$ MΩ, $\rho_a = 5$)



1954

Αγγλική Ορολογία

Acceleration starter: εκκινητής επιταχύνσεως
 : definite time - καθορισμένου χρόνου
 : current limit - με περιορισμό ρεύματος.

Accelerometer: επιταχυνσιόμετρο

Actuator (direct - reverse): επενεργητής (ορθής φοράς - ανάστροφης φοράς)

Actuating signal: ενεργοποιό σήμα

Address line: γραμμή διεύθυνσεως

Amplifier (operational): ενισχυτής (τελεστικός)

Analogue: ανάλογο

Analog computer: αναλογικός υπολογιστής

Analog - to - digital converter: αναλογικός - ψηφιακός μετατροπέας

Anticipatory control: προληπτικός έλεγχος

Armature voltage: τάση επαγγικού τυμπάνου

ASKANIA regulator: ρυθμιστής ΑΣΚΑΝΙΑ

Attenuation: εξασθένιση

Back emf: αντηλεκτρεγερτική δύναμη

Bellows: φυσούνα

Bimetallic strip: διμεταλλικό έλασμα

Bourdon tube: σωλήνας μπουρντόν

Central processing unit (CPU): κεντρική μονάδα επεξεργασίας

Closed loop: κλειστός βρόχος

Command value: τιμή εντολής

Comparator: συγκρίτης

Computer control: έλεγχος με υπολογιστή

Computer supervisory control: εποπτικός έλεγχος με υπολογιστή

Contactor: επαφέας

Control: έλεγχος - continuous - συνεχής έλεγχος

 : discontinuous - διακεκομένος έλεγχος

 : element - στοιχείο έλεγχου

 : lag - υστέρηση έλεγχου

 : numerical - αριθμητικός έλεγχος

 : parameter range - πεδίο παραμέτρου έλεγχου

 : room - αίθουσα έλεγχου

 : valve - βαλβίδα έλεγχου

Controlled variable: ελεγχόμενη μεταβλητή

Controller: ελεγκτής

Controlling parameter: ελέγχουσα παράμετρος

Cyclic response: κυκλική (ταλαντωτική) απόκριση

Cycling (minimum): κυκλικότητα (ελάχιστη)

Damped response: αποσβησμένη απόκριση

Dashpot relay: ηλεκτρονόμος αποσβέσεως

Data logging: καταγραφή δεδομένων

Dead time: νεκρός χρόνος

Decibel: σχετική μονάδα μεγέθους της αρμονικής απόκρισεως

De-multiplexer: αποπολυπλέκτης

Derivative constant: σταθερά παραγώγου

Derivative control: παράγωγος έλεγχος (ρυθμού)

Desider value: επιθυμητή τιμή

Detector: μετρητής (αισθητήρας)

Deviation: απόκλιση

Differential amplifier: διαφορικός ενισχυτής

Differential control: διαφορικός έλεγχος (ρυθμού)

Differentiator: διαφοριστής

Digital to analog converter: ψηφιακός - αναλογικός μετατροπέας

Direct action: δράση ορθής φοράς.

Direct digital control systems (DDC): συστήματα άμεσου ψηφιακού ελέγχου

Directly controlled variable: άμεσα ελεγχόμενη μεταβλητή

Discontinuous control: διακεκομένος έλεγχος

Disturbance torque: ροπή διαταραχής

Dynamic response: δυναμική απόκριση

Emf: ηλεκτρεγερτική δύναμη

Error area: εμβαδό σφάλματος

Error detector: μετρητής σφάλματος

Error modulated signal: διαμορφωμένο σήμα σφάλματος

Error signal: σήμα σφάλματος

Error voltage: τάση σφάλματος

Feedback: ανατροφοδότηση (ανάδραση)

Feedback control systems: συστήματα ελέγχου με ανατροφοδότηση

Floating control: «πλωτός» έλεγχος

Flyball Governor: ρυθμιστής με τις σφαίρες

Follower (voltage): ακόλουθος (τάσεως)

Frequency response: αρμονική απόκριση

Gain (voltage open-loop): απολαβή (τάσεως ανοικτού βρόχου)
Gain margin: περιθώριο μεγέθους

I to P converter: μετατροπέας ρεύματος σε πίεση

Impulse response: κρουστική απόκριση

Input: είσοδος (συστήματος)

Instability: αστάθεια (συστήματος)

Integral control: ολοκληρωτικός έλεγχος (επανατάξεως)

Integration constant: ασταθερά ολοκληρώσεως

Inverter: αναστροφέας

Inverting input: αναστροφική είσοδος

Light source: πηγή φωτός

Load: φορτίο

Magnitude graph: παράσταση μεγέθους

Magnitude ratio: πολλό μεγέθους

Mass storage system: σύστημα μαζικής εναποθήκευσης

Mercury switch: διακόπτης υδραργύρου

Micro-computer: μικροϋπολογιστής

Micro-processor: μικροεπεξεργαστής

Multiplexer: πολυπλέκτης

Multistep control: πολυβαθμιδικός έλεγχος

Negative feedback: αρνητική ανατροφοδότηση

Neutral zone: ουδέτερη ζώνη

Nominal load: ονομαστικό φορτίο

Non-inverting input: μη αναστροφική είσοδος

Numerical control: αριθμητικός έλεγχος

Offset error: σφάλμα αντισταθμίσεως

On-off control: έλεγχος «ON-OFF»

