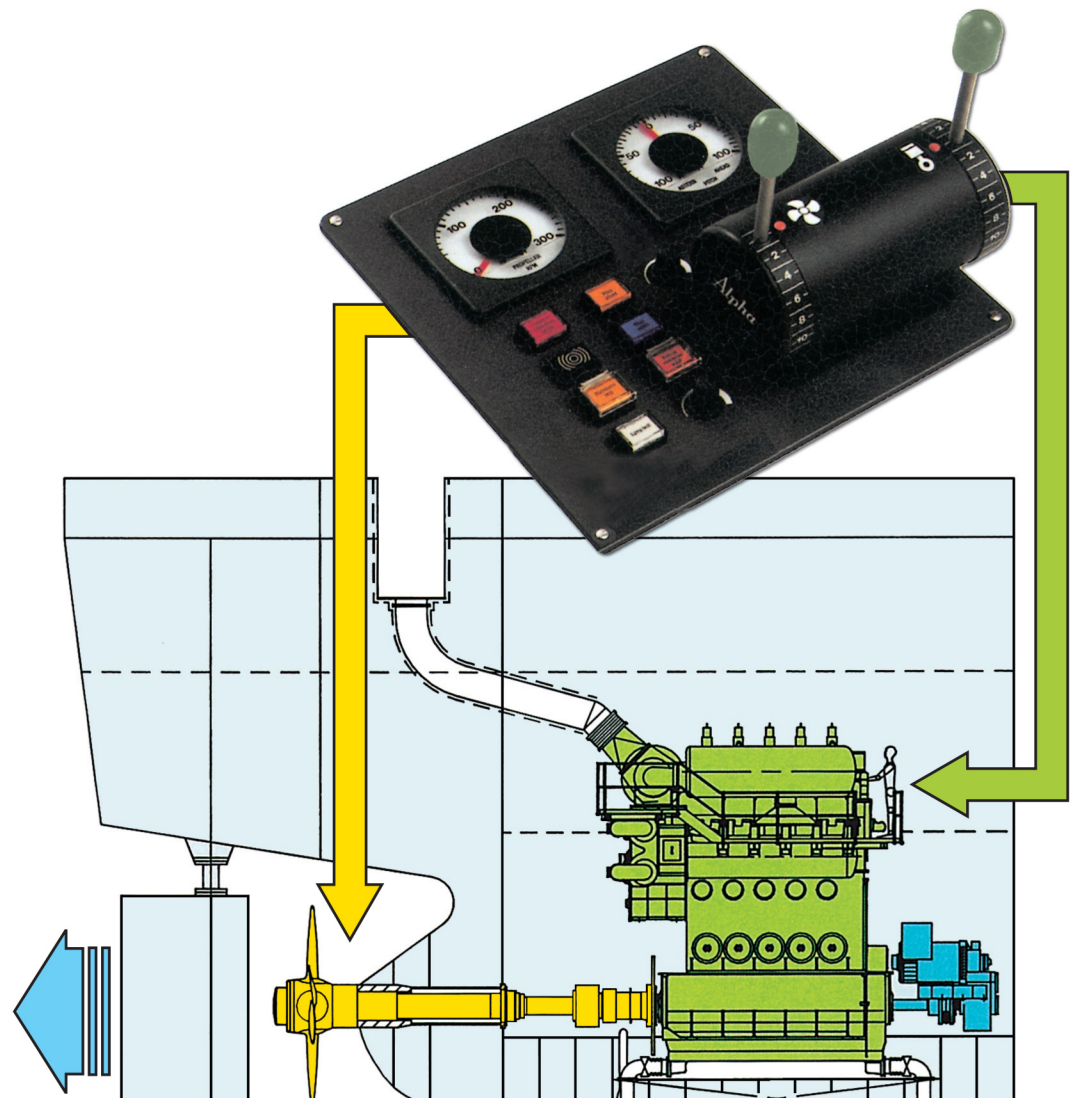




ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ
ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

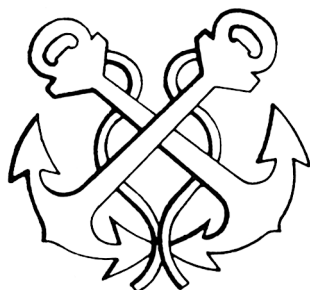
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ
ΑΚΑΔΗΜΙΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟ ΕΛΕΓΧΟ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΠΛΟΙΩΝ



Ι. Γ. Βλαχογιάννη
Δ. Α. Παπαχρήστου
Γ. Ε. Χαμηλοθώρη

ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ



ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ
ΑΚΑΔΗΜΙΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ



Α΄ ΕΚΔΟΣΗ 2002

Β΄ ΕΚΔΟΣΗ 2009

ISBN: 960-337-048-7

Copyright © 2009

Απαγορεύεται η ολική ή μερική ανατύπωση του βιβλίου και των εικόνων με κάθε μέσο καθώς και η διασκευή, η προσαρμογή, η μετατροπή και η κυκλοφορία του. (Άρθρο 3 του ν. 2121/1993).

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Ο Ευγένιος Ευγενίδης, ιδρυτής και χορηγός του «Ιδρύματος Ευγενίδου», προείδε ενωρίτερα και σχημάτισε τη βαθιά πεποίθηση ότι αναγκαίο παράγοντα για την πρόοδο του έθνους αποτελεί η άρτια κατάρτιση των τεχνικών μας σε συνδυασμό προς την ηθική τους αγωγή.

Την πεποίθησή του αυτή την μετέτρεψε σε γενναία πράξη ευεργεσίας, όταν κληροδότησε σεβαστό ποσό για τη σύσταση Ιδρύματος, που θα είχε ως σκοπό να συμβάλλει στην τεχνική εκπαίδευση των νέων της Ελλάδας.

Έτσι, τον Φεβρουάριο του 1956 συνεστήθη το «Ίδρυμα Ευγενίδου», του οποίου την διοίκηση ανέλαβε η αδελφή του Μαρ. Σίμου, σύμφωνα με την επιθυμία του διαθέτη. Από τη στιγμή εκείνη άρχισαν πραγματοποιούμενοι οι σκοποί που οραματίστηκε ο Ευγένιος Ευγενίδης και συγχρόνως η εκπλήρωση μιας από τις βασικότερες ανάγκες του εθνικού μας βίου. Το έργο του Ιδρύματος συνέχισε από το 1981 μέχρι το 2000 ο Νικόλαος Βερονίκος-Ευγενίδης· έκτοτε συνεχίζει αυτό ο κ. Λεωνίδας Δημητριάδης-Ευγενίδης.

Κατά την κλιμάκωση των σκοπών του, το Ίδρυμα προέταξε την έκδοση τεχνικών βιβλίων, τόσο για λόγους θεωρητικούς όσο και πρακτικούς. Διεπιστώθη πράγματι ότι αποτελεί πρωταρχική ανάγκη ο εφοδιασμός των μαθητών με σειρές από βιβλία, τα οποία θα έθεται ορθά θεμέλια στην παιδεία τους και θα αποτελούσαν συγχρόνως πολύτιμη βιβλιοθήκη για κάθε τεχνικό.

Ειδικότερα, όσον αφορά στα εκπαιδευτικά βιβλία των σπουδαστών των Δημοσίων Σχολών Εμπορικού Ναυτικού, το Ίδρυμα ανέλαβε τότε την έκδοσή τους σε πλήρη και στενή συνεργασία με τη Διεύθυνση Ναυτικής Εκπαιδύσεως του Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας, υπό την εποπτεία του οποίου υπάγονται οι Σχολές αυτές. Η ανάθεση στο Ίδρυμα έγινε με την υπ' αριθμ. 61288/5031, της 9ης Αυγούστου 1966, απόφαση του Υπουργείου Εμπορικής Ναυτιλίας, οπότε και συνεκροτήθη και η αρμόδια Επιτροπή Εκδόσεων.

Αποτέλεσμα της συνεργασίας αυτής ήταν η έκδοση της Σειράς Βιβλιοθήκη του Ναυτικού, όπου εξεδόθησαν: α) Για τους μαθητές των Μέσων Ναυτικών Σχολών 30 τόμοι βιβλίων (1967 – 1979). β) Για τις ΑΔΣΕΝ (Ανώτερες Δημόσιες Σχολές Εμπορικού Ναυτικού) 54 τόμοι (1981 – 2001).

Κύριος σκοπός των εκδόσεων αυτών, των οποίων το περιεχόμενο είναι σύμφωνα με τα εκάστοτε ισχύοντα αναλυτικά προγράμματα του ΥΕΝ, ήταν η παροχή προς τους σπουδαστές των Ναυτικών Σχολών ΑΔΣΕΝ και Ναυτικών Λυκείων των αναγκαίων τότε εκπαιδευτικών κειμένων, τα οποία αντιστοιχούν προς τα μαθήματα που διδάσκονται στις Σχολές αυτές.

Επίσης ελήφθη ιδιαίτερη πρόνοια, ώστε τα βιβλία αυτά να είναι γενικότερα χρήσιμα για όλους τους αξιωματικούς του Εμπορικού Ναυτικού, που ασκούν το επάγγελμα ή εξελίσσονται στην ιεραρχία του κλάδου τους, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι επέρχεται μεταβολή στη στάθμη του περιεχομένου τους.

Με την υπ' αριθμ. Μ2111.1/2/99/28-05-1999 (ΦΕΚ 1168Β/14-6-99) υπουργική απόφαση, όπως τροποποιήθηκε με την Κ.Υ.Α. των υπουργών Οικονομίας και Οικονομικών και Εμπορικής Ναυτιλίας αριθμ. Μ3611.2/05/05/16-12-2005 (ΦΕΚ 1942Β/30-12-2005 και ΦΕΚ

169 Β/13-02-2006), το Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας ανέθεσε στο Ίδρυμα Ευγενίδου την συγγραφή και έκδοση των διδακτικών εγχειριδίων των Ναυτικών Ακαδημιών· ήδη το ΥΕΝΑΝΠ προέκρινε την συγγραφή 21 βιβλίων προς κάλυψη των αναγκών των σπουδαστών βάσει των ισχυόντων αναλυτικών προγραμμάτων.

Οι συγγραφείς και η Επιτροπή Εκδόσεων του Ιδρύματος εξακολουθούν να καταβάλλουν κάθε προσπάθεια, ώστε τα βιβλία να είναι επιστημονικώς άρτια αλλά και προσαρμοσμένα στις ανάγκες και τις δυνατότητες των σπουδαστών. Γι' αυτό έχουν προσεγγίσει γλωσσική διατύπωση των κειμένων τους και η διαπραγμάτευση των θεμάτων είναι ανάλογη προς τη στάθμη της εκπαίδευσής, για την οποία προορίζονται.

Με την προσφορά στους καθηγητές, στους σπουδαστές των ΑΕΝ και σε όλους τους αξιωματικούς του Εμπορικού Ναυτικού των εκδόσεών του, το Ίδρυμα συμβάλλει στην πραγματοποίηση του σκοπού του ιδρυτή του Ευγενίου Ευγενίδου.

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Εμμανουήλ Δρης, καθηγητής ΕΜΠ, Πρόεδρος.

Ιωάννης Τεγόπουλος, ομ. καθηγητής ΕΜΠ.

Ιωάννης Τζαβάρας, αντιναύαρχος Λ.Σ. (Ε.Α.)

Παναγιώτης Πετρόπουλος, πλοίαρχος Λ.Σ., Διευθ. Ναυτ. Εκπ. Υ.Ε.Ν.Α.Ν.Π.

Σύμβουλος επί των εκδόσεων του Ιδρύματος **Κων. Αγγ. Μανάφης**, ομότιμος καθηγ. Φιλοσοφικής Σχολής Πανεπιστημίου Αθηνών.

Γραμματέας της Επιτροπής, **Γεώργιος Ανδρεάκος**.

Ειδικός Επιστημονικός Σύμβουλος για το βιβλίο «Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο – Αυτοματισμοί Πλοίων» **Σπύρος Τζαφέστας**, καθηγητής Ε.Μ.Π.

Διατελέσαντα μέλη της Επιτροπής

Γ. Κακριδής (1955-1959) Καθηγητής ΕΜΠ, *Α. Καλογεράς* (1957-1970) Καθηγητής ΕΜΠ, *Α. Παππάς* (1955-1983) καθηγητής ΕΜΠ, *Χ. Καβουνίδης* (1955-1984) Μηχ. Ηλ. ΕΜΠ, *Μ. Αγγελόπουλος* (1970-2003) ομ. καθηγητής ΕΜΠ, *Σπ. Γουλιέλμος* (1958) Αντ/ρχος, *Ξ. Αντωνιάδης* (1959-1966) Αντ/ρχος, Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Γ. Τσακίρης* (1967-1969) Πλοίαρχος, Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ελλ. Σίδερης* (1967-1969) Υποναύαρχος, *Π. Φουστέρης* (1969-1971) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Αλ. Μοσχονάς* (1971-1972) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Χρυσανθακόπουλος* (1972-1974) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Αθαν. Σωτηρόπουλος* (1974-1977) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Σπαρτιώτης* (1977) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., προσωρινός Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Θ. Πουλάκης* (1977-1979) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Ανκούδης* (1979-1981) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Αναστ. Δημαράκης* (1981-1982) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Τσαντήλας* (1982-1984) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Α. Σταυρόπουλος* (1983-2008) ομ. καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς, *Ε. Τζαβέλας* (1984-1986) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Γρηγοράκος* (1986-1988) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Α. Μπαρκατσάς* (1988-1989) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Παπαναστασίου* (1989) Αρχιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Λάμπρου* (1989-1992) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Κοκορέτσας* (1992-1993) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Μαρκάκης* (1993-1994) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Ζουμπούλης* (1994-1995) Πλοίαρχος Λ.Σ., *Φ. Ψαρράς* (1995-1996) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Γ. Καλαρόνης* (1996-1998) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Θ. Ρεντζεπέρης* (1998-2000) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ι. Στεφανάκης* (2000-2001) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Μαρίνος* (2001) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Εξαρχόπουλος* (2001-2003) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Κ. Μπριλάκης* (2003-2004) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Ν. Θεμέλαρος* (2003-2004) Αντιπλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Π. Κουβέλης* (2004-2005) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ., *Δ. Βασιλάκης* (2005-2008) Πλοίαρχος Λ.Σ., Δ/ντής Ναυτ. Εκπαιδ.

Ι Δ Ρ Υ Μ Α Ε Υ Γ Ε Ν Ι Δ Ο Υ
Β Ι Β Λ Ι Ο Θ Η Κ Η Τ Ο Υ Ν Α Υ Τ Ι Κ Ο Υ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟ ΕΛΕΓΧΟ
ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΠΛΟΙΩΝ

ΒΛΑΧΟΓΙΑΝΝΗ Γ. ΙΩΑΝΝΗ

Ηλεκτρολόγου Μηχανικού
Επίκ. Καθηγήτη Τμ. Πληροφορικής
και Τεχνολογίας Υπολογιστών ΤΕΙ Λαμίας

ΠΑΠΑΧΡΗΣΤΟΥ Α. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Πτυχιούχου Μηχανικού Αυτοματισμού Τ.Ε.

ΧΑΜΗΛΟΘΩΡΗ Ε. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Δρ. Μηχανολόγου Μηχανικού
Καθηγήτη Τμ. Αυτοματισμού ΤΕΙ Πειραιά

ΑΘΗΝΑ
2009



ΠΡΟΛΟΓΟΣ Β' ΕΚΔΟΣΕΩΣ

Η δεύτερη έκδοση του βιβλίου οφείλεται στην ανάγκη να περιληφθούν σ' αυτήν προσθήκες, συμπληρώσεις και διορθώσεις που επεσημάνθησαν στο κείμενο της πρώτης εκδόσεως και κρίθηκαν αναγκαίες. Σ' αυτές περιέχονται η διορθωμένη διατύπωση όρων, μαθηματικών τύπων και προτάσεων με στόχο την αποτελεσματικότερη παρουσίαση των θεμάτων, καθώς και διάφορες διευκρινιστικές προσθήκες σε ορισμένες ενότητες και παράθεση νέων παραδειγμάτων (όπως π.χ. στο Κεφάλαιο 8 που αφορά στους Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές) με στόχο την αριότερη κάλυψη της σχετικής ύλης.

Κατά κύριο λόγο, οι προσθήκες και οι προσαρμογές οφείλονται στα σχόλια και στις παρατηρήσεις διδασκόντων στις Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού. Τους ευχαριστούμε γι' αυτές που είναι απαύγασμα της διδακτικής τους εμπειρίας και επιστημονικής τους καταρτίσεως. Επίσης ευχαριστούμε ιδιαίτερα το Τμήμα Εκδόσεων του Ιδρύματος Ευγενίδου για την άριστη επιμέλεια και την υποδειγματική συνεργασία κατά την παραγωγή της δεύτερης εκδόσεως.

Χάρης στην κοινή αυτή προσπάθεια, ευελπιστούμε ότι το βιβλίο θα ανταποκριθεί καλύτερα στις ανάγκες της Ναυτικής Εκπαιδεύσεως.

Οι συγγραφείς



ΠΡΟΛΟΓΟΣ Α' ΕΚΔΟΣΕΩΣ

Το βιβλίο «Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο – Αυτοματισμοί Πλοίων» απευθύνεται στους σπουδαστές των Ναυτικών Ακαδημιών. Τα κεφάλαια του βιβλίου καλύπτουν ευρύ φάσμα θεμάτων αυτοματισμού. Η ύλη του ανταποκρίνεται στο αναλυτικό πρόγραμμα διδασκαλίας του μαθήματος του Ε' εξαμήνου ειδικότητας Μηχανικών Εμπορικού Ναυτικού.

Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει στις βασικές έννοιες του αυτοματισμού και των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Το θεωρητικό υπόβαθρο των ΣΑΕ παρουσιάζεται στο δεύτερο κεφάλαιο (Ανάλυση Γραμμικών Συστημάτων) και στο πέμπτο κεφάλαιο (Εισαγωγή στη Σύγχρονη Θεωρία). Τα συστήματα με συνεχή σήματα περιέχονται στο έκτο κεφάλαιο (Σχεδίαση Συστημάτων Λογικού Αυτοματισμού). Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται οι κυριότερες τεχνολογίες και τύποι οργάνων (αισθητήρων και οργάνων δράσεως), που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση συστημάτων αυτοματισμού. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κυριότερες μορφές των ελεγκτών ενώ η κατασκευή και λειτουργία των Προγραμματιζομένων Λογικών Ελεγκτών (ΠΛΕ) παρουσιάζεται στο έβδομο κεφάλαιο και η διαδικασία εφαρμογής τους για την επίλυση προβλημάτων αυτοματισμού στο όγδοο. Το ένατο κεφάλαιο περιγράφει εφαρμογές του αυτοματισμού για τον έλεγχο διατάξεων και συστημάτων πλοίων. Τέλος το δέκατο κεφάλαιο περιέχει μικρή εισαγωγή στη χρήση των συγχρόνων υπολογιστικών μέσων για την προσομοίωση, ανάλυση και σχεδίαση αυτοματισμών.

Όπως προκύπτει και από τον τίτλο του, το βιβλίο εξυπηρετεί ταυτόχρονα δύο στόχους:

- Εισάγει το σπουδαστή γενικά στις έννοιες και τις τεχνικές του αυτοματισμού. Πρόκειται για γνώσεις με ευρύτερη αξία που χρησιμοποιούνται σε όλους τους τομείς των τεχνολογικών εφαρμογών.
- Παρουσιάζει τους αυτοματισμούς, όπως αυτοί χρησιμοποιούνται στη ναυτική τεχνολογία (δηλαδή στις συσκευές και διατάξεις των πλοίων).

Καταβάλαμε προσπάθεια ώστε αυτός ο διπλός χαρακτήρας να διατηρείται σε όλα τα κεφάλαια, εντάσσοντας συστηματικά παραδείγματα ή ερωτήματα σε καθαρά ναυτικές εφαρμογές.

Με το σημερινό πρόγραμμα διδασκαλίας των ΑΕΝ, ο χρόνος διδασκαλίας του μαθήματος είναι ίσως περιορισμένος σε σχέση με την προβλεπόμενη ποικιλία και έκταση της ύλης. Για τον λόγο αυτό, επιχειρήσαμε να αναπτύξουμε το περιεχόμενο των περισοτέρων κεφαλαίων έτσι ώστε να επιτρέπεται διττή χρήση του. Ο διδάσκων μπορεί να επικεντρώσει τη διδασκαλία σε βασικές αρχές και έννοιες, που παρουσιάζονται συνήθως στις αρχικές ενότητες του κεφαλαίου, ή να εμβαθύνει προχωρώντας σε επόμενες ενότητες. Πιστεύουμε ότι αυτή η δυνατότητα επιλογής βοηθάει το διδάσκοντα να προσαρμόσει τη ροή ανάλογα με τις ανάγκες της διδασκαλίας.

Ευελπιστούμε ότι το βιβλίο αυτό θα βοηθήσει τους σπουδαστές να αξιολογήσουν την σημασία και τον ιδιαίτερο ρόλο, τον οποίο κατέχει ο αυτοματισμός μεταξύ των διαφόρων κλάδων της τεχνολογίας και να αναγνωρίζουν τα συστήματα αυτοματισμού στο περιβάλλον του πλοίου.

Ευχαριστούμε το Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας και το Ίδρυμα Ευγενίδου που μας επέλεξαν μετά την προκήρυξη του σχετικού διαγωνισμού για τη συγγραφή του βιβλίου. Ευχαριστούμε ιδιαίτερα το Τμήμα Εκδόσεων του Ιδρύματος Ευγενίδου, για την άριστη συνεργασία, την άψογη επιμέλεια και εκτύπωση του βιβλίου. Επίσης ευχαριστούμε τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Σπύρο Τσαφέστα για τη συμβολή του κατά την επιστημονική κρίση του περιεχομένου του βιβλίου.

Γνωρίζουμε ότι, η παρούσα πρώτη έκδοση του βιβλίου ενδεχομένως να περιέχει λάθη και παραλείψεις. Θα είναι ιδιαίτερα ευπρόσδεκτες τυχόν παρατηρήσεις και σχόλια, τα οποία θα βοηθήσουν στην αριότερη παρουσίαση του θέματος σε επόμενη έκδοση.

Οι συγγραφείς

Εισαγωγή

I

1.1 Γενικά.

Τα *συστήματα αυτομάτου ελέγχου* διαδραματίζουν ένα συνεχώς αυξανόμενο ρόλο στη σύγχρονη ζωή, από την απλή οικιακή συσκευή μέχρι τα πολύπλοκα συστήματα που εφαρμόζονται στη βιομηχανία ή τη ναυτιλία. Η μελέτη και η ανάλυση των συστημάτων ελέγχου στηρίζεται στις θεωρίες της αναδράσεως και της αναλύσεως των γραμμικών συστημάτων, χρησιμοποιεί δε τις ιδέες της θεωρίας των κυκλωμάτων και των τηλεπικοινωνιών.

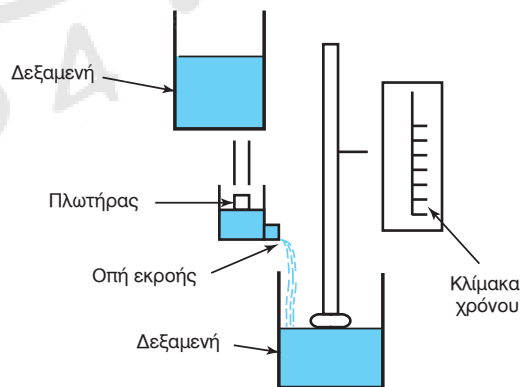
Ο όρος *αυτοματισμός* περιλαμβάνει κυρίως τις εφαρμογές του αυτομάτου ελέγχου στη βιομηχανία, τη διοίκηση και την παραγωγή και αφορά κατά κύριο λόγο τις μηχανές οι οποίες «αυτοελέγχονται», έχουν δηλαδή την ικανότητα να διορθώνουν αυτόματα τη συμπεριφορά της λειτουργίας τους σύμφωνα με κάποια επιθυμητή είσοδο (εντολή).

Σήμερα οι ιστορικοί θεωρούν ότι ο αυτοματισμός και τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου αποτελούν το πιο σημαντικό επίτευγμα που πέτυχε ο άνθρωπος κατά την περίοδο μεταβάσεώς του από την προβιομηχανική στη βιομηχανική περίοδο (18ος και 19ος αιώνας). Η ραγδαία ανάπτυξη της επιστήμης του αυτοματισμού οφείλεται στην αύξηση της παραγωγικότητας και της αξιοπιστίας των παραγωγικών συστημάτων. Συνέπεια αυτής είναι η ριζική τροποποίηση των σχέσεων ανθρώπου-μηχανής αλλά και των ανθρώπων μεταξύ τους λόγω της όλο και αυξανόμενης χρήσεως των αυτομάτων συστημάτων σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας και των αλλαγών που επέφεραν σε δομές, δραστηριότητες και συνήθειες.

1.2 Ιστορική εξέλιξη.

Η χρησιμοποίηση του αυτοματισμού για τον έλεγχο και τη λειτουργία συστημάτων αρχίζει από πολύ παλιά. Η λέξη «αυτόματα» συναντάται για πρώτη

φορά στην Ιλιάδα του Ομήρου στη ραψωδία Σ, όπου ο θεός Ήφαιστος κατασκευάζει στο εργαστήριό του, αυτόματους τρίποδες (στίχ. 369-381). Στη μυθολογία απαντάται η έννοια του αυτοματισμού στα μεταλλικά σκυλιά του βασιλιά Αλκίνοου και στον μπρούτζινο γίγαντα Τάλο. Έτσι, στη μυθολογία συναντά κανείς το όνειρο του ανθρώπου να κατασκευάσει αυτόματες μηχανές, οι οποίες θα λειτουργούν χωρίς την επέμβαση του ανθρώπου. Στην ελληνιστική περίοδο ο Αρχιμήδης κατασκευάζει αυτόματες πολεμικές μηχανές για την προστασία των Συρακουσών από την πολιορκία των Ρωμαίων. Ο Κτησίβιος από την Αλεξάνδρεια κατασκευάζει μια αυτόματη ανυψωτική μηχανή, που λειτουργεί με πεπιεσμένο αέρα με σκοπό την ανύψωση ενός βαρέος μπρούτζινου καθρέφτη. Ο ίδιος αργότερα κατασκεύασε το ξακουστό υδραυλικό ρολόι, χρησιμοποιώντας ένα αυτόματο μηχανισμό ρυθμίσεως της στάθμης του νερού (σχ. 1.2α). Ο Φίλων ο Βυζάντιος κατασκεύασε την αυτόματη λάμπα λαδιού, στην οποία



Σχ. 1.2α.

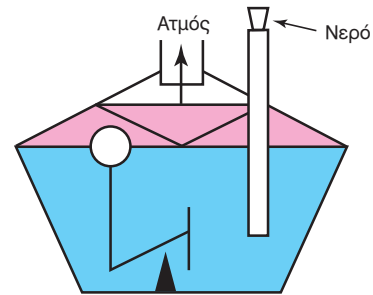
Μηχανισμός που ελέγχει τη στάθμη του υγρού σε δεξαμενή με χρήση πλωτήρα που κατασκεύασε ο Κτησίβιος. Η σταθερή στάθμη εξασφάλιζε σταθερή εκροή νερού, οπότε στη δεύτερη δεξαμενή ανυψωνόταν σταθερά το υγρό. Ο δείκτης μετρούσε το χρόνο με σχετική ακρίβεια.

η στάθμη του λαδιού ρυθμιζόταν αυτόματα. Όμως ο μηχανικός της αρχαιότητας, ο οποίος ασχολήθηκε περισσότερο με τον αυτοματισμό ήταν ο Έρω ο Αλεξανδρινός, που ανήκε στην ομάδα των μηχανικών της ελληνιστικής περιόδου (1ος - 2ος αι. π.Χ.), ο οποίος κατασκεύασε αξιοθαύμαστους αυτοματισμούς. Ο ίδιος έγραψε δυο σημαντικά έργα, τα «Πνευματικά» και την «Αυτοματοποιητική», στα οποία περιγράφει διάφορα είδη μηχανισμών αυτομάτου ελέγχου. Η ιστορική εξέλιξη των αυτοματισμών περνάει μέσα από τη ρωμαϊκή και βυζαντινή τεχνολογία, τις αυτόματες μηχανές του μεσαίωνα, τα πολύπλοκα μηχανικά ρολόγια, τις μηχανές του Καρτέσιου, τα σχέδια του Λεονάρντο Ντα Βίντσι. Στην περίοδο αυτή, της Αναγεννήσεως, ανήκει για παράδειγμα, η μελέτη για το μηχανισμό ενός αυτοκίνητου φερού και η αυτόματη μηχανή για την παραγωγή εργαλείων.

Ένα από τα πιο γνωστά αυτόματα συστήματα των νεότερων χρόνων είναι ο ρυθμιστής θερμοκρασίας που εφευρέθηκε από τον Ολλανδό Κορνήλιο Ντρέμπελ (1572-1633 μ.Χ.). Ο Ντένις Πάπεν το 1681 μ.Χ. επινόησε τον αυτόματο ρυθμιστή πίεσεως για τους ατμολέβητες. Το 1769 μ.Χ., σταθμό για τη βιομηχανική εφαρμογή των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου αποτέλεσε η εφεύρεση του μηχανικού ρυθμιστή στροφών του ατμοστροβίλου από τον Τζαίμς Βατ. Ο ρυθμιστής αυτός είχε την ικανότητα να μετράει τις στροφές του κεντρικού άξονα μεταδόσεως της κινήσεως και να ρυθμίζει ανάλογα την παροχή ατμού στον ατμοστρόβιλο έτσι ώστε οι στροφές του να παραμένουν σταθερές. Ο μηχανισμός αυτός ήταν η αιτία για τη μαζική παραγωγή και την ευρεία χρήση της ατμομηχανής, τη μετατροπή της βιοτεχνίας σε βιομηχανία και τέλος, τη ραγδαία ανάπτυξη αυτής.

Ένα άλλο σημαντικό σύστημα αυτομάτου ελέγχου εκείνη την περίοδο ήταν το σύστημα ρυθμίσεως της στάθμης νερού σε ατμολέβητα (σχ. 1.2β). Εφευρέτης του ήταν ο Ρώσος μηχανικός Ιβάν Πολζούνωφ, ο οποίος τελειοποίησε το μηχανισμό αυτό το 1765. Η λειτουργία του ήταν η εξής: 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.

Μέχρι το 1868 μ.Χ. οι διάφορες εφαρμογές στον τομέα των αυτοματισμών γινόταν εμπειρικά και χωρίς τη μαθηματική περιγραφή τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο αυτόματος έλεγχος της θερμοκρασίας μιας υψικαμίνου ή ο θερμοστάτης για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας ενός κλιβάνου, ενός θερμοσίφωνα κλπ. Οι συστηματικές εφαρμογές των αυτοματισμών άρχισαν με τις πρώτες μαθηματικές παραστάσεις συστημάτων από τον Μάξγουελ το 1868, με την εφαρμογή των μετασχηματισμών Laplace για την επίλυση διαφορικών εξισώσεων, με τη μελέτη του Νίκουϊστ για την ευστάθεια των γραμμικών συστημάτων και με τη διατύπωση μαθηματικών προτύπων και αναλόγων συστημάτων ελέγχου από τον Mason.



Σχ. 1.2β.

Αυτόματος ρυθμιστής στάθμης νερού σε ατμολέβητα.

Στα τέλη του 19ου αιώνα ο Βιονεγκράντσκι ανέπτυξε τη μαθηματική θεωρία για τους αυτόματους ρυθμιστές. Πριν από το Β' παγκόσμιο πόλεμο η επιστήμη των αυτοματισμών εμφανίζει σημαντική πρόοδο στα εργαστήρια της εταιρείας Bell Telephone στις ΗΠΑ με τους Μπόντε, Μπλακ κ.ά. Οι επιστήμονες αυτοί ανέπτυξαν τις θεωρίες για τη δημιουργία ενός σύγχρονου αυτόματου τηλεφωνικού συστήματος και για ηλεκτρονικούς ενισχυτές με ανάδραση. Παράλληλα, Σοβιετικοί μαθηματικοί συνέβαλαν στην ανάπτυξη της σύγχρονης θεωρίας των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Αυτοί εστίασαν την προσοχή τους στη μαθηματική ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (διαφορικές εξισώσεις) σε αντίθεση με τους Αμερικανούς επιστήμονες, οι οποίοι έδωσαν έμφαση στο πεδίο της συχνότητας (μετασχηματισμοί Laplace). Κατά τη διάρκεια του Β' παγκοσμίου πολέμου ο τομέας των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου αναπτύχθηκε ραγδαία με την εφαρμογή τους στις σύγχρονες πολεμικές μηχανές. Τέτοια παραδείγματα είναι ο αυτόματος πιλότος των αεροπλάνων, που επεκτάθηκε αργότερα και στα εμπορικά αεροσκάφη, ο αυτόματος σκοπευτής των πυροβόλων και το αυτόματο σύστημα ανιχνεύσεως κινουμένων στόχων με το ραντάρ.

Στις επόμενες δεκαετίες η εισαγωγή των αναλογικών και των ψηφιακών Η/Υ στα συστήματα αυ-

τοματισμών και των ψηφιακών Η/Υ στα συστήματα αυ-

τομάτου ελέγχου συνέβαλε δραστικά στην ακρίβεια και στην απόδοση της λειτουργίας τους. Η εξερεύνηση του διαστήματος έδωσε νέα σημαντική ώθηση στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου με αποτέλεσμα το σχεδιασμό εξαιρετικά πολυπλόκων και μεγάλης ακριβείας συστημάτων. Νέες θεωρίες αναπτύχθηκαν με σκοπό τη δημιουργία ακόμη τελειότερων αυτοματισμών. Επιγραμματικά αναφέρουμε τις εξελίξεις στην επιστήμη και την τεχνολογία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου μέχρι σήμερα:

- Ολοκλήρωση της θεωρίας των γραμμικών συστημάτων.
- Ανάπτυξη της θεωρία της αναλογικής εξομοίωσης με χρήση αναλογικών υπολογιστών.
- Ανάπτυξη της θεωρίας άριστου ελέγχου.
- Ανάπτυξη της θεωρίας των μη γραμμικών συστημάτων.
- Αναγνώριση συστημάτων και αυτοπροσαρμοζόμενος έλεγχος.
- Ανάπτυξη του ψηφιακού ελέγχου και εφαρμογή ψηφιακών Η/Υ.
- Σχεδιασμός προγραμματιζομένων ελεγκτών για τον έλεγχο παραγωγικών διεργασιών.
- Ανάπτυξη της ρομποτικής επιστήμης με εφαρμογή στη βιομηχανία, διάστημα, ιατρική κ.ά.
- Ανάπτυξη ευφών συστημάτων και τεχνητής νοημοσύνης για την αυτόματη διάγνωση βλαβών, για την κατασκευή συστημάτων με υψηλό βαθμό ασφάλειας, για την καταγραφή, ταξινόμηση και επεξεργασία της ανθρώπινης εμπειρίας έτσι ώστε οι Η/Υ να είναι σε θέση να παίρνουν αποφάσεις.

1.3 Γενική περιγραφή συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

Σύστημα αυτομάτου ελέγχου ονομάζουμε ένα σύνολο αλληλοσυνδεομένων μηχανισμών και εξαρτημάτων που έχει ως σκοπό την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος (απόκριση). Η βάση για την ανάλυση των συστημάτων ελέγχου είναι η θεωρία γραμμικών συστημάτων (γραμμικό ονομάζουμε ένα σύστημα, όταν η έξοδος του ακολουθεί την είσοδο του συστήματος, δηλαδή όταν διπλασιάζεται ή τριπλασιάζεται η είσοδος. Το ίδιο ισχύει και για την έξοδο), η οποία προϋποθέτει ότι υπάρχει η σχέση «αιτίου-αποτελέσματος» μεταξύ των διαφόρων στοιχείων που αποτελούν το σύστημα (σχ. 1.3α). Η **διεργασία** (process), η οποία ονομάζεται επίσης και **βαθμίδα** (block), εκτελείται από ένα στοιχείο του συστήματος και παριστάνεται συμβολικά με ένα

ορθογώνιο πλαίσιο. Το αίτιο που ενεργοποιεί το σύστημα είναι η **είσοδος του συστήματος** (system input). Το αποτέλεσμα που θα προκύψει μετά την εκτέλεση της διεργασίας είναι η **έξοδος του συστήματος**. Για παράδειγμα, μπορούμε να αναφέρουμε, ως σύστημα το θερμοσίφωνα, όπου είσοδός του είναι η εντολή για θέρμανση του νερού. Την εντολή αυτή εκτελεί ο θερμοσίφωνας και μετά από κάποιο χρονικό διάστημα δίδει ως έξοδο το ζεστό νερό.

Τα συστήματα ελέγχου διακρίνονται σε:

1.3.1 Συστήματα ανοικτού βρόχου (open loop).

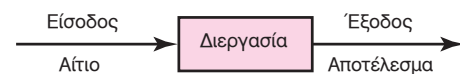
Στο σχήμα 1.3β φαίνεται σχηματικά ένα σύστημα ανοικτού βρόχου, το οποίο χρησιμοποιεί έναν **ελεγκτή** (controller). Ο ελεγκτής ελέγχει τη διεργασία για να διατηρείται η επιθυμητή έξοδος. Σε ένα σύστημα ελέγχου η είσοδος που εφαρμόζεται είναι η επιθυμητή έξοδος. Στο προηγούμενο παράδειγμα, ο θερμοσίφωνας έχει ως επιθυμητή έξοδο το ζεστό νερό μιας ορισμένης θερμοκρασίας. Ο ελεγκτής είναι ένας θερμοστάτης, ο οποίος ρυθμίζει τη λειτουργία του θερμοσίφωνα (καυστήρα).

Στο σύστημα ανοικτού βρόχου η ροή πληροφοριών γίνεται μόνο σε μια κατεύθυνση, που ονομάζεται **διεύθυνση** και είναι η ροή από τον ελεγκτή προς τη διεργασία (ελεγχόμενο σύστημα).

Η διαδικασία ελέγχου σε ένα σύστημα ανοικτού βρόχου βασίζεται στην εύρεση του κατάλληλου ελεγκτή και στην επιλογή της κατάλληλης ελεγχόμενης μεταβλητής $u(t)$ έτσι ώστε η έξοδος του συστήματος να ανταποκρίνεται στην επιθυμητή είσοδο αναφοράς.

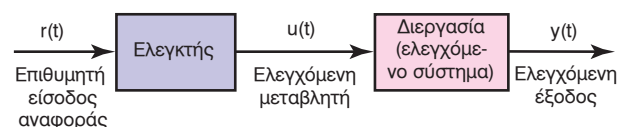
1.3.2 Συστήματα κλειστού βρόχου (closed loop).

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τα συστήματα ανοικτού βρόχου δίνουν εντολές



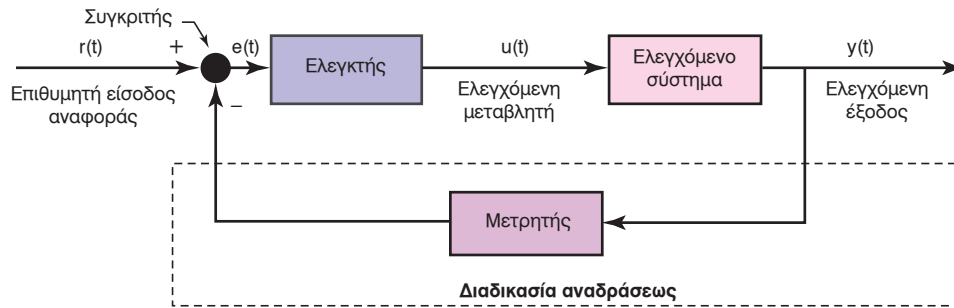
Σχ. 1.3α.

Διάγραμμα διεργασίας, που θα αποτελέσει αντικείμενο ελέγχου.



Σχ. 1.3β.

Γραφική απεικόνιση συστήματος ανοικτού βρόχου.



Σχ. 1.3γ.

Γραφική απεικόνιση συστήματος κλειστού βρόχου.

και κατευθύνουν, δεν ελέγχουν όμως το αποτέλεσμα σε σχέση με την επιθυμητή είσοδο αναφοράς. Έτσι δεν ασκείται συνεχής δυναμικός έλεγχος κατά τη διάρκεια της *διαδικασίας ελέγχου* (on line). Για να υπάρχει δυναμικός έλεγχος απαιτείται η δημιουργία συστήματος κλειστού βρόχου, στο οποίο ισχύουν οι παρακάτω επιπρόσθετες διαδικασίες:

- Η διαδικασία μετρήσεως, όπου μετράται από έναν *μετρητή* η έξοδος του συστήματος.
- Η διαδικασία συγκρίσεως, όπου το σήμα του μετρητή συγκρίνεται με την επιθυμητή είσοδο αναφοράς από το *συγκριτή*.

Η διαδικασία αυτή του ελέγχου προϋποθέτει μια αντίστροφη πορεία από την έξοδο προς την είσοδο, από το αποτέλεσμα προς το αίτιο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *ανάδραση* (feedback) ή *ανατροφοδότηση*. Η ανάδραση ή ανατροφοδότηση επιτρέπει τη μέτρηση της ελεγχόμενης εξόδου του συστήματος, την επαναφορά της στην είσοδο και τη σύγκρισή της με την επιθυμητή είσοδο αναφοράς. Δημιουργεί έτσι, έναν κύκλο ελέγχου, σχηματίζοντας το σφάλμα ελέγχου καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας ελέγχου.

Το σφάλμα ελέγχου είναι το αποτέλεσμα της συγκρίσεως ανάμεσα στην πραγματική ελεγχόμενη έξοδο και την επιθυμητή είσοδο αναφοράς ενός συστήματος ελέγχου και αποτελεί τη διέγερση στον ελεγκτή του συστήματος.

Μηδενικό σφάλμα σημαίνει ταύτιση εισόδου αναφοράς και εξόδου, δηλαδή το σύστημα λειτουργεί τέλεια. Θετικό ή αρνητικό σφάλμα σημαίνει αντίστοιχα θετική ή αρνητική απόκλιση μεταξύ εισόδου-εξόδου. Αντίθετα, από το μηδενικό σφάλμα στο θετικό ή αρνητικό ενεργοποιείται ο ελεγκτής με στόχο την επαναφορά του συστήματος στην επιθυμητή κατάσταση.

Η γραφική απεικόνιση ενός *συστήματος κλειστού βρόχου* ή *συστήματος ελέγχου με ανάδραση*, όπως διεθνώς έχει επικρατήσει (feedback control

system), περιλαμβάνει εκτός από τον ελεγκτή, το μετρητή, το συγκριτή με το σφάλμα ελέγχου $e(t)$ και την επιθυμητή είσοδο αναφοράς (σχ. 1.3γ).

Όπως βλέπουμε, στο σχήμα 1.3γ ο συγκριτής συγκρίνει αλγεβρικά (+ και -) το σήμα εισόδου με το σήμα αναδράσεως. Ένα σύστημα ονομάζεται *αρνητικής αναδράσεως* (negative feedback), όταν το σήμα της αναδράσεως αφαιρείται κατά τη σύγκρισή του από το σήμα της εισόδου (όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3γ όπου το (-) βρίσκεται στον κλάδο της αναδράσεως και το (+) στον κλάδο της εισόδου αναφοράς).

1.4 Σύγκριση συστημάτων ανοικτού και κλειστού βρόχου.

Τα συστήματα ανοικτού βρόχου είναι συστήματα, τα οποία περιλαμβάνουν τον ελεγκτή και το ελεγχόμενο σύστημα, ενώ τα συστήματα κλειστού βρόχου περιλαμβάνουν επιπλέον το *μετρητή* (detector) και το *συγκριτή* (comparator).

Στα συστήματα ανοικτού βρόχου ασκείται η διεύθυνση ως διαδικασία ελέγχου, που σημαίνει ότι έχει μια διαδικασία παραγωγής του επιθυμητού σήματος εισόδου και εφαρμογής στο ελεγχόμενο σύστημα μέσω του ελεγκτή. Επιπλέον στο σύστημα κλειστού βρόχου υπάρχει και η διαδικασία ελέγχου, δηλαδή η έξοδος του συστήματος. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από τη διεύθυνση μετρείται και συγκρίνεται με την επιθυμητή είσοδο αναφοράς. Αυτή η σημαντική λειτουργία ονομάζεται *ανάδραση* και αποτελεί τη βασική διαφορά μεταξύ των δύο τύπων συστημάτων αλλά και το σημαντικό πλεονέκτημα του συστήματος κλειστού βρόχου έναντι του ανοικτού βρόχου.

Στη σύγχρονη εποχή τα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι τα συστήματα κλειστού βρόχου με πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία, τη ναυτιλία, τη γεωργία, την ιατρική, στις τηλεπικοινωνίες κ.ά.

1.5 Παραδείγματα.

Ακολουθούν μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα συστημάτων ανοικτού βρόχου:

1) Έλεγχος εντάσεως ραδιοφώνου.

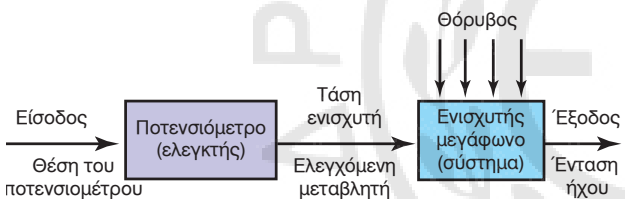
Το ποτενσιόμετρο αποτελεί ένα στοιχείο ελέγχου σε ηλεκτρικά κυκλώματα. Με το ποτενσιόμετρο εισόδου μπορούμε να ελέγχομε την τάση του ενισχυτή και συνεπώς την ένταση του ήχου στα μεγάφωνα του ραδιοφώνου (σχ. 1.5α).

2) Έλεγχος πορείας σκάφους.

Το πηδάλιο του σκάφους είναι ο ελεγκτής μέσω του οποίου ελέγχεται η πορεία της (σχ. 1.5β).

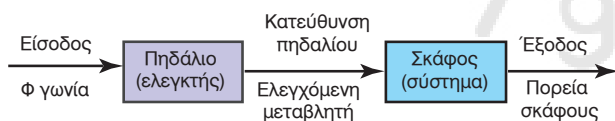
3) Έλεγχος στροφών ατμοστροβίλου.

Μια ρυθμιστική βάνα στην προσαγωγή του ατμού ενός ατμοστροβίλου είναι δυνατόν να ρυθμίζει τις στροφές του κινητήριου άξονα του ατμοστροβίλου. Η ρυθμιστική βάνα αποτελεί τον ελεγκτή του συστήματος (σχ. 1.5γ).



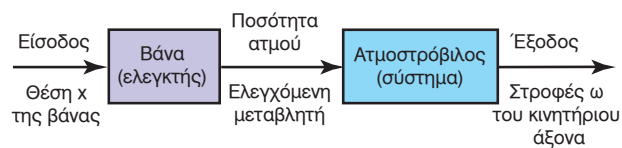
Σχ. 1.5α.

Έλεγχος εντάσεως ραδιοφώνου.



Σχ. 1.5β.

Έλεγχος πορείας σκάφους.



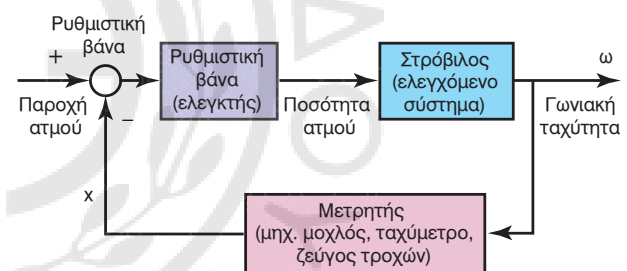
Σχ. 1.5γ.

Έλεγχος στροφών ατμοστροβίλου.

Ακολουθούν μερικά παραδείγματα συστημάτων κλειστού βρόχου.

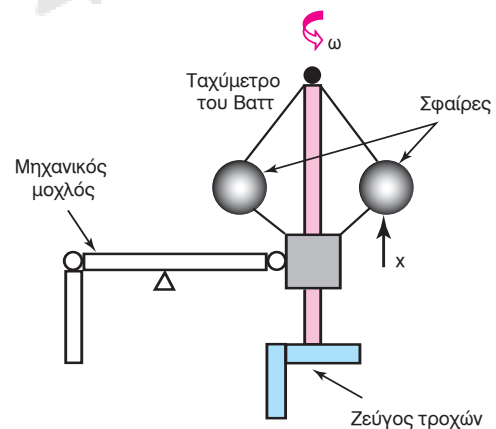
4) Έλεγχος στροφών ατμοστροβίλου με τον ρυθμιστή του Βαττ.

Η μέτρηση των στροφών του ατμοστροβίλου γίνεται με το ταχύμετρο του Βαττ, ένα μηχανισμό, που μετατρέπει τις στροφές σε ευθύγραμμη μετατόπιση δύο ή περισσότερων σφαιρών και συνδέεται μέσω μηχανικών μοχλών με ρυθμιστική βάνα στην είσοδο του ατμοστροβίλου. Όταν μειωθούν οι στροφές του κινητήριου άξονα του ατμοστροβίλου, τότε μετακινούνται προς τα κάτω οι περιστρεφόμενες σφαίρες του ταχύμετρου ανοίγοντας τη ρυθμιστική βάνα με αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής του ατμού. Έτσι, η αύξηση της παροχής του ατμού αυξάνει τις στροφές του ατμοστροβίλου (σχ. 1.5δ και 1.5ε). Αντίθετα, όταν αυξηθούν οι στροφές του κινητήριου άξονα του ατμοστροβίλου, τότε οι περιστρεφόμενες σφαίρες μετακινούνται προς τα πάνω κλείνοντας τη ρυθμιστική βάνα με αποτέλεσμα τη μείωση της παροχής του ατμού. Έτσι, η μείωση της παροχής του



Σχ. 1.5δ.

Έλεγχος στροφών ατμοστροβίλου με ρυθμιστή Βαττ.



Σχ. 1.5ε.

Μηχανικός ρυθμιστής Βαττ.

αιμού μειώνει τις στροφές του ατμοστροβίλου (σχ. 1.5δ και 1.5ε).

5) Έλεγχος θερμοκρασίας ηλεκτρικού ψυγείου.

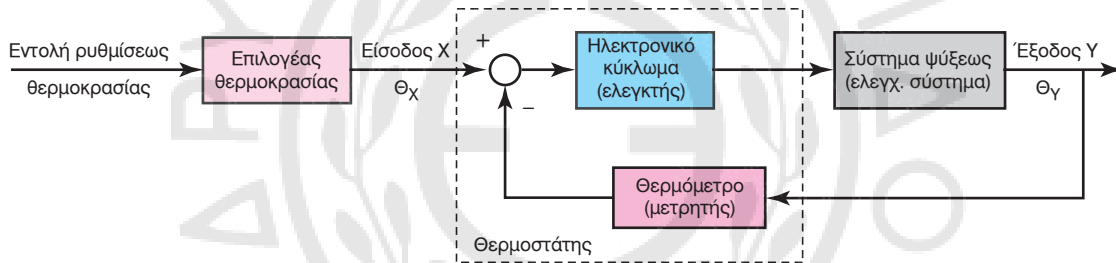
Στο σύστημα αυτό με τη βοήθεια ενός θερμοστάτη ελέγχουμε τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον εσωτερικό χώρο ενός ψυγείου (σχ. 1.5στ).

6) Αυτόματος έλεγχος ρομπότ.

Ο έλεγχος ενός ρομπότ αποτελεί έλεγχο κλειστού βρόχου. Σε αυτό το σύστημα ο Η/Υ αποτελεί τον ελεγκτή και συγκριτή ταυτόχρονα, ενώ το ελεγχόμενο σύστημα είναι το ρομπότ (μηχανικό μέρος). Η ανάδραση πραγματοποιείται μέσω ενός **αισθητήριου** (sensor), το οποίο εντοπίζει τη θέση του αντικειμένου και επιτρέπει μέσω του Η/Υ τη σύγκριση μεταξύ πραγματικής και επιθυμητής θέσεως του βραχίονα του ρομπότ. Ο διεγέρτης είναι ένα ηλεκτροϋδραυλικό σύστημα παροχής κινήσεως στο ρομπότ (σχ. 1.5ζ).

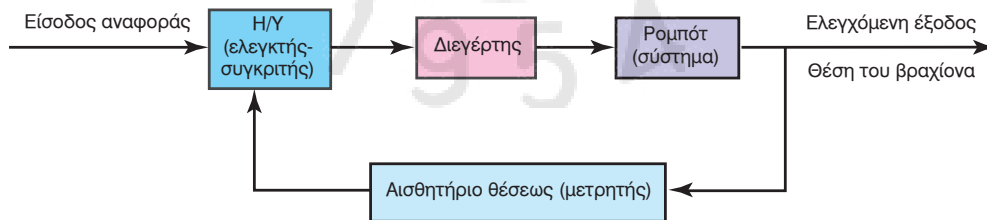
1.6 Ερωτήσεις.

1. Τι ονομάζεται διεύθυνση του συστήματος αυτομάτου ελέγχου;
2. Ποια είναι η λειτουργία του ελεγκτή;
3. Τι ονομάζεται σύστημα ανοικτού βρόχου;
4. Τι ονομάζεται ανάδραση ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου;
5. Τι σημαίνει μηδενικό σφάλμα;
6. Ποιες οι διαφορές ανοικτού και κλειστού βρόχου συστήματος αυτομάτου ελέγχου;
7. Περιγράψτε τη διαδικασία ελέγχου που ασκεί ο οδηγός στην πορεία ενός αυτοκινήτου πάνω σε ένα δρόμο. Σχεδιάστε το σύστημα ελέγχου (γραφική απεικόνιση).
8. Περιγράψτε τη διαδικασία ελέγχου της στάθμης του υγρού σε μια δεξαμενή με ταυτόχρονη παροχή και εκροή υγρού. Σχεδιάστε το σύστημα ελέγχου (γραφική απεικόνιση).



Σχ. 1.5στ.

Έλεγχος θερμοκρασίας ηλεκτρικού ψυγείου.



Σχ. 1.5ζ.

Αυτόματος έλεγχος ρομπότ.

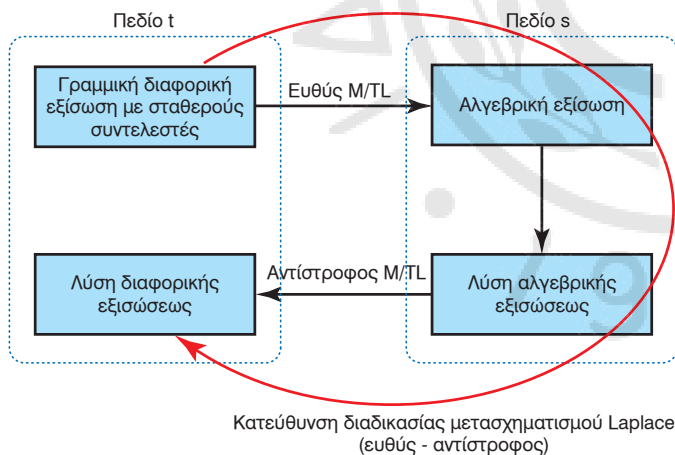
Ανάλυση γραμμικών συστημάτων

2

2.1 Μετασχηματισμός Laplace.

2.1.1 Εισαγωγή.

Ο μετασχηματισμός Laplace (ευθύς, αντίστροφος μετασχηματισμός Laplace) είναι ένα σημαντικό μαθηματικό εργαλείο για τη μελέτη, ανάλυση και σχεδίαση των γραμμικών μη χρονικά μεταβαλλομένων συστημάτων. Το μαθηματικό μοντέλο των συστημάτων αυτών αποτελείται από γραμμικές διαφορικές εξισώσεις με σταθερούς συντελεστές. Ο μετασχηματισμός Laplace ανάγει την επίλυση μιας γραμμικής διαφορικής εξίσωσης με σταθερούς συντελεστές σε επίλυση μιας αλγεβρικής εξίσωσης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1α.



Σχ. 2.1α.

Διαδικασία μετασχηματισμού Laplace.

Ονομάζουμε **ευθύ μετασχηματισμό Laplace** το μετασχηματισμό που εκφράζεται με τη σχέση:

$$L: f(t) \rightarrow L[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-st} dt = F(s) \quad (2.1)$$

Ορίζουμε **αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace** το μετασχηματισμό που εκφράζεται με τη σχέση:

$$L^{-1}: F(s) \rightarrow L^{-1}[F(s)] = \frac{1}{2\pi j} \lim_{r \rightarrow \infty} \int_{\alpha - jr}^{\alpha + jr} F(s) e^{st} ds \quad (2.2)$$

Ο ευθύς μετασχηματισμός Laplace χαρακτηρίζει την απεικόνιση μιας συναρτήσεως του χρόνου $f(t)$ σε μια συνάρτηση της μιγαδικής μεταβλητής $F(s)$ στο μιγαδικό (φανταστικό) επίπεδο s .

$$\begin{matrix} L \\ f(t) \rightarrow F(s) \end{matrix} \quad (2.3)$$

Ο μετασχηματισμός Laplace έχει την ικανότητα:

- Να απλοποιεί τις συναρτήσεις (μετασχηματίζει τις συναρτήσεις μεταβλητής t σε ρητές συναρτήσεις μεταβλητής s).
- Να απλοποιεί τις πράξεις (η διαφορική εξίσωση μέσω του μετασχηματισμού Laplace ανάγεται σε αλγεβρική εξίσωση).
- Να απλοποιεί την ανάλυση κυκλωμάτων με αρχική ενέργεια.
- Να διευκολύνει τη μελέτη κυκλωμάτων με χροστικές διεγέρσεις.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Laplace μπορούμε να βρούμε απ' ευθείας τη μερική λύση διαφορικής εξίσωσης χωρίς να μεσολαβήσει ο προσδιορισμός της γενικής λύσεως ακόμη και αν το δεύτερο μέλος της διαφορικής εξίσωσης είναι ασυνεχής συνάρτηση. Εδώ πρέπει να παρατηρήσουμε ότι δεν έχουν όλες οι συναρτήσεις $F(s)$ αντίστροφο μετασχηματισμό, π.χ. οι συναρτήσεις s , s^2 , ημς δεν είναι μετασχηματισμός Laplace καμιάς συναρτήσεως του t .

2.1.2 Ιδιότητες μετασχηματισμού Laplace.

Οι θεμελιώδεις ιδιότητες του μετασχηματισμού Laplace είναι:

$$\text{Αν } f(t) = \frac{dy}{dt} \text{ με } y(0) = 0 \Rightarrow F(s) = sY(s) \quad (2.4)$$

και αν $f(t) = \int_0^t y(\tau) d\tau \Rightarrow F(s) = \frac{1}{s} Y(s)$ (2.5)

Έτσι με το μετασχηματισμό Laplace η παράγωγος και το ολοκλήρωμα ως προς το χρόνο t μετατρέπονται σε ένα απλό πολλαπλασιασμό ή σε μια διαίρεση στο επίπεδο της μιγαδικής συχνότητας s:

Επίπεδο t	Μετασχηματισμός Laplace	Επίπεδο s
d/dt	L →	s
∫ dt	L →	1/s

Με βάση τις ιδιότητες του πίνακα 2.1.1 είναι δυνατόν να μετασχηματιστεί μια γραμμική διαφορική εξίσωση σε μια απλή αλγεβρική σχέση (πίνακας 2.1.2).

Παράδειγμα:

Επίπεδο t	Μετασχηματισμός Laplace	Επίπεδο s
dy/dt+a y(t)=b x(t)	L →	(s+a) Y(s)=b X(s)

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Laplace στα μεγέθη της εντάσεως του ρεύματος i(t) και της τάσεως u(t) ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, διαπιστώνεται ότι οι σχέσεις των αντιστοίχων μιγαδικών μεγεθών I(s) και U(s) στο μιγαδικό επίπεδο μετατρέπονται σε απλές αλγεβρικές σχέσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1.2.
Βασικοί μετασχηματισμοί Laplace.

α/α	Επίπεδο t	Επίπεδο s
1	S(t)	1
2	1	1 / s
3	t	1 / s ²
4	t ⁿ	n! / s ⁿ⁺¹
5	e ^{-σt}	1 / (s+σ)
6	t e ^{-σt}	1 / (s+σ) ²
7	sin (ωt)	ω / (s ² +ω ²)
8	cos (ωt)	s / (s ² +ω ²)
9	sin (ωt+φ)	[s sin(φ)+ω cos(φ)] / (s ² +ω ²)
10	e ^{-σt} sin (ωt)	ω / [(σ+s) ² + ω ²]
11	e ^{-σt} cos (ωt)	(s+σ) / [(σ+s) ² + ω ²]

Αν i(t) > I(s) και u(t) > U(s) οι σχέσεις στα ηλεκτρικά στοιχεία μετασχηματίζονται ως εξής:

α) Κύκλωμα με χωρητικότητα:

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) \cdot d\tau \xrightarrow{L} U(s) = \frac{1}{sC} I(s) \quad (2.6)$$

β) Κύκλωμα με επαγωγή:

$$u(t) = L \frac{di}{dt} \xrightarrow{L} U(s) = Ls \cdot I(s) \quad (2.7)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1.1.
Ιδιότητες μετασχηματισμού Laplace.

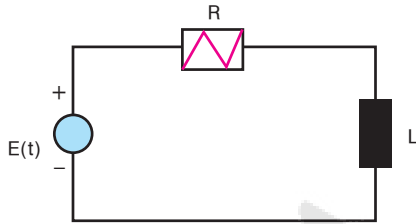
α/α	Ιδιότητα	Επίπεδο t	Επίπεδο s
1	Σταθερός συντελεστής	a y(t)	a Y(s)
2	Άθροισμα	y ₁ (t)+y ₂ (t)	Y ₁ (s)+Y ₂ (s)
3	1η παράγωγος	dy/dt = y(t)	sY(s) - y(0)
4	2η παράγωγος	d ² y/dt ² = y(t)	s ² Y(s) - s y(0) - y'(0)
5	n-οστή παράγωγος	d ⁿ y/dt ⁿ = y ⁿ (t)	s ⁿ Y(s) - s ⁿ⁻¹ y(0) - ... - y ⁽ⁿ⁻¹⁾ (0)
6	Ολοκλήρωμα	∫ y(τ)dτ	1/s Y(s)
7	Κλιμάκωση χρόνου	y(ωt)	(1/ω) Y(s/ω)
8	Καθυστερήση χρόνου	y(t-T)	e ^{-sT} Y(s)
9	Εκθετική απόσβεση	e ^{-σt} y(t)	Y(s+σ)
10	Συνέλιξη	∫ y(t-τ) x(τ) dτ	Y(s) X(s)
11	Αρχική τιμή	y(0) = lim _{t→0} y(t)	lim _{s→∞} sY(s)
12	Τελική τιμή	y(∞) = lim _{t→∞} y(t)	lim _{s→0} sY(s)

γ) **Κύκλωμα με αντίσταση:**

$$u(t) = R \cdot i(t) \xrightarrow{L} U(s) = R \cdot I(s) \quad (2.8)$$

Και η διαφορική εξίσωση που χαρακτηρίζει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα (σχ. 2.1β) μετασχηματίζεται σε μια απλή αλγεβρική σχέση:

$$R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di}{dt} = e(t) \xrightarrow{L} (R + Ls) \cdot I(s) = E(s) \quad (2.9)$$



Σχ. 2.1β.
Κύκλωμα R-L.

2.1.3 Αντίστροφος μετασχηματισμός Laplace.

Η μαθηματική έκφραση για τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace είναι:

$$F(s) \xrightarrow{L^{-1}} f(t) = L^{-1}[F(s)] \quad (2.10)$$

Κατά τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace ισχύουν όλες οι ιδιότητες και οι μετασχηματισμοί που ισχύουν για τον ευθύ μετασχηματισμό Laplace (πίνακες 2.1.1 και 2.1.2).

Για να είναι δυνατός ο αντίστροφος μετασχηματισμός Laplace συνθέτων συναρτήσεων της μεταβλητής s απαιτείται η ανάλυση αυτών των συναρτήσεων σε επιμέρους αντιστρέψιμα κλάσματα.

Μια σύνθετη συνάρτηση F(s) με δεδομένους πόλους p_1, p_2, \dots, p_n :

$$F(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{P(s)}{(s-p_1) \cdot (s-p_2) \dots (s-p_n)} \quad (2.11)$$

είναι δυνατόν να αναλυθεί με τη μέθοδο Heaviside σε κλάσματα της μορφής:

$$F(s) = \frac{A_1}{s-p_1} + \frac{A_2}{s-p_2} + \dots + \frac{A_n}{s-p_n} \quad (2.12)$$

Οπότε η αντίστροφη μετασχηματισμένη συνάρτησή της (2.12) είναι:

$$f(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t} + \dots + A_n \cdot e^{p_n t} \quad (2.13)$$

Οι συντελεστές A_1, A_2, \dots, A_n υπολογίζονται από την ταυτότητα:

$$\frac{P(s)}{(s-p_1) \cdot (s-p_2) \dots (s-p_n)} = \frac{A_1}{s-p_1} + \frac{A_2}{s-p_2} + \dots + \frac{A_n}{s-p_n} \quad (2.14)$$

Σε κάθε όρο του δεύτερου μέλους της σχέσεως (2.14) εφαρμόζεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός Laplace. Συμπερασματικά, η μέθοδος Heaviside επιλύει ομαλά περιπτώσεις συνθέτων συναρτήσεων.

2.2 Συνάρτηση μεταφοράς.

Ένα από τα κυριότερα εργαλεία περιγραφής της εισόδου-εξόδου ενός συστήματος είναι η συνάρτηση μεταφοράς. Η ιδέα της χρήσεως συναρτήσεων μεταφοράς για την περιγραφή φυσικών γραμμικών συστημάτων αποτελεί φυσική συνέπεια των μεθόδων μετασχηματισμού Laplace για τη λύση των γραμμικών διαφορικών εξισώσεων. Με το μετασχηματισμό Laplace μετατρέπεται το μαθηματικό μοντέλο ενός γραμμικού φυσικού συστήματος g, δηλαδή η γραμμική διαφορική εξίσωση του συστήματος στο επίπεδο του χρόνου t, σε μια απλή αλγεβρική σχέση της μιγαδικής συχνότητας s στο μιγαδικό επίπεδο s (σχ. 2.2α).

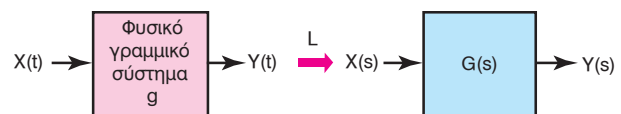
Έτσι το γραμμικό σύστημα g που διαθέτει ως μαθηματικό μοντέλο τη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d^n y}{dt^n} + \alpha_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + \alpha_1 \cdot \frac{dy}{dt} + \alpha_0 \cdot y(t) = b_0 \cdot x(t) + b_1 \cdot \frac{dx}{dt} + \dots + b_m \cdot \frac{d^m x}{dt^m} \quad (2.15)$$

Με εφαρμογή του μετασχηματισμού Laplace και θεωρώντας μηδενικές τις αρχικές συνθήκες το γραμμικό σύστημα g στο επίπεδο s μετατρέπεται σε:

$$Y(s) \cdot (s^n + \alpha_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + \alpha_1 \cdot s + \alpha_0) = X(s) \cdot (b_0 + b_1 \cdot s + \dots + b_m \cdot s^m) \quad (2.16)$$

$$\text{με: } y(0) = y'(0) = \dots = y^{(n-1)}(0) = 0 \quad (2.17)$$



Σχ. 2.2α.
Απεικόνιση συστήματος στο επίπεδο s.

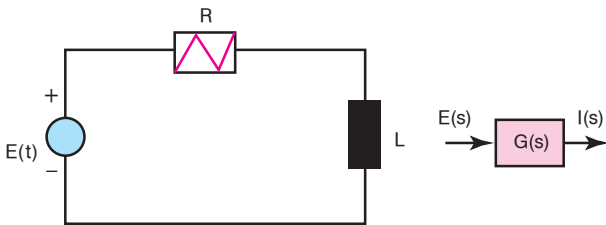
Συνάρτηση μεταφοράς (transfer function) ενός γραμμικού μη χρονικά μεταβαλλόμενου συστήματος αποκαλείται ο λόγος της μετασχηματισμένης κατά Laplace συναρτήσεως εξόδου προς τη μετασχηματισμένη κατά Laplace συνάρτηση εισόδου, θεωρώντας όλες τις αρχικές συνθήκες μηδενικές (αρχικές τιμές συναρτήσεων). Έτσι για το παραπάνω μαθηματικό μοντέλο προκύπτει ότι η συνάρτηση μεταφοράς του είναι:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m \cdot s^m + b_{m-1} \cdot s^{m-1} \dots + b_1 \cdot s + b_0}{s^n + \alpha_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + \alpha_1 \cdot s + \alpha_0} \quad (2.18)$$

Όπως φαίνεται από τη σχέση (2.18) η συνάρτηση μεταφοράς είναι ο λόγος δυο πολυωνύμων του s , γνωστά ως πολυώνυμο του αριθμητή $Y(s)$ και πολυώνυμο του παρονομαστή $X(s)$, αντίστοιχα. Το πολυώνυμο του παρονομαστή $X(s)$ διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του φυσικού συστήματος. Η συνάρτηση μεταφοράς $G(s)$ χαρακτηρίζει πλήρως το φυσικό σύστημα, επειδή περιέχει όλες τις πληροφορίες σχετικά με τους συντελεστές της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει το σύστημα. Δηλαδή, αν η συνάρτηση μεταφοράς είναι γνωστή, τότε η διαφορική εξίσωση μπορεί να αναπαραχθεί. Επίσης, η συνάρτηση μεταφοράς εξαρτάται μόνο από το φυσικό σύστημα και όχι από την είσοδο ή τις αρχικές συνθήκες. Η $G(s)$ είναι ανεξάρτητη των αρχικών συνθηκών, αφού προϋποθέτει μηδενικές αρχικές συνθήκες διαφορετικά, επιστρέφουμε πίσω στη διαφορική εξίσωση στο πεδίο του χρόνου t .

Π.χ. αν θεωρηθεί ως φυσικό σύστημα ένα ηλεκτρικό κύκλωμα R-L (σχ. 2.2β), η διαφορική εξίσωση του συστήματος είναι:

$$R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di}{dt} = e(t) \quad (2.19)$$



Σχ. 2.2β.
Κύκλωμα R-L.

Εφαρμόζοντας το μετασχηματισμό Laplace εξάγεται:

$$(R + L \cdot s) \cdot I(s) = E(s) \quad (2.20)$$

Συνεπώς η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$G(s) = \frac{I(s)}{E(s)} = \frac{1}{R + L \cdot s} \quad (2.21)$$

Αντίστροφα, έχοντας τη συνάρτηση μεταφοράς $G(s)$ βρίσκεται η διαφορική εξίσωση κάνοντας σταθερωτό πολλαπλασιασμό και αντικαθιστώντας τον όρο $s^n Y(s)$ με τη n -οστή παράγωγο του $y(t)$:

$$G(s) = \frac{I(s)}{E(s)} = \frac{1}{R + L \cdot s} \Rightarrow (R + L \cdot s) \cdot I(s) = E(s) \Rightarrow R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di}{dt} = e(t) \quad (2.22)$$

Μια άλλη εκδοχή της συναρτήσεως μεταφοράς είναι η **αρμονική συνάρτηση μεταφοράς** $G(j\omega)$ η οποία καθορίζει το μέτρο και τη φάση της αρμονικής αποκρίσεως του συστήματος. Προκύπτει από τη συνάρτηση μεταφοράς $G(s)$ του συστήματος για $s=j\omega$, όταν δηλαδή η μιγαδική συχνότητα s δεν έχει πραγματικό μέρος αλλά όλα τα μεγέθη του συστήματος ταλαντεύονται με συχνότητα ω . Με άλλα λόγια η αρμονική συνάρτηση μεταφοράς είναι η συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει για ένα σύστημα όταν σε αυτό εφαρμοστεί στην είσοδό του ένα ημιτονοειδές σήμα και εξεταστεί η μόνιμη κατάσταση του συστήματος. Π.χ. η αρμονική συνάρτηση μεταφοράς του ηλεκτρικού κυκλώματος R-L είναι:

$$G(s) = \frac{I(s)}{E(s)} = \frac{1}{R + L \cdot s} \Rightarrow G(j\omega) = \frac{I(j\omega)}{E(j\omega)} = \frac{1}{R + j\omega \cdot L} \quad (2.23)$$

Το μέτρο της παραπάνω αρμονικής συναρτήσεως είναι:

$$M(\omega) = |G(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{R^2 + L^2 \cdot \omega^2}} \quad (2.24)$$

και η φάση της $G(j\omega)$ είναι:

$$\theta(\omega) = -\arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (2.25)$$

Έτσι, από κοινού οι σχέσεις (2.24) και (2.25) ορίζουν το μέτρο και τη φάση του συστήματος της μόνιμης αποκρίσεως για ημιτονοειδή είσοδο [$e(t)=y(t)=\sin(\omega t)$]:

$$i(t) = M \cdot \sin(\omega t + 0) = \frac{1}{\sqrt{R^2 + L^2 \cdot \omega^2}} \cdot \sin(\omega t - \arctan \frac{\omega L}{R}) \quad (2.26)$$

Στη συνάρτηση μεταφοράς [$G(s) = Y(s)/X(s)$], το πολυώνυμο του παρονομαστή $X(s)$ περιέχει τους συντελεστές του συστήματος $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n-1}$, ενώ το πολυώνυμο του αριθμητή τους συντελεστές εισόδου $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$. Ως **χαρακτηριστική εξίσωση** (characteristic equation) του συστήματος ορίζεται η εξίσωση η οποία όταν εφαρμοστεί στη συνάρτηση μεταφοράς μηδενίζεται το πολυώνυμο του παρονομαστή:

$$X(s) = s^n + \alpha_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + \alpha_1 \cdot s + \alpha_0 = 0 \quad (2.27)$$

Η χαρακτηριστική εξίσωση αντιστοιχεί στην ομογενή διαφορική εξίσωση του συστήματος:

$$\frac{d^n y}{dt^n} + \alpha_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + \alpha_1 \cdot \frac{dy}{dt} + \alpha_0 \cdot y(t) = 0 \quad (2.28)$$

Η ομογενής διαφορική εξίσωση καθορίζει την ελεύθερη απόκριση του συστήματος.

Οι ρίζες του πολυωνύμου $X(s)$, δηλαδή οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξισώσεως, ονομάζονται **πόλοι** (poles), p_1, p_2, \dots, p_n . Οι πόλοι καθορίζουν τη συμπεριφορά ενός συστήματος, ανεξάρτητα από την επίδραση της εισόδου του και ισοδυναμούν με το μαθηματικό μοντέλο της ομογενούς διαφορικής εξισώσεως. Ο βαθμός n του χαρακτηριστικού πολυωνύμου ισούται με τον αριθμό των πόλων του συστήματος και είναι ίσος επίσης με την τάξη n της διαφορικής εξισώσεως.

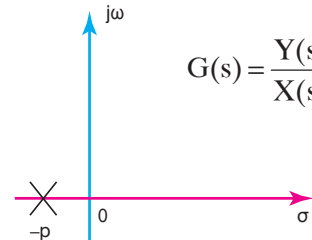
Η συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να περιγραφεί με μια **αναλυτική μορφή πόλων και ριζών**:

$$G(s) = K \cdot \frac{(s - z_1) \cdot (s - z_2) \cdot \dots \cdot (s - z_m)}{(s - p_1) \cdot (s - p_2) \cdot \dots \cdot (s - p_n)} \quad (2.29)$$

όπου z_1, z_2, \dots, z_m είναι οι ρίζες του πολυωνύμου του αριθμητή [$Y(s)=0$] ή όπως αλλιώς λέγονται μηδενικές τιμές του συστήματος. Ο συντελεστής K ονομάζεται **κέρδος** (gain) του συστήματος.

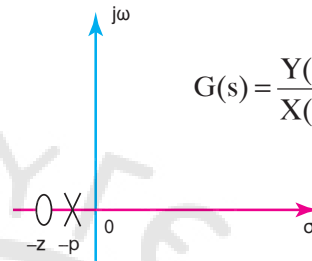
Το παραπάνω σύνολο των μεταβλητών $(n+m+1)$ προσδιορίζει τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος και χαρακτηρίζει τη νέα αυτή μορφή μαθηματικού μοντέλου στο μιγαδικό επίπεδο s .

Εκτός της παραστάσεως της $G(s)$ με την αναλυτική μορφή πόλων και ριζών μπορεί αυτή να παρασταθεί γραφικά στο μιγαδικό επίπεδο, για κέρδος $K=1$, όπου ονομάζεται **διάταξη πόλων και ριζών** (pole-zero configuration). Συμβολίζοντας τους πόλους με x και τις ρίζες με o παριστάνεται στα σχήματα 2.2γ, 2.2δ, 2.2ε και 2.2στ. Π.χ.:



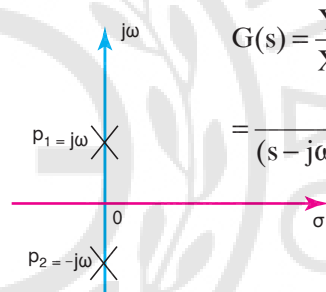
$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s+p} \quad (2.30)$$

Σχ. 2.2γ.



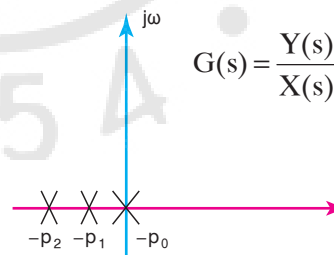
$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{s+z}{s+p} \quad (2.31)$$

Σχ. 2.2δ.



$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s^2 + \omega_0^2} = \frac{1}{(s - j\omega_0) \cdot (s + j\omega_0)} \quad (2.32)$$

Σχ. 2.2ε.



$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s \cdot (s+p_1) \cdot (s-p_2)} \quad (2.33)$$

Σχ. 2.2στ.

2.3 Χρονική απόκριση.

2.3.1 Γενικά.

Χρονική απόκριση (time response) συστήματος ονομάζουμε την ανάλυση της εξόδου του, όταν το σύστημα (δηλ. συνάρτηση μεταφοράς του) και η είσοδος του είναι γνωστά. Η απόκριση του συστήμα-

τος αποτελείται από τη **μεταβατική απόκριση** (transient response) και τη **μόνιμη απόκριση** (steady state response). Η πρώτη αναφέρεται στο μέρος εκείνο της αποκρίσεως που τείνει στο μηδέν καθώς ο χρόνος μεγαλώνει, ενώ η δεύτερη αφορά στο μέρος εκείνο της αποκρίσεως που απομένει, αφού πρώτα το μεταβατικό μέρος έχει εξασθενήσει (σχ. 2.3α).

Η χρονική απόκριση είναι το αποτέλεσμα του συστήματος στην εφαρμογή μιας συγκεκριμένης εισόδου $u(t)$ και χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του συστήματος ειδικά για αυτή την είσοδο. Έτσι υπάρχουν διαφορετικές χρονικές αποκρίσεις για διαφορετικές εισόδους.

2.3.2 Χρονικές συναρτήσεις εισόδου.

Στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου εφαρμόζονται τέσσερις χρονικές συναρτήσεις εισόδου:

$$u(t) = \begin{cases} 1 & \text{για } t \geq 0 \\ 0 & \text{για } t < 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

α) **Μοναδιαία βηματική συνάρτηση** (unit step function). Ορίζεται η συνάρτηση του λογικού διακόπτη που πραγματοποιεί μοναδιαίο βήμα τη χρονική στιγμή $t=0$ (σχ. 2.3β).

β) **Μοναδιαία παλμική συνάρτηση** (unit impulse function) ή **συνάρτηση δέλτα** (delta function). Ορίζεται η συνάρτηση του στιγμιαίου παλμού τη χρονική στιγμή $t=0$ (σχ. 2.3γ).

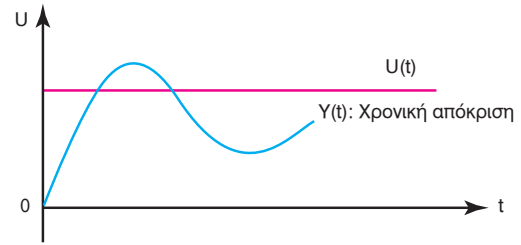
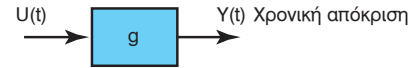
$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{για } t = 0 \\ 0 & \text{για } t \neq 0 \end{cases} \quad (2.35)$$

$$\text{με } \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

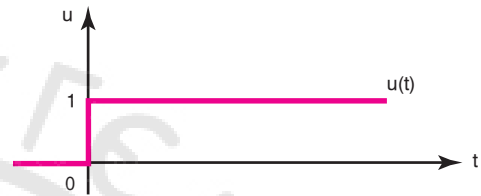
γ) **Μοναδιαία ανοδική συνάρτηση** ή **συνάρτηση ράμπας** (unit ramp function). Η συνάρτηση αυτή είναι το ολοκλήρωμα της μοναδιαίας βηματικής συναρτήσεως $u(t)$ (2.34) (σχ. 2.3δ).

$$r(t) = \int_0^t u(t) dt = \begin{cases} t & \text{για } t \geq 0 \\ 0 & \text{για } t < 0 \end{cases} \quad (2.36)$$

δ) **Μοναδιαία παραβολική συνάρτηση**, η οποία ορίζεται ως ακολούθως (σχ. 2.3ε):



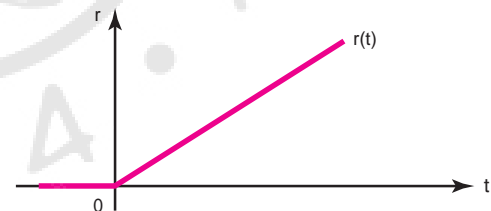
Σχ. 2.3α.
Χρονική απόκριση.



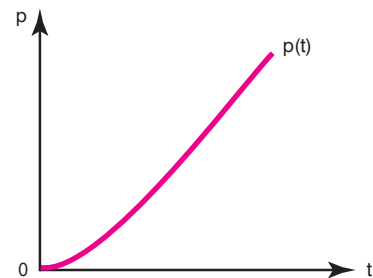
Σχ. 2.3β.
Μοναδιαία βηματική συνάρτηση.



Σχ. 2.3γ.
Μοναδιαία παλμική συνάρτηση ή συνάρτηση δέλτα.



Σχ. 2.3δ.
Μοναδιαία ανοδική συνάρτηση ή συνάρτηση ράμπας.



Σχ. 2.3ε.
Μοναδιαία παραβολική συνάρτηση.

$$p(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}t^2 & \text{για } t \geq 0 \\ 0 & \text{για } t < 0 \end{cases} \quad (2.37)$$

2.3.3 Μορφές χρονικής αποκρίσεως.

Η χρονική απόκριση ενός συστήματος εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του συστήματος και τις αρχικές συνθήκες όσο κι απ' την είσοδο του συστήματος. Οι μορφές της χρονικής αποκρίσεως είναι:

α) **Ελεύθερη απόκριση** (free response) ενός γραμμικού φυσικού συστήματος ορίζεται η απόκριση του συστήματος με μηδενική είσοδο $x(t)=0$ και διέγερση του συστήματος μόνο από τις αρχικές συνθήκες του: $y(0), y'(0), \dots, y^{(n-1)}(0)$.

β) **Εξαναγκασμένη απόκριση** (forced response) ενός γραμμικού φυσικού συστήματος ορίζεται η απόκριση του συστήματος όταν όλες οι αρχικές συνθήκες είναι μηδενικές και εφόσον το σύστημα ξεκινά από την ηρεμία και έχει μόνο διέγερση την είσοδό του: $y(0)=y'(0)=\dots=y^{(n-1)}(0)=0$.

Η ολική χρονική απόκριση του φυσικού γραμμικού συστήματος είναι το άθροισμα της ελεύθερης και της εξαναγκασμένης αποκρίσεώς του:

$$y(t) = y_{\text{free}}(t)|_{x(t)=0} + y_{\text{forced}}(t)|_{y_0=0} \quad (2.38)$$

Ακολουθούν οι δύο πιο σημαντικές κατηγορίες χρονικής αποκρίσεως.

1) Χρονική απόκριση 1ης τάξεως.

Ένα γραμμικό φυσικό σύστημα 1ης τάξεως έχει ως μαθηματικό μοντέλο μια διαφορική εξίσωση 1ης τάξεως της μορφής:

$$\frac{dy}{dt} + \alpha \cdot y(t) = b \cdot u(t) \Rightarrow T \cdot \frac{dy}{dt} + y(t) = A \cdot u(t) \quad (2.39)$$

Συνεπώς η συνάρτηση μεταφοράς για $A=1$ είναι:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{1+T \cdot s} \quad (2.40)$$

όπου T είναι η σταθερά χρόνου του συστήματος.

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος εξετάζεται παρακάτω η απόκρισή του, για διαφορετικές εισόδους και με μηδενικές αρχικές συνθήκες.

α) **Απόκριση με σταθερή είσοδο** (σχ. 2.3στ).

Για είσοδο της μορφής $x(t)=u(t)$ θα είναι:

$$y(t) = L^{-1}[Y(s)] = L^{-1}\left[\frac{1}{1+T \cdot s} \cdot \frac{1}{s}\right] = 1 - e^{-t/T} \quad (2.41)$$

Ο χρόνος που χρειάζεται το σύστημα, για να φθάσει το 63,7 % της τελικής τιμής ονομάζεται **ταχύτητα αποκρίσεως** και προκύπτει, αν στη σχέση (2.41) τοποθετηθεί $t=T$. Συνεπώς:

$$y(T) = 1 - e^{-1} = 0,637 \quad (2.42)$$

β) **Απόκριση με ανοδική είσοδο** (σχ. 2.3ζ).

Η απόκριση του συστήματος για είσοδο της μορφής $x(t) = r(t) = t$ θα είναι:

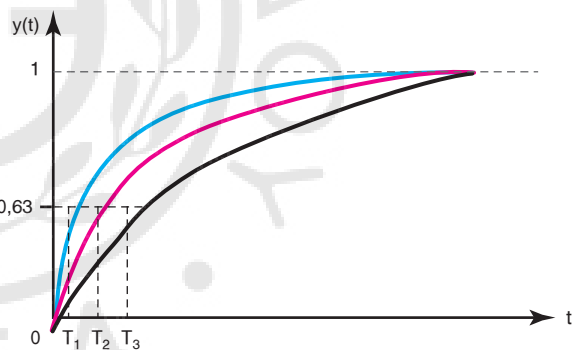
$$y(t) = L^{-1}[Y(s)] = L^{-1}\left[\frac{1}{1+T \cdot s} \cdot \frac{1}{s^2}\right] = t - T + T \cdot e^{-t/T}, \quad t \geq 0 \quad (2.43)$$

Το σήμα του σφάλματος $e(t)$ υπολογίζεται ως:

$$e(t) = r(t) - y(t) = T \cdot (1 - e^{-t/T}), \quad t \geq 0 \quad (2.44)$$

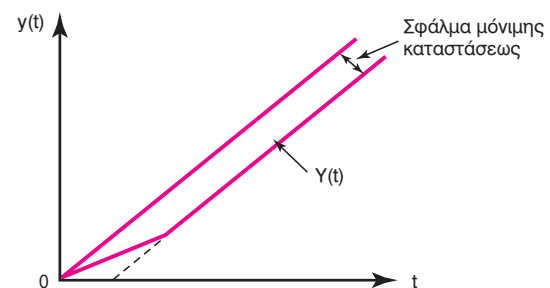
Το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως είναι:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = T.$$



Σχ. 2.3στ.

Γραφική απεικόνιση της $y(t)$ για σταθερές χρόνου $T_1 < T_2 < T_3$



Σχ. 2.3ζ.

Γραφική απεικόνιση της $y(t)$.

2) Χρονική απόκριση 2ης τάξεως.

Ένα γραμμικό σύστημα 2ης τάξεως έχει μαθηματικό μοντέλο μια γραμμική διαφορική εξίσωση 2ης τάξεως της μορφής (σχ. 2.3η):

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dt^2} + \alpha_1 \cdot \frac{dy}{dt} + \alpha_0 \cdot y(t) &= b_0 \cdot u(t) \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{1}{\omega_n^2} \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \cdot \frac{dy}{dt} + y(t) &= A \cdot u(t) \end{aligned} \quad (2.45)$$

όπου:

ω_n η φυσική συχνότητα (natural frequency).

ζ ο συντελεστής αποσβέσεως (damping ratio).

A η ενίσχυση συστήματος.

Η συνάρτηση μεταφοράς είναι της μορφής:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (2.46)$$

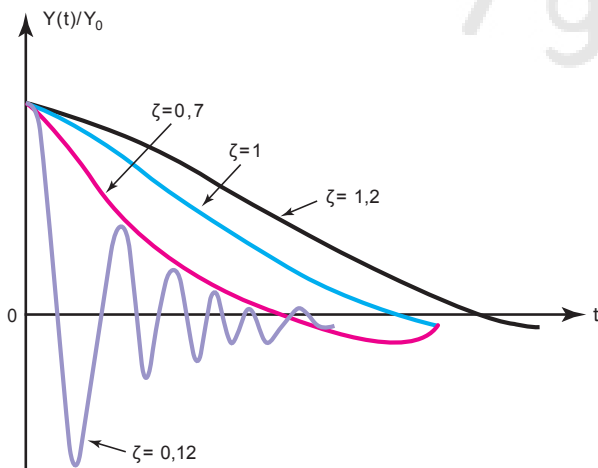
Η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος είναι:

$$s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2 = 0 \quad (2.47)$$

Οι πόλοι της $G(s)$ είναι οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης, δηλαδή:

$$s_{1,2} = -\zeta \cdot \omega_n \pm \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.48)$$

Η συμπεριφορά του συστήματος 2ης τάξεως εξαρτάται από τη μορφή που έχουν οι πόλοι του συστήματος. Πραγματικοί πόλοι συνεπάγονται εκθετική συμπεριφορά, ενώ μιγαδικοί πόλοι συνεπάγονται ταλάντωση του συστήματος. Έτσι, ο χαρακτήρας των πόλων εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή αποσβέσεως ζ .



Σχ. 2.3η.

Ελεύθερη απόκριση συστήματος 2ης τάξεως με $u(t)=0$.

α) Υπερκρίσιμη απόσβεση $\zeta > 1$.

Στην περίπτωση αυτή η χαρακτηριστική εξίσωση έχει δυο πραγματικές ρίζες της μορφής της εξίσωσης (2.48) και η χρονική απόκριση του συστήματος είναι της μορφής:

$$y(t) = 1 - e^{\zeta \omega_n t} \left[\cosh(\omega_n \cdot t \cdot \sqrt{\zeta^2 - 1}) + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \cdot \sinh(\omega_n \cdot t \cdot \sqrt{\zeta^2 - 1}) \right] \quad (2.49)$$

β) Κρίσιμη απόσβεση $\zeta = 1$.

Στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση μεταφοράς $G(s)$ έχει ως διπλό πόλο την πραγματική τιμή $-\omega_n$, δηλαδή:

$$s_1 = s_2 = -\omega_n \quad (2.50)$$

Η χρονική απόκριση είναι της μορφής:

$$y(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t) \quad (2.51)$$

γ) Υποκρίσιμη απόσβεση $\zeta < 1$.

Στην περίπτωση αυτή η χαρακτηριστική εξίσωση έχει δυο μιγαδικές συζυγείς ρίζες της μορφής:

$$s_{1,2} = -\zeta \cdot \omega_n \pm j \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.52)$$

Η χρονική απόκριση είναι της μορφής:

$$y(t) = L^{-1}[Y(s)] = 1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (2.53)$$

$$\text{όπου:} \quad \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \right) \quad (2.54)$$

$$\text{και} \quad \omega = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.55)$$

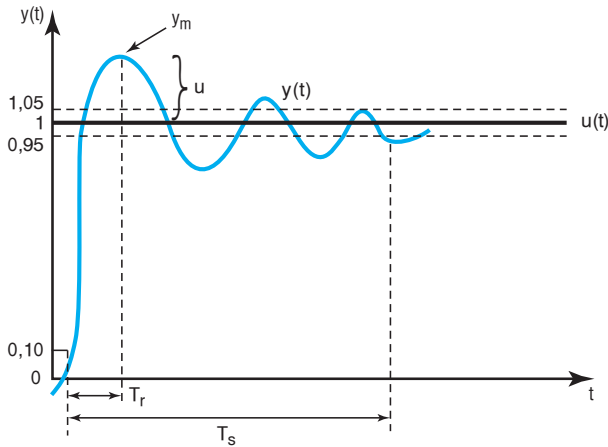
Η εξίσωση (2.55) εκφράζει τη φυσική ιδιοσυχνότητα με απόσβεση του συστήματος ενώ η σταθερά ω_n εκφράζει τη φυσική ιδιοσυχνότητα χωρίς απόσβεση (undamped natural frequency).

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη της χρονικής αποκρίσεως των συστημάτων 2ης τάξεως θα πρέπει να αναφερθούν κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη (σχ. 2.3θ):

1) Ο συντελεστής υπερψώσεως (overshoot coefficient):

$$u = \frac{y_m - y_\infty}{y_m} = e^{-\zeta \pi / \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.56)$$

2) Ο χρόνος ανυψώσεως (rise time):



Σχ. 2.30.

Χαρακτηριστικά μεγέθη χρονικής αποκρίσεως συστημάτων 2ης τάξεως.

$$T_r = \frac{1 + 2,5 \cdot \zeta}{\omega_n} \quad (2.57)$$

3) Ο χρόνος αποκαταστάσεως (setting time) για απόκλιση $\epsilon = \pm 5\%$:

$$T_s = \frac{3}{\omega_n \zeta} \quad (2.58)$$

2.4 Χαρακτηριστικά και επιδόσεις συστημάτων ελέγχου.

2.4.1 Εισαγωγή.

Ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου αποτελείται από εξαρτήματα που συνδέονται έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή απόκρισή του. Αφού η επιθυμητή απόκριση είναι γνωστή, παράγουμε ένα σήμα, που είναι ανάλογο με το σφάλμα μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής αποκρίσεως. Η χρήση του σήματος αυτού για τον έλεγχο της διαδικασίας δημιουργεί έναν κύκλο που τον ονομάζουμε **ανάδραση** (feedback). Η εισαγωγή της αναδράσεως είναι συνήθως απαραίτητη για τη βελτίωση των επιδόσεων των συστημάτων.

Για να αναπτύξουμε τα χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα από την εισαγωγή της αναδράσεως στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, θα εξετάσουμε ένα σύστημα κλειστού βρόχου (σχ. 2.4).

Η σχέση του συστήματος κλειστού βρόχου είναι η ακόλουθη:

$$C(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} R(s) \quad (2.59)$$

Αν λάβουμε υπόψη ότι $E_a = C(s)/G(s)$ μπορούμε να μετασχηματίσουμε την (2.59) και να πάρουμε:

$$E_a(s) = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} R(s) \quad (2.60)$$

Για τη σωστή λειτουργία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου απαιτείται το σφάλμα (E_a) να μειωθεί στο ελάχιστο. Αυτό θα πραγματοποιηθεί, εάν στη σχέση (2.60) το μέγεθος $1 + G(s)H(s)$ είναι μεγαλύτερο της μονάδας. Επίσης, ισχύει ότι, αν η ανάδραση $H(s) = 1$, τότε θα έχουμε:

$$E_a = R(s) - C(s) \quad (2.61)$$

2.4.2 Πλεονεκτήματα χρήσεως της αναδράσεως στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.

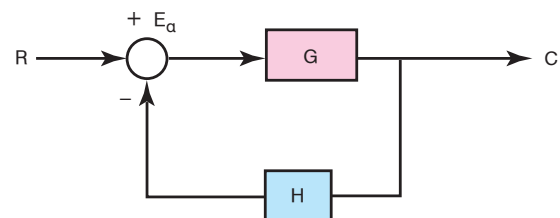
Με την εισαγωγή της αναδράσεως έχουμε τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

1) Μικρή επίδραση των μεταβολών των παραμέτρων στη λειτουργία του συστήματος.

Η συνάρτηση μεταφοράς $G(s)$ του ανοικτού βρόχου, για τους σκοπούς της ανάλυσεως αυτής ονομάζεται **διαδικασία**, γιατί ανταποκρίνεται στη βασική επεξεργασία του σήματος και υπόκειται σε διάφορες μεταβολές, όπως είναι οι ανακρίβειες στο σύστημα μετρήσεων κ.ά. Στον ανοικτό βρόχο όλες αυτές οι μεταβολές έχουν ως αποτέλεσμα μειωμένη ακρίβεια στην έξοδο. Στο σύστημα κλειστού βρόχου, το σύστημα αναγνωρίζει όλες τις μεταβολές της εξόδου και προσπαθεί να διορθώσει την έξοδο. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί από τη σχέση (2.59), αν δεχθούμε ότι $G(s)H(s) \gg 1$. Στην περίπτωση αυτή θα είναι:

$$G(s) = [1/H(s)] R(s) \quad (2.62)$$

Η σχέση (2.62) σημαίνει ότι η έξοδος είναι ανεξάρτητη της τιμής της συναρτήσεως μεταφοράς $G(s)$, και ότι εξαρτάται μόνο από την ανάδραση $H(s)$, η οποία μπορεί να είναι και σταθερός αριθμός ή μονάδα. Από τη σχέση (2.62) προκύπτει ότι



Σχ. 2.4.

Συμβολισμός συστήματος κλειστού βρόχου.

στην ανάδραση θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε εξαρτήματα καλής ποιότητας που δεν μεταβάλλονται με το χρόνο ή τις συνθήκες περιβάλλοντος, όπως είναι η θερμοκρασία κλπ. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απαίτηση $G(s)H(s) \gg 1$ ενδέχεται να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια ή ταλαντώσεις γεγονός που είναι μεγάλης σημασίας μειονέκτημα των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, όπως θα τονίσουμε παρακάτω. Ωστόσο, αυτό δεν μειώνει τη μεγάλη αξία του γεγονότος ότι ελαττώνεται η επίδραση των μεταβολών της $G(s)$ στην έξοδο. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι, για να έχουμε ένα σύστημα ανοικτού βρόχου, που να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές με ακρίβεια, θα πρέπει να επιλέξουμε με προσοχή τη συνάρτηση μεταφοράς $G(s)$. Όταν όμως το σύστημα είναι κλειστού βρόχου, είναι δυνατόν να προδιαγράψουμε την $G(s)$ με μικρότερη ακρίβεια.

2) Δυνατότητα ρυθμίσεως της συμπεριφοράς του συστήματος.

Η συμπεριφορά ενός συστήματος ανοικτού βρόχου ελέγχεται από τη συνάρτηση μεταφοράς, η οποία όμως δεν παρέχει πάντοτε τη δυνατότητα ρυθμίσεων, ώστε να επιτευχθεί άλλη ανταπόκριση του συστήματος στις απαιτήσεις εκτός από την αλλαγή εξαρτημάτων. Αντίθετα, στα συστήματα κλειστού βρόχου μπορούμε πάντοτε να κάνουμε ρυθμίσεις εύκολα ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή συμπεριφορά (απόκριση).

3) Αντιμετώπιση σημάτων διαταραχής.

Η σπουδαιότερη επίδραση της αναδράσεως στα συστήματα ελέγχου είναι ο έλεγχος και η μερική εξουδετέρωση των σημάτων διαταραχής (perturbation). Τα σήματα διαταραχής είναι εξωτερικές διεγέρσεις οι οποίες αναγκάζουν το σύστημα να δώσει λανθασμένη έξοδο. Τέτοιες εξωτερικές διεγέρσεις είναι ο θόρυβος των ενισχυτών, η επίδραση του ανέμου στις κεραίες του radar κ.ά. Στα συστήματα κλειστού βρόχου εξουδετερώνεται η επίδραση των διαταραχών αυτών και μειώνεται η αποτελεσματικότητά τους στην ακρίβεια του συστήματος. Η επίδραση αυτή θα μπορούσε να θεωρηθεί ως τροποποίηση της διαδικασίας $G(s)$ και να υπαχθεί στην πρώτη περίπτωση. Σημειώνεται, ωστόσο, ως ιδιαίτερο πλεονέκτημα, λόγω της σημασίας του και του ιδιαίτερου τρόπου με τον οποίο μελετούμε την επίδραση αυτή. Η επίδραση αυτή αναλύεται χρησιμοποιώντας την αρχή της επαλληλίας. Υπολογίζουμε

την απόκριση του συστήματος στο σήμα διαταραχής, θεωρώντας μηδενική είσοδο και μετά υπολογίζουμε την απόκριση στο σήμα εισόδου με μηδενικό σήμα διαταραχής. Η συνολική απόκριση του συστήματος είναι το άθροισμα των δύο αποκρίσεων.

4) Μείωση του σφάλματος στη μόνιμη κατάσταση.

Η εισαγωγή της αναδράσεως μειώνει το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως, γεγονός πολύ σημαντικό, αφού είναι πάντοτε επιθυμητό να διατηρήσουμε το σφάλμα εισόδου-εξόδου στο ελάχιστο δυνατό. Την επίδραση του συστήματος κλειστού βρόχου μπορούμε να υπολογίσουμε εξετάζοντας αντίστοιχα το σφάλμα για το ανοικτού και το κλειστού βρόχου σύστημα. Για την περίπτωση του ανοικτού βρόχου το σήμα σφάλματος είναι:

$$E_o(s) = [1 - C(s)] R(s) \quad (2.63)$$

Το σφάλμα στο σύστημα κλειστού βρόχου [για $H(s)=1$] είναι:

$$E_\alpha(s) = [1 / \{1 + G(s)\}] R(s) \quad (2.64)$$

Για το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως χρησιμοποιούμε το θεώρημα τελικής τιμής, που είναι:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s E_\alpha(s) \quad (2.65)$$

Με βάση το θεώρημα αυτό και αν δεχθούμε ότι η είσοδος είναι βαθμωτή, θα έχουμε για το σύστημα ανοικτού βρόχου:

$$\begin{aligned} e(\infty) &= \lim_{s \rightarrow 0} s [1 - G(s)] 1/s = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} [1 - G(s)] = 1 - G(0) \end{aligned} \quad (2.66)$$

Για το σύστημα του κλειστού βρόχου έχουμε:

$$e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s [1 / \{1 + G(s)\}] 1/s = 1 / [1 + G(0)] \quad (2.67)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το $G(0)$ είναι συνήθως κάποιος αριθμός, π.χ. 20, συμπεραίνουμε, συγκρίνοντας τις σχέσεις (2.66) και (2.67), ότι το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως είναι συνήθως μεγαλύτερο της μονάδας για το ανοικτού βρόχου σύστημα σε σχέση με το σύστημα του κλειστού βρόχου, που είναι ελεγχόμενο και μικρότερο της μονάδας.

2.4.3 Μειονεκτήματα της αναδράσεως στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.

Κατ' αρχήν, λόγω της αναδράσεως προστίθενται μερικά εξαρτήματα (αισθητήρες), τα οποία πρέπει να τηρούν αυστηρές προδιαγραφές. Τα εξαρτήματα

αυτά αυξάνουν το κόστος σημαντικά. Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι η μείωση του κέρδους γιατί από $G(s)$ μειώνεται σε $G(s)/[1+G(s)H(s)]$. Συνήθως στα συστήματα ελέγχου υπάρχει αρκετό περιθώριο κέρδους, το οποίο είναι χρήσιμο να το εκμεταλλευόμαστε, για να εφαρμόσουμε την ανάδραση και να έχουμε τα πλεονεκτήματά της.

Τέλος, ένα τρίτο μειονέκτημα είναι η εισαγωγή αστάθειας και πολυπλοκότητας, που δεν υπάρχει στα συστήματα ανοικτού βρόχου. Συμπερασματικά λοιπόν, μπορούμε να αναφέρουμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις και ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές του συστήματος, τα πλεονεκτήματα υπερκαλύπτουν τα μειονεκτήματα.

2.4.4 Ευαισθησία συστημάτων σε μεταβολές παραμέτρων.

Η λειτουργία ενός υλοποιημένου συστήματος αυτομάτου ελέγχου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια του μοντέλου της υπό έλεγχο διαδικασίας. Αυτό συμβαίνει, γιατί συνήθως η σχεδίαση του ελεγκτή γίνεται σε περιβάλλον προσομοιώσεως του συνολικού συστήματος ελεγκτή/διαδικασίας. Είναι λοιπόν προφανές ότι αν υπάρχει αντιστοιχία μοντέλου/πραγματικότητας το συνολικό σύστημα δεν θα συμπεριφέρεται όπως αναμενόταν. Μία από τις πιθανές πηγές αναντιστοιχίας είναι και η χρήση εσφαλμένων τιμών για τις παραμέτρους του μοντέλου της διαδικασίας. Το σφάλμα αυτό μπορεί να προκύψει είτε από εσφαλμένη εκτίμηση είτε από αλλαγή της τιμής της παραμέτρου λόγω βλάβης ή φυσιολογικού αιτίου. Επειδή κάτι τέτοιο είναι αναπόφευκτο, είναι απαραίτητο το σύστημα να σχεδιασθεί με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να έχει μικρή ευαισθησία σε τέτοιες αλλαγές, δηλαδή η εκτροπή από την αναμενόμενη συμπεριφορά να είναι εντός αποδεκτών ορίων.

Για τη μέτρηση της *ευαισθησίας* (sensitivity) ενός συστήματος κλειστού βρόχου, χρησιμοποιείται η *συνάρτηση ευαισθησίας* S ,

$$S = \frac{\partial G/G}{\partial p/p} = \frac{p}{G} \frac{\partial G}{\partial p} \quad (2.68)$$

όπου G είναι η συνάρτηση μεταφοράς και p η παράμετρος που ενδιαφέρει.

Η συνάρτηση αυτή δίνει το ποσοστό μεταβολής της συναρτήσεως μεταφοράς για αντίστοιχο ποσοστό μεταβολής της παραμέτρου. Επομένως είναι επιθυμητό, $S_p^G \ll 1$. Πρέπει πάντως να τονισθεί ότι δεν είναι πάντα εύκολο να εξετάζουμε το θέμα της

ευαισθησίας αναλυτικά.

2.4.5 Σφάλματα στη μόνιμη κατάσταση.

Στην υποπαράγραφο 2.4.2 συγκρίναμε το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως μεταξύ του ανοικτού και κλειστού βρόχου συστήματος. Τονίσαμε συγκρίνοντας τις σχέσεις (2.66) και (2.67) ότι, ενώ για το σύστημα ανοικτού βρόχου το σφάλμα είναι κάποιος αριθμός μεγαλύτερος της μονάδας, στο σύστημα κλειστού βρόχου για τις συνηθισμένες εφαρμογές ευσταθών συστημάτων, είναι πολύ μικρότερο της μονάδας. Στην περίπτωση του συστήματος κλειστού βρόχου, η συνάρτηση του σφάλματος (για $H=1$), δίνεται από τη σχέση (2.64) που την επαναλαμβάνουμε: $E_a(s) = [1 / \{1 + G(s)\}] R(s)$, και για να βρούμε την τιμή του σφάλματος εφαρμόζουμε το θεώρημα της τελικής τιμής (σχέση 2.65). Όπως προκύπτει από τις δύο παραπάνω σχέσεις, όταν $H=1$, εξαρτάται από την είσοδο και από τη συνάρτηση μεταφοράς. Συνήθως, στα συστήματα ελέγχου το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως εξετάζεται για τις τρεις εισόδους που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.4.1, δηλαδή τη *βηματική είσοδο* $R(s)=A/s$, τη *γραμμική είσοδο* $R(s)=A/s^2$ και την *παροβολική είσοδο* $R(s)=A/s^3$. Ακόμη, το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως εξαρτάται και χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των ολοκληρώσεων, που υπάρχουν στη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος ανοικτού βρόχου. Είναι φανερό ότι η συνάρτηση μεταφοράς του ανοικτού βρόχου θα έχει τη μορφή:

$$G(s) = A(s)/B(s) = [\Pi(s+s_z) / s^N \Pi(s+s_p)] \quad (2.69)$$

Το σύστημα είναι μηδενικού, πρώτου ή δεύτερου τύπου, όταν το N είναι αντίστοιχα 0, 1 ή 2. Ο τύπος του συστήματος είναι καθοριστικός για την τιμή του σφάλματος του συστήματος. Είναι χρήσιμο να προσδιορίσουμε το σφάλμα της μόνιμης καταστάσεως για τις τρεις τυποποιημένες μορφές εισόδου και για τους τρεις τύπους συστημάτων ελέγχου (για $H=1$).

1) Βηματική είσοδος [$R(s) = A/s$].

Το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως για βηματική είσοδο θα είναι:

$$e_{ss}(t) = \lim [(sA/s)/(1+G(s))] = A/1+G(0) \quad (2.70)$$

Η σταθερά $G(0)$ ονομάζεται *σταθερά σφάλματος θέσεως* (position error constant) και συμβολίζεται με το K_p . Όταν $N=0$ αποδεικνύεται με τη βοήθεια της σχέσεως (2.69) ότι:

για $N=0$, $e_{ss}(t) = A/(1+K_p)$
 και $e_{ss}(t) = 0$ για $N>0$ (2.71)

2) Γραμμική είσοδος ($R(s) = A/s^2$).

Το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως για γραμμική είσοδο θα είναι:

$$e_{ss}(t) = \lim [(sA/s^2)/1+G(s)] = \lim [A/s+sG(s)] = \lim A/[sG(s)] \quad (2.72)$$

Η ποσότητα $\lim [sG(s)] = K_v$ ονομάζεται **σταθερά σφάλματος ταχύτητας** (velocity error constant) και συμβολίζεται με K_v . Με τη βοήθεια της σχέσεως (2.69), αποδεικνύεται ότι:

για $N=0$, $e_{ss}(t)=\infty$, για $N=1$ $e_{ss}(t)=A/K_v$ και για $N=2$ $e_{ss}(t) = 0$ (2.73)

3) Παραβολική είσοδος [$R(s) = A/s^3$].

Το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως για παραβολική είσοδο θα είναι:

$$e_{ss}(t) = \lim [(sA/s^3) (1+G(s))] = \lim A/[s^2G(s)] \quad (2.74)$$

Η ποσότητα $\lim [s^2 G(s)] = K_a$ ονομάζεται **σταθερά σφάλματος επιταχύνσεως** (acceleration error constant) και συμβολίζεται με K_a . Με τη βοήθεια της σχέσεως (2.69), αποδεικνύεται ότι:

για $N \leq 1$, $e_{ss}(t) = \infty$ και για $N=2$
 $e_{ss}(t) = A/K_a$ (2.75)

Στον πίνακα 2.4.1 συνοψίζονται οι σχέσεις του σφάλματος μόνιμης καταστάσεως, με τους συντελεστές K_p , K_v , K_a για τις τρεις εισόδους και τους τρεις τύπους συστημάτων.

Όπως τονίσαμε, η προσπάθεια για τη σχεδίαση ενός συστήματος ελέγχου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε, το σύστημα να έχει το ελάχιστο δυνατό σφάλμα μόνιμης καταστάσεως. Η απαίτηση αυτή οδηγεί πολλές φορές στην επιλογή μικρού συντελεστή αποσβέσεως (ζ), που σημαίνει ότι το σύστημα θα

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4.1.

Σφάλμα μόνιμης καταστάσεως για διάφορες μορφές εισόδου και τύπους συστημάτων ($H=1$).

Τύπος συστήματος	Βηματική είσοδος	Γραμμική είσοδος	Παραβολική είσοδος
0	$A(1+K_p)$	∞	∞
1	0	A/K_v	∞
2	0	0	A/K_a

έχει πολλές ταλαντώσεις, μία κατάσταση που είναι ανεπιθύμητη. Θα πρέπει συνεπώς στις περιπτώσεις αυτές να γίνει ο κατάλληλος συμβιβασμός, δηλαδή να πάρουμε το ελάχιστο σφάλμα με το ελάχιστο επιτρεπτό ζ .

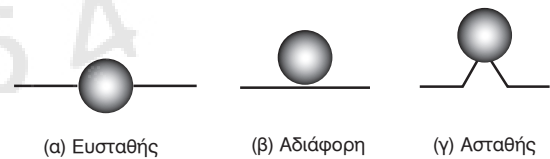
2.5 Ευστάθεια και μεταβατική συμπεριφορά.

2.5.1 Ευστάθεια (stability).

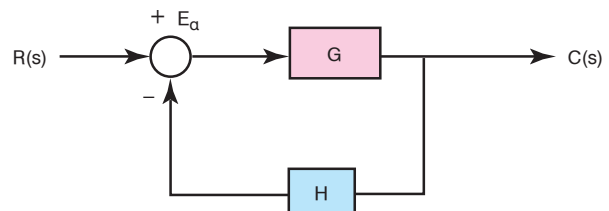
Ένα χαρακτηριστικό των συστημάτων κλειστού βρόχου είναι η πιθανότητα αστάθειάς τους, δηλαδή η έξοδος να αυξάνεται θεωρητικά επ' άπειρον. Στην πράξη, η αύξηση αυτή της εξόδου θα συνεχισθεί μέχρις ότου βρεθεί κάποια κατάσταση ισορροπίας, λόγω μη γραμμικότητας των εξαρτημάτων, ή μέχρι αυτοκαταστροφής του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι, αν εφαρμοσθεί μια περιορισμένη είσοδος ή διαταραχή στο σύστημα, η απόκρισή του θα είναι «εντός ορίων» και το σύστημα θα θεωρηθεί ευσταθές.

Η ευστάθεια είναι ένα φυσικό φαινόμενο. Για παράδειγμα στη σφαίρα του σχήματος 2.5α η περίπτωση (α) είναι ευσταθής, γιατί για οποιαδήποτε, εντός ορίων διαταραχή ή μετατόπιση η σφαίρα θα επιστρέψει στην αρχική της κατάσταση. Η ισορροπία της περιπτώσεως (β) είναι αδιάφορη, γιατί για οποιαδήποτε μετακίνηση ή διαταραχή, η σφαίρα κινείται, χωρίς να έχει την τάση να επιστρέψει στην αρχική της θέση. Τέλος η ισορροπία της περιπτώσεως (γ) είναι ασταθής, γιατί για οποιαδήποτε διαταραχή ή μετακίνηση, η σφαίρα τείνει να απομακρυνθεί από το σημείο ισορροπίας.

Παρόμοια είναι και η συμπεριφορά των δυναμικών συστημάτων. Στο σχήμα 2.5β επαναλαμβάνομε



Σχ. 2.5α.
Ευστάθεια σφαίρας.



Σχ. 2.5β.
Σύστημα κλειστού βρόχου.

τη γενική μορφή ενός συστήματος κλειστού βρόχου.

Η σχέση (2.59) μας δίνει για το σύστημα αυτό:

$$C(s) = \{G(s) / (1 + G H(s))\} R(s) \quad (2.76)$$

Είναι προφανές ότι η σχέση (2.76) θα πάρει τη μορφή:

$$C(s) = [p(s) / q(s)] R(s) \quad (2.77)$$

Εάν υποθέσουμε ότι η διέγερση στο σύστημα είναι η βηματική συνάρτηση $U(t)$, τότε έχουμε:

$$R(s) = L[U(t)] = 1/s \quad (2.78)$$

Αν αντικαταστήσουμε το $R(s)$ στη σχέση (2.77), θα πάρουμε:

$$C(s) = 1/s [p(s) / q(s)] \quad (2.79)$$

Η σχέση (2.79) μπορεί να αναπτυχθεί κατά το θεώρημα Heaviside, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} C(s) &= 1/s [p(s)/q(s)] = (\alpha_m s^m + \alpha_{m-1} s^{m-1} + \dots + \alpha_1 s + \alpha_0) / (s(b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0)) = \\ &= 1/b_n [K_0/s + K_1/s-s_1 + K_2/s-s_2 + \dots + K_n/s-s_n] \end{aligned} \quad (2.80)$$

Η συνάρτηση εξόδου θα είναι:

$$c(t) = L^{-1}[C(s)] = 1/b_n [K_0 + K_1 e^{s_1 t} + K_2 e^{s_2 t} + K_3 e^{s_3 t} + \dots + K_n e^{s_n t}] \quad (2.81)$$

Οι εκθέτες s_1, s_2, \dots, s_n είναι οι ρίζες του παρονομαστή της συνολικής συναρτήσεως μεταφοράς και όπως προκύπτει από τη σχέση (2.76), είναι οι ρίζες της συναρτήσεως $1+G(s)H(s)$, η οποία είναι η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος.

Για να μελετήσουμε το σύστημα, εστιάζουμε την προσοχή μας στην τυπική ρίζα:

$$s_k = \sigma_k + j\omega_k \quad (2.82)$$

Ο όρος της εξόδου στο διάστημα του χρόνου που αντιστοιχεί στην τυπική ρίζα θα είναι:

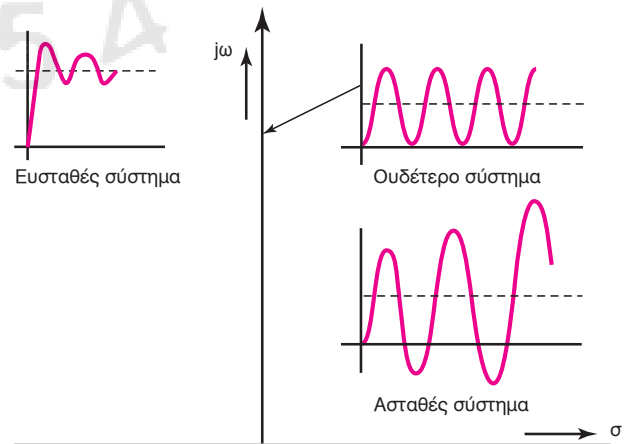
$$K_k/b_n e^{(\sigma_k + j\omega_k)t} = (K_k/b_n e^{\sigma_k t}) e^{j\omega_k t} \quad (2.83)$$

Από τη σχέση (2.83) προκύπτει ότι ο όρος αυτός θα αυξάνεται συνεχώς, όταν το σ_k είναι θετικός αριθμός ενώ θα μειώνεται συνεχώς, όταν είναι αρνητικός. Συνεπώς, δε μπορούμε να ανεχθούμε την κατάσταση $\sigma_k > 0$, γιατί τότε το σύστημα θα είναι ασταθές. Όταν το σ_k είναι μηδέν, θα έχουμε πάλι την περίπτωση που οδηγεί σε ταλαντώσεις σταθερού εύρους, κατάσταση την οποία επίσης θεωρούμε ασταθή. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο σχήμα 2.5γ, από το οποίο μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η θέση των πόλων του συστήματος στο επίπεδο s , καθορίζει την αντίστοιχη μεταβατική κατά-

σταση και την ευστάθεια. Όταν οι πόλοι βρίσκονται στο αριστερό ημιεπίπεδο s ($\sigma < 0$), η μεταβατική απόκριση εξασθενεί με το χρόνο, ενώ όταν οι πόλοι βρίσκονται στον άξονα $j\omega$, ή στο δεξιό ημιεπίπεδο s , η μεταβατική κατάσταση αντίστοιχα είναι σταθερή ή αυξάνεται με το χρόνο. Προκύπτει λοιπόν από όλα τα παραπάνω, ότι η επιθυμητή θέση των πόλων που είναι οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσώσεως, στο επίπεδο s , είναι το αριστερό ημιεπίπεδο και ακόμη ότι η ευστάθεια του συστήματος κρίνεται από τη θέση των πόλων της $C(s)$ στο επίπεδο s . Το συμπέρασμα λοιπόν είναι ότι η αναγκαία και ικανή συνθήκη ώστε ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου να είναι ευσταθές, είναι όλοι οι πόλοι της συνολικής συναρτήσεως μεταφοράς του συστήματος να έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος.

Το γεγονός ότι καταλήξαμε στο παραπάνω συμπέρασμα, υποθέτοντας ότι η διέγερση είναι βηματική, δεν μειώνει τη γενικότητα του συμπεράσματος, γιατί θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε οποιαδήποτε άλλη διέγερση, π.χ. ημιτονοειδή, αφού η διέγερση επηρεάζει μόνο τη μόνιμη κατάσταση και όχι το μεταβατικό φαινόμενο. Στην περίπτωση αυτή οι κυματομορφές του σχήματος 2.5γ θα ήταν διαφορετικές αλλά οι συνθήκες ευστάθειας του συστήματος οι ίδιες.

Για να μελετήσουμε και να εξασφαλίσουμε την ευστάθεια ενός συστήματος, θα πρέπει να βρούμε τις ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσώσεως $q(s)$, εργασία που είναι κουραστική, όταν ο βαθμός της εξίσώσεως είναι μεγαλύτερος του δύο. Για το λόγο αυτό, έχουν επινοηθεί μέθοδοι, με τις οποίες μπορούμε να βρούμε, αν το σύστημα είναι ευσταθές ή όχι, χωρίς να λύ-



Σχ. 2.5γ.

Ευστάθεια συστήματος στο επίπεδο s για βηματική διέγερση.

σομε την εξίσωση. Μια τέτοια μέθοδος είναι το κριτήριο του Routh, που θα αναλύσουμε παρακάτω.

Άμεσα σχετιζόμενη με το θέμα της ευστάθειας είναι η επιλογή των διαφόρων παραμέτρων του συστήματος, ώστε αυτό να είναι ευσταθές. Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα της αστάθειας: η προσέγγιση στο επίπεδο s και η προσέγγιση στο διάστημα της συχνότητας. Υπάρχει ωστόσο και η προσέγγιση στο διάστημα του χρόνου που εφαρμόζεται σε περισσότερα πολύπλοκα συστήματα, όπως είναι αυτά που έχουν περισσότερες της μιας εισόδου ή μεταβλητά με το χρόνο εξαρτήματα.

2.5.2 Κριτήριο Routh.

Το κριτήριο Routh μας επιτρέπει να εξακριβώσουμε, αν ένα σύστημα είναι ευσταθές ή ασταθές. Το κριτήριο προσδιορίζει, αν η χαρακτηριστική εξίσωση (2.27)

$$X(s) = q(s) = \alpha_n s^n + \dots + \alpha_1 s + \alpha_0 = 0$$

έχει ρίζες με θετικό ή αρνητικό πραγματικό μέρος, χωρίς να χρειάζεται να βρούμε αυτές τις ρίζες και τη χρονική απόκριση.

Η διαδικασία που απαιτείται είναι η ακόλουθη:

Εφόσον όλοι οι συντελεστές της χαρακτηριστικής εξισώσεως (2.27) είναι ομόσημοι, τους κατατάσσουμε σε έναν πίνακα (πίνακας 2.5.1):

όπου :

$$b_{n-1} = \frac{\alpha_{n-1}\alpha_{n-2} - \alpha_n\alpha_{n-3}}{\alpha_{n-1}} \quad (2.84)$$

$$b_{n-3} = \frac{\alpha_{n-1}\alpha_{n-4} - \alpha_n\alpha_{n-5}}{\alpha_{n-1}} \quad (2.85)$$

$$c_{n-1} = \frac{b_{n-1}\alpha_{n-3} - \alpha_{n-1}b_{n-3}}{b_{n-1}} \quad (2.86)$$

Το κριτήριο Routh (πίνακας 2.5.2) ορίζει ότι, για να είναι ευσταθές ένα σύστημα, πρέπει οι όροι της πρώτης στήλης του πίνακα Routh να είναι ομόσημοι. Ο αριθμός των ριζών της χαρακτηριστικής εξισώσεως που βρίσκονται στο δεξιό ημιεπίπεδο s ισούται με τον αριθμό αλλαγών του προσήμου των συντελεστών της πρώτης στήλης του πίνακα Routh.

2.5.3 Σχετική ευστάθεια.

Μέχρι τώρα ασχοληθήκαμε με το ερώτημα πότε ένα σύστημα είναι ευσταθές ή ασταθές. Εξετάσαμε

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5.1.

Πίνακας Routh.

s^n	α_n	α_{n-2}	α_{n-4}	...
s^{n-1}	α_{n-1}	α_{n-3}	α_{n-5}	...
s^{n-2}	b_{n-1}	b_{n-3}	b_{n-5}	...
s^{n-3}	c_{n-1}	c_{n-3}	c_{n-5}	...
				πρώτη στήλη
				←
s^1	g_{n-1}			
s^0	h_{n-1}			

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5.2.

Ειδικές περιπτώσεις κριτηρίου Routh.

α/α	Περιπτώσεις
1.	Τουλάχιστον δύο σειρές έχουν μηδενικούς όρους, οπότε το σύστημα είναι ασταθές και η χαρακτηριστική εξίσωση έχει δύο αντίθετους πραγματικούς πόλους.
2.	Όλοι οι όροι μιας σειράς του πίνακα είναι μηδενικοί, οπότε ο πίνακας συμπληρώνεται με τους όρους της αμέσως προηγούμενης σειράς.
3.	Ένας όρος της πρώτης στήλης είναι μηδέν και οι υπόλοιποι διάφοροι του μηδενός ή δεν υπάρχουν. Τότε αντικαθίσταται ο μηδενικός όρος από ένα πολύ μικρό αριθμό, ομόσημο με τους προηγούμενους της πρώτης στήλης και συνεχίζεται η ανάπτυξη του πολυωνύμου.

δηλαδή την **απόλυτη ευστάθεια** (absolute stability) συστήματος. Στην πράξη όμως θα πρέπει να βρούμε πόσο ευσταθές είναι ένα σύστημα, δηλαδή ποια είναι η **σχετική ευστάθειά** (relative stability) του.

Σχετική ευστάθεια ονομάζεται το χαρακτηριστικό το οποίο καθορίζει το σχετικό χρόνο αποκαταστάσεως της κάθε ρίζας ή του κάθε ζεύγους ριζών της χαρακτηριστικής εξισώσεως (2.27). Είναι φανερό ότι αυτό προσδιορίζεται από το μέγεθος του πραγματικού μέρους της κάθε ρίζας. Όσο περισσότερο αρνητικό είναι το πραγματικό μέρος μιας ρίζας, τόσο περισσότερο συντελεί στην ευστάθεια του συστήματος.

Η σχετική ευστάθεια, που στο επίπεδο του χρόνου μπορεί να καθορισθεί βάζοντας όρια στην υπερύψωση, στους χρόνους ανυψώσεως και αποκαταστάσεως κ.ά., στο επίπεδο s μπορεί να καθορισθεί ορίζοντας μια **συγκεκριμένη περιοχή** σχετικής ευστάθειας μέσα στο αρνητικό ημιεπίπεδο του s (σχ. 2.5δ).

2.5.4 Κριτήριο Nyquist.

Το κριτήριο ευστάθειας Nyquist βασίζεται στη συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου, για ένα ειδικό κλειστό δρόμο που ονομάζεται **δρόμος Nyquist** στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας s (δεξιό ημιεπίπεδο). Δίνει μάλιστα πληροφορίες για την ευστάθεια (απόλυτη και σχετική) των συστημάτων κλειστού βρόχου. Ο δρόμος Nyquist (σχ. 2.5ε) διανύεται δεξιόστροφα, και περιλαμβάνει ολόκληρο τον άξονα $j\omega$ από $-\infty$ έως $+\infty$ και μια ημικυκλική διαδρομή με άπειρη ακτίνα στο δεξιό ημιεπίπεδο.

α) Κριτήριο Nyquist για απόλυτη ευστάθεια.

Ισχύει: $Z=N+P$

όπου:

P ο αριθμός πόλων της $G(s)H(s)$ στο δεξιό μιγαδικό ημιεπίπεδο s .

N ο αριθμός περικυκλώσεων του σημείου $(-1,0)$ δεξιόστροφα από την $G(j\omega)H(j\omega)$.

Z οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης $1+G(s)H(s)=0$ στο δεξιό μιγαδικό ημιεπίπεδο s .

Έτσι, για να είναι ένα ευσταθές σύστημα κλειστού βρόχου πρέπει να ισχύει:

$N = -P$ όπου $Z=0$

και το περίγραμμα $G(j\omega)H(j\omega)$ περικυκλώνει το σημείο $(-1,0)$, με φορά αριστερόστροφη. Το σημείο $-1+j0=(-1,0)$ ονομάζεται **κρίσιμο σημείο**.

β) Κριτήριο Nyquist για σχετική ευστάθεια.

Με βάση αυτό το κριτήριο, μπορούμε να ορίσουμε με ακρίβεια συγκεκριμένα τη σχετική ευστάθεια ενός κλειστού συστήματος (σχ. 2.5στ).

Σχετικά ευσταθές είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου με:

$G(j\omega)=M(\omega)e^{j\Phi(\omega)} = x+jy$ (2.87)

Όταν:

Για $M(\omega_0)=1$
είναι $|\Phi(\omega_0)| < 180^\circ$

2.5.5 Μεταβατική συμπεριφορά.

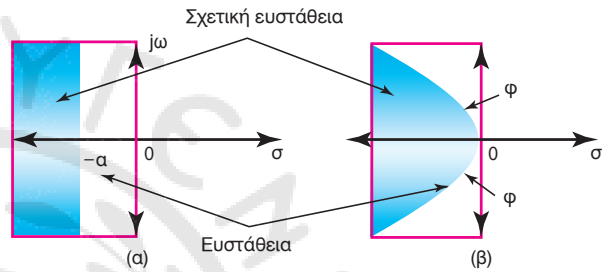
Τα συστήματα με σταθερή ή περιοδική είσοδο

οδηγούνται μετά από μια μεταβατική φάση σε μια μόνιμη κατάσταση.

Μεταβατική απόκριση (transient response) ονομάζουμε εκείνο το τμήμα της χρονικής αποκρίσεως ενός συστήματος που τείνει στο μηδέν, όταν ο χρόνος τείνει στο άπειρο, δηλαδή στην αρχική φάση.

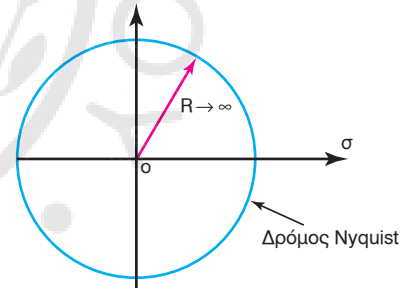
Μόνιμη απόκριση (steady state response) είναι εκείνο το τμήμα της χρονικής αποκρίσεως που δεν τείνει στο μηδέν, όταν ο χρόνος τείνει στο άπειρο, δηλαδή παραμένει ως απόκριση της μόνιμης καταστάσεως του συστήματος.

Έτσι η **ολική χρονική απόκριση** ενός γραμμικού

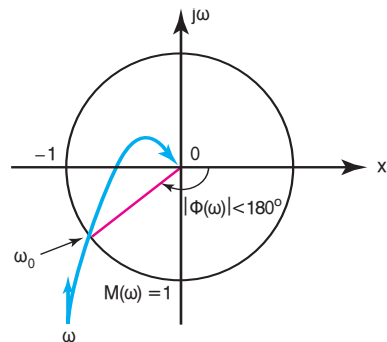


Σχ. 2.5δ.

α) Σχετική ευστάθεια με πόλους p (για $Re(p) < -a$). β) Σχετική ευστάθεια με πόλους $p = \sigma + j\omega$ (για $\sigma/\omega = \epsilon\phi\phi$).



Σχ. 2.5ε.
Δρόμος Nyquist.



Σχ. 2.5στ.
Σχετική ευστάθεια με κριτήριο Nyquist.

συστήματος είναι το άθροισμα της μεταβατικής και της μόνιμης αποκρίσεώς του.

$$Y(t) = y_{\text{μεταβ.}}(t) \Big|_{\lim_{t \rightarrow \infty} Y_{\mu=0}} + y_{\text{μόνιμη}}(t)$$



Σχ. 2.6α.
Αρμονική απόκριση.

2.6 Αρμονική απόκριση.

2.6.1 Γενικά.

Με τον όρο *απόκριση συχνότητας* (επίπεδο συχνότητας) εννοούμε τη χρονική απόκριση της μόνιμης καταστάσεως γραμμικού, χρονικά αμετάβλητου συστήματος, του οποίου η είσοδος είναι ένα ημιτονοειδές σήμα σταθερού εύρους και μεταβαλλόμενης συχνότητας. Όπως δείξαμε στην παράγραφο 2.2 «Συνάρτηση μεταφοράς» υπάρχει και μια άλλη εκδοχή της συναρτήσεως μεταφοράς, η *αρμονική συνάρτηση μεταφοράς* $[G(j\omega)]$, η οποία είναι η συμπεριφορά του συστήματος στο επίπεδο της μιγαδικής συχνότητας. Η αρμονική συνάρτηση μεταφοράς προκύπτει από τη συνάρτηση μεταφοράς για $s = j\omega$, και καθορίζει το μέτρο και τη φάση της αρμονικής αποκρίσεως του συστήματος (σχ. 2.6α).

2.6.2 Διαγράμματα μέτρον - φάσεως.

Το μέτρο και η φάση της αρμονικής αποκρίσεως ενός συστήματος, είναι συναρτήσεις της *συχνότητας* ω , με την οποία διεγείρεται το σύστημα, και καθορίζουν τη συμπεριφορά του συστήματος στο επίπεδο της συχνότητας. Η συμπεριφορά αυτή παριστάνεται γραφικά με τα *διαγράμματα μέτρον και φάσεως* της αρμονικής αποκρίσεως του συστήματος (σχ. 2.6β και 2.6γ).

Ένα σύστημα με συνάρτηση μεταφοράς που αναλύεται σε παράγοντες κέρδους, ριζών και πόλων ορίζεται από τη σχέση (2.88):

$$G(s) = K \frac{P(s)}{Q(s)} = K \frac{(s - z_1) \dots (s - z_m)}{(s - p_1) \dots (s - p_n)} \quad (2.88)$$

και με αρμονική συνάρτηση μεταφοράς

$$G(j\omega) = K \frac{(j\omega - z_1) \dots (j\omega - z_m)}{(j\omega - p_1) \dots (j\omega - p_n)} \quad (2.89)$$

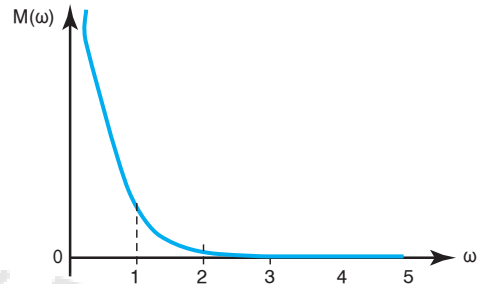
οπότε θα έχουμε:

Σχέση μέτρον: $M = M(\omega) = |G(j\omega)| \quad (2.90)$

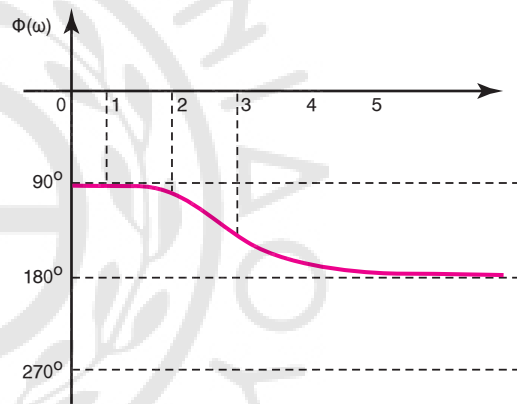
Σχέση φάσεων:

$$\Phi = \Phi(\omega) = \angle G(j\omega) = \Phi_K + \Phi_{z_1} + \dots + \Phi_{z_m} - \Phi_{p_1} - \dots - \Phi_{p_n} \quad (2.91)$$

Τα αρμονικά διαγράμματα αποτελούν παραστα-



Σχ. 2.6β.
Αρμονικό διάγραμμα μέτρον.



Σχ. 2.6γ.
Αρμονικό διάγραμμα φάσεως.

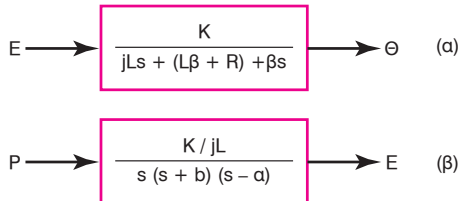
τική ένδειξη της συμπεριφοράς του συστήματος στις διάφορες συχνότητες ω .

2.7 Άλγεβρα βαθμίδων και διαγραμμάτων ροής σημάτων.

2.7.1 Άλγεβρα βαθμίδων.

Με τη χρήση των βαθμίδων (λειτουργικά διαγράμματα) για την παρουσίαση των χαρακτηριστικών εισόδου-εξόδου ενός φυσικού συστήματος είναι στενά συνδεδεμένο ένα σύνολο διαδικασιών που αναφέρονται ως *άλγεβρα βαθμίδων* ή *λειτουργικών διαγραμμάτων* (block diagram Algebra). Ουσιαστικά πρόκειται για μια γραφική διαδικασία χειρισμού των αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτουν από το

μετασχηματισμό Laplace. Επομένως, οι βαθμίδες αυτές βοηθούν συχνά στην εύρεση της συναρτήσεως μεταφοράς ενός σύνθετου φυσικού συστήματος. Συνδυάζουν τις βαθμίδες διαφόρων τμημάτων του φυσικού συστήματος, για να σχηματίσουν το γενικό λειτουργικό διάγραμμα εισόδου-εξόδου, άρα και τη συνάρτηση μεταφοράς (σχ. 2.7α).

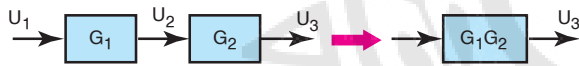


Σχ. 2.7α.

Βαθμίδα ενός συστήματος. α) Πολωνυμική μορφή. β) Μορφή σε γινόμενο παραγόντων.

Επιπρόσθετα, η άλγεβρα βαθμίδων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις φάσεις ανάλυσεως και σχεδιάσεως ενός προβλήματος ελέγχου, για να αποκτήσει το σύστημα κάποια ιδιαίτερα πλεονεκτική μορφή. Στην άλγεβρα βαθμίδων ισχύουν οι εξής περιπτώσεις:

1) Βαθμίδες στη σειρά (σχ. 2.7β).



Σχ. 2.7β.

Βαθμίδες στη σειρά.

Δυο βαθμίδες στη σειρά έχουν τις παρακάτω σχέσεις:

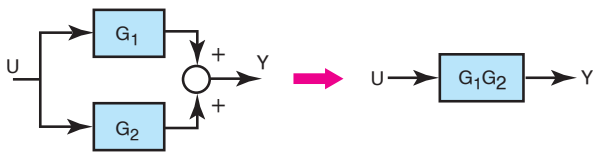
$$U_2 = G_1 \cdot U_1, \quad U_3 = G_2 \cdot U_2 \Rightarrow \quad (2.92)$$

$$\Rightarrow U_3 = G_1 \cdot G_2 \cdot U_1$$

Άρα η ολική συνάρτηση μεταφοράς δυο βαθμίδων στη σειρά είναι:

$$G = G_1 G_2 \quad (2.93)$$

2) Βαθμίδες παράλληλα (σχ. 2.7γ).



Σχ. 2.7γ.

Βαθμίδες παράλληλα.

Δυο βαθμίδες συνδεδεμένες παράλληλα διέπονται από τις παρακάτω σχέσεις:

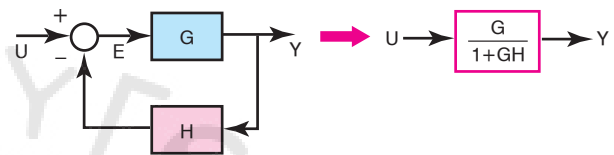
$$Y_1 = G_1 \cdot U, \quad Y_2 = G_2 \cdot U \Rightarrow \quad (2.94)$$

$$\Rightarrow Y = Y_1 + Y_2 = (G_1 + G_2) \cdot U$$

Άρα η ολική συνάρτηση μεταφοράς δυο βαθμίδων, συνδεδεμένων παράλληλα είναι:

$$G = G_1 + G_2 \quad (2.95)$$

3) Βαθμίδα κλειστού βρόχου (σχ. 2.7δ).



Σχ. 2.7δ.

Βαθμίδα κλειστού βρόχου.

Σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου ισχύουν:

α) Με αρνητική ανάδραση.

$$Y = GE, \quad E = U - HY$$

$$\text{οπότε ισχύει: } Y = G(U - HY) = GU - GHY \Rightarrow$$

$$GU = (1 + GH)Y$$

Άρα η ολική συνάρτηση μεταφοράς θα είναι:

$$G_{ολ} = \frac{G}{1 + GH} \quad (2.96)$$

β) Με θετική ανάδραση.

$$Y = GE, \quad E = U + HY$$

$$Y = G(U + HY) = GU + GHY \Rightarrow$$

$$\Rightarrow GU = (1 - GH)Y$$

Άρα η ολική συνάρτηση μεταφοράς θα είναι:

$$G_{ολ} = \frac{G}{1 - GH} \quad (2.97)$$

γ) Μοναδιαία ανάδραση (H=1).

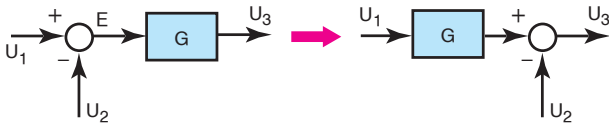
Η ολική συνάρτηση είναι:

$$G_{ολ} = \frac{G}{1 + G} \quad (2.98)$$

4) Μετασχηματισμός διαγραμμάτων βαθμίδων.

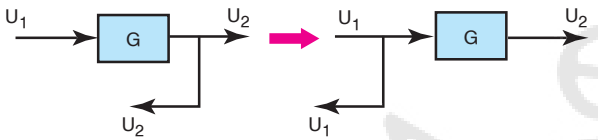
Η εφαρμογή των αλγεβρικών σχέσεων μεταξύ των βαθμίδων επιτρέπει το μετασχηματισμό ορισμένων συνθέτων διαγραμμάτων βαθμίδων.

α) **Μετακίνηση σημείου αθροίσεως μετά από μια βαθμίδα** (σχ. 2.7ε).



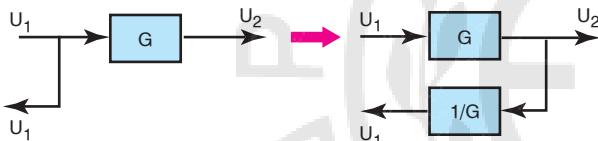
Σχ. 2.7ε.

β) **Μετακίνηση σημείου λήψεως πριν από μια βαθμίδα** (σχ. 2.7στ).



Σχ. 2.7στ.

γ) **Μετακίνηση σημείου λήψεως μετά από μια βαθμίδα** (σχ. 2.7ζ).



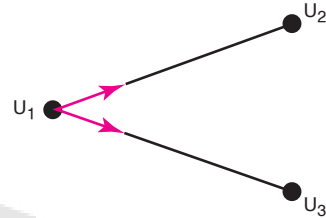
Σχ. 2.7ζ.

Ο κλάδος συνδέει δύο κόμβους και ενεργεί ως πολλαπλασιαστής σήματος (σχ. 2.7ια).

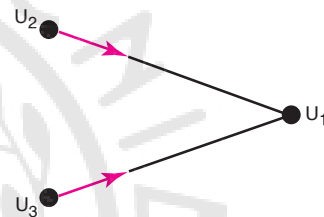
Ισχύει: $U_2 = AU_1$

Βρόχος είναι η κλειστή διαδρομή που αρχίζει και καταλήγει στον ίδιο κόμβο (σχ. 2.7ιβ).

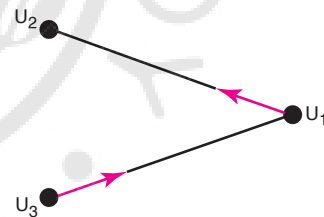
Η μετάβαση από τη συνάρτηση μεταφοράς στο



Σχ. 2.7η.
Κόμβος εισόδου.



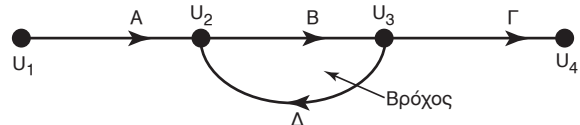
Σχ. 2.7θ.
Κόμβος εξόδου.



Σχ. 2.7ι.
Μικτός κόμβος.



Σχ. 2.7ια.
Πολλαπλασιαστής σήματος.



Σχ. 2.7ιβ.
Βρόχος.

2.7.2 **Άλγεβρα διαγραμμάτων ροής σημάτων.**

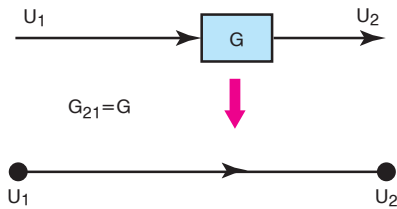
Η θεωρία τους αναπτύχθηκε από τον S.J.Mason και εφαρμόζεται σε κάθε σύστημα χωρίς να χρειάζεται να γίνει απλοποίηση. Τα διαγράμματα ροής σημάτων είναι η γραφική απεικόνιση ενός συνόλου γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων της μιγαδικής μεταβλητής s και παρέχουν μια εποπτική εικόνα του συστήματος ελέγχου.

Ένα διάγραμμα ροής αποτελείται από κόμβους, κλάδους και βρόχους. Ο κάθε κόμβος παριστάνει ένα σήμα (μεταβλητή) και ανήκει σε μια από τις παρακάτω τρεις κατηγορίες:

- 1) **Κόμβος εισόδου:** Είναι ο κόμβος από τον οποίο ξεκινούν ένας ή περισσότεροι κλάδοι και στον οποίο δεν καταλήγει κανένας κλάδος (σχ. 2.7η).
- 2) **Κόμβος εξόδου:** Είναι ο κόμβος, στον οποίο καταλήγουν ένας ή περισσότεροι κλάδοι και από τον οποίο δεν ξεκινάει κανένας κλάδος (σχ. 2.7θ).
- 3) **Μικτός κόμβος:** Είναι ο κόμβος, στον οποίο εισέρχονται και εξέρχονται κλάδοι (σχ. 2.7ι).

διάγραμμα ροής συμβολίζεται μαθηματικά με τη σχέση (σχ. 2.7γ):

$$U_2 = G_{21} U_1$$



Σχ. 2.7γ. Διάγραμμα ροής.

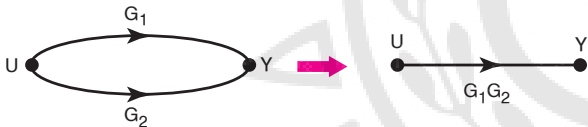
Στην άλγεβρα διαγραμμάτων ροής ισχύουν οι παρακάτω περιπτώσεις (σε αντιστοιχία με την άλγεβρα βαθμίδων):

α) Σύνδεση σε σειρά (σχ. 2.7ιδ).



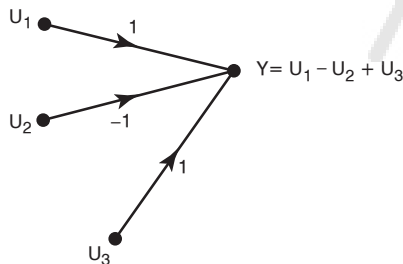
Σχ. 2.7ιδ. Σύνδεση σε σειρά.

β) Σύνδεση παράλληλα (σχ. 2.7ιε).



Σχ. 2.7ιε. Σύνδεση παράλληλα.

γ) Σημείο αθροίσεως (σχ. 2.7ιστ).



Σχ. 2.7ιστ. Σημείο αθροίσεως.

Εξίσωση Mason.

Η εξίσωση αυτή δίνει τη συνολική συνάρτηση μεταφοράς ενός διαγράμματος ροής σημάτων, χω-

ρίς να είναι απαραίτητο να περάσουμε από τα στάδια γραφικής απλοποιήσεως. Η εξίσωση αυτή χρησιμεύει ιδιαίτερα για συστήματα πολύπλοκα και στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως **θεώρημα Mason**.

Η εξίσωση του Mason είναι:

$$T = \frac{1}{\Delta_n} \sum T_n \Delta_n \tag{2.99}$$

όπου:

T η μεταφορά εισόδου-εξόδου.

Δ η ορίζουσα του διαγράμματος και δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta = 1 - \Sigma L_1 + \Sigma L_2 - \Sigma L_3 + \dots \tag{2.100}$$

για τις ακόλουθες περιπτώσεις (πίνακας 2.7.1):

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.7.1.
Παράμετροι ορίζουσας Δ.

ΣL_1	Άθροισμα των κερδών (L_1) όλων των βρόχων του διαγράμματος ροής.
ΣL_2	Άθροισμα των γινομένων των κερδών (L_2) όλων των βρόχων του διαγράμματος ροής ανά δύο που να μην εφάπτονται.
ΣL_3	Άθροισμα των γινομένων των κερδών (L_3) όλων των βρόχων του διαγράμματος ροής ανά τρεις που να μην εφάπτονται μεταξύ τους.

T_n είναι η μεταφορά του νιοστού απ' ευθείας δρόμου, που συνδέει είσοδο με έξοδο.

Δ_n είναι η τιμή της Δ χωρίς να λάβομε υπόψη τους βρόχους που εφάπτονται στη n-οστή προς τα εμπρός διαδρομή.

2.8 Παραδείγματα.

1. Να βρεθεί ο μετασχηματισμός Laplace της συναρτήσεως δ(t) ή συναρτήσεως Dirac.

Λύση:

Ως συνάρτηση δ(t) ορίζουμε τη συνάρτηση του χρόνου, που έχει μηδενική τιμή, όταν t διάφορο του μηδενός και μοναδιαία επιφάνεια, όταν t=0. Άρα έχουμε τις εξής συνθήκες:

$$\delta(t) = 0, \quad t \neq 0$$

$$\int_{0^-}^{0^+} \delta(t) dt = 1$$

Επομένως:

$$F(s) = L[\delta(t)] = \int_0^{\infty} \delta(t) e^{-st} dt = \int_{0^-}^{0^+} \delta(t) e^{-s \cdot 0} + \int_0^{\infty} 0 e^{-st} dt = 1$$

Άρα: $L[\delta(t)] = 1$

2. Να βρεθεί ο μετασχηματισμός Laplace της συναρτήσεως $f(t) = e^{-\alpha t}$, $t \geq 0$, $\alpha > 0$.

Λύση:

$$F(s) = L(e^{-\alpha t}) = \int_0^{\infty} e^{-\alpha t} e^{-st} dt = \int_0^{\infty} e^{-(\alpha+s)t} dt = \left[\frac{-1}{\alpha+s} e^{-(\alpha+s)t} \right]_0^{\infty} =$$

$$= \frac{-1}{\alpha+s} \lim_{t \rightarrow \infty} \left[e^{-(\alpha+s)t} \right]_0^{\infty} = \frac{-1}{\alpha+s} \left[\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-(\alpha+s)t} - 1 \right] = \frac{1}{s+\alpha}$$

Άρα $L(e^{-\alpha t}) = \frac{1}{s+\alpha}$

3. Να βρεθεί ο μετασχηματισμός Laplace της συναρτήσεως $f(t) = \eta \mu \alpha t$, $t \geq 0$.

Λύση:

$$L(\eta \mu \alpha t) = \int_0^{\infty} \eta \mu \alpha t e^{-st} dt = \lim_{\alpha \rightarrow 0} \left[\frac{1}{s^2 + \alpha^2} e^{-st} (-s \eta \mu \alpha t - \alpha \sigma \nu \alpha t) \right]_0^{\infty} =$$

$$= \lim_{\alpha \rightarrow 0} \left[\frac{1}{s^2 + \alpha^2} e^{-s \cdot \infty} (-s \eta \mu \alpha \cdot \infty - \alpha \sigma \nu \alpha \cdot \infty) + \frac{\alpha}{s^2 + \alpha^2} \right] = \frac{\alpha}{s^2 + \alpha^2}$$

Άρα $L(\eta \mu \alpha t) = \frac{\alpha}{s^2 + \alpha^2}$

Όμοια επιλύεται και η συνάρτηση $f(t) = \sigma \nu \alpha t \Rightarrow L(\sigma \nu \alpha t) = \frac{s}{s^2 + \alpha^2}$.

4. Να βρεθεί ο αντίστροφος μετασχηματισμός Laplace: $L^{-1} \left\{ \frac{7}{s-2} - \frac{1}{s+1} \right\}$.

Λύση:

Θα έχουμε: $L^{-1} \left(\frac{7}{s-2} \right) - L^{-1} \left(\frac{1}{s+1} \right) = 7e^{2t} - e^{-t}$

Άρα $L^{-1} \left(\frac{7}{s-2} - \frac{1}{s+1} \right) = 7e^{2t} - e^{-t}$

5. Να βρεθεί ο αντίστροφος μετασχηματισμός Laplace (με τη μέθοδο Heaviside) της συναρτήσεως:

$$F(s) = \frac{3s^2 - 6}{s^3 - 7s^2 + 7s + 15}$$

Λύση:

Η δοσμένη συνάρτηση γράφεται ως: $F(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{3s^2 - 6}{s^3 - 7s^2 + 7s + 15}$ (1)

Είναι $P(s) = 3s^2 - 6$, και $Q(s) = s^3 - 7s^2 + 7s + 15$ και η παράγωγος της $Q(s)$ είναι $Q'(s) = 3s^2 - 14s + 7$.
Οι ρίζες της $Q(s)$ είναι $\rho_1 = -1$, $\rho_2 = 3$, $\rho_3 = 5$.

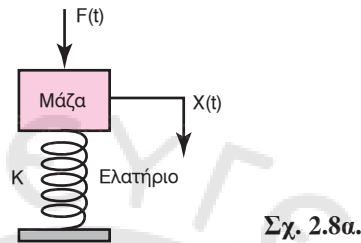
Αν αντικαταστήσουμε στην (1) όπου s τις τιμές διαδοχικά -1 , 3 , 5 θα έχουμε:

$$F(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \frac{3s^2 - 6}{s^3 - 7s^2 + 7s + 15} \Rightarrow F(s) = -\frac{1}{8} \frac{1}{s+1} - \frac{21}{8} \frac{1}{s-3} + \frac{69}{12} \frac{1}{s-5}$$

Άρα θα είναι:

$$L^{-1}[F(s)] = -\frac{1}{8} L^{-1}\left(\frac{1}{s+1}\right) - \frac{21}{8} L^{-1}\left(\frac{1}{s-3}\right) + \frac{69}{12} L^{-1}\left(\frac{1}{s-5}\right) = -\frac{1}{8} e^{-t} - \frac{21}{8} e^{3t} + \frac{69}{12} e^{5t} = f(t)$$

6. Να βρεθεί η συνάρτηση μεταφοράς του παρακάτω συστήματος (σχ. 2.8α):



Σχ. 2.8α.

Λύση:

Θεωρούμε ως φυσικό σύστημα μια ταλαντευόμενη μάζα M επί ελατηρίου ελαστικότητας K . Η διαφορική εξίσωση του συστήματος είναι:

$$M \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) + Kx(t) = f(t)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος είναι:

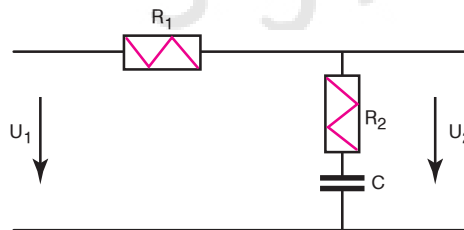
$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = 1/(Ms^2 + K)$$

Η απεικόνιση του συστήματος (ταλαντευόμενη μάζα) είναι (σχ. 2.8β):



Σχ. 2.8β.

7. Να βρεθεί η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος του σχήματος 2.8γ:



Σχ. 2.8γ.

Λύση:

Το ηλεκτρικό κύκλωμα του σχήματος 2.8γ είναι ένα κύκλωμα ολοκληρώσεως με καθυστέρηση φάσεως (Lag circuit). Οπότε έχουμε (Νόμος Kirchhoff):

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2 + 1/Cs}{R_1 + R_2 + 1/Cs} = \frac{1 + R_2Cs}{1 + (R_1 + R_2)Cs}$$

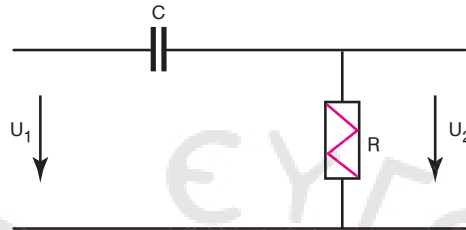
Η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$G(s) = \frac{1+Ts}{1+\alpha Ts} = \frac{1}{\alpha} \frac{s+1/T}{s+1/\alpha T}$$

όπου:

$$\alpha = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \geq 1, \text{ σταθερά χρόνου } T = R_2 C.$$

8. Να βρεθεί η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος του σχήματος 2.8δ:



Σχ. 2.8δ.

Λύση:

Το ηλεκτρικό κύκλωμα του σχήματος 2.8δ είναι ένα κύκλωμα διαφορίσεως (differential circuit). Οπότε έχουμε (Νόμος Kirchoff):

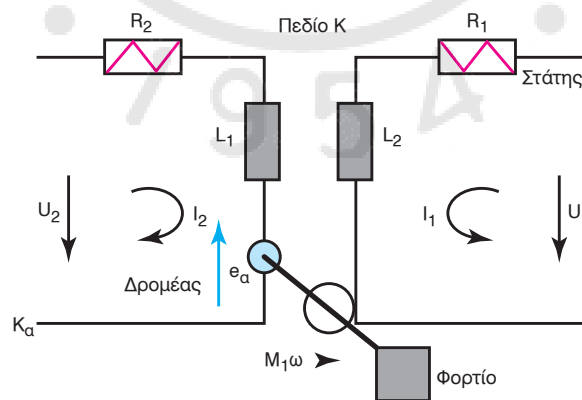
$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R}{1/Cs + R} = \frac{RCs}{1 + RCs}$$

Η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$G(s) = \frac{Ts}{1 + Ts}$$

όπου σταθερά χρόνου $T = RC$.

9. Να βρεθεί η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος του σχήματος 2.8ε:



Σχ. 2.8ε.

Λύση:

Το κύκλωμα του σχήματος 2.8ε είναι ένας ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος (DC) με διέγερση από το δρομέα. Στα άκρα του δρομέα επιδρά μια δύναμη που ονομάζεται ανηλεκτρεγερτική και συμβολίζεται με e_α ανάλογη των στροφών του κινητήρα ($e_\alpha = K_\alpha \omega$).

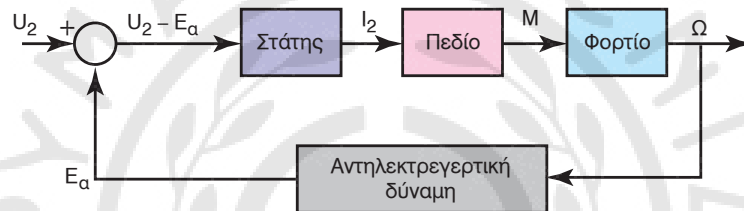
Τα επιμέρους τμήματα του κυκλώματος έχουν τις παρακάτω σχέσεις:

α/α	Τμήμα	Μαθηματικό μοντέλο (διαφορική εξίσωση)	Μετασχηματισμός Laplace
1.	Δρομέας	$U_2 - e_a = L_2 \frac{di_2}{dt} + r_2 i_2$	$U_2 - E_a = (L_2 s + R_2) I_2$
2.	Πεδίο	$M = K i_2$	$M = K I_2$
3.	Φορτίο	$M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega$	$M = (J s + B) \Omega$

Η ολική συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$G(s) = \frac{\Omega}{U_2} = \frac{K}{K K_a + (L_2 s + R_2)(J s + B)}$$

Ακολουθεί η απεικόνιση του συστήματος (σχ. 2.8στ):



Σχ. 2.8στ.

10. Δίνεται η παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς συστήματος ανοικτού βρόχου με μοναδιαία ανάδραση ($H=1$):

$$G(s) = \frac{k}{s(Ts+1)}$$

Να βρεθούν :

- Τι τάξεως σύστημα είναι;
- Με ποιο παράγοντα πρέπει να πολλαπλασιασθεί η σταθερά χρόνου T ώστε ο συντελεστής αποσβέσεως ζ να μειωθεί από 0,8 σε 0,4;

Λύση:

- α) Δίνεται η συνάρτηση μεταφοράς:

$$G(s) = \frac{k}{s(Ts+1)}$$

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου αφού το σύστημα έχει μοναδιαία ανάδραση είναι:

$$F(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{k}{Ts^2 + s + k} = \frac{k/T}{s^2 + \frac{1}{T}s + \frac{k}{T}}$$

Άρα το σύστημα είναι δεύτερης τάξεως οπότε:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{T}} \quad \text{φυσική συχνότητα}$$

και k : σταθερά ενισχύσεως,

$$\zeta = \frac{1}{2T\omega_n} = \frac{1}{2\sqrt{kT}} \text{ συντελεστής αποσβέσεως.}$$

β) Για συντελεστές αποσβέσεως $\zeta_1=0,8$ και $\zeta_2=0,4$ με την ίδια σταθερά ενισχύσεως k έχουμε:

$$\left. \begin{aligned} \zeta_1 &= \frac{1}{2\sqrt{kT_1}} \\ \zeta_2 &= \frac{1}{2\sqrt{kT_2}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} = \frac{0,8}{0,4} = 2 \Rightarrow T_2 = 4T_1$$

11. Να εφαρμοστεί το κριτήριο του Routh στη χαρακτηριστική εξίσωση:

$$X(s) = s^4 + 2s^3 + 3s^2 + 8s + 2 = 0$$

Λύση:

Κατασκευάζουμε τον πίνακα Routh:

1 ^η σειρά	1	3	2
2 ^η σειρά	2	8	0
3 ^η σειρά	-1	2	0
4 ^η σειρά	12		
5 ^η σειρά	2		

Παρατηρούμε ότι υπάρχουν αλλαγές σημείου στην πρώτη σειρά (2^η, 3^η στήλη), οπότε το σύστημα είναι ασταθές και έχει δύο ρίζες στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο.

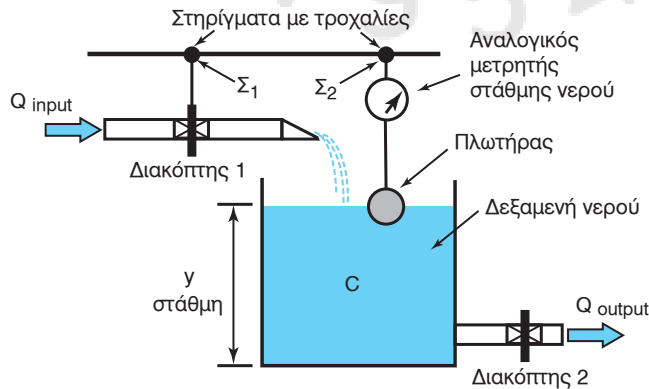
12. Δίνεται ένα απλό σύστημα ελέγχου στάθμης υγρού με χρήση πλωτήρα (σχ. 2.8ξ).

Να βρεθούν :

α) Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου.

β) Να σχεδιαστεί το διάγραμμα ροής του συστήματος κλειστού βρόχου.

γ) Σχεδιάστε τη χρονική απόκριση του συστήματος με εισόδους της μορφής 1. $\omega(t)=u(t)$, 2. $\omega(t)=\delta(t)$.



Σχ. 2.8ξ.

Λύση:

α) Το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος είναι:

$C \frac{dy(t)}{dt} = q_i(t) - q_o(t)$: Διαφορική εξίσωση συστήματος, η οποία συνδέει παροχή (εισόδου-εξόδου) με τη στάθμη.

$e(t) = \omega(t) - k_f y(t)$: Σφάλμα, το οποίο συνδέει την αναλογική ένδειξη οργάνου (ω) με τη στάθμη (k σταθερά).

$p(t) = K_\alpha e(t)$, $q_i(t) = K_v p(t)$, $y(t) = R q_o(t)$: Σχέσεις που συνδέουν παροχή - στάθμη - σφάλμα.

Μετασχηματίζουμε με Laplace το μαθηματικό μοντέλο και έχουμε:

$$L [CsY(s) = q_i(s) - q_o(s)]$$

$$L [e(s) = \omega(s) - K_f Y(s)]$$

$$L [p(s) = K_\alpha E(s)]$$

$$L [q_i(s) = K_v p(s)]$$

$$L [Y(s) = R q_o(s)]$$

Χρησιμοποιούμε την εξίσωση του Mason, για να βρούμε την ολική συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου:

$$F(s) = \frac{Y(s)}{\omega(s)} = \frac{T_1 \Delta_1}{\Delta}$$

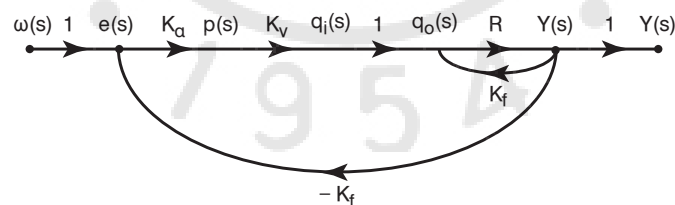
όπου: $T_1 = K_\alpha K_v R$, $\Delta = 1 - \Sigma L_1$
με

$$L_1 = -K_\alpha K_v K_f - RCs \Rightarrow \Delta = 1 + K_\alpha K_v K_f R + RCs, \Delta_1 = 1 - (0) = 1$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου είναι:

$$F(s) = \frac{Y(s)}{\omega(s)} = \frac{K_\alpha K_v R}{1 + RCs + K_\alpha K_v K_f R}$$

β) Το διάγραμμα ροής βάσει των εξισώσεων του συστήματος (από μετασχηματισμό Laplace) (σχ. 2.8η):



Σχ. 2.8η.

γ) Χρονικές αποκρίσεις:

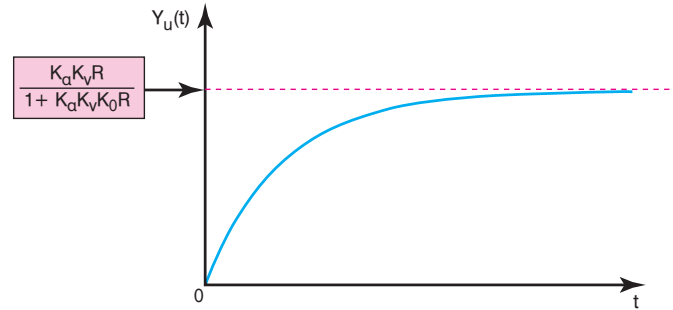
1) Για βηματική είσοδο $\omega(t) = u(t) = 1/s$, έχουμε:

$$F(s) \Rightarrow Y_u(s) = \frac{K_\alpha K_v R}{1 + RCs + K_\alpha K_v K_o R} \omega(s) = \frac{K_\alpha K_v R}{s(1 + RCs + K_\alpha K_v K_o R)}$$

$$\lim y_u(t) = \lim s Y_u(s) = 0$$

$$\lim y_u(t) = \lim s Y_u(s) = \frac{K_\alpha K_v R}{1 + K_\alpha K_v K_o R}$$

Σχεδιάζουμε την απόκριση του συστήματος με βηματική είσοδο, $y_u(t)$ (σχ. 2.8θ).



Σχ. 2.80.

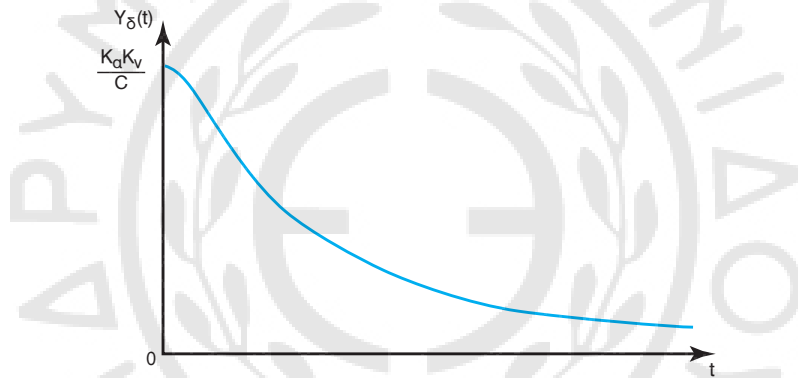
2) Για συνάρτηση δέλτα $\omega(t)=\delta(t)=1$ έχουμε:

$$F(s) \Rightarrow Y_{\delta}(s) = \frac{K_{\alpha} K_v R}{1 + RCs + K_{\alpha} K_v K_0 R} \omega(s) = \frac{K_{\alpha} K_v R}{1 + RCs + K_{\alpha} K_v K_0 R}$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} y_{\delta}(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} s Y_{\delta}(s) = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_{\delta}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s Y_{\delta}(s) = \frac{K_{\alpha} K_v}{C}$$

Σχεδιάζουμε την απόκριση του συστήματος με είσοδο, $y_{\delta}(t)$, (συνάρτηση δέλτα) (σχ. 2.81):



Σχ. 2.81.

13. Να λυθεί η διαφορική εξίσωση (με αρχικές συνθήκες):

$$2 \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) + 3 \left(\frac{dx}{dt} \right) + x(t) = 1 \quad \text{για αρχικές συνθήκες } t=0, x=0,5, \frac{dy}{dt}=1$$

Λύση:

Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Laplace έχουμε:

$$2[s^2 X(s) - sx(0) - x^{(1)}(0)] + 3[sX(s) - x(0)] + X(s) = \frac{1}{s}$$

$$2s^2 X(s) - 2s \cdot 0,5 - 2 + 3sX(s) - 3(0,5) + X(s) = \frac{1}{s}$$

$$X(s)[2s^2 + 3s + 1] - s - 3,5 = \frac{1}{s} \Rightarrow X(s)(2s^2 + 3s + 1) - (s + 3,5) = \frac{1}{s}$$

$$X(s)(2s^2 + 3s + 1) - (s + 3,5) = \frac{1}{s} \Rightarrow X(s)(2s^2 + 3s + 1) = \frac{1}{s} + (s + 3,5)$$

$$X(s)(2s^2 + 3s + 1) = \frac{1}{s} + (s + 3,5) \Rightarrow X(s) = \frac{(s^2 + 3,5s + 1)}{[s(2s^2 + 3s + 1)]}$$

Οι ρίζες του πολυωνύμου $2s^2+3s+1$ είναι $\rho_1=-1, \rho_2=-0,5$

$$X(s) = (s^2+3,5s+1) / [s(2s^2+3s+1)] \Rightarrow (s^2+3,5s+1) / [s(s+1)(s+0,5)]$$

$$X(s) = \frac{c_1}{s} + \frac{c_2}{s+1} + \frac{c_3}{s+0,5}$$

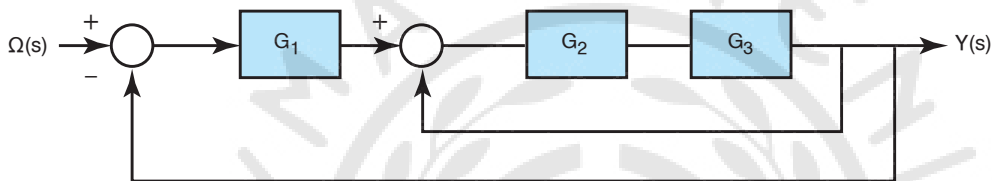
$$c_1 = \lim sX(s) = \lim [(s^2+3,5s+1) / (s+1)(s+0,5)] = 2$$

$$c_2 = \lim (s+1)X(s) = \lim [(s^2+3,5s+1) / s(s+0,5)] = -3$$

$$c_3 = \lim (s+0,5)X(s) = \lim [(s^2+3,5s+1) / s(s+1)] = 2$$

$$\text{οπότε } X(s) = \frac{2}{s} - \frac{3}{s+1} + \frac{2}{s+0,5} \Rightarrow x(t) = 2-3e^{-t}+2e^{-t/2}$$

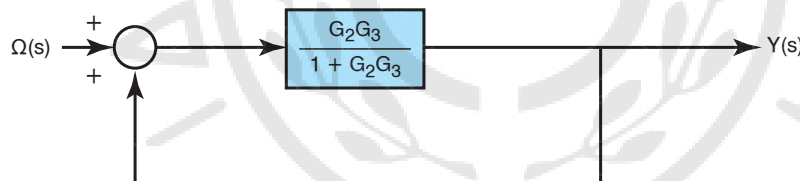
14. Δίνεται το διάγραμμα βαθμίδων του σχήματος 2.8ια για να γίνει απλοποίηση.



Σχ. 2.8ια.

Λύση:

α) Μετατροπή κλειστού βρόχου σε ανοικτό (μοναδιαία ανάδραση) (σχ. 2.8ιβ):

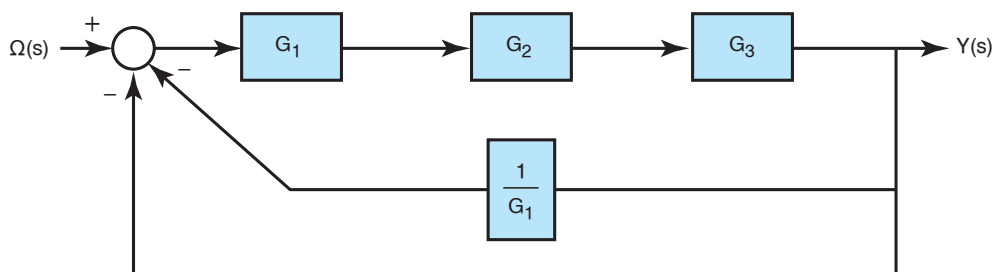


Σχ. 2.8ιβ.

οπότε δεύτερη μετατροπή κλειστού σε ανοικτό:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{\Omega(s)} = \frac{\frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_2 G_3}}{1 + \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_2 G_3}} = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_2 G_3 + G_1 G_2 G_3}$$

β) Μετατόπιση σημείου αθροίσεως αριστερά (σχ. 2.8ιγ):



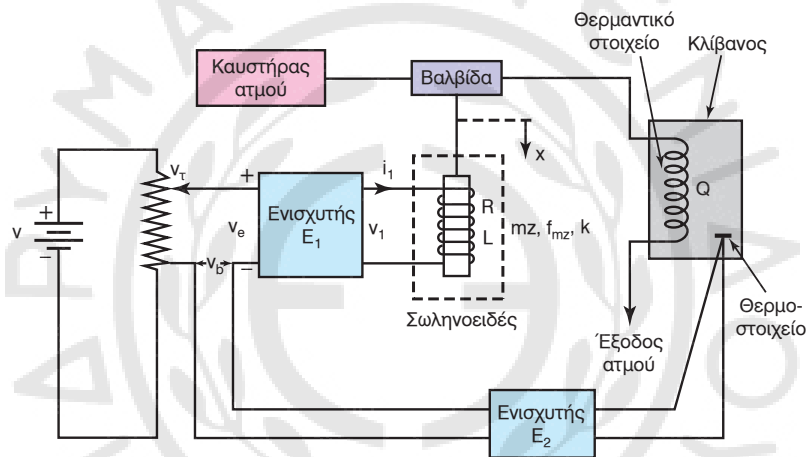
Σχ. 2.8ιγ.

οπότε απευθείας δρόμος $G_1 G_2 G_3$ και κλάδοι αναδράσεως $(\frac{1}{G_1} + 1)$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{\Omega(s)} = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_1 G_2 G_3 (\frac{1}{G_1} + 1)} = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_2 G_3 + G_1 G_2 G_3}$$

15. Δίνεται ένα σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8ιδ. Κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα μεταβολή της τάσεως στα άκρα του θερμοστοιχείου, η οποία ενισχυόμενη από τον ενισχυτή κέρδους E_2 οδηγείται στην είσοδο του διαφορικού ενισχυτή κέρδους E_1 . Με μείωση της τάσεως στα άκρα του θερμοστοιχείου προκαλείται αύξηση του ρεύματος i_1 , το οποίο επάγει μία δύναμη μετακινήσεως της μάζας mz , ώστε να ανοίξει περισσότερο η βαλβίδα ελέγχου παροχής του καυσίμου με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας του κλιβάνου στο επιθυμητό επίπεδο. Να βρεθούν:

- Το μοντέλο του συστήματος.
- Το δομικό διάγραμμα και το διάγραμμα ροής σημάτων και
- η συνάρτηση μεταφοράς.



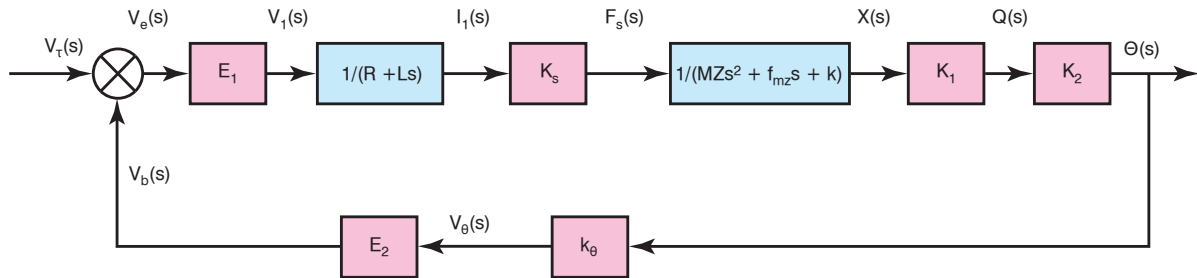
Σχ. 2.8ιδ.

Λύση:

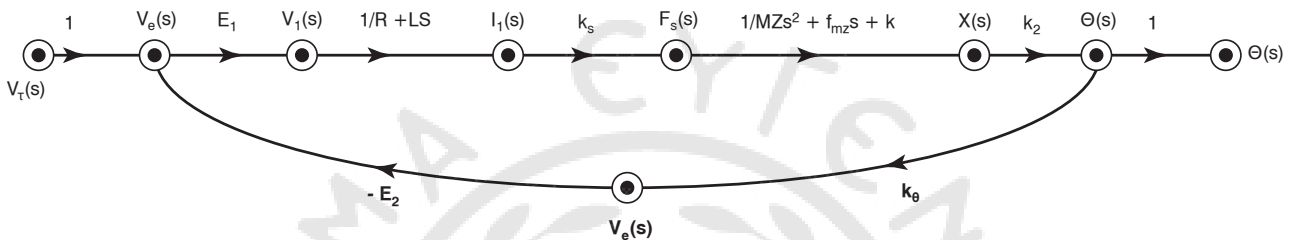
α) Το μοντέλο (εξισώσεις λειτουργίας) του συστήματος στο επίπεδο t και αντίστοιχα στο επίπεδο s (ευθύς μετασχηματισμός Laplace) είναι:

Διαφορική εξίσωση μοντέλου	Ευθύς μετασχηματισμός Laplace
$v_e(t) = v_r(t) - v_b(t)$	$V_e(s) = V_r(s) - V_b(s)$
$v_1(t) = E_1 v_e(t)$	$V_1(s) = E_1 V_e(s)$
$v_1(t) = R i_1(t) + L di_1(t)/dt$	$V_1(s) = (R + L s) I_1(s)$
$f_s(t) = K_s i_1(t)$	$F_s(t) = K_s I_1(s)$
$f_s(t) = MZ d^2x(t)/dt^2 + f_{mz} dx(t)/dt + kx(t)$	$F_s(s) = (MZs^2 + f_{mz}s + k) X(s)$
$q(t) = k_1 x(t)$	$Q(s) = K_1 X(s)$
$\theta(t) = k_2 q(t)$	$\Theta(s) = K_2 Q(s)$
$v_b(t) = E_2 v_\theta(t)$	$V_b(s) = E_2 V_\theta(s)$
$v_\theta(t) = k_\theta \theta(t)$	$V_\theta(s) = K_\theta \Theta(s)$

β) Το δομικό διάγραμμα του συστήματος είναι:



Το διάγραμμα ροής σημάτων είναι:



γ) Η συνάρτηση μεταφοράς προκύπτει μέσω του διαγράμματος ροής σημάτων:

$$G(s) = \Theta(s) / V_r(s) = T_1 \Delta_1 / \Delta$$

Όπου:

$$T_1 = E_1 k_s k_1 k_2 / \{(R+Ls)(MZs^2 + f_{mz} s + k)\}$$

$$\Delta = 1 - \Sigma L_1$$

και

$$L_1 = -k_s k_1 k_2 E_2 k_\theta E_1 / \{(R+Ls)(MZs^2 + f_{mz} s + k)\}$$

$$\Delta_1 = 1 - (0) = 1$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις Δ , L_1 , Δ_1 στο τύπο Mason έχουμε τη συνάρτηση μεταφοράς:

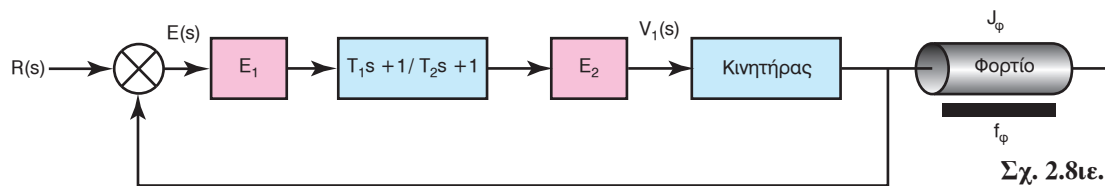
$$G(s) = \Theta(s) / V_r(s) = E_1 k_s k_1 k_2 / \{(R+Ls)(MZs^2 + f_{mz} s + k) + E_1 E_2 k_s k_1 k_2 k_\theta\}$$

16. Στο σχήμα 2.8ie φαίνεται η διάταξη ενός συστήματος ελέγχου κινητήρα (motor). Να βρεθούν:

α) Σφάλμα θέσεως.

β) Σφάλμα ταχύτητας και

γ) σφάλμα επιταχύνσεως.



Σχ. 2.8ie.

Λύση:

Για το σύστημα ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$V_1(s) = \{E_1 E_2 (T_1 s + 1) / T_2 s + 1\} E(s)$$

$$E(s) = R(s) - \Theta(s)$$

$$T_m(s) = J_\phi s^2 \Theta(s) + f_\phi s \Theta(s)$$

$$T_m(s) = J_\phi s^2 \Theta(s) + m s \Theta(s)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

$$E(s) = [J\varphi s^2 + (f\varphi - m) s] (T_2 s + 1) R(s) / [k E_1 E_2 (T_1 s + 1) \{J\varphi s^2 + (f\varphi - m) s\} (T_2 s + 1)]$$

α) Το σφάλμα θέσεως προκύπτει ως:

$$e_{ss,p} = 0$$

β) Το σφάλμα ταχύτητας προκύπτει ως:

$$e_{ss,v} = (f - m) R_1 / k E_1 E_2$$

γ) Το σφάλμα επιταχύνσεως προκύπτει ως:

$$e_{ss,a} = \infty$$

2.9 Ερωτήσεις.