Open - loop: ανοικτός βρόχος

Operational amplifier: τελεστικός ενισχυτής

Optimization: αριστοποίηση

Optimum control: άριστος έλεγχος

Output: έξοδος (συστήματος)

Overload relay: ηλεκτρονόμος υπερφορτώσεως

Overshoot: υπερύψωση

Part programmer: προγραμματιστής εξαρτημάτων

Peak error: μέγιστο σφάλμα

Period (ultimate): περίοδος (τελική)

Peripheral unit: περιφερειακή μονάδα

Phase graph: παράσταση φάσεως

Phase lag: υστέρηση φάσεως

Phase lead: προπορεία φάσεως

Phase margin: περιθώριο φάσεως

Photodetector: φωτοαισθητήρας (φωτομετρήτης)

Photon: φωτόνιο

Piezoelectric: πιεζοηλεκτρικός

Pneumatic actuator: πνευματικός επενεργητής

Potentiometer: ποτενσιόμετρο

Process: διεργασία

Process lag: υστέρηση διεργασίας

Process load: φορτίο διεργασίας

Proportional band: ζώνη αναλογίας

Proportional control: αναλογικός έλεγχος

Proportionality constant: σταθερά αναλογίας

RAM (Random Access Memory): μνήμη τυχαίας προσπλάσεως

Range (variable): πεδίο (μεταβλητής)

Rate control: έλεγχος ρυθμού

Reference signal: σήμα αναφοράς

Relay: ηλεκτρονόμος

: dashpot - ηλεκτρονόμος αποσβέσεως
 : fast reacting - ηλεκτρονόμος ταχείας αντιδράσεως

: field loss - ηλεκτρονόμος απώλειας πεδίου

: overload - ηλεκτρονόμος υπερφορτώσεως

: time delay - ηλεκτρονόμος με χρονική καθυστέρηση

Reset control: έλεγχος επανατάξεως

Residual error: υπολειμματικό σφάλμα

Reverse action: αντίστροφη δράση

Rise time: χρόνος ανυψώσεως

ROM (Read Only Memory): μνήμη για μόνο ανάγνωση

Seebeck effect: φαινόμενο «σύμπεκ»

Seismic mass: σεισμική μάζα

Servomechanism: σερβομηχανισμός

Servomotor: σερβοκινητήρας

Set point: σημείο ρυθμίσεως

Settling time: χρόνος αποκαταστάσεως

Stability: ευστάθεια

Strain gage: επιμηκυνσιόμετρο

Summing point: σημείο αθροίσεως

Supervisory computer control: εποπτικός έλεγχος με υπολογιστή

Synchro: σύγχρονο (σύστημα)

: control transformer - σύχρονομετασχηματιστής έλεγχου

: differential - συγχρονοδιαφορικό

: generator - συγχρονογεννήτρια

: motor - συγχρονοκινητήρας

System error: σφάλμα συστήματος

System input: είσοδος συστήματος

System output: έξοδος συστήματος

Tachometer: ταχύμετρο

Test mass: μάζα δοκιμής



Thermocouple: Θερμοστοιχείο

Transducer: μεταλλάκτης

Two- step control: έλεγχος δύο βαθμίδων

Ultimate period: τελική περίοδος (συστήματος)

Undervoltage: υπόταση

Variable: μεταβλητή

Valve (control): βαλβίδα (ελέγχου)

Voltage follower: ακόλουθος τάσεως





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Εισαγωγή στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου

1.1 Γενικά	1
1.2 Η έννοια της ανατροφοδοτήσεως	1
1.3 Κατηγορίες αυτομάτων μηχανών	2
1.4 Σύντομη ιστορική αναδρομή	4
1.5 Γενική περιγραφή συστημάτων αυτομάτου ελέγχου	10
1.6 Παραδείγματα συστημάτων ελέγχου	13
1.7 Ασκήσεις	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

Βασικά εξαρτήματα συστημάτων ελέγχου

2.1 Ηλεκτρικά και ηλεκτρολογικά εξαρτήματα	18
2.1.1 Ποτενσιόμετρα ως μετρητές τάσεως	18
2.1.2 Ποτενσιόμετρα ως μετρητές σφάλματος (συγκριτές)	20
2.1.3 Μεταλλάκτες	22
2.1.4 Συγχρονοσυστήματα	28
2.1.5 Σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος	33
2.1.6 Σερβοκινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος	36
2.1.7 Ταχύμετρα	37
2.1.8 Ηλεκτρονόμοι υπερφορτώσεως	39
2.2 Ηλεκτρονικά	
2.2.1 Χαρακτηριστικά τελεστικού ενισχυτή	41
2.2.2 Μη αναστροφικός ενισχυτής	44
2.2.3 Διαφορικός ενισχυτής	45
2.2.4 Κύκλωμα μετατροπής τάσεως σε ρεύμα	46
2.2.5 Κύκλωμα μετατροπής ρεύματος σε τάση	47
2.2.6 Κύκλωμα ολοκληρώσεως	48
2.2.7 Άλλα ειδικά κυκλώματα	49
2.3 Πνευματικά εξαρτήματα ελέγχου	49
2.3.1 Μετατροπέας ρεύματος σε πίεση	49
2.3.2 Πνευματικός επενεργητής	50
2.4 Μηχανικά εξαρτήματα ελέγχου	52
2.4.1 Μεταλλάκτης μετατοπίσεως	52
2.4.2 Μετρητής καταπονήσεων ή επιμηκυνσιόμετρα	54
2.4.3 Μετρητής επιταχύνσεως ή επιταχυνσιόμετρα	55