1. Να βρεθούν οι μετασχηματισμοί Laplace των συναρτήσεων:

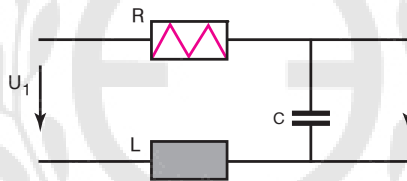
$$t^2 e^{-at}, e^{-5t} \sin 3t, e^{-2t} U(t), e^{-t} \eta_{\mu} 9t, e^{-5(t-1)} U(t-1)$$

2. Να βρεθούν οι αντίστροφοι μετασχηματισμοί Laplace των συναρτήσεων:

$$F(s) = \frac{3}{s-1}, \quad F(s) = \frac{5}{s(s+6)}, \quad F(s) = \frac{s}{s(s-1)}, \quad F(s) = \frac{s(s+1)}{(s+1)(s-7)}, \quad F(s) = 1 / s^2 + 3s - 8$$

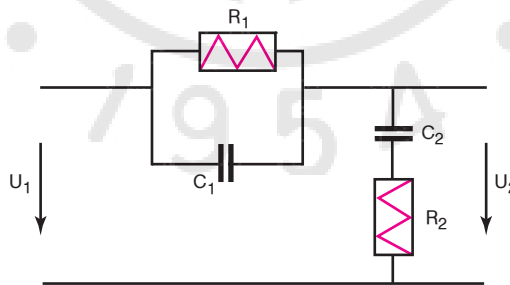
3. Να βρεθούν οι συναρτήσεις μεταφοράς των παρακάτω συστημάτων:

α) Κύκλωμα RLC (σχ. 2.9α).



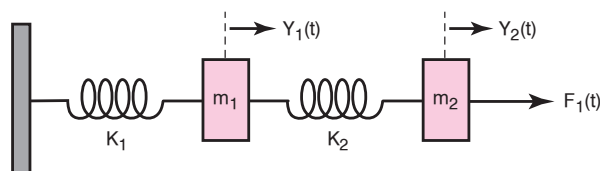
Σχ. 2.9α.

β) Φίλτρο προπορείας-καθυστερήσεως (σχ. 2.9β).



Σχ. 2.9β.

γ) Μηχανικό σύστημα μαζών-ελατηρίων (σχ. 2.9γ).



Σχ. 2.9γ.

4. Τι ονομάζουμε χαρακτηριστική εξίσωση;
5. Ποια είναι η αναλυτική μορφή πόλων και ριζών μιας συναρτήσεως μεταφοράς;
6. Τι ονομάζουμε διάταξη πόλων και ριζών;
7. Τι είναι ελεύθερη και τι εξαναγκασμένη απόκριση;
8. Τι σημαίνει ο παρακάτω τύπος;

$$\omega = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.55)$$

9. Ποια είναι τα μειονεκτήματα της εισαγωγής της αναδράσεως στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου;
10. Ποιοι είναι οι τύποι υπολογισμού του μόνιμου σφάλματος για βηματική είσοδο και παραβολική είσοδο;
11. Πότε ένα σύστημα είναι ευσταθές και πότε ασταθές;
12. Να εφαρμοστεί το κριτήριο ευστάθειας Routh στις παρακάτω χαρακτηριστικές εξισώσεις:

$$\alpha) X(s) = s^6 + 3s^5 + 4s^4 + 6s^3 + 15s^2 + 21s + 10 = 0$$

$$\beta) X(s) = s^4 + s^3 + s^2 + s + 2 = 0$$

$$\gamma) X(s) = 6s^2 + 12 = 0$$

13. Τι σημαίνει σχετική ευστάθεια;
14. Τι είναι ο δρόμος Nyquist;
15. Ισχύει η παρακάτω σχέση;
 $Z = N + P + 1$
16. Τι ονομάζουμε μεταβατική απόκριση;
17. Ποια είναι η μαθηματική έκφραση της αρμονικής συναρτήσεως μεταφοράς;
18. Ποια είναι η εξίσωση MASON; Αναλύστε τους συντελεστές της.
19. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος ελέγχου δίνεται:

$$G(s) = k / (s^2 + 5s + k)$$

όπου k η παράμετρος ενισχύσεως του συστήματος το οποίο διεγείρεται από είσοδο της μορφής της μοναδιαίας βαθμίδας. Για $k=10$, $k=20$, $k=50$ ζητούνται:

- α) Οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξισώσεως.
 - β) Η φυσική ιδιοσυχνότητα χωρίς απόσβεση ω_n .
 - γ) Ο συντελεστής αποσβέσεως ζ .
 - δ) Η χρονική απόκριση του συστήματος για βηματική είσοδο.
 - ε) Ο συντελεστής υπερευψώσεως.
 - στ) Να εφαρμοστεί το κριτήριο ευστάθειας Routh.
 - η) Παρατηρήσεις για την επίδραση της παραμέτρου k στα χαρακτηριστικά του συστήματος.
20. Δίνεται η συνάρτηση μεταφοράς μοναδιαίας αναδράσεως:

$$G(s) = \frac{k}{s(s+1)}$$

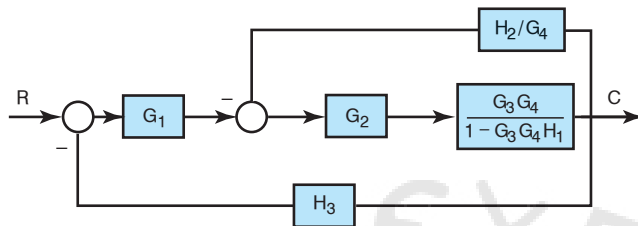
Να βρεθούν τα σφάλματα θέσεως, ταχύτητας, επιταχύνσεως.

21. Να λυθούν οι διαφορικές εξισώσεις (με αρχικές συνθήκες):

α) $[d^2x/dt^2] + 5 [dx/dt] + 4x(t) = 2$ για αρχικές συνθήκες $t=0, x=0,5, \frac{dy}{dt}=1$

β) $-2[d^2x/dt^2] + [dx/dt] - 3x(t) = 1$ για αρχικές συνθήκες $t=0, x=1, \frac{dy}{dt}=1$

22. Να απλοποιηθεί το διάγραμμα βαθμίδων του σχήματος 2.9δ:



Σχ. 2.9δ.



3.1 Εισαγωγή.

Μετά τη θεωρητική ανάλυση των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, προχωρούμε στην ανάλυση των εξαρτημάτων που περιέχονται σε ένα σύστημα ελέγχου. Τα εξαρτήματα που περιλαμβάνονται σε ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου είναι τα ακόλουθα:

- Ο **αισθητήρας** που είναι διάταξη όπου μετατρέπει μια μη ηλεκτρική φυσική ή χημική ποσότητα σε ηλεκτρικό σήμα. Τέτοιες διατάξεις λέγονται **μορφομετατροπείς** (transducers) ή **μετρητές** (detectors).
- Οι διατάξεις συγκρίσεως σημάτων εισόδου και εξόδου, οι οποίοι ονομάζονται **συγκριτές** (comparators).
- Οι διατάξεις που ενισχύουν την ισχύ των σημάτων, ώστε να εξασφαλίζουν την αξιοπιστία του σήματος και ονομάζονται **ενισχυτές** (amplifiers).
- Οι διατάξεις που επιτυγχάνουν εξίσωση της επιθυμητής και της πραγματικής εξόδου του συστήματος και ονομάζονται **ενεργοποιητές** (actuators) ή **ελεγκτές** (controllers).

Οι παραπάνω διατάξεις αποτελούνται από απλά ή σύνθετα ηλεκτρικά, ηλεκτρονικά, μηχανικά και πνευματικά συστήματα.

3.2 Ηλεκτρικά και ηλεκτρομηχανολογικά εξαρτήματα.

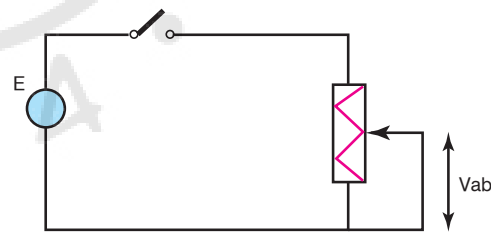
3.2.1 Ποτενσιόμετρο για τη μέτρηση της τάσεως.

Η μέτρηση τάσεων στα συστήματα ελέγχου απαιτεί συχνά μεγάλη ακρίβεια, όταν η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος προς μέτρηση είναι υψηλή. Το κύκλωμα του ποτενσιόμετρου είναι ένας βαθμονομημένος διαιρέτης τάσεων κινούμενου δρομέα, που μετράει μια άγνωστη τάση με αντιστάθμιση. Αυτό που διαφοροποιεί το ποτενσιόμετρο από το διαιρέτη τάσεως είναι το ότι αντί να υπάρχουν δύο σταθερές αντιστάσεις, υπάρχει μία μόνο αντίσταση με κυλιόμενη επαφή (σχ. 3.2α). Η αντίσταση κατασκευά-

ζεται από ισοπαχές ομογενές σύρμα τυλιγμένο σε κύλινδρο από μονωτικό υλικό. Λόγω του τρόπου κατασκευής της αντιστάσεως του ποτενσιόμετρου, η αντίσταση μεταξύ της επαφής και του ενός άκρου του ποτενσιόμετρου είναι ανάλογη της απόστασης της επαφής από το άκρο αυτό. Για να πάρουμε διάφορες τιμές τάσεως από μια πηγή E χρησιμοποιούμε το ποτενσιόμετρο. Η τάση V_{ab} είναι ανάλογη με την αντίσταση R_{ab} που αντιστοιχεί στο τμήμα ab και συνεπώς ανάλογη με την απόσταση της επαφής από το άκρο b του ποτενσιόμετρου. Έτσι μπορούμε να μετρήσουμε τάσεις μεταξύ $0-E$ Volt.

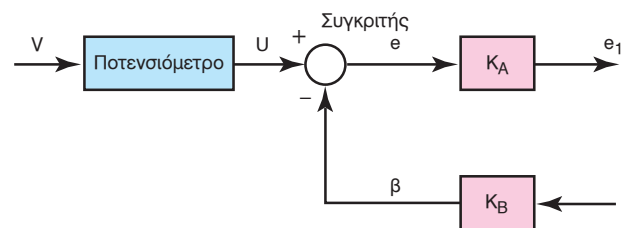
3.2.2 Ποτενσιόμετρο για μέτρηση σφάλματος (συγκριτής).

Τα ποτενσιόμετρα χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου και ως συγκριτές. Ο μετρητής σφάλματος αποτελείται από το συγκριτή και δύο ενισχυτές, οι οποίοι ενισχύουν τα σήματα της αναδράσεως και της ενεργοποίησεως. Στο σχήμα 3.2β φαίνεται η συνδεσμολογία του ποτενσιόμετρου



Σχ. 3.2α.

Κύκλωμα ποτενσιόμετρου.



Σχ. 3.2β.

Λειτουργικό διάγραμμα μετρητού σφάλματος.

για τη μέτρηση του σήματος σφάλματος. Η σύγκριση των σημάτων U και β γίνεται με αλγεβρική επαλληλία των διαφορών δυναμικού U και β στο κύκλωμα του ποτενοσιόμετρου και των δύο ενισχυτών. Χρησιμοποιώντας το νόμο Kirchhoff, που διατυπώνει το γεγονός ότι το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων γύρω από ένα βρόχο ισούται με το μηδέν, έχουμε:

$$\beta + e - U = 0 \quad \text{ή} \quad U - \beta = e \quad (3.1)$$

Η παραπάνω σχέση περιγράφει τη λειτουργία του συγκριτή.

3.2.3 Μορφομετατροπείς.

Οι **μορφομετατροπείς** (transducers) είναι διατάξεις με τις οποίες η ενέργεια μετατρέπεται από μία μορφή σε άλλη. Στα συστήματα ελέγχου οι μορφομετατροπείς με τη μεγαλύτερη εφαρμογή είναι αυτοί που μετατρέπουν μη-ηλεκτρικά φυσικά μεγέθη σε ηλεκτρικό σήμα. Κάθε μία από τις τέσσερις μορφές ενέργειας (φως, θερμότητα, μηχανική ενέργεια και χημική ενέργεια) παρουσιάζουν διάφορες φυσικές ιδιότητες, οι οποίες μπορούν να γίνουν αισθητές από τους κατάλληλους μορφομετατροπείς. Τα πλεονεκτήματα της μετατροπής των μη ηλεκτρικών μεγεθών σε ηλεκτρικές ποσότητες είναι:

- Η ευκολία αποθηκεύσεως που έχει η ηλεκτρική πληροφορία, για να χρησιμοποιηθεί μετά από ένα χρονικό διάστημα.
- Η ταχύτητα αποκρίσεως και η πολύ υψηλή ευαισθησία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών.
- Η δυνατότητα τηλεμετρίας.
- Η ακρίβεια.

Οι μορφομετατροπείς διακρίνονται σε οπτικούς, θερμικούς και πιεζοηλεκτρικούς.

1) Οπτικοί.

Στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου χρησιμοποιείται συχνά για διάφορες μετρήσεις το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο ορατό ή υπέρυθρο φάσμα της. Σε αυτές τις μετρήσεις χρησιμοποιείται η ακτινοβολία, η οποία διακρίνεται σε ορατή ή υπέρυθη. Τέτοιες εφαρμογές είναι η διάταξη μετρήσεως μια μετατοπίσεως με χρησιμοποίηση της αντανάκλασεως της ακτινοβολίας από διάφορες επιφάνειες ή η μέτρηση της θερμοκρασίας ενός υλικού από το φάσμα ακτινοβολίας που εκπέμπει.

Γενικά, ένα σύστημα οπτικού μεταλλάκτη αποτελείται από μια **πηγή** ακτινοβολίας (source) και από ένα **μετρητή** (detector). Η πηγή μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε **φωτόνια** (photons). Κάθε φωτόνιο

μεταφέρει ενέργεια που υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$W = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.2)$$

όπου:

W η ενέργεια του φωτονίου (j),
 h η σταθερά του Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ j-s),
 λ το μήκος κύματος ακτινοβολίας (m) και
 c η ταχύτητα του φωτός (300.000 m/s).

Στην πράξη χρησιμοποιούνται οι **φωτομετρητές** ή **φωτοαισθητήρες** (photo-detector) που μετατρέπουν τη φωτεινή ενέργεια που δέχονται σε ηλεκτρικό σήμα. Οι μετρητές αυτοί πρέπει να έχουν χαρακτηριστικά συμβατά με εκείνα της πηγής (π.χ. ίδιο φάσμα ακτινοβολίας). Οι περισσότεροι φωτομετρητές περιέχουν διόδους από κρυστάλλους ημιαγωγού, που είναι αδιαφανείς και έχουν την ιδιότητα να απορροφούν φωτεινή ενέργεια σε μορφή φωτονίων. Η ενέργεια των φωτονίων μεταδίδεται στα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού, τα οποία διεγείρονται και μετατοπίζονται αφήνοντας τη θέση τους ιονισμένη θετικά (σχ. 3.2γ). Το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο της διόδου συσσωρεύει τα θετικά ιόντα στη μια μεριά της διόδου και τα ηλεκτρόνια στην άλλη, δημιουργώντας διαφορά δυναμικού ανάλογη προς την ένταση της ακτινοβολίας που πέφτει στη δίοδο, σύμφωνα με τη σχέση:

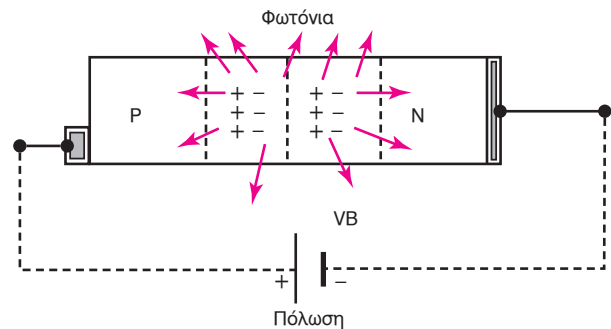
$$U = U_0 \ln(I) \quad (3.3)$$

όπου:

I η ένταση ακτινοβολίας (W/m^2),
 U_0 η σταθερά (V) και
 U η τάση εξόδου χωρίς ηλεκτρικό φορτίο (V).

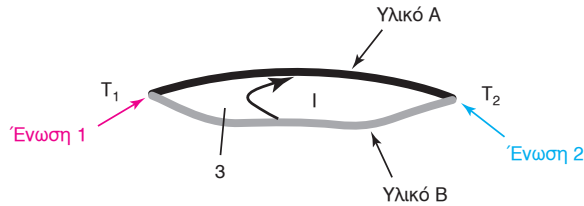
2) Θερμικοί.

Το **θερμοστοιχείο** (thermocouple) είναι μορφομετατροπέας με πολλές εφαρμογές, όπως συστήμα-



Σχ. 3.2γ.

Ηλεκτρονική δομή φωτοαισθητήρα με δίοδο.



Σχ. 3.2δ.
Μορφή θερμοστοιχείου.

τα ελέγχου θερμοκρασίας χώρου κλπ. Η λειτουργία του θερμοστοιχείου, όπως και ενός μεγάλου ποσοστού θερμοηλεκτρικών μετρητών, βασίζεται σε μια «ιδιάζουσα» ηλεκτρική συμπεριφορά ορισμένων μετάλλων ή κραμάτων, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία τους κάτω από ορισμένες συνθήκες.

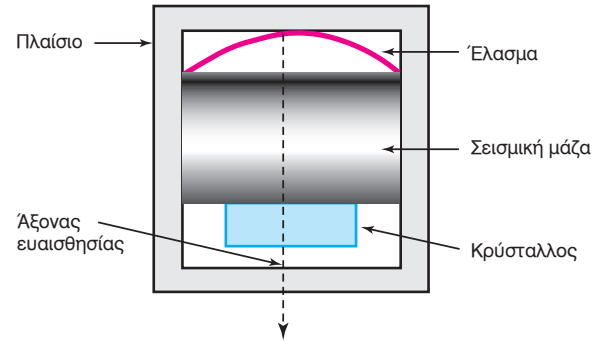
Η αρχή λειτουργίας του θερμοστοιχείου (σχ. 3.2δ) στηρίζεται στο **φαινόμενο Seebeck**. Αν η ένωση 1 βρίσκεται σε θερμοκρασία T_1 και η ένωση 2 σε θερμοκρασία T_2 , θα κυκλοφορήσει ένα ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από τα σύρματα, το οποίο προσδιορίζεται από το νόμο του Ohm και είναι η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται και εξαρτάται από τις θερμοκρασίες T_1 , T_2 και τα υλικά A, B. Η R είναι η ωμική αντίσταση του κυκλώματος. Αν το σύρμα B κοπεί στη θέση 3 και συνδεθεί ένα βολτόμετρο άπειρης εσωτερικής αντιστάσεως, η ένδειξή του θα είναι ίση με τη θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη E. Η πολικότητα της θερμοηλεκτρεγερτικής δυνάμεως E είναι (+) στο υλικό A και (-) στο υλικό B.

Ένα άλλο φαινόμενο, που επηρεάζει τη λειτουργία του θερμοστοιχείου είναι το φαινόμενο Peltier. Σύμφωνα με αυτό, αν το υλικό A του σχήματος 3.2δ είναι σε πιο υψηλή ενεργειακή στάθμη από εκείνη του B, τότε στην ένωση 1, που τα ηλεκτρόνια κινούνται από το υλικό A προς B, εκλύεται θερμότητα και η ένωση 1 θερμαίνεται. Αντίθετα, η ένωση B ψύχεται, γιατί εκεί εμφανίζεται απορρόφηση θερμότητας. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει οποτεδήποτε περνάει ρεύμα από ένωση δύο υλικών διαφορετικής ενεργειακής στάθμης.

Αν θεωρήσουμε $T_1 > T_2$, τότε το ηλεκτρικό ρεύμα έχει την ίδια φορά μέσα στο υλικό A. Σε αυτήν την περίπτωση εκλύεται θερμότητα. Αντίθετα στο υλικό B, όπου η ροή του ρεύματος και της θερμότητας είναι αντίθετες απορροφάται θερμότητα. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως **φαινόμενο Thomson**.

3) Πιεζοηλεκτρικοί.

Είναι οι μορφομετατροπείς που μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια λόγω πίεσεως σε ηλεκτρική. Ένας τέτοιος μορφομετατροπέας είναι ο **πιεζοηλε-**



Σχ. 3.2ε.

Πιεζοηλεκτρικός μετρητής επιταχύνσεως.

πιοηλεκτρικός μετρητής επιταχύνσεως (piezoelectric accelerometer) (σχ. 3.2ε). Η λειτουργία του βασίζεται στην ιδιότητα που έχουν ορισμένοι κρύσταλλοι να παράγουν τάση, όταν πιέζονται. Ο κρύσταλλος βρίσκεται δίπλα σε μια μάζα η οποία λέγεται **σεισμική μάζα** (seismic mass) και ασκεί πίεση στον κρύσταλλο. Με τη χρησιμοποίηση ενός ελασματος η σεισμική μάζα ασκεί πάντοτε μια μικρή πίεση αναφοράς. Όταν το σύστημα υποβληθεί σε επιτάχυνση, η σεισμική μάζα πιέζει τον κρύσταλλο με δύναμη. Η δύναμη αυτή εξαρτάται από την επιτάχυνση a , σύμφωνα με τη γνωστή σχέση $F=ma$, ενώ παράγεται 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 μετρήσουμε την τάση αυτή, χρειαζόμαστε ένα ηλεκτρονικό μετρητή χαμηλού θορύβου και υψηλής σύνθετης αντιστάσεως εισόδου. Η τάση εξόδου του συστήματος είναι μεγέθους μερικών mV. Η ιδιοσυχνότητα των μετρητών αυτών μπορεί να υπερβεί τα 5 kHz, και επομένως οι μετρητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μετρήσεις δονήσεων αντιστοίχων συχνοτήτων.

3.2.4 Συγχρονοστήματα.

Μια σημαντική εφαρμογή των συστημάτων ελέγχου αφορά στον έλεγχο θέσεως, όπως για παράδειγμα, στην περίπτωση που απαιτείται απόλυτος συγχρονισμός της γωνιακής θέσεως ενός άξονα με κάποιο άλλο, οπότε ο συγχρονισμός πρέπει να γίνει χωρίς τη φυσική σύνδεση των δύο αξόνων. Αυτό υλοποιείται με τη βοήθεια ειδικών ηλεκτρικών μηχανών, οι οποίες ονομάζονται **αυτοσύγχρονες μηχανές** ή **σύγχρονα** (synchros). Υπάρχουν τρεις τύποι τέτοιων συστημάτων:

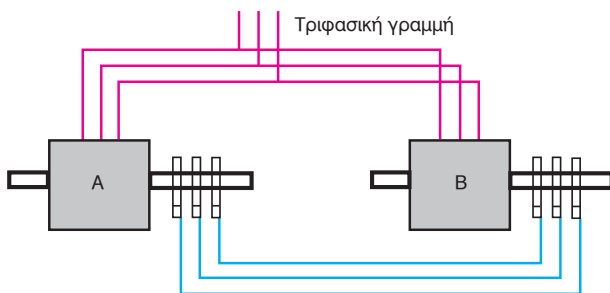
α) Τα τριφασικά σύγχρονα ισχύος για τη μετάδοση μεγάλων ροπών.

β) Τα μονοφασικά ενδείξεως, που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις μεταδόσεως πολύ ελαφρών ροπών.

γ) Τα συστήματα γεννήτριας-μετασχηματιστή για την ένδειξη απευθυγραμμίσεως των αξόνων, υπό μορφή μεγέθους και πολικότητας τάσεων.

Στην πρώτη περίπτωση ενός τριφασικού συστήματος συγχρονομηχανών (σχ. 3.2στ), τα πρωτεύοντα τυλίγματα τους διεγείρονται από την τριφασική γραμμή, ενώ τα αντίστοιχα δευτερεύοντα τυλίγματα συνδέονται μεταξύ τους. Όταν η μια 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 συστήματα εφαρμόζονται σε ανυψωτικούς κινητήρες γεραμών, σε τυπογραφικές πρέσες κ.ά.

Ο συγχρονισμός δύο ηλεκτρικών μηχανών επιτυγχάνεται και με μονοφασικές μηχανές. Τα τυλίγματα των δρομέων της γεννήτριας και του κινητήρα συνδέονται με κοινή τροφοδοτική πηγή τάσεως εναλλασσόμενου ρεύματος. Τα τυλίγματα των στατών, αποτελούνται από τρία τυλίγματα για κάθε στάτη, σε άξονες 120° μεταξύ τους και έχουν συνδεθεί αντίστοιχα. Όταν το ρεύμα επιφέρει «διέγερση» στα τυλίγματα των δρομέων παράγονται τάσεις εξ επαγωγής. Οι τάσεις που παράγονται στα τυλίγματα των στατών της γεννήτριας και του κινητήρα είναι ίσες, με αποτέλεσμα να μην κυκλοφορεί ρεύμα στα τυλίγματα και επομένως να μην αναπτύσσεται ροπή στρέψεως στους δρομείς. Όταν όμως οι γωνιακές θέσεις των δύο δρομέων δεν είναι ίδιες, οι τάσεις που παράγονται στα τυλίγματα των στατών είναι άνισες και έτσι κυκλοφορεί ωφέλιμο ρεύμα. Τα μαγνητικά πεδία σε συνδυασμό με το ρεύμα αυτό παράγουν ροπές στρέψεως που τείνουν να τοποθετήσουν τους δρομείς στην ίδια γωνία. Τα μονοφασικά συστήματα συγχρονισμού



Σχ. 3.2στ.

Σύστημα τριφασικών συγχρονομηχανών.

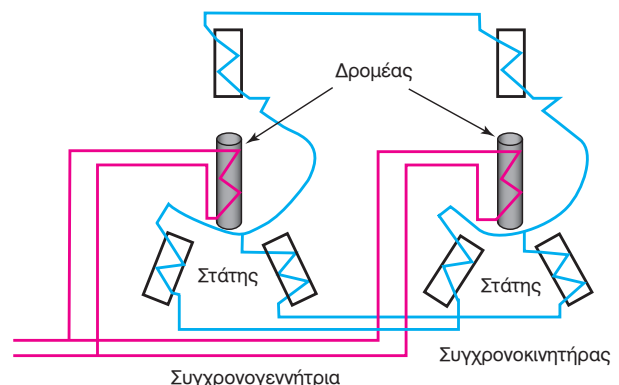
έχουν αρκετές εφαρμογές όπως ο έλεγχος της γωνιακής θέσεως μιας περιστρεφόμενης κεραίας τηλεοράσεως από το δωμάτιο που λειτουργεί ο δέκτης, ο έλεγχος των κινητών περυσιών των αεροσκαφών κλπ. Μια παραλλαγή του μονοφασικού συστήματος είναι η εισαγωγή ενός **συγχρονοδιαφορικού** (differential synchro) (σχ. 3.2ζ). Στη διάταξη αυτή η περιστροφή του άξονα του διαφορικού είναι συνάρτηση της διαφοράς των περιστροφών των δύο άλλων αξόνων. Το συγχρονοδιαφορικό ενεργεί σαν μια διαφορική γεννήτρια. Σε ρυθμίσεις μεγάλης ακρίβειας της γωνιακής θέσεως ενός περιστρεφόμενου άξονα είναι απαραίτητο να αναπτύσσονται μεγάλες ροπές στρέψεως. Τα συγχρονοσυστήματα που παράγουν τέτοιες ροπές έχουν μικρή ακρίβεια ως προς την επιθυμητή γωνιακή θέση του άξονα. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούμε ένα ειδικό συγχρονοσύστημα στο οποίο παράγεται τάση, το πλάτος της οποίας είναι συνάρτηση της διαφοράς των γωνιακών θέσεων των δύο αξόνων. Λέγεται **τάση σφάλματος** (error voltage), επειδή η ελεγχόμενη γωνιακή θέση παρουσιάζει σφάλμα. Η τάση αυτή ενεργοποιεί άλλα εξαρτήματα που διορθώνουν το σφάλμα.

3.2.5 Σερβοκινητήρες.

Οι **σερβοκινητήρες** (servomotor) διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

1) Σερβοκινητήρας συνεχούς ρεύματος.

Σε έναν 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 επαγω-



Σχ. 3.2ζ.

Μονοφασικό σύστημα, συγχρονοδιαφορικό.

γικό τύμπανο του κινητήρα. Η κινητήρια ροπή T_K δίνεται από τη σχέση:

$$T_K = K_1 \Phi I_T \quad (3.4)$$

Υπάρχουν δύο τρόποι ελέγχου της λειτουργίας ενός σερβοκινητήρα:

α) Έλεγχος από το επαγωγικό τύμπανο.

Εδώ διατηρείται σταθερό το ρεύμα διεγέρσεως του κινητήρα και ρυθμίζεται η τάση που εφαρμόζεται στο **επαγωγικό τύμπανο** (armature voltage). Το σταθερό ρεύμα διεγέρσεως I_δ του κινητήρα παρέχεται συνήθως με μια χωριστή σταθερή πηγή συνεχούς ρεύματος. Η μαγνητική ροή Φ στον κινητήρα είναι ανάλογη με το ρεύμα διεγέρσεως I_δ , δηλαδή:

$$\Phi = K_\delta I_\delta \quad (3.5)$$

όπου: $K_\delta = \text{σταθερά}$.

Από τις σχέσεις (3.4) και (3.5) βρίσκουμε:

$$T_K = K_1 K_\delta I_\delta I_T \quad (3.6)$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί επειδή τα K_1 , K_δ και I_δ είναι σταθερά. Έτσι έχουμε:

$$T_K = K_K I_T \quad (3.7)$$

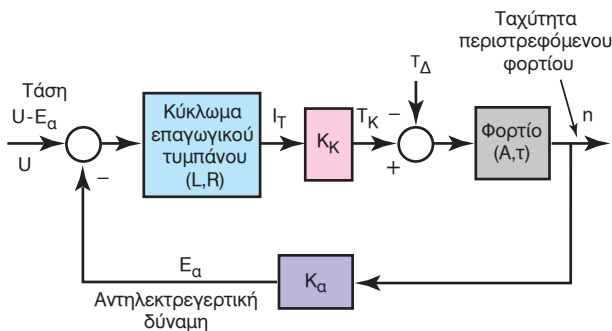
όπου: $K_K = K_1 K_\delta I_\delta = \text{σταθερά}$.

Η **ανηλεκτρεγερτική δύναμη** (back emf) του κινητήρα είναι ανάλογη προς την ταχύτητα του κινητήρα, δηλαδή:

$$E_a = K_a n \quad (3.8)$$

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:

$$T_\Phi = T_K - T_\Delta \quad (3.9)$$



Σχ. 3.2η.

Λειτουργικό διάγραμμα σερβοκινητήρα ελεγχόμενου από την τάση του επαγωγικού τυμπάνου.

Η ταχύτητα n του περιστρεφόμενου φορτίου συνδέεται με τη ροπή $T_{a\Phi}$ του φορτίου, σύμφωνα με τη διαφορική εξίσωση:

$$T_\Phi = A \frac{dn}{dt} + t_n \quad (3.10)$$

όπου:

A η ροπή αδράνειας του φορτίου, t_n ο συντελεστής περιστροφικής τριβής και dn/dt η γωνιακή επιτάχυνση του κινητήρα.

Στο σχήμα 3.2η συνοψίζονται όλες οι δυναμικές σχέσεις που αφορούν το σερβοκινητήρα, ο οποίος ελέγχεται από την τάση του επαγωγικού τυμπάνου.

β) Έλεγχος από το πεδίο διεγέρσεως.

Εδώ διατηρείται σταθερή η ένταση στο επαγωγικό τύμπανο I_T και ρυθμίζεται η τάση που εφαρμόζεται στο πεδίο διεγέρσεως. Αυτός ο τρόπος ελέγχου παρέχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Ο έλεγχος είναι απλός.
- Είναι σχετικά αποδοτικός γιατί έχει μικρές απώλειες στο κύκλωμα του πεδίου και
- παρέχει ομαλό έλεγχο ταχύτητας, χωρίς διακοπές.

Η ροπή που παράγεται από τον κινητήρα σε αυτό τον τρόπο ελέγχου είναι:

$$T_K = K_1 K_\delta I_T I_\delta \quad (3.11)$$

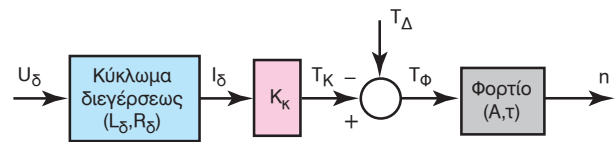
Το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου παραμένει σταθερό. Έτσι, δεν αναπτύσσεται ανηλεκτρεγερτική δύναμη. Το ρεύμα διεγέρσεως συνδέεται με την τροφοδοτική τάση U_δ του πεδίου διεγέρσεως, σύμφωνα με τη διαφορική εξίσωση:

$$U_\delta = L_\delta [dI_\delta/dt] + R_\delta I_\delta \quad (3.12)$$

όπου:

dI_δ/dt η ταχύτητα μεταβολής ρεύματος διεγέρσεως I_δ .

Στο σχήμα 3.2θ δίνεται το λειτουργικό διάγραμμα του σερβοκινητήρα ελεγχόμενου από το πεδίο διεγέρσεως. Σε σχέση με τον προηγούμενο τρόπο ελέγχου, παρατηρούμε στο διάγραμμα ότι δεν υπάρχει



Σχ. 3.2θ.

Λειτουργικό διάγραμμα σερβοκινητήρα ελεγχόμενου από το πεδίο διεγέρσεως.

ενδογενής ανατροφοδότηση, επειδή δεν αναπτύσσεται αντηλεκτρεγερτική δύναμη στο τύμπανο.

2) Σερβοκινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ο σερβοκινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ένας διφασικός επαγωγικός κινητήρας ο οποίος έχει δύο ανεξάρτητα τυλίγματα στο στάτη του, τοποθετημένα σε γωνία 90° μεταξύ τους (σχ. 3.2ι). Όταν ο διφασικός κινητήρας χρησιμοποιείται ως σερβοκινητήρας, η ταχύτητά του ρυθμίζεται με την τάση εισόδου U . Στην περίπτωση αυτή, η εναλλασσόμενη τάση U στο ένα από τα τυλίγματα είναι σταθερή, ενώ η άλλη τάση ελέγχου U_ϵ είναι μεταβλητή. Όταν αυτή η τάση (U_ϵ) μεταβάλλεται, η ροπή και η ταχύτητα μεταβάλλονται. Στο σχήμα 3.2ια παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του σερβοκινητήρα, που δείχνουν τη σχέση ροπής-ταχύτητας, για διάφορες εφαρμοζόμενες τάσεις ελέγχου. Όπως φαίνεται για τιμές $U_\epsilon \neq 0$ 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.

3.2.6 Ταχύμετρο.

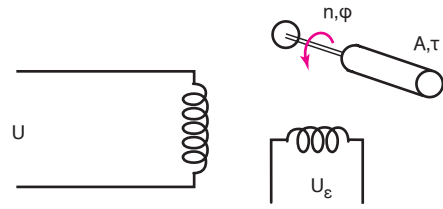
Το **ταχύμετρο** (tachometer), είναι μορφομετατροπέας με πολλές εφαρμογές σε συστήματα ελέγχου θέσεως και ταχύτητας. Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας ενός περιστρεφόμενου άξονα και τη μετατροπή της σε τάση εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής συχνότητας. Το ταχύμετρο περιέχει ένα μικρό διφασικό κινητήρα (σχ. 3.2ιβ). Το τύλιγμα I δημιουργεί το σταθερό πεδίο και τροφοδοτείται από μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος με σταθερό πλάτος και συχνότητα. Μια άλλη τάση u_{II} με την ίδια συχνότητα παράγεται στο βοηθητικό τύλιγμα β. Το τύλιγμα II μπορεί να θεωρηθεί ανοικτό κύκλωμα, αφού η τάση του συνδέεται στην είσοδο ενός ενισχυτή με πολύ μεγάλη σύνθετη αντίσταση εισόδου. Σε ιδανικές συνθήκες το πλάτος του σήματος της τάσεως u_{II} είναι γραμμικά ανάλογο με την ταχύτητα του δρομέα. Έτσι, η σχέση που συνδέει τη μετατροπή της περιστροφικής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι:

$$u_{II} = K_T \omega \quad (3.13)$$

όπου:

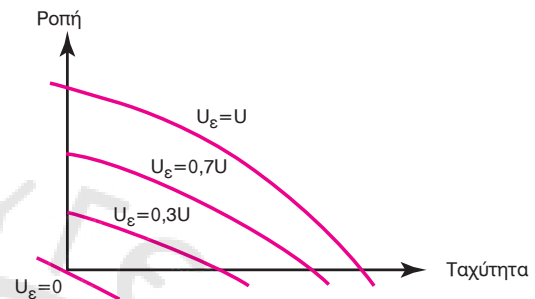
K_T η σταθερά,

ω η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα.



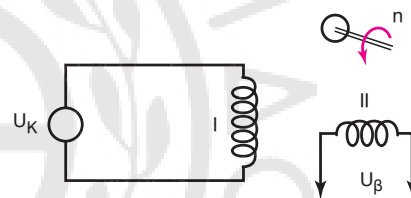
Σχ. 3.2ι.

Σερβοκινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχ. 3.2ια.

Χαρακτηριστικές καμπύλες σερβοκινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχ. 3.2ιβ.

Ταχύμετρο με διφασικό κινητήρα.

3.3 Ηλεκτρονικά εξαρτήματα.

3.3.1 Τελεστικός ενισχυτής.

Ο **τελεστικός ενισχυτής** (operational amplifiers) είναι ενισχυτής με πολύ μεγάλη ενίσχυση και πήρε την ονομασία του από το γεγονός ότι αρχικά σχεδιάστηκε για την εκτέλεση μαθηματικών πράξεων (πρόσθεση, αφαίρεση, διαφύριση, ολοκλήρωση) σε συνδυασμό με την εφαρμογή του στην κατασκευή των αναλογικών υπολογιστών. Οι τελεστικοί ενισχυτές έχουν πέντε βασικά άκρα για τη σύνδεσή τους, από τα οποία δύο είναι για την τροφοδοσία, δύο για τις εισόδους και ένα για την έξοδο. Το σχήμα 3.3α δείχνει το σύμβολο με το οποίο απεικονίζεται στα κυκλώματα ο τελεστικός ενισχυτής. Οι εισόδους του τελεστικού ενισχυτή συμβολίζονται με τα σύμβολα (-) και (+) και ονομάζονται αντίστοιχα **είσοδος με αναστροφή** (inverting input) και **είσοδος χωρίς αναστροφή** (non inverting input). Και οι δύο μαζί καλούνται διαφορικό ζεύγος, επειδή το

δυναμικό στην έξοδο (V_o) εξαρτάται από τη διαφορά των δυναμικών στις δύο εισόδους. Η έξοδος V_o , είναι θετική ως προς τη γη (σημείο αναφοράς), όταν η είσοδος (+) είναι θετική ως προς την είσοδο (-). Επομένως, η πολικότητα της εξόδου εξαρτάται από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των εισόδων (+) και (-).

Το δυναμικό εξόδου μετρείται και αυτό ως προς τη γη και κυμαίνεται μεταξύ δύο ορίων που εξαρτώνται από τα δυναμικά τροφοδοσίας $+V$ και $-V$.

Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής έχει άπειρη **απολαβή τάσεως** (gain), επειδή μια πολύ μικρή διαφορά μεταξύ U_1 και U_2 έχει ως αποτέλεσμα να παίρνει η έξοδος τιμή κόρου. Άλλα χαρακτηριστικά ενός ιδανικού τελεστικού ενισχυτή είναι ότι η σύνθετη αντίσταση μεταξύ των δύο εισόδων τείνει στο άπειρο και η σύνθετη αντίσταση της εξόδου τείνει στο μηδέν. Ο ιδανικός τελεστικός ενισχυτής έχει δύο δυνατές τιμές εξόδου $+U_K$ και $-U_K$ (σχ. 3.3β).

Στην πράξη, ο τελεστικός ενισχυτής χρησιμοποιείται με ανάδραση της εξόδου στην είσοδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3γ. Το κύκλωμα αυτό περιγράφει ένα αναστροφικό τελεστικό ενισχυτή. Η αντίσταση R_2 χρησιμοποιείται για την ανάδραση της εξόδου στην αναστροφική είσοδο, και η αντίσταση R_1 συνδέει την είσοδο U_i στο ίδιο σημείο του τελεστικού ενισχυτή. Το κοινό σημείο συνδέσεως ονομάζεται **σημείο αθροίσεως** (summing point). Η ανάδραση οδηγεί την έξοδο να ρυθμιστεί, ώστε:

- Η τάση στο σημείο αθροίσεως να παίρνει την τιμή της τάσεως στο (+), σημείο που είναι 0 σε αυτήν την περίπτωση και
- να μην κυκλοφορεί ρεύμα στους ακροδέκτες της εισόδου, επειδή στον ιδανικό τελεστικό ενισχυτή, η σύνθετη αντίσταση της εισόδου τείνει στο άπειρο, δηλαδή $I=0$.

Έτσι, το αλγεβρικό άθροισμα των εντάσεων στο σημείο αθροίσεως είναι μηδέν: $I_1 + I_2 = I = 0$. Χρησιμοποιώντας το νόμο του Ohm υπολογίζουμε την τάση εξόδου:

$$U_o = -\frac{R_2}{R_1} U_i \quad (3.14)$$

Στο σχήμα 3.3γ, όταν $R_2 < R_1$, τότε το κύκλωμα επιφέρει **εξασθένιση** (attenuation).

Στην περίπτωση των πρακτικών τελεστικών ενισχυτών πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράμετροι (σχ. 3.3δ):

α) Ένας πραγματικός τελεστικός ενισχυτής δεν έχει άπειρα μεγάλη απολαβή τάσεως. Η απολαβή τάσεως ανοικτού κυκλώματος ορίζεται ως η κλίση της κεκλιμένης γραμμής AB (σχ. 3.3δ).

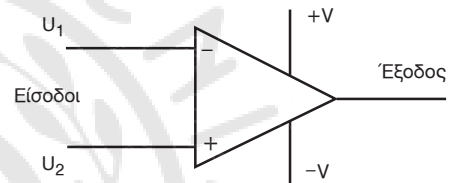
β) Δεν έχει άπειρη μεγάλη σύνθετη αντίσταση εισόδου.

γ) Έχει πολύ μικρή σύνθετη αντίσταση εξόδου, αλλά όχι ίση με το μηδέν. Οπότε, χρησιμοποιώντας το νόμο του Ohm έχουμε τάση εξόδου:

$$V_o = AU_a - \left(\frac{U_o - U_a}{R_2}\right) Z_o \quad (3.15)$$

όπου:

A η απολαβή τάσεως ανοικτού κυκλώματος,
 Z_o η σύνθετη αντίσταση εξόδου.



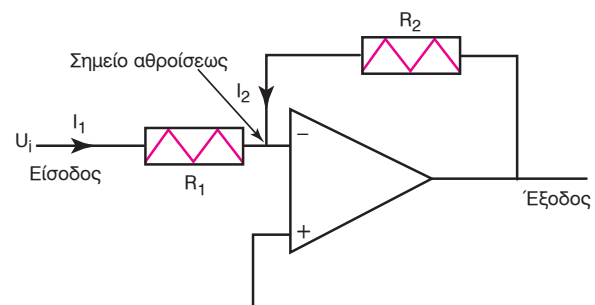
Σχ. 3.3α.

Σύμβολο του τελεστικού ενισχυτή.



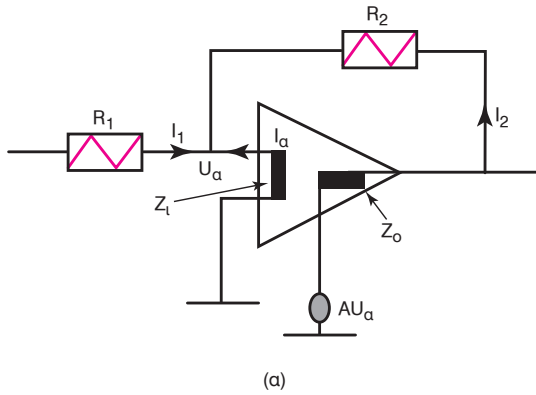
Σχ. 3.3β.

Σχέση μεταξύ εισόδου-εξόδου του ιδανικού τελεστικού ενισχυτή.

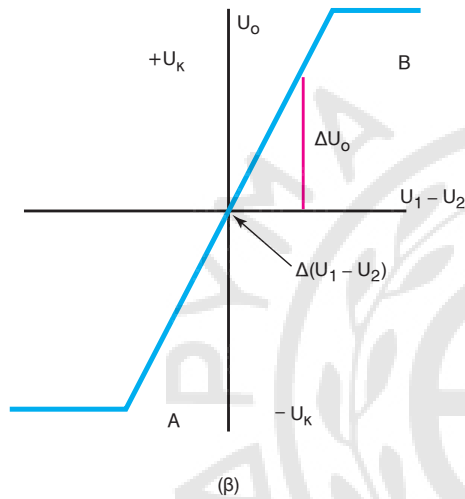


Σχ. 3.3γ.

Αναστροφικός τελεστικός ενισχυτής.



(a)



(β)

Σχ. 3.3δ.

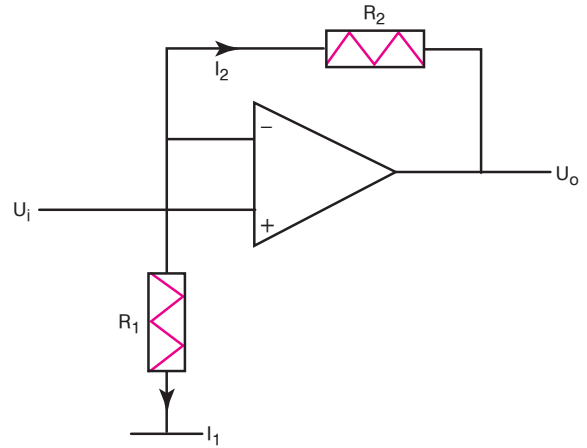
Πρακτικός τελεστικός ενισχυτής. α) Κύκλωμα. β) Χαρακτηριστικά πρακτικού τελεστικού ενισχυτή.

3.3.2 Μη αναστροφικός ενισχυτής.

Το κύκλωμα του μη αναστροφικού ενισχυτή φαίνεται στο σχήμα 3.3ε. Με βάση το νόμο του Ohm, η τάση εξόδου ισούται με:

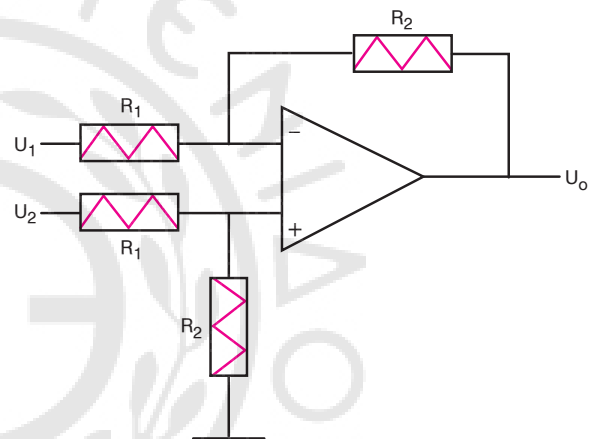
$$U_o = (1 + \frac{R_2}{R_1})U_i \quad (3.16)$$

Από τη σχέση (3.16) 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 εξασθένηση τάσεως, λόγω της μονάδας. Τέλος, η είσοδος συνδέεται απ' ευθείας με τη μη αναστρεφόμενη είσοδο του τελεστικού ενισχυτή, η δε σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος είναι πολύ υψηλή, γιατί είναι ίση με τη σύνθετη αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή.



Σχ. 3.3ε.

Μη αναστροφικός ενισχυτής.



Σχ. 3.3στ.

Διαφορικός ενισχυτής.

3.3.3 Διαφορικός ενισχυτής.

Ο διαφορικός ενισχυτής (σχ. 3.3στ) έχει ως σκοπό να ενισχύσει τη διαφορά δύο τάσεων. Η ανάλυση του κυκλώματος οδηγεί εύκολα στη σχέση:

$$U_o = \frac{R_2}{R_1}(U_2 - U_1) \quad (3.17)$$

Το σύστημα έχει απολαβή ίση με το λόγο R_2/R_1 και απόκριση τη διαφορά τάσεων που εφαρμόζεται στις δύο εισόδους. Το κύκλωμα αυτό έχει ένα βασικό μειονέκτημα, που είναι η χαμηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου. Αυτό το πρόβλημα λύνεται, όταν απαιτείται υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου με την προσθήκη στην κάθε μία είσοδο ενός βραχυκυκλωμένου τελεστικού ενισχυτή με την αρνητική είσοδό του. Οι προσθήκες αυτές ονομάζονται *ακόλουθοι τάσεως* (voltage followers) (σχ. 3.3ζ), επειδή η έξοδος

ακολουθεί την είσοδο σε περιοχή τιμών που ορίζεται από τις δύο τιμές τάσεων κόρου του τελεστικού ενισχυτή.

3.3.4 Ολοκληρωτής.

Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή με εφαρμογή στον αναλογικό υπολογιστή και σε συστήματα ελέγχου (όπου απαιτείται ολοκλήρωση σημάτων) είναι ο **ολοκληρωτής** (integrator) (σχ. 3.3η). Το κύκλωμα είναι απλό στην κατασκευή του και η ανάδραση του σήματος εξόδου του τελεστικού ενισχυτή γίνεται μέσω πυκνωτή (σχ. 3.3η). Η τάση εξόδου ισούται με:

$$U_o = -\frac{1}{RC} \int U_i dt \quad (3.18)$$

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

3.3.5 Διαφοριστής.

Ένα κύκλωμα τελεστικού ενισχυτή με πυκνωτή στην είσοδο και αντίσταση στην ανάδραση, είναι ένα κύκλωμα διαφορίσεως (σχ. 3.3θ) ή ένας **διαφοριστής** (differentiator) και εξομοιώνει τη σχέση της παραγωγίσεως. Η τάση εξόδου ισούται με:

$$U_i = -RC \frac{dU_o}{dt} \quad (3.19)$$

Και εδώ η σταθερά RC ονομάζεται **σταθερά χρόνου διαφορίσεως**.

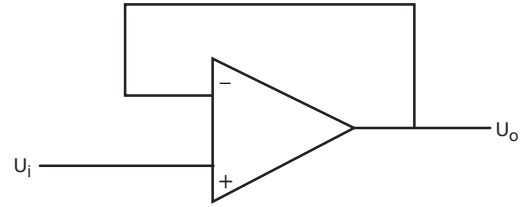
3.3.6 Ειδικά κυκλώματα.

Στα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται και άλλα ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπως αθροιστές, κυκλώματα μετατροπής τάσεως-ρεύματος, μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και αντίστροφα κ.ά., που ξεφεύγουν από το σκοπό αυτού του κεφαλαίου.

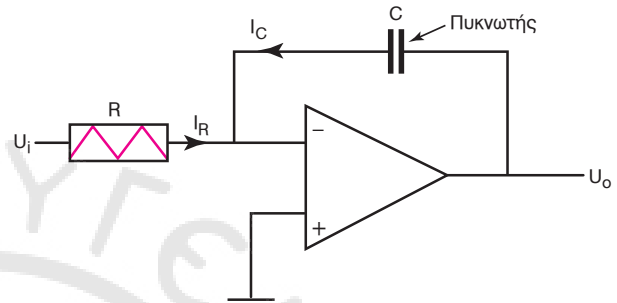
3.4 Πνευματικά εξαρτήματα.

3.4.1 Μετατροπέας ρεύματος σε πίεση.

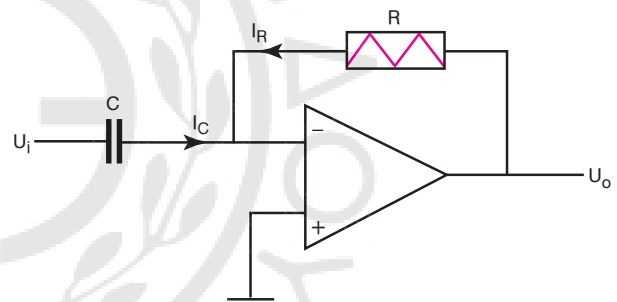
Αρκετές φορές σε διάφορες εφαρμογές συστημάτων ελέγχου είναι απαραίτητο να μετατραπεί μια ένταση ρεύματος σε πίεση σε μεγέθη από 4-20mA σε 20-100kPa αντίστοιχα. Αυτό επιτυγχάνεται με μία διάταξη που ονομάζεται **μετατροπέας ρεύματος**



Σχ. 3.3ζ.
Ακόλουθος τάσεως.

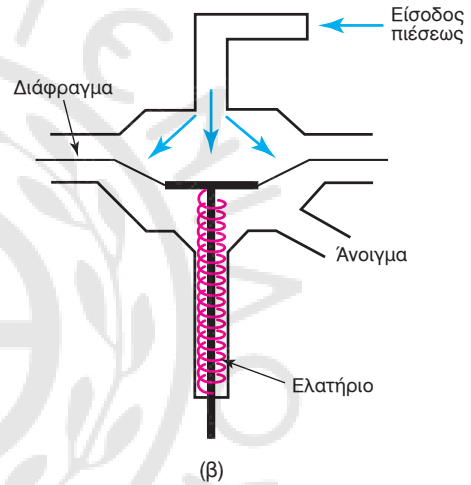
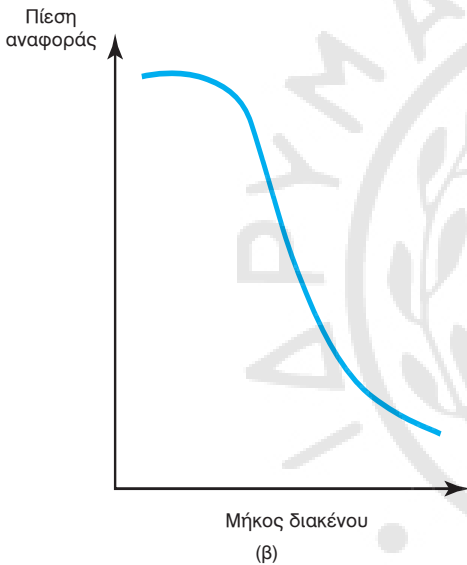
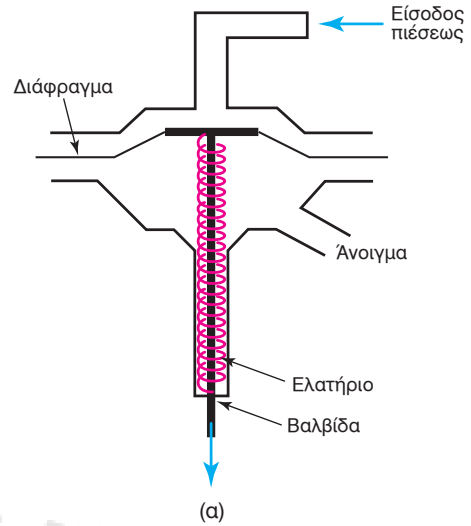
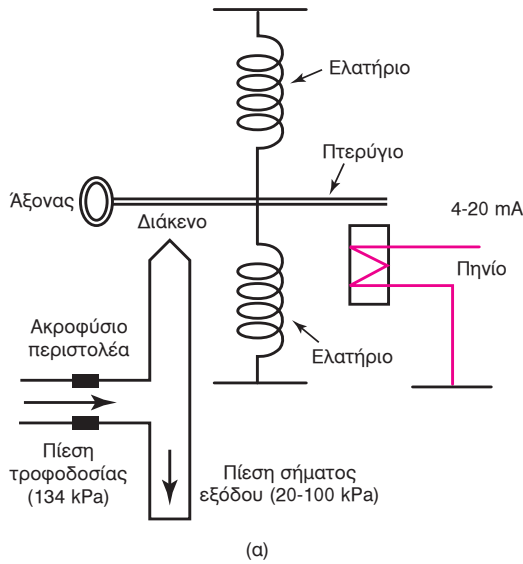


Σχ. 3.3η.
Ολοκληρωτής.



Σχ. 3.3θ.
Κύκλωμα διαφορίσεως.

σε πίεση (I to P converter). Το σύστημα αποτελείται από ένα σωληνοειδές πηνίο, το οποίο ελέγχεται από ένα ηλεκτρικό σήμα εντάσεως 4-20 mA, ένα περύγιο το οποίο μετακινείται από το πηνίο και αυξομειώνει το διάκενο μεταξύ ακροφυσίου-περυσίου και από μια πνευματική διάταξη (σχ. 3.4α). Μια πηγή αέρα σταθερής πίεσεως (περίπου 100 kPa) τροφοδοτεί συμπιεσμένο αέρα διά μέσου του περιστολέα στο ακροφύσιο. Το μήκος του διακένου ανάμεσα στο ακροφύσιο και το περύγιο ρυθμίζει το μέγεθος της εκροής, επομένως και την πίεση του αέρα που διοχετεύεται στο κάτω μέρος του σωλήνα, όπου είναι η έξοδος. Όταν το περύγιο κλείνει πλήρως το ακροφύσιο, η πίεση εξόδου είναι ίση με την πίεση της τροφοδοτικής πηγής. Η κίνηση του περυσίου ελέγχεται από το πηνίο, δηλαδή από την ένταση του ρεύματος.



Σχ. 3.4β.

Πνευματικός επενεργητής ορθής φοράς. α) Θέση χαμηλής πίεσεως. β) Θέση υψηλής πίεσεως.

Σχ. 3.4α.

Μετατροπέας ρεύματος σε πίεση. α) Διάταξη. β) Καμπύλη λειτουργίας.

3.4.2 Πνευματικός επενεργητής.

Ο **πνευματικός επενεργητής** (pneumatic actuator) ή **πνευματικό στοιχείο δράσεως** μετατρέπει ένα ενεργοποιό σήμα πίεσεως σε δύναμη ή ροπή στρέψεως, που απαιτείται για την ενεργοποίηση ενός στοιχείου ελέγχου. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο ότι η πίεση είναι ίση με τη δύναμη που ασκείται σε μοναδιαία επιφάνεια. Όταν υπάρχει μια διαφορά πίεσεως που εφαρμόζεται πάνω σε ένα διάφραγμα εμβαδού A , η συνολική δύναμη στο διάφραγμα δίνεται από τη σχέση:

$$F = (p_1 - p_2) A \quad (3.20)$$

όπου:

$p_1 - p_2$ η διαφορά πίεσεως (Pa),
 A το εμβαδόν του διαφράγματος (m^2) και
 F η δύναμη (N).

Έτσι για να διπλασιάσουμε τη δύναμη, με δεδομένη πίεση, αρκεί να διπλασιάσουμε το εμβαδόν του διαφράγματος, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν πολύ μεγάλες δυνάμεις με σχετικά μικρά σήματα πίεσεως, γύρω στα 20-100 kPa.

Οι συνηθέστεροι πνευματικοί επενεργητές είναι αυτοί που σχετίζονται με **βαλβίδες έλεγχου** (control valves). Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4β, έχουμε έναν **πνευματικό επενεργητή ορθής φοράς** (direct). Στο σχήμα 3.4β(α) η βαλβίδα βρίσκεται σε θέση χαμηλής πίεσεως και η ατμοσφαιρική πίεση κρατάει το έμβολο ψηλά, ενώ στο σχήμα 3.4β(β) η βαλβίδα βρίσκε-

ται σε θέση υψηλής πίεσης. Η κίνηση του εμβόλου ανοίγει ή κλείνει τη βαλβίδα, ανάλογα με το σύστημα ελέγχου. Η σχέση που συνδέει τη μετατόπιση του εμβόλου με την πίεση που εφαρμόζεται στην είσοδο του συστήματος είναι:

$$\Delta x = \frac{A}{K} \Delta p \quad (3.21)$$

όπου:

Δx η μετατόπιση εμβόλου (m),
 Δp η εφαρμοζόμενη πίεση (Pa) και
 A το εμβαδόν διαφράγματος (m^2).

Τέλος υπάρχουν και πνευματικοί επενεργητές *αντίστροφης φοράς* (reverse actuators).

3.5 Μηχανικά εξαρτήματα.

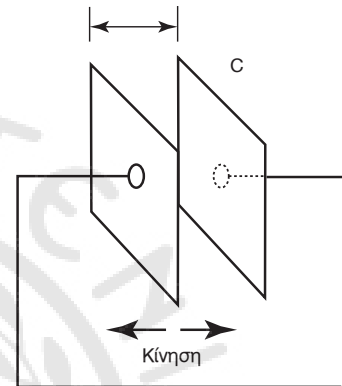
3.5.1 Μορφομετατροπέας μετατοπίσεως.

Ο πιο απλός μορφομετατροπέας μετατοπίσεως είναι το *ποτενσιόμετρο*. Η μετατόπιση του δρομέα του ποτενσιόμετρου, ρυθμίζει την αντίσταση εξόδου και επομένως την τάση εξόδου. Έτσι μετατρέπει την ευθύγραμμη ή περιστροφική κίνηση σε ηλεκτρικό σήμα τάσεως. Άλλοι τύποι μορφομετατροπέων μετατοπίσεως είναι διατάξεις μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής χωρητικότητας ή μεταβαλλόμενης αυτεπαγωγής. Στην πρώτη περίπτωση, εφαρμόζεται η αρχή ότι η χωρητικότητα μιας διατάξεως είναι αντίστροφως ανάλογη προς την απόσταση μεταξύ των δύο επιφανειών του πυκνωτή και ανάλογη προς την ενεργό επιφάνειά τους (σχ. 3.5α). Κατ' αυτόν τον τρόπο με μια μετατόπιση της μιας επιφάνειας, οι δύο επιφάνειες του πυκνωτή πλησιάζουν και η ηλεκτρική χωρητικότητα, αυξάνεται και αντίστροφα. Στη δεύτερη περίπτωση ο σιδηροπυρήνας, ο οποίος είναι μαγνητικά διαπερατός μετακινούμενος μέσα στο πηνίο, μεταβάλλει την αυτεπαγωγή του πηνίου, μετατρέποντας την ευθύγραμμη ή περιστροφική κίνηση σε ηλεκτρικό σήμα (σχ. 3.5β).

3.5.2 Μετρητής τάσεως.

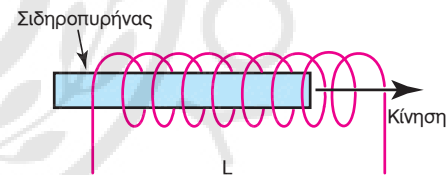
Ο *μετρητής τάσεως* ή *καταπονήσεως* (strain gage) είναι το σημαντικότερο εξάρτημα στα μηχανικά εξαρτήματα. Εφαρμόζεται στη μέτρηση μηχανικών τάσεων, πιέσεων, επιταχύνσεων, ροών και άλλων φυσικών ποσοτήτων. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην ύπαρξη μηχανικής τάσεως, που μεταβάλλει την ηλεκτρική αντίσταση του μετρητή ο οποίος εί-

ναι κατασκευασμένος από λεπτό μεταλλικό σύρμα ή από λεπτό στρώμα ημιαγωγίμου υλικού. Ο μετρητής αποτελείται από μια σχάρα με λεπτό σύρμα, η οποία είναι κολλημένη με ειδική κόλλα πάνω σε ένα ψιλό χαρτί (σχ. 3.5γ). 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. Επειδή η με-



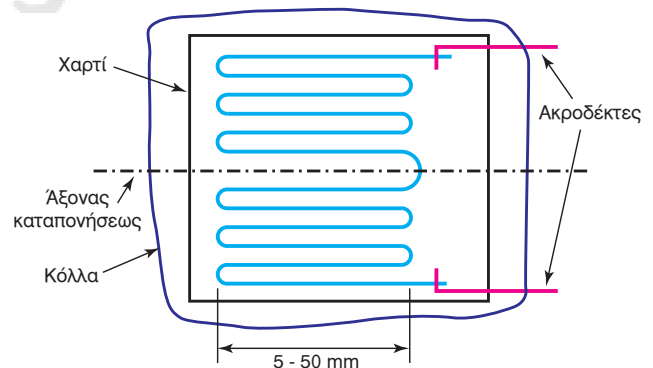
Σχ. 3.5α.

Μορφομετατροπέας μετατοπίσεως μεταβαλλόμενης χωρητικότητας.



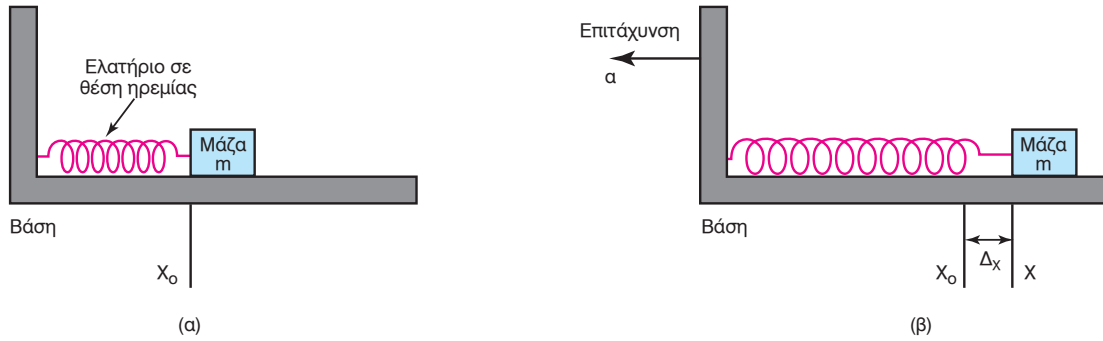
Σχ. 3.5β.

Μορφομετατροπέας μετατοπίσεως με μεταβαλλόμενη αυτεπαγωγή.



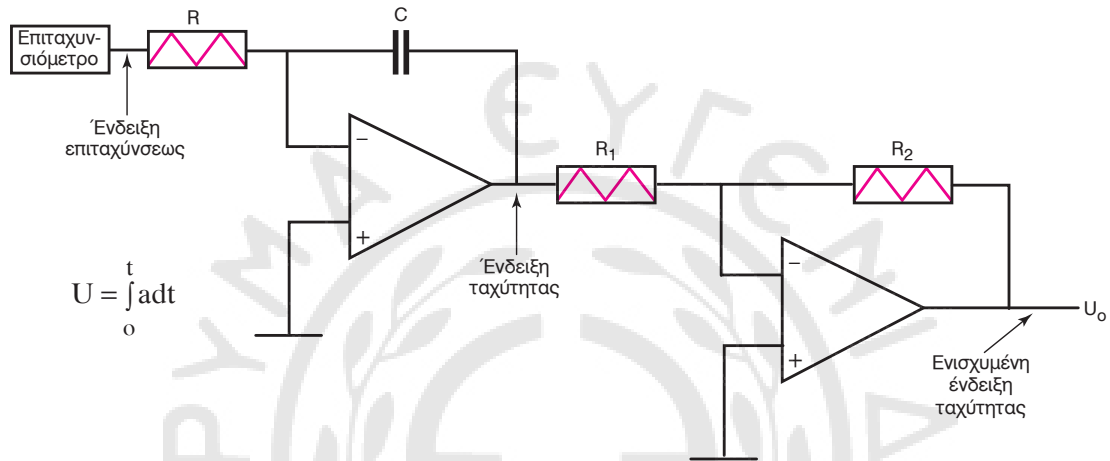
Σχ. 3.5γ.

Εφαρμογή μετρητή τάσεως για τη μέτρηση της καταπονήσεως ενός μετάλλου.



Σχ. 3.5δ.

Βασική διάταξη επιταχυνσιόμετρου. α) Χωρίς επιτάχυνση. β) Με επιτάχυνση.



Σχ. 3.5ε.

Μετατροπή επιταχυνσιόμετρου σε μετρητή ταχύτητας.

ταβολή στην ηλεκτρική αντίσταση του μετρητή τάσεως είναι σχετικά μικρή, η μέτρηση αυτή γίνεται με ειδικό κύκλωμα γέφυρας, που εξασφαλίζει μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση. Εξουδετερώνοντας έτσι τυχόν σφάλματα, λόγω μεταβολών θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και λόγω πολύ μικρών τιμών του ηλεκτρικού σήματος που ενεργοποιεί το μετρητή της αντιστάσεως.

3.5.3 Επιταχυνσιόμετρο.

Το **επιταχυνσιόμετρο** (accelerometers) εφαρμόζεται σε συστήματα ελέγχου στη ναυσιπλοΐα, στη δοκιμή προϊόντων, στην αναζήτηση πετρελαιοπηγών κ.ά. Η λειτουργία του βασίζεται στο **νόμο της αδράνειας** ($F=ma$) σε συνδυασμό με το **νόμο του Hooke** ($F=-Kx$). Έτσι, όταν είναι ίσες οι δύο αυτές δυνάμεις:

$$K\Delta x = ma \quad (3.22)$$

λύνοντας ως προς την επιτάχυνση a έχουμε:

$$a = \frac{k}{m} \Delta x \quad (3.23)$$

Άρα το επιταχυνσιόμετρο λειτουργεί ανάλογα με τη διεύθυνση της δυνάμεως που ασκείται συμπιέζοντας ή επιμηκύνοντας το ελατήριο που διαθέτει (σχ. 3.5δ). Από τη σχέση (3.23) μετρώντας την επιμήκυνση Δx του ελατηρίου, μετρούμε την επιτάχυνση a , γιατί υπάρχει άμεση αναλογία μεταξύ των 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). Το επιταχυνσιόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως όργανο μετρήσεως της ταχύτητας. Σε αυτήν την περίπτωση, συνδέουμε στην έξοδο του ένα κύκλωμα ολοκληρωτή και ενισχυτή (σχ. 3.5ε).

3.5.4 Μορφομετατροπείας πίεσεως.

Ο **μορφομετατροπείας πίεσεως** (pressure transducer), μετατρέπει την πίεση σε μετατόπιση κάποιου εξαρτήματος. Συνήθως για μέτρηση πιέσεων μεγαλύτερων της μιας ατμόσφαιρας, χρησιμοποιείται ως εξάρτημα το διάφραγμα (σχ. 3.5στ). Το διάφραγμα τοποθετείται σε μια διάταξη, όπου όταν ασκείται

πίεση στο αριστερό και δεξιό μέρος του, η ωφέλιμη δύναμη που εφαρμόζεται σε αυτό είναι:

$$F = (P_1 - P_2) A \quad (3.24)$$

όπου:

A το εμβαδόν διαφράγματος (m^2) και P_1, P_2 οι πιέσεις ($N/m^2, Pa$).

Το διάφραγμα λειτουργεί σαν ελατήριο στο οποίο εφαρμόζεται ο **νόμος του Hooke**. Στο σημείο ισορροπίας η εξίσωση των δύο δυνάμεων δίνει την σχέση της μετατοπίσεως του διαφράγματος ως προς την πίεση που ασκείται στην επιφάνειά του.

Μια ειδική διάταξη που μετατρέπει πιέσεις μεγαλύτερες από μια ατμόσφαιρα είναι ο **σωλήνας του Μπουρντόν** (Bourdon tube). Στο σχήμα 3.5ζ φαίνεται η διάταξη αυτή, στην οποία υπάρχει ένας καμπυλωτός σωλήνας κατασκευασμένος από ειδικό εύκαμπτο μέταλλο. Το μέταλλο αυτό μετατοπίζεται με την αύξηση της πίεσεως στο εσωτερικό του. Η μετατροπή της μετατοπίσεως που παράγεται από τους μορφομετατροπέας πίεσεως σε ηλεκτρικά σήματα γίνεται με ποτενοσιόμετρο ή μετρητή τάσεως.

3.5.5 Μορφομετατροπέας ροής.

Ο **μορφομετατροπέας ροής** χρησιμοποιείται για μετρήσεις ροής ενός υγρού. Η ροή μετρείται είτε ως ταχύτητα υγρού (m/s) είτε ως παροχή όγκου (m^3/s) είτε ως παροχή μάζας (kg/s). Η μέθοδος μετρήσεως βασίζεται στην **αρχή του Βεντούρι**. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5η, στο σωλήνα μέσα από τον οποίο ρέει το υγρό υπάρχει μια στένωση και έτσι δημιουργείται μια διαφορά πίεσεως ($P_2 - P_1$). Η διαφορά αυτή μπορεί να μετρηθεί από διάφραγμα ή άλλους μετρητές και είναι ανάλογη με την ταχύτητα ροής του υγρού. Άλλες μετρήσεις ροής εφαρμόζουν διάφορα εμπόδια στο δρόμο του υγρού (πλωτήρες, μικρές προπέλες, κ.ά.) και υπολογίζουν τις προκύπτουσες διαφορές στη ροή υγρού με ποτενοσιόμετρο, ταχύμετρο κ.ά. Όταν το υγρό έχει ικανοποιητική ηλεκτρική αγωγιμότητα, η μέτρηση της ροής μπορεί να γίνει με ηλεκτρονική μέθοδο. Το τμήμα του σωλήνα στο οποίο γίνεται η μέτρηση κατασκευάζεται από ειδικό μονωτικό υλικό, όπως το τεφλόν ή το γυαλί.

$$Q = C\sqrt{\Delta p} \quad (3.25)$$

όπου:

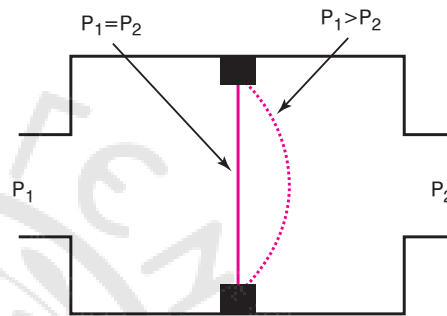
Q η παροχή,

C ο συντελεστής ροής και

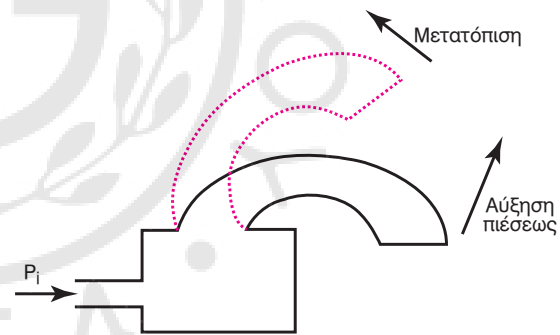
Δp η διαφορά πίεσεως ($P_1 - P_2$).

3.5.6 Οδοντωτοί τροχοί.

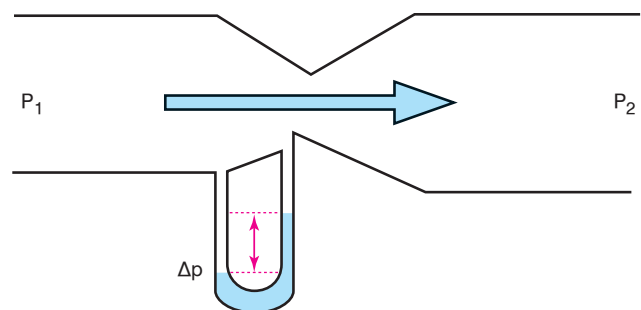
Σε συστήματα ελέγχου όπου υπάρχουν περιστρεφόμενα φορτία πρέπει να επιτυγχάνεται συχνά μια συγκεκριμένη ταχύτητα με μια ελάχιστη ροπή. Αυτό γίνεται με επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού κινητήρα και συστήματος οδοντωτών τροχών (γρανάζια). Αν η ταχύτητα του κινητήρα είναι μικρότερη από την επιθυμητή, με το κατάλληλο σύστημα οδοντωτών τροχών μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη



Σχ. 3.5στ.
Διάφραγμα.



Σχ. 3.5ζ.
Σωλήνας Μπουρντόν.



Σχ. 3.5η.
Μετρητής ροής.

ταχύτητα. Το ίδιο επίσης μπορεί να γίνει για την επίτευξη της κατάλληλης ροπής. Ένα σύστημα οδοντωτών τροχών φαίνεται στο σχήμα 3.5θ. Το σύστημα οδοντωτών τροχών μειώνει ή αυξάνει τη γωνιακή ταχύτητα, τη θέση και τη στρεπτική ροπή.

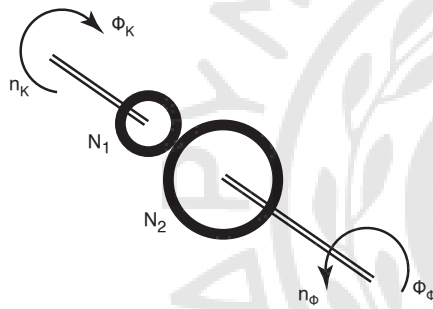
Οι σχέσεις που συνδέουν τις φυσικές μεταβλητές ενός συστήματος οδοντωτών τροχών είναι οι ακόλουθες:

$$N_2 \Phi_{\phi} = N_1 \Phi_K \quad (3.26)$$

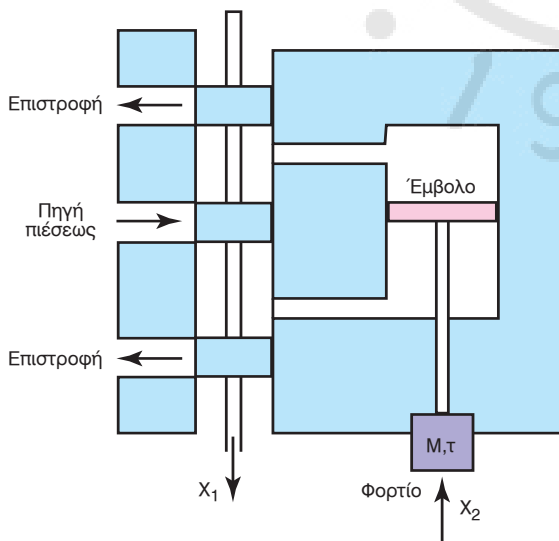
$$n_{\phi} = n_K \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad (3.27)$$

3.5.7 Υδραυλικός σερβοκινητήρας.

Ο υδραυλικός σερβοκινητήρας (σχ. 3.5ι) είναι ένας υδραυλικός ενισχυτής, που χρησιμοποιείται πολύ σε



Σχ. 3.5θ. Σύστημα οδοντωτών τροχών.



Σχ. 3.5ι. Υδραυλικός σερβοκινητήρας.

συστήματα ελέγχου αεροσκαφών για την κίνηση περρυγίων και αυτοκινήτων, στο σύστημα φρένων και τιμονιού. Μετατρέπει την ευθύγραμμη κίνηση σε ισχυρό σήμα πίεσεως.

3.6 Μετρητές θερμοκρασίας.

Οι μετρητές θερμοκρασίας είναι αισθητήρια που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας.

Τα κυριότερα από αυτά είναι τα εξής:

α) **Θερμόμετρα διαστολής** (Thermometer) (σχ. 3.6α). Θερμόμετρα που χρησιμοποιούν κάποιο ρευστό μέσα σε γυάλινο σωλήνα. Συνηθέστερα ρευστά είναι ο υδράργυρος και το οινόπνευμα. Φτάνουν σε θερμοκρασίες 500°C, ενώ ο υδράργυρος στερεοποιείται στους -39°C, η αλκοόλη στους -62°C και η τολουόλη στους -90°C.

β) **Αισθητήρες με αντίσταση** (Resistance temperature Detector-RTD) (σχ. 3.6β). Αισθητήρες που αποτελούνται από μέταλλα (π.χ. χαλκός, λευκόχρυ-



Σχ. 3.6α. Κλασικό θερμόμετρο.



Σχ. 3.6β. Θερμόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης.

σος, νικέλιο και βολφράμιο) ή κράματα, των οποίων η αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Η μεταβολή της αντιστάσεως εν γένει δεν είναι γραμμική. Μέσα όμως σε μια θερμοκρασιακή περιοχή μπορεί να είναι γραμμική με αρκετή προσέγγιση, ιδίως για το λευκόχρυσο. Οι αισθητήρες με αντίσταση χρησιμοποιούνται σε διάταξη γέφυρας, διατίθενται σε πολλές μορφές και έχουν πολλά πεδία εφαρμογών. Μετρούν τη θερμοκρασία υγρών και αερίων, την επιφανειακή θερμοκρασία στερεών και εμφανίζουν σταθερότητα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται στη χημική βιομηχανία για μέτρηση θερμοκρασίας διαβρωτικών υγρών και λυμάτων.

γ) **Θερμίστορ** (Thermistors) (σχ. 3.6γ). Κατασκευάζονται από οξειδία μετάλλων όπως νικελίου, μαγγανίου, ουρανίου, σιδήρου, κοβαλτίου και χαλκού και έχουν χαρακτηριστικά ημιαγωγών. Ως μετρητές θερμοκρασίας η λειτουργία τους στηρίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντιστάσεώς τους, ανάλογα με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η αντίστασή τους μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, αντίθετα από ό,τι συμβαίνει στην περίπτωση των αισθητήρων με αντίσταση. Έχουν μεγάλη ευαισθησία, μικρό μέγεθος, περιοχή μετρούσεως -80°C έως 300°C και είναι ευσταθή. Χρησιμοποιούνται επίσης για μέτρηση διαφοράς θερμοκρασίας όπως διαφορικός μετρητής θερμοκρασίας με θερμίστορ. Τα κύρια χαρακτηριστικά των αισθητήρων θερμοκρασίας που βασίζονται στα θερμίστορ είναι το πολύ μικρό μέγεθος, η ταχεία απόκριση στις μεταβολές θερμοκρασίας, το μεγάλο εύρος θερμοκρασίας όπου μπορούν να λειτουργήσουν, η υψηλή διακριτική ικανότητα σε μικρές περιοχές θερμοκρασίας, καθώς και ότι μπορούν να ενσωματωθούν επάνω σε στερεά σώματα και να μετρούν την επιφανειακή τους θερμοκρασία.

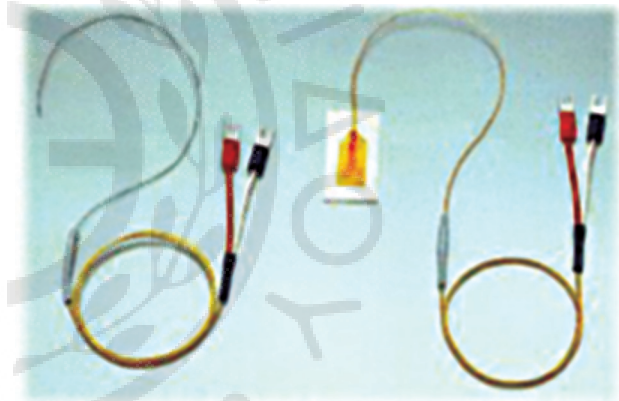
δ) **Ημιαγωγικοί μετρητές θερμοκρασίας** (Semiconducting Thermometer) (σχ. 3.6δ). Είναι ημιαγωγικές αντιστάσεις, που έχουν θετικό συντελεστή θερμοκρασίας (0,8% ανά $^{\circ}\text{C}$), καλή γραμμικότητα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως οι αισθητήρες με αντιστάσεις και τα θερμίστορ. Επίσης υπάρχουν ολοκληρωμένα κυκλώματα που συμπεριφέρονται σαν πηγές ρεύματος, των οποίων η ένταση εξαρτάται από τη θερμοκρασία και μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως μετρητές θερμοκρασίας.

ε) **Πυρόμετρα ακτινοβολίας** (Radiation Pyrometer) (σχ. 3.6ε). Χρησιμοποιούνται για πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ακτινοβολία, καθώς μετράνε το φως που εκπέμπουν.

Διακρίνονται σε **οπτικά**, **διχρωματικά** και **φωτοηλεκτρικά** πυρόμετρα (φωτοκύτταρα), τα οποία με τη σειρά τους χωρίζονται σε πυρόμετρα **φωτοεκπομπού**, **φωτο-αγωγού** και **φωτο-βολταϊκά**.



Σχ. 3.6γ.
Θερμίστορ NTC.



Σχ. 3.6δ.
Ημιαγωγικοί μετρητές θερμοκρασίας.



Σχ. 3.6ε.
Πυρόμετρα.

3.7 Ερωτήσεις.

1. Σε ποιες κατηγορίες διακρίνονται τα εξαρτήματα των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου;
2. Ποια είναι η λειτουργία του ποτενσιόμετρου ως μετρητή τάσεως;
3. Τι ονομάζουμε μορφομετατροπείς;
4. Σε πιο φαινόμενο στηρίζεται η λειτουργία του θερμοστοιχείου;
5. Ποια είναι η χρησιμότητα της σεισμικής μάζας στον πιεζοηλεκτρικό μεταλλάκτη;
6. Πώς λειτουργεί ένα τριφασικό σύστημα συγχρονομηχανών;
7. Πότε χρησιμοποιούμε ένα ειδικό συγχρονοσύστημα που ονομάζεται τάση σφάλματος;
8. Ποια είναι τα πλεονεκτήματα του ελέγχου σερβοκινητήρα συνεχούς ρεύματος από το πεδίο διεγέρσεως;
9. Τι παρατηρούμε στις χαρακτηριστικές καμπύλες σερβοκινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος;
10. Ποιοι παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ανάλυση του κυκλώματος ενός πρακτικού τελεστικού ενισχυτή;
11. Ποια είναι η χρησιμότητα του διαφορικού ενισχυτή;
12. Πώς λειτουργεί ένας μετατροπέας ρεύματος σε πίεση;
13. Ποια είναι η αρχή λειτουργίας του πνευματικού επενεργητή;
14. Τι είναι ο μετρητής τάσεως ή καταπονήσεως;
15. Πώς λειτουργεί ο σωλήνας του Μπουρντόν;
16. Πού χρησιμοποιούνται οι οδοντωτοί τροχοί;



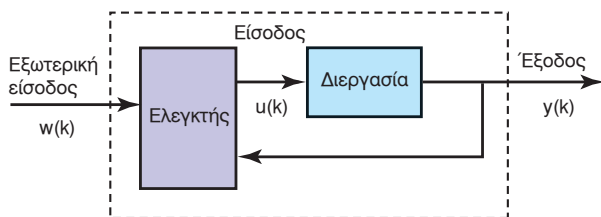
Ελεγκτές

4

4.1 Εισαγωγή.

Η σχεδίαση συστημάτων ελέγχου αποσκοπεί στον προσδιορισμό του κατάλληλου σήματος εισόδου, έτσι ώστε η διεργασία να έχει επιθυμητή συμπεριφορά. Η επιθυμητή συμπεριφορά της διεργασίας ποικίλλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της και τη λειτουργία που αυτή καλείται να εκτελέσει. Ο έλεγχος είναι αυτόματος, εφόσον το σήμα ελέγχου (είσοδος) παράγεται από μια συσκευή που ονομάζεται *ελεγκτής* (controller) και η οποία λειτουργεί αυτόματα. Ο ελεγκτής χρησιμοποιεί, γενικά, το σήμα εξόδου (απόδοση) του συστήματος έτσι ώστε να μεγιστοποιεί την πληροφορία που γνωρίζει για τη διεργασία και έτσι να διορθώνει αυτόματα την επιλογή της κατάλληλης εντολής εισόδου. Αυτή εξάλλου είναι και η αρχή λειτουργίας του ελέγχου κλειστού βρόχου (βλ. παρ. 1.3.2) που χαρακτηρίζεται από την ανατροφοδότηση των σημάτων εξόδου της διεργασίας (σχ. 4.1).

Ο βιομηχανικός έλεγχος βασίζεται κατά κανόνα στους ελεγκτές, για την αρχή των οποίων πρέπει να ανατρέξουμε στο 18ο αιώνα. Από τότε, εκατομμύρια ελεγκτές λειτουργούν ικανοποιητικά σε όλων των ειδών τις παραγωγικές διαδικασίες (βιομηχανία, μεταλλεία, ναυσιπλοΐα, αεροπλοΐα, κ.ά.) στον κόσμο, κάτω από δύσκολες και αντίξοες αρκετές φορές συνθήκες. Είναι σχεδόν βέβαιο ότι η βιομηχανική επανάσταση θα ήταν αδύνατη χωρίς αυτούς τους απλούς, αξιόπιστους και ευρέως διαδεδομένους ελεγκτές.



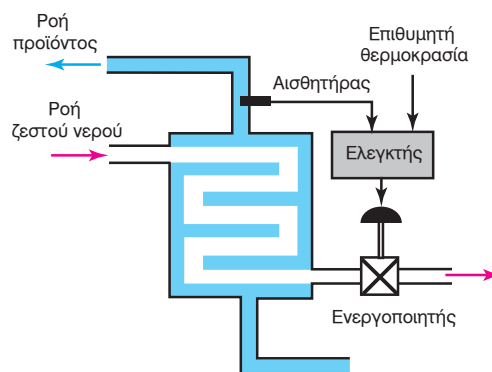
Σχ. 4.1.
Δομή κλειστού βρόχου.

4.2 Τύποι ελέγχου.

Στην πράξη, μια παραγωγική διεργασία συχνά περιέχει αριθμό βρόχων ελέγχου, κάθε ένας από τους οποίους έχει διαφορετικό σκοπό και διαφορετικές προδιαγραφές. Σε πολλές περιπτώσεις οι μεταβλητές των διαφόρων βρόχων αλληλεπιδρούν και η μεταβολή μιας μεταβλητής επηρεάζει όλες τις άλλες. Η ανάλυση και η σύνθεση των πολυμεταβλητών ελεγκτών είναι δύσκολη και απαιτεί γνώση της θεωρίας των πολυμεταβλητών συστημάτων ελέγχου. Υπάρχουν όμως και απλές περιπτώσεις, όπου οι μεταβλητές ενός βρόχου δεν επηρεάζουν άλλους, οπότε οι βρόχοι ελέγχου μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητοι. Έτσι διακρίνονται οι εξής βασικοί τύποι ελέγχου: ο έλεγχος μοναδικού βρόχου, ο έλεγχος λόγου, ο διαδοχικός έλεγχος και ο έλεγχος προσμεϊξέως.

4.2.1 Έλεγχος μοναδικού βρόχου.

Ο *έλεγχος μοναδικού βρόχου* (single-loop control) είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος ελέγχου. Στην περίπτωση αυτή, μια μεταβλητή της ελεγχόμενης διαδικασίας ελέγχεται αποκλειστικά από έναν ελεγκτή που δεν έχει διασύνδεση με άλλον. Ο βασικότερος στόχος του ελεγκτή είναι η τήρηση της εξόδου της διαδικασίας στην επιθυμητή τιμή, παρά τις διαταραχές που μπορεί να υποσθεί. Στο σχήμα 4.2α φαίνεται ένα



Σχ. 4.2α.
Έλεγχος μοναδικού βρόχου.

απλό παράδειγμα ελέγχου μοναδικού βρόχου. Η ελεγχόμενη διεργασία είναι ένας εναλλάκτης αντίστροφης ροής όπου ζεστό νερό κυκλοφορεί στο σπείρωμα του εναλλάκτη για να ζεσάνει το υγρό μέσα στο δοχείο. Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας στην έξοδο του εναλλάκτη μεταδίδει δεδομένα για τη θερμοκρασία της εξόδου του στον ελεγκτή, ο οποίος μεταβάλλει τη θέση μιας ηλεκτροβάνας και συνεπώς της ροής του ζεστού νερού στο σπείρωμα του εναλλάκτη. Σκοπός του ελεγκτή είναι να διατηρεί τη θερμοκρασία του τελικού προϊόντος σταθερή παρά τις διακυμάνσεις στις ροές των υγρών στα δύο κυκλώματα του εναλλάκτη.

4.2.2 Έλεγχος λόγου.

Στον *έλεγχο λόγου* (ratio control), στόχος του ελεγκτή είναι η τήρηση του λόγου δύο μετρούμενων μεταβλητών σε κάποια επιθυμητή τιμή.

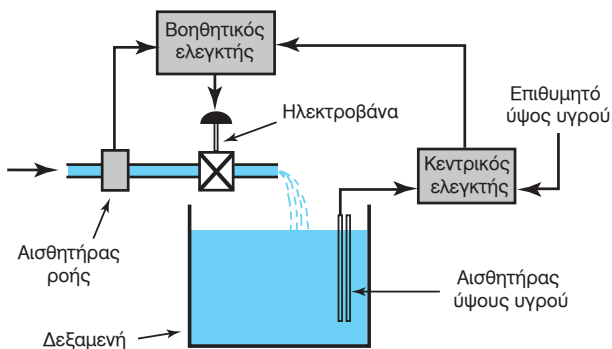
4.2.3 Διαδοχικός έλεγχος.

Στο *διαδοχικό έλεγχο* (cascade control), η έξοδος ενός βρόχου αποτελεί την επιθυμητή τιμή ενός δεύτερου βρόχου. Η μεταβλητή ελέγχου εξαρτάται από μια άλλη μεταβλητή, που έχει ανεξάρτητη ονομαστική τιμή. Στο σχήμα 4.2β φαίνεται ο έλεγχος στάθμης υγρού με διαδοχικό έλεγχο. Εδώ το ύψος του υγρού συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή και η διαφορά τροφοδοτεί το βοηθητικό ελεγκτή που ρυθμίζει μια ηλεκτροβάνα και τη ροή του εισερχόμενου υγρού.

4.2.4 Έλεγχος προσμείξεως.

Ο *έλεγχος προσμείξεως* (blend control) έχει ως στόχο την τήρηση των ποσοστιαίων ροών ή περισσοτέρων υλικών, η πρόσμειξη των οποίων αποτελεί το τελικό προϊόν της διαδικασίας.

Η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος ελέγχου



Σχ. 4.2β.
Διαδοχικός έλεγχος.

μπορεί να βελτιστοποιηθεί μόνο όταν όλοι οι ελεγκτές του έχουν συντονιστεί και λειτουργούν σωστά. Το μέτρο αποτελεσματικότητας εξαρτάται από:

- Την αντίδραση του συστήματος σε εξωτερικές διαταραχές, που προκαλούν απόκλιση των εξόδων από τις επιθυμητές τους τιμές.
- Το χρόνο αποκαταστάσεως του συστήματος μετά από κάποια διαταραχή και
- το πόσο καλά το σύστημα ακολουθεί τις προγραμματιζόμενες τιμές.

4.3 Συντονισμός ελεγκτών.

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι συντονισμού ενός ελεγκτή. Διακρίνονται κυρίως σε:

1) Πειραματικό συντονισμό εντός γραμμής.

Στην περίπτωση αυτή το σύστημα διεγείρεται με γνωστές διαταραχές (π.χ. σταθερές τιμές) και η απόκριση του συστήματος κλειστού βρόχου τροποποιείται μεταβάλλοντας διαδοχικά τις παραμέτρους του ελεγκτή, έως ότου η απόκριση του συστήματος κριθεί ικανοποιητική. Καμμία γνώση της θεωρίας ελέγχου, σχεδιασμού ελεγκτών δεν απαιτείται. Ο βαθμός με τον οποίο μεταβάλλονται οι παράμετροι του ελεγκτή είναι καθαρά θέμα εμπειρίας του συντονιστή, που βασίζεται συνήθως σε εμπειρικούς κανόνες. Στην πράξη οι έμπειροι συντονιστές μπορούν να πετύχουν πάρα πολύ καλά αποτελέσματα σε μικρό χρόνο. Βασικό μειονέκτημα της πειραματικής μεθόδου είναι πως δεν μπορεί να εγγυηθεί πως η απόκριση του συστήματος θα είναι βέλτιστη.

2) Συστηματικές μεθόδους.

Είναι αναλυτικές μέθοδοι που προέρχονται από εκτίμηση και ταυτοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς της ελεγχόμενης διαδικασίας. Διακρίνονται σε δύο βασικές μεθόδους ελέγχου: στη *μακροσκοπική μέθοδο*, που βασίζεται στην κλασική θεωρία ελέγχου, και απαιτεί μετρήσεις της ολικής συμπεριφοράς της διαδικασίας (σχέση εισόδου-εξόδου), χωρίς να απαιτείται γνώση των εσωτερικών δυναμικών παραμέτρων της διαδικασίας και στη *μικροσκοπική μέθοδο*, που βασίζεται στη σύγχρονη θεωρία και απαιτεί την πλήρη γνώση της δυναμικής συμπεριφοράς κάθε στοιχείου του συστήματος, γεγονός που την καθιστά δύσκολη μέθοδο, λόγω της συχνής ελλείψεως ολοκληρωμένης γνώσεως του συστήματος. Οι μέθοδοι αυτοί έχουν το πλεονέκτημα της απλότητας αλλά και το μειονέκτημα ότι είναι προσεγγιστικοί εφόσον ισχύουν για μικρές μόνο μεταβολές γύρω από το σημείο λειτουργίας.

4.4 Έλεγχος τριών όρων.

Ο έλεγχος τριών όρων (Proportional, Integral plus Derivative - PID) είναι ο πιο συνηθισμένος βιομηχανικός έλεγχος διεργασιών. Οι βιομηχανικοί ελεγκτές ενός, δύο ή τριών όρων αποτελούν τη βασική συνιστώσα του βιομηχανικού αυτοματισμού. Οι βιομηχανικοί ελεγκτές εμφανίζονται σε διάφορες μορφές, όπως:

- Αυτόνομο υλικό που λειτουργεί αναλογικά ή ψηφιακά και
- λογισμικό, ενσωματωμένο σε υπολογιστή.

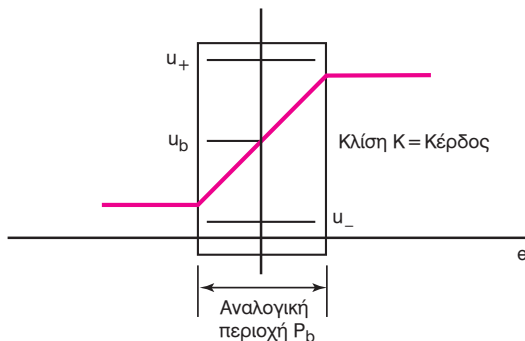
Οι ελεγκτές τριών όρων έκαναν την εμφάνισή τους κατά τη δεύτερη δεκαετία του 20ου αιώνα. Στις βιομηχανικές εφαρμογές συναντάμε τις εξής κατηγορίες ελέγχου:

1) Αναλογικός έλεγχος (Proportional control) - P.

Είναι η βασικότερη μέθοδος ελέγχου. Οι ταλαντώσεις ενός ελεγχόμενου συστήματος μπορούν να αποφευχθούν χρησιμοποιώντας ένα αναλογικό ελεγκτή, η έξοδος του οποίου είναι ανάλογη της εισόδου του και όχι απλώς του προσήμου της εισόδου. Αυτό συνεπάγεται ένα ελεγκτή που περιέχει ενισχυτή. Η έξοδος του αναλογικού ελεγκτή είναι σταθερή, όταν η είσοδος του σφάλματος e είναι μηδέν. Στο σχήμα 4.4α φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη ενός αναλογικού ελεγκτή, που χαρακτηρίζεται από τη σχέση εισόδου-εξόδου:

$$u = C(e) \quad (4.1)$$

Για να περιγραφούν πλήρως τα χαρακτηριστικά του ελεγκτή πρέπει πρώτα να προσδιορισθούν τα μέγιστα και ελάχιστα όρια u_+ και u_- της μεταβλητής ελέγχου, δηλαδή της εξόδου του ελεγκτή. Η γραμμική περιοχή ενός αναλογικού ελεγκτή ορίζεται από την κλίση K της χαρακτηριστικής καμπύλης δηλαδή, το αναλογικό κέρδος ή από το εύρος της



Σχ. 4.4α.

Χαρακτηριστική καμπύλη αναλογικού ελεγκτή.

καμπύλης P_b . Η αναλογική περιοχή και το κέρδος του ελεγκτή συνδέονται με τη σχέση:

$$u_+ - u_- = K P_b \quad (4.2)$$

και το εύρος ($u_+ - u_-$) αποτελεί το 100% της δράσεως ελέγχου και έτσι:

$$K = 100 / P_b \quad (4.3)$$

Στην πράξη, η χαρακτηριστική καμπύλη ενός αναλογικού ελεγκτή δεν είναι ιδανική, αλλά παρουσιάζει *απαλό κορεσμό* (soft saturation).

Ο κανόνας ελέγχου ενός απλού αναλογικού ελεγκτή είναι:

$$u = C(e) = Ke + u_b \quad (4.4)$$

Το βασικό μειονέκτημα του αναλογικού ελέγχου είναι ότι μπορεί να οδηγήσει μια ελεγχόμενη διεργασία σε μόνιμο σφάλμα, πράγμα ανεπιθύμητο.

2) Ολοκληρωτικός έλεγχος (integral control) ή έλεγχος επανατάξεως (reset control) - I.

Ένας αποτελεσματικός τρόπος εξαλείψεως του μόνιμου σφάλματος είναι η προσθήκη ενός ολοκληρωτικού όρου στη συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή. Με την προσθήκη αυτή εξομαλύνεται το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση. Το κέρδος του ανοικτού βρόχου γίνεται άπειρο στη μόνιμη κατάσταση. Με τον τρόπο αυτό ένα μικρό θετικό σφάλμα ολοκληρώνεται και αυξάνεται με το χρόνο, δημιουργώντας μια μεταβλητή ελέγχου (έξοδος) που χάρη στην ανάδραση, αναγκάζει το κλειστό κύκλωμα να επανέλθει στην επιθυμητή του κατάσταση. Όλα αυτά ισχύουν υπό τον όρο ότι το κλειστό σύστημα είναι ευσταθές, οπότε ο ολοκληρωτικός όρος ωθεί τη διεργασία σε μηδενικό σφάλμα.

3) Έλεγχος αναλογικός-ολοκληρωτικός - PI.

Ένας ελεγκτής δύο όρων ορίζεται από τη σχέση εισόδου-εξόδου:

$$u(t) = K[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau] \quad (4.5)$$

Ο ελεγκτής δύο όρων PI, είναι πολύ διαδεδομένος στην παραγωγή και έχει αναλάβει το κύριο φόρτο του βιομηχανικού ελέγχου. Άνω του 90% των πρακτικών εφαρμογών έχουν δύο μόνο όρους. Στη δράση του αναλογικού όρου τώρα προστίθεται ο ολοκληρωτικός όρος, που χρησιμοποιείται κυρίως για την εξάλειψη του μόνιμου σφάλματος, που είναι χαρακτηριστικό των αναλογικών ελεγκτών. Βέβαια,

η προσθήκη του δεύτερου όρου έχει και αρνητικές επιπτώσεις, εφόσον αυξάνει το βαθμό του συστήματος, αφού προκαλεί αστάθεια στο σύστημα.

4) Διαφορικός έλεγχος (differential control) ή έλεγχος ρυθμού (rate control) -D.

Κατά την εκκίνηση βιομηχανικών διεργασιών, η απόκλιση της ελεγχόμενης μεταβλητής από την επιθυμητή τιμή μεταβάλλεται ραγδαία, με αποτέλεσμα και η διορθωτική δράση του ελεγκτή να πρέπει να είναι ταχεία. Στην περίπτωση αυτή, ο ελεγκτής PI απαντά σχετικά αργά και δεν προσφέρει αποτελεσματικό έλεγχο. Χρειάζεται λοιπόν ένας άλλος τύπος ελεγκτή, η έξοδος του οποίου να εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία μεταβάλλεται η απόκλιση. Αυτό το προσφέρει ο διαφορικός έλεγχος, που ονομάζεται και **προληπτικός έλεγχος** (anticipatory control), γιατί προβλέπει και προλαμβάνει ενδεχόμενες μεταβολές της αποκλίσεως.

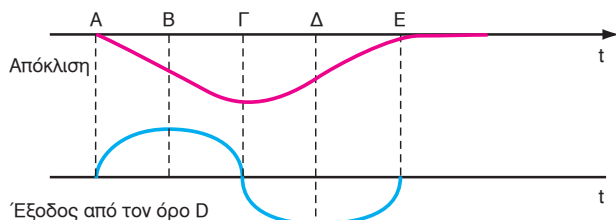
Στόχος του όρου D στη συνάρτηση μεταφοράς του σύνθετου ελεγκτή τριών όρων είναι κυρίως η βελτίωση της ευστάθειας του κλειστού συστήματος και η επιτάχυνση της βηματικής αποκρίσεως του συστήματος. Επειδή σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες υπάρχει έμφυτα κάποια αδράνεια και καθυστέρηση της αποκρίσεως μετά από διέγερση, ο όρος D προβλέπει την είσοδο της διεργασίας ώστε να της δώσει ευκαιρία να αντιδράσει έγκαιρα σε σφάλματα. Ο όρος D δεν συνιστά από μόνος του ελεγκτή αλλά πάντα σε συνεργασία με κάποιο άλλο όρο. Έτσι, σε συνεργασία με τον αναλογικό ελεγκτή P δημιουργούν έναν ελεγκτή τύπου PD, που έχει διαφορική εξίσωση:

$$u(t) = K[e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (4.6)$$

Στο σχήμα 4.4β φαίνεται η διορθωτική δράση του όρου D.

5) Έλεγχος τριών όρων P-I-D.

Το βασικό εργαλείο στο χώρο του βιομηχανικού



Σχ. 4.4β.

Διορθωτική δράση όρου D.

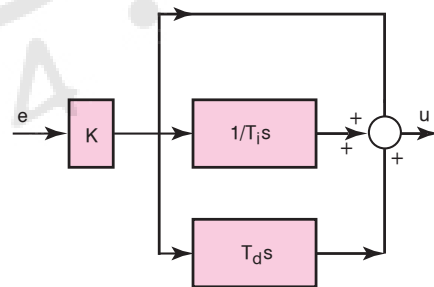
ελέγχου για την τροποποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς μιας διεργασίας είναι ο ελεγκτής τριών όρων. Όταν ο ελεγκτής αυτός λειτουργεί κανονικά και μέσα στα όρια της αναλογικής περιοχής του, τότε η δυναμική του συμπεριφορά περιγράφεται από μια διαφορο-ολοκληρωτική εξίσωση, η κλασική μορφή της οποίας περιέχει τρεις όρους (P-I-D) που είναι:

$$u(t) = K[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] = P + I + D \quad (4.7)$$

Η $u(t)$ είναι η μεταβλητή ελέγχου και αποτελεί την έξοδο του ελεγκτή και είσοδο της διεργασίας. Το σφάλμα μεταξύ της πραγματικής και επιθυμητής τιμής της εξόδου $y(t)$ της διεργασίας υπό έλεγχο είναι $y_{\text{επιθ}} - y_{\text{πραγμ}}(t)$. Η μεταβλητή ελέγχου, που είναι η έξοδος του ελεγκτή, είναι το άθροισμα των τριών όρων: του αναλογικού όρου P, (δηλ. ανάλογο του σφάλματος), ολοκληρωτικού I (δηλ. ανάλογο του ολοκληρώματος του σφάλματος) και του όρου D (ανάλογο της παραγώγου του σφάλματος). Οι παράμετροι ενός βιομηχανικού ελεγκτή τριών όρων είναι: το αναλογικό κέρδος K, ο χρόνος ολοκληρώσεως T_i και ο χρόνος παραγωγισμού T_d . Ο ελεγκτής τριών όρων έχει συνάρτηση μεταφοράς:

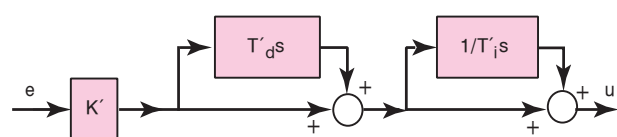
$$C(s) = K(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (4.8)$$

που μπορεί να εκφραστεί στις ακόλουθες μορφές: **παράλληλη** (σχ. 4.4γ), **σειριακή** (σχ. 4.4δ), και **ανα-**



Σχ. 4.4γ.

Παράλληλη αρχιτεκτονική ελεγκτή τριών όρων.



Σχ. 4.4δ.

Σειριακή αρχιτεκτονική ελεγκτή τριών όρων.

λυτική. Η παράλληλη μορφή είναι η πιο συχνή. Οι σταθερές χρόνου T_i , T_d δεν αλληλεπιδρούν αλλά το κέρδος K του αναλογικού όρου επηρεάζει όλους τους όρους.

Η σειριακή μορφή δεν χρησιμοποιείται συχνά, γιατί έχει το μειονέκτημα ότι οι σταθερές των όρων ολοκληρώσεως και παραγωγισμού αλληλοεπιδρούν.

Οι δύο αρχιτεκτονικές είναι ισοδύναμες και έχουν την ίδια συνάρτηση μεταφοράς, όταν:

$$\left. \begin{aligned} K &= K' \frac{(T'_d + T'_i)}{T'_i} \\ T_i &= T'_d + T'_i \\ T_d &= \frac{T'_d T'_i}{T'_d + T'_i} \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Τέλος, υπάρχει και η αναλυτική μορφή, που είναι χρήσιμη κατά την ανάλυση της ευστάθειας του κλειστού συστήματος και έχει το πλεονέκτημα ότι οι τρεις όροι εμφανίζονται ανεξάρτητα. Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή τριών όρων σε αναλυτική μορφή έχει δύο μηδενικά (z_1 , z_2) και έναν πόλο στην αρχή.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{k}{s} (s + z_1)(s + z_2) \quad (4.10)$$

4.5 Τεχνολογία ελεγκτών.

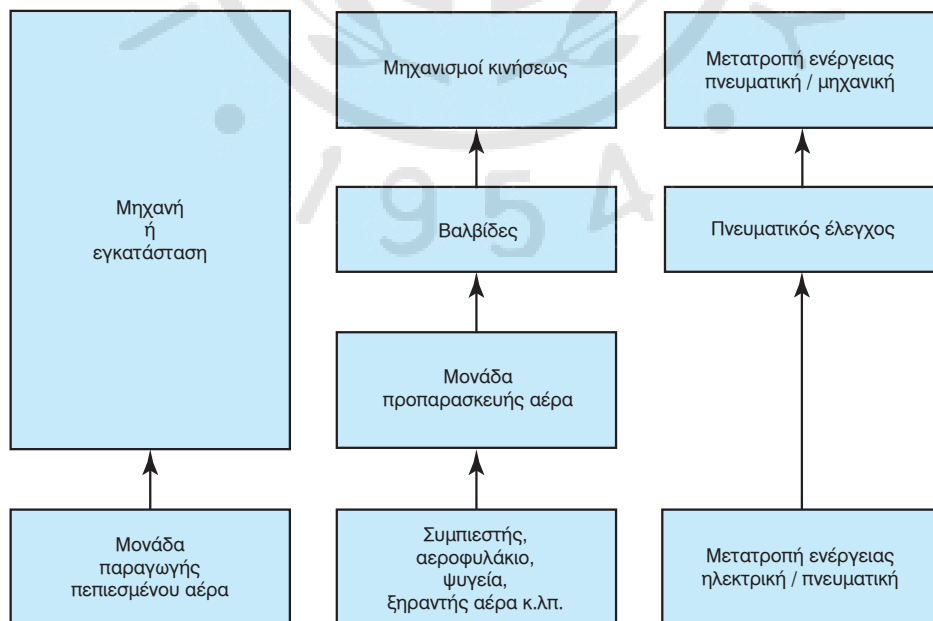
Οι ελεγκτές διακρίνονται ως προς την τεχνολογία λειτουργίας και κατασκευής σε: πνευματικούς και υδραυλικούς, ηλεκτρικούς, ηλεκτρονικούς και ψηφιακούς.

4.5.1 Πνευματικά και υδραυλικά συστήματα (ελεγκτές).

Πνευματικό σύστημα ονομάζεται οποιοδήποτε σύστημα χρησιμοποιεί την ενέργεια που έχει αποθηκευθεί στον πεπιεσμένο αέρα για να παράγει ωφέλιμο έργο (σχ. 4.5α). Τα πνευματικά συστήματα χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση μιας εργασίας που μπορεί να είναι επαναλαμβανόμενη, επικίνδυνη για τους χειριστές, να πραγματοποιείται σε μη φιλικό περιβάλλον ή να απαιτεί ακρίβεια ή ταχύτητα. Τα πνευματικά συστήματα άρχισαν να χρησιμοποιούνται από τη δεκαετία του 1950 στη βιομηχανία και εφαρμόζονται ως μέσο αυτοματισμού χαμηλού κόστους.

Στα πνευματικά συστήματα, οι **μηχανισμοί κινήσεως** (drive elements) είναι τα **ενεργά στοιχεία** (actuators) τα οποία ελέγχονται, έτσι ώστε η ενέργεια που παρέχει ο πεπιεσμένος αέρας να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες κατεργασίες, όπως πρέσες, σφύρες κλπ..

Στους μηχανισμούς κινήσεως πραγματοποιείται η



Σχ. 4.5α.

Οργάνωση πνευματικού συστήματος.

μετατροπή ενέργειας από πνευματική σε μηχανική, δηλαδή η αποθηκευμένη στον πεπιεσμένο αέρα ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανικό έργο. Οι μηχανισμοί κινήσεως διακρίνονται σε **μηχανισμούς γραμμικής κινήσεως**, στους οποίους ανήκουν οι **κύλινδροι απλής ενέργειας** (single-acting cylinders) και οι **κύλινδροι διπλής ενέργειας** (double-acting cylinders), και στους **μηχανισμούς περιστροφικής κινήσεως**, στους οποίους ανήκουν οι **περιστροφικοί ενισχυτές** (rotary actuators) και οι **κινητήρες πεπιεσμένου αέρα** (compressed-air motors).

Ο έλεγχος στα πνευματικά συστήματα γίνεται με βαλβίδες. Οι βαλβίδες ελέγχουν το δρόμο (path) του πεπιεσμένου αέρα προς τους μηχανισμούς κινήσεως. Η λειτουργία, καθώς και ο τρόπος ενεργοποίησης των βαλβίδων διαφέρει ανάλογα με τις απαιτήσεις των κατεργασιών. Στις βαλβίδες ανήκουν οι **βαλβίδες ελέγχου κατευθύνσεως** (directional control valves), οι **βαλβίδες ελέγχου παροχής** (flow-control valves), οι **βαλβίδες ελέγχου** (check valves) και οι **βαλβίδες ελέγχου πίεσεως** (pressure-control valves).

Υπάρχουν πολλοί τρόποι ελέγχου στα πνευματικά συστήματα οι οποίοι εξαρτώνται από τη φύση και το σκοπό της χρήσεώς τους, και είναι οι εξής:

- **Έλεγχος με πάτημα και άφηση** (press and release control) (αντίστοιχο του ηλεκτρικού κουδουνιού).
- **Έλεγχος με συγκράτηση** (hold on control) και
- **ακολουθιακός έλεγχος** (sequence control) (μια σειρά ON/OFF γεγονότων).

Ένα πνευματικό κύκλωμα ελέγχου περιέχει συνήθως τρία επίπεδα:

- Το **πρώτο** θέτει το σύστημα σε κίνηση, δηλαδή δίνει το σήμα εισόδου.
- Το **δεύτερο** επεξεργάζεται το σήμα και το μεταφέρει προς εκτέλεση και
- το **τρίτο** εκτελεί εντολή από μηχανισμό κινήσεως.

Στο επίπεδο ελέγχου, ο τρόπος λειτουργίας των βαλβίδων ελέγχου εξαρτάται από την εργασία για την οποία χρησιμοποιούνται. Στα απλά συστήματα ελέγχονται πνευματικά, δηλαδή τα στοιχεία ελέγχου λειτουργούν με πεπιεσμένο αέρα που τους παρέχουν τα στοιχεία σήματος. Για πιο σύνθετες εργασίες ο έλεγχος είναι ηλεκτροπνευματικός.

Ο εξοπλισμός των πνευματικών συστημάτων αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- **Μονάδα προπαρασκευής αέρα** (air-service unit). Χρησιμοποιείται για να πιστοποιείται η καλή

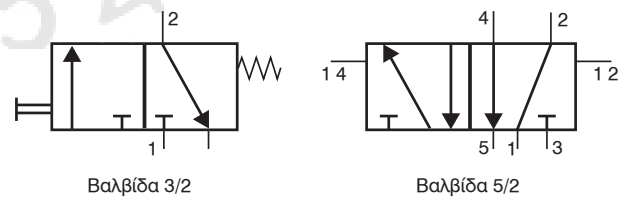
ποιότητα του πεπιεσμένου αέρα. Περιλαμβάνει: το φίλτρο αέρα, το διαχωριστή νερού, τη βαλβίδα ρυθμίσεως πίεσεως, το μανόμετρο και τη βαλβίδα ελέγχου (ON/OFF).

- **Βαλβίδες ελέγχου κατευθύνσεως** (directional control valves). Στον πνευματικό έλεγχο, ως προς τη λειτουργία τους, χρησιμοποιούνται **ως στοιχεία σήματος** (signaling elements) ή **στοιχεία ελέγχου** (control elements). Επίσης χαρακτηρίζονται από **στόμια** (connections ή ports) και **θέσεις** (switching positions). Η βαλβίδα ελέγχου κατευθύνσεως που έχει μ στόμια και ν θέσεις ονομάζεται "βαλβίδα μ/ν" ή "μ-οδική βαλβίδα ν θέσεων". Τέτοιες βαλβίδες είναι η **βαλβίδα 3/2** (χειρισμός με μπουτόν, θέση ηρεμίας κλειστή και επαναφορά με ελατήριο), η **βαλβίδα 5/2** (με πνευματική οδήγηση) (σχ. 4.5β) κλπ..

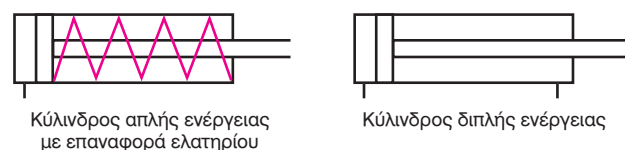
- **Κύλινδροι** (cylinder). Βρίσκονται συνήθως στο επίπεδο εκτελέσεως, αποτελούν δηλαδή μηχανισμούς κινήσεως. Διακρίνονται σε κυλίνδρους απλής ενέργειας με επαναφορά ελατηρίου και κυλίνδρους διπλής ενέργειας (σχ. 4.5γ).

Τα πνευματικά συστήματα έχουν κάποια μειονεκτήματα όπως ότι υπάρχει κίνδυνος διαρροής του συστήματος λόγω πολύ μεγάλης αποθηκευμένης ενέργειας, ότι έχουν μεγάλη ευαισθησία στα ξένα σωματίδια που θα υπεισέλθουν στον πεπιεσμένο αέρα και τέλος ότι η δημιουργία γραμμικής κινήσεως είναι περιορισμένης αποστάσεως (2 m) και περιορισμένης δυνάμεως (3000 kp).

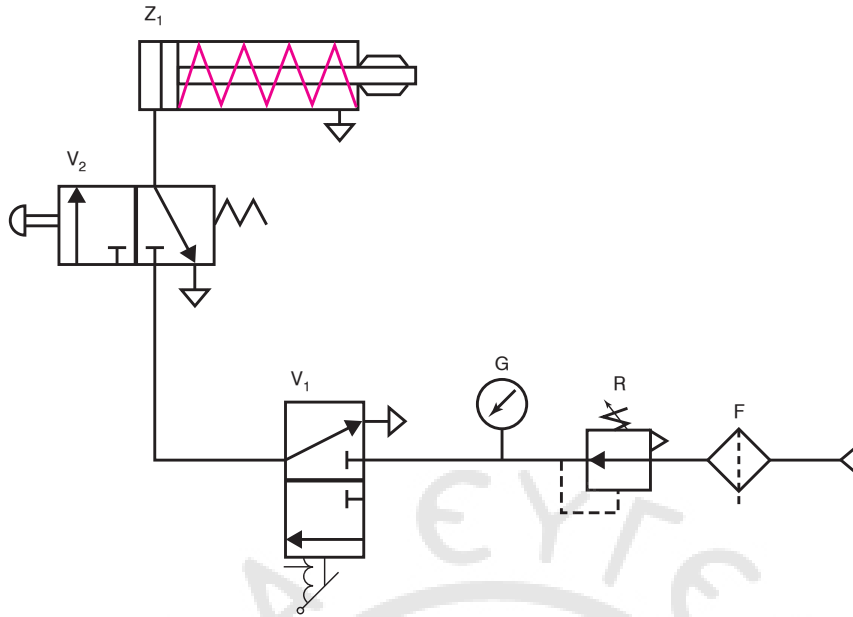
Ακολουθεί ένα απλό κύκλωμα πνευματικού ελέγχου, κυλίνδρου απλής ενέργειας, με χρήση βαλβίδας ελέγχου κατευθύνσεως 3/2 με χειρισμό κομβίου (μπουτόν) και επαναφορά ελατηρίου (σχ. 4.5δ).



Σχ. 4.5β.
Είδη βαλβίδων.



Σχ. 4.5γ.
Είδη κυλίνδρων.

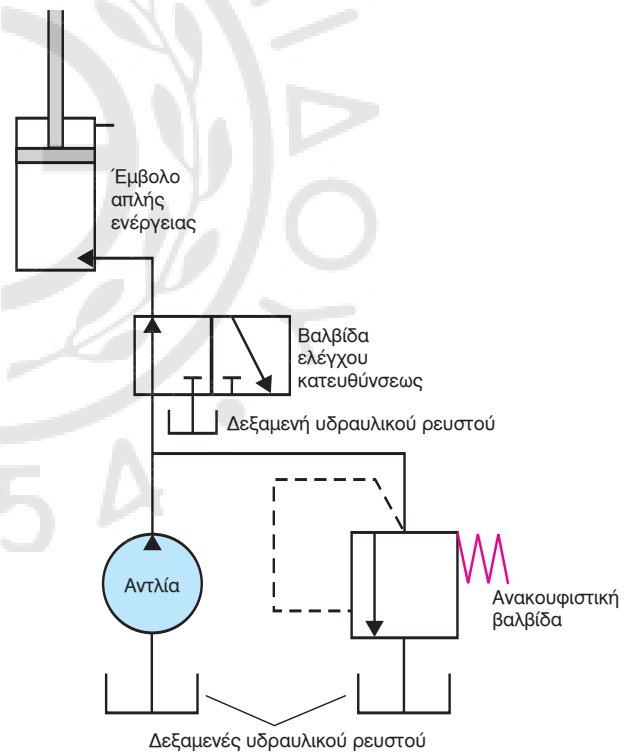


Σχ. 4.5δ.

Κύκλωμα κυλίνδρου απλής ενέργειας με βαλβίδα 3/2 με χειρισμό κομβίου (μπουτόν) και επαναφορά ελατηρίου.

Υδραυλικά συστήματα ονομάζουμε τα συστήματα μεταφοράς ισχύος που αποτελούνται από αντλίες, σωληνώσεις, επιστόμια και υδραυλικούς κινητήρες, περιστροφικούς ή παλινδρομικούς, που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ροπής ή δύναμης. Τα υδραυλικά συστήματα απαιτούν μικρό όγκο και μάζα των υδραυλικών κινητήρων, είναι ελαστικά, πολύ άκαμπτα και έχουν σχετικά μεγάλη ταχύτητα αντίδρασης, στην οποία συντελεί η μεγάλη άκαμψία και οι μικρές μάζες. Οι μηχανισμοί τους είναι ανθεκτικοί στην υγρασία και το διαβρωτικό περιβάλλον, λόγω της καλής στεγανότητας για την αντιμετώπιση των υψηλών πιέσεων λαδιού που επικρατούν μέσα στους μηχανισμούς. Παρέχουν τη δυνατότητα άνετης μεταβολής των στροφών ενός άξονα μέχρι μηδενικής τιμής και επίσης προσφέρουν, κατ' επιλογή, μεταβολή της χρήσιμης ροπής στρέψεως ή της δύναμης, με μεταβολή της πίεσης λειτουργίας του συστήματος. Η μέγιστη τιμή της πίεσης του συστήματος περιορίζεται με ασφαλιστικές βαλβίδες.

Τα υδραυλικά συστήματα έχουν κάποια μειονεκτήματα όπως: υπάρχει κίνδυνος διαρροής και ρυπάνσεως του περιβάλλοντος από τα ρευστά που περιέχονται στα κυκλώματα, έχουν μεγάλη ευαισθησία στα ξένα σωματίδια που μπορεί να υπεισέλθουν στο υδραυλικό ρευστό, επειδή οι ανοχές μεταξύ των σταθερών και κινητών μερών είναι πολύ μικρές λόγω υψηλών πιέσεων λειτουργίας και υπάρχει σχετικός κίνδυνος διάρρηξης του συστήματος λόγω



Σχ. 4.5ε.

Υδραυλικό κύκλωμα ελέγχου εμβόλου απλής ενέργειας με 3/2 βαλβίδα.

της πολύ μεγάλης αποθηκευμένης ενέργειας.

Απλό υδραυλικό σύστημα ελέγχου εμβόλου απλής ενέργειας με 3/2 βαλβίδα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5ε.

4.5.2 Ηλεκτρικοί ελεγκτές.

Οι ηλεκτρικοί ελεγκτές χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα αυτόματου ελέγχου. Ο χειρισμός τους γίνεται με το χέρι, με την κίνηση κάποιου μηχανικού εξαρτήματος, με κάμψη μιας διμεταλλικής ράβδου ή με κάποιο ηλεκτρομαγνήτη.

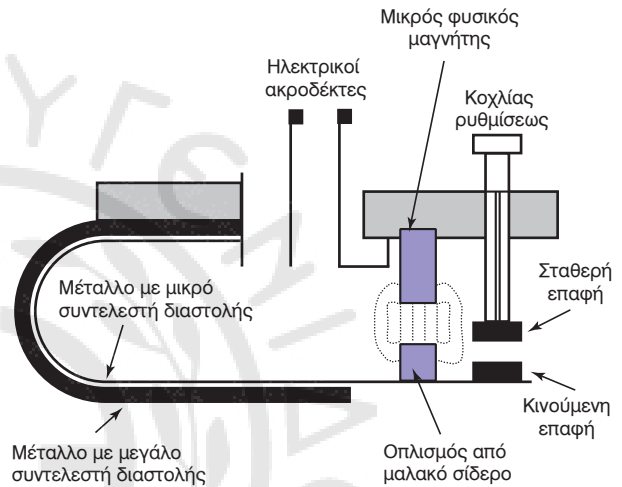
Ο πιο απλός ηλεκτρικός ελεγκτής είναι των **δύο βαθμίδων ON-OFF** (σχ. 4.5στ), που χρησιμοποιείται στον έλεγχο της θερμοκρασίας χώρου. Αποτελείται από ένα διμεταλλικό έλασμα, το ένα άκρο του οποίου είναι σταθερό το δε άλλο ελεύθερο, για να κινείται πάνω-κάτω, ανάλογα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Το κύκλωμα ρυθμίζεται έτσι ώστε οι επαφές να είναι κλειστές, όταν το περιβάλλον έχει τη επιθυμητή θερμοκρασία. Η ρύθμιση αυτή επιτυγχάνεται με τον κοχλία ρυθμίσεως. Όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξηθεί, το διμεταλλικό έλασμα κάμπτεται προς τα κάτω και ανοίγει τις επαφές. Ο μικρός μαγνήτης εξασφαλίζει την απότομη και σίγουρη κίνηση του ελάσματος κατά το άνοιγμα και το κλείσιμο των επαφών, ώστε να μη φθείρονται από τη δημιουργία ηλεκτρικών εκφορτίσεων.

Ένας άλλος απλός ηλεκτρικός ελεγκτής είναι ο **αναλογικός** (σχ. 4.5ζ). Αποτελείται από δύο ποτενσιόμετρα με έναν τροφοδότη εναλλασσόμενου ρεύματος σε σύνδεση τύπου γέφυρας. Το κύκλωμα συμπληρώνεται με ένα ηλεκτρονόμο, ο οποίος μετράει το υπάρχον σφάλμα και με ένα μονοφασικό κινητήρα, ο οποίος κινεί το βάκτρο μιας βαλβίδας. Η λειτουργία του κυκλώματος είναι η ακόλουθη: όταν επισημανθεί κάποια απόκλιση, το κινητό μέρος του ποτενσιόμετρου ελέγχου μετακινείται και διαταράσσεται η ηλεκτρική ισορροπία στη γέφυρα. Έτσι αυξάνεται η διέλευση του ρεύματος από τη μια σπειρά του ηλεκτρονόμου, με αποτέλεσμα το κινητό μέρος του να κλείσει τις αντίστοιχες επαφές. Αυτό το κλείσιμο θέτει σε λειτουργία τον κινητήρα οπότε το βάκτρο κινείται και ταυτόχρονα ενημερώνεται το ποτενσιόμετρο μέσω του δρομέα του και επέρχεται ισορροπία στη γέφυρα, ο ηλεκτρονόμος επανέρχεται στην ουδέτερη θέση και ο κινητήρας αδρανεί. Αν όμως υπάρξει απόκλιση προς την αντίθετη κατεύθυνση ο ηλεκτρονόμος κλείνει τις άλλες επαφές και ο κινητήρας περιστρέφεται αναστροφή. Ένα μειονέκτημα του κυκλώματος είναι η μέτρια επίδοση του λόγω μικρής ευαισθησίας του ηλεκτρονόμου κατά την εμφάνιση μικρών αποκλίσεων. Βελτίωση

του κυκλώματος επιτυγχάνεται με αντικατάσταση του ηλεκτρονόμου από ένα ηλεκτρονικό ελεγκτή. Σήμερα, όλο και περιορίζονται οι εφαρμογές των ηλεκτρικών ελεγκτών λόγω της μεγάλης διεισδύσεως των ηλεκτρονικών και ψηφιακών ελεγκτών.

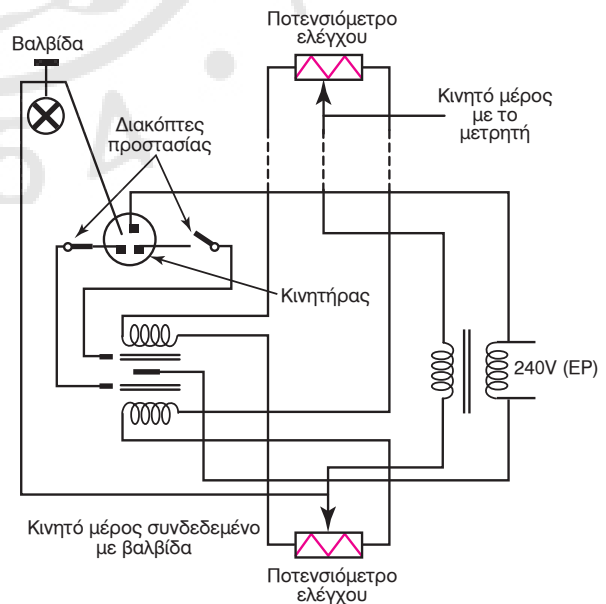
4.5.3 Ηλεκτρονικοί ελεγκτές.

Οι **ηλεκτρονικοί ελεγκτές** έχουν μαζί με τους **ψηφιακούς ελεγκτές** που θα εξετάσουμε παρακάτω τη μεγαλύτερη εφαρμογή στα συστήματα αυτόματου



Σχ. 4.5στ.

Απλός ηλεκτρικός ελεγκτής δύο βαθμίδων ON-OFF, διμεταλλικός θερμοστάτης.



Σχ. 4.5ζ.

Ηλεκτρικός αναλογικός ελεγκτής.

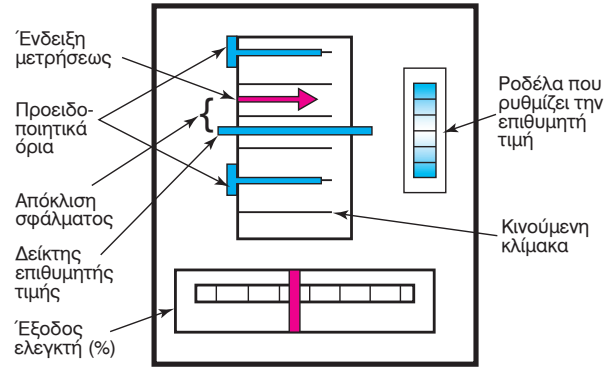
ελέγχου. Οι ελεγκτές αυτοί χρησιμοποιούν τελεστικούς ενισχυτές στα κυκλώματά τους. Οι συνηθισμένοι ηλεκτρονικοί ελεγκτές, που χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές διεργασίες, διαθέτουν έναν πίνακα ελέγχου (σχ. 4.5η). Σε αυτόν τον πίνακα ελέγχου υπάρχουν όργανα για τη συνεχή παρακολούθηση της διεργασίας και ένας μηχανισμός με τον οποίο καθορίζεται το σημείο ρυθμίσεως (επιθυμητή τιμή) της ελεγχόμενης μεταβλητής. Επίσης υπάρχει ένα όργανο με την ένδειξη της εξόδου του ελεγκτή σε κλίμακα 0-100%. Η ίδια η ένδειξη είναι δυνατό σε άλλες διατάξεις να παρουσιάζεται ψηφιακά. Στον πίνακα ελέγχου υπάρχει ένας μετρητής, ο οποίος παρέχει τη στιγμιαία τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής σε ποσοστό. Η ένδειξη αυτή συγκρίνεται με το δείκτη του σημείου ρυθμίσεως και προκύπτει έτσι μια στιγμιαία ένδειξη του σφάλματος, της ελεγχόμενης μεταβλητής από την επιθυμητή τιμή. Υπάρχουν επίσης δύο δείκτες, οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν πάνω και κάτω από το σημείο ρυθμίσεως και χρησιμεύουν ως όρια προειδοποίησης της τιμής του σφάλματος. Όταν το σφάλμα υπερβεί τα όρια ενεργοποιείται ένα κουδούνι, που ειδοποιεί τον υπεύθυνο τεχνικό να επέμβει αποτελεσματικά και να προλάβει τυχόν ζημιές στη διεργασία. Σε πιο προηγμένους πίνακες ελέγχου υπάρχει διακόπτης μετατροπής της διαδικασίας ελέγχου από αυτόματη σε χειρορρυθμιζόμενη και επιλογείς για τη ρύθμιση της ζώνης αναλογίας και των παραμέτρων, που σχετίζονται με τις υπόλοιπες μεθόδους ελέγχου. Όταν ο έλεγχος γίνεται με Η/Υ υπάρχει ειδική είσοδος για το σήμα του υπολογιστή, που μεταφέρει τις εκάστοτε εντολές ελέγχου.

Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ενεργοποιείται από το σήμα σφάλματος που παράγεται στο συγκριτή. Υπάρχουν δύο βασικοί μέθοδοι για την παραγωγή ενός ηλεκτρονικού σήματος σφάλματος.

- Χρήση ηλεκτρικών αντιστάσεων (σχ. 4.5θ).
- Χρήση τελεστικού ενισχυτή.

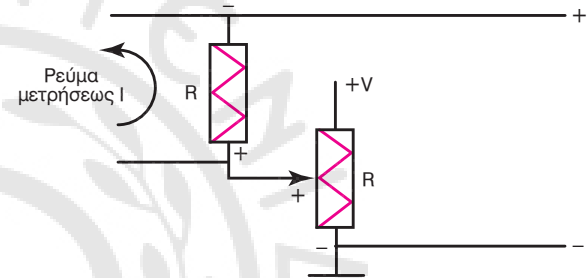
Ο πιο χρησιμοποιούμενος ελεγκτής είναι ο ελεγκτής ON-OFF ή ελεγκτής δύο βαθμίδων. Θα τον βρούμε στα περισσότερα σπίτια και γραφεία που έχουν συστήματα κλιματισμού, τα οποία λειτουργούν με ελεγκτές δύο βαθμίδων. Οι περισσότεροι ελεγκτές του τύπου αυτού χρησιμοποιούν το σύστημα **διμεταλλικής ράβδου** (bimetallic strip) σε συνδυασμό με ένα **διακόπτη υδραργύρου** (mercury switch) (σχ. 4.5ι).

Ελεγκτής ON-OFF είναι επίσης και ο ελεγκτής



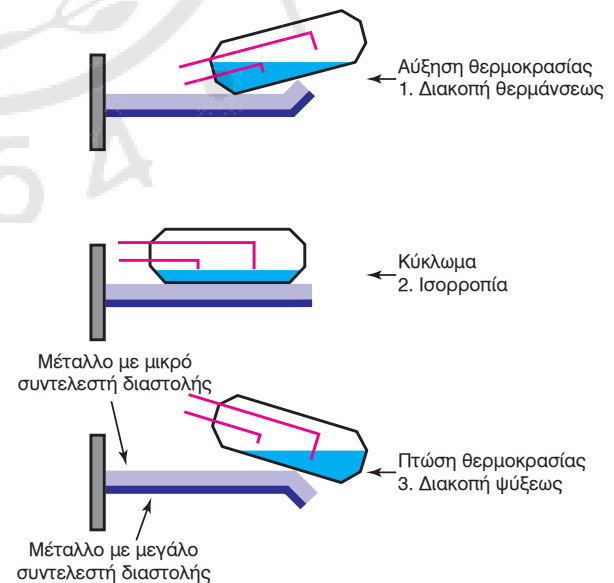
Σχ. 4.5η.

Εξωτερικό πλαίσιο ενός πίνακα ελέγχου.



Σχ. 4.5θ.

Μετρητής σφάλματος με αντιστάσεις.



Σχ. 4.5ι.

Λειτουργία διμεταλλικού ελεγκτή με διακόπτη υδραργύρου.

με δύο τελεστικούς ενισχυτές (αθροιστή, αναστροφέα) και ένα συγκριτή (σχ. 4.5ια). Η μεταβλητή αντίσταση R2 επιτρέπει τη ρύθμιση του εύρους της ουδέτερης ζώνης. Το σήμα εξόδου είναι η τάση σφάλματος, ενώ το σήμα εξόδου U_o είναι δυαδικό (0 ή U_o). Ο συγκριτής αλλάζει το σήμα στην έξοδο 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 ($U_{\Sigma P}$) (σχ. 4.5ιβ).

Οι αντίστοιχοι ηλεκτρονικοί ελεγκτές των ελεγκτών τριών όρων P,I,D, είναι οι ακόλουθοι:

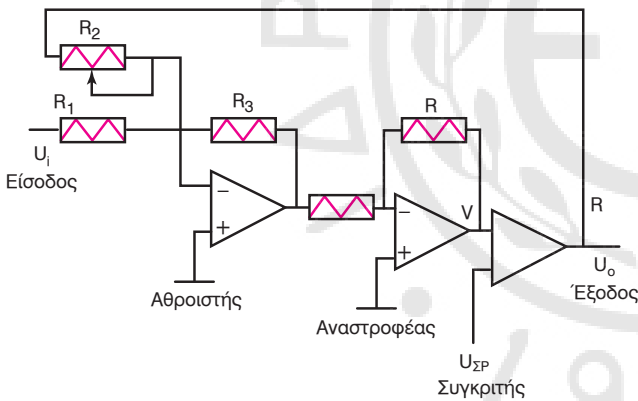
1) Αναλογικός ηλεκτρονικός ελεγκτής (P).

Η σχέση που χαρακτηρίζει τη δράση του αναλογικού ελεγκτή (σχ. 4.5ιγ) είναι:

$$\Sigma = \rho_{\alpha} e_{\pi} + \Sigma(0) \quad 4.11$$

όπου:

Σ η έξοδος του ελεγκτή από 0%-100%,
 ρ_{α} η σταθερά αναλογίας,
 e_{π} το σφάλμα σε ποσοστό πλήρους κλίμακας και



Σχ. 4.5ια.

Ελεγκτής ON-OFF με τελεστικούς ενισχυτές.

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

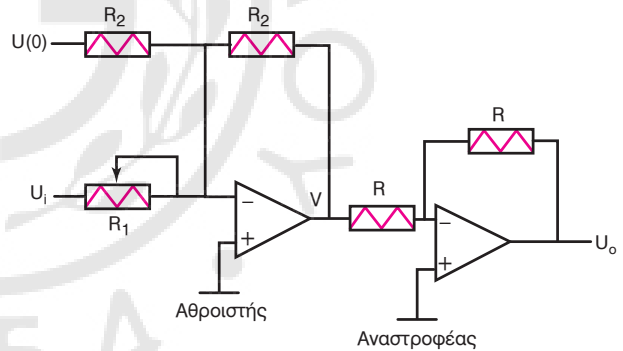
Η τάση εξόδου U_o ισούται με:

$$U_o = \frac{R_2}{R_1} U_i + U(0) \quad (4.12)$$

Η σχεδίαση αυτού του ελεγκτή γίνεται με τρόπο, που η τάση εξόδου να κυμαίνεται μεταξύ 0- $U_{μεγ}$, που αντιστοιχεί στην κλίμακα 0-100% του στοιχείου ελέγχου. Το ίδιο επιδιώκεται και για την κλίμακα της τάσεως εισόδου, η οποία δέχεται το σήμα σφάλματος. Η σταθερά R_2/R_1 ρυθμίζει τη σχέση του σφάλματος με την τάση κόρου της εξόδου του τελεστικού ενισχυτή ώστε η μέγιστη τιμή του σφάλματος να αντιστοιχεί με τη τάση κόρου.

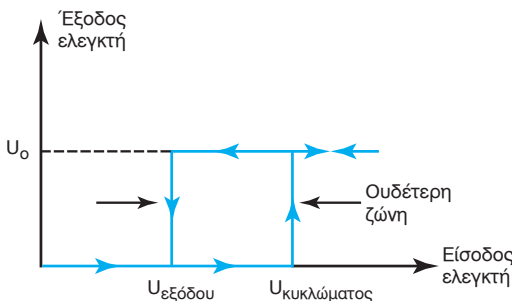
2) Ηλεκτρονικός ελεγκτής επανατάξεως (I).

Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής επανατάξεως (σχ. 4.5ιδ) αποτελείται από ένα κύκλωμα ολοκληρώσεως και από έναν αναστροφικό αθροιστή. Ο ολοκληρωτής τελεστικός ενισχυτής «ολοκληρώνει» το σφάλμα στο χρόνο κατά τον οποίο αυτό διαρκεί. Η σταθερά ολο-



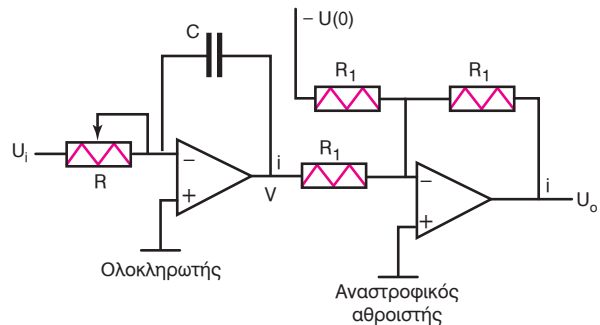
Σχ. 4.5ιγ.

Ηλεκτρονικός αναλογικός ελεγκτής.



Σχ. 4.5ιβ.

Απόκριση ελεγκτή ON-OFF.



Σχ. 4.5ιδ.

Ηλεκτρονικός ελεγκτής επανατάξεως.

κληρώσεως είναι ίση με RC . Η τάση εξόδου ισούται:

$$U_o = \frac{1}{RC} \int U_i dt + U(0) \quad (4.13)$$

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. Αν η τιμή του $1/RC$ είναι πολύ μεγάλη, η έξοδος του ελεγκτή αυξάνει με γρήγορο ρυθμό, δημιουργείται *υπερύψωση* (overshoot) ως προς την επιθυμητή τιμή και η απόκλιση καταλήγει σε ταλάντωση.

3) Ηλεκτρονικός ελεγκτής ρυθμού (D).

Η εξίσωση του ελεγκτή ρυθμού είναι:

$$U_o = \pm R_2 C \frac{dU_i}{dt} + U(0) \quad (4.14)$$

όπου:

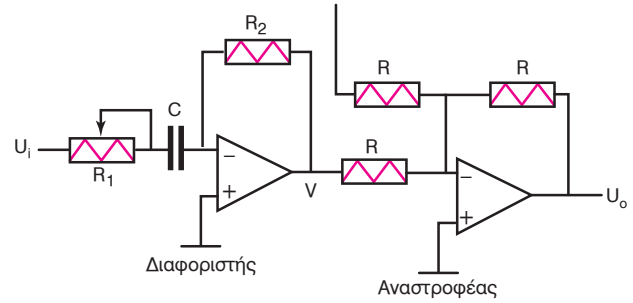
$R_2 C$ η *σταθερά παραγώγου* (derivative constant).

Το πρώτο μέρος αυτού του ελεγκτή (σχ. 4.5ιε) αποτελείται από το διαφοριστή τελεστικό ενισχυτή, ενώ το δεύτερο αποτελείται από τον αναστροφέα-αθροιστή. Σκοπός της αντιστάσεως R_1 στην είσοδο του κυκλώματος είναι η εξασφάλιση ευστάθειας στο όλο κύκλωμα, όταν το σήμα σφάλματος U_i μεταβάλλεται ραγδαία. Η τιμή της επιβάλλεται κατά τρόπο ώστε, για μεγάλες συχνότητες f το γινόμενο $2\pi f R_1 C \ll 1$.

Όλοι οι παραπάνω ηλεκτρονικοί ελεγκτές μπορούν να συνδυαστούν για την κατασκευή συνθέτων ελεγκτών τύπου PI, PD, PID (σχ. 4.5ιστ).

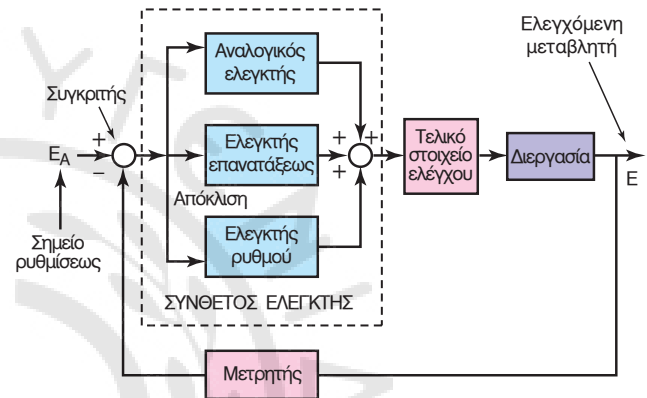
4.5.4 Ψηφιακοί ελεγκτές.

Οι πρώτοι ελεγκτές κατασκευάζονταν με αναλογικές τεχνικές και περιείχαν πνευματικά ή υδραυλικά στοιχεία, όπως φουσερά, βαλβίδες, έμβολα κλπ. Οι ηλεκτρονικοί ελεγκτές με τελεστικούς ενισχυτές χρησιμοποιήθηκαν πολύ αργότερα. Στα μέσα της δεκαετίας του '60 εμφανίστηκαν οι πρώτοι ψηφιακοί ελεγκτές σε σχήμα και λειτουργικότητα ακριβώς όμοια με τους προγενέστερους αναλογικούς ελεγκτές, τους οποίους και αντικατέστησαν. Με την εμφάνιση των μικροεπεξεργαστών στα μέσα της δεκαετίας του '70, ο χώρος του αυτόματου ελέγχου άλλαξε ριζικά και οι ελεγκτές εμφανίστηκαν πλέον σε μορφή λογισμικού. Η ευκολία προγραμματισμού, η ευελιξία που προσφέρει το λογισμικό καθώς και η μεγάλη τα-



Σχ. 4.5ιε.

Ηλεκτρονικός ελεγκτής ρυθμού (D).



Σχ. 4.5ιστ.

Σύνθετος ελεγκτής τριών όρων.

χύτητα επεξεργασίας των συγχρόνων επεξεργαστών, επιτρέπουν τη χρήση συνθέτων αλγορίθμων ελέγχου και ελεγκτών, κάτι που ήταν αδιανόητο πριν λίγα μόνο χρόνια. Οι ψηφιακοί ελεγκτές με τη μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία, αποτελούν πλέον τον πυρήνα του αυτόματου ελέγχου. Σταδιακά οι ελεγκτές ενσωματώθηκαν στους προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (PLC) αποτελώντας το θεμελιώδες στοιχείο του βιομηχανικού αυτοματισμού.

Οι κυριότερες εφαρμογές των ψηφιακών ελεγκτών είναι οι ακόλουθες:

1) Συλλογή δεδομένων (Data Acquisition System – DAS).

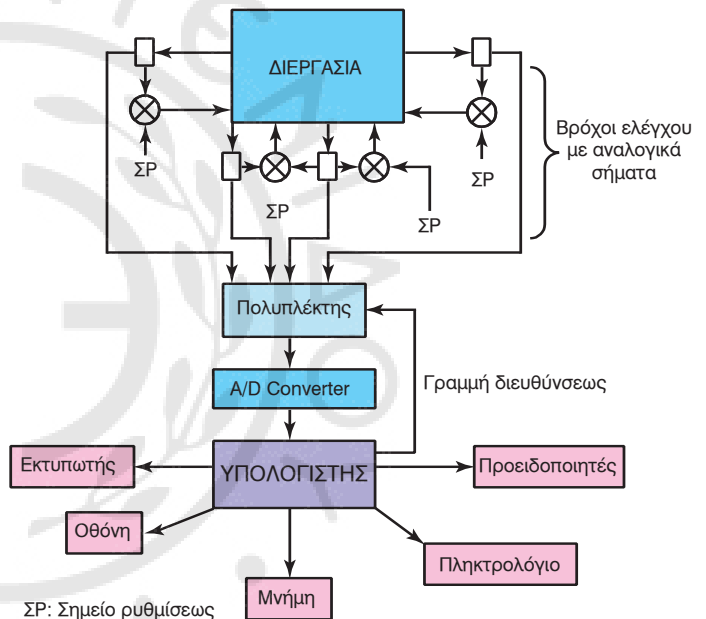
Για να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα της παραγωγής, είναι απαραίτητο να υπάρχει λεπτομερής γνώση όλων των παραμέτρων της παραγωγής (ρυθμός παραγωγής, κόστος πρώτων υλών κ.ά.). Παλιά αυτό γινόταν από τους μηχανικούς παραγωγής μετά από κάθε κύκλο παραγωγής, με αποτέλεσμα οι διάφορες διορθωτικές βελτιώσεις να γίνονται στους μελλοντικούς κύκλους παραγωγής.

Στο σχήμα 4.5ιζ παρουσιάζεται η γενική διάταξη ενός συστήματος που χρησιμοποιεί τον υπολογιστή για τη συλλογή δεδομένων ελέγχου. Αποτελείται από τέσσερις βρόχους ελέγχου, με τέσσερις συγκριτές και αντίστοιχα σημεία ρυθμίσεως. Οι τέσσερις ελεγχόμενες μεταβλητές εποπτεύονται συνεχώς από μετρητές, τα σήματα των οποίων εισάγονται σε έναν *πολυπλέκτη* (multiplexer). Ο πολυπλέκτης με εντολές από τον υπολογιστή μέσω της *γραμμής διεύθυνσης* (address line) ελέγχει και κατευθύνει τα διάφορα σήματα από τους μετρητές προς τον υπολογιστή. Σήμερα ένας ψηφιακός πολυπλέκτης μπορεί να παίρνει πάνω από 5000 δείγματα το δευτερόλεπτο, από διάφορες εισόδους. Η μορφή των σημάτων είναι αναλογική. Για αυτό παρεμβάλλεται μεταξύ του πολυπλέκτη και του υπολογιστή ένας *αναлого-ψηφιακός μετατροπέας* (A/D Converter), ο οποίος μετατρέπει τα σήματα αυτά σε ψηφιακής μορφής, για να μπορεί να τα επεξεργασθεί ο υπολογιστής. Ο υπολογιστής εκτελεί διαδοχικά και με μεγάλη ταχύτητα διάφορες εργασίες. Κάποιες φορές, ο υπολογιστής πρέπει να εκτελέσει ορισμένες εργασίες σχεδόν ταυτόχρονα, πράγμα που σημαίνει ότι πολλοί είσοδοι σημάτων πρέπει να αποθηκευθούν με κάποια σειρά. Η δειγματοληψία αυτή επιτυγχάνεται από τον αναλογικό πολυπλέκτη, οποίος αποτελείται από έναν αριθμό διακοπών που δρουν με κατ' ευθείαν εντολή από τον υπολογιστή, μέσω της γραμμής διεύθυνσης. Ο αναλογικός πολυπλέκτης συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω ενός αναлого-ψηφιακού μετατροπέα. Ο μετατροπέας αυτός πρέπει να λειτουργεί με μεγάλη ταχύτητα για να μπορεί να παρακολουθεί τη μεγάλη ταχύτητα του πολυπλέκτη. Ένα σημαντικό εξάρτημα στο σύστημα είναι και οι *προειδοποιητές*. Ο ρόλος τους είναι να παρακολουθούν τις τιμές των εισόδων. Όταν αυτές υπερβούν τα επιτρεπτά όρια, θέτουν σε λειτουργία διάφορα συστήματα συναγερμού. Τέλος, υπάρχουν και οι *περιφερειακές συσκευές* (peripheral units), οι οποίες υποστηρίζουν και ολοκληρώνουν την λειτουργία του συστήματος. Σε αυτές περιλαμβάνονται το πληκτρολόγιο, η οθόνη, ο εκτυπωτής, το σύστημα αποθήκευσης δεδομένων (μνήμη), το οποίο περιλαμβάνει σκληρούς δίσκους και μαγνητικές ταινίες.

2) Εποπτικός έλεγχος.

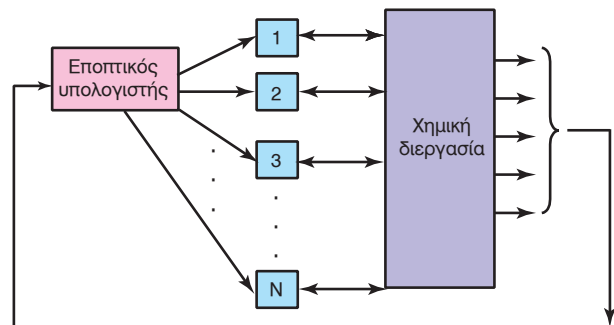
Στην περίπτωση συλλογής δεδομένων, ο υπολογιστής δεν έχει άμεσα ενεργό ρόλο, γιατί συλλέγει τις

διάφορες πληροφορίες, τις οποίες επεξεργάζεται αργότερα. Ωστόσο ο υπολογιστής μπορεί να έχει ενεργό ρόλο στον έλεγχο, να παράγει διορθωτικά σήματα και να έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει διάφορα *σημεία ρυθμίσεως* (set points). Η διαδικασία αυτή λέγεται *εποπτικός έλεγχος με υπολογιστή* (computer supervisory control) (σχ. 4.5η). Χρησιμοποιείται ευρέως σε χημικές διεργασίες, για τη μεγιστοποίηση της αποδόσεως σε κατανάλωση ενέργειας ή πρώτων υλών, μεγιστοποίηση κερδών παραγωγής κ.ά. Έτσι ένας υπολογιστής εποπτεύει και συντονίζει τη λειτουργία πολλών βρόχων ελέγχου, αποφασίζοντας για τις καλύτερες τιμές των σημείων ρυθμίσεως των διαφόρων βρόχων.



Σχ. 4.5ιζ.

Σύστημα συλλογής δεδομένων με υπολογιστή.



Σχ. 4.5η.

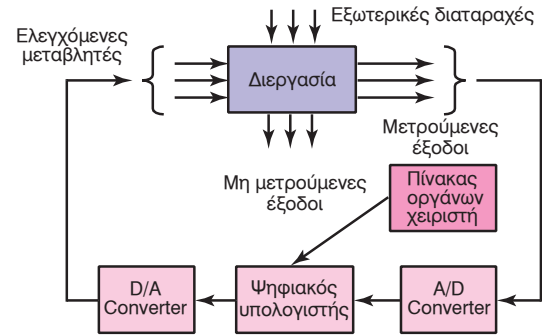
Εποπτικός έλεγχος με υπολογιστή χημικής διεργασίας.

3) Άμεσος ψηφιακός έλεγχος (Direct Digital Control, DDC).

Στην περίπτωση αυτή (σχ. 4.5ιθ) έχουμε στη θέση του ελεγκτή τον ψηφιακό υπολογιστή ή μικροεπεξεργαστή. Στη μέθοδο αυτή οι ψηφιακές εισοδοί, που αντιπροσωπεύουν τις μεταβλητές της διεργασίας, συγκρίνονται από τον υπολογιστή με τις προκαθορισμένες στο λογισμικό ελέγχου επιθυμητές τιμές και με βάση τις λύσεις των εξισώσεων ελέγχου για κάθε περίπτωση, εκπέμπονται διορθωτικά σήματα στα τελικά στοιχεία ελέγχου. Οι αναλογικοί βρόχοι ελέγχου δεν υφίστανται πλέον, ενώ τα **σημεία ρυθμίσεως** (set points) έχουν εισαχθεί στο λογισμικό ελέγχου, όπου συγκρίνονται με τις μετρούμενες δυναμικές μεταβλητές.

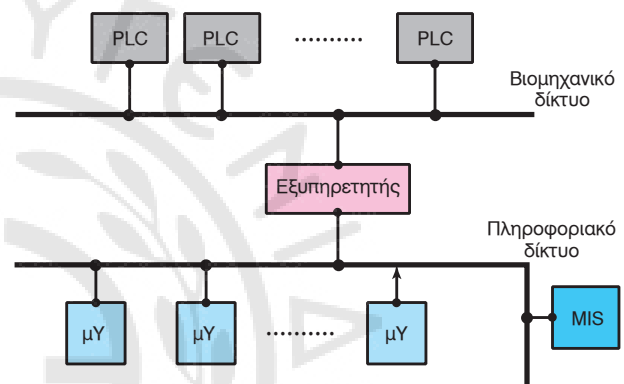
4) Συστήματα συλλογής δεδομένων και εποπτικού ελέγχου (Supervisory Control & Data Acquisition – SCADA).

Η τελευταία λέξη στον ηλεκτρονικό ψηφιακό έλεγχο είναι τα **συστήματα συλλογής δεδομένων και εποπτικού ελέγχου** (SCADA) (σχ. 4.5κ). Το σύστημα SCADA αποτελείται από δύο ανεξάρτητα δίκτυα: το **πρώτο**, που περιέχει τους **προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές** (PLC), είναι ένα **βιομηχανικό δίκτυο** (industrial network), στην κορυφή του οποίου είναι ένας εξυπηρετητής. Ο εξυπηρετητής είναι συνήθως ένας σταθμός εργασίας με λειτουργικό σύστημα **πολλαπλών εργασιών** (multitasking) όπως το UNIX, Windows-NT κ.ά. ή ένας μικροϋπολογιστής μεγάλης ισχύος και χωρητικότητας με το ίδιο λειτουργικό σύστημα. Εκτός από τον έλεγχο των επικοινωνιών του βιομηχανικού δικτύου ο εξυπηρετητής περιέχει και μια **βάση δεδομένων** (data base) **πραγματικού χρόνου** (real time), όπου αποθηκεύονται όλα τα δεδομένα που συλλέγονται από τους PLC. Αυτοί που είναι άμεσα συνδεδεμένοι με τη διεργασία και με μια **σχεσιακή βάση δεδομένων** (relational data base), η οποία περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία του συστήματος. Ο άλλος ρόλος του εξυπηρετητή είναι να εξυπηρετεί τα διάφορα μικροϋπολογιστικά συστήματα, που είναι συνδεδεμένα σε ένα **δευτερο** και ανεξάρτητο **πληροφοριακό δίκτυο** (information network) υψηλής ταχύτητας. Η αρχιτεκτονική του δικτύου είναι η κλασική **εξυπηρετητή-πελάτη** (client-server), που συνηθίζεται στα σύγχρονα καταναμεμένα πληροφοριακά συστήματα. Κάθε μικροϋπολογιστής στο πληροφοριακό δίκτυο έχει το κατάλ-



Σχ. 4.5ιθ.

Τυπική διάταξη άμεσου ψηφιακού ελέγχου.



Σχ. 4.5κ.

Σύστημα συλλογής δεδομένων και εποπτικού ελέγχου.

ληλο λογισμικό εφαρμογής και εκτελεί τις δικές του εφαρμογές ανεξάρτητα των άλλων και ανάλογα με τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου χειριστή. Έτσι κάθε χειριστής του συστήματος SCADA έχει το δικό του μικροϋπολογιστικό σύστημα, μέσω του οποίου μπορεί να ανακαλέσει πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες στον εξυπηρετητή, να τις επεξεργασθεί και να τις απεικονίσει κατάλληλα. Έτσι εισάγεται η φιλοσοφία της κατακεντρωμένης παρακολούθησης μιας παραγωγικής διεργασίας από πολλούς χειριστές σε διάφορα σημεία της διεργασίας αντί της συγκεντρωτικής παρακολούθησης σε μια κεντρική αίθουσα ελέγχου. Τέλος, το σύστημα SCADA έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με το ανεξάρτητο **πληροφοριακό σύστημα διοικήσεως της επιχειρήσεως** (Management Information System– MIS).

4.6 Ερωτήσεις.

1. Ποιος είναι ο σκοπός του ελεγκτή σε ένα σύστημα ελέγχου;

2. Τι γνωρίζεται για τον έλεγχο μοναδικού βρόχου;
3. Τι γνωρίζεται για το διαδοχικό έλεγχο; Περιγράψτε ένα παράδειγμα.
4. Τι ονομάζουμε πειραματικό συντονισμό εντός γραμμής; Σε τι πλεονεκτεί έναντι άλλων μεθόδων συντονισμού;
5. Σχεδιάστε και εξηγήστε τη χαρακτηριστική καμπύλη ενός πρακτικού αναλογικού ελεγκτή με απαλό κορεσμό.
6. Τι επιτυγχάνεται με την προσθήκη του ολοκληρωτικού όρου I;
7. Σχεδιάστε τη διορθωτική δράση του όρου D;
8. Ποια είναι η εξίσωση του PID; Εξηγήστε την.
9. Ποια είναι η λειτουργία του απλού αναλογικού ηλεκτρικού ελεγκτή (σχεδιασμός);
10. Σχεδιάστε το εξωτερικό πλαίσιο ενός κλασικού ηλεκτρονικού ελεγκτή και αναλύστε τα στοιχεία του.
11. Σχεδιάστε έναν ελεγκτή ON-OFF με τελεστικούς ενισχυτές και εξηγήστε τη λειτουργία του.
12. Σχεδιάστε έναν ηλεκτρονικό ελεγκτή επανατάξεως και εξηγήστε τη λειτουργία του.
13. Τι γνωρίζεται για τη συλλογή δεδομένων (DAS);
14. Τι ονομάζουμε άμεσο ψηφιακό έλεγχο (DDC);
15. Ενός συστήματος SCADA σχεδιάστε το διάγραμμα και εξηγήστε τα στοιχεία που το αποτελούν.



Εισαγωγή στη σύγχρονη θεωρία

5

5.1 Εισαγωγή.

Η σύγχρονη θεωρία των συστημάτων ελέγχου είναι αποτέλεσμα της εισαγωγής του ψηφιακού υπολογιστή, ο οποίος έδωσε νέα ώθηση στην τεχνική των συστημάτων ελέγχου και άνοιξε ένα τεράστιο πεδίο έρευνας και εφαρμογής. Βέβαια, δεν πρέπει να ξεχνάμε την κλασική θεωρία (Ανάλυση Γραμμικών Συστημάτων), στην οποία στηρίζεται οποιαδήποτε άλλη θεωρία. Στη σύγχρονη θεωρία των συστημάτων ελέγχου απέκτησε μεγάλη αξία η μέθοδος μεταβλητών καταστάσεως γιατί έχει πολύ ευρύτερη εφαρμογή στη λύση ειδικών προβλημάτων στα ψηφιακά συστήματα ελέγχου, στα μη γραμμικά συστήματα, στον ευφυή έλεγχο κ.ά. Τα ψηφιακά συστήματα ελέγχου πήραν μεγάλη έκταση εφαρμογής, γιατί έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τα αναλογικά. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι η βελτιωμένη ευστάθεια, η καλύτερη αξιοπιστία, η σταθερότητα της ενισχύσεως, η μικρή επίδραση των θορύβων και η ευελιξία στον προγραμματισμό. Για τη μελέτη τους χρησιμοποιούμε το μετασχηματισμό Z , που είναι ανάλογος του μετασχηματισμού *Laplace*. Τα μη γραμμικά προβλήματα αποτελούν έναν άλλο τομέα της σύγχρονης θεωρίας του ελέγχου. Υπάρχουν και αντιμετωπίζονται με τεχνικές γραμμικής προσεγγίσεως ή με ειδικές μεθόδους. Ο ευφυής έλεγχος αποτελεί μια μοντέρνα μέθοδο ελέγχου με αρκετές εφαρμογές. Στην ουσία είναι ένας μη συμβατικός έλεγχος σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους, που βασίζεται στη **θεωρία της ασαφούς λογικής** (Fuzzy Logic) την οποία ανακάλυψε ο L. Zadeh στη δεκαετία του '60. Τέλος, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα που προέρχονται από τον κλάδο της τεχνητής νοημοσύνης, αποτελούν άλλο ένα τομέα μοντέρνου ελέγχου με διαρκώς και αυξανόμενες εφαρμογές.

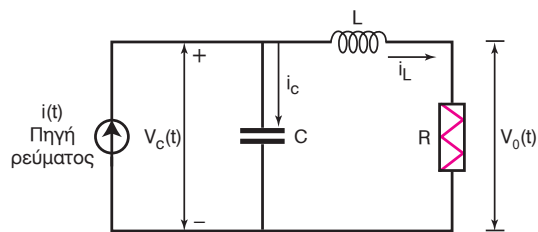
5.2 Μεταβλητές καταστάσεως.

Οι εξισώσεις καταστάσεως χρησιμοποιήθηκαν εκ-

τενώς στη μελέτη των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, περί το 1960 λόγω των απαιτήσεων των διαστημικών προγραμμάτων με σκοπό την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων. Η χρήση της μεταβλητής s με το μετασχηματισμό Laplace και το διάστημα της συχνότητας με τη μεταβλητή ω θα εξακολουθήσουν να χρησιμοποιούνται ως βασικά εργαλεία από το μηχανικό ελέγχου. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτοί έχουν περιορισμένη χρήση γιατί εφαρμόζονται σε συστήματα με μία είσοδο και μία έξοδο και μόνο όταν τα συστήματα είναι γραμμικά και χρονικά αμετάβλητα. Η περιγραφή των συστημάτων ελέγχου με τις εξισώσεις καταστάσεως στο διάστημα του χρόνου, παρέχει οικονομία συμβολισμών και ευκολία χρήσεως υπολογιστή, όπως επίσης και δυνατότητα επεκτάσεως σε μη γραμμικά ή χρονικά μεταβαλλόμενα συστήματα.

Το κάθε δυναμικό σύστημα είναι δυνατόν να περιγραφεί με διαφορικές εξισώσεις, που συσχετίζουν τις **μεταβλητές καταστάσεως**. Μεταβλητές καταστάσεως είναι οι μεταβλητές, οι οποίες προσδιορίζουν με διαφορικές εξισώσεις τη μελλοντική συμπεριφορά του δυναμικού συστήματος και την έξοδο, όταν είναι γνωστά η **παρούσα κατάσταση** και τα **σήματα εισόδου**.

Θα διευκρινίσουμε την έννοια των μεταβλητών καταστάσεως ενός δυναμικού συστήματος με το απλό κύκλωμα RLC που εικονίζεται στο σχήμα 5.2. Στην περίπτωση του κυκλώματος αυτού μπορούμε να ορίσουμε δύο μεταβλητές καταστάσεως x_1, x_2 , όπου η μεταβλητή x_1 παριστά την τάση του πυκνω-



Σχ. 5.2.
Κύκλωμα RLC.

τή (v_c) και η μεταβλητή x_2 παριστά το ρεύμα του πυκνωτή (i_L). Αν εφαρμόσουμε το **νόμο του Kirchhoff** για τα ρεύματα στον κόμβο 1, θα πάρουμε:

$$i_c(t) = \frac{dv_c(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \quad (5.1)$$

Ομοίως αν εφαρμόσουμε το νόμο του Kirchhoff για τις τάσεις στο δεξιό βρόχο, θα έχουμε:

$$-v_c(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} + Ri_L(t) = 0 \quad (5.2)$$

Η έξοδος του συστήματος δίνεται από την εξίσωση:

$$v_0(t) = R i_L(t) \quad (5.3)$$

Αν γράψουμε τις εξισώσεις (5.1) και (5.2) συναρτήσει των μεταβλητών καταστάσεως x_1 και x_2 θα έχουμε:

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{x_2}{C} + \frac{i(t)}{C} \quad (5.4)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{x_1}{L} - \frac{R}{L} x_2 \quad (5.5)$$

Η έξοδος του κυκλώματος θα είναι:

$$v_0(t) = R x_2 \quad (5.6)$$

Αν χρησιμοποιήσουμε το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων (5.4) και (5.5) και τις αρχικές συνθήκες $x_1(0)$ και $x_2(0)$, μπορούμε να βρούμε τη **μελλοντική συμπεριφορά** του συστήματος και την **έξοδο**.

Στην περίπτωση του παραπάνω κυκλώματος, οι μεταβλητές καταστάσεως ελήφθησαν «εκ διαισθήσεως». Φυσικά, θα πρέπει να πάρουμε τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό μεταβλητών καταστάσεως. Αυτός αποδεικνύεται ότι είναι ίσος με τον αριθμό των ανεξαρτήτων στοιχείων αποθηκεύσεως ενέργειας, που για την περίπτωση του κυκλώματος RLC είναι δύο. Ωστόσο, η εκλογή των μεταβλητών αυτών δεν είναι η μοναδική. Θα μπορούσαμε π.χ. να επιλέξουμε για την περίπτωση του σχήματος 5.2 ως μεταβλητή x'_1 το ρεύμα του πυκνωτή και ως μεταβλητή x'_2 την τάση του πυκνωτή, οπότε η σχέση των μεταβλητών αυτών με τις προηγούμενες θα είναι:

$$x'_1 = 1/C \left[\int x_1 dt + x_1(0) \right] \quad (5.7)$$

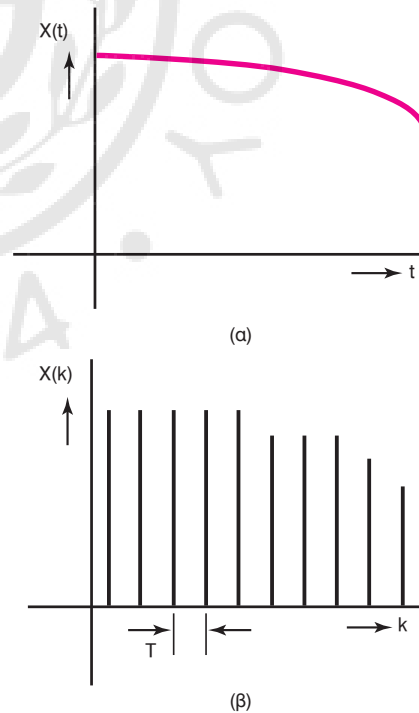
$$x'_2 = 1/L \left[\int x_2 dt + x_2(0) \right] \quad (5.8)$$

Το παράδειγμα του σχήματος 5.2 είναι απλό. Συνήθως, πολλά ηλεκτρικά κυκλώματα, ηλεκτρομηχανικά συστήματα ή συστήματα ελέγχου δεν είναι τόσο απλά και είναι δύσκολο να περιγράψουμε το σύστημα με σειρά διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξεως, οπότε προτιμούμε να βρίσκουμε τις εξισώσεις καταστάσεως του συστήματος από το λειτουργικό του διάγραμμα.

5.3 Μετασχηματισμός Z.

Όπως είδαμε στο **δεύτερο κεφάλαιο**, ο **μετασχηματισμός Laplace** χρησιμοποιείται για την ανάλυση και τη σχεδίαση των γραμμικά και χρονικά αμεταβλήτων στο συνεχή χρόνο συστημάτων. Βασικής σημασίας στην περίπτωση αυτή είναι η συνάρτηση μεταφοράς. Με παρόμοιο και αντίστοιχο τρόπο θα ορίσουμε τώρα έναν άλλο μετασχηματισμό, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση των συστημάτων διακριτού χρόνου, η λειτουργία των οποίων περιγράφεται με εξισώσεις διαφορών.

Οι εξισώσεις διαφορών αφορούν δεδομένα διακριτού χρόνου, ενώ όταν έχουμε συνεχές σήμα, θα πρέπει να το ψηφιοποιήσουμε (δειγματοληψία-μετατροπή σε διακριτό σήμα) πριν το χρησιμοποιήσουμε σε ψηφιακό σύστημα (σχ. 5.3). Μια εξίσωση δι-



Σχ. 5.3.

α) Συνεχές σήμα. β) Ακολουθία που παράγεται από τη δειγματοληψία του συνεχούς σήματος σε ίσες χρονικές περιόδους διάρκειας T .

αφορών έχει τη μορφή:

$$i(k+1) = i(k) + 100k + 1 \quad (5.9)$$

όπου:

i ο αριθμός των χρονικών μονάδων, που σχετίζονται με τα ωρολογιακά σήματα του υπολογιστή και k ο αριθμός των δεδομένων.

Υπάρχουν πολλές ομοιότητες μεταξύ των εξισώσεων διαφορών και των διαφορικών εξισώσεων. Το βασικό σημείο είναι να παρατηρήσουμε ότι στις εξισώσεις διαφορών η εξαρτημένη μεταβλητή είναι διακριτή και όχι συνεχής. Έτσι, στην εξίσωση διαφορών:

$$y(k+1) - y(k) = 3k + 5 \quad (5.10)$$

η **εξαρτημένη μεταβλητή** είναι η μεταβλητή y και η **ανεξάρτητη μεταβλητή** η μεταβλητή k . Λύση της εξίσωσης διαφορών λαμβάνεται, όταν γνωρίζουμε την εξαρτημένη μεταβλητή για κάθε τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής που μας ενδιαφέρει. Συνεπώς η λύση παίρνει τη μορφή ακολουθίας αριθμών. Υπάρχουν συνήθως πολλές ακολουθίες οι οποίες ικανοποιούν την εξίσωση διαφορών, αφού υπάρχουν πολλές λύσεις. Η **γενική λύση** είναι αυτή, όπου μπορούμε να πάρουμε όλες τις δυνατές λύσεις.

Ο μετασχηματισμός Z ορίζεται για ακολουθίες αριθμών ως η εκθετική σειρά z^{-k} με συντελεστές ίσους με τις τιμές της ακολουθίας αριθμών $e(k)$, όπως:

$$E(z) = Z[e(k)] = e(0) + e(1)z^{-1} + e(2)z^{-2} + e(3)z^{-3} + \dots \quad (5.11)$$

όπου το σύμβολο $Z[\]$ συμβολίζει την πράξη μετασχηματισμού Z .

Η εξίσωση (5.9) μπορεί να γραφεί με πιο συμπτυκνωμένο τρόπο, ως:

$$E(z) = Z[e(k)] = \sum_{k=0}^{\infty} e(k)z^{-k} \quad (5.12)$$

Στις περισσότερες τεχνικές εφαρμογές δεν χρειάζεται να ασχολούμαστε με σειρά απείρων όρων, επειδή είναι δυνατόν να εκφράσουμε τη σειρά σε κλειστή μορφή. Η κλειστή μορφή ισχύει συνήθως για τιμές του z που βρίσκονται σε μια περιοχή, η οποία είναι γνωστή σαν **ακτίνα απόλυτης σύγκλισης**.

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι δε θα πρέπει να αναζητήσουμε φυσική έννοια και σημασία στη μεταβλητή z , η οποία είναι μια μαθηματική μεταβλητή, αντίστοιχη της μεταβλητής s , που χρησιμοποιήσαμε στο μετασχηματισμό Laplace.

Ο μετασχηματισμός Z ορίζεται για οποιαδήποτε

ακολουθία αριθμών $e(k)$ και είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση του οποιονδήποτε είδους συστήματος που περιγράφεται με εξισώσεις διαφορών.

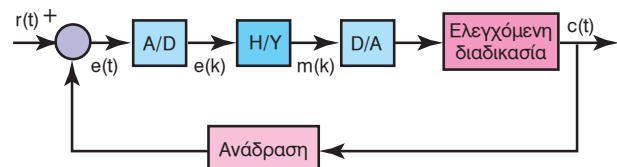
Η σχέση (5.11) ορίζει το μονόπλευρο μετασχηματισμό Z . Ο αμφίπλευρος μετασχηματισμός z που ονομάζεται και **γενικευμένη συνάρτηση**, ορίζεται ως:

$$Z[f(k)] = \sum_{-\infty}^{\infty} e(k)e^{-k} \quad (5.13)$$

Κλείνοντας τη σύντομη αναφορά στο μετασχηματισμό Z θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η ακολουθία $e(k)$ που παράγεται από τη συνάρτηση χρόνου $e(t)$ με δειγματοληψία ανά κάθε T δευτερόλεπτα, περιγράφεται στην πραγματικότητα με την έκφραση $e(kT)$.

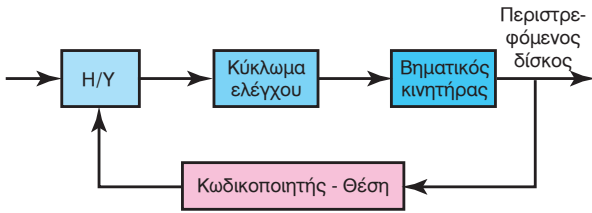
5.4 Ψηφιακά συστήματα ελέγχου.

Τα ψηφιακά συστήματα διαφέρουν από τα αναλογικά από την άποψη ότι τα σήματα σε ένα ή περισσότερα εξαρτήματα του συστήματος είναι σειρά παλμών ή αριθμητικός κώδικας. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4α, το σύστημα είναι μόνο εν μέρει ψηφιακό, και το κυρίως ψηφιακό τμήμα του είναι ο ελεγκτής, μέρος του οποίου είναι ο υπολογιστής. Ο ελεγκτής επεξεργάζεται το σήμα διαφοράς $e(t)$ και παράγει ένα σήμα $m(t)$, ώστε το σήμα να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του. Η ελεγχόμενη διαδικασία έχει κάποια δυναμική, στην οποία δεν μπορούμε ή είναι δύσκολο να επέμβουμε, μπορούμε όμως να επέμβουμε στη δυναμική του ελεγκτή, ώστε η δυναμική του κλειστού συστήματος να είναι ικανοποιητική και το σύστημα να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις και στις προδιαγραφές του. Με τον ελεγκτή υλοποιούμε κάποια συνάρτηση μεταφοράς. Η σχεδίαση των συναρτήσεων μεταφοράς μπορεί να γίνει με κατάλληλο αλγόριθμο, ο οποίος πρέπει να προγραμματισθεί στον ψηφιακό υπολογιστή ή να σχεδιασθεί με ειδικά εξαρτήματα. Ο υπολογιστής ανάλογα με το μέγεθος του συστήματος και την πολυπλοκότητά του, μπορεί να είναι μεγάλος υπολογιστής, μικροεπεξεργαστής ή και ψηφιακό φίλτρο. Η



Σχ. 5.4α.

Ψηφιακό σύστημα ελέγχου.



Σχ. 5.4β.

Σύστημα ελέγχου βηματικού κινητήρα.

μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D-Analog to Digital) για να αναγνωρισθούν από τον υπολογιστή και η μετατροπή ψηφιακών σημάτων σε αναλογικά στην έξοδο του συστήματος για να αναγνωρισθούν και να χρησιμοποιηθούν από το σύστημα (D/A-Digital to Analog) γίνεται από ειδικές συσκευές που ονομάζονται **μετατροπείς**. Τα ψηφιακά συστήματα ελέγχου συγκρινόμενα με τα αναλογικά έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα, όπως:

- Βελτιωμένη ευστάθεια.
- Καλύτερη αξιοπιστία.
- Σταθερότητα της ενισχύσεως.
- Μικρή επίδραση των θορύβων και των διαταραξών.
- Μικρότερο βάρος και
- ευελιξία στον προγραμματισμό.

Η ανάλυση και η σχεδίαση των ψηφιακών συστημάτων γίνεται με χρήση του μετασχηματισμού Z και των εξισώσεων διαφορών. Σε αντίθεση με τα συστήματα συνεχούς χρόνου, των οποίων η λειτουργία περιγράφεται με διαφορικές εξισώσεις, στα ψηφιακά συστήματα η λειτουργία περιγράφεται με ένα σύνολο εξισώσεων διαφορών. Οι μέθοδοι ανάλυσης όπως ο γεωμετρικός τόπος ριζών και το διάστημα της συχνότητας εφαρμόζονται κατάλληλα προσαρμοσμένα και στα ψηφιακά συστήματα ελέγχου.

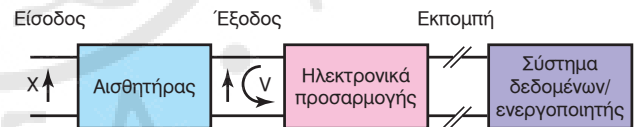
Στο σχήμα 5.4β παρουσιάζεται ένα ψηφιακό σύστημα ελέγχου ενός βηματικού κινητήρα με βασικό εξάρτημα το **βηματικό κινητήρα** (step motor) και ένα περιστρεφόμενο δίσκο για φόρτωση ελαφρού υλικού. Το σύστημα είναι κλειστού βρόχου για έλεγχο θέσεως με ψηφιακό τρόπο. Για την είσοδο και έξοδο των σημάτων μετρήσεως και ελέγχου από και προς τον υπολογιστή χρησιμοποιούνται A/D και D/A μετατροπείς, οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι στον υπολογιστή σε μορφή κάρτας (PC card).

5.5 Ηλεκτρονικά κυκλώματα προσαρμογής (interface).

Η εμφάνιση και ανάπτυξη συστημάτων ψηφιακών

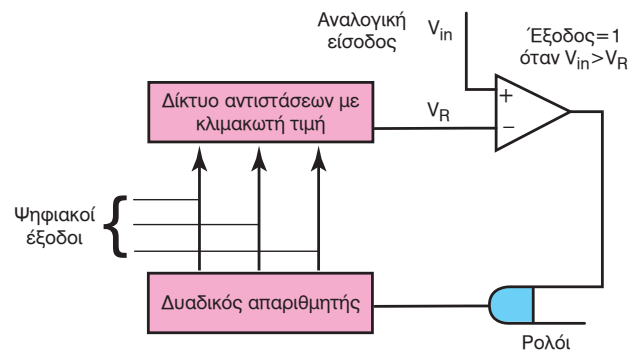
προσωπικών υπολογιστών (PC) προκάλεσε επαναστατική αλλαγή στον τομέα της αποκτήσεως δεδομένων και ελέγχου. Η αίσθηση είναι ότι ο προσωπικός υπολογιστής με μερικές πρόσθετες κάρτες αποτελεί πλέον το απαραίτητο εργαλείο στην υπηρεσία του τεχνικού και του επιστήμονα. Το κύκλωμα **επεξεργασίας σήματος** (signal processing) που βρίσκεται μεταξύ του αισθητήρα και ενός συστήματος δεδομένων ή ενός ενεργοποιητή ονομάζεται συνήθως σύστημα **ηλεκτρονικών προσαρμογής**. (interface electronic) (σχ. 5.5α). Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα προσαρμογής μπορούν απλά να μετατρέψουν μία μεταβολή αντιστάσεως, χωρητικότητας ή επαγωγής σε σήμα τάσεως ή να εκτελέσουν και άλλες λειτουργίες (ενίσχυση, μείωση θορύβου, αντιστάθμιση, έλεγχο και μετάδοση).

Το σήμα που εισέρχεται από τον αισθητήρα στο κύκλωμα προσαρμογής είναι συνήθως αναλογικό. Για το λόγο αυτό διαθέτει ένα **μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό** (ADC-Analog to Digital Converter), για να παρέχει ένα ψηφιακό σήμα, το οποίο μπορεί να μεταδοθεί με υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και απαλλαγμένο από θόρυβο. Στο σχήμα 5.5β παρουσιάζεται η απλούστερη μορφή ενός ADC τύπου απλής κλίσεως (ράμπας). Το κύκλωμα λειτουργεί συγκρίνοντας την αναλογική τάση εισόδου V_{in} με ένα χρονικά ακριβές πριονωτό σήμα, που παράγεται από το κλιμακωτό δίκτυο. Πολλά ADC χαμηλού κόστους λειτουργούν ακόμη με βάση την αρχή αυτή, όπως το Ferranti ZN245,



Σχ. 5.5α.