2.4.4 Μεταλλάκτης πιέσεως	59
2.4.5 Μεταλλάκτης ροής	60
2.4.6 Υδραυλικός σερβοκινητήρας	61
2.4.7 Οδοντωτοί τροχοί (γρανάζια)	62
2.5 Ασκήσεις	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

Περιγραφή βασικών συστημάτων ρυθμίσεως και ελέγχου

3.1 Συστήματα αυτομάτου ελέγχου θέσεως	79
3.2 Συστήματα αυτομάτου ελέγχου ταχύτητας	82
3.3 Συστήματα αυτομάτου ελέγχου στάθμης υγρού	84
3.4 Συστήματα αυτομάτου ελέγχου ροής υγρών	86
3.5 Συστήματα αυτομάτου ελέγχου θερμοκρασίας	89
3.6 Αυτοματισμοί για την εκκίνηση, τον έλεγχο λειτουργίας και την προστασία κινητήρων	92
3.6.1 Αυτοματισμοί εκκινήσεως κινητήρων ΣΡ	92
3.6.2 Αυτοματισμοί εκκινήσεως κινητήρων ΕΡ	99
3.7 Συστήματα ελέγχου εναλλασσόμενης τάσεως	103
3.8 Άσκήσεις	107

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

Αρχές ελέγχου βιομηχανικών διεργασιών

4.1 Ορισμοί στοιχείων βιομηχανικού ελέγχου	111
4.2 Αξιολόγηση ΣΑΕ	114
4.2.1 Κριτήρια αξιολογήσεως των ΣΑΕ	114
4.2.2 Κριτήρια αξιολογήσεως της δυναμικής αποκρίσεως συστημάτων	117
4.3 Ορισμοί διεργασίας	119
4.4 Παράμετροι ελέγχου	121
4.4.1 Σφάλμα	121
4.4.2 Πεδίο μεταβλητής	123
4.4.3 Πεδίο παραμέτρου ελέγχου	123
4.4.4 Υστέρηση ελέγχου	124
4.4.5 Νεκρός χρόνος	124
4.5 Αρμονική απόκριση	125
4.5.1 Γραφικές παραστάσεις	125
4.5.2 Χρησιμότητα αρμονικής αποκρίσεως	129
4.5.3 Ευστάθεια συστήματος	131
4.6 Μέθοδοι ελέγχου	133
4.6.1 Έλεγχος δύο βαθμίδων (ON-OFF)	134
4.6.2 «Πολυυβαθμιδικός» έλεγχος	135
4.6.3 «Πλωτός» έλεγχος	137
4.6.4 Βασικές μέθοδοι συνεχούς ελέγχου	138
4.7 Άσκήσεις	150

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

Ελεγκτές

5.1 Ηλεκτρονικοί ελεγκτές	154
5.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά	154
5.1.2 Ηλεκτρονικό σήμα σφάλματος	155
5.1.3 Ελεγκτές ON-OFF	157
5.1.4 Σύνθετοι ελεγκτές	160

5.2 Ηλεκτρικοί ελεγκτές	166
5.2.1 Ηλεκτρικοί ελεγκτές ON-OFF	167
5.2.2 Ηλεκτρικοί αναλογικοί ελεγκτές	167
5.2.3 Σύνθετοι ηλεκτρικοί ελεγκτές	169
5.3 Πνευματικοί και υδραυλικοί ελεγκτές	170
5.3.1 Πνευματικοί ελεγκτές «ON - OFF»	170
5.3.2 Πνευματικός αναλογικός ελεγκτής	171
5.3.3 Σύνθετοι πνευματικοί ελεγκτές	173
5.3.4 Πνευματικός ελεγκτής τριών δράσεων	174
5.3.5 Υδραυλικοί ελεγκτές	175
5.4 Ηλεκτρονικοί ψηφιακοί ελεγκτές	176
5.4.1 Καταγραφή δεδομένων με υπολογιστή	177
5.4.2 Εποπτικός έλεγχος με υπολογιστή	179
5.4.3 Άμεσος ψηφιακός έλεγχος	179
5.4.4 Άμεσος ψηφιακός έλεγχος με μικρο - υπολογιστές	181
5.5 Ασκήσεις	182
Αγγλική ορολογία	185

COPYRIGHT ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