Λειτουργικό διάγραμμα ενός συστήματος αισθητήρα.

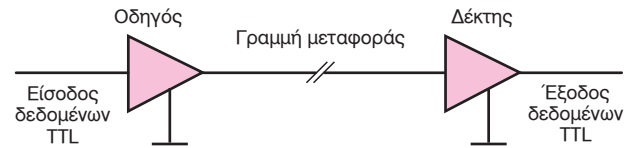


Σχ. 5.5β.

ADC απλής κλίσεως.

όμως σήμερα συνηθίζονται ADC που βασίζονται σε μεθόδους διαδοχικών προσεγγίσεων.

Η προετοιμασία και η μετάδοση ψηφιακών σημάτων με ηλεκτρονικά κυκλώματα προσαρμογής είναι συνηθισμένη και το κόστος συνήθως αντισταθμίζεται από τα πλεονεκτήματα των υψηλότερων ρυθμών μεταδόσεως και των χαμηλότερων επιπέδων θορύβου. Η ψηφιακή πληροφορία ανταλλάσσεται συνήθως μεταξύ μιας διατάξεως (αισθητήρας) και ενός μικροϋπολογιστή με τη βοήθεια είτε μιας σειριακής είτε μιας παράλληλης θύρας επικοινωνίας. Στη θεωρία ένα σειριακό ψηφιακό κύκλωμα προσαρμογής απαιτεί μόνο ένα ή δύο καλώδια (σχ. 5.5γ) και είναι κατά πολύ φθηνότερο από ένα παράλληλο (8 συρματινών καλωδίων) κύκλωμα προσαρμογής. Επιπλέον, για μια μετάδοση διπλού καλωδίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν εμπορικές διατάξεις επικοινωνίας, όπως ένα κοινό τηλεφωνικό καλώδιο. Πρότυπα σειριακών κυκλωμάτων προσαρμογής έχουν καθοριστεί από το **Σύνδεσμο Ηλεκτρονικών Βιομηχανιών** (EIA – Electronic Industrial Association). Το περισσότερο χρησιμοποιούμενο κύκλωμα προσαρμογής για μικροϋπολογιστικά συστήματα είναι το πρότυπο RS-232, ενώ τα πρότυπα RS-422 και RS-423 χρησιμοποιούνται όπου απαιτούνται μακρύτερες γραμμές μεταδόσεως ή μεγαλύτεροι ρυθμοί ροής δεδομένων. Τα ρεύματα παράγονται από πρότυπα στοιχεία οδηγήσεως και συλλέγονται από πρότυπους δέκτες. Ο RS-232 είναι ένα συνδετήρας D με 25 ακροδέκτες (pin), στον οποίο οι περισσότερες γραμμές είναι γραμμές ελέγχου. Αυτή η μάλλον περίπλοκη διάταξη έχει προκύψει από την πρωταρχική της χρήση, που είναι περισσότερο ανταλλαγή πληροφορίας με διαποδιαμορφωτές (modem), εκτυπωτές και σχεδιογράφους (plotter) παρά αισθητήρες. Το προτεινόμενο μήκος γραμμής (εξαρτώμενο από

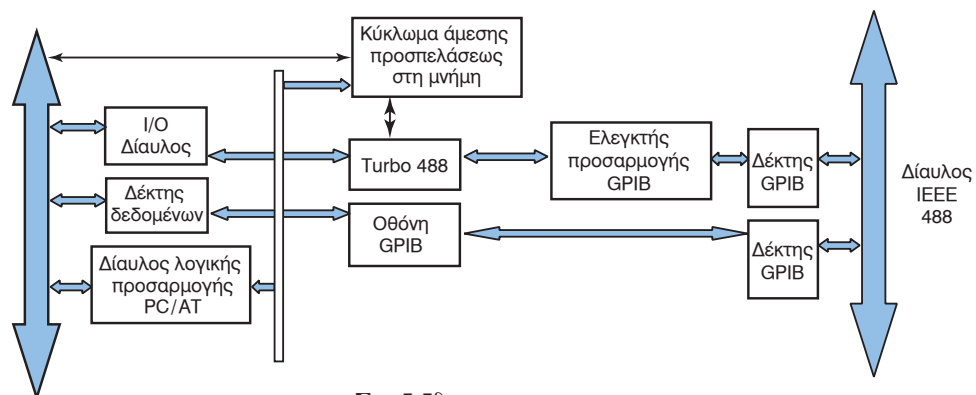


Σχ. 5.5γ.

Απλό σειριακό κύκλωμα.

το φορτίο) είναι περίπου 100 μέτρα και ο μέγιστος ρυθμός μεταδόσεως δεδομένων είναι 20 Kbauds (20 Kbits/s σε ένα δυαδικό κανάλι).

Οι κατασκευαστές έχουν αναπτύξει ένα σύστημα προσαρμογής ειδικά για ψηφιακά ελεγχόμενα όργανα. Η μέθοδος επικοινωνίας και ελέγχου ονομάζεται **δίαυλος οργάνου γενικού σκοπού** (GPIB – General Purpose Instrument Bus) και έχει προτυποποιηθεί από την IEEE το 1978 ως IEEE-488 (σχ. 5.5δ). Η κατασκευή του διαύλου (bus) επιτρέπει σε ένα μόνο επεξεργαστή (π.χ. PC) να ελέγχει μέχρι 20 άλλες συσκευές χρησιμοποιώντας μόνο ένα κύκλωμα προσαρμογής. Το GPIB χρησιμοποιεί ένα ασύγχρονο σύστημα ενδοεπικοινωνίας, για να περάσει δεδομένα και άρα είναι δυνατόν να παραχθούν ρυθμοί μεταδόσεως πολύ μεγαλύτεροι από εκείνους του RS-232C (μέχρι 2 MBit/s). Το GPIB είναι ένα σύνολο 25 γραμμών, από τις οποίες 8 μεταφέρουν δεδομένα και άλλες 8 δρουν ως γραμμές ελέγχου και γειώσεις. Οποιαδήποτε συσκευή συνδεδεμένη με το δίαυλο μπορεί να στείλει (πομπός) ή να λάβει (δέκτης) δεδομένα, αλλά μια συσκευή πρέπει να δρα ως ελεγκτής. Κάρτες κυκλωμάτων προσαρμογής κυκλοφορούν στο εμπόριο για τα PC, οι οποίες μπορούν να περιέχουν ένα πομποδέκτη Intel 8291, έναν ελεγκτή 8292 GPIB και δύο διαύλους πομποδεκτών 8293 GPIB. Αυτό επιτρέπει στο PC να διευθύνει το δίαυλο με χρήση **λογισμικού** (software). Το GPIB είναι ακριβό σύστημα και χρησιμοποιείται σε μεγάλες εφαρ-



Σχ. 5.5δ.

AT-GPIB διάγραμμα βαθμίδων.

μογές και μόνο για επικοινωνία μικρών αποστάσεων (μέχρι 20 m).

5.6 Μη γραμμικά συστήματα ελέγχου.

Οι φυσικές σχέσεις δεν είναι όλες ακριβώς γραμμικές. Για παράδειγμα, το ελατήριο το θεωρούμε γραμμικό, δηλαδή ότι η απόκλιση του είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης δύναμης, ενώ αντίθετα στην πραγματικότητα η γραμμικότητα (αναλογία) ισχύει για μια μικρή μόνο περιοχή αποκλίσεως. Αυτό εξηγεί, γιατί δεν είναι πάντα ικανοποιητική η προσέγγιση του μη γραμμικού στοιχείου με γραμμικό τρόπο (αναλογικό). Αντίθετα με τις γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, δεν υπάρχουν αναλυτικές λύσεις για ένα μεγάλο αριθμό μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων και μόνο για πολύ λίγες υπάρχουν αναλυτικές λύσεις. Το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπισθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να βρούμε γραμμική προσέγγιση του μη γραμμικού εξαρτήματος και μετά να λύσουμε τη γραμμική διαφορική εξίσωση. Η γραμμική προσέγγιση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, ανάλογα με το ειδικό πρόβλημα. Συνήθως παίρνουμε μια μικρή περιοχή της καμπύλης στην περιοχή αυτή φέρνοντας την εφαπτόμενη και χρησιμοποιούμε την εφαπτόμενη αντί για την καμπύλη. Ο δεύτερος τρόπος αφορά στη χρήση μιας από τις παρακάτω ειδικές μεθόδους λύσεως:

- Ειδικές μαθηματικές λύσεις.
- Περιγραφική συνάρτηση.
- Λύση στο επίπεδο φάσεως.
- Λύση με αναλογικό υπολογιστή.
- Λύση με ψηφιακό υπολογιστή.

Από τις παραπάνω μεθόδους η τελευταία είναι η πιο αποτελεσματική, ενώ η πρώτη απαιτεί ειδικές γνώσεις μαθηματικών. Η λύση με αναλογικό υπολογιστή έχει ξεπεραστεί από την πρόοδο της ψηφιακής τεχνολογίας. Παρακάτω, θα περιγράψουμε σύντομα τη δεύτερη και τρίτη μέθοδο. Θα πρέπει στο σημείο αυτό να τονίσουμε ότι στα συστήματα ελέγχου ενδιαφερόμαστε τόσο για την πλήρη λύση, όσο και για την ευστάθεια, που μπορεί να βρεθεί από το επίπεδο φάσεως και το κριτήριο Lyapunov.

Περιγραφική συνάρτηση. Η μέθοδος αυτή είναι μία προσεγγιστική μέθοδος και εφαρμόζεται, όταν στο σύστημα έχουμε ένα μόνο μη γραμμικό εξάρτημα. Η μέθοδος στηρίζεται στην παραδοχή και την απλοποίηση ότι αν η είσοδος στο μη γραμμικό εξάρτημα είναι ημιτονοειδής, λαμβάνεται υπόψη μόνο η πρώτη αρμονική.

Επίπεδο φάσεως. Η μέθοδος του επιπέδου φά-

σεως είναι μια διαδεδομένη μέθοδος για τον προσδιορισμό της ευστάθειας του συστήματος. Η μέθοδος συνίσταται στην κατασκευή διαγράμματος μεταβολής της ταχύτητας (\dot{x} , πρώτη παράγωγος) ως συνάρτηση της θέσεως (x) και με παράμετρο το χρόνο. Είναι φανερό ότι η καμπύλη φάσεως θα είναι διαφορετική για τις διάφορες αρχικές συνθήκες του συστήματος. Η μέθοδος έχει 3 βασικούς περιορισμούς:

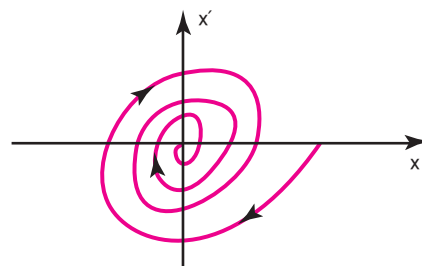
α) Ισχύει μόνο για συστήματα δεύτερου βαθμού.

β) Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για μελέτη μεταβατικών φαινομένων υπό την επίδραση των αρχικών συνθηκών.

γ) Οι συντελεστές του x και \dot{x} είναι δυνατόν να είναι μόνον συναρτήσεις του x και \dot{x} , δηλαδή δεν ισχύει, όταν οι συντελεστές εξαρτώνται από το χρόνο.

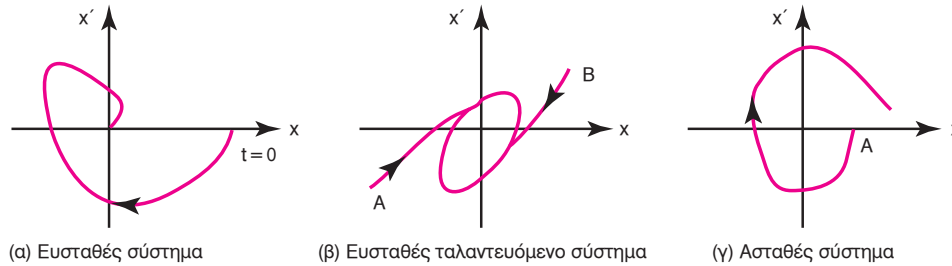
Το διάγραμμα φάσεως είναι εύκολο να κατασκευασθεί με γραφικό και αναλυτικό τρόπο, όταν το σύστημα είναι γραμμικό. Στο σχήμα 5.6α φαίνεται το διάγραμμα φάσεως συστήματος δεύτερου βαθμού. Το βέλος στην καμπύλη δίνει τη διεύθυνση αυξήσεως του χρόνου. Όταν το σύστημα δεν είναι γραμμικό, υπάρχουν διάφοροι προσεγγιστικοί τρόποι κατασκευής του. Ωστόσο, η καμπύλη φάσεως είναι εύκολο να κατασκευασθεί με το αναλογικό υπολογιστή, όταν στον οριζόντιο άξονα του καταγραφέα βάλομε τη μεταβλητή x και στο κατακόρυφο το \dot{x} .

Από το διάγραμμα φάσεως μπορούμε να πάρουμε διάφορες πληροφορίες, κυριότερη όμως είναι η πληροφορία, αν το σύστημα είναι ευσταθές ή ασταθές. Στο σχήμα 5.6β(α) φαίνεται το διάγραμμα φάσεως ενός ευσταθούς συστήματος. Αυτό ξεκινάει από μια αρχική θέση και καταλήγει στο κέντρο, δηλαδή σε μηδενική απόσταση και ταχύτητα. Στο σχήμα 5.6β(β) το σύστημα είναι ευσταθές ταλαντευόμενο, γιατί όταν το διάγραμμα ξεκινάει από διάφορα σημεία A και B καταλήγει πάντοτε σε ένα κλειστό κύκλο. Το σύστημα του σχήματος 5.6β(γ) είναι ασταθές, γιατί η καμπύλη ξεκινάει από κάποιο σημείο A και απομακρύνεται συνεχώς προς το άπειρο. Στα μη γραμμικά συστήματα υπάρχει το ενδεχόμενο να έχουμε ευστά-



Σχ. 5.6α.

Διάγραμμα φάσεως γραμμικού συστήματος δεύτερου βαθμού.



Σχ. 5.6β.

Διάγραμμα φάσεως.

θεια για ορισμένες αρχικές συνθήκες και για άλλες να έχουμε αστάθεια. Η ευστάθεια στα γραμμικά συστήματα διαφέρει σε σχέση με την εφαρμογή του **θεωρήματος Lyapunov**, που αφορά την ευστάθεια των γραμμικών και των μη γραμμικών συστημάτων. Όταν λέμε ότι ένα σύστημα είναι ευσταθές, εννοούμε ότι μπορεί να είναι υπό συνθήκες ευσταθές ή ότι καταλήγει σε κλειστή γραμμή του διαγράμματος φάσεως. Τέλος, το σύστημα μπορεί να είναι ασυμπτωτικά ευσταθές, που σημαίνει ότι καταλήγει στη συνθήκη ηρεμίας. Για τα μη γραμμικά συστήματα θα πρέπει να προσθέσουμε τον όρο **γενικά ευσταθές**, που σημαίνει ότι το σύστημα είναι ευσταθές σε όλα τα επίπεδα φάσεως και τον όρο **τυπικά ευσταθές**, που σημαίνει ότι το σύστημα είναι ευσταθές μόνο σε μια περιοχή του επιπέδου φάσεως.

Το σημαντικότερο θεώρημα που εφαρμόζεται για τον έλεγχο της συμπεριφοράς ενός μη γραμμικού συστήματος είναι το θεώρημα Lyapunov. Αυτό προβλέπει ότι αν στο επίπεδο φάσεως μπορούμε να βρούμε μια καμπύλη, που περιγράφεται από τη συνάρτηση $V(x)$ ώστε να είναι:

$$\begin{aligned} V(x) &= 0 \text{ για } x = 0 \\ V(x) &> 0 \text{ για } x \neq 0 \\ V(x) &\rightarrow \infty \text{ για } |x| \rightarrow \infty \\ W &= dv/dt \leq 0 \text{ για } x \neq 0 \end{aligned} \quad (5.14)$$

τότε το σύστημα είναι ευσταθές. Ενώ όταν:

$$W = dv/dt < 0 \text{ για } x \neq 0 \quad (5.15)$$

το σύστημα είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Αν όμως:

$$\begin{aligned} W &= dv/dt = 0 \text{ για } x = 0 \\ W &< 0 \text{ για } x \neq 0 \\ W &\rightarrow \infty \text{ για } |x| \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (5.16)$$

τότε το σύστημα είναι ασταθές εκτός εάν $V > 0$.

Σημειώνεται ότι η μέθοδος που παρουσιάστηκε αφορά στην ευστάθεια χωρίς τη λύση της διαφορικής εξίσωσης του συστήματος και ονομάζεται **δεύτερη μέθοδος του Lyapunov** ή **απειθείας μέθοδος**. Η πρώτη μέθοδος αφορά στη λύση της εξίσωσης.

5.7 Ευφυής έλεγχος.

Τα συμβατικά συστήματα αυτοματισμού χρησιμοποιούν αυστηρή μαθηματική λογική. Αντίθετα ο άνθρωπος δεν χρησιμοποιεί μαθηματικούς όρους (αληθής, ψευδής), αλλά σχετικούς και ποιοτικούς χαρακτηρισμούς (πολύ, λίγο, υψηλό, χαμηλό, νωρίς, αργά). Ο τρόπος με τον οποίο η ανθρώπινη σκέψη αποδίδει και χρησιμοποιεί ποιοτικούς χαρακτηρισμούς αποτελεί το ιδιαίτερο φαινόμενο που ονομάζουμε **φυσική νοημοσύνη** ή **λογική** ή **αντίληψη** ή **συλλογισμό**. Η ανθρώπινη νοημοσύνη χειρίζεται κυρίως ποιοτικές έννοιες, που δεν μπορούν να αποδοθούν με απλούς μαθηματικούς όρους. Επίσης, η απόδοση των χαρακτηρισμών διαφέρει από άτομο σε άτομο διότι συνδέεται με την προσωπική εμπειρία, το γνωστικό υπόβαθρο και πολλά άλλα ατομικά χαρακτηριστικά. Έτσι, είναι συνηθισμένο δύο άνθρωποι να χαρακτηρίζουν το ίδιο γεγονός με διαφορετικούς όρους, π.χ. το ίδιο χρώμα μπορεί να θεωρείται από άλλους «κανονικό» και από άλλους «ανοικτό» ή «φωτεινό». Ακόμη, ο ίδιος άνθρωπος μπορεί, σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ή υπό διαφορετικές συνθήκες να αποδώσει διαφορετικούς χαρακτηρισμούς στο ίδιο μέγεθος ή φαινόμενο. Η λεπτομερής διαδικασία της ανθρώπινης σκέψης δεν είναι πλήρως γνωστή και αποτελεί αντικείμενο της επιστημονικής έρευνας. Όμως, είναι γνωστό ότι η ανθρώπινη νοημοσύνη ξεπερνά σε επιδόσεις και τα πλέον προηγμένα «αυτόματα» συστήματα. Η υπεροχή αυτή είναι μάλιστα σαφέστερη όσο πιο πολυσύνθετο είναι το πρόβλημα αυτοματισμού, διότι εκεί αξιοποιείται η ικανότητα του ανθρώπινου νου να συνδυάζει τεράστιες ποσότητες πληροφορίας και να αναπτύσσει «αντίληψη». Για παράδειγμα, σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, η ρύθμιση των πλέον σημαντικών παραμέτρων ανατίθεται σε έμπειρους χειριστές που «αισθάνονται» την παραγωγική διαδικασία και μπορούν να τη λειτουργήσουν σε απόδοση υψηλότερη από οποιοδήποτε μηχανικό σύστημα ελέγχου. Ακόμη, υπάρχουν πολλά παραδείγματα φαινομενι-

κά απλών εργασιών, όπως το βάδισμα, ο συντονισμός κινήσεως και οράσεως ή ο χειρισμός μουσικών οργάνων, όπου τεχνητά συστήματα ελέγχου δεν προσεγγίζουν καν τις ανθρώπινες επιδόσεις. Όπως δείχνει και το όνομά της, η επιστήμη της τεχνητής νοημοσύνης προσπαθεί να αναπαράγει τα στοιχεία της ανθρώπινης νοημοσύνης με τεχνικά μέσα. Στην περιοχή της τεχνητής νοημοσύνης ανήκει και ο ευφυής έλεγχος, δηλαδή ο ειδικότερος τομέας, που επιδιώκει να προσδώσει στα συστήματα αυτοματισμού κάποια χαρακτηριστικά ανθρώπινης αντιλήψεως.

Μια από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους ευφυούς ελέγχου στηρίζεται στην προσέγγιση της διαδικασίας νοήσεως, η οποία αναπτύχθηκε από τις εργασίες του Lotfi Zadeh στα μέσα της δεκαετίας του εξήντα και ονομάζεται *ασαφής λογική*. Σε αντίθεση με την *επαγωγική* ή «κλασική» λογική, η ασαφής λογική δέχεται ότι το ίδιο γεγονός επιδέχεται δύο ή περισσότερους χαρακτηρισμούς ταυτόχρονα. Η αρχική ιδέα προτάθηκε από τον J. Lukasiewicz στη δεκαετία του '20.

Η μέθοδος της ασαφούς λογικής συνδέει τις ποιτικές έννοιες που χρησιμοποιούνται στον ανθρώπινο συλλογισμό με ποσοτικά δεδομένα, τα οποία είναι κατάλληλα για μηχανική επεξεργασία (H/Y). Τα συστήματα αυτοματισμού που στηρίζονται στην ασαφή λογική αξιοποιούν αυτήν ακριβώς τη σύνδεση. Ειδικότερα, χρησιμοποιούν το βαθμό αληθείας, για να υπολογίσουν και να εφαρμόσουν κανόνες ελέγχου. Ο βαθμός αληθείας είναι ένα ποσοτικό μέγεθος που αντιπροσωπεύει πόσο ευκολότερα κατατάσσουμε ένα γεγονός σε μία κατηγορία συγκριτικά με ένα άλλο γεγονός. Ένας κανόνας έχει δύο μέρη: το *πρώτο μέρος* είναι η συνθήκη που περιγράφει πότε ο κανόνας ισχύει. Η συνθήκη ενός κανόνα μπορεί να είναι απλή ή σύνθετη, δηλαδή να περιέχει πολλές διαφορετικές προτάσεις που συνδέονται μεταξύ τους με τις λέξεις «και» και «είτε», π.χ. «η θερμοκρασία είναι υψηλή και η υγρασία είναι κανονική». Το *δεύτερο μέρος* ενός κανόνα είναι το αποτέλεσμα που περιγράφει τι θα συμβαίνει, όταν ο κανόνας ισχύει, π.χ. «αν η πίεση είναι υψηλή, η βαλβίδα εξόδου να ανοίξει».

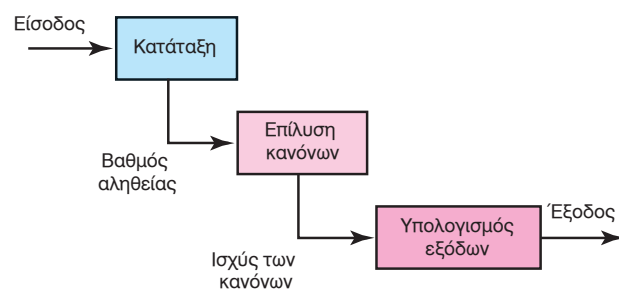
Όπως οι ανθρώπινοι συλλογισμοί, οι κανόνες συνήθως περιέχουν ποιτικά και όχι ποσοτικά δεδομένα. Οι κανόνες διατυπώνονται συνήθως από έμπειρους χειριστές ή άλλους ειδικούς εξοικειωμένους με το ελεγχόμενο σύστημα ή διεργασία. Άρα μέσω των κανόνων τα συστήματα αυτοματισμού με χρήση ασαφούς λογικής είναι σε θέση να αποτυπώ-

σουν την ανθρώπινη γνώση και εμπειρία. Για αυτό το λόγο κατατάσσονται στα λεγόμενα *έμπειρα συστήματα* ή *συστήματα γνώσεως*. Ένα σύστημα αυτοματισμού με τη χρήση ασαφούς λογικής (ελεγκτής) περιλαμβάνει τρία τμήματα (σχ. 5.7):

- Τη *διαδικασία κατατάξεως* της εισόδου που χρησιμοποιεί τα δεδομένα εισόδου στον ελεγκτή για τον υπολογισμό του βαθμού αληθείας.
- Τη *διαδικασία επίλυσεως* των κανόνων χρησιμοποιεί το βαθμό αληθείας για να υπολογίσει τις συνθήκες των κανόνων ελέγχου και επομένως να συμπεράνει ποιοι κανόνες ισχύουν και κατά πόσο.
- Τη *διαδικασία υπολογισμού* της εξόδου ενεργοποιεί το δεύτερο μέρος (αποτέλεσμα) των κανόνων που ισχύουν, για να υπολογίσει την έξοδο του ελεγκτή. Η έξοδος αυτή είναι η εντολή προς το ελεγχόμενο σύστημα.

Αντίθετα με τα συμβατικά συστήματα ελέγχου τα συστήματα που χρησιμοποιούν ασαφή λογική δεν χρειάζονται προηγούμενη «μαθηματική» ανάλυση της ελεγχόμενης διεργασίας αλλά «ποιοτική» περιγραφή των σημαντικών φαινομένων και αλληλεπιδράσεων, μέσα από τη διατύπωση των κανόνων ελέγχου. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα επιθυμητό σε περιπτώσεις ελέγχου πολυπλόκων διεργασιών, που δεν μπορούν να περιγραφούν σωστά με εξισώσεις ή άλλες συμβατικές μαθηματικές μεθόδους. Τέτοια παραδείγματα είναι π.χ. η αναγνώριση μορφής μέσα σε εικόνες ή η μουσική. Επίσης, η χρήση ασαφούς λογικής είναι κατάλληλη για τον έλεγχο διατάξεων που απαιτείται να λειτουργούν σε πολύ διαφορετικές συνθήκες, π.χ. συσκευές κλιματισμού, οικιακές συσκευές. Η ασαφής λογική χρησιμοποιείται, όταν υπάρχουν και λειτουργούν πρακτικοί κανόνες, π.χ. από τη γνώση και την εμπειρία των χειριστών μιας συσκευής ή διατάξεως.

Από τα τέλη της δεκαετίας του '80, οι εφαρμογές των συστημάτων αυτών εξαπλώνονται ταχύτατα,



Σχ. 5.7.

Έλεγχος με ασαφή λογική.

τόσο στη βιομηχανία όσο και στα προϊόντα ευρείας καταναλώσεως (φωτογραφική μηχανή, οικιακές συσκευές). Ο έλεγχος ασαφούς λογικής χρησιμοποιείται ακόμη σε αποδοτικές συσκευές κλιματισμού. Το σύστημα ελέγχου μετράει τη θερμοκρασία καθώς επίσης και τις εντολές από το χειριστήριο (επιθυμητή θερμοκρασία). Ένα τυπικό σύστημα χρησιμοποιεί περίπου 50 κανόνες ασαφούς λογικής, για να καθορίσει τη ροή του αέρα (ταχύτητα ανεμιστήρα) και την ένταση της ψύξεως (βαλβίδα του συμπιεστή). Αναφέρεται ότι συσκευές κλιματισμού με έλεγχο ασαφούς λογικής ανταποκρίνονται έως και πέντε φορές ταχύτερα στις εντολές του χειριστήριου και ταυτόχρονα περιορίζουν την κατανάλωση έως και 25% συγκριτικά με μια συμβατική μονάδα. Ο ασαφής έλεγχος χρησιμοποιείται και στη βιομηχανία (τσιμεντοβιομηχανία, διυλιστήρια, βιομηχανία τροφίμων, στις μηχανοκατασκευές κ.ά.).

5.8 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι συστήματα, των οποίων η δομή είναι εμπνευσμένη από τον τρόπο λειτουργίας του νευρικού συστήματος και του εγκεφάλου. Η βασική μονάδα ενός νευρωνικού δικτύου είναι ο **νευρώνας** (σχ. 5.8α). Ο πυρήνας του νευρώνα δέχεται σήματα από άλλους νευρώνες μέσω καναλιών εισόδου, που ονομάζονται **δενδρίτες**, και τα επεξεργάζεται για τη δημιουργία ενός καινούργιου σήματος. Αν το σήμα που προκύπτει είναι αρκετά ισχυρό, ενεργοποιεί την έξοδο του νευρώνα. Τότε παράγεται ένα σήμα εξόδου, το οποίο μεταδίδεται μέσω του καναλιού εξόδου, το οποίο καλείται **άξον**. Η μετάδοση από τον άξονα στους δενδρίτες άλλων νευρώνων περνά από μία σύνδεση, που ονομάζεται **σύναψη**. Το μεταδιδόμενο σήμα μεταβάλλεται ανάλογα με τη συναπτική ισχύ αυτής της συνδέσεως. Ο εγκεφαλος αποτελείται από δισεκατομμύρια νευρώνες.

Το κύριο στοιχείο επεξεργασίας ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου μιμείται τη λειτουργία ενός βιολογικού νευρώνα και ονομάζεται τεχνητός νευρώνας (σχ. 5.8β). Είναι ένα στατικό, αναλλοίωτο ως προς την ολίσθηση σύστημα πολλαπλών εισόδων και μιας εξόδου, που διέπεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$y_i(n) = f[x_i(n)] \quad (5.17)$$

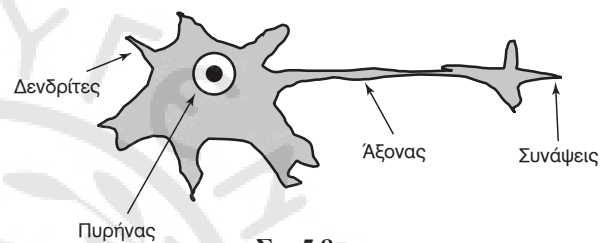
$$x_i(n) = \sum_{j=1}^M W_{ij} u_j(n) \quad (5.18)$$

Ο όρος $x_i(n)$ σχηματίζει το άθροισμα των σημά-

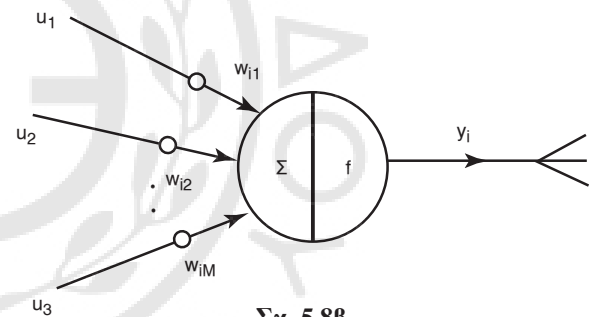
των που προέρχονται από άλλους νευρώνες συνδεδεμένους με τον i νευρώνα, μετά την επίδραση των συναπτικών βαρών w_{ij} . Η συνάρτηση f μπορεί να είναι μια συνάρτηση κάτωφλιού, που παράγει μια μη μηδενική τιμή, αν το άθροισμα $x_i(n)$ είναι αρκετά ισχυρό, δηλαδή, μεγαλύτερο από το κατώφλι της $f(u)$ ή μπορεί να είναι μια συνεχής συνάρτηση. Τρεις διαδοδομένες επιλογές της $f(u)$ απεικονίζονται στο σχήμα 5.8γ και είναι:

α) **Μοντέλο Mc Culloch-Pitts**, όπου η $f(u)$ έχει τη μορφή του μοναδιαίου βήματος.

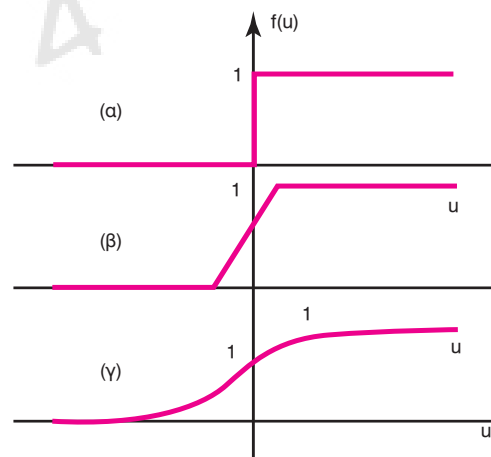
$$f(u) = \begin{cases} 1 & \text{αν } u > 0 \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (5.19)$$



Σχ. 5.8α.
Παράσταση βιολογικού νευρώνα.



Σχ. 5.8β.
Τεχνητός νευρώνας.



Σχ. 5.8γ.

Συνήθεις επιλογές της μη γραμμικής συναρτήσεως του νευρώνα.

β) **Τμηματικά γραμμικό μοντέλο**, όπου η $f(u)$ ορίζεται ως εξής:

$$f(u) = \begin{cases} 0 & \text{αν } u \leq 0 \\ u & \text{αν } 0 < u < 1 \\ 1 & \text{αν } u \geq 1 \end{cases} \quad (5.20)$$

γ) **Σιγμοειδές μοντέλο**. Το σιγμοειδές μοντέλο είναι αυτό που χρησιμοποιείται περισσότερο στην πράξη. Ονομάστηκε έτσι από την S-μορφολογία, της μη γραμμικότητάς του. Μια δημοφιλής επιλογή είναι η συνάρτηση:

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha u}} \quad (5.21)$$

Καθώς το $\alpha \rightarrow +\infty$, το σιγμοειδές μοντέλο μετατρέπεται στο μοντέλο Mc Cullough-Pitts. Άλλο ένα σιγμοειδές μοντέλο είναι:

$$f(u) = \frac{1 - e^{-\alpha u}}{1 + e^{-\alpha u}} \quad (5.22)$$

Ένα νευρωνικό δίκτυο σχηματίζεται από τη σειριακή, την παράλληλη και με την ανατροφοδοτούμενη σύνδεση των νευρώνων. Επιπροσθέτως, περιλαμβάνει απομονωτή εισόδου, όπου τα δεδομένα παρουσιάζονται στο δίκτυο και απομονωτή εξόδου, ο οποίος κρατά την απόκριση του δικτύου για μια δεδομένη είσοδο. Δύο σημαντικές κατηγορίες δικτύων είναι:

- Τα **δίκτυα πολλαπλών επιπέδων**, που παριστάνονται από στατικά, μη γραμμικά, χρονικά αναλλοίωτα συστήματα. Οι νευρώνες είναι οργανωμένοι σε μια ακολουθία επιπέδων.
- Τα **επαναληπτικά δίκτυα**, τα οποία περιλαμβάνουν δυνατότητες μνήμης και έτσι παριστάνονται από δυναμικά συστήματα. Ένας τυπικός αντιπρόσωπος ενός επαναληπτικού δικτύου είναι το δίκτυο Hopfield.

Σήμερα, υπάρχει πολύ έντονο ενδιαφέρον για την εφαρμογή και εκμετάλλευση των νευρωνικών δικτύων σε πολλούς τομείς της βιομηχανικής παραγωγής, στην ιατρική, στις μεταφορές και στην αγροτική παραγωγή. Η πρόοδος στους τομείς των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεγάλης κλίμακας (VLSI) και στους παράλληλους υπολογιστές είχαν ως αποτέλεσμα την εντυπωσιακή αύξηση της βασικής και εφαρμοσμένης έρευνας στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, σε πεδία όπως συστήματα αναγνώρισης προτύπων, στην επεξεργασία εικόνας και φωνής, στη μηχανική όραση, στη ρομποτική, στα συστήματα αυτομάτου

ελέγχου κλπ. Τα χαρακτηριστικά των τεχνητών νευρωνικών δικτύων που τα καθιστούν ιδιαίτερα εφαρμόσιμα στην περιοχή του ελέγχου παραγωγικών διεργασιών είναι τα εξής:

- Έχουν από τη φύση τους εφαρμογή σε μη γραμμικό έλεγχο, κάτι που προκύπτει από την ικανότητά τους να προσεγγίζουν μη γραμμικές σχέσεις εισόδου-εξόδου.
- Έχουν έμφυτες ικανότητες ανεκτικότητας σε βλάβες λόγω της παράλληλης δομής τους.
- Με κατάλληλη εκπαίδευση το νευρωνικό δίκτυο έχει την ικανότητα να γενικεύει και να προεκτείνει, όταν διεγείρεται με άγνωστες εισόδους.
- Έχουν την ικανότητα να λειτουργούν με αριθμητικά και γλωσσικά δεδομένα εξίσου ικανοποιητικά.
- Μπορούν να επεξεργαστούν πολλαπλά σήματα εισόδου και εξόδου, και έτσι είναι τα ιδανικά για τον έλεγχο πολυμεταβλητών συστημάτων.

Οι παραπάνω ιδιότητες αποτελούν τις απαραίτητες βάσεις για την ανάπτυξη μιας νέας κατηγορίας ευφυών συστημάτων. Οι νευρωνικοί ελεγκτές στα συστήματα ελέγχου υλοποιούνται με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, που πρέπει πρώτα να εκπαιδευτούν κατάλληλα. Οι νευρωνικοί ελεγκτές εμπίπτουν στην κατηγορία των εκπαιδευομένων ελεγκτών οι οποίοι αποτελούν μαζί με τα ευφυή συστήματα τον πυρήνα της νέας γενιάς μη συμβατικών ελεγκτών, που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη.

5.9 Ερωτήσεις.

1. Ποια πλεονεκτήματα έχουν τα ψηφιακά συστήματα ελέγχου σε σύγκριση με τα αναλογικά;
2. Ποια η χρησιμότητα των A/D και D/A σε ένα τυπικό ψηφιακό σύστημα ελέγχου;
3. Τι είναι το GPIB;
4. Τι ονομάζουμε μη γραμμικά συστήματα;
5. Ποιοι μέθοδοι λύσεων χρησιμοποιούνται στα μη γραμμικά συστήματα ελέγχου;
6. Τι είναι ο ευφυής έλεγχος;
7. Από ποια τμήματα αποτελείται ο ασαφής ελεγκτής;
8. Περιγράψτε μια εφαρμογή ευφυή ελέγχου.
9. Ποιες είναι οι δύο πιο σημαντικές κατηγορίες τεχνητών νευρωνικών δικτύων;
10. Ποια είναι τα χαρακτηριστικά των τεχνητών νευρωνικών δικτύων που τα καθιστούν ιδιαίτερα εφαρμόσιμα στον τομέα του ελέγχου παραγωγικών διεργασιών;

Σχεδίαση συστημάτων λογικού αυτοματισμού

6

6.1 Γενικά.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδίασεως συστημάτων λογικού αυτοματισμού. Ειδικότερα, παρουσιάζονται τα κυκλώματα συνδυαστικού αυτοματισμού, με τη διαδικασία καταστρώσεως ενός προβλήματος αυτοματισμού σε μορφή λογικής εξισώσεως και την απλοποίηση του κυκλώματος που προκύπτει, καθώς επίσης και ο ακολουθιακός αυτοματισμός με τη μέθοδο απεικονίσεως και προδιαγραφής ακολουθιακών συστημάτων GRAFCET. Και οι δύο παραπάνω κατηγορίες ανήκουν στο πεδίο του λογικού αυτοματισμού και αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την ανάπτυξη συστημάτων αυτοματισμού προετοιμάζοντας επίσης τον τεχνικό στη χρήση προγραμματιζομένων λογικών ελεγκτών (PLC).

6.2 Η διαδικασία σχεδίασεως.

Ο στόχος της σχεδίασεως είναι η διατύπωση του **προβλήματος αυτοματισμού** και η διαμόρφωση ενός κατάλληλου **κυκλώματος αυτοματισμού**. Δηλαδή, η σχεδίαση αφορά στη μετάβαση από τη διατύπωση του προβλήματος (εισερχόμενο βέλος στο σχήμα 6.2) στη λύση, δηλαδή στο σχέδιο ενός συστήματος αυτοματισμού, ικανού να αντιμετωπίζει επαρκώς το πρόβλημα (εξερχόμενο βέλος στο σχήμα 6.2).

Στη γενική περίπτωση, η διατύπωση του προβλήματος αυτοματισμού αποτελείται από δύο αλληλένδετα μέρη:

α) Την αναφορά και την καταγραφή ορισμένων σημαντικών φυσικών παραμέτρων (π.χ. η θερμοκρα-

σία ενός χώρου, η στάθμη μιας δεξαμενής, το ρεύμα που διαρρέει ένα πηνίο), που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τη συγκεκριμένη εφαρμογή για την οποία ο αυτοματισμός προορίζεται.

β) Την περιγραφή της επιθυμητής συμπεριφοράς αυτών των φυσικών παραμέτρων (π.χ. οι τιμές τους να διατηρούνται μέσα σε ορισμένα όρια που απαιτούνται για την ασφαλή λειτουργία των σχετικών μηχανών ή διατάξεων).

6.3 Λογικός αυτοματισμός και συνδυαστικός αυτοματισμός.

Εδώ θα επικεντρωθούμε σε προβλήματα λογικού αυτοματισμού. Πρόκειται για προβλήματα που διατυπώνονται με **λογικές προτάσεις**, δηλαδή με εκφράσεις που μπορούν να είναι είτε αληθείς είτε ψευδείς. Για παράδειγμα, ο σκοπός του αυτοματισμού για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας ενός χώρου διατυπώνεται ως εξής: «**η θερμοκρασία να είναι μικρότερη από 28 °C**». Αυτό είναι κάτι που κάθε στιγμή είτε συμβαίνει (δηλ. επαληθεύεται) είτε όχι (δηλ. διαψεύδεται). Η εξέταση αυτής της κατηγορίας προβλημάτων μας επιτρέπει να εκφράσουμε το πρόβλημα αυτοματισμού ως σχέση μεταξύ **λογικών μεταβλητών**. Οι λογικές μεταβλητές είναι παράμετροι που παίρνουν δύο τιμές: «Αληθής» (true -1) ή «Ψευδής» (false - 0). Οι λογικές μεταβλητές συνδέονται μεταξύ τους μέσω λογικών πράξεων, σύμφωνα με την άλγεβρα Boole.

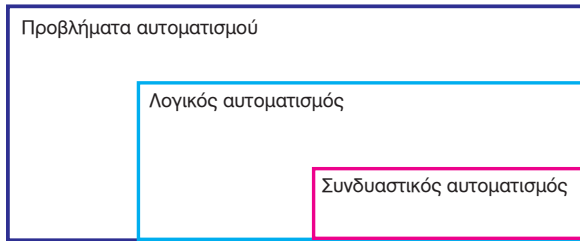
Το προϊόν της σχεδίασεως είναι το **κύκλωμα αυτοματισμού**, που μπορεί να λάβει τις εξής δύο μορφές:

α) Να είναι το σχέδιο του ηλεκτρικού κυκλώματος που υλοποιεί τον αυτοματισμό. Τα ηλεκτρικά κυκλώματα αυτοματισμού λειτουργούν ελέγχοντας την κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος διά μέσου επαφών, ηλεκτρονόμων και άλλων ηλεκτρικών στοιχείων. Για το λόγο αυτό ονομάζονται επίσης και **κυκλώματα επαφών**.



Σχ. 6.2.

Η διαδικασία σχεδίασεως κυκλωμάτων αυτοματισμού.



Σχ. 6.3α.

Κατηγορίες προβλημάτων αυτοματισμού.

β) Να είναι το λογικό κύκλωμα που αναπαριστά τη «λογική» του αυτοματισμού με συμβολικό τρόπο. Τα κυριότερα σύμβολα αυτής της αναπαράστασης είναι οι λογικές πύλες. Οι λογικές πύλες καθορίζουν τις σχέσεις και τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των λογικών μεταβλητών που εμπλέκονται στο πρόβλημα αυτοματισμού. Για το λόγο αυτό τα λογικά κυκλώματα ονομάζονται επίσης και *κυκλώματα πυλών*.

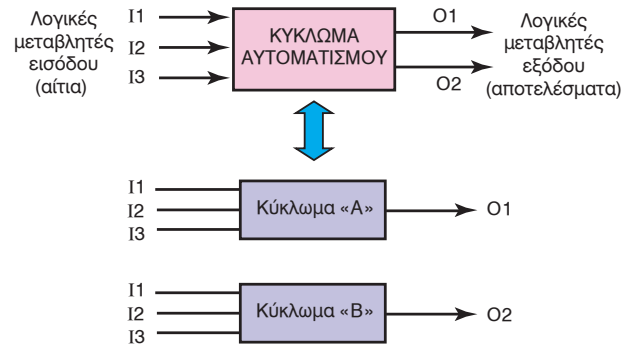
Επιπλέον θα αναφερθούμε σε μια ειδικότερη υποκατηγορία προβλημάτων λογικού αυτοματισμού, όπως δείχνει το σχήμα 6.3α, που είναι τα *συστήματα συνδυαστικού αυτοματισμού*, δηλαδή τα συστήματα των οποίων η έξοδος κάθε στιγμή καθορίζεται από τις τιμές των εισόδων κατά την ίδια χρονική στιγμή και όχι από τις προηγούμενες τιμές. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται και *συστήματα χωρίς μνήμη*.

6.3.1 Διατύπωση πίνακα αληθείας.

Το πρώτο στάδιο για τη σχεδίαση ενός κυκλώματος συνδυαστικού αυτοματισμού είναι η διατύπωση του προβλήματος αυτοματισμού με τη μορφή *πίνακα αληθείας* (truth table). Η εργασία αυτή περιλαμβάνει δύο σημαντικά βήματα:

1) Διάκριση των μεταβλητών αιτίου-αποτελέσματος.

Το πρώτο βήμα αφορά στο νοηματικό διαχωρισμό μεταξύ των λογικών *μεταβλητών εισόδου* και των *μεταβλητών εξόδου* του κυκλώματος αυτοματισμού. Μεταβλητή εξόδου του κυκλώματος αυτοματισμού είναι εκείνη που δέχεται τιμές (καθορίζεται) από το κύκλωμα αυτοματισμού. Δηλαδή, στο κύκλωμα αυτοματισμού έχει ανατεθεί να χειρίζεται τις αντίστοιχες παραμέτρους. Μια μεταβλητή εξόδου ονομάζεται επίσης και *αποτέλεσμα* για προφανείς λόγους. Συνήθως, οι μεταβλητές εισόδου συμβολίζονται με το γράμμα *I* από τον αγγλικό όρο Input ή από παραπλήσιο σύμβολο (π.χ. το γράμμα *Q*, ώστε να αποφεύγεται η σύγχυση του κεφαλαίου όμιζρον «*O*» με το μηδέν «*0*»). Έτσι, οι μεταβλητές εξόδου μπορούν να συμβολίζονται ως *O1, O2, O3* κλπ.



Σχ. 6.3β.

Το κύκλωμα αυτοματισμού ως σχέση «αιτίου-αποτελέσματος».

Αντίθετα, μεταβλητή εισόδου του κυκλώματος αυτοματισμού είναι μια εξωτερική, ως προς το κύκλωμα αυτοματισμού, συνθήκη που καθορίζεται από το περιβάλλον. Στην περίπτωση αυτή, στο κύκλωμα αυτοματισμού έχει ανατεθεί να ανταποκρίνεται στις αντίστοιχες παραμέτρους. Οι μεταβλητές αυτές ονομάζονται και *αίτια*, ακριβώς διότι προξενούν την αντίδραση του κυκλώματος αυτοματισμού. Συνήθως, οι μεταβλητές εισόδου συμβολίζονται με το γράμμα *I* από τον αγγλικό όρο Input. Έτσι, οι μεταβλητές εξόδου μπορούν να συμβολίζονται ως *I1, I2, I3* κλπ. Η διάκριση αυτή οδηγεί στη διατύπωση του προβλήματος αυτοματισμού και του αντίστοιχου κυκλώματος αυτοματισμού με τη μορφή σχέσεως «αιτίου-αποτελέσματος», όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3β.

Το υποθετικό κύκλωμα του σχήματος 6.3β έχει τρεις λογικές εισόδους και δύο λογικές εξόδους. Επομένως, η διατύπωση του προβλήματος αυτοματισμού πρέπει να περιγράφει την επιθυμητή λογική τιμή (0 ή 1) κάθε εξόδου για όλους τους συνδυασμούς τιμών των τριών εισόδων. Αντίστοιχα, το κύκλωμα αυτοματισμού πρέπει να παρακολουθεί την κατάσταση των τριών λογικών μεταβλητών εισόδου και να επιβάλλει «κατάλληλες τιμές» στις δύο λογικές μεταβλητές εξόδου. Οι «κατάλληλες τιμές» περιγράφονται επίσης στη διατύπωση του προβλήματος αυτοματισμού.

2) Σχηματισμός του πίνακα αληθείας.

Ο πίνακας αληθείας απεικονίζει τις τιμές των λογικών μεταβλητών εξόδου για κάθε δυνατό συνδυασμό των τιμών των λογικών εισόδων. Από μόνη της, κάθε λογική είσοδος λαμβάνει δύο διαφορετικές τιμές: 1 ή 0. Εάν έχουμε άλλη μια είσοδο, τότε κάθε τιμή της πρώτης συνδυάζεται με τις δύο δυνατές τιμές της

δεύτερης. Επομένως, έχουμε τέσσερις συνδυασμούς συνολικά. Επαναλαμβάνοντας αυτόν το συλλογισμό για τρεις, τέσσερις κ.ο.κ. μεταβλητές εισόδου καταλήγουμε ότι N μεταβλητές εισόδου σχηματίζουν 2^N διαφορετικούς συνδυασμούς. Αυτός είναι και ο αριθμός των γραμμών του πίνακα αληθείας.

Έτσι, στην περίπτωση του κυκλώματος του σχήματος 6.3β, ο πίνακας αληθείας θα έχει $2^3=8$ γραμμές, που αντιστοιχούν στους συνδυασμούς τιμών των τριών εισόδων και $3+2=5$ στήλες, που αντιστοιχούν στις λογικές μεταβλητές (εισόδου και εξόδου) που εμπλέκονται στη διατύπωση του προβλήματος αυτοματισμού. Ο πίνακας αληθείας παρουσιάζεται στον πίνακα 6.3.1 (οι τιμές των μεταβλητών εξόδου είναι αυθαίρετες και δεν αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη «επιθυμητή συμπεριφορά»).

Παράδειγμα.

Ένα σύστημα παροχής έχει ως σκοπό να απομακρύνει τα νερά της βροχής αποφεύγοντας όμως, κατά το δυνατόν, την υπερχείλιση των δεξαμενών και αγωγών που χρησιμοποιούνται για αυτήν την απομάκρυνση (σχ. 6.3γ). Τα νερά της βροχής (όμβρια ύδατα) συγκεντρώνονται αρχικά σε ένα φρεάτιο. Το φρεάτιο είναι εφοδιασμένο με διακόπτη συνδεδεμένο με πλωτήρα, που ενεργοποιείται όταν η στάθμη ανέβει σε σημείο υπερχείλισης. Το νερό του φρεατίου μπορεί να παροχετεύεται σε έναν κεντρικό σωλήνα αποχετεύσεως μέσω ηλεκτρικής αντλίας. Ο σωλήνας είναι επίσης εφοδιασμένος με πλωτήρα υπερχείλισης ακριβώς όπως και το φρεάτιο. Σκοπός του αυτοματισμού είναι να διατηρεί τη

στάθμη του φρεατίου και του σωλήνα κάτω από τη στάθμη υπερχείλισης, δίνοντας όμως προτεραιότητα στο σωλήνα. Εάν η στάθμη του σωλήνα πλησιάσει την υπερχείλιση, τότε το σύστημα πρέπει να ενεργοποιεί ένα ηχητικό σήμα (σειρήνα).

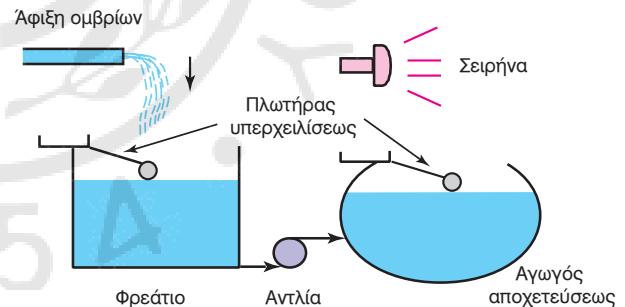
Από το παραπάνω πρόβλημα αυτοματισμού είναι φανερό ότι το κύκλωμα αυτοματισμού «χειρίζεται» δύο λογικές μεταβλητές (μεταβλητές εξόδου): τη λειτουργία της αντλίας και την ενεργοποίηση της σειρήνας. Συγκεκριμένα, το κύκλωμα αυτοματισμού παίρνει αποφάσεις και αναλόγως καθορίζει την τιμή της κάθε μιας μεταβλητής (αληθής ή ψευδής). Επομένως, αυτές είναι οι λογικές μεταβλητές εξόδου του κυκλώματος.

Σύμφωνα με την εκφώνηση του προβλήματος αυτοματισμού, για να καταλήξει στις όποιες αποφάσεις, το κύκλωμα εισόδου πρέπει να «γνωρίζει» δύο πράγματα: εάν έχει υπερχείλισει το φρεάτιο και εάν έχει υπερχείλισει ο σωλήνας αποχετεύσεως. Δηλαδή, το κύκλωμα πρέπει να ανταποκρίνεται στις λογικές καταστάσεις (αληθής ή ψευδής) αυτών των δύο μεγεθών. Επομένως, αυτές είναι οι λογικές μεταβλητές εισόδου. Συνολικά, το κύκλωμα αυτοματισμού συνδέεται με το περιβάλλον όπως στο σχήμα 6.3δ. Τα βέλη του σχήματος δείχνουν την κατεύθυνση της ροής της πληροφορίας. Η πληροφορία π.χ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3.1.

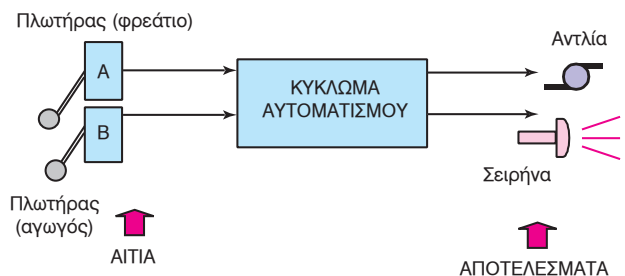
Πίνακας αληθείας για το υποθετικό κύκλωμα του σχήματος 6.3β.

I1	I2	I3	O1	O2
0	0	0	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
1	0	0	0	1
0	1	1	1	1
1	1	0	0	1
1	0	1	0	0
1	1	1	0	1
«αίτια»			«αποτελέσματα»	



Σχ. 6.3γ.

Στοιχεία του προβλήματος αυτοματισμού.



Σχ. 6.3δ.

Στοιχεία του προβλήματος αυτοματισμού.

για την υπερχείλιση (I2) μεταφέρεται από τον πλωτήρα υπερχείλισης του σωλήνα στο κύκλωμα αυτοματισμού ή η πληροφορία για την ενεργοποίηση της αντλίας (O1) εκπορεύεται από το κύκλωμα αυτοματισμού προς την αντλία. Αντίθετα, τα βέλη του σχήματος 6.3γ δείχνουν τη ροή του νερού.

Συγκρίνοντας τα δύο σχήματα θα διαπιστώσετε ότι δεν υπάρχει κανένα κοινό σημείο αφού στο πρώτο (σχ. 6.3γ) η αντλία τροφοδοτείται με νερό από το φρεάτιο, ενώ στο δεύτερο (σχ. 6.3δ) τροφοδοτείται με εντολές από το κύκλωμα αυτοματισμού. Επομένως, όλες οι εμπλεκόμενες μεταβλητές είναι συνολικά τέσσερις και ο πίνακας αληθείας έχει τέσσερις στήλες. Επίσης, οι δύο μεταβλητές εισόδου μπορούν να σχηματίσουν $2^2=4$ διαφορετικούς συνδυασμούς και επομένως ο πίνακας αληθείας έχει τέσσερις γραμμές. Για να καταστρώσουμε τον πίνακα αληθείας, πρέπει να υπολογίσουμε τις τιμές των μεταβλητών εξόδου για κάθε δυνατό συνδυασμό των εισόδων, δηλαδή για κάθε γραμμή του πίνακα. Οι τιμές αυτές καταχωρούνται στις αντίστοιχες δύο τελευταίες στήλες του πίνακα αληθείας και μπορούν να υπολογισθούν χωριστά για κάθε μεταβλητή εξόδου ως εξής:

α) **Λειτουργία της αντλίας.** Η αντλία ενεργοποιείται μόνο στην περίπτωση που το φρεάτιο υπερχειλίζει και ταυτόχρονα ο σωλήνας δεν έχει υπερχειλίσει. Διαφορετικά, η αντλία δε λειτουργεί.

β) **Λειτουργία της σειρήνας.** Η σειρήνα ειδοποιεί για την υψηλή στάθμη του κεντρικού αγωγού, όταν ο αγωγός υπερχειλίζει. Η ενεργοποίηση της σειρήνας πρέπει να γίνεται ανεξάρτητα από την κατάσταση του φρεατίου. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις η αντίστοιχη έξοδος είναι «ψευδής» (λογικό 0).

Στον πίνακα 6.3.2 παρουσιάζεται ο πίνακας αληθείας του παραδείγματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3.2.

Πίνακας αληθείας του παραδείγματος.

I1 Το φρεάτιο υπερχειλίζει	I1 Ο αγωγός υπερχειλίζει	O1 Η αντλία λειτουργεί	O2 Η σειρήνα ειδοποιεί
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1

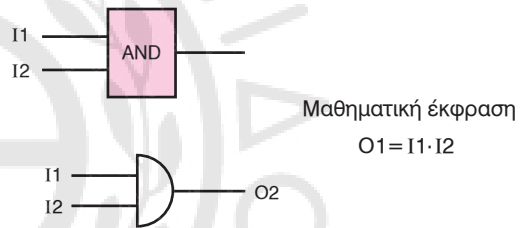
6.3.2 Οι λογικές πράξεις και οι λογικές πύλες.

Η επεξεργασία του κυκλώματος αυτοματισμού χρησιμοποιεί τις κυριότερες λογικές πράξεις και τις αντίστοιχες λογικές πύλες. Οι βασικότερες λογικές πύλες είναι τρεις: η πύλη «ΚΑΙ» (AND), η πύλη «Ή» (OR) και η πύλη «ΟΧΙ» (NOT). Άλλη χρήσιμη πύλη είναι εκείνη του «ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή» (EX-OR). Οι πύλες αυτές παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1) Η λογική πύλη «ΚΑΙ» (AND).

Η λογική πράξη AND συνδέει δύο ή περισσότερες λογικές μεταβλητές εισόδου (αίτια) με μια μεταβλητή εξόδου (αποτέλεσμα). Η μεταβλητή εξόδου είναι αληθής, εάν και μόνον όλες ανεξαιρέτως οι λογικές μεταβλητές εισόδου είναι αληθείς. Η λογική πράξη AND παριστάνεται με το σύμβολο της τελείας (·).

Η πράξη AND απεικονίζεται με την αντίστοιχη λογική πύλη AND, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3ε.



Σχ. 6.3ε.

Συμβολισμός λογικής πύλης AND.

Στον πίνακα 6.3.3 φαίνεται ο πίνακας αληθείας της πύλης AND.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3.3.

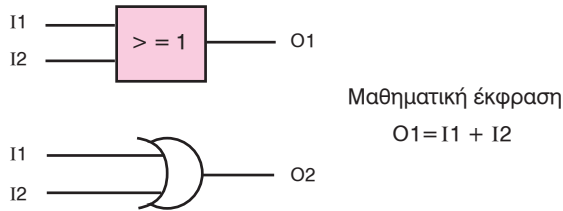
Πίνακας αληθείας πύλης AND.

I1	I2	O1
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

2) Η λογική πύλη «Ή» (OR).

Η λογική πράξη OR συνδέει δύο ή περισσότερες λογικές μεταβλητές εισόδου (αίτια) με μια μεταβλητή εξόδου (αποτέλεσμα). Η μεταβλητή εξόδου είναι αληθής εάν μια ή και περισσότερες λογικές μεταβλητές εισόδου είναι αληθείς. Η λογική πράξη OR παριστάνεται με το σύμβολο της αλγε-

βρικής προσθέσεως (σταυρός, +), που τοποθετείται μεταξύ των αιτίων. Η πράξη OR απεικονίζεται με την αντίστοιχη λογική πύλη OR, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3στ.



Σχ. 6.3στ.

Συμβολισμός λογικής πύλης OR.

Στον πίνακα 6.3.4 παρουσιάζεται ο πίνακας αληθείας της πύλης OR.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3.4.

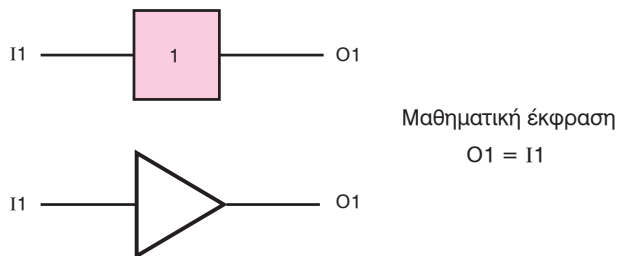
Πίνακας αληθείας πύλης OR.

I1	I2	O1
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

3) Η λογική πύλη «OXI» (NOT).

Η λογική πράξη NOT συνδέει μια λογική μεταβλητή εισόδου (αίτιο) με μια μεταβλητή εξόδου (αποτέλεσμα). Η μεταβλητή εξόδου είναι αληθής, εάν και μόνον η λογική μεταβλητή εισόδου είναι ψευδής, δηλαδή η τιμή του αιτίου αντιστρέφεται. Η λογική πράξη NOT παριστάνεται με μια γραμμή (-) που τοποθετείται πάνω από το σύμβολο της μεταβλητής εισόδου ή με το σύμβολο της αλγεβρικής αφαιρέσεως (μείον), που τοποθετείται στα αριστερά του αιτίου.

Η πράξη NOT απεικονίζεται με την αντίστοιχη λογική πύλη NOT, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3ζ.



Σχ. 6.3ζ.

Συμβολισμός λογικής πύλης NOT.

Στον πίνακα 6.3.5 φαίνεται ο πίνακας αληθείας της πύλης NOT.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3.5.

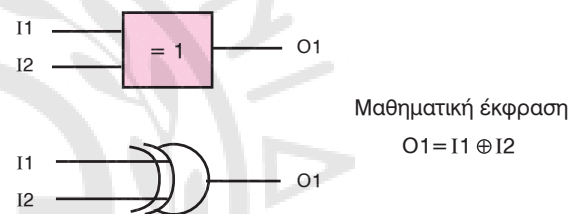
Πίνακας αληθείας πύλης NOT.

I1	O1
0	1
1	0

4) Η λογική πύλη «ΑΠΟΚΛΕΙΣΤΙΚΟΥ Ή» (EXOR).

Η λογική πράξη EXOR συνδέει δύο λογικές μεταβλητές εισόδου (αίτια) με μια μεταβλητή εξόδου (αποτέλεσμα). Η μεταβλητή εξόδου είναι αληθής εάν και μόνον οι τιμές των λογικών μεταβλητών εισόδου (αίτια) διαφέρουν μεταξύ τους, δηλαδή η μια είναι αληθής και η άλλη ψευδής. Η λογική πράξη EXOR παριστάνεται με ένα σταυρό σε κύκλο, που τοποθετείται μεταξύ των αιτίων.

Η πράξη EXOR απεικονίζεται με την αντίστοιχη λογική πύλη EXOR, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3η.



Σχ. 6.3η.

Συμβολισμός λογικής πύλης EXOR.

Στον πίνακα 6.3.6 φαίνεται ο πίνακας αληθείας της πύλης EXOR.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3.6.

Πίνακας αληθείας πύλης EXOR.

I1	I2	O1
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

6.3.3 Η λογική παράσταση.

Οι απλές λογικές πράξεις, όπως οι πράξεις AND, EXOR, OR, NOT, που είδαμε παραπάνω, είναι κατάλληλες, για να εκφράσουν απλές σχέσεις μεταξύ λογικών μεταβλητών. Αυτές όμως μπορούν να συνδυάζονται και σε σύνθετες λογικές εκφράσεις. Επίσης μπορούν να περιγράφουν πιο πολύπλοκες εξαρτήσεις μεταξύ λογικών μεταβλητών. Οι **λογικές παραστάσεις**, όπως ονομάζονται, αποτελού-

νται από σύμβολα λογικών μεταβλητών, από σύμβολα απλών λογικών πράξεων και από παρενθέσεις, π.χ. $Y = X1 \cdot (X2 + X3) \cdot X4$.

Οι λογικές παραστάσεις ακολουθούν ορισμένους απλούς κανόνες. Οι κανόνες αυτοί αποτελούν την «άλγεβρα» της μαθηματικής λογικής, όπως ακριβώς οι κανόνες της αριθμητικής αποτελούν την άλγεβρα των αριθμών. Οι κανόνες αυτοί επαληθεύονται και με την κοινή «λογική». Οι βασικότεροι παρουσιάζονται εδώ:

$A \cdot B = B \cdot A$ ο νόμος της αντιμεταθέσεως για το AND.

$A + B = B + A$ ο νόμος της αντιμεταθέσεως για το OR.

$A \cdot (B + C) = A \cdot C + A \cdot B$ ο επιμεριστικός νόμος.

$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C = A \cdot B \cdot C$ ο προσεταιριστικός νόμος για το AND.

$A + (B + C) = (A + B) + C = A + B + C$ ο προσεταιριστικός νόμος για το OR.

$\left. \begin{array}{l} \overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B} \\ \overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B} \end{array} \right\} \text{ οι δύο μορφές του νόμου De Morgan}$

6.4 Ακολουθιακός αυτοματισμός.

Ο **ακολουθιακός αυτοματισμός** ανήκει στην κατηγορία του λογικού αυτοματισμού, διότι ασχολείται με την εξέλιξη **λογικών μεταβλητών**, δηλαδή με παραμέτρους που παίρνουν δύο τιμές: αληθή ή ψευδή.

Όμως, αντίθετα από ένα σύστημα συνδυαστικού αυτοματισμού, οι στιγμιαίες τιμές των εισόδων ενός συστήματος ακολουθιακού αυτοματισμού δεν καθορίζουν μονοσήμαντα την τιμή της εξόδου του συστήματος. Το σχήμα 6.4α παρουσιάζει διαγραμματικά ένα παράδειγμα ακολουθιακού αυτοματισμού, ο οποίος ελέγχει έναν ηλεκτροκινητήρα από ένα χειριστήριο με δύο πλήκτρα (μπουτόν) Start και Stop.

Η αρχή της λειτουργίας αυτού του συστήματος είναι γνωστή: όταν πιέσουμε το πλήκτρο Start, ο κινητήρας μπαίνει σε κίνηση εφόσον είναι σε στάση. Όταν πιέσουμε το πλήκτρο Stop ο κινητήρας σταματά, εφόσον κινείται.

Υποθέτουμε ότι μια δεδομένη χρονική στιγμή γνωρίζουμε τη στιγμιαία τιμή των εισόδων, π.χ. ότι δεν πιέζεται κανένα από τα δύο πλήκτρα του χειριστηρίου. Η πληροφορία αυτή δεν είναι από μόνη της επαρκής, για να καθορίσουμε με βεβαιότητα την κατάσταση της εξόδου, δηλαδή την κίνηση του κινητήρα. Ο κινητήρας μπορεί εξίσου καλά, να στρέφει ή να είναι σε στάση. Ειδικότερα, γνωρίζουμε ότι χω-

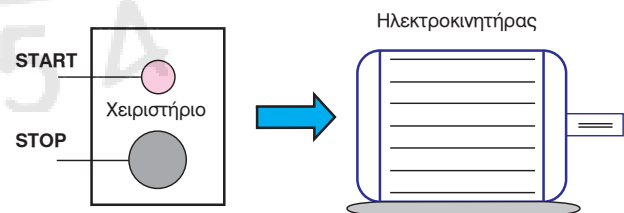
ρίς επέμβαση στο χειριστήριο ο κινητήρας θα κινείται, εάν ήταν ήδη σε κίνηση προηγουμένως και θα παραμένει σταματημένος, εάν ήταν ήδη σε στάση. Έτσι, αυτό το σύστημα αυτοματισμού θυμάται και διατηρεί την κατάσταση που είχε προηγουμένως, δηλαδή διαθέτει **μνήμη**. Αυτό είναι το βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων ακολουθιακού αυτοματισμού. Όπως δείχνει και το σχήμα 6.4β, το σύστημα αυτοματισμού καταχωρεί τιμές σε αυτές τις μνήμες και τις επαναχρησιμοποιεί μαζί με τις τιμές των εισόδων για τον υπολογισμό των τιμών των εξόδων του συστήματος.

6.4.1 Μέθοδος προδιαγραφής GRAFCET.

Οι ακολουθιακοί αυτοματισμοί υλοποιούνται με διαφορετικές τεχνολογίες: με ηλεκτρικά, ηλεκτρονικά, μηχανικά, πνευματικά, υδραυλικά και άλλα στοιχεία ή ακόμη και με συνδυασμό αυτών των τεχνολογιών. Για την ανάλυση των ακολουθιακών αυτοματισμών είναι αναγκαία η χρήση μεθόδων που να αποτυπώνουν τη «λογική» του αυτοματισμού, ανεξάρτητα από τον εκάστοτε συγκεκριμένο τρόπο τεχνικής υλοποίησης.

Μια τέτοια γενική μέθοδος απεικόνισης είναι η **GRAFCET (GRaphe Fonctionnel de Commande Etape Transition)**. Η μέθοδος GRAFCET αναπτύχθηκε αρχικά από τη Γαλλική Ένωση για την Κυβερνητική στην Οικονομία και την Τεχνολογία (AFCET) και έχει ενταχθεί ως επίσημο πρότυπο σε αρκετές ευρωπαϊκές χώρες.

Σύμφωνα με τη μέθοδο, τα ακολουθιακά συστήματα απεικονίζονται με διαγράμματα. Τα κύρια στοι-



Σχ. 6.4α.

Έλεγχος ηλεκτροκινητήρα.



Σχ. 6.4β.

Γενική μορφή ακολουθιακού κυκλώματος αυτοματισμού.

χεία της μεθόδου απεικόνισης GRAFCET, όπως παρουσιάζονται και στο απλό παράδειγμα του σχήματος 6.4γ, είναι τα εξής:

α) Οι **φάσεις**. Κάθε φάση απεικονίζεται με ένα αριθμημένο τετράγωνο και αντιστοιχεί σε μια κίνηση ή εργασία. Οι κινήσεις απεικονίζονται πλάι στις αντίστοιχες φάσεις με παραλληλόγραμμα, στο εσωτερικό των οποίων αναγράφεται το όνομα της κίνησης. Μια φάση και η αντίστοιχη κίνηση συνδέονται με μια λεπτή γραμμή. Το σχήμα 6.4γ απεικονίζει δύο φάσεις (3 και 8) και αντίστοιχα δύο εργασίες (κίνηση εμπρός και στάση).

β) Οι **δεσμοί**. Ένας δεσμός απεικονίζεται με μια γραμμή που συνδέει δυο «διαδοχικές» φάσεις. Οι δεσμοί είναι προσανατολισμένοι, δηλαδή έχουν βέλος που δείχνει τη σειρά διαδοχής των φάσεων. Συνήθως το βέλος των δεσμών παραλείπεται, διότι η κατεύθυνση ροής των φάσεων είναι προφανής από το περιεχόμενο του διαγράμματος ή από τη λογική του συστήματος αυτοματισμού. Το σχήμα 6.4γ περιλαμβάνει ένα δεσμό που συνδέει τις δύο φάσεις και υποδηλώνει μετάβαση από τη φάση 3 στη φάση 8.

γ) Οι **μεταβάσεις**. Η μετάβαση απεικονίζεται με μια παχιά γραμμή κάθετη σε ένα δεσμό. Κάθε μετάβαση συνδέεται με μια συνθήκη, για να ενεργοποιηθεί η μετάβαση. Η συνθήκη γράφεται πλάι στο σύμβολο της μεταβάσεως. Το σχήμα 6.4γ, περιλαμβάνει μια μετάβαση που ενεργοποιείται, όταν η συνθήκη PRESS είναι αληθής.

Το σχήμα 6.4δ συνοψίζει τη μορφή και τα χαρακτηριστικά αυτών των δομικών στοιχείων της απεικόνισης GRAFCET.

6.4.2 Κανόνες της GRAFCET.

Κάθε φάση ενός διαγράμματος GRAFCET έχει δύο δυνατές καταστάσεις, είτε την **ενεργή**, είτε την **αδρανή** (απενεργοποιημένη). Οι ενεργές φάσεις σημειώνονται κάθε στιγμή με ένα στίγμα (τελεία), τοποθετημένο στην κάτω δεξιά γωνία του συμβόλου τους (αριθμημένο τετράγωνο).

Οι δεσμοί και οι μεταβάσεις που παρεμβάλλονται μεταξύ των φάσεων «μεταφέρουν» την ενεργοποίηση από τη μια φάση στην επόμενη. Η διαδικασία αυτή, δηλαδή η εξέλιξη του διαγράμματος GRAFCET, γίνεται σύμφωνα με τρεις κανόνες.

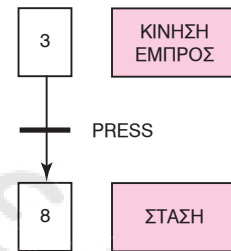
1) Αρχική φάση.

Πριν την έναρξη της λειτουργίας του αυτοματισμού, το ακολουθιακό σύστημα βρίσκεται στην **αρχική**

φάση του κατάστασης. Στο διάγραμμα η κατάσταση αυτή απεικονίζεται με μια ειδική φάση, την **αρχική φάση**, που σημειώνεται με ένα διπλό τετράγωνο, όπως στο σχήμα 6.4ε.

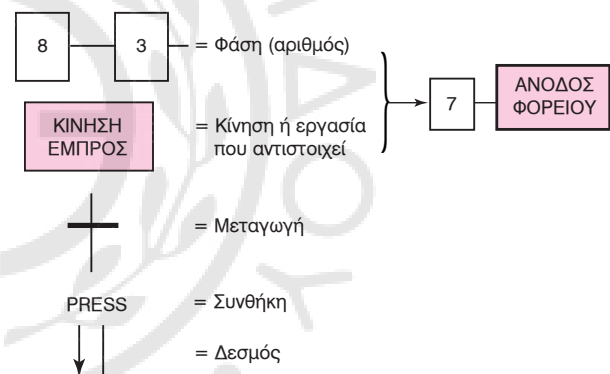
2) Μετάβαση.

Μια μετάβαση εφαρμόζεται υποχρεωτικά, όταν και μόνον όταν η συνθήκη με την οποία συνδέεται είναι αληθής και ταυτόχρονα η προηγούμενη φάση είναι ενεργή.



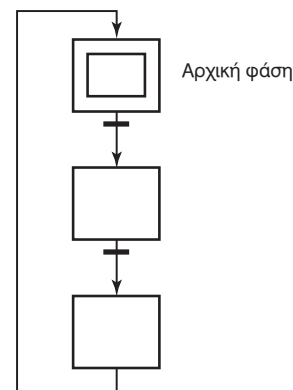
Σχ. 6.4γ.

Απλό παράδειγμα διαγράμματος GRAFCET.



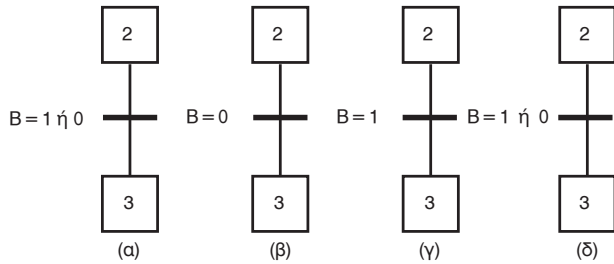
Σχ. 6.4δ.

Βασικά δομικά στοιχεία GRAFCET.



Σχ. 6.4ε.

Συμβολισμός της αρχικής φάσεως.



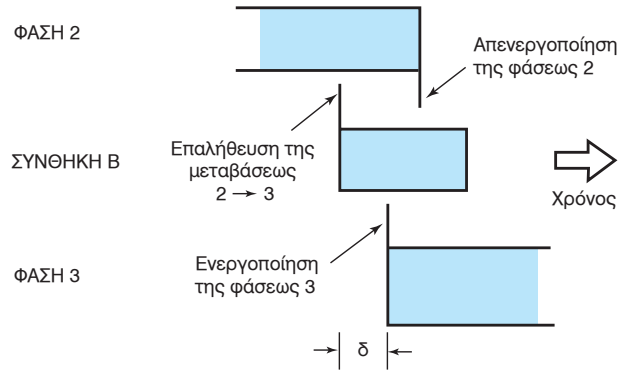
Σχ. 6.4στ.

Περίπτωσης μεταβάσεως.

Το σχήμα 6.4στ παρουσιάζει μια μετάβαση σε διαφορετικές καταστάσεις. Στην περίπτωση (α) η μετάβαση 2/3 δεν εφαρμόζεται (ανεξάρτητα εάν η συνθήκη «β» είναι αληθής ή ψευδής), διότι η φάση 2 είναι αδρανής. Στην περίπτωση (β) η μετάβαση δεν εφαρμόζεται, παρόλο που η προηγούμενη φάση 2 είναι ενεργή, διότι η συνθήκη «β» είναι ψευδής. Στην περίπτωση (γ) η μετάβαση μπορεί να εφαρμοσθεί, διότι συντρέχουν όλες οι προϋποθέσεις του κανόνα: η φάση 2 είναι ενεργή και η συνθήκη της μεταβάσεως «β» είναι αληθής. Η (δ) δείχνει την κατάσταση του διαγράμματος μετά την εφαρμογή της μεταβάσεως: η φάση 2 απενεργοποιήθηκε και η φάση 3 έγινε ενεργή.

3) Διαδικασία ενεργοποίησης των φάσεων.

Όταν μια μετάβαση εφαρμόζεται, όλες οι φάσεις που βρίσκονται στο δεσμό αμέσως πριν τη μετάβαση γίνονται αδρανείς και όλες οι φάσεις που βρίσκονται στο δεσμό μετά τη μετάβαση ενεργοποιούνται.



Σχ. 6.4ζ.

Χρονική ακολουθία για την εφαρμογή της μεταβάσεως 2/3.

Θεωρητικά, αυτές οι αλλαγές συμβαίνουν ταυτόχρονα και στιγμιαία. Το σχήμα 6.4ζ δείχνει την **πρακτική χρονική ακολουθία**, με την οποία εφαρμόζεται η μετάβαση από τη φάση 2 στη φάση 3.

6.5 Ερωτήσεις.

1. Ποιες μορφές μπορεί να λάβει το κύκλωμα αυτοματισμού;
2. Περιγράψτε τα βήματα που ακολουθούμε για τη διατύπωση ενός πίνακα αληθείας (χρησιμοποιείτε παράδειγμα).
3. Τι γνωρίζεται για τις πύλες AND, OR, EXOR;
4. Ποια είναι τα κύρια στοιχεία της μεθόδου απεικόνισης GRAFCET;
5. Σχεδιάστε ένα παράδειγμα χρησιμοποιώντας τους κανόνες της μεθόδου GRAFCET.

Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές



7.1 Εισαγωγή.

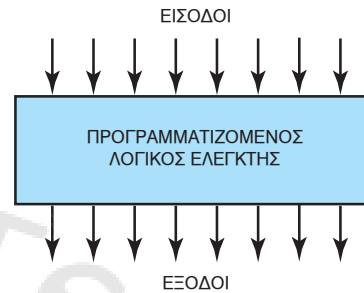
Ο *Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής* (ΠΛΕ) (Programmable Logic Controller-PLC) (σχ. 7.1) είναι μια συσκευή που δέχεται σήματα εισόδου, τα επεξεργάζεται σύμφωνα με ένα πρόγραμμα, το οποίο έχει αποθηκευμένο και δίνει στην έξοδό της το αποτέλεσμα του προγράμματος. Με άλλα λόγια είναι ένας ειδικός υπολογιστής, ο οποίος αλληλεπιδρά με τον «εξωτερικό κόσμο» μέσω εισόδων-εξόδων. Χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο συστημάτων και διεργασιών. Στον ΠΛΕ συνδέονται οι συσκευές εισόδου, που μπορεί να είναι μηχανικοί διακόπτες, επαφές κ.ά.

Ο χρήστης του ΠΛΕ αποθηκεύει ένα πρόγραμμα ελέγχου στη μνήμη. Η λειτουργία του ελεγκτή είναι να παρακολουθεί την κατάσταση των εισόδων και εξόδων σύμφωνα με το πρόγραμμα. Επειδή το πρόγραμμα μπορεί να τροποποιηθεί, ο ΠΛΕ δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αλλάξει τη συγκεκριμένη λειτουργία του αυτοματισμού χωρίς να αλλάξει τις συνδέσεις των συστημάτων εξόδου.

Οι ΠΛΕ είναι μια τεχνολογία χαμηλού κόστους με αρκετά πλεονεκτήματα. Οι εφαρμογές τους έχουν αυξηθεί πολύ τα τελευταία 10 χρόνια, ενώ τελευταία χρησιμοποιούνται και σε νέες τεχνολογίες όπως συστήματα ασαφούς λογικής, τεχνητών νευρωνικών δικτύων και έμπειρων συστημάτων. Μια πολύ διαδεδομένη χρήση τους είναι η αντικατάσταση παλαιότερων αυτοματισμών με ηλεκτρονόμους (ρελέ), οι οποίοι δίνουν νέες δυνατότητες για συνδιασμούς λογικών και αριθμητικών πράξεων, επεξεργασία αναλογικών σημάτων κ.ά.

7.2 Κύρια μέρη του ΠΛΕ.

Οι ΠΛΕ είναι διατάξεις ελέγχου, των οποίων ο τρόπος λειτουργίας δεν είναι προκαθορισμένος από την κατασκευή του ελεγκτή αλλά μπορεί να



Σχ. 7.1.

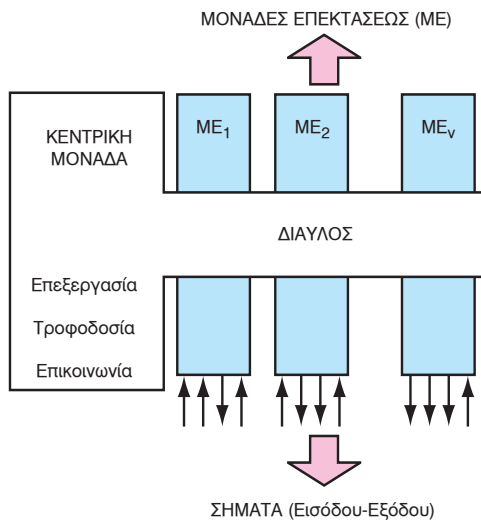
Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής (ΠΛΕ).

αλλάζει με κατάλληλο προγραμματισμό. Έτσι αντίθετα με τους συμβατικούς ελεγκτές και ρυθμιστές ένας ΠΛΕ μπορεί να επιτελεί διαφορετικούς ρόλους ελέγχου, π.χ. να ρυθμίζει τη θερμοκρασία ή να ελέγχει τη στάθμη μιας δεξαμενής. Μάλιστα, οι σύγχρονοι ΠΛΕ μπορούν να εκτελούν αυτούς τους ρόλους ταυτόχρονα. Στις περισσότερες εφαρμογές, ένας ΠΛΕ χειρίζεται ταυτόχρονα πολλές δεκάδες ή και εκατοντάδες διαφορετικά σήματα (εισόδους και εξόδους) και αναλαμβάνει τη λειτουργία δεκάδων βρόχων και διατάξεων ελέγχου. Τα κύρια μέρη ενός ΠΛΕ (σχ. 7.2) είναι τα εξής:

α) **Κεντρική μονάδα.** Αποτελείται από τη μονάδα επεξεργασίας (επεξεργαστή), η οποία υλοποιεί την προγραμματισμένη λογική ελέγχου. Επίσης, περιλαμβάνει και διάφορες διατάξεις για βοηθητικές λειτουργίες, όπως ηλεκτρική τροφοδοσία, επικοινωνία, διαγνωστικό έλεγχο, προστασία κλπ.

β) **Μονάδες επεκτάσεως.** Ο αριθμός τους μπορεί να φθάνει σε αρκετές δεκάδες εισόδους και εξόδους. Οι μονάδες επεκτάσεως παρεμβάλλονται μεταξύ της κεντρικής μονάδας και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Οι μονάδες επεκτάσεως φέρουν ακροδέκτες, στους οποίους συνδέονται τα σήματα από και προς τον ελεγκτή.

γ) **Δίαυλος.** Κάθε μονάδα επεκτάσεως ανταλλάσσει συνεχώς πληροφορίες με την κεντρική μονάδα. Μεταφέρει προς την κεντρική μονάδα τις



Σχ. 7.2.

Κύρια μέρη του Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή.

πληροφορίες που συλλέγει στους ακροδέκτες, στους οποίους δέχεται σήμα εισόδου. Επίσης, παραλαμβάνει από την κεντρική μονάδα οδηγίες, για να σχηματίσει τα κατάλληλα ηλεκτρικά μεγέθη στους ακροδέκτες, από τους οποίους στέλλονται τα σήματα εξόδου του ΠΛΕ. Αυτή η επικοινωνία γίνεται μέσα από το δίαυλο, στον οποίο συνδέονται όλες οι κάρτες επεκτάσεως.

Οι μονάδες επεκτάσεως είναι ηλεκτρονικές διατάξεις και συνήθως έχουν τη μορφή τυπωμένου κυκλώματος ή κάρτας. Οι κάρτες διαθέτουν κατάλληλο σχήμα και διαμορφωμένα άκρα ώστε να προσαρμόζονται σε ειδικές υποδοχές του ελεγκτή. Όλα τα είδη ΠΛΕ διαθέτουν πολύ μεγάλη ποικιλία από μονάδες επεκτάσεως. Οι κυριότερες διαφορές μιας μονάδας επεκτάσεως σε σχέση με μια άλλη αφορούν στον αριθμό των ακροδεκτών που έχει η κάρτα και το είδος των σημάτων που παράγει ή υποδέχεται (αναλογικό, ψηφιακό, σήμα ρεύματος, σήμα τάσεως, λειτουργία ρελέ κλπ.).

7.2.1 Επεξεργαστής.

Ο επεξεργαστής με τον οποίο είναι εφοδιασμένος ένας ΠΛΕ, ανήκει σε μία κατηγορία **ολοκληρωμένου κυκλώματος** (chip) που είναι γνωστό ως **ενσωματωμένος μικροελεγκτής**. Όλες οι λειτουργίες ενός υπολογιστή έχουν συμπεριληφθεί σε αυτό το ολοκληρωμένο κύκλωμα που τυπικά έχει ενεργή επιφάνεια μικρότερη κατά 1cm^2 και περιλαμβάνει εκατοντάδες χιλιάδες **τρανζίστορ** (transistor). Με την υποστήριξη άλλων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μπορεί να εκτελεί πολλά εκατομμύρια οδηγιών ανά δευτερόλεπτο. Επικοινωνεί με τη μνήμη και τα

ενδιάμεσα κυκλώματα εισόδου-εξόδου μέσω ενός συστήματος αγωγών (δίαυλος), με τον οποίο στέλνει ή παίρνει 8, 16 ή 32 σήματα τη φορά. Η τάση λειτουργίας του είναι 5V συνεχούς ρεύματος. Τα μοντέρνα προϊόντα της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων υπόκεινται σε ακριβείς διαδικασίες σχεδιασμού σε τεχνικές παραγωγής, που χαρακτηρίζονται από εξαιρετική καθαρότητα και ακρίβεια, και σε εκτενέστερο έλεγχο. Ως αποτέλεσμα, είναι αξιόπιστα στη λειτουργία τους και έχουν ρυθμό βλαβών μικρότερο από το 10% του αντίστοιχου της επόμενης καλύτερης τεχνολογίας.

7.3 Λειτουργία και χαρακτηριστικά του ΠΛΕ.

Ο ΠΛΕ είναι στην ουσία ένας **βιομηχανικός ηλεκτρονικός υπολογιστής**, που διαθέτει μνήμη, στην οποία αποθηκεύεται το πρόγραμμα, δηλαδή μια σειρά από εντολές ή οδηγίες. Οι εντολές μεταφέρονται διαδοχικά σε ένα ειδικό τμήμα, τον επεξεργαστή, όπου και εκτελούνται. Όταν εκτελέσει μια εντολή, ο επεξεργαστής φέρνει από τη μνήμη την επόμενη εντολή, την εκτελεί κ.ο.κ. Όταν ο επεξεργαστής φτάσει στην τελευταία εντολή, η εκτέλεση του προγράμματος ξεκινά πάλι από την αρχή. Δηλαδή το πρόγραμμα εκτελείται συνεχώς σε κύκλο.

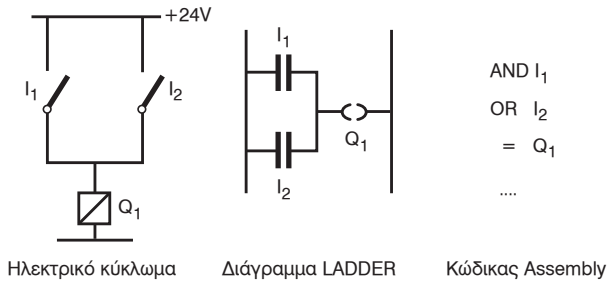
Για τον προγραμματισμό του ΠΛΕ χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες γλώσσες προγραμματισμού:

α) **Ladder diagram (LADDER)**. Είναι μια διαγραμματική απεικόνιση που αναπτύχθηκε ως μετεξέλιξη συνδεσμολογικού ηλεκτρολογικού σχεδίου, που χρησιμοποιείται στους ηλεκτρικούς αυτοματισμούς. Η διάταξη και ο τύπος των στοιχείων που χρησιμοποιεί παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με κυκλώματα, επαφές, πηνία.

β) **Control system flow chart (CSF)**. Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που η λειτουργία του κυκλώματος έχει παρασταθεί με λογικές πύλες, όπως AND, OR, NOT κλπ.

γ) **Statement List (STL)**. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες γλώσσες που είναι γραφικά διαγράμματα, η γλώσσα Statement List έχει γραμμές εντολών που καταχωρούνται σε συντομογραφία. Μοιάζει με προγραμματισμό γλώσσας ηλεκτρονικού υπολογιστή (π.χ. BASIC, PASCAL).

Στο σχήμα 7.3 παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα λογικής πράξεως OR μεταξύ δύο μεταβλητών I_1 και I_2 , με τρεις τρόπους. Στο αριστερό τμήμα του σχήματος, η πράξη OR εκτελείται ηλεκτρικά, δηλαδή εάν κλείσει η επαφή I_1 ή I_2 , τότε το πηνίο Q_1 ενεργοποιείται. Το μεσαίο τμήμα του σχήματος παρουσιάζει την ίδια λειτουργία χρησιμοποιώντας σύμβολα της γλώσσας LADDER. Τα σύμβολα αυτά



Σχ. 7.3.

Παράδειγμα λογικής πράξεως OR.

απεικονίζουν τις θέσεις της μνήμης του ΠΛΕ, που αντιστοιχούν σε επαφές και πηνία. Στο δεξιό τμήμα του σχήματος, η ίδια λειτουργία καταγράφεται με κωδικούς (λέξεις) αντί για γραμμές.

Συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα ελέγχου οι ΠΛΕ έχουν τα εξής κύρια πλεονεκτήματα:

α) Μία και μόνη συσκευή μπορεί να εξυπηρετήσει εντελώς διαφορετικές λειτουργίες ελέγχου και μάλιστα ταυτόχρονα με κατάλληλο προγραμματισμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αντικατασταθούν αρκετά αυτόνομα συστήματα αυτοματισμού.

β) Ο ελεγκτής μπορεί να συνεργάζεται με κάθε είδους αισθητήριο και όργανο δράσεως, με την αλλαγή ή την προσθήκη της κατάλληλης μονάδας επεκτάσεως.

γ) Οι λύσεις αυτοματισμού με ΠΛΕ χρησιμοποιούν ενιαία τεχνολογία. Αυτό διευκολύνει τη γρήγορη εκμάθηση, συντήρηση και ανάπτυξη των συστημάτων.

Η μεγάλη ανάπτυξη της πληροφορικής και των Η/Υ βοηθά σημαντικά τους ΠΛΕ να προσφέρουν ολοένα πιο αξιόπιστες λύσεις σε ένα ευρύ πεδίο προβλημάτων αυτοματισμού (βιομηχανία, μεταφορές, κτήρια κ.ά.). Σήμερα, σε ορισμένους παραγωγικούς κλάδους όπως η ναυτιλία, η χημική βιομηχανία, τα τρόφιμα, οι ΠΛΕ κυριαρχούν σχεδόν ολοκληρωτικά, έχοντας αντικαταστήσει και εκτοπίσει τις άλλες προγενέστερες τεχνολογίες ελέγχου.

7.4 Διαχείριση δεδομένων.

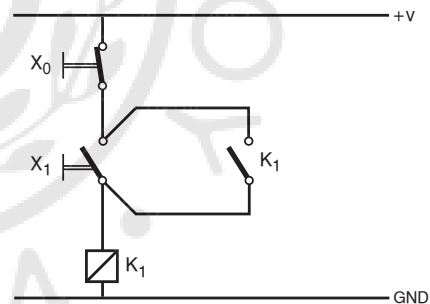
Η έξοδος των ακολουθιακών συστημάτων εξαρτάται όχι μόνον από τις τρέχουσες, αλλά και από τις προηγούμενες τιμές των εισόδων. Άρα, τα ακολουθιακά συστήματα πρέπει να μπορούν να αποθηκεύουν σε μια δεδομένη χρονική στιγμή τις τιμές των λογικών μεταβλητών και να μπορούν να επαναλάβουν αυτές τις τιμές σε μια επόμενη χρονική στιγμή. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται μνήμη.

Οι ΠΛΕ χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη

και εφαρμογή ακολουθιακών συστημάτων αυτοματισμού. Οι ΠΛΕ διαθέτουν ηλεκτρονικές διατάξεις μνήμης, καθώς και ειδικό λογισμικό, που αποτελεί μέρος του λειτουργικού τους συστήματος για τη διαχείριση των δεδομένων που αποθηκεύονται σε αυτές. Από κοινού, αυτές οι διατάξεις και το λογισμικό αποτελούν το *σύστημα μνήμης* ή *σύστημα αποθηκεύσεως δεδομένων* του ΠΛΕ.

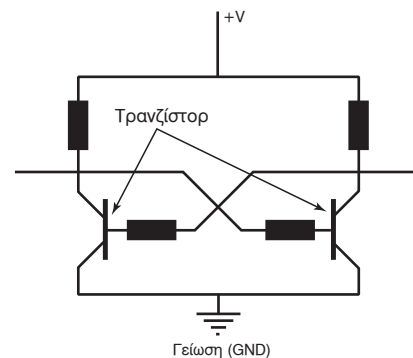
Ο κυριότερος μηχανισμός συγκρατήσεως των δεδομένων στη μνήμη του ΠΛΕ είναι το δυαδικό στοιχείο μνήμης. Το κύκλωμα ενός ηλεκτρονόμου με αυτοσυγκράτηση, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.4α, αποτελεί ένα τέτοιο στοιχείο μνήμης. Η κατάσταση του πηνίου K_1 του ηλεκτρονόμου «απομνημονεύει» την επαφή που ενεργοποιήθηκε πρόσφατα. Εάν το πηνίο K_1 είναι ενεργό, η τελευταία επαφή που ενεργοποιήθηκε είναι η X_1 . Εάν το πηνίο K_1 είναι αδρανές, η τελευταία επαφή που ενεργοποιήθηκε είναι η X_0 .

Το κύκλωμα του ηλεκτρονόμου με αυτοσυγκράτηση προσφέρει ένα απλό παράδειγμα του τρόπου λειτουργίας ενός *ηλεκτρομηχανικού* στοιχείου μνήμης. Όμως οι ΠΛΕ, καθώς και όλες οι ψηφιακές συσκευές, χρησιμοποιούν *ηλεκτρονικά* στοιχεία μνήμης. Το σχήμα 7.4β παρουσιάζει την αρχή της λειτουργίας του αντίστοιχου στοιχείου μνήμης με τρανζίστορ.



Σχ. 7.4α.

Ηλεκτρομηχανικό στοιχείο μνήμης.



Σχ. 7.4β.

Ηλεκτρονικό στοιχείο μνήμης.

Κάθε βασικό στοιχείο μνήμης αποθηκεύει δύο καταστάσεις 0 ή 1. Αυτή είναι η μικρότερη δυνατή χωρητικότητα μνήμης και ονομάζεται **δυναδικό ψηφίο** ή **bit** (binary digit). Η μνήμη του ΠΛΕ αποτελείται από εκατομμύρια Bit που ταξινομούνται διαδοχικά, όπως δείχνει το σχήμα 7.4γ(β).

Οκτώ στοιχεία μνήμης ενός bit αποτελούν μια μνήμη χωρητικότητας ενός byte [σχ. 7.4γ(γ)]. Το Byte έχει επικρατήσει ως η συνηθέστερη μονάδα μετρήσεως της χωρητικότητας της μνήμης ενός ΠΛΕ. Συνήθως η χωρητικότητα της μνήμης εκφράζεται σε χιλιάδες byte που συμβολίζονται ως Kbyte (kilobyte). Μεγαλύτερες χωρητικότητες εκφράζονται σε εκατομμύρια byte, που συμβολίζονται ως M-byte (megabyte). Η χωρητικότητα της μνήμης ενός ΠΛΕ μπορεί να επεκτείνεται με κατάλληλες κάρτες σε χωρητικότητες μεγέθους MByte.

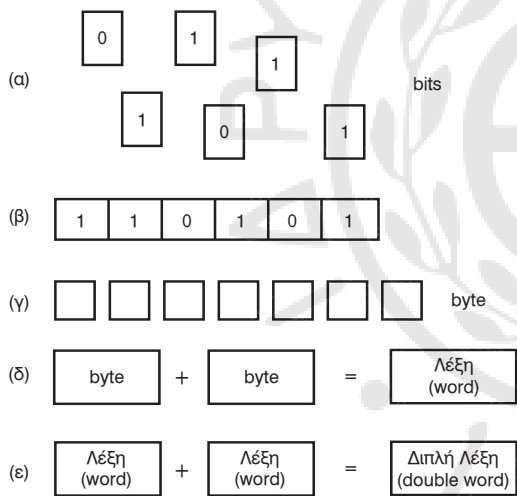
Τα byte της μνήμης του ΠΛΕ ταξινομούνται διαδοχικά. Καθένα χαρακτηρίζεται από τη **διεύθυνσή** του, δηλαδή από έναν αριθμό, που δηλώνει τη θέση του στη διαδοχή των byte. Η **διεύθυνση** (address)

επιτρέπει να εντοπίζουμε μεταξύ όλων των byte της μνήμης εκείνο το συγκεκριμένο byte που μας ενδιαφέρει. Ο πίνακας 7.4.1 δείχνει αυτόν τον τρόπο αριθμοδοτήσεως των bytes της μνήμης ενός ΠΛΕ συνολικής ονομαστικής χωρητικότητας 64 KByte.

Ένα byte αποθηκεύει όλους τους συνδυασμούς των καταστάσεων των διαφορετικών bit που περιέχει. Επειδή κάθε bit αποθηκεύει 2 καταστάσεις και κάθε byte περιέχει 8 bit, ο αριθμός των συνδυασμών είναι 2^8 , δηλαδή 256 διαφορετικές καταστάσεις.

Η χωρητικότητα ενός byte χρησιμοποιείται για να αποθηκεύσει ακέραιους αριθμούς από το 0 έως το 255 εκφρασμένους στο δυαδικό σύστημα αριθμώσεως. Το παράδειγμα του πίνακα 7.4.2 δείχνει την αποθήκευση του δεκαδικού αριθμού 103 (δυναδικός αριθμός 01100111) σε ένα byte.

Επίσης, ένα byte χρησιμοποιείται, για να αποθηκεύσει διψήφιους ακέραιους αριθμούς από το 0 έως το 99 εκφρασμένους σε σύστημα BCD (Binary Coded Decimal). Στο σύστημα BCD κάθε ψηφίο του δε-



Σχ. 7.4γ.

Μονάδες χωρητικότητας μνήμης: bit, byte, word.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.4.1.
Οργάνωση της μνήμης του ΠΛΕ.

Διεύθυνση μνήμης	Περιεχόμενα byte
00000	0010 1010
00001	0001 0010
00002	1110 1001
...	...
...	...
65533	0001 0010
65534	1011 0010
65535	0011 0101

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.4.2.
Αποθήκευση δυαδικού αριθμού σε ένα byte.

0	1	1	0	0	1	1	1	bit του byte
7	6	5	4	3	2	1	0	Εκθέτης του 2
128	64	32	16	8	4	2	1	Πολλαπλασιαστής
0	64	32	0	0	4	2	1	Μέλη του αθροίσματος
103								Άθροισμα

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.4.3.
Αποθήκευση αριθμού BCD σε ένα byte.

0	1	1	0	0	1	1	1	bit του byte
3	2	1	0	3	2	1	0	Εκθέτης του 2 (ανά τετράδα)
8	4	2	1	8	4	2	1	Πολλαπλασιαστής (ανά τετράδα)
0	4	2	0	0	4	2	1	Μέλη του αθροίσματος (ανά τετράδα)
6				7				Δεκαδικό ψηφίο
1				0				Εκθέτης του 10
10				1				Πολλαπλασιαστής
60				7				Μέλη του αθροίσματος
67								Αποτέλεσμα

καδικού αριθμού αποθηκεύεται χωριστά σε ένα δυαδικό αριθμό μήκους 4 bit. Το παράδειγμα του πίνακα 7.4.3 δείχνει την αποθήκευση του δεκαδικού αριθμού 67 (αριθ. BCD 01100111) σε ένα byte.

Επίσης, ένα byte μπορεί να αποθηκεύσει έναν από 256 αλφαριθμητικούς χαρακτήρες (γράμμα, αριθμητικό ψηφίο, σύμβολο), σύμφωνα με κάποιο από τα τυποποιημένα συστήματα αριθμίσσεως συμβόλων. Το συνηθέστερο σύστημα είναι ο *κώδικας ASCII* (American Standard Code for Information Interchange), που ένα απόσπασμα του παρουσιάζεται στο σχήμα 7.4δ.

Αυτή η χωρητικότητα του byte είναι σχετικά περιορισμένη και για αρκετές εφαρμογές δεν επαρκεί. Για τις λειτουργίες του ΠΛΕ, που απαιτούν μεγαλύτερη χωρητικότητα, τα δεδομένα καταχωρούνται σε σχηματισμούς δύο διαδοχικών byte που ονομάζονται *Λέξεις* (word). Κάθε Λέξη περιέχει $2 \times 8 = 16$ διαφορετικά bit και έχει χωρητικότητα 65536 διαφορετικές καταστάσεις, δηλαδή μπορεί να αποθηκεύσει ακέραιους αριθμούς στο διάστημα 0-65535.

Η χωρητικότητα μιας Λέξεως επεκτείνεται συνδυάζοντας δύο λέξεις μαζί σε ένα σχηματισμό μήκους $2 \times 16 = 32$ bit, που ονομάζεται *Διπλή Λέξη* (double word). Κάθε Διπλή Λέξη μπορεί να απεικονίσει οποιοδήποτε ακέραιο αριθμό μεταξύ του μηδέν και του $4.294.967.296 = 2^{32} - 1$, δηλαδή μπορεί να αποθηκεύσει περισσότερα από 4 δισεκατομμύρια διαφορετικές καταστάσεις.

7.4.1 Η μεταφορά των δεδομένων στον ΠΛΕ.

Η μεταφορά δεδομένων μεταξύ των διαφορετι-

Char	Code	Char	Code	Char	Code
<space>	32	@	64	`	96
!	33	Á	65	a	97
"	34	B	66	b	98
#	35	C	67	c	99
\$	36	D	68	d	100
%	37	E	69	e	101
&	38	F	70	f	102
~	39	G	71	g	103
(40	H	72	h	104
)	41	I	73	i	105
*	42	J	74	j	106
+	43	K	75	k	107
~	44	L	76	l	108
-	45	M	77	m	109
.	46	N	78	n	110
/	47	O	79	o	111
0	48	P	80	p	112
1	49	Q	81	q	113
2	50	R	82	r	114
3	51	S	83	s	115
4	52	T	84	t	116
5	53	U	85	u	117
6	54	V	86	v	118
7	55	W	87	w	119
8	56	X	88	x	120
9	57	Y	89	y	121
:	58	Z	90	z	122
;	59	[91	{	124
<	60	\	92		125
=	61]	93	}	126
>	62	^	94	~	127
?	63	-	95	<delete>	128

Σχ. 7.4δ.

Απόσπασμα του πίνακα συμβόλων ASCII.

κών θέσεων μνήμης του ΠΛΕ καταλαμβάνει ένα σημαντικό μέρος κάθε προγράμματος ΠΛΕ. Η μεταφορά δεδομένων περιλαμβάνει δύο επιμέρους λειτουργίες που συνδυάζονται, όπως δείχνει το σχήμα 7.4ε:

1) Ανάκτηση δεδομένων από τη μνήμη.

Η απλούστερη μορφή εντολής ανακτήσεως είναι η γνωστή εντολή L (Load) που διαβάζει το περιεχόμενο μιας εισόδου, μιας εξόδου ή μιας βοηθητικής μνήμης. Η εντολή Load περιορίζεται σε στοιχεία μνήμης χωρητικότητας ενός Bit.

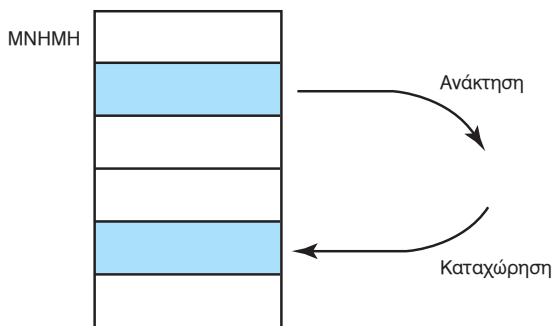
2) Καταχώρηση δεδομένων στη μνήμη.

Η απλούστερη μορφή εντολής καταχωρήσεως είναι η γνωστή εντολή αντικαταστάσεως με το σύμβολο «=», που μεταφέρει τα περιεχόμενα του καταχωρητή λογικού αποτελέσματος σε μια μνήμη εισόδου, εξόδου ή βοηθητική. Η εντολή «=» εφαρμόζεται σε στοιχεία μνήμης χωρητικότητας ενός bit.

Όλοι οι ΠΛΕ διαθέτουν πολλές εντολές για τη μεταφορά δεδομένων. Αυτές οι διαφορετικές εντολές κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο που υλοποιούν τη μεταφορά: **μεταφορά με ένα βήμα** και **μεταφορά μέσω καταχωρητή**.

α) Μεταφορά δεδομένων με ένα βήμα (Move).

Κατά τη μεταφορά με ένα βήμα, τα περιεχόμενα μιας θέσεως μνήμης μεταγράφονται απευθείας από μια θέση μνήμης σε μια άλλη. Η σχετική εντολή ονομάζεται συνήθως *Move* και συμβολίζεται συχνά με το κωδικό όνομα *MOV*. Για να λειτουργήσει η εντολή Move, πρέπει να γνωρίζει από ποια θέση (διεύθυνση) της μνήμης θα αντιγράψει τα δεδομένα και σε ποια θέση θα τα μεταφέρει. Έτσι, η τυπική μορφή της εντολής έχει τέσσερα μέρη: το συμβολικό όνομα *MOV*, τις δύο διευθύνσεις μνήμης και τη συνθήκη εκτελέσεως της εντολής. Το σχήμα 7.4στ



Σχ. 7.4ε.

Διαδικασία μεταφοράς δεδομένων.

παρουσιάζει ένα παράδειγμα προγραμματισμού με την εντολή Move σε γλώσσα Ladder. Το σχήμα αυτό απεικονίζει την ίδια χρήση της εντολής Move με δύο παραπλήσιους συμβολισμούς (α) και (β).

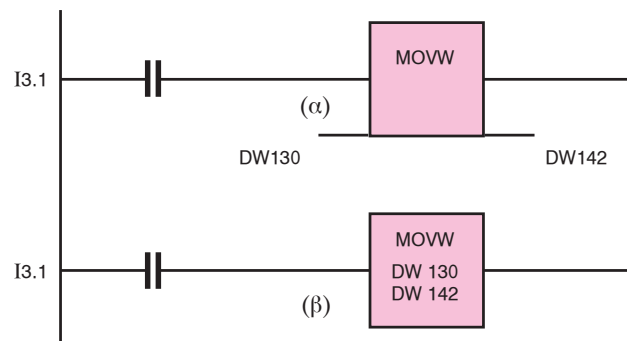
Στο παράδειγμα του σχήματος, όταν η είσοδος I3.1 είναι ενεργή (αληθής) τότε εκτελείται η εντολή MOVW, που σε μια κίνηση αντιγράφει την τιμή της λέξεως (word) που βρίσκεται στη θέση μνήμης (διεύθυνση) με αριθμό 130 και την καταχωρεί στη θέση μνήμης με αριθμό 142. Το γράμμα W στο τέλος του συμβολικού ονόματος της εντολής (MOVW αντί απλά MOV) υποδηλώνει ότι πρόκειται για την ειδικότερη παραλλαγή της εντολής που μεταφέρει τιμές τύπου word. Ομοίως, ο κωδικός DW (Data Word) δηλώνει ότι πρόκειται για θέσεις μνήμης για δεδομένα word.

β) Μεταφορά δεδομένων μέσω καταχωρητή (Load-Store).

Η μεταφορά μέσω καταχωρητή γίνεται σε δύο βήματα. Τα περιεχόμενα μιας θέσεως μνήμης καταρχήν μεταφέρονται σε έναν καταχωρητή (register). Οι καταχωρητές είναι ειδικές θέσεις μνήμης, οι οποίες από την κατασκευή του ΠΛΕ έχουν τη δυνατότητα καλύτερης συνεργασίας με τη μονάδα επεξεργασίας. Η σχετική εντολή ονομάζεται συνήθως *Load* και συμβολίζεται συχνά με το κωδικό όνομα *LD*.

Στο δεύτερο βήμα, τα περιεχόμενα του καταχωρητή αποθηκεύονται σε μια νέα θέση μνήμης. Η σχετική εντολή ονομάζεται συνήθως *Store* και συμβολίζεται συχνά με το κωδικό όνομα *ST*.

Για να λειτουργήσει η συνδυασμένη εντολή Load+Store, πρέπει να γνωρίζει από ποια θέση (διεύθυνση) της μνήμης θα αντιγράψει τα δεδομένα και σε ποια θέση θα τα μεταφέρει. Έτσι, η τυπική μορφή της εντολής έχει πέντε μέρη: τα συμβολικά ονόματα LD και ST, τις δύο διευθύνσεις μνήμης και



Σχ. 7.4στ.

Εντολή Move.

τη συνθήκη εκτελέσεως της εντολής. Το σχήμα 7.4ζ παρουσιάζει ένα παράδειγμα προγραμματισμού της μεταφοράς μέσω καταχωρητή σε γλώσσα ladder. Το σχήμα απεικονίζει την ίδια χρήση των εντολών με δύο παραπλήσιους συμβολισμούς (α) και (β).

Στο παράδειγμα του σχήματος, όταν η είσοδος I3.1 είναι ενεργή (αληθής), τότε εκτελείται η εντολή LDA. Η εντολή αυτή σε μια κίνηση αντιγράφει την τιμή της λέξεως (word) που βρίσκεται στη θέση μνήμης (διεύθυνση) με αριθμό 130 και την αποθηκεύει στον καταχωρητή με συμβολικό όνομα A. Το γράμμα A στο τέλος του συμβολικού ονόματος της εντολής (LDA αντί απλά LD ή L) υποδηλώνει ότι πρόκειται για την ειδικότερη παραλλαγή της εντολής που συνεργάζεται με τον καταχωρητή A του ΠΛΕ.

Στη συνέχεια, εκτελείται η εντολή STA, που αντιγράφει την τιμή του καταχωρητή A και την καταχωρεί στη θέση μνήμης με αριθμό 142. Εδώ επίσης το γράμμα A στο τέλος του συμβολικού ονόματος της εντολής STA αντί απλά ST υποδηλώνει ότι πρόκειται για την ειδικότερη παραλλαγή της εντολής που συνεργάζεται με τον καταχωρητή A του ΠΛΕ.

Το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι απολύτως ισοδύναμο με εκείνο του προηγούμενου παραδείγματος. Οι δύο διαδοχικές εντολές μεταφέρουν το περιεχόμενο της θέσεως μνήμης DW130 στη θέση μνήμης DW142.

Όπως και στην περίπτωση της εντολής Move, το είδος των δεδομένων που χρησιμοποιείται κάθε φορά πρέπει να ταιριάζει με τη χωρητικότητα του καταχωρητή που μεσολαβεί στη μεταφορά. Οι περισσότεροι ΠΛΕ διαθέτουν αρκετούς καταχωρητές με μήκος byte, word ή και double word και αντίστοιχες εντολές για τη διακίνηση δεδομένων από και προς αυτούς.

Στο σχήμα 7.4ζ η εντολή LDA φορτώνει τον καταχωρητή με το δεκαδικό αριθμό 325 αντί για το περιεχόμενο της διεύθυνσης μνήμης DW130 προηγουμένως. Στη συνέχεια, αυτή η τιμή μεταφέρεται από τον καταχωρητή στη διεύθυνση DW142. Αυτός ο τρόπος μεταφοράς δεδομένων είναι κατάλληλος για την καταχώρηση, σε συγκεκριμένες θέσεις μνήμης, δεδομένων των οποίων η τιμή είναι εκ των προτέρων γνωστή και μπορεί να ενσωματωθεί στο ίδιο το πρόγραμμα του ΠΛΕ.

7.4.2 Η χρήση της μεταφοράς δεδομένων στον προγραμματισμό.

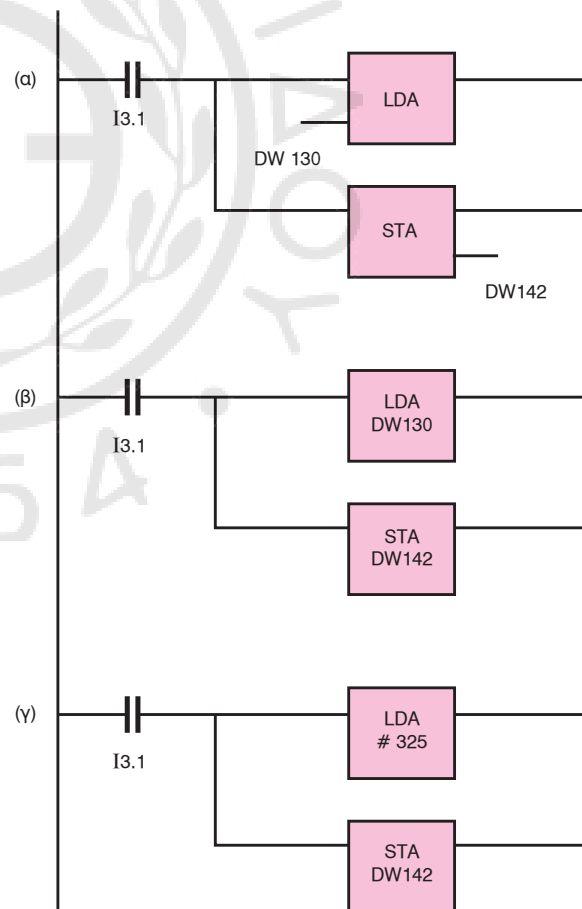
Οι περισσότερες εντολές των ΠΛΕ στηρίζονται στην ανταλλαγή δεδομένων με τη μνήμη. Συγκεκριμένα, η μνήμη του ΠΛΕ προσφέρει στις εντολές του προγράμματος δύο εξυπηρετήσεις:

– Διαθέτει τις τιμές των δεδομένων και των παραμέτρων που απαιτούνται, για να εκτελεσθεί η επεξεργασία που αντιστοιχεί στην εντολή.

– Διαθέτει θέσεις, στις οποίες θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας, ώστε να είναι διαθέσιμα σε επόμενη χρήση.

Μια από τις συνηθισμένες χρήσεις της πρώτης κατηγορίας είναι η καταχώρηση των απαραίτητων παραμέτρων για τη σωστή λειτουργία των χρονικών, καταμετρητών, συγκριτών κλπ. εντολών.

Το σχήμα 7.4η παρουσιάζει ένα παράδειγμα καταχωρήσεως παραμέτρων για μια χρονική λειτουργία. Η καταχώρηση των παραμέτρων επιτυγχάνεται μεταφέροντας δεδομένα σε έναν καταχωρητή χωρητικότητας Λέξη (αποτελούμενη από δύο byte). Οι παράμετροι καταχωρούνται με ειδική κωδικοποίηση, που εξαρτάται από το συγκεκριμένο κατασκευαστή και τύπο ΠΛΕ. Η κωδικοποίηση αξιοποιεί τα 14 από τα 16 διαθέσιμα bit.



Σχ. 7.4ζ.

Μεταφορά μέσω καταχωρητή, εντολές Load-Store.

Λέξη (word)															
byte 2								byte 1							
Χωρίς σημασία		Μονάδα χρόνου		Τιμή του χρόνου κωδικοποιημένη σε μορφή BCD											
B15	B14	B13	B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
3				0				2				5			
s/10				25											

Σχ. 7.4η.

Καταχώρηση των παραμέτρων μιας χρονικής λειτουργίας.

Χρονική λειτουργία T5															
Λέξη (word)															
byte 2								byte 1							
Χρήση για τη διαχείριση της χρονικής λειτουργίας						Τρέχουσα τιμή μετρήσεως του χρόνου κωδικοποιημένη ως δυαδικός αριθμός									
B15	B14	B13	B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
39															

Σχ. 7.4θ.

Ανάκτηση της τρέχουσας μετρήσεως του χρόνου μιας χρονικής λειτουργίας.

Το σχήμα 7.4θ παρουσιάζει ένα παράδειγμα ανακτήσεως της τρέχουσας τιμής μετρήσεως του χρόνου στο εσωτερικό μιας χρονικής λειτουργίας. Η τιμή του χρόνου βρίσκεται σε μια θέση μνήμης που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη χρονική λειτουργία (την T5 στο παράδειγμα) και έχει επίσης χωρητικότητα word. Η ερμηνεία της τιμής που βρίσκεται στη μνήμη εξαρτάται από το συγκεκριμένο κατασκευαστή και τύπο ΠΛΕ. Η κωδικοποίηση της τιμής του χρόνου αξιοποιεί τα 10 από τα 16 διαθέσιμα bit.

7.5 Οργάνωση προγράμματος.

Η απλούστερη μορφή προγράμματος του ΠΛΕ είναι η διαδοχική τοποθέτηση των εντολών με τη σειρά με την οποία εκτελούνται. Η μορφή αυτή παρουσιάζεται στη γλώσσα λίστας εντολών ως αριθμημένος κατάλογος εντολών, που τελειώνει με κάποιο ειδικό συμβολισμό για το τέλος του προγράμματος. Στη μορφή αυτή οι εντολές κατανέμονται απλά σε ομάδες, αποτελούμενες από ένα μικρό

αριθμό εντολών. Οι εντολές μιας ομάδας αντιστοιχούν σε μια κοινή λειτουργία ή ενότητα του συστήματος αυτοματισμού. Η ομαδοποίηση των εντολών διευκολύνει απλά την κατανόηση του προγράμματος, χωρίς όμως επίπτωση στον τρόπο εκτέλεσής των εντολών.

Όλοι οι σύγχρονοι τύποι ΠΛΕ υποστηρίζουν μια πιο αποτελεσματική οργάνωση των εντολών ενός προγράμματος από αυτήν την απλή διαδοχή των εντολών. Το πρόγραμμα του ΠΛΕ κατανέμεται σε τμήματα, που για λόγους εποπτικών δεν ξεπερνούν τις 200-250 εντολές. Κάθε τμήμα ονομάζεται *υποπρόγραμμα* (sub-programme) ή *υπορουτίνα* (sub-routine) ή επίσης και *μπλοκ προγράμματος* (programme block).

Τα υποπρογράμματα επιτρέπουν με απλές εντολές να διαχειριστούμε τη σειρά εκτέλεσής του προγράμματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις η χρήση των υποπρογραμμάτων μπορεί να μειώσει κατά πολύ τον αριθμό των εντολών που απαιτούνται για την επίτευξη της λειτουργίας του αυτοματισμού.

Οι συνηθέστεροι τύποι υποπρογραμμάτων είναι:

α) Το **υποπρόγραμμα οργανώσεως** (Organization Block) που συμβολίζεται συνήθως ως OB.

β) Το **υποπρόγραμμα εκτελέσεως** προγράμματος (Programme Block), που συμβολίζεται συχνά με PB.

γ) Το **υποπρόγραμμα λειτουργιών** (Function Block) που συμβολίζεται συνήθως με τα αρχικά FB.

Κάθε ΠΛΕ έχει, ανάλογα με την κατασκευή και τον τύπο του, το δικό του συγκεκριμένο τρόπο ορισμού των υποπρογραμμάτων με κατάλληλες εντολές. Επίσης, κάθε ΠΛΕ έχει περιορισμούς που αφορούν το μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό υποπρογραμμάτων κάθε διαφορετικού είδους, το μέγιστο αριθμό εντολών που μπορούν να περιέχονται σε ένα υποπρόγραμμα κλπ. Φυσικά, το σύνολο της μνήμης που απαιτείται για την αποθήκευση όλων των υποπρογραμμάτων δεν μπορεί να ξεπερνά τη μέγιστη διαθέσιμη μνήμη του ελεγκτή.

Το σχήμα 7.5α παρουσιάζει τον τρόπο διαγραμματικής απεικόνισης ενός υποπρογράμματος.

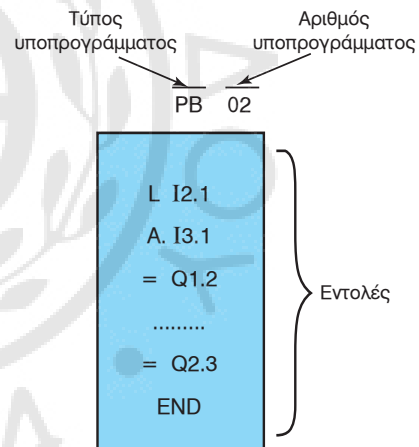
Το υποπρόγραμμα απεικονίζεται ως ένα ορθογώνιο πλαίσιο, που περιέχει όλες τις εντολές που ανήκουν σε αυτό. Η τελευταία εντολή είναι κοινή για όλα τα είδη υποπρογραμμάτων και είναι απαραίτητη, για να δηλώνει στον επεξεργαστή ότι η εκτέλεση έφθασε στο τέλος του υποπρογράμματος. Σε αρκετούς τύπους ΠΛΕ, η εντολή END συμβολίζεται επίσης με BE από τα αρχικά των λέξεων Block End (τέλος μπλοκ). Η ταυτότητα του υποπρογράμματος καθορίζεται από το συνδυασμό του τύπου του και του αριθμού του (02 στο παράδειγμα). Αυτή η απεικόνιση εξυπηρετεί, για να παρασταθεί διαγραμματικά η σειρά με την οποία εκτελούνται οι εντολές κατά την κανονική λειτουργία του συστήματος αυτοματισμού. Το σχήμα 7.5β δείχνει ένα παράδειγμα ροής της εκτελέσεως μεταξύ δύο υποπρογραμμάτων. Η εκτέλεση αρχίζει στο επάνω τμήμα του υποπρογράμματος 1 και συνεχίζει έως το σημείο «Α». Εκεί η εκτέλεση μεταφέρεται στο υποπρόγραμμα 2, και συγκεκριμένα στην αρχή του (πρώτη εντολή στο επάνω τμήμα του). Όταν φθάσει στην εντολή END του υποπρογράμματος 2, η εκτέλεση επιστρέφει στο σημείο «Α» και συνεχίζει έως το κατώτερο τμήμα του. Όταν φθάσει στην εντολή END του υποπρογράμματος 1, η εκτέλεση μεταφέρεται σε ένα άλλο υποπρόγραμμα (δε φαίνεται στο σχήμα).

Στο σημείο «Α» του υποπρογράμματος 1 βρίσκεται μια ειδική εντολή προγραμματισμού, η οποία προκαλεί διακοπή της εκτελέσεως των εντολών του υποπρογράμματος 1 και μεταφορά της εκτελέσεως στις εντολές του υποπρογράμματος 2. Δηλαδή, η εντολή αυτή «καλεί» το υποπρόγραμμα

2 να παρεμβληθεί μεταξύ των εντολών του υποπρογράμματος 1. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **κλήση** του υποπρογράμματος και οι σχετικές εντολές ονομάζονται **εντολές κλήσεως**.

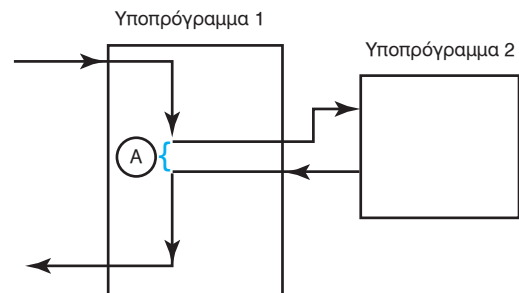
Άρα κάθε υποπρόγραμμα εκτελείται, **όταν και εφόσον κληθεί** (όταν υπάρχει το εισερχόμενο βέλος όπως στο σχήμα 7.5β). Αυτό ισχύει πράγματι για όλα τα υποπρογράμματα με μια μοναδική εξαίρεση: το **κύριο υποπρόγραμμα**. Η αρχή του κύριου υποπρογράμματος είναι το σημείο στο οποίο ξεκινάει η εκτέλεση **αυτόματα** και ανεξάρτητα από το περιεχόμενο του προγράμματος. Έτσι, το κύριο υποπρόγραμμα είναι το μόνο υποπρόγραμμα που είναι απαραίτητο, για να λειτουργήσει κανονικά ο ΠΛΕ. Στους περισσότερους τύπους ΠΛΕ το κύριο υποπρόγραμμα ανήκει στην κατηγορία των υποπρογραμμάτων οργανώσεως (OB) και συνήθως είναι το OB01 ή το OB00.

Λόγω αυτής της ιδιαιτερότητάς του, το κύριο υποπρόγραμμα καταλαμβάνει τον κεντρικό ρόλο στη συνολική δομή ενός προγράμματος ΠΛΕ. Η δομή αυτή παίρνει τη μορφή ενός δέντρου με δια-



Σχ. 7.5α.

Διαγραμματική απεικόνιση υποπρογράμματος.



Σχ. 7.5β.

Απεικόνιση της ροής εκτελέσεως τμήματος ενός προγράμματος.

δοχικά επίπεδα, όπως στο σχήμα 7.5γ (προς τα δεξιά). Το κύριο πρόγραμμα καλεί άλλα υποπρογράμματα, τα οποία με τη σειρά τους καλούν άλλα υποπρογράμματα κ.ο.κ. Το βέλος με τη διακεκομμένη στο αριστερό μέρος του σχήματος δείχνει τη συνεχή **κυκλική** εκτέλεση του κύριου υποπρογράμματος.

7.5.1 Εντολές κλήσεως υποπρογράμματος.

Η πιο απλή διαδικασία κλήσεως ενός υποπρογράμματος είναι η **κλήση χωρίς προϋπόθεση**. Η εντολή αυτή ονομάζεται **unconditional jump** ή **unconditional call** και συμβολίζεται σε αρκετές γλώσσες λίστας εντολών, με τον κωδικό JU, ακολουθούμενο από τον αριθμό του καλούμενου υποπρογράμματος.

Το σχήμα 7.5δ παρουσιάζει ένα παράδειγμα χρήσεως της εντολής στο εσωτερικό του κύριου υποπρογράμματος (OB01), για να καλέσει το υποπρόγραμμα PB08.

Ο κύκλος εκτελέσεως αρχίζει με την πρώτη εντολή του κύριου υποπρογράμματος (Load I3.2 στο παράδειγμα του σχήματος) και συνεχίζει έως την εντολή κλήσεως JU PB08. Στο σημείο αυτό η εκτέλεση μεταφέρεται στην αρχή του υποπρογράμματος PB08 (εντολή Set M1.0 στο σχήμα 7.5δ). Όταν οι εντολές του υποπρογράμματος ολοκληρωθούν (εντολή END του υποπρογράμματος PB08), η εκτέλεση επιστρέφει στην αμέσως επόμενη από την κλήση εντολή (εντολή Load I2.6 στο παράδειγμα του σχήματος 7.5δ) και συνεχίζει κανονικά έως την εντολή END του κύριου υποπρογράμματος. Στη συνέχεια ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Η άλλη κατηγορία κλήσεως εντολών είναι η **κλήση με προϋπόθεση**. Όλοι οι τύποι ΠΛΕ διαθέτουν τέτοιου τύπου εντολή, ώστε να προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στον προγραμματισμό. Η εντολή αυτή ονομάζεται **conditional jump** ή **conditional call** και συμβολίζεται σε αρκετές γλώσσες λίστας εντολών με τον κωδικό JC ακολουθούμενο από τον αριθμό του καλούμενου υποπρογράμματος. Η εντολή εκτρέπει τη ροή εκτελέσεως του προγράμματος μόνο εάν το τρέχον λογικό αποτέλεσμα (που βρίσκεται στον καταχωρητή λογικού αποτελέσματος) είναι αληθές, αλλιώς η ροή της εκτελέσεως συνεχίζεται κανονικά και δεν έχει επίπτωση στην επεξεργασία του προγράμματος.

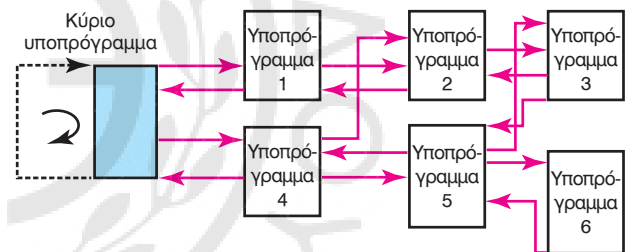
7.5.2 Το υποπρόγραμμα λειτουργιών (function).

Σε αρκετές εφαρμογές αυτοματισμού το πρό-

γραμμα ΠΛΕ περιέχει ομάδες εντολών που επαναλαμβάνονται με την ίδια ακριβώς σειρά, αλλά διαφέρουν ως προς τις παραμέτρους εισόδου, εξόδου ή μνήμης που χρησιμοποιούν. Για παράδειγμα, ένα πρόγραμμα μπορεί να ελέγχει τη διαδικασία εκκινήσεως και στάσεως πολλών διαφορετικών ηλεκτροκινητήρων. Όπως δείχνει και το σχήμα 7.5ε, οι σχετικές εντολές είναι για κάθε κινητήρα πανομοιότυπες αλλά χρησιμοποιούν τις διαφορετικές εισόδους και εξόδους που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο κινητήρα.

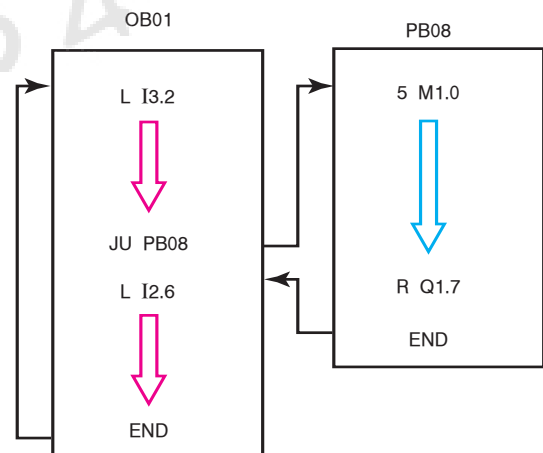
Το σχήμα 7.5στ παρουσιάζει μια άλλη προσέγγιση, που έχει το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα. Οι εντολές γράφονται μια μόνο φορά χρησιμοποιώντας τις υποθετικές παραμέτρους Start, Stop, Relay, αντί για συγκεκριμένες εξόδους. Κάθε φορά που οι εντολές πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, πρέπει να αντικαθιστούμε αυτές τις υποθετικές παραμέτρους και να τοποθετούμε τις συγκεκριμένες εισόδους και εξόδους που δείχνει ο πίνακας (ανάλογα με τον αριθμό του κινητήρα).

Όλοι οι τύποι ΠΛΕ δίνουν τη δυνατότητα κατα-



Σχ. 7.5γ.

Συνολική δομή του προγράμματος (μορφή δέντρων).



Σχ. 7.5δ.

Κλήση υποπρογράμματος χωρίς προϋπόθεση.

Κινητήρας με αριθμό ...				
#1	#2	#3	#4	#5
L I 1.1	L I 1.7	L I 1.5	L I 2.1	L I 2.3
S Q 2.1	S Q 2.7	S Q 2.6	S Q 2.2	S Q 2.5
LN I 1.2	LN I 1.4	LN I 2.2	LN I 2.4	LN I 1.3
R Q 2.1	R Q 2.7	R Q 2.6	R Q 2.2	R Q 2.5

Σχ. 7.5ε.

Πρόγραμμα για τον έλεγχο πέντε κινητήρων (αποσπάσματα).

	Κινητήρας με αριθμό ...				
	#1	#2	#3	#4	#5
Start	I 1.1	I 1.7	I 1.5	I 2.1	I 2.3
Stop	I 1.2	I 1.4	I 2.2	I 2.4	I 1.3
Relay	Q 2.1	Q 2.7	Q 2.6	Q 2.2	Q 2.5
L Start S Relay LN Stop R Relay					

Σχ. 7.5στ.

Πρόγραμμα για τον έλεγχο πέντε κινητήρων (αποσπάσματα).

σκευής υποπρογραμμάτων ειδικού τύπου, που ακολουθούν αυτή τη δεύτερη μέθοδο και ονομάζονται **υποπρογράμματα λειτουργιών** (function blocks).

Οι εντολές που περιέχονται σε ένα υποπρόγραμμα λειτουργιών μπορούν να χρησιμοποιούν υποθετικές μεταβλητές, οι οποίες ονομάζονται **τυπικές παράμετροι** (formal parameters). Αυτές, αντίθετα με τις πραγματικές παραμέτρους, δεν αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες θέσεις μνήμης του ΠΛΕ. Οι τυπικές παράμετροι δηλώνονται με ειδικές εντολές ορισμού, που τοποθετούνται σε ένα ξεχωριστό τμήμα του κώδικα του προγράμματος. Το σχήμα 7.5ζ παρουσιάζει τη δήλωση των τυπικών παραμέτρων του προηγούμενου παραδείγματος στη γλώσσα λίστας εντολών που χρησιμοποιούν αρκετοί ευρωπαϊκοί τύποι ΠΛΕ.

Οι τυπικές παράμετροι αντικαθίστανται με πραγματικές τη στιγμή της κλήσεως του υποπρογράμματος από ένα άλλο υποπρόγραμμα. Αυτό γί-

νεται συνήθως με μια σειρά από εντολές δηλώσεων, που τοποθετούνται αμέσως μετά την εντολή κλήσεως του υποπρογράμματος λειτουργιών.

FB 24	
Ορισμοί	NAME: ONOFF PARAM01: START PARAM02: STOP PARAM03: RELAY
Εντολές	L START S RELAY LN STOP R RELAY END

Σχ. 7.5ζ.

Υποπρόγραμμα λειτουργιών για έλεγχο κινητήρα.

7.6 Απαριθμητές – Συγκριτές.

Πολλές εφαρμογές αυτοματισμού περιλαμβάνουν μια ή περισσότερες διαδικασίες καταμετρήσεως, δηλαδή την καταγραφή του αριθμού των εμφανίσεων ενός γεγονότος, π.χ. των αυτοκινήτων που περνούν από μια πύλη, των κινήσεων που εκτέλεσε μια μηχανή, των περιστροφών ενός τυμπάνου κλπ. Για αυτό το λόγο, όλοι οι ΠΛΕ διαθέτουν έτοιμες εντολές για την καταμέτρηση παλμών. Οι λειτουργίες αυτές ονομάζονται **απαριθμητές** ή **μετρητές** (counters). Ανάλογα με τον τρόπο καταμετρήσεως, οι απαριθμητές κατατάσσονται σε:

- **Απαριθμητές αυξήσεως** (up counters). Ξεκινούν από μια αρχική τιμή και σε κάθε παλμό που λαμβάνουν αυξάνουν την τρέχουσα μέτρηση κατά μια μονάδα.
- **Απαριθμητές μειώσεως** (down counters). Ξεκινούν από μια αρχική τιμή και σε κάθε παλμό που λαμβάνουν μειώνουν την τρέχουσα μέτρηση κατά μια μονάδα.
- **Απαριθμητές αυξομειώσεως** (up-down counters) ή απλά απαριθμητές. Συνδυάζουν τις λειτουργίες των παραπάνω, δηλαδή μειώνουν ή αυξάνουν την τρέχουσα τιμή μετρήσεως, ανάλογα με την άφιξη παλμών σε δύο χωριστές «απολήξεις».

Ένας απαριθμητής είναι στην πραγματικότητα μια θέση μνήμης (συνήθως μια λέξη των δύο byte) σε μια ειδική περιοχή της μνήμης του ΠΛΕ, η οποία συνεργάζεται με τις αντίστοιχες εργασίες χειρισμού των απαριθμητών. Οι σχετικές εργασίες ή εντολές είναι οι εξής:

- α) Ο μηδενισμός του απαριθμητή ώστε να αρχίσει μια νέα καταμέτρηση.
- β) Η πρώτη τοποθέτηση αρχικής τιμής στον απαριθμητή, ώστε να μην αρχίζει τη μέτρηση αναγκαστικά από το μηδέν.
- γ) Η αύξηση ή η μείωση της τρέχουσας τιμής, ανάλογα και με το είδος του απαριθμητή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.
- δ) Η ανάκτηση (ανάγνωση ή ερώτηση) της τρέχουσας τιμής του απαριθμητή ώστε το πρόγραμμα του ΠΛΕ να λάβει κάποια απόφαση ή να υπολογίσει κάποιο άλλο δεδομένο.

7.6.1 Δομή της λέξεως του απαριθμητή.

Ο τρόπος λειτουργίας των εντολών του απαριθμητή σχετίζεται με την οργάνωση των bit στο εσωτερικό της λέξεως στη μνήμη του ΠΛΕ που αντι-

στοιχεί στον καταχωρητή. Σχεδόν όλοι οι κατασκευαστές ΠΛΕ συμβολίζουν τους απαριθμητές με το γράμμα C (από το αρχικό του αγγλικού όρου counter – μετρητής ή απαριθμητής), ακολουθούμενο από έναν αριθμό που υποδηλώνει τον ένα συγκεκριμένο από τους διαθέσιμους απαριθμητές. Ένα όνομα απαριθμητή, π.χ. C56, δηλώνει ταυτόχρονα και τη θέση μνήμης που αντιστοιχεί σε αυτόν τον απαριθμητή.

Το σχήμα 7.6α παρουσιάζει ένα παράδειγμα λέξεως απαριθμητή. Οι παράμετροι καταχωρούνται με ειδική κωδικοποίηση, που εξαρτάται από το συγκεκριμένο κατασκευαστή και τύπο ΠΛΕ. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η κωδικοποίηση αξιοποιεί τα 12 από τα 16 διαθέσιμα bit.

Τα πρώτα τέσσερα bit της λέξεως δεν χρησιμοποιούνται. Τα υπόλοιπα 12 bit εκφράζουν τρία δεκαδικά ψηφία σύμφωνα με την κωδικοποίηση BCD. Στο παράδειγμα του σχήματος, τα ψηφία αυτά είναι τα 2, 1 και 5. Επομένως, ο απαριθμητής έχει δεκαδική τιμή 215.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η χωρητικότητα της λέξεως του απαριθμητή είναι τρία δεκαδικά ψηφία, δηλαδή ο απαριθμητής μπορεί να καταγράψει τιμές στο διάστημα 0-999. Γενικότερα, τα αριθμητικά όρια του απαριθμητή εξαρτώνται από τον αριθμό των bit που διατίθενται για την καταχώρηση της τρέχουσας τιμής μετρήσεως. Ο πίνακας του σχήματος 7.6β παρουσιάζει μερικές από τις συνηθισμένες περιπτώσεις ορίων καταμετρήσεως.

7.6.2 Λειτουργίες των απαριθμητών.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι κύριες λειτουργίες των απαριθμητών.

1) Μηδενισμός του απαριθμητή.

Η εντολή μηδενισμού καταχωρεί την τιμή μηδέν (δηλαδή «διαγράφει») στη λέξη του απαριθμητή. Η εντολή αυτή συχνά συμβολίζεται με το γράμμα R (από τον αγγλικό όρο reset) και είναι ακριβώς ίδια με την εντολή RESET που χρησιμοποιείται για το μηδενισμό των flip-flop ή των χρονικών λειτουργιών. Για παράδειγμα, η παρακάτω εντολή μηδενίζει τον απαριθμητή με αυξόντα αριθμό 46 (υποθέτοντας ότι ο συγκεκριμένος ΠΛΕ διαθέτει τουλάχιστον σαράντα έξι απαριθμητές!)

R C46

Το σχήμα 7.6γ παρουσιάζει την επίδραση της παραπάνω εντολής στη λέξη (θέση μνήμης), που αντιστοιχεί στον απαριθμητή C46. Το σχήμα απει-

C34															
byte 2								byte 1							
Χωρίς σημασία				Τιμή μετρήσεως κωδικοποιημένη σε μορφή BCD											
B15	B14	B13	B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
X	X	X	X	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
				2				1				5			
215															

Σχ. 7.6α.

Καταχώρηση δεδομένων σε λέξη απαριθμητή.

Τρόπος καταχώρισης στη λέξη του απαριθμητή (χωρίς πρόσημο).	Όρια τιμών μετρήσεως	Παράδειγμα τιμής
Τρία δεκαδικά ψηφία σε κωδικοποίηση BCD, αποτελούμενα από τέσσερα bit το καθένα (συνολικά 12 bit)	0 έως 999 – 500 έως 499	854 –40
Τέσσερα δεκαδικά ψηφία σε κωδικοποίηση BCD, αποτελούμενα από τέσσερα bit το καθένα (συνολικά 16 bit)	0 έως 9999 – 5000 έως 4999	1234 –2567
Δέκα δυαδικά ψηφία (10 bit)	0 έως 1023 – 512 έως 511	678 –456
Δώδεκα δυαδικά ψηφία (12 bit)	0 – 4095 – 2048 έως 2047	38567 –1753
Δεκαέξι δυαδικά ψηφία (16 bit)	0 – 65535 – 32768 έως 32767	38567 –1753

Σχ. 7.6β.

Όρια καταμετρήσεως, ανάλογα με τον τρόπο καταχώρισης της τιμής του απαριθμητή.

Λέξη απαριθμητή C46															
Χωρίς σημασία				Τιμή μετρήσεως κωδικοποιημένη σε μορφή BCD											
B15	B14	B13	B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
Πριν την εκτέλεση της εντολής															
X	X	X	X	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
				215 (μορφή BCD)											
Μετά την εκτέλεση της εντολής															
X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				0 (μηδέν)											

Σχ. 7.6γ.

Μηδενισμός απαριθμητή.

B15	B14	B13	B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
Καταχωρητής A πριν την εκτέλεση της εντολής LDA															
1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
Τυχαία αριθμητική τιμή 16 bit															
Καταχωρητής A μετά την εκτέλεση της εντολής LDA															
1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
όπως πριν				215 (μορφή BCD)											
Λέξη απαριθμητή C46 πριν την εκτέλεση της εντολής STA															
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
0 (π.χ. μετά από μηδενισμό)															
Λέξη απαριθμητή C46 μετά την εκτέλεση της εντολής STA															
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
αδιάφορα				215 (μορφή BCD)											

Σχ. 7.6δ.

Τοποθέτηση αρχικής τιμής σε απαριθμητή.

κονίζει το περιεχόμενο της μνήμης πριν και μετά την εκτέλεση της εντολής.

2) Τοποθέτηση αρχικής τιμής.

Η εντολή τοποθέτησεως αρχικής τιμής καταχωρεί μια επιθυμητή τιμή στη λέξη του απαριθμητή. Η εντολή αυτή υλοποιείται συνήθως με δύο βήματα, σε αναλογία με τον τρόπο τοποθέτησεως της τιμής του χρόνου στις χρονικές λειτουργίες.

Κατά το πρώτο βήμα, ο καταχωρητής φορτώνεται με την τιμή του χρόνου. Η πρώτη αυτή εντολή είναι όμοια με την εντολή LOAD, που χρησιμοποιείται στη μεταφορά δεδομένων μέσω καταχωρητή. Εφόσον χρειάζεται, πριν από την αριθμητική τιμή τοποθετείται ένα συμβολικό όνομα (πρόθεμα), που δηλώνει ότι πρόκειται για τιμή που θα χρησιμοποιηθεί σε καταμέτρηση, επομένως να μετατραπεί σε κατάλληλη ειδική μορφή απεικονίσεως. Για παράδειγμα, η εντολή (LDA) φορτώνει στον καταχωρητή A την τιμή 215. Το πρόθεμα KC σημαίνει ότι η τιμή θα καταχωρηθεί στη συγκεκριμένη μορφή που απαιτείται για τον απαριθμητή του παραδείγματος. Κατά τη μετατροπή ο επεξεργαστής του ΠΛΕ ελέγχει ότι η τιμή είναι επιτρεπτή, δηλαδή ότι βρίσκεται εντός των ορίων τιμών για το συγκεκριμένο είδος απαριθμητή, και, σε αντίθετη περίπτωση, την προσαρμόζει ή προκαλεί μήνυμα σφάλματος εκτελέσεως.

LDA KC215

Στο δεύτερο βήμα η τιμή μεταφέρεται από τον καταχωρητή στη λέξη του απαριθμητή. Αυτή η εντολή είναι όμοια με την εντολή STORE που χρησιμοποιείται στη μεταφορά δεδομένων μέσω καταχωρητή. Η επόμενη εντολή τοποθετεί στον απαριθμητή C46 την αρχική τιμή που βρίσκεται στον καταχωρητή A.

STA C46

Το σχήμα 7.6δ παρουσιάζει την επίδραση της παραπάνω διαδικασίας στον καταχωρητή A και στη λέξη (θέση μνήμης) που αντιστοιχεί στον απαριθμητή C46. Απεικονίζει επίσης το περιεχόμενο της μνήμης πριν και μετά την εκτέλεση των σχετικών εντολών.

3) Αύξηση της τρέχουσας τιμής.

Η εντολή αύξησεως προσθέτει στην τρέχουσα τιμή του απαριθμητή μια μονάδα. Η εντολή αυτή συχνά έχει το συμβολικό όνομα γράμμα CU (από τον αγγλικό όρο Counter Up). Για παράδειγμα, η παρακάτω εντολή αυξάνει την τιμή του απαριθμητή με αριθμό 46.

CU C46

Το σχήμα 7.6ε παρουσιάζει την επίδραση της παραπάνω εντολής στη λέξη (θέση μνήμης) που αντιστοιχεί στον απαριθμητή C46. Το σχήμα απεικονίζει το περιεχόμενο της μνήμης πριν και μετά την εκτέλεση της εντολής.

Λέξη απαριθμητή C46															
Χωρίς σημασία				Τιμή μετρήσεως κωδικοποιημένη σε μορφή BCD											
B15	B14	B13	B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
Πριν την εκτέλεση της εντολής															
X	X	X	X	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
215 (μορφή BCD)															
Μετά την εκτέλεση της εντολής															
X	X	X	X	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0
216 (μορφή BCD)															

Σχ. 7.6ε.

Αύξηση της τρέχουσας τιμής.

Λέξη απαριθμητή C46															
Χωρίς σημασία				Τιμή μετρήσεως κωδικοποιημένη σε μορφή BCD											
B15	B14	B13	B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
Πριν την εκτέλεση της εντολής															
X	X	X	X	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
215 (μορφή BCD)															
Μετά την εκτέλεση της εντολής															
X	X	X	X	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
214 (μορφή BCD)															

Σχ. 7.6στ.

Μείωση της τρέχουσας τιμής.

4) Μείωση της τρέχουσας τιμής.

Η εντολή μείωσης αφαιρεί από την τρέχουσα τιμή του απαριθμητή μια μονάδα. Η εντολή αυτή έχει συχνά το συμβολικό όνομα CD (από τον αγγλικό όρο Counter Down). Για παράδειγμα, η παρακάτω εντολή μειώνει την τιμή του απαριθμητή με αριθμό 46.

```
CD C46
```

Το σχήμα 7.6στ παρουσιάζει την επίδραση της παραπάνω εντολής στη λέξη (θέση μνήμης) που αντιστοιχεί στον απαριθμητή C46. Το σχήμα απεικονίζει το περιεχόμενο της μνήμης πριν και μετά την εκτέλεση της εντολής.

5) Ανάκτηση της τρέχουσας τιμής.

Η τρέχουσα τιμή ενός απαριθμητή μπορεί να

χρησιμοποιηθεί στον προγραμματισμό με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος είναι μεταφορά της τιμής σε έναν καταχωρητή ή μια θέση μνήμης, όπου θα γίνει η περαιτέρω επεξεργασία της τιμής, π.χ. η σύγκριση της τρέχουσας τιμής με μια άλλη ή ο υπολογισμός της διαφοράς της από μια άλλη κλπ. Η ανάκτηση γίνεται με τις γνωστές εντολές μεταφοράς μέσω καταχωρητή. Η παρακάτω εντολή μεταφέρει την τιμή του απαριθμητή C46 στη θέση μνήμης DW187.

```
MOV C46 DW187
```

Ο δεύτερος τρόπος ανάκτησης της τρέχουσας τιμής είναι η χρήση του απαριθμητή ως λογική μνήμη, που παίρνει δύο τιμές: Ψευδής (0), εφόσον η τρέχουσα τιμή είναι μηδέν και Αληθής (1) σε κάθε άλλη περίπτωση. Έτσι, το παρακάτω απόσπασμα

προγράμματος ελέγχει εάν ο απαριθμητής C46 έχει μηδενισθεί και ενεργοποιεί τη λογική έξοδο Q3.4.

```
AN C46
S Q3.4
```

7.6.3 Είδη και λειτουργία των συγκριτών.

Κατά τον προγραμματισμό των ΠΛΕ χρειάζεται συχνά η λήψη αποφάσεων με βάση τη *σύγκριση* μεταξύ δύο τιμών. Ένα πρόγραμμα π.χ. για τον έλεγχο του κλιματισμού μπορεί να ενεργοποιεί την ψύξη όταν η θερμοκρασία του χώρου είναι *μεγαλύτερη* από την προκαθορισμένη επιθυμητή θερμοκρασία. Για αυτό το λόγο όλοι οι ΠΛΕ διαθέτουν έτοιμες εντολές για τη σύγκριση που ονομάζονται *συγκριτές* (comparators). Ανάλογα με το είδος της σχέσεως που εξετάζουν οι συγκριτές διακρίνονται στους εξής τύπους:

ίσον	=
διαφορετικό	<>
μεγαλύτερο	>
μεγαλύτερο ή ίσο	>=
μικρότερο	<
μικρότερο ή ίσο	<=

Οι περισσότεροι τύποι ΠΛΕ διαθέτουν εντολές για όλα αυτά τα είδη συγκρίσεων. Η πιο διαδεδομένη μορφή εντολής συγκρίσεως είναι η σύγκριση μέσω καταχωρητών. Στην περίπτωση αυτή η εντολή συγκρίσεως συγκρίνει τα περιεχόμενα δύο συγκεκριμένων καταχωρητών, πάντα των ιδίων. Έτσι η σύγκριση δύο τιμών γίνεται σε 3 βήματα: φόρτωση του A καταχωρητή, φόρτωση του B και τέλος σύγκριση των περιεχομένων τους και απόφαση.

Οι παρακάτω εντολές εξετάζουν εάν η τρέχουσα τιμή της λέξεως DW165 είναι μικρότερη από την τρέχουσα τιμή της λέξεως DW274 και, εφόσον αυτό επαληθεύεται, ενεργοποιούν την έξοδο Q3.2.

```
LDA DW165
LDB DW274
<=?
S Q3.2
```

Κατά το πρώτο βήμα, ο πρώτος καταχωρητής φορτώνεται με την τιμή της λέξεως DW165. Στο δεύτερο βήμα, ο δεύτερος καταχωρητής φορτώνεται με την τιμή της λέξεως DW274. Στο τρίτο βήμα, η εντολή συγκρίσεως εξετάζει εάν το περιεχόμενο του καταχωρητή A είναι μικρότερο από εκείνο του καταχωρητή B. Εάν αυτό επαληθεύεται, το λογικό αποτέλεσμα είναι αληθές, οπότε εκτελείται η αμέσως επόμενη εντολή ενεργοποίησης της εξόδου.

Στο παράδειγμα που ακολουθεί, υποθέτουμε έμμεσα ότι ο συγκεκριμένος τύπος ΠΛΕ χρησιμοποιεί τους καταχωρητές A και B για όλες τις εντολές συγκρίσεως. Η σειρά με την οποία χρησιμοποιούνται οι καταχωρητές θα είναι πάντοτε ίδια για όλες τις εντολές συγκρίσεως, δηλαδή ελέγχεται εάν ο καταχωρητής A είναι μεγαλύτερος από τον B και όχι ανάστροφα. Ο πίνακας 7.6.1 παρουσιάζει τη λειτουργία της συγκρίσεως για τον υποθετικό ΠΛΕ του παραδείγματος.

Αρκετοί τύποι ΠΛΕ δε διαθέτουν χωριστές εντολές φόρτωσης για κάθε καταχωρητή, δηλαδή LDA, LDB, LDC κλπ., αλλά μια ενιαία εντολή φόρτωσης LD, στην οποία δεν προσδιορίζεται

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.6.1.

Λειτουργία της συγκρίσεως.

Εντολή	Το τρέχον λογικό αποτέλεσμα είναι Αληθές εάν:
=?	Το περιεχόμενο του καταχωρητή A είναι ίσο με το περιεχόμενο του καταχωρητή B.
<>?	Το περιεχόμενο του καταχωρητή A είναι διαφορετικό από το περιεχόμενο του καταχωρητή B.
>?	Το περιεχόμενο του καταχωρητή A είναι μεγαλύτερο από το περιεχόμενο του καταχωρητή B.
>=?	Το περιεχόμενο του καταχωρητή A είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το περιεχόμενο του καταχωρητή B.
<?	Το περιεχόμενο του καταχωρητή A είναι μικρότερο από το περιεχόμενο του καταχωρητή B.
<=?	Το περιεχόμενο του καταχωρητή A είναι μικρότερο ή ίσο από το περιεχόμενο του καταχωρητή B.

συγκεκριμένος καταχωρητής. Αυτό δε σημαίνει ότι ο αντίστοιχος ΠΛΕ διαθέτει ένα μοναδικό καταχωρητή, αλλά ότι οι διαδοχικές τιμές κατανέμονται στους καταχωρητές αυτόματα. Στην περίπτωση αυτή, η σειρά των καταχωρητών καθορίζεται από τη σειρά εκτέλεσης των εντολών φορτώσεως. Δηλαδή εάν υπάρχουν δύο καταχωρητές, η τελευταία εντολή φορτώσεως που εκτελέστηκε αφορά πάντα στον καταχωρητή Β και η προτελευταία πάντα στον καταχωρητή Α. Έτσι, για έναν ΠΛΕ αυτής της κατηγορίας το ίδιο πρόγραμμα, όπως παραπάνω, θα μπορούσε να γραφεί:

```
LD DW165
```

```
LD DW274
```

```
<=?
```

```
S Q3.2
```

Όταν η εκτέλεση του προγράμματος φθάσει στο τρίτο βήμα, η πλέον πρόσφατη εντολή καταχωρήσεως είναι η LD DW274. Επομένως η τιμή της λέξεως DW274 έχει αποθηκευτεί στον καταχωρητή Β (χωρίς το πρόγραμμα να αναφέρει ρητά το όνομα του καταχωρητή). Η αμέσως προηγούμενη εντολή καταχωρήσεως είναι η LD DW165. Επομένως η τιμή της λέξεως αυτής έχει αποθηκευτεί στον καταχωρητή Α. Άρα η λειτουργία του προγράμματος είναι ισοδύναμη με αυτήν του προηγούμενου παραδείγματος.

7.7 Αναλογικές εισόδους.

Οι σημερινές συσκευές επεξεργασίας δεδομένων είναι ψηφιακές λόγω της *τεχνολογίας κατασκευής τους*. Έτσι λειτουργούν οι ηλεκτρονικοί επεξεργαστές και οι μνήμες που βρίσκονται στην καρδιά των συγχρόνων υπολογιστικών συστημάτων. Για αυτό το λόγο, τα ψηφιακά σήματα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δηλαδή πρόκειται για δεδομένα σε μορφή την οποία ο επεξεργαστής χειρίζεται εύκολα, γρήγορα και αποτελεσματικά.

Όμως, τα περισσότερα ενδιαφέροντα φυσικά μεγέθη παίρνουν συνεχείς τιμές, είναι δηλαδή από τη φύση τους αναλογικά και όχι ψηφιακά. Για παράδειγμα, ενδιαφερόμαστε να ελέγξουμε την τιμή της θερμοκρασίας ενός χώρου, το βάρος ενός προϊόντος, την πίεση ενός καζανιού σε ένα πλοίο κ.ά. Όλα αυτά είναι αναλογικές παράμετροι που δεν εκφράζονται με λογικές μεταβλητές τύπου «Αληθής» ή «Ψευδής» αλλά ούτε και με ψηφιακές «λέξεις» αποτελούμενες από έναν αριθμό από bit.

Για αυτό το λόγο σχεδόν όλα τα σύγχρονα συστήματα αυτοματισμού χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό από ψηφιακά και αναλογικά σήματα. Οι ΠΛΕ ειδικότερα διαθέτουν ειδικές μονάδες (κάρτες) εισόδου, που μετατρέπουν τα αναλογικά σήματα σε ψηφιακή μορφή κατάλληλη για επεξεργασία από τον επεξεργαστή του ΠΛΕ.

Το σχήμα 7.7α παρουσιάζει τη γενική δομή μιας μονάδας αναλογικής εισόδου. Ο αντικειμενικός σκοπός της μονάδας είναι να συλλάβει ένα συγκεκριμένο φυσικό μέγεθος (π.χ. τη θερμοκρασία) και να το αποθηκεύσει ως ψηφιακό δεδομένο στη μνήμη του ΠΛΕ.

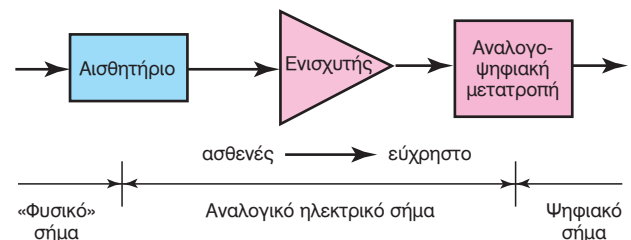
Η συνολική αυτή διαδικασία οργανώνεται σε τρία στάδια.

α) Το *αισθητήριο* (sensor) συλλαμβάνει και μετατρέπει το «φυσικό» σήμα σε αναλογικό ηλεκτρικό σήμα. Κατά κανόνα, το μετρούμενο φυσικό μέγεθος είναι μια ασθενής μεταβολή κάποιας ροής ενέργειας και μετατρέπεται σε εξίσου ασθενή ηλεκτρική τάση ή ηλεκτρικό ρεύμα.

β) Ο *ενισχυτής* (amplifier) μεγεθύνει το ασθενές ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από το αισθητήριο και το μεταφέρει σε ισχυρότερο μέγεθος, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω επεξεργασία και μετατροπή. Ταυτόχρονα ο ενισχυτής λειτουργεί και ως βαθμίδα «απομονώσεως», διότι ανταποκρίνεται ο ίδιος (και όχι το αισθητήριο) στις ενεργειακές ανάγκες των επομένων σταδίων επεξεργασίας του σήματος.

γ) Η *διάταξη αναлого-ψηφιακής μετατροπής* (analog to digital converter) μετασχηματίζει το αναλογικό ηλεκτρικό μέγεθος σε ψηφιακή μορφή, κατάλληλη για αποθήκευση σε μνήμη.

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από αισθητήρια κατάλληλα για τα διαφορετικά φυσικά μεγέθη. Ο πίνακας 7.7.1 αναφέρει ορισμένα από τα κύρια μετρούμενα μεγέθη. Οι κατηγορίες του πίνακα αντιστοιχούν στις βασικές ομάδες φυσικοχημικών φαινομένων που συναντώνται στα αντίστοιχα συστήμα-



Σχ. 7.7α.

Γενική δομή μονάδας αναλογικής εξόδου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.7.1.
Φυσικά μεγέθη (και αντίστοιχες μονάδες μετρήσεως).

Μηχανικά συστήματα	Συστήματα ρευστών	Ηλεκτρικά συστήματα
Γραμμική ή περιστροφική απόλυτη θέση ή μετατόπιση ή κλίση [m, rad]. Γραμμική ή περιστροφική ταχύτητα [m/s, rad/s]. Γραμμική ή περιστροφική επιτάχυνση [m/s ² , rad/s ²]. Συχνότητα κραδασμού ή ταλαντώσεως [Hz]. Δύναμη ή ροπή [N, Nm].	Πυκνότητα μάζας [kg/m ³] Πίεση [Pa] Παροχή [m ³ /s] Ταχύτητα ροής [m/s] Κινηματικό ιξώδες [cSt] Επιφανειακή τάση [N/m]	Ηλεκτρική τάση [V] Ηλεκτρικό ρεύμα [A] Ηλεκτρική αντίσταση [Ω] Χωρητικότητα [F] Συντελεστής σκεδάσεως (επαγωγή) [H] Ένταση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου [A/m] Ένταση μαγνητικής ροής [Wb]
Θερμικά συστήματα	Φως - Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	Χημικά συστήματα
Θερμοκρασία [°C] Θερμική ισχύς [W] Κατανομή της ισχύος στις συχνότητες (φάσμα) [W]	Φωτεινότητα [Cd] Συντελεστής ανακλάσεως ή μεταδόσεως [rad] Ποσότητα ραδιενέργειας [Bq] Γωνία πολώσεως [rad] Κατανομή της ισχύος στις συχνότητες (φάσμα) [W]	Συγκέντρωση μορίων ή ιόντων [mole/m ³] Χημική οξύτητα [PH] Δυναμικό οξειδοαναγωγής [V]

τα: μηχανικά, ηλεκτρομαγνητικά, χημικά, θερμικά κλπ. Βεβαίως, στο εσωτερικό της κάθε κατηγορίας, τα αισθητήρια που χρησιμοποιούνται για κάθε φυσική παράμετρο είναι μεταξύ τους διαφορετικά. Επιπρόσθετα, τα αισθητήρια μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή λειτουργίας τους. Έτσι, για παράδειγμα το θερμομέτρο διαστολής είναι κατάλληλο για μέτρηση χαμηλών και μεσαίων θερμοκρασιών, ενώ οι υψηλότερες θερμοκρασίες προσδιορίζονται από το «χρώμα» (τη συχνότητα) της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας χωρίς επαφή με το θερμό σώμα.

7.7.1 Αναлого-ψηφιακή μετατροπή.

Η επεξεργασία αναλογικών ηλεκτρικών σημάτων στηρίζεται στη χρήση διατάξεων πολλαπλασιασμού της ηλεκτρικής τάσεως, οι οποίοι ονομάζονται **τελεστικοί ενισχυτές**. Ένας τυπικός τελεστικός ενισχυτής (OpAmp, operational amplifier) έχει κέρδος της τάξεως του 105 ή και μεγαλύτερο. Το κέρδος ονομάζεται και **απολαβή τάσεως** και είναι ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ της τάσεως εξόδου και της τάσεως εισόδου. Στην πράξη η τάση εξόδου του τελεστικού ενισχυτή περιορίζεται σε πολύ χαμηλότερες τιμές και συγκεκριμένα στην υψηλότερη τάση τροφοδοσίας που του παρέχουμε.

Το σχήμα 7.7β(α) απεικονίζει ένα παράδειγμα τελεστικού ενισχυτή με κέρδος 5×10^4 και τροφοδοσία -3 έως $+5$ Volt. Λόγω του μεγάλου κέρδους, η παραμικρή διαφορά τάσεως στην είσοδο $V_{in} = V^+ - V^-$ οδηγεί την έξοδο του ενισχυτή στο αντίστοιχο θετικό ή αρνητικό όριο της. Για παράδειγμα, μια διαφορά $V_{in} = -1$ mV αντιστοιχεί σε θεωρητική έξοδο -50 V και, επειδή αυτό δεν είναι εφικτό, η τάση εξόδου βυθίζεται ως το κατώτερο όριό της, δηλαδή -3 V που είναι η αρνητική τάση τροφοδοσίας. Η εξάρτηση της τάσεως εξόδου από την τάση εισόδου παρουσιάζεται διαγραμματικά στο σχήμα 7.7β(β).

Το σχήμα 7.7β(β) δείχνει ότι πρακτικά η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή εξαρτάται από το **πρόσημο** της τάσεως εισόδου V_{in} και όχι από το μέγεθός της. Δηλαδή, όταν $V^+ > V^-$ η έξοδος είναι 5 V και όταν $V^+ < V^-$ η έξοδος είναι -3 V. Για το λόγο αυτό ο τελεστικός ενισχυτής ονομάζεται και **αναλογικός συγκριτής**, δηλαδή συγκρίνει δυο αναλογικές τιμές της τάσεως και «δείχνει» ποια είναι μεγαλύτερη μέσω του αντίστοιχου σήματος της εξόδου του.

Μάλιστα, με κατάλληλη επιλογή των τάσεων τροφοδοσίας η έξοδος του αναλογικού συγκριτή μπορεί να προσαρμοσθεί στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των λογικών σημάτων. Συγκεκριμένα, η έξοδος μπο-

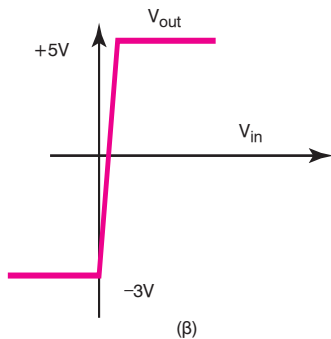
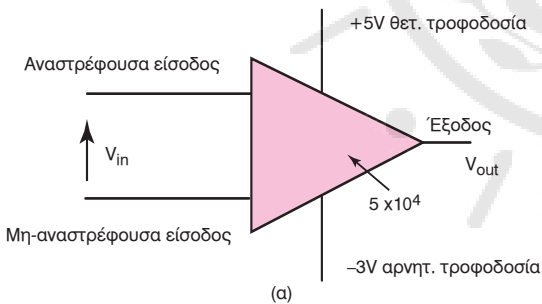
ρεί να λαμβάνει τιμές 5 ή 0 V, οι οποίες σε πολλούς επεξεργαστές αντιστοιχούν στα λογικά επίπεδα «Αληθής» (True) και «Ψευδής» (False) αντίστοιχα. Η απλούστερη μέθοδος αναλογο-ψηφιακής μετατροπής είναι η μετατροπή χειμάρρου.

Μετατροπή χειμάρρου.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί αναλογικούς συγκριτές. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται και **μετατροπή καταρράκτη** (flash conversion), λόγω της ταχύτητας με την οποία πραγματοποιείται η μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.

Η κεντρική ιδέα της μεθόδου είναι η ταυτόχρονη σύγκριση της αναλογικής τάσεως εισόδου με μια σειρά από προκαθορισμένες στάθμες τάσεως. Το σχήμα 7.7γ παρουσιάζει έναν αναλογο-ψηφιακό μετατροπέα χειμάρρου που μετατρέπει μια αναλογική τάση στο διάστημα 0 έως V_{ref} σε ψηφιακή «λέξη», αποτελούμενη από δύο δυαδικά ψηφία (b1 και b0).

Η λέξη των δύο bit μπορεί να απεικονίσει $2^2=4$ διαφορετικές τιμές (αυτή είναι η **διακριτική ικανότητα** του συγκεκριμένου Α/Ψ μετατροπέα). Επομένως το εύρος αναλογικών τιμών της τάσεως V_{ref} κατανέμεται σε τέσσερα διαστήματα, ίσα μεταξύ τους. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα διαιρέτη τάσεως, που αποτελείται από τις τέσσερις ίσες αντιστάσεις στο αριστερό μέρος του σχήματος. Η τάση σε κάθε κόμβο του διαιρέτη είναι κατά $V_{ref}/4$ υψηλότερη από εκείνη του προηγούμενου κόμβου.



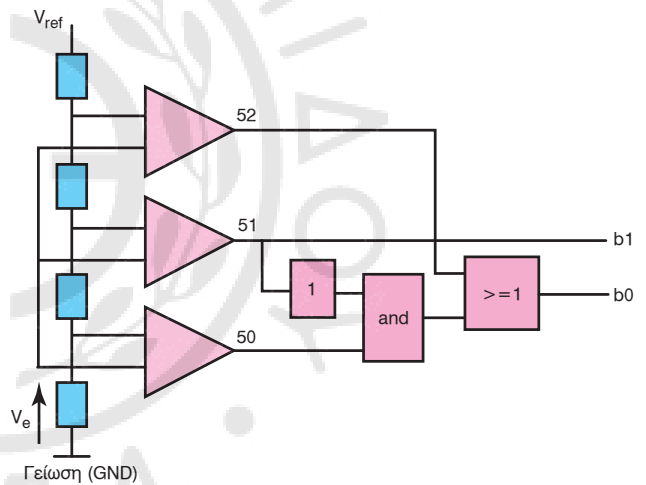
Σχ. 7.7β.

Τελεστικός ενισχυτής.

Έτσι ο διαιρέτης δημιουργεί λήψεις τάσεως $V_{ref}/4$, $V_{ref}/2$ και $3V_{ref}/4$.

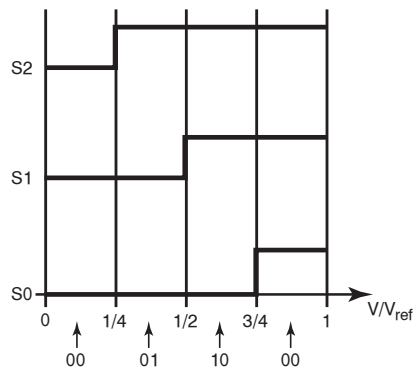
Το κύκλωμα του μετατροπέα περιλαμβάνει τρεις συγκριτές. Η μη αναστρέφουσα είσοδος κάθε συγκριτή τροφοδοτείται με την προς μετατροπή αναλογική τάση V_e . Η αναστρέφουσα είσοδος κάθε συγκριτή συνδέεται με μια από τις τάσεις που παράγει ο διαιρέτης. Έτσι, η λογική κατάσταση στην έξοδο του συγκριτή δείχνει κατά πόσο η αναλογική τάση είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την αντίστοιχη λήψη από τους κόμβους του διαιρέτη. Το σχήμα 7.7δ απεικονίζει την εξάρτηση των εξόδων S0, S1, S2 για διαφορετικές τιμές της τάσεως εισόδου. Στο διάγραμμα αυτό η τάση εισόδου εκφράζεται σε αδιάστατες μονάδες ως κλάσμα V_e/V_{ref} .

Το σχήμα 7.7δ αναφέρει επίσης την τιμή της δυαδικής λέξεως που αντιστοιχεί σε κάθε διαδοχικό διάστημα τάσεως (από δυαδικό 00 έως δυαδικό 11). Επομένως οι συνδυασμοί λογικών καταστάσεων S0,



Σχ. 7.7γ.

Αναλογο-ψηφιακός μετατροπέας δύο bit.



Σχ. 7.7δ.

Τάση εισόδου και αποτέλεσμα των συγκρίσεων.

S1 και S2 αντιστοιχούν σε τιμές των δυαδικών ψηφίων b1 και b0, σύμφωνα με τον πίνακα 7.7.2. Η μετατροπή αυτή επιτυγχάνεται με λογικό κύκλωμα, που βρίσκεται το δεξί μέρος του σχήματος 7.7γ.

Οι διατάξεις μετατροπής χειμάρρου επιτυγχάνουν το χαμηλότερο χρόνο αναλογο-ψηφιακής μετατροπής με συνήθως λιγότερο από ένα εκατομμυριοστό του δευτερολέπτου (μs). Η ταχύτητά τους περιορίζεται μόνο από την καθυστέρηση μεταγωγής των ηλεκτρονικών στοιχείων από τις οποίες είναι κατασκευασμένες.

Παρά την ταχύτητά τους οι μετατροπείς χειμάρρου δε χρησιμοποιούνται, όταν απαιτείται μεγάλη διακριτική ικανότητα (δηλ. μεγάλος αριθμός bit της παραγόμενης ψηφιακής λέξεως), διότι απαιτούν πολύ μεγάλες ποσότητες ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και στοιχείων υψηλής ακριβείας. Ένας μετατροπέας διακριτικής ικανότητας N bit απαιτεί $2^N - 1$ συγκριτές και 2^N ίσες αντιστάσεις. Π.χ. για την παραγωγή ψηφιακών δεδομένων ενός Byte απαιτούνται 255 συγκριτές και 256 αντιστάσεις!

7.7.2 Η εφαρμογή αναλογικών εισόδων στους ΠΛΕ.

Οι περισσότεροι ΠΛΕ κάθε κατασκευαστή διαθέτουν μια ποικιλία συμβατού εξοπλισμού για τη σύνδεση αναλογικών εισόδων (πίνακας 7.7.3). Συνήθως αυτός ο εξοπλισμός έχει τη μορφή μονάδας επεκτάσεως (κάρτας), που προσαρμόζεται στη βασική μονάδα του ΠΛΕ. Οι κάρτες αναλογικών εισόδων εξυπηρετούν συνήθως πολλές όμοιες αναλογικές εισόδους και κατηγοριοποιούνται με δύο βασικά κριτήρια:

α) Το είδος των ηλεκτρικών αναλογικών σημάτων που δέχονται κι επομένως το είδος των αισθητήρων που μπορούν να συνδεθούν και να συνεργασθούν με τον ΠΛΕ. Οι κύριες επιμέρους ομάδες αυτής της κατηγορίας είναι οι αναλογικές κάρτες που δέχονται ηλεκτρική τάση κι εκείνες που δέχονται ηλεκτρικό ρεύμα. Πρόσθετα, οι αποδεκτές τιμές αυτών των ηλεκτρικών μεγεθών κινούνται σε τυποποιημένα όρια που ονομάζονται **ονομαστικές περιοχές**.

β) Τη διακριτική ικανότητα, δηλαδή τον αριθμό από διαφορετικές στάθμες στις οποίες κατατάσσεται το αναλογικό σήμα κατά τη μετατροπή σε ψηφιακό δεδομένο. Λόγω του δυαδικού τρόπου απεικόνισης των ψηφιακών δεδομένων, η διακριτική ικανότητα εκφράζεται συχνά σε δυνάμεις του δύο ή -ισοδύναμα- σε αριθμό bit.

Το σχήμα 7.7ε απεικονίζει τη χαρακτηριστική της μετατροπής, δηλαδή την αντιστοιχία μεταξύ αναλογικών και ψηφιακών τιμών, στη γενική περίπτωση της αναλογο-ψηφιακής μετατροπής με δι-

ακριτική ικανότητα N δυαδικά ψηφία (bit).

Οι αναλογικές κάρτες των ΠΛΕ συνοδεύονται από αντίστοιχο ειδικό λογισμικό. Πρόκειται για έτοιμα υποπρογράμματα λειτουργιών (function blocks) που εξυπηρετούν τη συνεργασία του κύριου προγράμματος με τις αναλογικές μονάδες. Οι κύριες βοηθητικές λειτουργίες που προσφέρουν είναι:

α) Δυνατότητα ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης της αναλογικής μονάδας (κάρτας) ή ενός συγκεκριμένου αριθμού αναλογικών εισόδων από αυτές που υποστηρίζονται από την κάρτα.

β) Εισαγωγή παραμέτρων για τη λειτουργία της αναλογο-ψηφιακής μετατροπής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.7.2.

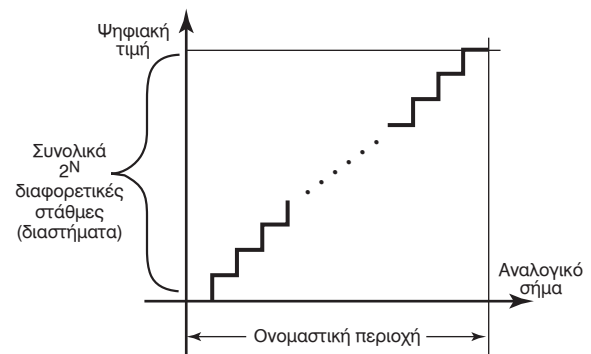
Συσχέτιση συγκριτών και δυαδικών ψηφίων.

Διάστημα V_e/V_{ref}	S2	S1	S0	b1	b0
0 - 1/4	0	0	0	0	0
1/4 - 1/2	0	0	1	0	1
1/2 - 3/4	0	1	1	1	0
3/4 - 1	1	1	1	1	1

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.7.3.

Συνήθεις κάρτες αναλογικών εισόδων.

Αναλογικό μέγεθος	Ονομαστική περιοχή
Ηλεκτρική τάση	±50 mV ±500 mV ±1 V ±5 V ±10 V
Ηλεκτρικό ρεύμα	±20 mA 4-20 mA



Σχ. 7.7ε.

Αντιστοιχία αναλογικών και ψηφιακών τιμών.

Η σημαντικότερη λειτουργία τους είναι η ενεργοποίηση της αναλογο-ψηφιακής μετατροπής και η ανάκτηση του ψηφιακού δεδομένου που αντιστοιχεί στη στιγμιαία αναλογική τιμή της εισόδου. Η ανάκτηση αυτή γίνεται συνήθως με μια απλή εντολή «φορτώσεως» π.χ.

LDA PW125

Στο παραπάνω παράδειγμα, το λειτουργικό σύστημα του ΠΛΕ αναγνωρίζει ότι θα πρέπει να μεταφέρει στον καταχωρητή δεδομένα μήκους μιας λέξεως από μια θέση μνήμης ειδικού τύπου. Ο ΠΛΕ ενεργοποιεί αυτόματα τη λειτουργία της αναλογο-ψηφιακής μετατροπής και καταχωρεί το αποτέλεσμα στον καταχωρητή.

7.8 Αναλογικές εξόδου.

Χάρη στην ψηφιακή τεχνολογία κατασκευής τους, οι ΠΛΕ διαθέτουν τη δυνατότητα πολύπλοκης και ταχύτατης επεξεργασίας πολλών αναλογικών και ψηφιακών σημάτων. Αυτή η υπολογιστική δύναμη θα έμενε όμως ανεκμετάλλευτη, εάν δεν υπήρχαν και οι αντίστοιχοι «μύες», δηλαδή οι διατάξεις που μετατρέπουν τις εξόδους του ΠΛΕ σε φυσικά μεγέθη στον πραγματικό κόσμο: δύναμη, ροπή, πίεση, ηλεκτρική τάση κλπ.. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται *όργανα δράσεως*.

Είναι γνωστό ότι οι λογικές εξόδου των ΠΛΕ μετατρέπονται σε ενέργειες ή δράσεις μέσω απλών διατάξεων διακοπής. Τυπικό παράδειγμα είναι οι ηλεκτρονόμοι, οι οποίοι ανάλογα με την κατάσταση μιας λογικής εξόδου του ΠΛΕ κλείνουν ή ανοίγουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Έτσι, οι ηλεκτρονόμοι μετατρέπουν μια λογική μεταβλητή με καταστάσεις Αληθής/Ψευδής σε μια ροή ηλεκτρικής ισχύος με καταστάσεις Εντός/Εκτός. Οι περισσότεροι κατασκευαστές εφοδιάζουν τους ΠΛΕ με συμβατούς ηλεκτρονόμους για μια μεγάλη ποικιλία χρήσεων (π.χ. για διαφορετικές τιμές μέγιστου ρεύματος ή για διαφορετικές ταχύτητες μεταγωγής) αλλά και με άλλες ανάλογες διατάξεις που μπορούν να διακόπτουν υδραυλικά ή πνευματικά κυκλώματα ισχύος.

Αντίστοιχα, οι ψηφιακές εξόδου των ΠΛΕ μετατρέπονται σε ενέργειες ή δράσεις μέσω πιο συνθέτων διατάξεων, που ονομάζονται *μονάδες αναλογικής εξόδου*. Πρόκειται για ειδικές μονάδες (κάρτες) εξόδου που μετασχηματίζουν τα ψηφιακά αριθμητικά σήματα από την έξοδο του ΠΛΕ σε συνεχές αναλογικό φυσικό μέγεθος κατάλληλο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Το σχήμα 7.8α παρουσιάζει τη γενική δομή μιας

μονάδας αναλογικής εξόδου. Ο αντικειμενικός σκοπός της μονάδας είναι να αναγνωρίσει ένα ψηφιακό αριθμητικό δεδομένο στη μνήμη του ΠΛΕ και να το μετατρέψει σε ένα συγκεκριμένο φυσικό μέγεθος (π.χ. στρεπτική ροπή) με επαρκή ισχύ ώστε να μπορεί να επηρεάσει αποτελεσματικά το περιβάλλον του ΠΛΕ (π.χ. να επιταχύνει την περιστροφή ενός τροχού).

Η διαδικασία αυτή οργανώνεται σε τρία στάδια:

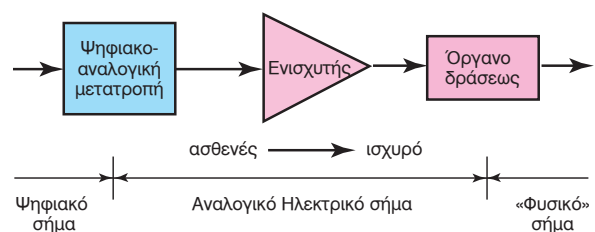
α) Η *διάταξη ψηφιακο-αναλογικής μετατροπής* (digital to analog converter) μετασχηματίζει την ψηφιακή αριθμητική τιμή σε αναλογικό ηλεκτρικό μέγεθος.

β) Ο *ενισχυτής* (amplifier) μεγεθύνει το ασθενές ηλεκτρικό σήμα που παράγεται από την ψηφιακο-αναλογική μετατροπή και το μεταφέρει σε ισχυρότερο μέγεθος. Αυτό στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή δύναμης, πίεσης, ροπής κλπ. Ταυτόχρονα, ο ενισχυτής λειτουργεί και ως βαθμίδα «απομονώσεως», διότι ανταποκρίνεται ο ίδιος (και όχι η διάταξη μετατροπής) στις ενεργειακές ανάγκες των επομένων σταδίων επεξεργασίας του σήματος.

γ) Το *όργανο δράσεως* (actuator) μετατρέπει το αναλογικό ηλεκτρικό σήμα σε «φυσικό» (σε κάποια φυσική παράμετρο) μεγάλης ισχύος. Το μέγεθος της φυσικής παραμέτρου είναι ανάλογο προς την ψηφιακή αριθμητική τιμή στην έξοδο του προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή.

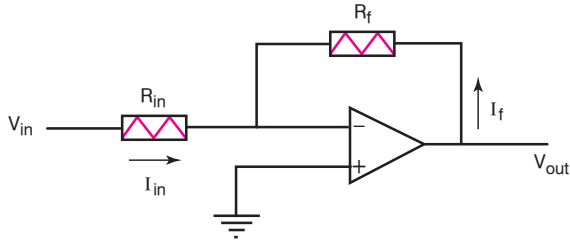
7.8.1 Ο τελεστικός ενισχυτής ως βαθμίδα εξόδου.

Η χρήση αναλογικών ηλεκτρικών σημάτων στηρίζεται στην αξιοποίηση διατάξεων πολλαπλασιασμού της ηλεκτρικής τάσεως, που ονομάζονται *ενισχυτές ισχύος*. Το σχήμα 7.8β παρουσιάζει το βασικό κύκλωμα ενός ενισχυτή ισχύος. Η τάση εξόδου του τελεστικού ενισχυτή ανατροφοδοτείται στην αναστρέφουσα είσοδο μέσω της αντιστάσεως R_f που ονομάζεται και αντίσταση *ανατροφοδοτήσεως* (feedback). Η τάση εισόδου του ενισχυτή τροφοδοτείται στη μη αναστρέφουσα είσοδο μέσω της αντιστάσεως R_{in} .

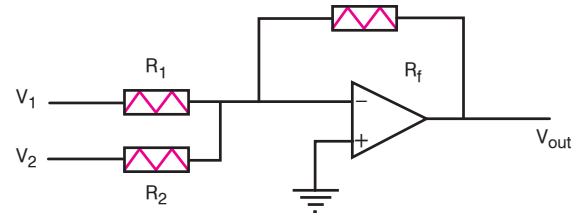


Σχ. 7.8α.

Γενική δομή μονάδας αναλογικής εξόδου.



Σχ. 7.8β.
Ενισχυτής ισχύος.



Σχ. 7.8γ.
Αναλογικός αθροιστής.

Υποθέτουμε ότι ο τελεστικός ενισχυτής στο κέντρο του κυκλώματος είναι ιδανικός, δηλαδή έχει άπειρο κέρδος ενισχύσεως και δεν απορροφά καθόλου ρεύμα στην είσοδό του (δηλαδή έχει άπειρη αντίσταση εισόδου). Εάν θεωρήσουμε ότι η τάση εξόδου έχει μια «λογική» τιμή, συμπεραίνουμε ότι η διαφορά τάσεως στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή πρέπει να είναι πολύ μικρή, δηλαδή πρακτικά μηδέν. Όμως η μη αναστρέφουσα είσοδος V^+ είναι γειωμένη, επομένως η V^- πρέπει να είναι επίσης στη γη (δυναμικό μηδέν). Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η πτώση τάσεως στην αντίσταση R_f είναι ίση με την τάση εξόδου V_{out} , δηλαδή:

$$V_{out} = I_f \cdot R_f \quad (7.1)$$

Επίσης με την ίδια λογική η πτώση τάσεως στην αντίσταση εισόδου R_{in} είναι ίση με την τάση εισόδου V_{in} :

$$V_{in} = I_{in} \cdot R_{in} \quad (7.2)$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, θεωρούμε ότι ο ενισχυτής δεν απορροφά ρεύμα, επομένως το συνολικό ρεύμα στην αναστρέφουσα είσοδο είναι μηδέν. Δηλαδή τα ηλεκτρικά ρεύματα στους δύο κλάδους που συνδέονται σε αυτήν είναι ίσα και αντίθετα:

$$I_f = I_{in} \quad (7.3)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές του ρεύματος με τις εκφράσεις που βρέθηκαν προηγουμένως, καταλήγουμε στη σχέση μεταξύ τάσεως εισόδου και εξόδου:

$$V_{out} = -V_{in} \cdot R_f / R_{in} \quad (7.4)$$

Επομένως το κύκλωμα του σχήματος 7.8β επιτυγχάνει **πολλαπλασιασμό της τάσεως** εισόδου κατά τον παράγοντα R_f/R_{in} , με ταυτόχρονη **αντιστροφή της πολικότητας** (για αυτό το λόγο το κύκλωμα ονομάζεται και **αναστρέφων ενισχυτής**). Ο πολλαπλασιασμός της τάσεως είναι θεωρητικός, δηλαδή η πραγματική τάση εξόδου περιορίζεται μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης τάσεως τροφοδοσίας του τελεστικού ενισχυτή.

Ο αναστρέφων ενισχυτής μπορεί να επεκταθεί

ώστε να συμπεριλάβει περισσότερες από μια τάσεις εισόδου. Το κύκλωμα του σχήματος 7.8γ απεικονίζει έναν ενισχυτή με δύο ανεξάρτητες εισόδους V_1 και V_2 . Εάν επαναληφθεί ο υπολογισμός που αναπτύχθηκε παραπάνω, η τάση εξόδου υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 \right) \quad (7.5)$$

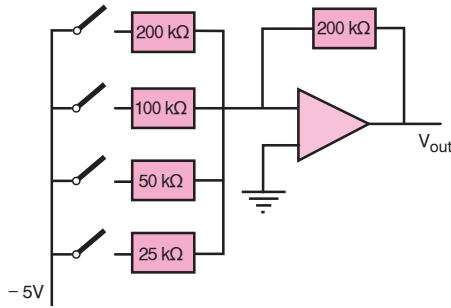
$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \dots + \frac{R_f}{R_N} V_N \right)$$

Δηλαδή η τάση εξόδου προκύπτει από το άθροισμα των τάσεων εισόδου, αφού προηγουμένως κάθε μια πολλαπλασιασθεί με το κλάσμα της αντιστάσεως ανατροφοδότησεως προς την αντίσταση στην αντίστοιχη είσοδο (παράγοντας R_f/R_N). Επομένως το κύκλωμα του σχήματος 7.8γ λειτουργεί ως αναλογικός αθροιστής. Μάλιστα, η κάθε είσοδος μπορεί να συμμετέχει στο άθροισμα με διαφορετικό συντελεστή, επιλέγοντας τις τιμές των αντιστάσεων εισόδου.

7.8.2 Μετατροπή με αθροιστή.

Η απλούστερη μέθοδος ψηφιακο-αναλογικής μετατροπής χρησιμοποιεί έναν αναλογικό αθροιστή, όπως αυτός που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η κεντρική ιδέα της μεθόδου είναι η άθροιση διαφορετικών τάσεων εισόδου που σχηματίζονται, ανάλογα με τη λογική τιμή των bit που απαιτούν την ψηφιακή έξοδο του ΠΛΕ. Το σχήμα 7.8δ παρουσιάζει έναν ψηφιακό-αναλογικό μετατροπέα αθροιστή, που μετατρέπει μια ψηφιακή «Λέξη», αποτελούμενη από τέσσερα δυαδικά ψηφία (b_3, b_2, b_1 και b_0), σε αναλογική τάση στο διάστημα 0 έως 75 V. Ο αθροιστής έχει τέσσερις εισόδους που συνδέονται με την τάση -5 V, ανάλογα με τη λογική κατάσταση του αντίστοιχου bit.

Σύμφωνα με το θεωρητικό αθροιστή, που παρουσιάστηκε προηγουμένως, η τάση εξόδου του



Σχ. 7.8δ.

Διάταξη ψηφιακο-αναλογικής μετατροπής τεσσάρων bit.

κυκλώματος είναι:

$$V_{out} = -\left(\frac{200}{25}V_{b3} + \frac{200}{50}V_{b2} + \frac{200}{25}V_{b1} + \frac{200}{200}V_{b0}\right) \quad (7.5)$$

$$\text{όπου } V_b = \begin{cases} 0 \\ -5V \end{cases} \quad (7.6)$$

7.8.3 Η εφαρμογή αναλογικών εξόδων στους ΠΛΕ.

Οι περισσότεροι ΠΛΕ διαθέτουν μια ποικιλία συμβατού εξοπλισμού για την παραγωγή ηλεκτρικών αναλογικών εξόδων (πίνακας 7.8.1). Συνήθως αυτός ο εξοπλισμός έχει τη μορφή μονάδας επεκτάσεως (κάρτας), που προσαρμόζεται στη βασική μονάδα του ΠΛΕ. Οι κάρτες αναλογικών εξόδων εξυπηρετούν συνήθως πολλές όμοιες αναλογικές εξόδους και κατηγοριοποιούνται με δύο βασικά κριτήρια:

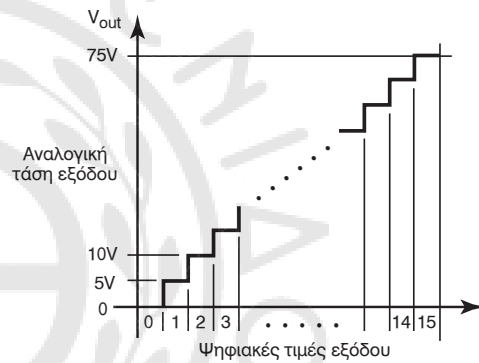
- Το είδος των ηλεκτρικών αναλογικών σημάτων που παράγονται και επομένως το είδος των οργάνων δράσεως που μπορούν να συνδεθούν και να συνεργασθούν με τον ΠΛΕ.
- Τη διακριτική ικανότητα, δηλαδή τον αριθμό από διαφορετικές στάθμες, στις οποίες κατατάσσεται το παραγόμενο αναλογικό ηλεκτρικό σήμα, σε αντιστοιχία με το ψηφιακό δεδομένο στην έξοδο του ΠΛΕ. Η διακριτική ικανότητα εκφράζεται συνήθως σε αριθμό bit.

Το σχήμα 7.8ε απεικονίζει τη χαρακτηριστική της μετατροπής, δηλαδή την αντιστοιχία μεταξύ ψηφιακών και αναλογικών τιμών, στην ειδική περίπτωση του ψηφιακού αναλογικού μετατροπέα του προηγούμενου παραδείγματος με διακριτική ικανότητα τέσσερα bit και με παραγόμενη τάση στο διάστημα 0-75 V.

Οι αναλογικές κάρτες εξόδων των ΠΛΕ συνοδεύονται από αντίστοιχο ειδικό λογισμικό. Πρόκειται για έτοιμα υποπρογράμματα λειτουργιών (func-

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.8.1.
Συνήθεις κάρτες αναλογικών εξόδων.

Αναλογικό μέγεθος	Ονομαστική περιοχή
Ηλεκτρική τάση	±50 mV
	±500 mV
	±1 V
	±5 V
	±10 V
	±50 V
Ηλεκτρικό ρεύμα	±20 mA
	4-20 mA



Σχ. 7.8ε.

Παράδειγμα αντιστοιχίας ψηφιακών και αναλογικών τιμών.

tion blocks), που εξυπηρετούν τη συνεργασία του κύριου προγράμματος με τις αναλογικές μονάδες. Οι κυριότερες βοηθητικές λειτουργίες που προσφέρουν είναι:

- Δυνατότητα ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης της αναλογικής μονάδας ή ενός συγκεκριμένου αριθμού αναλογικών εξόδων από αυτές που υποστηρίζονται από την κάρτα.
- Εισαγωγή παραμέτρων για τη λειτουργία της ψηφιακο-αναλογικής μετατροπής.

Όπως και στην περίπτωση των αναλογικών εισόδων του ΠΛΕ, η σημαντικότερη λειτουργία της κάρτας και του λογισμικού που τη συνοδεύει είναι η ενεργοποίηση της μετατροπής και η παραγωγή του αναλογικού ηλεκτρικού μεγέθους, που αντιστοιχεί στη στιγμιαία ψηφιακή τιμή της εξόδου. Η μετατροπή γίνεται συνήθως με μια απλή εντολή αποθημεύσεως, π.χ.

STA PW127

Στο παραπάνω παράδειγμα το λειτουργικό σύστημα του ΠΛΕ αναγνωρίζει ότι πρέπει να μεταφέρει δεδομένα μήκους μιας λέξεως από τον καταχωρητή στη θέση μνήμης ειδικού τύπου PW127, η οποία ανήκει στην αναλογική κάρτα εξόδου. Ο ΠΛΕ ενεργοποιεί αυτόματα τη λειτουργία της ψηφιακο-αναλογικής μετατροπής και εφαρμόζει την παραγόμενη ηλεκτρική τάση (ή ρεύμα) στους ακροδέκτες της κάρτας εξόδου.

7.9 Διόρθωση και ανίχνευση βλαβών.

Ο καλύτερος τρόπος αποφυγής λαθών σε ένα σύστημα ΠΛΕ είναι ένα κατάλληλο προληπτικό πρόγραμμα συντηρήσεως. Αν και οι ΠΛΕ σχεδιάζονται, για να ελαττώσουν τη συντήρηση και να παρέχουν λειτουργία χωρίς προβλήματα, πρέπει να λαμβάνονται τακτικά κάποια προληπτικά μέτρα. Τα ακόλουθα προληπτικά μέτρα πρέπει να λαμβάνονται έτσι ώστε να αποφεύγονται τυχόν δυσλειτουργίες στη λειτουργία του συστήματος:

- Σκόνη συσσωρευμένη στα κυκλώματα του ΠΛΕ πρέπει να καθαρίζεται. Εάν συσσωρευτεί σε επαγωγούς θερμότητας και ηλεκτρονικά κυκλώματα, θα έχουμε μείωση θερμότητας, με αποτέλεσμα πιθανές βλάβες. Ειδικά αν η αγώγιμη σκόνη φθάσει στα ηλεκτρονικά κυκλώματα υπάρχει μεγάλη πιθανότητα βραχυκυκλωμάτων και επομένως μόνιμες βλάβες στις πλακέτες των κυκλωμάτων.
- Οι συνδέσεις των μονάδων εισόδων-εξόδων (I/O) πρέπει να ελέγχονται περιοδικά για σωστές επαφές. Χαλαρές συνδέσεις μπορεί να δημιουργήσουν εσφαλμένη λειτουργία του συστήματος αλλά και πιθανές ζημιές στα κυκλώματα.
- Πρέπει να ελέγχονται όλες οι συσκευές για τις ρυθμίσεις που έχουν.
- Μηχανήματα που προκαλούν θορύβους ή συσκευές που εκπέμπουν θερμότητα πρέπει να μην βρίσκονται δίπλα σε συστήματα ΠΛΕ.

Σε περίπτωση βλάβης ή κακής λειτουργίας πρέπει να ακολουθήσουμε μια σωστή και συστηματική μέθοδο ανιχνεύσεως βλαβών για την αποκατάστασή τους. Η δυνατότητα ελέγχου της διαδικασίας λειτουργίας ενός ΠΛΕ σε οθόνη CRT (καθοδικής λυχνίας), είναι μεγάλο πλεονέκτημα σε πολλές περιπτώσεις βλαβών.

Όταν αντιμετωπίζουμε ένα πρόβλημα, το πρώτο βήμα στην ανίχνευση βλάβης είναι η αναγνώριση του προβλήματος και η πιθανή πηγή του. Η πηγή του προβλήματος μπορεί να εντοπιστεί στη μονάδα επεξεργασίας, στις μονάδες εισόδου-εξόδου, στην

καλωδίωση ή στις εισόδους-εξόδους των μηχανημάτων που ελέγχονται. Όταν εντοπισθεί το πρόβλημα, είναι πλέον εύκολο να διορθωθεί. Οι περιπτώσεις που μπορεί τυχόν να προκύψουν προβλήματα είναι οι ακόλουθες:

α) **Μονάδα επεξεργασίας.** Ο επεξεργαστής είναι υπεύθυνος για αυτοανίχνευση πιθανών σφαλμάτων. Εκτελεί ελέγχους σφαλμάτων κατά τη λειτουργία του και στέλνει πληροφορίες καταστάσεως σε ενδείξεις που είναι τοποθετημένες στην πρόσοψη της μονάδας. Τυπικοί διαγνωστικοί έλεγχοι περιλαμβάνουν την **κατάσταση της μνήμης** (memory OK), του **επεξεργαστή** (Processor OK), της **μπαταρίας** (battery OK) και της **τροφοδοσίας** (power supply OK). Οι περισσότεροι ΠΛΕ, περιλαμβάνουν ένα χρονιστή παρακολούθησεως (watchdog timer) για τον έλεγχο της διαδικασίας σαρώσεως του προγράμματος. Ο χρονιστής αυτός είναι συνήθως ένα ξεχωριστό κύκλωμα χρονισμού, που πρέπει να τίθεται και να επανατίθεται από τον επεξεργαστή σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Μόλις ανιχνευθεί βλάβη από τον επεξεργαστή, ο χρονιστής ενεργοποιείται, σταματώντας έτσι αμέσως τη λειτουργία του συστήματος. Ανιχνεύονται επίσης τα δεδομένα μνήμης μέσω εσωτερικών διαγνωστικών μικροπρογραμμάτων.

β) **Βλάβες εισόδων/εξόδων.** Αν ο ελεγκτής λειτουργεί σε κατάσταση RUN αλλά οι συσκευές εισόδου-εξόδου δεν λειτουργούν όπως προγραμματίστηκαν, η πιο πιθανή πηγή του προβλήματος είναι μία από τις ακόλουθες:

- Συσκευές εισόδου-εξόδου.
- Σύνδεση μεταξύ μονάδων εισόδου-εξόδου.
- Μονάδα ισχύος.

Ο εντοπισμός του προβλήματος επιτυγχάνεται συνήθως με την σύγκριση της πραγματικής καταστάσεως της ύποπτης συσκευής και των δεικτών καταστάσεως του ελεγκτή.

7.10 Ερωτήσεις.

1. Ποια είναι η δομή ενός ΠΛΕ;
2. Ποιες γλώσσες προγραμματισμού χρησιμοποιούνται στον προγραμματισμό ενός ΠΛΕ;
3. Πώς γίνεται η μεταφορά δεδομένων στον ΠΛΕ;
4. Ποιες είναι οι λειτουργίες του απαριθμητή;
5. Ποια είναι τα κριτήρια κατηγοριοποιήσεως των καρτών αναλογικών εισόδων και εξόδων;
6. Ποια προληπτικά μέτρα πρέπει να λαμβάνονται για τον έλεγχο λειτουργίας ενός ΠΛΕ;

Επίλυση προβλημάτων αυτοματισμού με χρήση Προγραμματιζομένων Λογικών Ελεγκτών



8.1 Γενικά.

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται μια συστηματική προσέγγιση στην αντιμετώπιση και επίλυση προβλημάτων αυτοματοποίησης με ολοκληρωμένες λύσεις αυτοματισμού (συστήματα), που στηρίζονται στη χρήση των *Προγραμματιζομένων Λογικών Ελεγκτών* (ΠΛΕ). Η προσέγγιση αυτή δίνει σημαντική βαρύτητα στον τρόπο καταγραφής και τεκμηρίωσης του προβλήματος αυτοματισμού και στην προτεινόμενη λύση, έτσι ώστε να μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί από διαφορετικούς τεχνικούς σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

8.2 Διαδικασία επίλυσης και τεκμηρίωσης.

Ο βασικός σκοπός της επίλυσης ενός προβλήματος αυτοματισμού είναι η ανάπτυξη μιας λύσης, που να επιβάλλει στο ελεγχόμενο σύστημα την επιθυμητή συμπεριφορά. Ταυτόχρονα, μια σωστή εφαρμογή αυτοματισμού πρέπει να ανταποκρίνεται και σε άλλα κριτήρια, όπως τα εξής:

- Να είναι οικονομικά εφικτή καταρχήν ως δαπάνη για την αρχική κατασκευή και εγκατάσταση της λύσης. Στο κόστος της εφαρμογής πρέπει να συνυπολογίζεται και η δαπάνη συντηρήσεως.
- Να είναι ασφαλής για τους χειριστές και για το περιβάλλον.

Μια συστηματική προσέγγιση με συγκεκριμένα βήματα και στάδια βοηθάει στην ανάπτυξη λύσεων, που να είναι αποτελεσματικές και ταυτόχρονα να ικανοποιούν τα παραπάνω κριτήρια. Τα συνήθη βήματα της διαδικασίας αναπτύξεως ολοκληρωμένων λύσεων αυτοματισμού με προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές είναι τα εξής:

- Περιγραφή του προβλήματος αυτοματισμού.
- Αναγνώριση των σημάτων και παραμέτρων που εμπλέκονται.
- Περιγραφή της λύσεως αυτοματισμού.
- Συνδεσμολογία και προγραμματισμός του ΠΛΕ.

Κάθε βήμα περιλαμβάνει την επεξεργασία πληροφοριών από το περιβάλλον και την κατασκευή ενός τμήματος της ολοκληρωμένης λύσεως. Ταυτόχρονα, κάθε βήμα περιλαμβάνει την αντίστοιχη τεκμηρίωση, ώστε να μπορεί να μεταδοθεί ή να καταχωρηθεί για μελλοντική χρήση.

8.3 Περιγραφή του προβλήματος.

Για να επιλυθεί ένα πρόβλημα αυτοματισμού, πρέπει καταρχήν να κατανοηθεί. Αυτή η κατανόηση αφορά σε δύο μέρη: στην αντίληψη του *περιβάλλοντος* του συστήματος του αυτοματισμού και στην αντίληψη του *στόχου* του αυτοματισμού.

8.3.1 Περιβάλλον του συστήματος αυτοματισμού.

Το *περιβάλλον του συστήματος αυτοματισμού* είναι η συγκεκριμένη βιομηχανική εφαρμογή ή η διάταξη στην οποία ανήκει ο αυτοματισμός. Αυτή η περιγραφή είναι αναγκαία, διότι ο σκοπός του συγκεκριμένου αυτοματισμού έχει νόημα μόνο για τη συγκεκριμένη διάταξη ή συσκευή. Επιπλέον, η περιγραφή του περιβάλλοντος δίνει πληροφορίες για τις συνθήκες στις οποίες ο αυτοματισμός πρέπει να λειτουργεί καθώς και για τους περιορισμούς που πρέπει να αντιμετωπίσει.

Το σχήμα 8.3α παρουσιάζει ένα παράδειγμα βιομηχανικής εφαρμογής. Πρόκειται για μια πρέσα θερμής συγκολλήσεως. Η πρέσα αποτελείται από έναν υδραυλικό κύλινδρο με έμβολο, στο άκρο του οποίου υπάρχει ένα ηλεκτρικό θερμαντικό στοιχείο. Τα υλικά που πρόκειται να συγκολληθούν (σε μορφή φύλλων) τοποθετούνται μεταξύ του εμβόλου του υδραυλικού κυλίνδρου και της βάσεως της πρέσας. Όταν ο κύλινδρος ενεργοποιηθεί, συμπιέζει τα δύο υλικά μεταξύ τους. Όταν το θερμαντικό στοιχείο ενεργοποιηθεί, θερμαίνει τα υλικά. Με αυτές τις δύο ενέργειες το πλαστικό από το οποίο αποτελούνται τα υλικά, «λιώνει» και τα δύο φύλλα ενώνονται σε ένα σώμα, δηλαδή συγκολλούνται.

Η πρέσα συγκολλήσεως λειτουργεί υπό την επί-

βλεψη ενός χειριστή, ο οποίος τοποθετεί τα υλικά προς συγκόλληση πάνω στη βάση της πρέσας. Ελέγχει την ενεργοποίηση του υδραυλικού κυλίνδρου και του θερμαντικού στοιχείου και, αφού ολοκληρωθεί η συγκόλληση, απομακρύνει τα συγκολλημένα υλικά.

8.3.2 Στόχος του συστήματος αυτοματισμού.

Ο στόχος του συστήματος αυτοματισμού είναι η συγκεκριμένη συμπεριφορά, την οποία το σύστημα αυτοματισμού πρέπει να εξασφαλίζει. Ο στόχος συνδέεται στενά με την περιγραφή της διατάξεως ή εφαρμογής, επειδή έτσι αποκτά νόημα μόνο για τις συγκεκριμένες συνθήκες και προδιαγραφές του περιβάλλοντος του συστήματος αυτοματισμού. Εξάλλου, ακόμη και ένας στόχος που είναι επιθυμητός σε διαφορετικές εφαρμογές, μπορεί για κάποιες να είναι ανέφικτος ή αντιοικονομικός.

Στην περίπτωση του παραδείγματος της πρέσας συγκολλήσεως ο στόχος του συστήματος αυτοματισμού είναι πολλαπλός:

α) Το σύστημα αυτοματισμού πρέπει να συμπεριέχει τα δύο υλικά για αρκετό χρονικό διάστημα έτσι ώστε οι επιφάνειες που θα συγκολληθούν να διατηρούνται σε επαφή. Οι δοκιμές συγκολλήσεως έδειξαν ότι το διάστημα αυτό δεν χρειάζεται να ξεπερνά τα 20 δευτερόλεπτα. Παρατεταμένη συμπίεση μπορεί να προξενήσει μόνιμη παραμόρφωση στα υλικά.

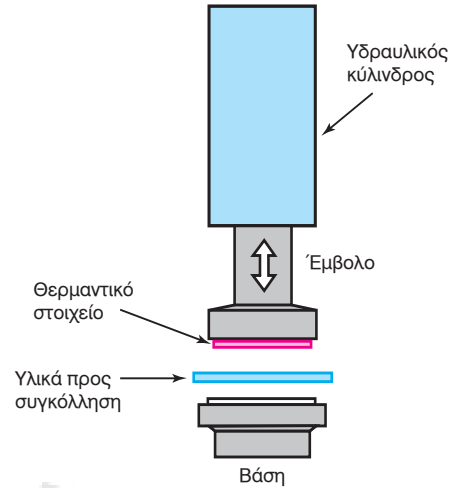
β) Ο αυτοματισμός πρέπει να διατηρεί τη θερμοκρασία της ενώσεως κάτω από τους 70 °C. Υψηλότερες θερμοκρασίες αλλοιώνουν το πλαστικό υλικό και η αντοχή του συγκολλημένου υλικού μειώνεται.

γ) Ο αυτοματισμός πρέπει να εξασφαλίζει ότι ο χειριστής της πρέσας, αφού τροφοδοτήσει την πρέσα με υλικά, έχει απομακρύνει τα χέρια του από το σημείο της συγκολλήσεως. Κατά την κάθοδό του, το έμβολο κινείται πολύ γρήγορα και με μεγάλη δύναμη και αποτελεί κίνδυνο για το χειριστή.

Όπως παρουσιάζει το σχήμα 8.3β, οι επιμέρους στόχοι αφορούν σε στοιχεία στην περιοχή της συγκολλήσεως, διότι εκεί επιτελείται και η βασική λειτουργία της πρέσας.

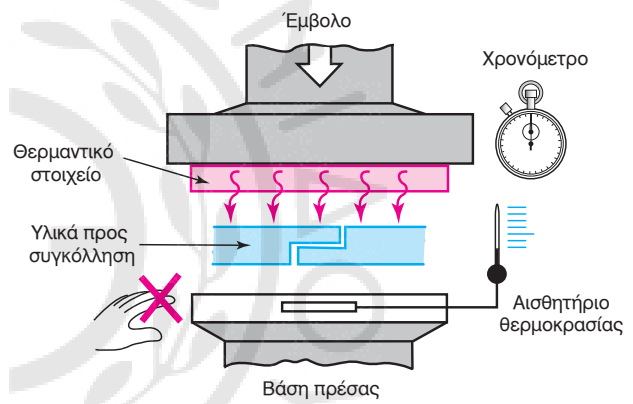
8.4 Περιγραφή σημάτων και συνδέσεων.

Η επιτυχημένη λύση αυτοματισμού με ΠΛΕ αξιοποιεί την υπολογιστική δύναμη και ευελιξία του ΠΛΕ, τον οποίο μπορούμε να προγραμματίσουμε, ώστε να επιτυγχάνει κατάλληλη επεξεργασία των πληροφοριών. Η μορφή αυτής της επεξεργασίας εξαρτάται από τις διαθέσιμες πληροφορίες. Άρα, η ανάπτυξη της λύσεως αυτοματισμού με ΠΛΕ προϋ-



Σχ. 8.3α.

Πρέσα (θερμής) συγκολλήσεως με ταυτόχρονη θέρμανση.



Σχ. 8.3β.

Η διαδικασία της θερμής συγκολλήσεως.

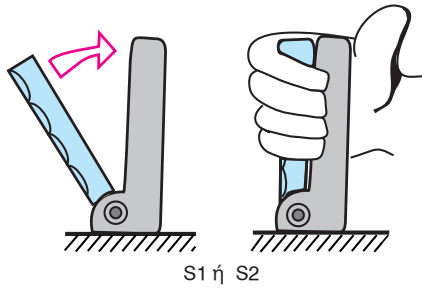
ποθέτει ότι καταρχήν γνωρίζουμε ποιες είναι οι διαθέσιμες πληροφορίες και ποιο είναι το περιεχόμενό τους.

Ειδικότερα, η επεξεργασία της λύσεως αυτοματισμού στηρίζεται σε προηγούμενη αναγνώριση και καταγραφή:

- Των παραμέτρων, που το σύστημα αυτοματισμού δέχεται από το περιβάλλον και ονομάζονται **σήματα εισόδου** ή **μεταβλητές εισόδου** ή **απλά εισόδοι** και
- των παραμέτρων, που το σύστημα αυτοματισμού μπορεί να επηρεάζει και ονομάζονται **σήματα εξόδου** ή **μεταβλητές εξόδου** ή **απλά εξόδοι**.

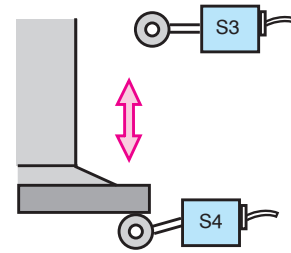
8.4.1 Είσοδοι.

Κάθε σήμα εισόδου παράγεται από αντίστοιχο αισθητήριο ή διάταξη εισόδου. Η πιο σημαντική πληροφορία σχετικά με ένα σήμα εισόδου είναι η



Σχ. 8.4α.

Ο χειροδιακόπτης ασφαλείας.



Σχ. 8.4β.

Οι διακόπτες θέσεως του εμβόλου.

αναγνώριση του οργάνου που το παράγει. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του οργάνου, το σήμα εισόδου μπορεί να αντιστοιχεί σε λογική μεταβλητή, δηλαδή να παίρνει δύο ηλεκτρικές τιμές, που να αντιστοιχούν στις λογικές καταστάσεις «Αληθής» και «Ψευδής». Το σήμα εισόδου μπορεί να είναι αναλογικό και να παίρνει συνεχείς τιμές σε ένα διάστημα.

Στην περίπτωση του παραδείγματος της πρέσας συγκολλήσεως, το σύστημα αυτοματισμού δέχεται διάφορα λογικά (ψηφιακά) και αναλογικά σήματα. Το σχήμα 8.4α απεικονίζει έναν από τους δύο πανομοιότυπους χειροδιακόπτες ασφαλείας, που διαθέτει η πρέσα. Πρόκειται για μηχανικούς διακόπτες, που βρίσκονται τοποθετημένοι σε ασφαλή απόσταση από το σημείο συγκολλήσεως. Όταν ένας χειροδιακόπτης ενεργοποιηθεί, δίνει ένδειξη ότι ο χειριστής έχει τοποθετήσει το χέρι του στο διακόπτη και επομένως το έχει απομακρύνει από την επικίνδυνη ζώνη της πρέσας.

Ο χειροδιακόπτης είναι συνδεδεμένος ως «κανο-

νικά ανοικτός», δηλαδή στην κατάσταση ηρεμίας δεν άγει. Η επιλογή αυτή είναι η ασφαλέστερη, επειδή, εάν ο διακόπτης ήταν κανονικά κλειστός, σε περίπτωση διακοπής της ηλεκτρικής τροφοδοσίας το όργανο αυτό θα έδινε την εσφαλμένη ένδειξη ότι τα χέρια του χειριστή είναι ασφαλή. Ο πίνακας 8.4.1 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των σημάτων εισόδου S1 και S2, που αντιστοιχούν στον αριστερό και δεξιό χειροδιακόπτη ασφαλείας.

Η βιομηχανική διάταξη του παραδείγματος περιλαμβάνει επίσης δύο μηχανικούς διακόπτες με τροχίσκο, τοποθετημένους στα άκρα της διαδρομής του εμβόλου, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 8.4β. Όταν ένας από τους διακόπτες ενεργοποιηθεί, δίνει ένδειξη ότι το έμβολο βρίσκεται στην αντίστοιχη θέση.

Ο πίνακας 8.4.2 που ακολουθεί καταγράφει τα χαρακτηριστικά των σημάτων εισόδου S3 και S4, που αντιστοιχούν στην ανώτερη και στην κατώτερη θέση της διαδρομής του εμβόλου.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.4.1.

Αναγνώριση εισόδων S1 και S2.

Είσοδος	Όργανο	Ηλεκτρικό σήμα	Λειτουργία
S1	Αριστερός (ΑΡ) χειροδιακόπτης, φέρει ένδειξη.	0 ή 12 V συνεχούς ρεύματος.	(Κλειστός/Ανοικτός) κλειστός (12 V), όταν πιέζεται από το χέρι. Ανοικτός (0 V) στην ελεύθερη θέση.
S2	Δεξιός (ΔΕ) χειροδιακόπτης, φέρει ένδειξη.	0 ή 12 V συνεχούς ρεύματος.	(Κλειστός/Ανοικτός) κλειστός (12 V), όταν πιέζεται από το χέρι. Ανοικτός (0 V) στην ελεύθερη θέση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.4.2.

Αναγνώριση εισόδων S3 και S4.

Είσοδος	Όργανο	Ηλεκτρικό σήμα	Λειτουργία
S3	Άνω διακόπτης θέσεως, φέρει ένδειξη «S3».	0 ή 12 V συνεχούς ρεύματος.	(Κλειστός/Ανοικτός) κλειστός (12 V), όταν το έμβολο ανέβει. Ανοικτός (0 V) στην ελεύθερη θέση.
S4	Κάτω διακόπτης θέσεως, φέρει ένδειξη «S4».	0 ή 12 V συνεχούς ρεύματος.	(Κλειστός/Ανοικτός) κλειστός (12 V), όταν το έμβολο κατέβει. Ανοικτός (0 V) στην ελεύθερη θέση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.4.3.
Αναγνώριση εισόδου TMP.

Είσοδος	Όργανο	Ηλεκτρικό σήμα	Λειτουργία
TMP	Αναλογικό θερμόμετρο ενσωματωμένο στη βάση της πρέσας.	0 έως 10 V	Περιοχή λειτουργίας από 20 έως 220 °C. Συντελεστής μετατροπής 0,05 Volt ανά βαθμό Κελσίου.

Η πρέσα συγκολλήσεως διαθέτει επίσης και ένα αναλογικό όργανο μετρήσεως της θερμοκρασίας, προσαρμοσμένο στη βάση της, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 8.4γ. Το όργανο περιέχει το καθαυτό αισθητήριο θερμοκρασίας και μια ηλεκτρονική διάταξη, που ενισχύει το σήμα το οποίο παράγεται από το αισθητήριο και το μετατρέπει σε ηλεκτρική τάση με μέγεθος ανάλογο προς τη θερμοκρασία.

Στον πίνακα 8.4.3 καταγράφονται τα χαρακτηριστικά του σήματος εισόδου TMP, το οποίο αντιστοιχεί στη μέτρηση της θερμοκρασίας συγκολλήσεως.

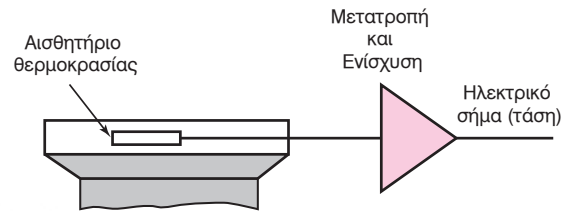
8.4.2 Έξοδοι.

Το σύστημα αυτοματισμού πρέπει να παράγει ένα σήμα εξόδου για κάθε διαθέσιμο όργανο, η λειτουργία του οποίου επηρεάζει το στόχο του αυτοματισμού. Η σημαντικότερη πληροφορία σχετικά με ένα σήμα εξόδου είναι η αναγνώριση του οργάνου που ελέγχεται από τον ΠΛΕ μέσω του συγκεκριμένου σήματος. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του οργάνου, το σήμα εξόδου μπορεί να αντιστοιχεί σε λογική μεταβλητή, δηλαδή να παίρνει δύο ηλεκτρικές τιμές, που να αντιστοιχούν στις λογικές καταστάσεις «Αληθής» και «Ψευδής». Ακόμη, το σήμα εξόδου μπορεί να είναι αναλογικό και να παίρνει συνεχείς τιμές σε ένα διάστημα.

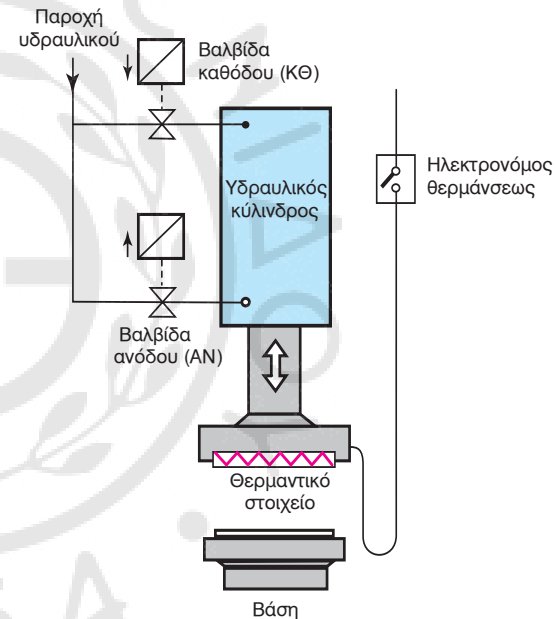
Στην περίπτωση του παραδείγματος της πρέσας συγκολλήσεως, το σύστημα αυτοματισμού παράγει τρία λογικά σήματα εξόδου, που απευθύνονται σε ισάριθμα όργανα δράσεως. Το σχήμα 8.4δ παρουσιάζει τη θέση και το ρόλο των οργάνων αυτών στη γενική διάταξη της πρέσας.

Η παροχή υδραυλικού υγρού υψηλής πίεσεως στον υδραυλικό κύλινδρο ελέγχεται από δύο ηλεκτρομαγνητικές υδραυλικές βαλβίδες δύο θέσεων (ανοικτή ή κλειστή). Η μια βαλβίδα παρέχει υδραυλικό υγρό στο άνω διαμέρισμα του κυλίνδρου και προκαλεί την έκταση, δηλαδή την κάθοδο του εμβόλου και επομένως τη συμπίεση των υλικών στην πρέσα συγκολλήσεως. Η άλλη βαλβίδα παρέχει υδραυλικό υγρό στο κάτω διαμέρισμα του κυλίνδρου και προκαλεί τη συστολή, δηλαδή την άνοδο του εμβόλου.

Επίσης, η πρέσα διαθέτει θερμαντικό στοιχείο,



Σχ. 8.4γ.
Όργανο θερμοκρασίας.



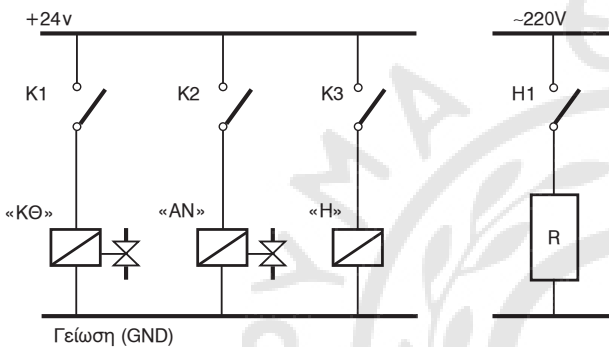
Σχ. 8.4δ.
Όργανα δράσεως της πρέσας.

ενσωματωμένο στην πλάκα πίεσεως του εμβόλου. Το θερμαντικό στοιχείο είναι μια ηλεκτρική αντίσταση, η τροφοδοσία της οποίας ελέγχεται από την επαφή ενός ηλεκτρονόμου.

Το σχήμα 8.4ε παρουσιάζει τον τρόπο συνδέσεως των εξόδων του ΠΛΕ με τα όργανα δράσεως. Όπως δείχνει το κύκλωμα επαφών στην αριστερή πλευρά του σχήματος, η λογική έξοδος K1 του προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή ελέγχει την ενεργοποίηση του πηνίου της υδραυλικής βαλβίδας «ΚΘ» για την κάθοδο του εμβόλου. Ομοίως, η έξοδος K2 ελέγχει το πηνίο της βαλβίδας «ΑΝ» για την άνοδο του εμβόλου. Ακόμη η λογική έξοδος K3

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.4.4.
Αναγνώριση εξόδων.

Έξοδος	Όργανο	Ηλεκτρικό σήμα	Λειτουργία
K1	Πηνίο υδραυλικής βαλβίδας για την κάθοδο του εμβόλου.	0 ή 24 V	Εφόσον είναι «Αληθής», η βαλβίδα παρέχει υδραυλικό υγρό στο άνω διαμέρισμα του κυλίνδρου.
K2	Πηνίο υδραυλικής βαλβίδας για την άνοδο του εμβόλου.	0 ή 24 V	Εφόσον είναι «Αληθής», η βαλβίδα παρέχει υδραυλικό υγρό στο κάτω διαμέρισμα του κυλίνδρου.
K3	Ηλεκτρονόμος τροφοδοσίας θερμομαντικού στοιχείου.	0 ή 24 V	Εφόσον είναι «Αληθής», ο ηλεκτρονόμος παρέχει 220 V (εναλλασσόμενου ρεύματος) στην αντίσταση του θερμομαντικού στοιχείου.



Σχ. 8.4ε.

Κύκλωμα επαφών των εξόδων του ΠΑΕ.

ελέγχει το πηνίο του ηλεκτρονόμου Η. Μια επαφή αυτού του ηλεκτρονόμου (η Η1 στο σχήμα) ελέγχει με τη σειρά της την τροφοδοσία της ηλεκτρικής αντίστασης, που θερμαίνει την περιοχή της συγκολλησεως.

Ο πίνακας 8.4.4 που ακολουθεί παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των σημάτων εξόδου για τον έλεγχο της κινήσεως του υδραυλικού κυλίνδρου και του θερμομαντικού στοιχείου.

8.5 Περιγραφή της λύσεως αυτοματισμού.

Η βασική «λογική» οποιασδήποτε λύσεως αυτοματισμού μπορεί και πρέπει να περιγράφεται λεκτικά, με απλές φράσεις που να αποδίδουν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί το σύστημα αυτοματισμού.

Στην περίπτωση του παραδείγματος της πρέσας συγκολλησεως, η λειτουργία του συστήματος αυτοματισμού συνοψίζεται στις διαδικασίες που περιγράφονται παρακάτω.

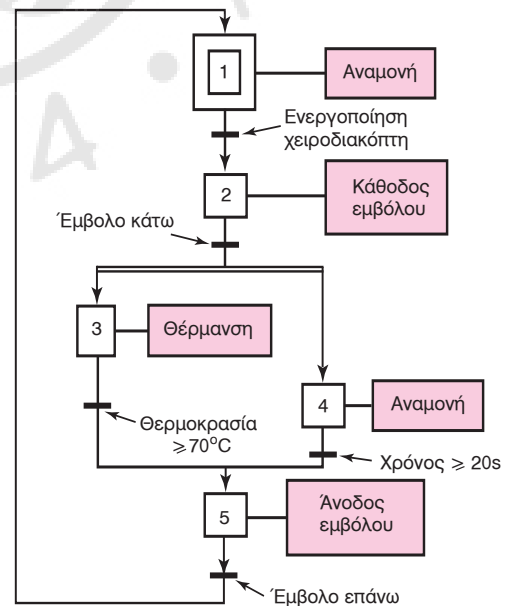
- Αρχικά, το έμβολο βρίσκεται στην άνω θέση και ο χειριστής έχει τοποθετήσει τα υλικά προς συγκόλληση στη βάση της πρέσας. Όταν ο χειριστής ενεργοποιήσει ταυτόχρονα τους δύο χει-

ροδιακόπτες, το έμβολο κατεβαίνει και την ίδια στιγμή το θερμομαντικό στοιχείο τροφοδοτείται με ηλεκτρικό ρεύμα.

- Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί την εξέλιξη της θερμοκρασίας της συγκολλησεως καθώς και το χρόνο από την αρχή της συμπίεσεως. Εάν η θερμοκρασία ξεπεράσει το προκαθορισμένο όριο των 70 °C ή εάν παρέλθει ο κανονικός χρόνος συμπίεσεως των 20 δευτερολέπτων, η συγκόλληση έχει ολοκληρωθεί. Το έμβολο ανεβαίνει και η ηλεκτρική τροφοδοσία του θερμομαντικού στοιχείου διακόπτεται.

- Ο χειριστής απομακρύνει το συγκολλημένο υλικό, τοποθετεί νέα υλικά στην πρέσα και ο κύκλος ξαναρχίζει.

Το σχήμα 8.5 παρουσιάζει αυτή τη λογική του



Σχ. 8.5.

Διάγραμμα φάσεων (GRAFSET) για το σύστημα αυτοματισμού της πρέσας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.5.1.
Περιγραφή φάσεων και μεταβάσεων του διαγράμματος GRAFCET.

Φάση		Μετάβαση	
1	Αναμονή, καμμία κίνηση.	1/2	Ταυτόχρονη ενεργοποίηση του δεξιού και του αριστερού χειροδιακόπτη S1 και S2.
2	Κάθοδος εμβόλου, ενεργοποίηση πηνίου «ΚΘ» μέσω της εντολής K1.	2/3 2/4	Ενεργοποίηση του διακόπτη στην κάτω θέση του εμβόλου S4.
3	Θέρμανση, ενεργοποίηση πηνίου «Η» μέσω της εντολής K3.	3/5	Μετρούμενη θερμοκρασία TMP μεγαλύτερη ή ίση από 70 °C.
4	Αναμονή για χρονικό διάστημα 20 δευτερολέπτων, καμμία κίνηση.	4/5	Χρόνος αναμονής από την αρχή της συμπίεσως ίσος με 20 δευτερόλεπτα.
5	Άνοδος εμβόλου, ενεργοποίηση πηνίου «ΑΝ» μέσω της εντολής K2	5/1	Ενεργοποίηση του διακόπτη στην άνω θέση του εμβόλου S3.

αυτοματισμού με τη μορφή διαγράμματος φάσεων (GRAFCET). Πρόκειται για ένα κυκλικό διάγραμμα με πέντε φάσεις και πέντε μεταβάσεις.

Το διάγραμμα φάσεων συνοδεύεται από αναλυτικότερη περιγραφή του περιεχομένου των φάσεων και των μεταβάσεων. Ειδικότερα, ο πίνακας 8.5.1 περιγράφει τις εργασίες που περιλαμβάνονται σε κάθε φάση αναφέροντας τα συγκεκριμένα όργανα που ενεργοποιούνται, καθώς επίσης και τα σήματα εισόδου που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συνθήκης για κάθε μετάβαση.

8.6 Συνδεσμολογία και προγραμματισμός του ΠΛΕ.

Ανεξάρτητα από τη μορφή στην οποία αποτυπώνεται το πρόγραμμα του ΠΛΕ, γραφική μορφή ή λίστα εντολών, πρέπει απαραίτητα να συνοδεύεται από αναλυτική κατάσταση, που να περιγράφει όλες τις χρησιμοποιούμενες μεταβλητές. Αυτή η κατάσταση σχηματίζεται ταυτόχρονα με την ανάπτυξη του κώδικα και αποτυπώνει την επιλογή των πλέον κατάλληλων μονάδων εισόδου, εξόδου, μνήμης και επεξεργασίας που ο ΠΛΕ διαθέτει, για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του συστήματος αυτοματισμού.

Ο πίνακας 8.6.1 παρουσιάζει ένα παράδειγμα καταστάσεως μεταβλητών για έναν υποθετικό ΠΛΕ, που θα εξυπηρετήσει την αυτοματοποιημένη λειτουργία της πρέσας συγκολλήσεως. Η πρώτη στήλη του πίνακα αναφέρει την ονομασία της παραμέτρου, όπως αυτή χρησιμοποιείται κατά τον προγραμματισμό του ελεγκτή (π.χ. Π1.2). Η δεύτερη στήλη αναφέρει το συμβολικό όνομα του εξωτερι-

κού σήματος, που αντιστοιχεί (εφόσον υπάρχει) σε αυτήν την παράμετρο (π.χ. S2). Η τρίτη στήλη αναφέρει τα ειδικότερα χαρακτηριστικά της παραμέτρου και επιπρόσθετα τη σύνδεση της παραμέτρου με μια μονάδα (κάρτα) εισόδων ή εξόδων.

Στο παράδειγμα του πίνακα 8.6.1 οι εισοδοί που αντιστοιχούν στους διακόπτες S1, S2, S3 και S4 φιλοξενούνται στην κάρτα εισόδων που καταλαμβάνει τη θέση με αριθμό 1 στο σύστημα επεκτάσεως του ΠΛΕ. Η κάρτα αυτή αντιλαμβάνεται τις λογικές στάθμες «Αληθής» ή «Ψευδής» (True ή False) με ηλεκτρική τάση 0 ή 12 V αντίστοιχα.

Η αναλογική είσοδος της θερμοκρασίας υποστηρίζεται από διαφορετική κάρτα (αναλογικών εισόδων), εγκατεστημένη στη θέση με αριθμό 4. Όπως αναφέρεται στον πίνακα, αυτή η μονάδα εισόδου δέχεται τάσεις στην περιοχή 0 έως 10 V και τις μετατρέπει σε δυαδικές λέξεις των οκτώ bit, δηλαδή σε δεκαδικές τιμές 0 έως 255. Επομένως, το όργανο θερμοκρασίας αρχίζει να μετρά από τους 20 βαθμούς, με βήμα 0,1 V ανά βαθμό και συνολικό εύρος 200 βαθμούς. Άρα οι 70 βαθμοί αντιστοιχούν σε τιμή της τάσεως $(70 - 20) \times 0,05 = 2,5$ V. Η δεκαδική τιμή που αντιστοιχεί είναι $255 \times 2,5 / 10 = 64$.

Οι εξοδοί K1 και K2 χρησιμοποιούν μια κάρτα, εγκατεστημένη στη δεύτερη θέση. Η κάρτα αυτή παράγει σήματα τάσεως 0 ή 24 V και μπορεί να παράσχει στα πηνία των υδραυλικών βαλβίδων το αναγκαίο ρεύμα (στον πίνακα 8.6.1 εκτιμάται σε 250 mA). Η έξοδος K3, λόγω της χαμηλότερης απαιτήσεως του ηλεκτρονόμου σε ρεύμα, μπορεί να χρησιμοποιήσει μια ξεχωριστή κάρτα εξόδων μικρότερης

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.6.1.
Κατάσταση μεταβλητών του προγράμματος της πρέσας.

Μνήμη	Σήμα	Είδος	Περιοχή λειτουργίας / μονάδα
I1.1	S1	Λογική είσοδος	0 ή 12 V (κάρτα εισόδων #1).
I1.2	S2	Λογική είσοδος	0 ή 12 V (κάρτα εισόδων #1).
I1.3	S3	Λογική είσοδος	0 ή 12 V (κάρτα εισόδων #1).
I1.4	S4	Λογική είσοδος	0 ή 12 V (κάρτα εισόδων #1).
DW4.2	TMP	Αναλογική είσοδος	0 έως 255 (οκτώ bit σε δυαδική απεικόνιση), αντιστοιχεί σε τάσεις εισόδου 0-10 V (κάρτα αναλογικών εισόδων #4).
Q2.1	K1	Λογική έξοδος	0 ή 24 V, 250 mA (κάρτα εξόδων #2).
Q2.2	K2	Λογική έξοδος	0 ή 24 V, 250 mA (κάρτα εξόδων #2).
Q3.1	K3	Λογική έξοδος	0 ή 24 V, 100 mA (κάρτα εξόδων #3).
T1	-	Χρονικό	0 έως 100 sec.

ισχύος, τοποθετημένη στην 3η θέση.

Οι μεταβλητές αυτές χρησιμοποιούνται στον παρακάτω κώδικα προγράμματος για ΠΛΕ.

```

-----
A I1.1 Αριστερός χειροδιακόπτης.
A I1.2 Δεξιός χειροδιακόπτης.
A I1.3 Έμβολο στην άνω θέση.
S Q2.1 Κάθοδος του εμβόλου.
-----
A I1.4 Έμβολο στην κάτω θέση.
S Q3.1 Θέρμανση.
-----
A I1.4 Έμβολο στην κάτω θέση.
KT 20S Φόρτωση χρόνου αναμονής 20 sec.
SD T1 Διέγερση της χρονικής λειτουργίας T1.
-----
L T1 Εκπνοή της χρονικής διάρκειας.
S Q2.2 Άνοδος του εμβόλου.
R Q3.1 Διακοπή της θερμάνσεως.
-----
L DW4.2 Ανάκτηση της θερμοκρασίας.
L KD64 Φόρτωση δεκαδικής τιμής 64.
>= Σύγκριση.
S Q2.2 Άνοδος του εμβόλου.
R Q3.1 Διακοπή της θερμάνσεως.

```

```

-----
A I1.3 Έμβολο στην άνω θέση.
R Q2.2 Διακοπή της ανόδου του εμβόλου.

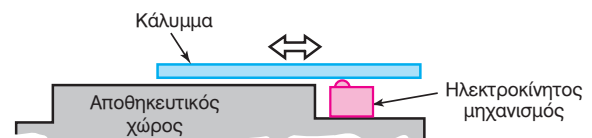
```

8.7 Παράδειγμα: έλεγχος θέσεως.

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει ένα απλό πρόβλημα αυτοματισμού, το οποίο επιλύεται με χρήση Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή. Η παρουσίαση ακολουθεί τη διαδικασία και τα στάδια επιλύσεως και τεκμηριώσεως που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

8.7.1 Περιβάλλον και στόχος του συστήματος αυτοματισμού.

Το σχήμα 8.7α παρουσιάζει ένα απλό σύστημα σφραγίσεως αποθηκευτικού χώρου (αμπαριού φορτηγού πλοίου) με συρόμενο κάλυμμα. Το κάλυμμα συνδέεται με ηλεκτροκίνητο μηχανισμό, ο οποίος είναι σε θέση να το μετατοπίζει μεταξύ δύο ακραίων θέσεων: την πλήρη σφράγιση (τοποθέτη-



Σχ. 8.7α.

Σύστημα σφραγίσεως αποθηκευτικού χώρου.

ση του καλύμματος στο στόμιο του αποθηκευτικού χώρου) και την πλήρη αποκάλυψη (μέγιστη απόσυρση του καλύμματος από το στόμιο).

Η σφράγιση του αποθηκευτικού χώρου γίνεται υπό την επίβλεψη ενός χειριστή. Ο στόχος του συστήματος αυτοματισμού είναι διπλός:

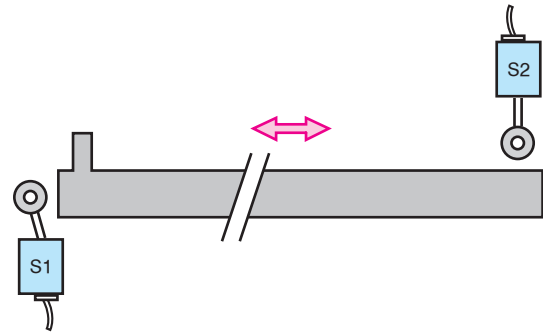
α) Να εξασφαλίζει ότι η τοποθέτηση του καλύμματος μεταξύ των ανωτέρω δύο ακραίων θέσεων ακολουθεί τις εντολές του χειριστή.

β) Να ενημερώνει, με κατάλληλες ενδείξεις, το χειριστή σχετικά με την τρέχουσα θέση του καλύμματος.

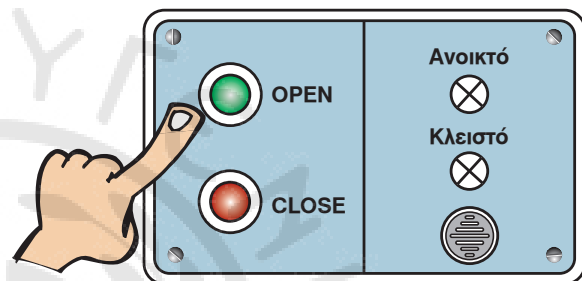
8.7.2 Περιγραφή εισόδων.

Το σύστημα αυτοματισμού δέχεται από το περιβάλλον τέσσερα λογικά (On/Off) σήματα εισόδου από ισάριθμα αισθητήρια. Ειδικότερα, η αναγνώριση της θέσεως του καλύμματος μεταξύ των ακραίων θέσεων (σφράγιση και αποκάλυψη) επιτυγχάνεται με δύο μηχανικούς διακόπτες με τροχίσκο, κατάλληλα τοποθετημένους στα άκρα της διαδρομής του καλύμματος, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 8.7β. Όταν ένας διακόπτης ενεργοποιηθεί (αλλάξει κατάσταση), δίνει ένδειξη ότι το κάλυμμα βρίσκεται στην αντίστοιχη θέση.

Επίσης, η αντίληψη των εντολών του χειριστή επιτυγχάνεται με δύο ηλεκτρομηχανικούς διακόπτες πλήκτρου, τοποθετημένους στον πίνακα ελέγχου και χειρισμού του συστήματος αυτοματισμού, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 8.7γ. Κάθε πλήκτρο αντιστοιχεί στην επιθυμητή κίνηση του καλύ-



Σχ. 8.7β.
Διακόπτες θέσεως του καλύμματος.



Σχ. 8.7γ.
Πίνακας ελέγχου και χειρισμού.

ματος προς την αντίστοιχη ακραία θέση, δηλαδή σε εντολή σφραγίσεως ή αποκαλύψεως.

Ο πίνακας 8.7.1 καταγράφει τα χαρακτηριστικά των σημάτων εισόδου S1 έως S4 που αντιστοιχούν στις ανωτέρω αναφερθείσες εισόδους του συστήματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.7.1.
Αναγνώριση εισόδων.

Είσοδος	Όργανο	Ηλεκτρικό σήμα	Λειτουργία
S1	Διακόπτης αναγνώρισεως θέσεως σφραγίσεως, φέρει ένδειξη "S1".	0 ή 12 V συνεχούς ρεύματος.	Τύπος "Κανονικά Ανοικτός". Κλειστός (12 V), όταν το κάλυμμα σφραγίσει το στόμιο. Ανοικτός (0 V) στην ελεύθερη θέση.
S2	Διακόπτης αναγνώρισεως θέσεως αποκαλύψεως, φέρει ένδειξη "S2".	0 ή 12 V συνεχούς ρεύματος.	Τύπος "Κανονικά Ανοικτός". Κλειστός (12 V), όταν το κάλυμμα απομακρυνθεί από το στόμιο. Ανοικτός (0 V) στην ελεύθερη θέση.
S3	Πλήκτρο εντολής σφραγίσεως, φέρει ένδειξη "CLOSE".	0 ή 12 V συνεχούς ρεύματος.	Τύπος "Κανονικά Ανοικτός". Κλειστός (12 V), όταν πιέζεται από το χειριστή. Ανοικτός (0 V) στην ελεύθερη θέση.
S4	Πλήκτρο εντολής αποκαλύψεως, φέρει ένδειξη "OPEN".	0 ή 12 V συνεχούς ρεύματος.	Τύπος "Κανονικά Ανοικτός". Κλειστός (12 V), όταν πιέζεται από το χειριστή. Ανοικτός (0 V) στην ελεύθερη θέση.

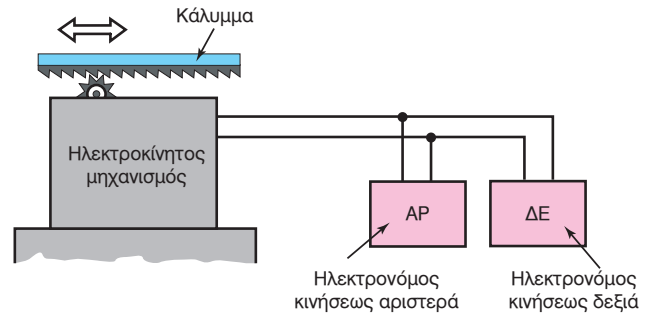
8.7.3 Περιγραφή εξόδων.

Η ηλεκτρική τροφοδοσία του μηχανισμού κινήσεως του καλύμματος ελέγχεται από δύο ηλεκτρονόμους. Το σχήμα 8.7δ παρουσιάζει τη θέση και το ρόλο των οργάνων αυτών στη διάταξη του συστήματος σφραγίσεως.

Επίσης, η τρέχουσα κατάσταση της θέσεως του καλύμματος παρουσιάζεται στο χειριστή με τρεις ενδείξεις: δύο οπτικές που αντιστοιχούν στις δύο ακραίες θέσεις του καλύμματος και μια ηχητική που αντιστοιχεί σε ενδιάμεση (απροσδιόριστη) θέση.

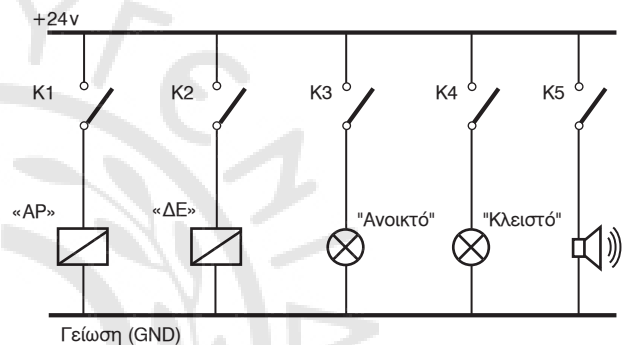
Το σχήμα 8.7ε παρουσιάζει τον τρόπο συνδέσεως των εξόδων του ΠΛΕ με τα όργανα δράσεως. Όπως δείχνει το κύκλωμα επαφών στην αριστερή πλευρά του σχήματος, η λογική έξοδος Κ1 του προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή ελέγχει την ενεργοποίηση του πηνίου του ηλεκτρονόμου "ΔΕ" για τη μετακίνηση του καλύμματος προς τη θέση σφραγίσεως. Ομοίως, η έξοδος Κ2 ελέγχει το πηνίο του ηλεκτρονόμου "ΑΡ" για τη μετακίνηση του καλύμματος προς τη θέση αποκαλύψεως. Επίσης, οι λογικές εξόδους Κ3 έως Κ5 ελέγχουν τα πηνία ισαρίθμων ηλεκτρονόμων που παράγουν τις ανωτέρω αναφερόμενες ενδείξεις: "Κλειστό", "Ανοικτό" και ηχητική επισήμανση στον πίνακα ελέγχου και χειρισμού του σχήματος 8.7γ.

Ο πίνακας 8.7.2 καταγράφει τα χαρακτηριστικά



Σχ. 8.7δ.

Όργανα δράσεως του μηχανισμού κινήσεως του καλύμματος.



Σχ. 8.7ε.

Κύκλωμα επαφών των εξόδων του ΠΛΕ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.7.2.

Αναγνώριση εξόδων Κ1, Κ2 και Κ3.

Έξοδος	Όργανο	Ηλεκτρικό σήμα	Λειτουργία
K1	Ηλεκτρονόμος τροφοδοσίας του κινητήρα του μηχανισμού, φέρει ένδειξη "ΑΡ".	0 ή 24 V	Εφόσον είναι Αληθής, οι επαφές του πηνίου διατάσσουν την πολικότητα της ηλεκτρικής τροφοδοσίας του κινητήρα για μετακίνηση του καλύμματος προς τα αριστερά (σφράγιση).
K2	Ηλεκτρονόμος τροφοδοσίας του κινητήρα του μηχανισμού, φέρει ένδειξη "ΔΕ".	0 ή 24 V	Εφόσον είναι Αληθής, οι επαφές του πηνίου διατάσσουν την πολικότητα της ηλεκτρικής τροφοδοσίας του κινητήρα για μετακίνηση του καλύμματος προς τα δεξιά (απόσυρση).
K3	Ηλεκτρονόμος φωτεινής ενδείξεως "Κλειστό".	0 ή 24 V	Εφόσον είναι Αληθής, ο ηλεκτρονόμος παρέχει τροφοδοσία στην ενδεικτική λυχνία "Κλειστό" του πίνακα.
K4	Ηλεκτρονόμος φωτεινής ενδείξεως "Ανοικτό".	0 ή 24 V	Εφόσον είναι Αληθής, ο ηλεκτρονόμος παρέχει τροφοδοσία στην ενδεικτική λυχνία "Ανοικτό" του πίνακα.
K5	Ηλεκτρονόμος ηχητικής σημάνεως.	0 ή 24 V	Εφόσον είναι Αληθής, ο ηλεκτρονόμος παρέχει τροφοδοσία στην ηχητική ένδειξη (σειρήνα).

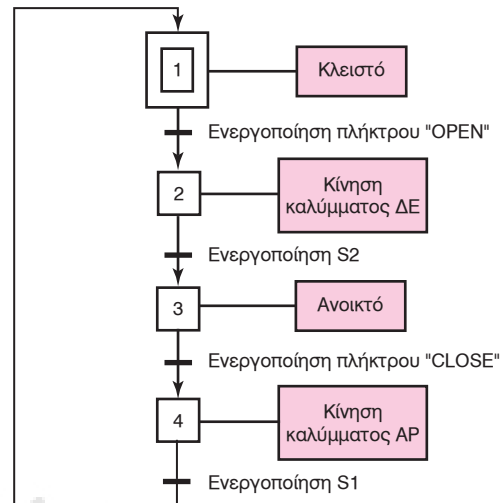
των σημάτων εξόδου για τον έλεγχο της κινήσεως του καλύμματος.

8.7.4 Περιγραφή της λύσεως αυτοματισμού.

Η λειτουργία του συστήματος αυτοματισμού συνοψίζεται στις διαδικασίες που περιγράφονται παρακάτω.

- Αρχικά το κάλυμμα βρίσκεται σε θέση σφραγίσεως και η αντίστοιχη ένδειξη φωτοβολεί. Όταν ο χειριστής ενεργοποιήσει το πλήκτρο OPEN, το κάλυμμα μετακινείται προς τα δεξιά (αποσύρεται) και ταυτόχρονα η σειρήνα ηχεί.
- Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί την άφιξη του καλύμματος στην ακραία δεξιά θέση (πλήρης απόσυρση). Όταν το κάλυμμα αποσυρθεί πλήρως, η λειτουργία της σειρήνας διακόπτεται και η αντίστοιχη ένδειξη φωτοβολεί.
- Όταν ο χειριστής ενεργοποιήσει το πλήκτρο CLOSE, το κάλυμμα μετακινείται προς τα αριστερά (σφραγίζει το στόμιο) και ταυτόχρονα η σειρήνα ηχεί.
- Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί την άφιξη του καλύμματος στην ακραία αριστερή θέση (σφράγιση). Όταν το κάλυμμα κλείσει πλήρως, η λειτουργία της σειρήνας διακόπτεται και η αντίστοιχη ένδειξη φωτοβολεί.

Το σχήμα 8.7στ παρουσιάζει αυτή τη λογική του αυτοματισμού με τη μορφή διαγράμματος φάσεων (GRAFSET). Πρόκειται για ένα κυκλικό διάγραμμα με τέσσερις φάσεις και ισάριθμες μεταβάσεις. Το διάγραμμα φάσεων συνοδεύεται από αναλυτικότερη περιγραφή του περιεχομένου των φάσεων και των μεταβάσεων στον πίνακα 8.7.3, ο οποίος περι-



Σχ. 8.7στ.

Διάγραμμα φάσεων (GRAFSET).

γράφει τις εργασίες που περιλαμβάνονται σε κάθε φάση αναφέροντας τα συγκεκριμένα όργανα που ενεργοποιούνται, καθώς επίσης και τα σήματα εισόδου που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συνθήκης για κάθε μετάβαση.

8.7.5 Συνδεσμολογία και προγραμματισμός του ΠΛΕ.

Ο πίνακας 8.7.4 παρουσιάζει ένα παράδειγμα καταστάσεως μεταβλητών για έναν υποθετικό ΠΛΕ, που θα εξυπηρετήσει την αυτοματοποιημένη λειτουργία της κινήσεως του καλύμματος. Η πρώτη στήλη του πίνακα αναφέρει την ονομασία της παραμέτρου, όπως αυτή χρησιμοποιείται κατά τον προγραμματισμό του ελεγκτή (π.χ. Π1.2). Η δεύτερη στήλη αναφέρει το συμβολικό όνομα του εξωτερικού σήματος που αντιστοιχεί (εφόσον υπάρχει) σ' αυτήν την

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.7.3.

Περιγραφή φάσεων και μεταβάσεων του διαγράμματος GRAFCET.

Φάση		Μετάβαση	
1	Κάλυμμα κλειστό. Η φωτεινή ένδειξη "Κλειστό" στον πίνακα ελέγχου και χειρισμού είναι ενεργή.	1/2	Ενεργοποίηση του διακόπτη πλήκτρου "Open".
2	Κίνηση του καλύμματος προς τα δεξιά. Ο ηλεκτρονόμος κινήσεως "ΔΕ" είναι ενεργός και η ηχητική ένδειξη (σειρήνα) σημαίνει.	2/3	Ενεργοποίηση του διακόπτη θέσεως S2.
3	Κάλυμμα ανοικτό. Η φωτεινή ένδειξη "Ανοικτό" στον πίνακα ελέγχου και χειρισμού είναι ενεργή.	3/4	Ενεργοποίηση του διακόπτη πλήκτρου "Close".
4	Κίνηση του καλύμματος προς τα αριστερά. Ο ηλεκτρονόμος κινήσεως "ΑΡ" είναι ενεργός και η ηχητική ένδειξη (σειρήνα) σημαίνει.	4/1	Ενεργοποίηση του διακόπτη θέσεως S2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.7.4.**Κατάσταση μεταβλητών του προγράμματος ελέγχου της κινήσεως του καλύμματος.**

Μνήμη	Σήμα	Είδος	Περιοχή λειτουργίας / μονάδα
I1.1	S1	Λογική είσοδος	0 ή 12 V (κάρτα εισόδων #1)
I1.2	S2	Λογική είσοδος	
I1.3	S3	Λογική είσοδος	
I1.4	S4	Λογική είσοδος	
Q2.1	K1	Λογική έξοδος	0 ή 24 V, 100 mA(κάρτα εξόδων #2)
Q2.2	K2	Λογική έξοδος	
Q2.3	K3	Λογική έξοδος	
Q2.4	K4	Λογική έξοδος	
Q2.5	K5	Λογική έξοδος	

παράμετρο (π.χ. S2). Η τρίτη στήλη αναφέρει τα ειδικότερα χαρακτηριστικά της παραμέτρου και επιπρόσθετα τη σύνδεση της παραμέτρου με μια μονάδα (κάρτα) εισόδων ή εξόδων.

Στο παράδειγμα του πίνακα, όλες οι εισόδοι (που αντιστοιχούν στους διακόπτες S1, έως και S4) φιλοξενούνται στην κάρτα εισόδων που καταλαμβάνει τη θέση με αριθμό 1 στο σύστημα επεκτάσεως του ΠΛΕ. Η κάρτα αυτή αντιλαμβάνεται τις λογικές στάθμες Αληθής ή Ψευδής (True ή False) με ηλεκτρική τάση 0 ή 12 V αντίστοιχα. Επίσης, όλες οι έξοδοι (που αντιστοιχούν στις επαφές K1 έως και K5) χρησιμοποιούν μια κάρτα εγκατεστημένη στη δεύτερη θέση. Η κάρτα αυτή παράγει σήματα τάσεως 0 ή 24 V και μπορεί να παράσχει στα πηνία των αντιστοιχών ηλεκτρονόμων το αναγκαίο ηλεκτρικό ρεύμα (στον πίνακα εκτιμάται κατά μέγιστο σε 100 mA).

Οι μεταβλητές αυτές χρησιμοποιούνται στον παρακάτω κώδικα προγράμματος για ΠΛΕ.

```
-----
A I1.4 πλήκτρο OPEN
S Q2.2 κίνηση αποσύρσεως
S Q2.5 σειρήνα ηχεί
```

```
-----
A I1.2 κάλυμμα ανοικτό
R Q2.2 διακοπή της κίνησης αποσύρσεως
R Q2.5 διακοπή της σειρήνας
S Q2.3 ένδειξη "Ανοικτό"
```

```
-----
A I1.3 πλήκτρο CLOSE
S Q2.1 κίνηση σφραγίσεως
S Q2.5 σειρήνα ηχεί
```

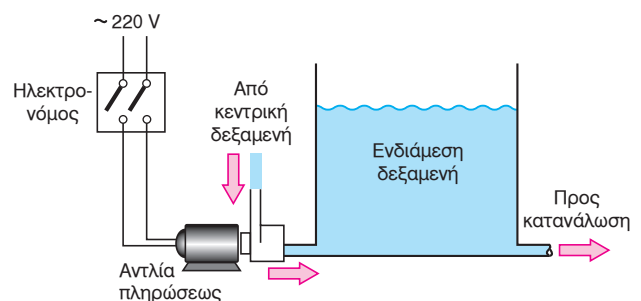
```
A I1.1 κάλυμμα κλειστό
R Q2.1 διακοπή της κινήσεως σφραγίσεως
R Q2.5 διακοπή της σειρήνας
S Q2.3 ένδειξη "Κλειστό"
```

8.8 Παράδειγμα: έλεγχος στάθμης.

Η δυνατότητα προγραμματισμού και η ευελιξία της διασυνδέσεως με διαφορετικά ελεγχόμενα συστήματα, καθιστούν τους ΠΛΕ κατάλληλους για ευρύ φάσμα εφαρμογών αυτοματισμού. Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει ένα παράδειγμα χρήσεως ΠΛΕ για τον έλεγχο μιας υδραυλικής διατάξεως.

8.8.1 Περιβάλλον και στόχος του συστήματος αυτοματισμού.

Το σχήμα 8.8α παρουσιάζει ένα απλό σύστημα ελέγχου της στάθμης μιας ενδιάμεσης δεξαμενής (π.χ. καυσίμου ή ύδατος). Η ενδιάμεση δεξαμενή τροφοδοτείται μέσω αντλίας από μια κεντρική δεξαμενή και παρέχει, ως εκροή, υγρό σε χρονικά διακυμαινόμενη κατανάλωση.

**Σχ. 8.8α.**

Σύστημα ενδιάμεσης δεξαμενής.

Ο στόχος του συστήματος αυτοματισμού είναι διπλός:

α) Να διατηρεί τη στάθμη της δεξαμενής μεταξύ του ανώτατου και του μέσου επιπέδου πληρώσεως, παρά τις διακυμάνσεις της καταναλώσεως.

β) Να ενημερώνει, με κατάλληλη ένδειξη, όταν η στάθμη πέσει κάτω από ένα ελάχιστο επίπεδο, όπως στην περίπτωση απρόβλεπτης ιδιαίτερα υψηλής καταναλώσεως, βλάβης της αντλίας, υδραυλικής διαρροής ή εξαντλήσεως του αποθέματος της κεντρικής δεξαμενής.

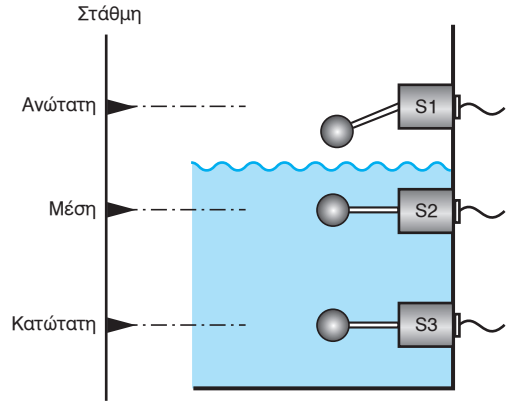
8.8.2 Περιγραφή εισόδων και εξόδων.

Το σύστημα αυτοματισμού δέχεται από το περιβάλλον τρία λογικά (On/Off) σήματα εισόδου από ισάριθμα αισθητήρια. Ειδικότερα, η αναγνώριση της πληρότητας της δεξαμενής επιτυγχάνεται με τρεις διακόπτες πλωτήρα, κατάλληλα τοποθετημένους στο επίπεδο της ανώτατης, της μέσης και της κατώτατης επιτρεπτής στάθμης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 8.8β. Όταν ένας διακόπτης ενεργοποιηθεί (αλλάξει κατάσταση), δίνει ένδειξη ότι η στάθμη βρίσκεται στην αντίστοιχη θέση.

Ο πίνακας 8.8.1 καταγράφει τα χαρακτηριστικά των σημάτων εισόδου S1 έως και S3 που αντιστοιχούν στις ανωτέρω αναφερθείσες εισόδους του συστήματος.

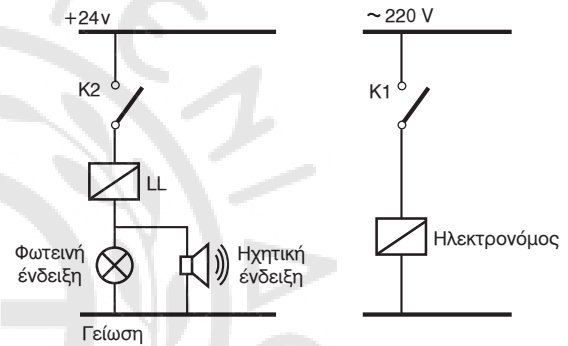
Επίσης, η ηλεκτρική τροφοδοσία της αντλίας πληρώσεως ελέγχεται από έναν ηλεκτρονόμο, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 8.8α.

Το σχήμα 8.8γ παρουσιάζει τον τρόπο συνδέσεως των εξόδων του ΠΛΕ με τα όργανα δράσεως. Όπως δείχνει το κύκλωμα επαφών στην δεξιά πλευρά του σχήματος, η λογική έξοδος K1 του προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή ελέγχει την ενεργοποίηση του πηνίου του ηλεκτρονόμου για την ηλεκτρική τροφοδοσία της αντλίας πληρώσεως. Η λογική έξοδος K2 ελέγχει το πηνίο του ηλεκτρονόμου "LL" που παράγει φωτεινή και ηχητική σήμανση.



Σχ. 8.8β.

Διακόπτες στάθμης της δεξαμενής.



Σχ. 8.8γ.

Κύκλωμα επαφών των εξόδων του ΠΛΕ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.8.1.
Αναγνώριση εισόδων.

Είσοδος	Όργανο	Ηλεκτρικό σήμα	Λειτουργία
S1	Διακόπτης πλωτήρα, αναγνώρισεως της ανώτατης στάθμης, φέρει ένδειξη "S1".	0 ή 12 V συνεχούς ρεύματος.	Τύπος "Κανονικά Ανοικτός". Κλειστός (12 V), όταν ο πλωτήρας ανυψωθεί. Ανοικτός (0 V) στην ελεύθερη θέση.
S2	Διακόπτης πλωτήρα, αναγνώρισεως της μέσης στάθμης, φέρει ένδειξη "S2".	0 ή 12 V συνεχούς ρεύματος.	Τύπος "Κανονικά Ανοικτός". Κλειστός (12 V), όταν ο πλωτήρας ανυψωθεί. Ανοικτός (0 V) στην ελεύθερη θέση.
S3	Διακόπτης πλωτήρα, αναγνώρισεως της κατώτερης στάθμης, φέρει ένδειξη "S3".	0 ή 12 V συνεχούς ρεύματος.	Τύπος "Κανονικά Κλειστός". Ανοικτός(0 V), όταν ο πλωτήρας ανυψωθεί. Κλειστός (12 V) στην ελεύθερη θέση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.8.2.
Αναγνώριση εξόδων K1 και K2.

Έξοδος	Όργανο	Ηλεκτρικό σήμα	Λειτουργία
K1	Ηλεκτρονόμος τροφοδοσίας του κινητήρα της αντλίας, φέρει ένδειξη “PUMP”.	0 ή 220 V	Εφόσον είναι Αληθής, οι επαφές του πηνίου συνδέουν την ηλεκτρική παροχή με τη γραμμή τροφοδοσίας του κινητήρα της αντλίας πληρώσεως.
K2	Ηλεκτρονόμος ενδείξεως “Χαμηλή στάθμη”.	0 ή 24 V	Εφόσον είναι Αληθής, οι επαφές του πηνίου ενεργοποιούν τη φωτεινή και ηχητική ένδειξη.

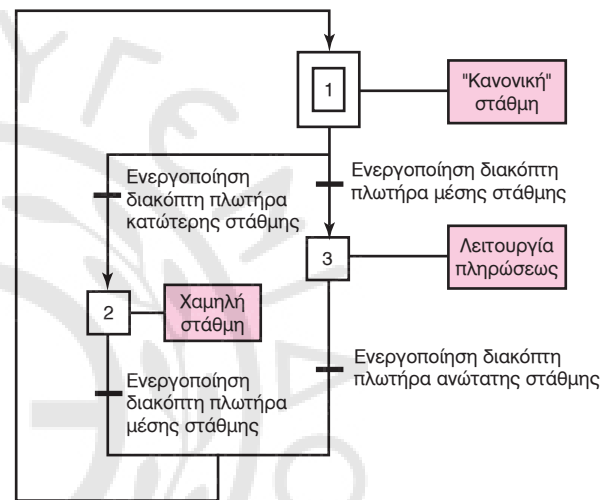
Ο πίνακας 8.8.2 καταγράφει τα χαρακτηριστικά των σημάτων εξόδου για τον έλεγχο της πληρώσεως της δεξαμενής.

8.8.3 Περιγραφή της λύσεως αυτοματισμού.

Η λειτουργία του συστήματος αυτοματισμού συνψίφεται στις διαδικασίες που περιγράφονται παρακάτω.

- Αρχικά η στάθμη της δεξαμενής βρίσκεται στην ανώτατη στάθμη πληρώσεως. Όταν ο διακόπτης πλωτήρα της μέσης στάθμης ενεργοποιηθεί, η αντλία πληρώσεως εκκινεί.
- Όταν ο διακόπτης πλωτήρα της ανώτατης στάθμης ενεργοποιηθεί, η λειτουργία της αντλίας πληρώσεως διακόπτεται.
- Όταν ο διακόπτης πλωτήρα της κατώτατης στάθμης ενεργοποιηθεί, η φωτεινή και ηχητική ένδειξη ενεργοποιούνται.

Το σχήμα 8.8δ παρουσιάζει αυτή τη λογική του αυτοματισμού με τη μορφή διαγράμματος φάσεων (GRAFSET). Πρόκειται για ένα κυκλικό διάγραμμα με τρεις φάσεις και ισάριθμες μεταβάσεις. Το διάγραμμα φάσεων συνοδεύεται από αναλυτικότερη



Σχ. 8.8δ.

Διάγραμμα φάσεων (GRAFSET).

περιγραφή του περιεχομένου των φάσεων και των μεταβάσεων στον πίνακα 8.8.3, οποίος περιγράφει τις εργασίες που περιλαμβάνονται σε κάθε φάση αναφέροντας τα συγκεκριμένα όργανα που ενεργοποιούνται, καθώς επίσης και τα σήματα εισόδου που

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.8.3.
Περιγραφή φάσεων και μεταβάσεων του διαγράμματος GRAFCET.

Φάση		Μετάβαση	
1	Κατάσταση της δεξαμενής σε μια “κανονική” στάθμη, μεταξύ της μέσης και της ανώτατης. Η αντλία και οι ενδείξεις δεν λειτουργούν.	1/2	Ενεργοποίηση του διακόπτη πλωτήρα κατώτερης στάθμης.
2	Διαπίστωση χαμηλής στάθμης. Η φωτεινή και η ηχητική ένδειξη ενεργοποιούνται.	1/3 και 2/1	Ενεργοποίηση του διακόπτη πλωτήρα μέσης στάθμης.
3	Λειτουργία πληρώσεως της δεξαμενής. Η αντλία λειτουργεί.	3/1	Ενεργοποίηση του διακόπτη πλωτήρα ανώτατης στάθμης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8.8.4.**Κατάσταση μεταβλητών του προγράμματος ελέγχου της κινήσεως του καλύμματος.**

Μνήμη	Σήμα	Είδος	Περιοχή λειτουργίας / μονάδα
I1.1	S1	Λογική είσοδος	0 ή 12 V (κάρτα εισόδων #1)
I1.2	S2	Λογική είσοδος	
I1.3	S3	Λογική είσοδος	
Q3.1	K1	Λογική έξοδος	0 ή 24 V, 100 mA(κάρτα εξόδων #3)
Q3.2	K2	Λογική έξοδος	

χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συνθήκης για κάθε μετάβαση.

8.8.4 Συνδεσμολογία και προγραμματισμός του ΠΛΕ.

Ο πίνακας 8.8.4 παρουσιάζει ένα παράδειγμα καταστάσεως μεταβλητών για έναν υποθετικό ΠΛΕ, που θα εξυπηρετήσει την αυτοματοποιημένη λειτουργία της κινήσεως του καλύμματος. Η πρώτη στήλη του πίνακα αναφέρει την ονομασία της παραμέτρου, όπως αυτή χρησιμοποιείται κατά τον προγραμματισμό του ελεγκτή (π.χ. I1.2). Η δεύτερη στήλη αναφέρει το συμβολικό όνομα του εξωτερικού σήματος που αντιστοιχεί (εφόσον υπάρχει) σε αυτήν την παράμετρο (π.χ. S2). Η τρίτη στήλη αναφέρει τα ειδικότερα χαρακτηριστικά της παραμέτρου και επιπρόσθετα τη σύνδεση της παραμέτρου με μια μονάδα (κάρτα) εισόδων ή εξόδων.

Στο παράδειγμα του πίνακα, όλες οι εισοδοί φιλοξενούνται στην κάρτα εισόδων που καταλαμβάνει τη θέση με αριθμό 1 στο σύστημα επεκτάσεως του ΠΛΕ. Η κάρτα αυτή αντιλαμβάνεται τις λογικές στάθμες Αληθής ή Ψευδής (True ή False) με ηλεκτρική τάση 0 ή 12 V αντίστοιχα. Επίσης, όλες οι έξοδοι χρησιμοποιούν μια κάρτα εγκατεστημένη στην τρίτη θέση. Η κάρτα αυτή παράγει σήματα τάσεως 0 ή 24 V και μπορεί να παράσχει στα πηνία των αντιστοίχων ηλεκτρονόμων το αναγκαίο ηλε-

κτρικό ρεύμα (στον πίνακα εκτιμάται κατά μέγιστο σε 100 mA).

Οι μεταβλητές αυτές χρησιμοποιούνται στον παρακάτω κώδικα προγράμματος για ΠΛΕ.

```
-----
A I1.2  στάθμη σε μέση θέση
S Q3.1  ενεργοποίηση αντλίας πληρώσεως
R Q3.2  διακοπή των ενδείξεων
-----
```

```
-----
A I1.2  στάθμη σε ανώτατη θέση
R Q2.1  διακοπή αντλίας πληρώσεως
-----
```

```
-----
A I1.3  στάθμη σε κατώτατη θέση
S Q3.2  ενεργοποίηση των ενδείξεων
-----
```

8.9 Ερωτήσεις.

1. Ποια είναι τα βήματα αναπτύξεως ολοκληρωμένων λύσεων αυτοματισμού με ΠΛΕ;
2. Πώς γίνεται η περιγραφή ενός προβλήματος αυτοματισμού (χρησιμοποιήστε παράδειγμα);
3. Σε ποιες πληροφορίες στηρίζεται η επεξεργασία της λύσεως αυτοματισμού με ΠΛΕ;
4. Εξηγήστε στον πίνακα 8.5.1 τις φάσεις και μεταβάσεις του διαγράμματος GRAFCET (σχ. 8.5).

Συστήματα αυτοματισμού πλοίων

9

9.1 Γενικά.

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει εφαρμογές αυτοματισμού στη ναυτιλία. Κάθε ενότητα του κεφαλαίου περιγράφει καταρχήν το αντίστοιχο **πρόβλημα ελέγχου**, δηλαδή το στόχο της σχετικής διατάξεως αυτοματισμού. Ο στόχος του αυτοματισμού εξηγείται στο πλαίσιο της λειτουργίας του αντίστοιχου «ναυτικού συστήματος», π.χ. της κινητήριας μηχανής ή του συστήματος πηδαλιουχίσεως. Έτσι, το πρόβλημα του ελέγχου συνδέεται με συγκεκριμένα θέματα ασφάλειας ή προστασίας του περιβάλλοντος και γενικότερα, άριστης εκμεταλλεύσεως του συγκεκριμένου συστήματος.

Το κεντρικό τμήμα κάθε ενότητας παρουσιάζει τη χρησιμοποιούμενη **τεχνολογία αυτοματισμού**. Σε αυτήν περιλαμβάνονται τα σήματα, τα αισθητήρια και τα όργανα δράσεως, οι διατάξεις ελέγχου κλπ., στοιχεία που συγκροτούν το σύστημα αυτοματισμού, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο αυτά διασυνδέονται και συλλειτουργούν. Η παρουσίαση αυτή επικεντρώνεται στη ναυτική τεχνολογία και συνοδεύεται από **ανάλυση** της λειτουργίας του συστήματος ελέγχου. Η ανάλυση χρησιμοποιεί τις έννοιες, τις μεθόδους και τις τεχνικές των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Κάθε ενότητα ολοκληρώνεται με σύντομη **σύνοψη**, που συμπυκνώνει τα κύρια συμπεράσματα από την προηγούμενη παρουσίαση. Κατά περίπτωση, η σύνοψη περιλαμβάνει ερωτήσεις, ασκήσεις και οδηγίες, που υποστηρίζουν τη λειτουργία του παρόντος βιβλίου ως διδακτικού βοηθήματος.

9.2 Πνευματικός έλεγχος στάθμης ατμοϋδροθαλάμου λέβητα.

Οι ατμοπαραγωγοί συγκαταλέγονται στις σημαντικότερες και συνηθέστερες πηγές ισχύος των πλοίων

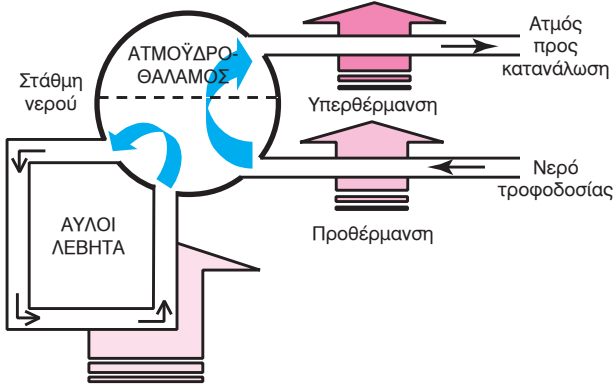
ων είτε αποτελούν τμήμα του κύριου συστήματος κινήσεως με ατμοστρόβιλο είτε τροφοδοτούν βοηθητικά συστήματα όπως ατμοκινητήρες για τους γερανούς του φορτίου, αεροσυμπιεστές, διατάξεις για την εκκίνηση μηχανών Diesel κλπ. Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει το πνευματικό σύστημα ελέγχου, που χρησιμοποιείται για τη συνεχή ρύθμιση της στάθμης του νερού στον ατμοϋδροθάλαμο του λέβητα.

9.2.1 Το πρόβλημα του ελέγχου.

Σε μια μεγάλη κατηγορία ατμοπαραγωγών (λεβήτων), ο ατμός διαχωρίζεται από το νερό σε **ατμοϋδροθάλαμο** (boiler drum), δηλαδή σε ένα οριζόντιο κυλινδρικό δοχείο πίεσεως, τοποθετημένο ψηλότερα από τους αυλούς του λέβητα. Το νερό, ως πυκνότερο, συλλέγεται στο κατώτερο μέρος του θαλάμου, ενώ ο ατμός συγκεντρώνεται στο ανώτερο μέρος. Ο ατμοϋδροθάλαμος περιέχει επίσης σχάρες, που βοηθούν στο διαχωρισμό νερού-ατμού.

Όταν υπάρξει ζήτηση ισχύος, ο παραγόμενος ατμός διοχετεύεται στον υπερθερμαντήρα από το ανώτερο τμήμα του θαλάμου. Η απομάκρυνση του ατμού μειώνει την πίεση με αποτέλεσμα να ατμοποιηθεί ένα τμήμα του νερού που περιέχεται στον ατμοϋδροθάλαμο. Η αναγκαία για την ατμοποίηση θερμότητα αποδίδεται ξανά στο νερό μέσω των αυλών του λέβητα, οι οποίοι επίσης απολήγουν στον ατμοϋδροθάλαμο. Έτσι, ο ατμοϋδροθάλαμος αποτελεί το σημείο αναμείξεως δύο κυκλοφοριών: μιας εσωτερικά στο λέβητα για τη μεταφορά ενέργειας από τα καυσάερα στο νερό, και μιας διά μέσου του λέβητα για τη μετατροπή του νερού τροφοδοσίας σε ατμό, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 9.2α.

Για να επιτελεί τη λειτουργία του διαχωρισμού, ο ατμοθάλαμος πρέπει να διατηρεί συνεχώς τη στάθμη του νερού σε ένα ενδιάμεσο επίπεδο. Η ενδιάμεση αυτή στάθμη αντιστοιχεί στο μέσο του δοχείου ή γενικότερα, σε κάποιο σημείο της γεωμετρίας του θαλάμου όπου η διαχωριστική επιφάνεια ατμού-νερού



Σχ. 9.2α.

Σχηματική απεικόνιση των ροών μάζας στο λέβητα.

να είναι η μέγιστη δυνατή, έτσι ώστε να διευκολύνεται η γρήγορη αλλαγή φάσεως του νερού και επομένως και η ταχεία αποκατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας.

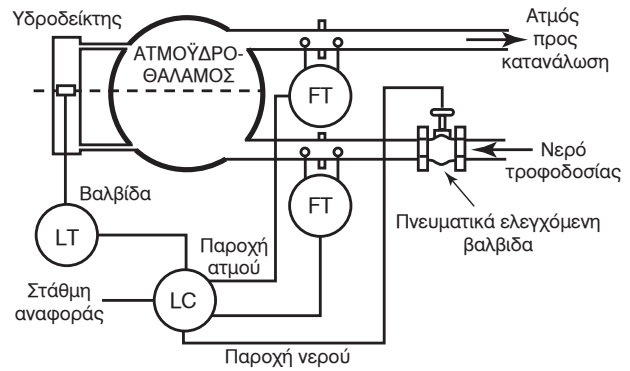
Εάν η στάθμη του νερού ανέβει υπερβολικά, υπάρχει ο κίνδυνος διοχετεύσεως υγρού στον υπερθερμαντήρα και στην κατανάλωση, με αποτέλεσμα ανεπαρκή λειτουργία του υπερθερμαντήρα ή και ενδεχόμενες καταστρεπτικές συνέπειες για τα ατμοκίνητα μηχανήματα. Εάν η στάθμη του νερού πέσει υπερβολικά, υπάρχει ο κίνδυνος κυκλοφορίας αερίου στους αυλούς του λέβητα, με συνέπεια αναποτελεσματική μεταφορά θερμότητας ή και υπέρμετρη θερμική καταπόνηση και ζημιά στα στοιχεία ανταλλαγής θερμότητας του ατμοπαραγωγού. Επομένως, η διατήρηση σταθερής στάθμης στον ατμοϋδροθάλαμο συμβάλλει:

- Στην αποδοτική εκμετάλλευση του λέβητα, κάτι που έχει επίπτωση όχι μόνο στο χαμηλότερο κόστος καυσίμου αλλά και στον περιορισμό της περιβαλλοντικής επιβαρύνσεως από τις εκπομπές καυσαερίων.
- Στην ασφαλή λειτουργία και τη διάρκεια ζωής της εγκαταστάσεως.

Η μάζα του νερού που ατμοποιείται αναπληρώνεται από νερό τροφοδοσίας (feedwater), το οποίο προσάγεται στο κατώτερο τμήμα του θαλάμου. Στόχος του συστήματος ελέγχου είναι να ρυθμίζει την τροφοδοσία νερού και να διατηρεί τη στάθμη του ατμοϋδροθαλάμου σταθερή, παρά τις διακυμάνσεις στη ζήτηση του ατμού και τις τυχόν αλλαγές στο σημείο λειτουργίας του λέβητα.

9.2.2 Το σύστημα ελέγχου της στάθμης.

Το σχήμα 9.2β παρουσιάζει τα κύρια στοιχεία



Σχ. 9.2β.

Πνευματικό σύστημα ελέγχου της στάθμης.

ενός πλήρους πνευματικού συστήματος ελέγχου της στάθμης του νερού στον ατμοϋδροθάλαμο. Το σύστημα περιλαμβάνει:

- **Αισθητήριο της στάθμης** (Level Transmitter – LT). Πρόκειται για αναλογικό στοιχείο πίεσεως αέρα, που συνδέεται μηχανικά στον πλωτήρα ενός υδροδείκτη. Η στήλη του υδροδείκτη συνδέεται υδραυλικά παράλληλα με τον ατμοϋδροθάλαμο και μεταφέρει τη θερμοκή κατάσταση του νερού και του ατμού (temperature equalizing column) χωρίς τις διαταραχές της στάθμης λόγω ατμοποίησης.
- **Αισθητήρια της παροχής όγκου** (Flow Transmitter – FT) του ατμού και του νερού. Συνήθως, τα όργανα αυτά μετρούν την πτώση πίεσεως στις δύο πλευρές μιας ειδικά διαμορφωμένης στενώσεως (calibrated orifice). Η πτώση πίεσεως μετατρέπεται μηχανικά σε παροχή και μεταδίδεται στην έξοδο του οργάνου, ως πίεση αέρα.
- **Πνευματικά ελεγχόμενη βαλβίδα ρυθμίσεως** της παροχής του νερού τροφοδοσίας. Η βαλβίδα μετατρέπει το σήμα πίεσεως αέρα σε μετακίνηση της θέσεως ενός διαφράγματος που στραγγαλίζει ή απελευθερώνει τη ροή του νερού το οποίο προσάγει η καταθλιπτική αντλία τροφοδοσίας.
- **Ελεγκτή στάθμης** (Level Controller – LC), ο οποίος εφαρμόζει το νόμο ελέγχου με στόχο τη διατήρηση της στάθμης στην επιθυμητή τιμή (στάθμη αναφοράς).

Οι μεταβλητές του συστήματος ελέγχου παρουσιάζονται στον πίνακα του σχήματος 9.2γ. Κάθε παράμετρος χαρακτηρίζεται από το σχετικό αισθητήριο ή όργανο δράσεως και χαρακτηρίζεται ως έξοδος (ΕΞ) του συστήματος ή είσοδος (ΕΙΣ) του συστήματος ανοικτού βρόχου.

Στην κανονική λειτουργία του λέβητα, η ζήτηση ενέργειας είναι συνεχής και ο ατμός διοχετεύεται συνεχώς στην κατανάλωση. Αυτή η διαρκής απομάκρυνση ατμού πρέπει να αντισταθμίζεται από αντίστοιχη ροή νερού τροφοδοσίας έτσι ώστε να διατηρείται το ισοζύγιο μάζας διά μέσου του λέβητα. Επομένως, το σύστημα ελέγχου πρέπει να διατηρεί τη βαλβίδα τροφοδοσίας σε μια ενδιάμεση ανοικτή θέση και να ρυθμίζει τις μεταβολές γύρω από αυτήν.

Η πλέον σύνθετη μορφή ελεγκτή που χρησιμοποιείται στην πράξη περιλαμβάνει τρεις αναλογικούς όρους, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 9.2δ και στην παρακάτω έκφραση του νόμου ελέγχου:

$$e(t) = y_{\text{ref}}(t) - y(t) \quad (9.1)$$

$$u(t) = k_1 e(t) + k_2 Q_s(t) - k_3 Q_w(t) \quad (9.2)$$

όπου:

y η στάθμη του νερού στον ατμοϋδροθάλαμο [m].

y_{ref} η στάθμη αναφοράς [m].

e το σφάλμα ρυθμίσεως της στάθμης [m].

$u=Q_w$ η παροχή του νερού τροφοδοσίας διά μέσου της πνευματικής βαλβίδας [m^3/s].

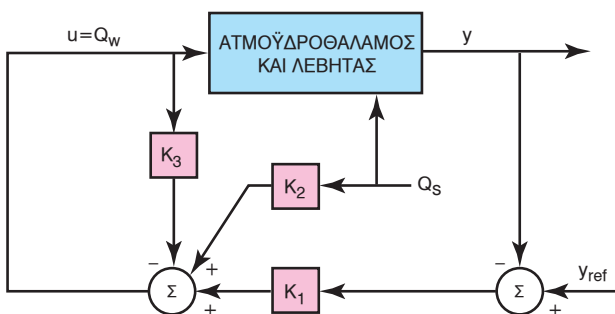
k_i οι παράμετροι του ελεγκτή ($i = 1,2,3$).

Q_s η παροχή όγκου του ατμού στην κατανάλωση [m^3/s].

Παράμετρος	Χαρακτηρισμός	Όργανο
Στάθμη στο θάλαμο	Μετρούμενη μεταβλητή (ΕΞ)	FT
Παροχή νερού	Διαταραχή (ΕΙΣ)	FT
Παροχή ατμού	Διαταραχή (ΕΙΣ)	LT
Παροχή νερού	Ελεγχόμενη μεταβλητή (ΕΙΣ)	Πνευματική βαλβίδα

Σχ. 9.2γ.

Πίνακας μεταβλητών του συστήματος και χαρακτηρισμός τους.



Σχ. 9.2δ.

Δομικό διάγραμμα του συστήματος κλειστού βρόχου.

Για μικρές διακυμάνσεις της στάθμης γύρω από τη στάθμη αναφοράς, η έκταση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στο θάλαμο μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, οπότε η εξάρτηση της στάθμης από την παροχή νερού και το ρυθμό ατμοποίησης περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση διατηρήσεως του όγκου του νερού:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{1}{A} [Q_w(t) - Q_{sw}(t)] \quad (9.3)$$

όπου:

A η επιφάνεια του νερού στη στάθμη αναφοράς [m^2].

Q_{sw} ο ρυθμός ατμοποίησης, δηλαδή η παροχή όγκου νερού που μετασχηματίζεται σε ατμό (ατμοποιείται) [m^3/s].

Σε πρώτη προσέγγιση, η κυκλοφορία του νερού στους αυλούς επαναφέρει «στιγμιαία» τη θερμοδυναμική ισορροπία στον ατμοϋδροθάλαμο, δηλαδή αποκαθιστά συνθήκες κόρου. Με την υπόθεση αυτή, ο ρυθμός ατμοποίησης μπορεί να θεωρηθεί ευθέως ανάλογος με την παροχή ατμού στην κατανάλωση, δηλαδή:

$$Q_{sw}(t) \approx \alpha Q_s(t) \quad (9.4)$$

όπου ο συντελεστής αναλογίας α προσεγγίζει το κλάσμα πυκνότητας νερού/ατμού στην κατάσταση κόρου για τις συνθήκες λειτουργίας του λέβητα.

Με τις παραπάνω παραδοχές και συμβολισμούς, η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου γράφεται ως:

$$\frac{E(s)}{Q_s(s)} = \left(\frac{\alpha}{A} \right)_{s+} \frac{1 - \frac{k_2}{\alpha(1+k_3)}}{A(1+k_3) + \frac{k_1}{s}} \quad (9.5)$$

Η σχέση (9.5) εκφράζει την απλοποιημένη δυναμική εξάρτηση μεταξύ της ζήτησεως ατμού Q_s και του σφάλματος ρυθμίσεως της στάθμης e . Έτσι, η μορφή της αποκρίσεως του σφάλματος στάθμης σε διαταραχές του φορτίου του λέβητα καθορίζεται από τις τιμές των παραμέτρων k_i του ελεγκτή. Η εξάρτηση αυτή μας επιτρέπει να αναλύσουμε συνοπτικά τη συμπεριφορά των συνηθεστέρων τύπων ελεγκτών που χρησιμοποιούνται στην πράξη.

1) Απλός ελεγκτής με ένα στοιχείο.

Ο απλούστερος ελεγκτής περιλαμβάνει μόνο έναν όρο τύπου P, δηλαδή προσαρμόζει τη θέση της πα-

ροχής τροφοδοσίας ανάλογα με το σφάλμα στάθμης. Στην περίπτωση αυτή ($k_2=k_3=0$), η απόκριση κλειστού βρόχου περιγράφεται από μια συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξεως, τα χαρακτηριστικά της οποίας μελετήθηκαν στο κεφάλαιο 2.

$$\frac{E(s)}{Q_s(s)} = \frac{\alpha/A}{s+k_1/A} \quad (9.6)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω έκφραση, ο ελεγκτής δεν εξαλείφει το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως, δηλαδή στην περίπτωση βηματικής μεταβολής της παροχής ατμού (π.χ. σε μια αύξηση της ζήτησεως) η στάθμη αποκαθίσταται σε τιμή διαφορετική από τη στάθμη αναφοράς. Η σταθερά χρόνου και το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως είναι αντίστροφα ανάλογα προς το κέρδος (παράμετρος k_1) του ελεγκτή. Επίσης, η σταθερά χρόνου είναι ανάλογη με την επιφάνεια του νερού στον ατμοϋδροθάλαμο.

Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών, ο ελεγκτής ενός στοιχείου είναι μια απλή και οικονομική λύση, κατάλληλη για μικρούς ατμολέβητες που αντιμετωπίζουν σπάνιες και περιορισμένες διαταραχές, όπως π.χ. οι ατμοπαραγωγοί βοηθητικών χρήσεων.

2) Ελεγκτής δύο στοιχείων.

Ο ελεγκτής δύο στοιχείων περιλαμβάνει επιπρόσθετα έναν όρο προσω-τροφοδοτήσεως, που αντισταθμίζει την εξωτερική διαταραχή Q_s . Δηλαδή ο ελεγκτής προσαρμόζει την παροχή νερού τροφοδοσίας ανάλογα και με τη μετρούμενη παροχή ατμού προς την κατανάλωση. Με τον τρόπο αυτό, ο ελεγκτής συνυπολογίζει την επερχόμενη αλλαγή της στάθμης λόγω ατμοποίησης και διορθώνει «προκαταβολικά» την παροχή τροφοδοσίας. Στην περίπτωση αυτή ($k_3=0$), η απόκριση κλειστού βρόχου περιγράφεται από τη συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{E(s)}{Q_s(s)} = \left(\frac{\alpha}{A} \right) \frac{1 - \frac{k_2}{\alpha}}{s + \frac{k_1}{A}} \quad (9.7)$$

Ο ελεγκτής αυτός πλεονεκτεί, συγκριτικά με τον απλό ελεγκτή που περιγράφηκε ανωτέρω, διότι με κατάλληλη επιλογή του κέρδους k_2 μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε τον αριθμητή της εκφράσεως (9.7), περιορίζοντας έτσι το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως.

3) Ελεγκτής τριών στοιχείων.

Στην περίπτωση συχνών και σημαντικών μεταβο-

λών της ζήτησεως ατμού, ο ελεγκτής δύο στοιχείων έχει την τάση να προκαλεί ταχείες αλλαγές της παροχής τροφοδοσίας. Τα θερμικά φαινόμενα του λέβητα δεν μπορούν να ακολουθήσουν αυτές τις διαταραχές της τροφοδοσίας με αποτέλεσμα το σύστημα ελέγχου στάθμης να οδηγείται σε ταλαντωτική συμπεριφορά. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο σε μεγάλους ατμοπαραγωγούς, όπου η υπόθεση της «σιγμιαίας» θερμοδυναμικής αποκαταστάσεως είναι ασύμβατη με τις φυσικές σταθερές χρόνου που αντιστοιχούν στις γεωμετρικές και ενεργειακές διαστάσεις της εγκαταστάσεως. Στις περιπτώσεις αυτές, η προσέγγιση (9.4) δεν ισχύει και ο συντελεστής αναλογίας α είναι μια σύνθετη δυναμική συνάρτηση των παραμέτρων λειτουργίας του λέβητα.

Ο ελεγκτής τριών στοιχείων συμπληρώνει τον προηγούμενο με μια πρόσθετη αρνητική προσω-τροφοδότηση. Ειδικότερα, ο ελεγκτής συνυπολογίζει την ήδη υφιστάμενη παροχή νερού τροφοδοσίας και μετριάξει, ανάλογα, την «προκαταβολική» δράση που περιγράφηκε παραπάνω. Σύμφωνα και με τη σχέση (9.5), η συμμετοχή του τρίτου όρου $-k_3Q_w$ μειώνει την ταχύτητα αποκρίσεως του συστήματος κλειστού βρόχου χωρίς να επηρεάζει το σφάλμα μόνιμης καταστάσεως.

9.2.3 Σύνοψη.

Το πνευματικό σύστημα ελέγχου της στάθμης του ατμοϋδροθαλάμου συμβάλλει στη διατήρηση της ασφαλούς και οικονομικής λειτουργίας του λέβητα. Οι μικρότερες εγκαταστάσεις εφαρμόζουν απλό αναλογικό ελεγκτή που χρησιμοποιεί το σφάλμα της στάθμης για να μεταβάλλει τη θέση της βαλβίδας στη γραμμή του νερού τροφοδοσίας. Οι μεγαλύτεροι ατμοπαραγωγοί χρησιμοποιούν ελεγκτές δύο ή τριών στοιχείων με προσω-τροφοδότηση, που συνυπολογίζει την παροχή ατμού προς την κατανάλωση ή και την παροχή νερού τροφοδοσίας. Εάν οι ρυθμοί που εισάγονται από το σύστημα ελέγχου της στάθμης είναι χαμηλότεροι από τις ταχύτητες αποκρίσεως των θερμοδυναμικών φαινομένων του λέβητα, η απόκριση κλειστού βρόχου προσεγγίζεται από ένα σύστημα πρώτης τάξεως.

9.3 Υδραυλικός ρυθμιστής στροφών κινητήρα (Woodward Governor).

Όλες οι πρακτικές εφαρμογές των θερμικών κινητήρων απαιτούν τη διατήρηση σταθερής ταχύτητας περιστροφής, ανεξάρτητα από το φορτίο. Η πα-

ρούσα ενότητα παρουσιάζει την υδραυλική-πνευματική διάταξη ελέγχου, που χρησιμοποιείται για αυτή τη συνεχή ρύθμιση των στροφών των ΜΕΚ και άλλων μηχανών.

9.3.1 Το πρόβλημα του ελέγχου.

Η ταχύτητα περιστροφής (στροφές ανά λεπτό) αποτελεί την κυριότερη παράμετρο λειτουργίας ενός θερμικού κινητήρα είτε πρόκειται για την κύρια μηχανή του πλοίου είτε για μηχανή, που κινεί βοηθητικά συστήματα (π.χ. ηλεκτροπαραγωγή). Η διατήρηση σταθερών στροφών συνδέεται με βασικές απαιτήσεις ασφάλειας και αποτελεσματικότητας, όπως:

- Την ομαλή κίνηση του πλοίου, στην περίπτωση της κύρια μηχανής. Η ταχύτητα του πλοίου πρέπει να διατηρείται σταθερή παρά τις τυχόν διαταραχές της αντιστάσεως από τον άνεμο ή τον κυματισμό.
- Τη σταθερότητα της συχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο, στην περίπτωση συγχρόνων ηλεκτροπαραγωγών. Η συχνότητα πρέπει να παραμένει στην ονομαστική τιμή, ανεξάρτητα από τις μεταβολές του φορτίου.

Σε όλες τις περιπτώσεις, η ρύθμιση των στροφών επιτυγχάνεται με την αλλαγή της ισχύος που παρέχεται στο θερμικό κινητήρα:

- Στις μηχανές εσωτερικής καύσεως (ΜΕΚ), στους αεριοστροβίλους (turbines) και στους αεριοπαραγωγούς (gaz generators), η ισχύς προσαρμόζεται αλλάζοντας την παροχή του καυσίμου, π.χ. μεταβάλλοντας τον εμβολισμό των αντλιών Bosch.
- Στους ατμοστροβίλους (και παλαιότερα τις ατμομηχανές), η ισχύς προσαρμόζεται μεταβάλλοντας την παρεχόμενη ποσότητα ατμού.

Έτσι, οι μεταβλητές του συστήματος ελέγχου στροφών είναι κοινές και παρουσιάζονται στον πίνακα του σχήματος 9.3α. Κάθε παράμετρος χαρακτηρίζεται ως έξοδος (ΕΞ) του συστήματος ή είσοδος (ΕΙΣ) του συστήματος ανοικτού βρόχου, δηλαδή του κινητήρα.

9.3.2 Ο φυγόκεντρικός ρυθμιστής στροφών.

Ο ρυθμιστής ταχύτητας που κατασκεύασε ο James Watt το 1788 είναι η πρώτη αποτελεσματική διάταξη ελέγχου των ατμομηχανών και, συνάμα, ο πρόγονος του σύγχρονου αυτοματισμού (σχ. 9.3β).

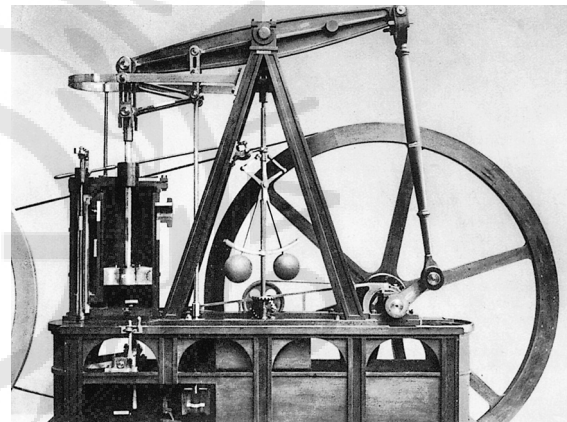
Το σχήμα 9.3γ παρουσιάζει την αρχή λειτουργίας του φυγόκεντρικού ρυθμιστή στροφών (ρυθμιστής του Watt).

νας της μηχανής περιστρέφει δύο ράβδους που φέρουν αντίβαρα. Η περιστροφή του άξονα αναπτύσσει «φυγόκεντρη» δύναμη, η οποία απομακρύνει τα αντίβαρα. Μέσω αρθρωτών συνδέσμων, η κίνηση των αντιβάρων μεταφέρεται στη βαλβίδα τροφοδοσίας της ατμομηχανής. Εάν η ταχύτητα είναι χαμηλή, τα αντίβαρα κινούνται προς τον άξονα και η θέση της βαλβίδας αλλάζει αυξάνοντας την παρε-

Παράμετρος	Χαρακτηρισμός
Ταχύτητα κινητήρα	Μετρούμενη μεταβλητή (ΕΞ)
Ροπή φορτίου	Διαπαραχή (ΕΙΣ)
Παροχή ισχύος	Ελεγχόμενη μεταβλητή (ΕΙΣ)

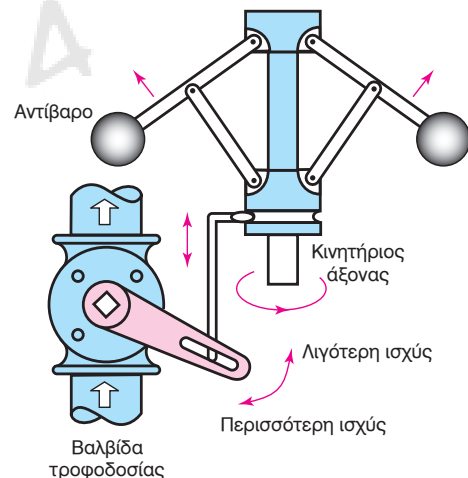
Σχ. 9.3α.

Πίνακας μεταβλητών του συστήματος και χαρακτηρισμούς τους.



Σχ. 9.3β.

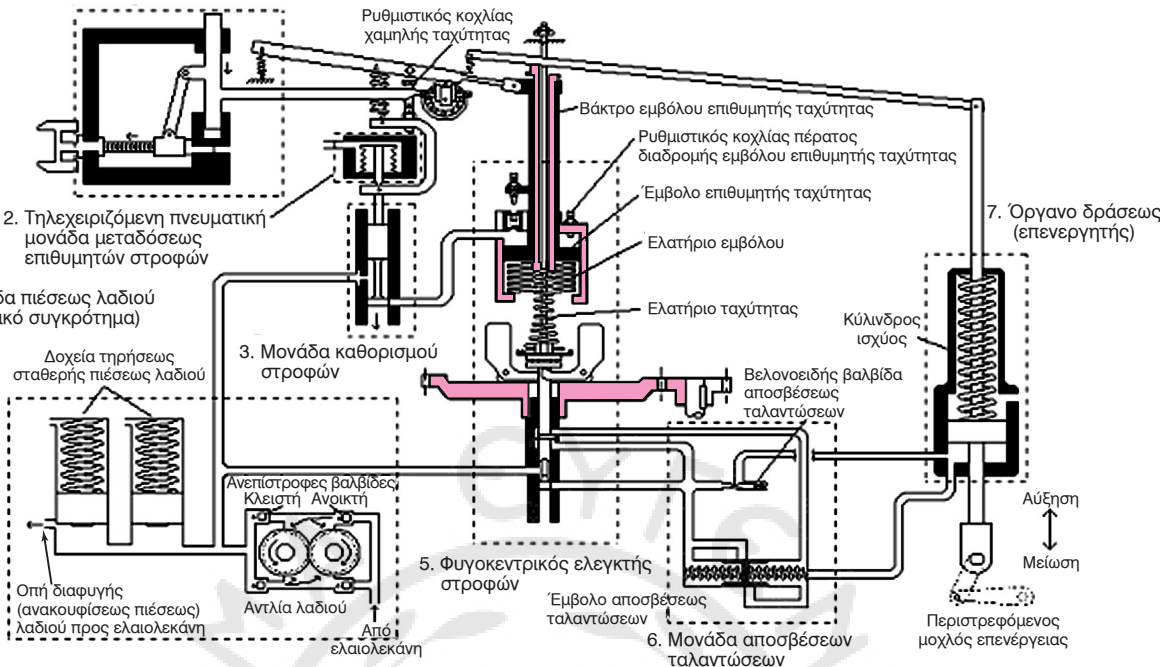
Ατμομηχανή εφοδιασμένη με ρυθμιστή ταχύτητας.



Σχ. 9.3γ.

Αρχή λειτουργίας του φυγόκεντρικού ρυθμιστή στροφών (ρυθμιστής του Watt).

1. Χειροκίνητη τοπική μονάδα μεταδόσεως επιθυμητών στροφών



Σχ. 9.3δ.

Λειτουργικό διάγραμμα υδραυλικού-πνευματικού ρυθμιστή στροφών.

χόμενη ισχύ. Το αντίστροφο συμβαίνει, όταν η ταχύτητα είναι υψηλή.

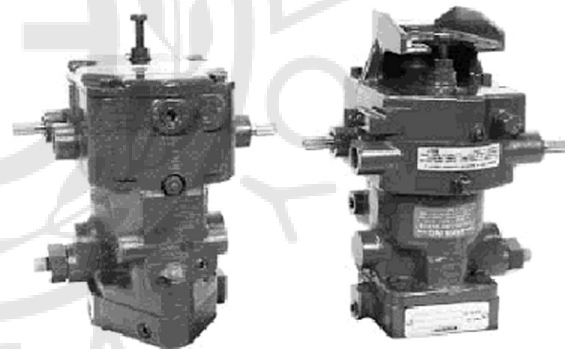
Η συνεχής ανάπτυξη νέων και ισχυροτέρων μηχανών ώθησε και στην ανάπτυξη αποτελεσματικότερων αυτοματισμών. Ο ρυθμιστής του Watt δεν μπορούσε να κινήσει τις βαλβίδες τροφοδοσίας πολύ μεγάλων κινητήρων (π.χ. τις θυρίδες παροχής νερού σε έναν υδροτροβίλο), όσο μεγάλα και απομακρυσμένα αντίβαρα και αν είχε. Ο Adam Woodward χρησιμοποίησε το 1970 μια πιο σύνθετη διάταξη, στην οποία ο ρυθμιστής του Watt κινούσε ένα συμπλέκτη, που με τη σειρά του κινούσε τη βαλβίδα τροφοδοσίας.

Η συνηθέστερη σύγχρονη μορφή φυγοκεντρικού ρυθμιστή στροφών ονομάζεται τύπου Woodward (γονεπινο από το ελληνικό ρήμα «κυβερνώ») και συνδυάζει υδραυλικά και πνευματικά (ή και ηλεκτρικά στοιχεία). Το σχήμα 9.3δ παρουσιάζει τη γενική διαμόρφωση και το σχήμα 9.3ε την εξωτερική όψη ενός ρυθμιστή Woodward.

Η λειτουργία των βασικών τμημάτων του ρυθμιστή περιγράφεται ως εξής:

1) Χειροκίνητη τοπική μονάδα μεταδόσεως επιθυμητών στροφών.

Πρόκειται για τεμαχική μονάδα, στην οποία



Σχ. 9.3ε.

Ρυθμιστής στροφών τύπου Woodward.

καταχωρείται χειροκίνητα και τοπικά ο επιθυμητός αριθμός στροφών ανά λεπτό με τη βοήθεια επιλογέα, που βρίσκεται στο σώμα του ρυθμιστή. Η τιμή αυτή των στροφών μεταδίδεται στη μονάδα καθορισμού των στροφών με μηχανικό σύστημα μοχλών.

2) Τηλεχειριζόμενη πνευματική μονάδα μεταδόσεως επιθυμητών στροφών.

Η μονάδα αυτή επιτρέπει την καταχώρηση της επιθυμητής ταχύτητας από κάποια απόσταση (π.χ. δωμάτιο ελέγχου μηχανοστασίου, γέφυρα). Η μετάδοση της εντολής γίνεται με τη βοήθεια πνευματικού σήματος, που προέρχεται από το μεταδότη του κε-

ντρικού συστήματος αυτομάτου ελέγχου του μηχανοστασίου. Όπως και στην περίπτωση της χειροκίνητης καταχωρήσεως, η επιθυμητή τιμή των στροφών μεταδίδεται στη μονάδα καθορισμού των στροφών με τη βοήθεια συστήματος μοχλών.

3) Μονάδα καθορισμού στροφών (r.p.m.).

Η μονάδα αυτή λειτουργεί με λάδι σταθερής πίεσης, που προέρχεται από το πιεστικό συγκρότημα. Η μονάδα αυτή ενεργοποιείται από τις μονάδες που αναφέρθηκαν προηγουμένως και στέλνει ένα υδραυλικό σήμα υπό μορφή πίεσης λαδιού στο φυγοκεντρικό ελεγκτή στροφών. Το σήμα αυτό αναλογεί στον επιθυμητό αριθμό στροφών (set point ή reference) για τη λειτουργία της μηχανής.

Στη μονάδα αυτή επιστρέφουν δύο μηχανικά σήματα, το ένα από το όργανο δράσεως και το άλλο από το φυγοκεντρικό ελεγκτή στροφών. Μέσω αυτών των σημάτων η μονάδα ενημερώνεται για την εκτέλεση της εντολής καθορισμού των στροφών.

4) Μονάδα πίεσης λαδιού (πιεστικό συγκρότημα).

Η μονάδα αυτή αποτελείται από μια αντλία λαδιού και μια διάταξη, που διατηρεί την πίεση του λαδιού σταθερή. Η αναρρόφηση της αντλίας βρίσκεται στη δεξαμενή λαδιού της μηχανής και η κατάθλιψη οδηγεί, με τη βοήθεια σωληνίσκων, στη μονάδα καθορισμού στροφών για την εκτέλεση της εντολής καθορισμού των στροφών.

5) Φυγοκεντρικός ελεγκτής στροφών.

Η μονάδα αυτή παίρνει κίνηση από τον άξονα της μηχανής με τη βοήθεια ενός συστήματος οδοντωτών τροχών. Ο φυγοκεντρικός ελεγκτής τροφοδοτείται με λάδι σταθερής πίεσης από τη μονάδα πίεσης λαδιού και μεταβλητής πίεσης από τη μονάδα καθορισμού των στροφών. Κατά τη λειτουργία του, ο ελεγκτής στέλνει ένα υδραυλικό σήμα υπό μορφή πίεσης λαδιού, στη μονάδα αποσβέσεως ταλαντώσεων και δέχεται σήματα από το όργανο δράσεως, που τον πληροφορεί για την εκτέλεση της εντολής ρυθμίσεως των στροφών και από τη μονάδα αποσβέσεως ταλαντώσεων, που περιορίζει και αποσβένει τις διακυμάνσεις των στροφών.

6) Μονάδα αποσβέσεως ταλαντώσεων.

Ο σκοπός της μονάδας αυτής είναι η απόσβεση των ταλαντώσεων των στροφών της μηχανής, όταν ο ρυθμιστής με τη βοήθεια του φυγοκεντρικού ελεγκτή στροφών επιχειρεί να διατηρήσει τις στροφές

της μηχανής σταθερές. Η μονάδα αυτή δέχεται ένα σήμα από το φυγοκεντρικό ελεγκτή και στέλνει δύο υδραυλικά σήματα υπό τη μορφή πίεσης λαδιού, το ένα στο όργανο δράσεως και το άλλο στο φυγοκεντρικό ελεγκτή.

7) Όργανο δράσεως (επενεργητής).

Η μονάδα αυτή είναι το εκτελεστικό όργανο του ρυθμιστή. Δέχεται σήμα από την έξοδο του αποσβεστήρα ταλαντώσεων και στέλνει σήμα, με το οποίο ρυθμίζεται η παροχή του πετρελαίου (ή του ατμού) στην κινητήρια μηχανή. Το σήμα του οργάνου δράσεως διαβιβάζεται στη μηχανή με τη βοήθεια ενός συστήματος μοχλών. Ο επενεργητής στέλνει επίσης ένα υδραυλικό σήμα προς τη μονάδα καθορισμού στροφών καθώς και στο φυγοκεντρικό ελεγκτή. Έτσι, το όργανο δράσεως πληροφορεί τις μονάδες αυτές για την πορεία της εκτέλεσης της εντολής.

9.3.3 Σύνοψη.

Το υδραυλικό σύστημα ελέγχου των στροφών των θερμοικών κινητήρων εξασφαλίζει ομαλή λειτουργία της μηχανής αντισταθμίζοντας τις μεταβολές του φορτίου. Η συνηθέστερη διάταξη ελέγχου στροφών είναι ο ρυθμιστής τύπου Woodward, που συνδυάζει φυγοκεντρικό στοιχείο με υδραυλική ενίσχυση για τη μεταβολή της παρεχόμενης στη μηχανή ισχύος.

9.4 Ηλεκτρονικός έλεγχος θερμοκρασίας λιπαντικού κύριας μηχανής.

Η καλή λειτουργία των κινητήρων στηρίζεται στην αποδοτική λίπανση, που με τη σειρά της εξαρτάται από τη σωστή και συστηματική απομάκρυνση θερμότητας (ψύξη) του λιπαντικού. Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει απλή ηλεκτρονική διάταξη ελέγχου, που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του λαδιού σε μηχανές εσωτερικής καύσεως.

9.4.1 Το πρόβλημα του ελέγχου.

Ο σχεδιασμός των ΜΕΚ προβλέπει συγκεκριμένες προδιαγραφές για τη θερμοκρασία του λιπαντικού λαδιού. Εάν η θερμοκρασία του λαδιού είναι υψηλή, υπάρχει ο κίνδυνος υπέρμετρης αυξήσεως της τριβής στα έδρανα και τις άλλες επιφάνειες ολισθήσεως στον κινητήρα με αποτέλεσμα την ταχύτερη φθορά όλων των στρεφομένων μερών και εν τέλει την καταστροφή της μηχανής. Ταυτόχρονα, η αυξημένη θερμοκρασία σημαίνει μειωμένη απα-

γωγή θερμότητας από τα σημεία έντονης θερμικής καταπονήσεως, όπως οι βαλβίδες ή οι θυρίδες εξαγωγής, τα οποία σύντομα καταρρέουν (καίγονται). Σε κάθε περίπτωση, και τα δύο παραπάνω φαινόμενα οδηγούν τον κινητήρα σε μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας με χαμηλή ενεργειακή απόδοση και ατελή καύση, που παράγει ρύπους.

Ανάλογα, αν και λιγότερο έντονα, φαινόμενα συμβαίνουν και στη περίπτωση που η θερμοκρασία του λαδιού είναι χαμηλή. Το «ψυχρό» λάδι έχει αυξημένο ιξώδες, κάτι που δεν συμφωνεί με την προδιαγραφή σχεδιασμού των εδράσεων του κινητήρα. Επομένως, οι τριβές καταναλώνουν υπέρμετρα μεγάλο ποσοστό της παρεχόμενης στον κινητήρα ισχύος, με αποτέλεσμα ο κινητήρας να λειτουργεί με μικρή απόδοση μηχανικής ισχύος και ατελή καύση που επιβαρύνει το περιβάλλον.

Επομένως, η διατήρηση της θερμοκρασίας λαδιού του κινητήρα συμβάλλει:

- Στον περιορισμό των απαιτήσεων έκτακτης συντηρήσεως του κινητήρα που επιδρά άμεσα στην αντίστοιχη εξοικονόμηση δαπανών συντηρήσεως και έμμεσα στη διασφάλιση της απρόσκοπτης λειτουργίας του πλοίου.
- Στην αποδοτική εκμετάλλευση του κινητήρα, που έχει επίπτωση όχι μόνο στο χαμηλότερο κόστος καυσίμου αλλά και στον περιορισμό της περιβαλλοντικής επιβαρύνσεως από τις εκπομπές καυσαερίων, τις διαρροές λιπαντικού κλπ.
- Στην ασφαλή λειτουργία και τη διάρκεια ζωής της μηχανής.

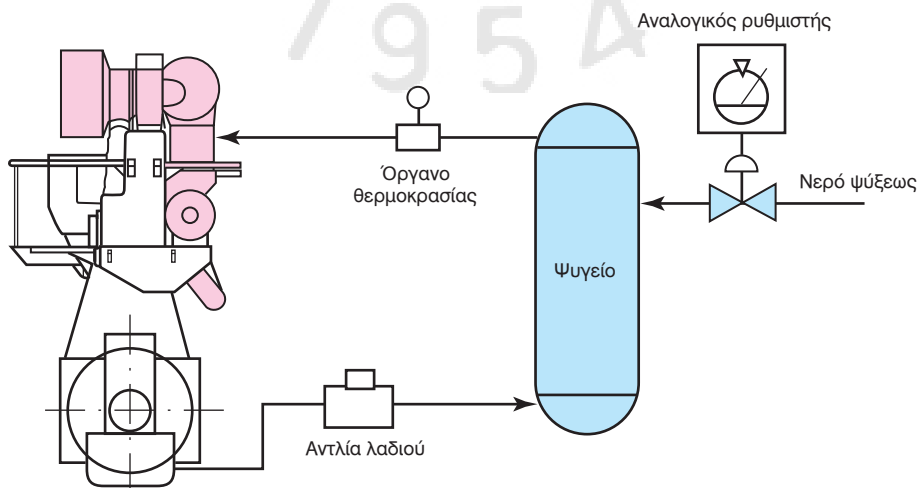
Το λάδι ψύχεται σε εναλλάκτη (ψυγείο), όπου

μεταφέρει τη θερμότητά του στο νερό ψύξεως. Στόχος του συστήματος ελέγχου είναι να ρυθμίζει τη ροή του νερού στο ψυγείο και να διατηρεί τη θερμοκρασία του λαδιού σταθερή παρά τις αλλαγές στις στροφές και το φορτίο του κινητήρα.

9.4.2 Ο ηλεκτρονικός ρυθμιστής θερμοκρασίας.

Το σχήμα 9.4α παρουσιάζει τα κύρια στοιχεία του συστήματος ελέγχου της θερμοκρασίας του λαδιού του κινητήρα. Το σύστημα περιλαμβάνει:

- **Αισθητήριο της θερμοκρασίας του λαδιού** (Temperature Transmitter, ΤΤ). Πρόκειται για αναλογικό στοιχείο ηλεκτρικής τάσεως αέρα που συνδέεται στη γραμμή προσαγωγής του λαδιού στη μηχανή.
- **Ηλεκτρονικό αναλογικό ρυθμιστή**. Ο ρυθμιστής φέρει όργανο με διπλή ένδειξη: τη μετρούμενη και την επιθυμητή θερμοκρασία του λαδιού. Ο χειριστής καταχωρεί τη θερμοκρασία αναφοράς τοποθετώντας το δείκτη της επιθυμητής θερμοκρασίας στην αντίστοιχη θέση.
- **Ενισχυτή ρεύματος**. Μέρος του ρυθμιστή ο ενισχυτής ρεύματος μετατρέπει το χαμηλής ισχύος σήμα του ρυθμιστή σε συνεχές ρεύμα σταθερής τιμής, ανάλογης με το επίπεδο του σήματος.
- **Ηλεκτρικά ελεγχόμενη βαλβίδα ρυθμίσεως της παροχής του νερού ψύξεως**. Μέσω ενός σωληνοειδούς πηνίου, η βαλβίδα μετατρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα σε μετακίνηση της θέσεως ενός διαφράγματος, που στραγγαλίζει ή απελευθερώνει τη ροή του νερού, το οποίο προσάγει η αντλία νερού ψύξεως.



Σχ. 9.4α.

Ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας του λαδιού του κινητήρα.

Οι μεταβλητές του συστήματος ελέγχου παρουσιάζονται στον πίνακα του σχήματος 9.4β. Κάθε παράμετρος χαρακτηρίζεται ως έξοδος (ΕΞ) του συστήματος ή είσοδος (ΕΙΣ) του συστήματος ανοικτού βρόχου, δηλαδή της μηχανής και του ψυγείου λαδιού.

Ο ρυθμιστής θερμοκρασίας ασκεί αναλογικό έλεγχο τύπου «Ρ» σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$e(t) = \theta_{ref}(t) - \theta(t) \text{ και} \quad (9.8)$$

$$u(t) = ke(t) \quad (9.9)$$

όπου:

θ η θερμοκρασία του λαδιού στην έξοδο του ψυγείου (degC).

θ_{ref} η επιθυμητή θερμοκρασία (θερμοκρασία αναφοράς (degC).

e το σφάλμα ρυθμίσεως της θερμοκρασίας λαδιού (degC).

$u = Q_w$ η παροχή του νερού ψύξεως διά μέσου του ψυγείου (m^3/s).

k το κέρδος του ελεγκτή ($m^3/s.degC$).

Το δομικό διάγραμμα του συστήματος κλειστού βρόχου παρουσιάζεται στο σχήμα 9.4γ.

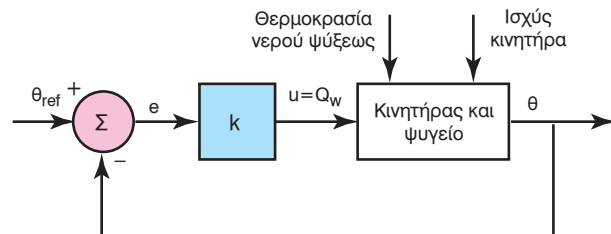
9.4.3 Σύνοψη.

Το ηλεκτρονικό σύστημα ρυθμίσεως της θερμοκρασίας λαδιού στον κινητήρα εξασφαλίζει ομαλή

Παράμετρος	Χαρακτηρισμός
Θερμοκρασία λαδιού	Μετρούμενη μεταβλητή (ΕΞ)
Ισχύς του κινητήρα	Διαταραχή (ΕΙΣ)
Θερμοκρασία νερού ψύξεως	Διαταραχή (ΕΙΣ)
Παροχή νερού ψύξεως	Ελεγχόμενη μεταβλητή (ΕΙΣ)

Σχ. 9.4β.

Πίνακας μεταβλητών του συστήματος και χαρακτηρισμός τους.



Σχ. 9.4γ.

Δομικό διάγραμμα του συστήματος ρυθμίσεως της θερμοκρασίας λαδιού.

λίπανση και απαγωγή της θερμότητας από τη μηχανή, αντισταθμίζοντας τις μεταβολές της ισχύος και τις αλλαγές στη θερμοκρασία του νερού ψύξεως. Η λειτουργία του στηρίζεται σε έναν απλό αναλογικό ελεγκτή τύπου Ρ αλλά επαρκεί για την αποτελεσματική διατήρηση της θερμοκρασίας του λαδιού σε επιθυμητά επίπεδα.

9.5 Αυτόματη ρύθμιση στροφών έλικας πλοίου.

Στα πλοία συναντάμε συχνά συστήματα, τα οποία για να λειτουργούν αποδοτικά, πρέπει να στρέφονται με σταθερή ταχύτητα (αριθμό στροφών) ή ακόμη να αλλάζουν ταχύτητα σύμφωνα με κάποιο προκαθορισμένο πρόγραμμα. Πολλά από αυτά τα συστήματα είναι ηλεκτρικά με βασικό συστατικό τους τον ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος παρέχει την κίνηση και αποτελεί μέρος του μηχανισμού ελέγχου.

9.5.1 Το πρόβλημα του ελέγχου.

Ένα τέτοιο παράδειγμα συστήματος ρυθμιζόμενων στροφών είναι η ηλεκτρική πρόωση πλοίου με σταθερές στροφές έλικας. Στο σύστημα αυτό, ο ηλεκτρικός κινητήρας συνδέεται με τον τελικό άξονα της έλικας απευθείας ή με την παρεμβολή μειωτήρα στροφών.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος τροφοδοτείται με κατάλληλη τάση στα τυλίγματά του και αναπτύσσει ροπή στον άξονά του. Η ροπή αυτή μεταφέρεται στον άξονα της έλικας και υπερνικά την αντίσταση του νερού στις επιφάνειες των πτερυγίων καθώς και τις τριβές στα έδρανα και τα σημεία στεγανότητας του κινητήριου άξονα. Η αντίσταση αυτή –και επομένως η ροπή φορτίου την οποία αντιμετωπίζει ο κινητήρας– δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από τις συνθήκες στην επιφάνεια της θάλασσας: τον κυματισμό και τον άνεμο. Χωρίς έλεγχο, η μεταβολή του φορτίου στον άξονα της έλικας θα μετέβαλε διαρκώς τη ροπή στον άξονα του κινητήρα και αυτή, με τη σειρά της, θα επηρέαζε τις στροφές της μηχανής.

Αυτές οι διακυμάνσεις είναι ανεπιθύμητες για την ορθή εκμετάλλευση του πλοίου που απαιτεί κίνηση με σταθερή ταχύτητα για μεγάλα χρονικά διαστήματα και χωρίς συνεχή ανθρώπινη επιτήρηση. Επιπρόσθετα, οι συνεχείς μεταβολές των στροφών προκαλούν δυναμική καταπόνηση του κινητήρα, γιατί δημιουργούνται στρεπτικές ταλαντώσεις, που μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφή της μηχανής. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι είναι ανάγκη να

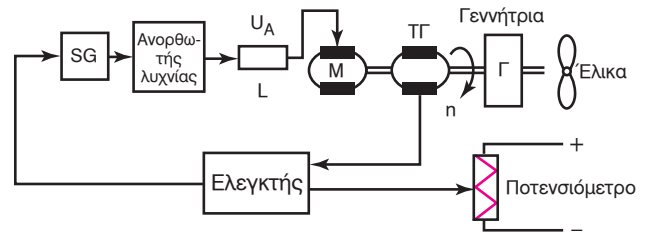
υπάρχει ένα αυτόματο σύστημα ρυθμίσεως των στροφών σε σχέση με τις αλλαγές του φορτίου.

9.5.2 Ο ηλεκτρονικός έλεγχος στροφών ηλεκτροκινητήρα.

Το σχήμα 9.5α παρουσιάζει το σύστημα ηλεκτρονικού ελέγχου των στροφών του ηλεκτροκινητήρα. Η ρύθμιση και διατήρηση των στροφών στην επιθυμητή ταχύτητα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ελεγκτή, ο οποίος αντιλαμβάνεται τις διαταραχές στο φορτίο της έλικας και προκαλεί μια κατάλληλη μεταβολή της τάσεως U_A στο επαγωγίμο του κινητήρα. Η γρήγορη αλλαγή της τάσεως U_A γίνεται με τη βοήθεια δύο διατάξεων: της **γεννήτριας τριγωνικών σημμάτων** (Sawtooth Generator-SG) και του ανορθωτή λυχνίας. Η γεννήτρια Sawtooth Generator είναι μια συσκευή, που αποτελείται από τρανζίστορ και λειτουργεί ως διαμορφωτής παλμών, παράγοντας στην κατάλληλη χρονική στιγμή μια σειρά από παλμούς, που χρησιμεύουν για τη διέγερση των λυχνιών ή θυρίστορ του ανορθωτή. Ο ανορθωτής, με τη σειρά του, παράγει στην έξοδό του συνεχή τάση. Η τάση αυτή εξομαλύνεται στο πηνίο L και κατόπιν εφαρμόζεται στον ηλεκτρικό κινητήρα M . Η γεννήτρια παλμών SG διεγείρεται από το σήμα στην έξοδο του ελεγκτή, ο οποίος τροφοδοτείται από την απόκλιση μεταξύ δύο ηλεκτρικών τάσεων. Η πρώτη αντιστοιχεί στον επιθυμητό αριθμό στροφών (RPM) του κινητήρα και καθορίζεται από ένα βαθμονομημένο ποτενοσίμετρο. Η δεύτερη αντιστοιχεί στην τρέχουσα πραγματική τιμή των στροφών της μηχανής και παράγεται από διάταξη ταχογεννήτριας (ΤΓ), συνδεδεμένη στον άξονα του κινητήρα.

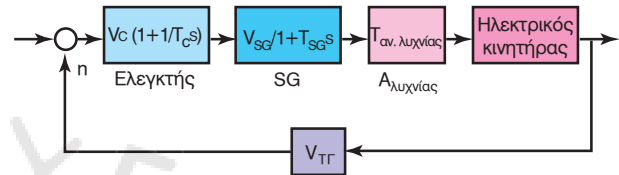
Τα ηλεκτρονικά στοιχεία που συνθέτουν το σύστημα ελέγχου για τον έλεγχο των στροφών χαρακτηρίζονται από τις παραμέτρους: **τάση, αντίσταση και χρόνος καθυστέρησης προσαρμογής**. Οι μαθηματικές παραστάσεις που εκφράζουν τη δυναμική τους φαίνονται στο λειτουργικό διάγραμμα του σχήματος 9.5β.

Στο επαγωγίμο του κινητήρα M εφαρμόζεται συνεχής ηλεκτρική τάση ($U_A = c\Phi$), όπου Φ είναι η μαγνητική ροή και c είναι μια σταθερά της μηχανής. Αυτή η τάση παράγει το ρεύμα τυμπάνου I_A , το οποίο καθορίζει την ηλεκτρομαγνητική ζεύξη μεταξύ στροφείου και στάτη και μέσω αυτής, την αναπτυσσόμενη ροπή $M = c\Phi I_A$. Ο ελεγκτής μεταβάλλει τη ροπή, ώστε να αντιστοιχεί στις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας. Στην περίπτωση αποκλίσεως της ταχύτητας από την επιθυμητή, η ροπή αυτή επαναφέρει τις στροφές της έλικας στο επιθυμητό επίπεδο.



Σχ. 9.5α.

Σύστημα αυτόματης ρυθμίσεως στροφών έλικας.



Σχ. 9.5β.

Λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου ρυθμίσεων στροφών ηλεκτρικού κινητήρα.

9.5.3 Σύνοψη.

Το ηλεκτρονικό σύστημα ρυθμίσεως της ταχύτητας του ηλεκτρικού κινητήρα διατηρεί σταθερές τις στροφές της έλικας, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις του φορτίου και τις συνθήκες πλεύσεως. Τα κύρια δυναμικά χαρακτηριστικά του συνδέονται με τις συναρτήσεις μεταφοράς του ηλεκτρικού κινητήρα και της αντιστάσεως που αναπτύσσεται στο σύστημα προώσεως (έλικα) του πλοίου.

9.6 Έλεγχος της πορείας του πλοίου.

Η διατήρηση της πορείας του πλοίου σε μια καθορισμένη κατεύθυνση είναι μια από τις βασικότερες προϋποθέσεις για την ασφάλεια και την ορθή εκμετάλλευση του πλοίου. Αυτή η ενότητα παρουσιάζει τη μαθηματική έκφραση του προβλήματος ελέγχου της πορείας με τη μορφή συναρτήσεως μεταφοράς.

9.6.1 Το πρόβλημα του ελέγχου πορείας.

Κατά την πλεύση του το πλοίο σε κανονική πορεία δέχεται ασύμμετρες πλευρικές δυνάμεις, π.χ. από τον άνεμο, τα κύματα, τα επιφανειακά θαλάσσια ρεύματα ή τις ασυμμετρίες στη γεωμετρία του σκάφους και της υπερδομής. Αυτές οι δυνάμεις τείνουν να στρέψουν την κατεύθυνση της κινήσεως, δηλαδή να δημιουργήσουν μια απόκλιση της πορείας. Η απόκλιση αντιμετωπίζεται συνεχώς μέσω της κατάλληλης τοποθέτησεως του πηδαλίου (rudder). Όπως δείχνει και το σχήμα 9.6α, η κατάσταση της

πορείας του πλοίου αποτυπώνεται με δύο κύριες παραμέτρους: τη γωνία πορείας ή απλώς «πορεία» (heading) ψ που εκφράζει τη γωνία μεταξύ του άξονα του πλοίου και μιας σταθερής διεύθυνσεως (τυπικά της διεύθυνσεως του μαγνητικού Βορρά), και τη γωνιακή απόκλιση του πηδαλίου δ_r από τη μέση θέση που αντιστοιχεί στην «ευθεία» πορεία.

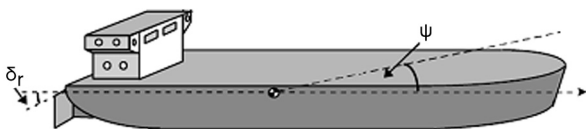
Η απόκλιση του πηδαλίου δημιουργεί μια διαφορά μεταξύ των δυνάμεων στις δύο πλευρές του πλοίου, η οποία ισοδυναμεί με στρεπτική ροπή περί τον κατακόρυφο άξονα. Σε μια πρώτη προσέγγιση, η ροπή προκαλεί επιταχυνόμενη περιστροφή του πλοίου, δηλαδή αλλαγή (διόρθωση) της πορείας. Στην πλέον απλοποιημένη μορφή της, η δυναμική σχέση μεταξύ της αποκλίσεως του πηδαλίου και της γωνίας της πορείας απεικονίζεται με μια συνάρτηση μεταφοράς δεύτερης τάξεως με ολοκληρωτή, της μορφής:

$$G_p(s) = \frac{\psi(s)}{\delta_r(s)} = \frac{K}{s(Ts+1)} \quad (9.10)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η σταθερά χρόνου T μπορεί να λάβει θετικές ή και αρνητικές τιμές, επομένως το σύστημα ανοικτού βρόχου να είναι αντίστοιχα ευσταθές ή και ασταθές. Η τιμή της εξαρτάται από την κατασκευή του πλοίου αλλά και από τις συνθήκες φορτώσεως και πλεύσεως (ταχύτητα, πλευρικές δυνάμεις).

Η εξίσωση (9.11) παρουσιάζει μια πιο σύνθετη έκφραση της συναρτήσεως μεταφοράς $G_p(s)$, όπως προκύπτει από τη γραμμικοποίηση ενός περίπλοκου μαθηματικού μοντέλου, που ενσωματώνει αναλυτικές εκφράσεις για τις διάφορες δυνάμεις στο σκάφος.

$$G_p(s) = \frac{\psi(s)}{\delta_r(s)} = \frac{-3.2587 \cdot 10^{-4} (s + 2.551 \cdot 10^{-2})}{s(s + 3.33 \cdot 10^{-1})(s + 5.3288 \cdot 10^{-2})(s + 6.8624 \cdot 10^{-3})} \quad (9.11)$$



Σχ. 9.6α.

Σχηματική απεικόνιση των παραμέτρων (γωνιών) της πορείας του πλοίου.

Οι συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων της συναρτήσεως μεταφοράς αντιστοιχούν σε ένα δεξαμενόπλοιο χωρητικότητας 250.000 κόρων, που πλέει χωρίς φορτίο με μέση ταχύτητα σε ανοικτή θάλασσα. Ανάλογα με τις συνθήκες, αυτές οι τιμές μπορούν να αλλάζουν δραστηκά.

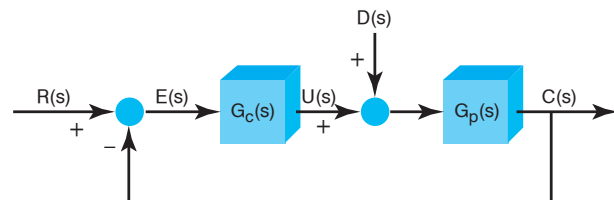
9.6.2 Το σύστημα ελέγχου πορείας.

Το σχήμα 9.6β παρουσιάζει το λειτουργικό διάγραμμα ενός συστήματος κλειστού βρόχου για τον έλεγχο της πορείας του πλοίου. Στο διάγραμμα εμφανίζονται τα εξής δομοστοιχεία και σήματα:

- $G_p(s)$ δυναμική του πλοίου, δηλαδή σχέση μεταξύ της στρεπτικής ροπής που ασκείται στο πλοίο και της πορείας $\psi(t)$.
- $G_c(s)$ δυναμική του ελεγκτή, δηλαδή σχέση μεταξύ του σφάλματος πορείας και της στρεπτικής ροπής την οποία δημιουργεί η απόκλιση του πηδαλίου.
- $R(s)$ είσοδος αναφοράς, δηλαδή τιμή της επιθυμητής πορείας του πλοίου.
- $E(s)$ σφάλμα $R(s)-C(s)$, δηλαδή απόκλιση της πραγματικής γωνίας πορείας από την επιθυμητή.
- $U(s)$ σήμα δράσεως, δηλαδή στρεπτική ροπή λόγω των δυνάμεων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του πηδαλίου.
- $D(s)$ διαταραχή, δηλαδή επιπρόσθετες άγνωστες συνιστώσες που δημιουργούν στρεπτική ροπή.
- $C(s)$ έξοδος του συστήματος, δηλαδή γωνία πορείας ψ .

9.6.3 Σύνοψη.

Μέσω του συνεχούς χειρισμού του πηδαλίου, το σύστημα ελέγχου της πορείας διατηρεί την κατεύθυνση της κινήσεως του πλοίου, αντισταθμίζοντας τις πλευρικές δυνάμεις που οφείλονται σε διακυμάνσεις των συνθηκών πλεύσεως και στην κατασκευή του πλοίου.



Σχ. 9.6β.

Λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου της πορείας του πλοίου.

9.7 Ερωτήσεις.

1. Ποια είναι τα κύρια στοιχεία του συστήματος ελέγχου της στάθμης του νερού στον ατμοϋδροθάλαμο;
2. Πώς λειτουργεί το αισθητήριο παροχής; Πώς λειτουργεί η πνευματική βαλβίδα; Πώς λειτουργεί το αναλογικό πνευματικό στοιχείο;
3. Στην περίπτωση ελεγκτή δύο όρων, ποια είναι η σχέση του συντελεστή «α» με το κέρδος k_2 ; Ποια είναι μια λογική περιοχή τιμών για το κέρδος k_2 ;
4. Πώς σχετίζεται η σταθερά χρόνου του συστήματος κλειστού βρόχου με την ταχύτητα κυκλοφορίας του νερού διά μέσου του λέβητα;
5. Υποθέτουμε δεδομένη την πίεση ή τη θερμοκρασία εξόδου του λέβητα (πριν την υπερθέρμανση) και μια εκτίμηση της βραδύτερης σταθεράς χρόνου των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας στο κύκλωμα των αυλών και τον ατμοϋδροθάλαμο. Ποια είναι η διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων k_1 , k_2 και k_3 ;
6. Πού απαντάται και ποια είναι η σκοπιμότητα του ελέγχου της ταχύτητας των θερμικών κινητήρων;
7. Ποια είναι τα κύρια στοιχεία του ρυθμιστή τύπου Woodward;
8. Ποια είναι η αρχή λειτουργίας του φυγοκεντρικού στοιχείου;
9. Ποιος είναι ο ρόλος των πνευματικών στοιχείων στο φυγοκεντρικό ρυθμιστή;
10. Ποιος είναι ο ρόλος της μονάδας αποσβέσεως ταλαντώσεων; Σε ποιες συνθήκες θα μπορούσαν να εμφανισθούν ταλαντώσεις στην ταχύτητα της μηχανής;
11. Ποια πλεονεκτήματα προσφέρει και ποιους κινδύνους αποτρέπει η αποτελεσματική ρύθμιση της θερμοκρασίας του λιπαντικού μιας μηχανής;
12. Ποια είναι τα κύρια στοιχεία του ρυθμιστή θερμοκρασίας του λαδιού;
13. Για ποιο λόγο ο αναλογικός όρος είναι επαρκής για τον έλεγχο της θερμοκρασίας;
14. Ποιοι είναι οι κύριοι λόγοι για τους οποίους επιδιώκουμε πλεύση με σταθερές στροφές έλικας;
15. Ποια είναι τα κύρια στοιχεία του ρυθμιστή ταχύτητας του ηλεκτρικού κινητήρα;
16. Ποια τμήματα του συστήματος προώσεως καθορίζουν κυρίως τη δυναμική απόκριση κατά τη μεταβολή του επιθυμητού σημείου λειτουργίας; Ποιες είναι οι σημαντικότερες παράμετροι, που επηρεάζουν αυτήν την απόκριση;
17. Ποιοι είναι οι κύριοι λόγοι, για τους οποίους επιδιώκουμε πλεύση σε σταθερή πορεία;
18. Είναι πιθανό μικρές αποκλίσεις του πηδαλίου να δημιουργούν ανεξέλεγκτα μεγάλες μεταβολές της πορείας του πλοίου; Σε ποιες συνθήκες θα μπορούσε να συμβεί αυτό;
19. Ποια είναι τα κύρια στοιχεία του συστήματος ελέγχου της πορείας του πλοίου;

Εισαγωγή στη σχεδίαση συστημάτων ελέγχου με MATLAB

10

10.1 Γενικά.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στη σχεδίαση συστημάτων αυτομάτου ελέγχου με τη χρήση του πακέτου λογισμικού **MATLAB**. Ουσιαστικά, γίνεται μια σύνοψη των θεωρητικών γνώσεων που παρουσιάστηκαν σε αυτό το βιβλίο με σκοπό την εφαρμογή τους στη σχεδίαση συστημάτων ελέγχου. Γι' αυτό προτείνεται το κεφάλαιο αυτό να χρησιμοποιηθεί για το εργαστηριακό μέρος του μαθήματος, που αφορά στη χρήση υπολογιστή στη μελέτη, σχεδίαση και εξομοίωση συστημάτων ελέγχου.

Το πρόγραμμα MATLAB γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλές ανάμεσα σε σπουδαστές, τεχνικούς, μηχανικούς και ερευνητές επειδή διαθέτει ειδικές δυνατότητες, όπως είναι η αλληλεπίδραση με το χρήστη, οι άμεσες δυνατότητες γραφικής απεικόνισης, οι ενσωματωμένες συναρτήσεις, η δυνατότητα προσθήκης συναρτήσεων από το χρήστη και ο απλός τρόπος προγραμματισμού. Το πακέτο περιλαμβάνει χρήσιμα εργαλεία για τη διασύνδεση με εξωτερικά προγράμματα και σύνολα δεδομένων, καθώς και τη δυνατότητα αποθηκεύσεως αρχείων με υπολογισμούς, που μπορούν στη συνέχεια να μετατραπούν εύκολα σε τεχνικές αναφορές.

10.2 Εισαγωγή στο MATLAB.

Το MATLAB είναι ένα πακέτο λογισμικού εύρυτα χρησιμοποιούμενο στο σχεδιασμό και την ανάλυση συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Περιλαμβάνει τις ακόλουθες δυνατότητες:

10.2.1 Είσοδος – έξοδος από το MATLAB.

Για την είσοδο στο πακέτο λογισμικού πρέπει να κάνουμε διπλό κλικ με το ποντίκι μας (*mouse*) στο εικονίδιο του MATLAB (*icon*), οπότε και μεταφερόμαστε στο περιβάλλον εργασίας (*command win-*

dow) του πακέτου, στο οποίο παρουσιάζονται τα ακόλουθα μηνύματα:

```
Commands to get started: intro, demo, help.  
Commands for more information: help, whatsnew,  
info, subscribe.  
>>
```

Για την έξοδο από το MATLAB αρκεί να πληκτρολογήσετε την εντολή:

```
>>quit  
ή  
>>exit
```

10.2.2 Χειρισμός διανυσμάτων.

Το MATLAB παρέχει εξαιρετικά απλούς τρόπους χρήσεως, ορισμού και χειρισμού διανυσμάτων. Έτσι, για να ορίσουμε το διάνυσμα στήλη:

$$x = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

αρκεί να πληκτρολογήσουμε:

```
>>x = [ 1; 2; 3]
```

και η απόκριση του προγράμματος είναι:

```
x =  
    1  
    2  
    3  
>>
```

Παρατηρήστε ότι κάθε στοιχείο ακολουθείται από το ελληνικό ερωτηματικό, το οποίο δηλώνει το τέλος γραμμής πίνακα. Εάν αντίθετα, το ερωτηματικό δεν είχε χρησιμοποιηθεί, τότε θα λαμβάναμε:

```
>>x=[1 2 3]  
x =  
    1    2    3
```

>>

το οποίο αποτελεί ένα διάνυσμα γραμμής.

Η εντολή «who» μας πληροφορεί για το ποιες μεταβλητές έχουν ορισθεί στο χώρο εργασίας. Έτσι, εάν στο σημείο αυτό πληκτρολογήσουμε την εντολή, το αποτέλεσμα θα έχει ως εξής:

```
>>who
Your variables are:
x
>>
```

Με τον τρόπο αυτό, το πρόγραμμα μας πληροφορεί ότι έχει ορισθεί μία μόνο μεταβλητή, η x. Η τιμή της μεταβλητής x μπορεί να βρεθεί, εάν απλά πληκτρολογήσουμε το όνομά της:

```
>>x
x =
    1     2     3
>>
```

Προκειμένου να λάβουμε περισσότερες πληροφορίες για το είδος της μεταβλητής αυτής πληκτρολογούμε την εντολή «whos» όπως ακολουθεί:

```
>>whos
Name Size Elements Bytes Density Complex
x      1by3      3      24    Full      No
Grand total is 3 elements using 24 bytes
>>
```

Έτσι, το πρόγραμμα μας πληροφορεί ότι η μεταβλητή x έχει διαστάσεις 1x3.

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του προγράμματος MATLAB είναι η on-line βοήθεια που προσφέρει. Έτσι, αν θέλουμε για παράδειγμα, να δούμε το σκοπό της εντολής whos αρκεί να πληκτρολογήσουμε:

```
>>help whos
WHOS
List information about current variables.
WHOS is a long form of WHO.
It lists all the variables in the current
workspace, together with information about
their size, density, complexity, etc.
>>
```

ενώ στη γενική περίπτωση, θα πρέπει να πληκτρολογήσουμε:

```
help όνομα εντολής
```

Για τον ορισμό ενός διανύσματος με 10 ισαπέχοντα στοιχεία μεταξύ των αριθμών 2 και 20 χρησιμοποιούμε την εντολή:

```
>>x=linspace(2, 20, 10)
x =
    2    4    6    8   10   12   14   16   18   20
>>
```

Εάν τα στοιχεία θέλουμε να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα στη λογαριθμική κλίμακα τότε χρησιμοποιούμε την εντολή:

```
>>x=logspace(-2, 2, 5)
x =
    0.0100    0.1000    1.0000   10.0000   100.0000
>>
```

Ορίζουμε στη συνέχεια, το διάνυσμα:

```
A = [ 1 2 3 ];
```

Παρατηρούμε στο σημείο αυτό ότι η προσθήκη του ελληνικού ερωτηματικού στο τέλος της εντολής έχει ως αποτέλεσμα να μην λαμβάνουμε απόκριση από το πρόγραμμα. Οι αριθμητικές πράξεις που ορίζονται στο MATLAB είναι με σειρά προτεραιότητας αυτές που φαίνονται στον πίνακα 10.2.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.2.1. Αριθμητικές πράξεις.

Σειρά	Περιγραφή	Σύμβολο
1η	^	Ύψωση σε δύναμη
2η	*	Πολλαπλασιασμός
3η	/	Διαίρεση
4η	+	Πρόσθεση
5η	-	Αφαίρεση

Εάν χρησιμοποιήσουμε τον τελεστή τελεία «.» πριν από τα σύμβολα των αριθμητικών πράξεων, τότε η αντίστοιχη πράξη εκτελείται στοιχείο προς στοιχείο.

10.2.3 Χειρισμός πινάκων.

Για να εισάγουμε τον πίνακα:

$$x = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

στο MATLAB, χρησιμοποιούμε την εντολή:

```
>>A= [1 2 3 ; 4 5 6 ; 7 8 9]
A =
    1     2     3
    4     5     6
```

```

      7      8      9
>>

```

Παρατηρήστε ότι οι διαδοχικές γραμμές του πίνακα χωρίζονται μεταξύ τους με το ελληνικό ερωτηματικό. Για τον υπολογισμό του ανάστροφου πίνακα πληκτρολογούμε:

```

>>B=A'
B =
     1     4     7
     2     5     8
     3     6     9
>>

```

ενώ για να πολλαπλασιάσουμε τους πίνακες A και B:

```

>>C=A*B
C =
    14    32    50
    32    77   122
    50   122   194
>>

```

Εκτός από τον πολλαπλασιασμό πίνακα με πίνακα το MATLAB επιτρέπει τον πολλαπλασιασμό πινάκων ανά στοιχείο, όπως το παράδειγμα που ακολουθεί:

```

>>D=[1 2 ; 3 4];
>>E=[4 5 ; 6 7];
>>D.*E
ans =
     4    10
    18    28
>>

```

Με όμοιο τρόπο ο πολλαπλασιασμός ενός πίνακα με τον εαυτό του γίνεται:

```

>>D^3
ans =
    37    54
    81   118
>>

```

Εξίσου εύκολα μπορεί να υπολογισθεί ο αντίστροφος ενός πίνακα:

```

>>inv(D)
ans =
   -2.0000    1.0000
    1.5000   -0.5000
>>

```

Οι ιδιοτιμές του πίνακα (ρίζες της εξίσωσης $\lambda I - A = 0$):

```

>>eig(D)

```

```

ans =
   - 0.3723
     5.3723
>>

```

Ένας σημαντικός αριθμός πινάκων με ειδική δομή μπορεί να ορισθεί εύκολα στο MATLAB. Για τον ορισμό ενός μοναδιαίου πίνακα διαστάσεως $n \times n$ χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση `eye(n)`, έτσι:

```

>>eye(3)
ans =
     1     0     0
     0     1     0
     0     0     1
>>

```

Οι συναρτήσεις `ones(n,m)` και `zeros(n,m)` χρησιμοποιούνται για τον ορισμό πινάκων διαστάσεων $n \times m$ με στοιχεία μονάδες ή μηδενικά αντίστοιχα:

```

>>zeros(2,3)
ans =
     0     0     0
     0     0     0
>>ones(3,2)
ans =
     1     1
     1     1
     1     1
>>

```

10.2.4 Συναρτήσεις.

Στο περιβάλλον του MATLAB είναι ενσωματωμένες οι πιο χρησιμοποιούμενες ευρέως συναρτήσεις, όπως οι `sin`, `cos`, `tan`, `log`, `log10`, `exp`, `sqrt` κτλ.

Π.χ.

```

>>cos(pi/4)
ans =
     0.7071

```

όπου $\pi = 3.1416$

Για να βρούμε τη σύνταξη των ενσωματωμένων συναρτήσεων, θα πρέπει να χρησιμοποιούμε την εντολή `help`. Για παράδειγμα:

```

help sin
SIN Sine
SIN(x) is the sine of the elements of X.

```

Εκτός από τις ενσωματωμένες συναρτήσεις ο χρήστης μπορεί να ορίσει δικές του συναρτήσεις, οι οποίες θα πρέπει να γραφούν σε ανεξάρτητα προγράμματα με όνομα, το οποίο θα πρέπει να ταυτίζεται με το όνομα της οριζόμενης συναρτήσεως και επέκταση `.m` (γνωστά και ως `m-files`). Η γενική

δομή ενός M-file είναι η ακόλουθη:

```
function [επιστρέφουσα - ορίσματα] = όνομα-m-
-file (ορίσματα)
εντολές του MATLAB
```

όπου η λέξη function ανήκει στις δεσμευμένες λέξεις του MATLAB και δηλώνει τον ορισμό συναρτήσεως. Έτσι αν θέλουμε να γράψουμε ένα M-file, το οποίο να υπολογίζει τις ρίζες μιας εξισώσεως δευτέρου βαθμού ($ax^2+bx+\gamma$), καλούμε τον κειμενογράφο (editor) του MATLAB (επιλέγουμε file, New, M-file) και πληκτρολογούμε τα ακόλουθα:

```
function [r1, r2]=equ2rizes(a, b, c)
% συνάρτηση υπολογισμού των ριζών
% δευτεροβάθμιας εξισώσεως  $ax^2+bx+\gamma$ 
[riza1, riza2] = equ2root(a, b, c)
% υπολογισμός Διακρίνουσας ( $\Delta=\beta^2-4\alpha\gamma$ )
diacr=b^2-4*a*c;
r1=(-b+sqrt(diacr)/(2*a);
r2=(-b-sqrt(diacr)/(2*a);
```

Στη συνέχεια, το αποθηκεύουμε στο directory, στο οποίο εργαζόμαστε (επιλέγουμε file, Save As...). Το όνομα του αρχείου πρέπει να ταυτίζεται με το όνομα της συναρτήσεως (equ2rizes) ενώ το extension θα πρέπει είναι *.m* (M-file). Το σύμβολο % χρησιμοποιείται στο MATLAB για τη χρήση σχολίων και αγνοείται στην εκτέλεση από το πακέτο λογισμικού. Τα σχόλια που ακολουθούν τον ορισμό της συναρτήσεως χρησιμοποιούνται από την εντολή help.

10.2.5 Γραφικές παραστάσεις.

Μία από τις σημαντικότερες δυνατότητες που προσφέρει το περιβάλλον του MATLAB είναι οι ενσωματωμένες ρουτίνες γραφικών δύο και τριών διαστάσεων. Για παράδειγμα, θέλουμε να παραστήσουμε γραφικά την συνάρτηση $\sin(2\pi t)$ για χρονικό διάστημα μιας περιόδου. Αρχικά, ορίζουμε το διάστημα χρόνου:

```
>> t=linspace(0, 1, 100);
```

και στη συνέχεια υπολογίζουμε την τιμή της συναρτήσεως στα σημεία αυτά:

```
>> y=sin(2*pi*t);
```

Για να παραστήσουμε γραφικά το αποτέλεσμα, χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση:

```
>> plot(t, y)
```

οπότε λαμβάνουμε το σχήμα 10.2α.

Με την προσθήκη ενός επιπλέον ορίσματος στη συνάρτηση plot καθορίζουμε τον τρόπο, με τον οποίο θα παρουσιασθούν στο γράφημα τα σημεία, ενώ η

εντολή grid προκαλεί την εμφάνιση διαγραμμίσεων (σχ. 10.2β):

```
>> plot(t, y, '-')
```

```
>> grid
```

Επίσης, η προσθήκη τίτλου και κειμένου γίνεται με τις εντολές που ακολουθούν:

```
>> title('Test time plots');
```

```
>> text(2.2, .5, 'text1')
```

▲
Συντεταγμένες κειμένου

Εκτός από τη συνάρτηση plot το MATLAB περιέχει και τις συναρτήσεις γραφικών loglog, semilog και semilogy. Έστω η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος πρώτης τάξεως:

$$G(s) = 1 / 1+s \quad (10.1)$$

Είναι γνωστό ότι το μέτρο της παραπάνω συναρτήσεως μεταφοράς δίνεται από τη σχέση:

$$|G(j\omega)| = -20 \log \sqrt{1+\omega^2} \text{ dB} \quad (10.2)$$

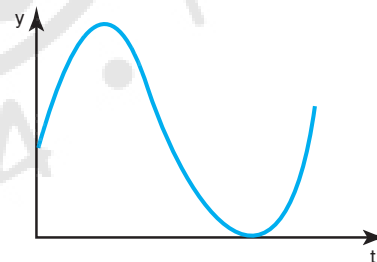
Προκειμένου να παραστήσουμε γραφικά το μέτρο συναρτήσεως της συχνότητας χρησιμοποιούμε τις εντολές:

```
>> w=logspace(-1, 1, 40);
```

```
>> G=-20*log10(sqrt(1+w.^2));
```

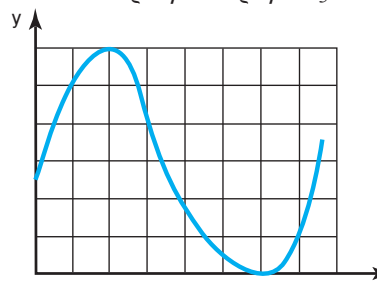
```
>> semilogx(w, G)
```

```
>>
```



Σχ. 10.2α.

Απόκριση συναρτήσεως.



Σχ. 10.2β.

Απόκριση συναρτήσεως με διαγραμμίσεις.

και η γραφική απεικόνιση που παίρνουμε είναι αυτή του σχήματος 10.2γ.

10.2.6 Προγραμματισμός στο MATLAB.

Το MATLAB έχει ενσωματωμένες δομές ελέγχου, τις οποίες βρίσκουμε σε οποιαδήποτε γλώσσα προγραμματισμού.

Ο βρόχος επαναλήψεως for ορίζεται ως:

```
for μεταβλητή = έκφραση
    εντολή
    .....
    εντολή
end
```

όπου η έκφραση έχει συνήθως τη μορφή:
μεταβλητή = αρχική τιμή; μεταβολή; τελική τιμή
ή

μεταβλητή = αρχική τιμή; τελική τιμή
και η μεταβολή τίθεται ίση με την προκαθορισμένη τιμή 1.

Η δομή επαναλήψεως υπό συνθήκη «while» είναι επίσης διαθέσιμη και έχει την ακόλουθη σύνταξη:

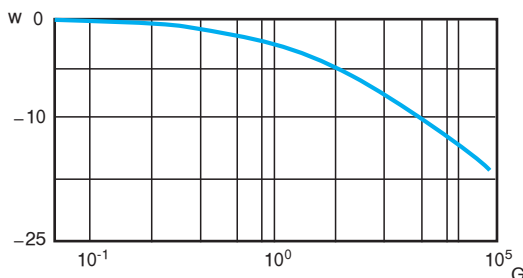
```
While λογική-έκφραση
    εντολή
    .....
    εντολή
end
```

όπου η λογική έκφραση αποτελείται από μία ή περισσότερες παραστάσεις της μορφής:

A-παράσταση τελεστής συσχέτισεως **B-παράσταση**

Οι διαθέσιμοι **τελεστές** συσχέτισεως είναι:

```
== ίσο
<= μικρότερο ή ίσο
>= μεγαλύτερο ή ίσο
~= άνισο
< μικρότερο
> μεγαλύτερο
```



Σχ. 10.2γ.

Ημιλογαριθμική απεικόνιση συναρτήσεως μεταφοράς πρώτης τάξεως.

ενώ οι διαθέσιμοι λογικοί **τελεστές** είναι οι:

```
& λογικό AND
| λογικό OR
~ λογικό NOT
```

Μία άλλη δομή ελέγχου είναι η if-elseif-end, η οποία έχει μορφή:

```
if A λογική έκφραση
    εντολές A
elseif B λογική έκφραση
    εντολές B
else
    εντολές Γ
end
```

Η τελευταία δομή ελέγχου είναι η δομή switch, η οποία έχει τη γενική μορφή:

```
Switch λογική έκφραση
case A εντολές A
case B εντολές B
case Γ εντολές Γ
otherwise εντολές
end
```

Ένα απλό παράδειγμα προγραμματισμού στο MATLAB, ο υπολογισμός του παραγοντικού ενός ακεραίου x ακολουθεί:

```
function xf=fact(x)
% υπολογισμός παραγοντικού
% ακεραίου x >=0
xf=1; i=1;
while (i<=x)
    xf=xf*i;
    i=i+1;
end
```

10.2.7 Πολυώνυμα.

Ένα πολυώνυμο έχει τη μορφή:

$$\pi(p)=p^2+2p-2 \quad (10.3)$$

Το πολυώνυμο αυτό αναπαρίσταται στο MATLAB με το διάνυσμα [1 2 -2], τα στοιχεία του οποίου είναι απλά οι συντελεστές του πολυωνύμου κατά φθίνουσα σειρά δυνάμεων. Έτσι για την αναπαράσταση του πολυωνύμου:

$$\pi(p)=p^5+2p^3-2$$

χρησιμοποιούμε την εντολή:

```
>>x=[1 0 2 0 0 -2]
```

```
x=
```

```
1 0 2 0 0 -2
```

```
>>
```

Για να βρούμε την τιμή του πολυωνύμου στο σημείο $p=1$, χρησιμοποιούμε την εντολή:

```
>> polyval(x, 1)
ans=
    1
>>
```

Εάν A είναι πίνακας, τότε με τον ίδιο τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε και τον πολυώνυμο πίνακα της μορφής:

$$\pi(A) = A^5 + 2A^3 - 2I$$

με τις εντολές:

```
>> A = [1 0; 1 1]
A =
    1    0
    1    1
>> polyvalm(x, A) % το m είναι για πίνακες
ans =
    1    0
   11    1
>>
```

Η συνάρτηση `poly` υπολογίζει τους συντελεστές του χαρακτηριστικού πολυωνύμου του $A(n,n)$, δηλαδή $\pi(\lambda) = |\lambda I - A|$

```
>> x = poly(A)
x =
    1    -2    1
>> poly2str(x, '\lambda')
ans =
    \lambda^2 - 2\lambda + 1
```

Οι ρίζες ενός πολυωνύμου μπορούμε να υπολογισθούν ως εξής:

```
>> x = [1 0 -1]
x =
    1    0   -1
>> roots(x)
ans =
   -1.0000
    1.0000
>>
>> x = [1 0 1]
x =
    1    0    1
>> roots(x)
ans =
    0+1.0000i
    0-1.0000i
>>
```

όπου $i = \sqrt{-1}$.

Ο πολλαπλασιασμός δύο πολυωνύμων πραγματοποιείται με την εντολή `conv` [convolution (συνέλιξη)] ως εξής:

```
>> a = [1 1 1]
a =
    1    1    1
>> b = [1 0 0 0 1]
b =
    1    0    0    0    1
>> conv(a, b)
ans =
    1    1    1    0    1    1    1
>>
```

10.2.8 Διαχείριση αρχείων.

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να διαβάζουμε δεδομένα από αρχεία ή να αποθηκεύουμε δεδομένα σε αρχεία. Το άνοιγμα ενός αρχείου, με το οποίο θα διαβάσουμε ή στο οποίο θα γράψουμε δεδομένα, επιτυγχάνεται με την εντολή `fopen`, η οποία έχει την ακόλουθη σύνταξη:

```
fid = fopen(όνομα αρχείου, τύπος αρχείου)
```

Το όνομα αρχείου είναι κάθε επιτρεπτό όνομα αρχείου. Ο τύπος αρχείου λαμβάνει την τιμή *r* (**read**) για ανάγνωση από αρχείο ή την τιμή *w* (**write**) για εγγραφή σε αρχείο. Για να κλείσουμε το αρχείο, χρησιμοποιούμε την εντολή:

```
error = fclose(fid)
```

όπου `fid` είναι η ακεραία σταθερά, την οποία επέστρεψε η εντολή `fopen` και η μεταβλητή `error` λαμβάνει την τιμή -1 , εάν το MATLAB απέτυχε να κλείσει το αρχείο ή την τιμή 0 , εάν εκτέλεσε επιτυχώς την εντολή.

Μία άλλη εντολή που χρησιμοποιείται είναι η `fprintf`, η οποία καταχωρεί μορφοποιημένα δεδομένα στο αρχείο. Η σύνταξή της είναι η ακόλουθη:

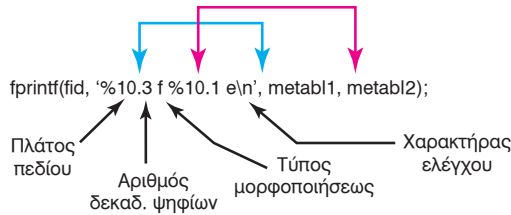
```
fprintf(fid, μορφοποίηση, μεταβλητές)
```

Η μορφοποίηση είναι ένα string, το οποίο καθορίζει τον τρόπο με το οποίο θα γραφούν οι μεταβλητές στο αρχείο, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.2δ.

Για το διάβασμα από αρχείο χρησιμοποιείται η εντολή `fscanf`, η οποία έχει σύνταξη πανομοιότυπη με τη `fprintf`:

```
fscanf(fid, μορφοποίηση, μεταβλητές)
```

Για την αποθήκευση δεδομένων μπορεί να χρη-



Σχ. 10.2δ.

String μορφοποίησης.

ομοιωθεί η εντολή save η οποία έχει σύνταξη:

```
save όνομα αρχείου
```

η οποία αποθηκεύει όλες τις μεταβλητές που είναι διαθέσιμες στο χώρο εργασίας στο αρχείο: όνομα αρχείου.mat. Τέλος, για να επαναφέρουμε ένα αρχείο που κατασκευάστηκε με την προηγούμενη εντολή, αρκεί να πληκτρολογήσουμε:

```
load όνομα αρχείου
```

Το πρόγραμμα που ακολουθεί κατασκευάζει και αποθηκεύει σε αρχείο έναν πίνακα, ο οποίος μας δίνει τις τιμές του ημιτόνου στο διάστημα $[0, \pi]$.

```
% Πρόγραμμα κατασκευής και αποθηκείωσης
% τιμών ημιτόνου στο διάστημα [0, π]
fid=fopen('sin_x.m','w');
if fid == -1
    disp('δεν ανοίγει το αρχείο')
end
t=linespace(pi, nsimia);
fprintf(fid, '%10s %10s \n', 't', 'sin(t)');
for i=1:nsimia
    fprintf(fid, '%10.2f %10.2f \n',
t(i), sin(t(i)))
end
lathos=fclose(fid);
if lathos~=0
    disp('δεν μπορεί να κλείσει το αρχείο')
end
```

10.3 Εισαγωγή στο παραθυρικό περιβάλλον (SIMULINK).

Το παραθυρικό περιβάλλον είναι εργαλείο του

MATLAB το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για την εξομίωση δυναμικών συστημάτων.

Για να ξεκινήσουμε στο περιβάλλον αυτό, πρέπει να πληκτρολογήσουμε:

```
>> simulink
```

Το σύστημα ανταποκρίνεται με εκκίνηση του simulink, η οποία γίνεται αντιληπτή από την εμφάνιση της φόρμας που φαίνεται στο σχήμα 10.3α:

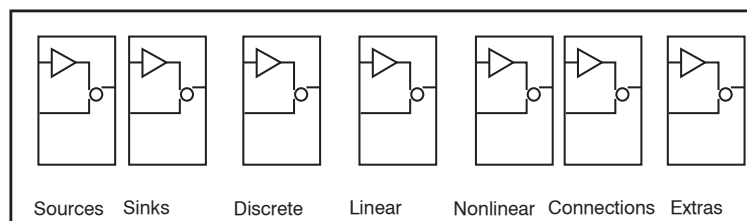
Η φόρμα περιέχει τα blocks τα οποία είναι διαθέσιμα στο Simulink, που είναι:

Sources	γεννήτριες σημάτων
Sinks	εργαλεία για γραφική απεικόνιση
Discrete	διακριτά μοντέλα και εργαλεία
Linear	συνεχή μοντέλα και εργαλεία
Nonlinear	μη γραμμικά στοιχεία
Connections	συνδέσεις με το υπολογιστικό περιβάλλον
Extras	διάφορα επιπλέον στοιχεία.

Προκειμένου να δούμε αναλυτικότερα τα εργαλεία που περιέχει κάθε block θα πρέπει να κάνουμε διπλό κλικ στο συγκεκριμένο block. Οπότε, θα εμφανιστεί στην οθόνη η φόρμα του συγκεκριμένου block που επιλέξαμε.

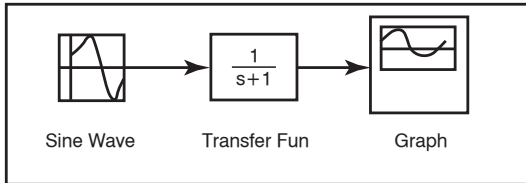
Για να ξεκινήσουμε τη δημιουργία ενός νέου προγράμματος στο παραθυρικό περιβάλλον, θα πρέπει να επιλέξουμε New από το File menu (ή Ctrl+N). Ως αποτέλεσμα της εκκίνησης νέου προγράμματος, το simulink δημιουργεί τη φόρμα ενός νέου προγράμματος. Προκειμένου να εισάγουμε κάποιο εργαλείο στο νέο πρόγραμμα εκτελούμε τα ακόλουθα:

- Ανοίγουμε το block, το οποίο περιέχει το εργαλείο αυτό.
- Τοποθετούμε το δρομέα του ποντικιού πάνω στο εργαλείο.
- Κρατώντας πατημένο το αριστερό κουμπί του ποντικιού σύρουμε το εργαλείο εντός της φόρμας του νέου προγράμματος.
- Ελευθερώνουμε το αριστερό κουμπί του ποντικιού και
- τοποθετούμε το δρομέα του ποντικιού πάνω



Σχ. 10.3α.

Κεντρική φόρμα Simulink.



Σχ. 10.3β.

Νέο πρόγραμμα στο Simulink.

στην έξοδο ενός block και με πατημένο το αριστερό κουμπί σύρουμε το ποντίκι, έως ότου βρούμε το επόμενο block. Έτσι συνδέουμε δύο block μεταξύ τους (σχ. 10.3β).

Τέλος, πριν εκτελέσουμε το πρόγραμμα που σχεδιάσαμε στο παραθυρικό περιβάλλον πρέπει να καθορίσουμε τις τιμές, που θα έχουν οι διάφοροι παράμετροι της εξομοίωσης. Έτσι επιλέγουμε Parameters από το menu Simulation και αλλάζουμε παραμέτρους σύμφωνα με τις προδιαγραφές που έχουμε καθορίσει για το σύστημα. Τρέχουμε το νέο πρόγραμμα επιλέγοντας το start από το menu Simulation, έτσι ώστε να ξεκινήσει η εξομοίωση και να εμφανιστεί η απόκριση του συστήματος.

10.4 Αυτόματος έλεγχος και MATLAB.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι βασικές εντολές, που χρησιμοποιούνται στη σχεδίαση συστημάτων αυτομάτου ελέγχου από το MATLAB (Control System Toolbox).

10.4.1 Περιγραφή συναρτήσεως μεταφοράς.

Δίνεται η παρακάτω συνάρτηση μεταφοράς:

$$G(s) = s / (s^2 + s + 1)$$

Η περιγραφή της παραπάνω συναρτήσεως μεταφοράς στο MATLAB είναι η ακόλουθη:

```
>> num=[1 0];
>> den=[1 1 1];
```

όπου το num συμβολίζει το πολυώνυμο του αριθμητή και το den το πολυώνυμο του παρονομαστή της συναρτήσεως μεταφοράς.

Για να μεταβούμε από τη συνάρτηση μεταφοράς στο χώρο καταστάσεως (στο πεδίο του χρόνου με διαφορικές εξισώσεις), ισχύει:

```
tf2ss(num, den)
```

και αντίστροφα

```
ss2tf(A, B, C, D)
```

όπου: ss=state space και tf=transfer function.

Έτσι, στο παράδειγμα που ακολουθεί έχουμε:

```
>> A=[-1 -1; 1 0];
>> B=[1; 0];
>> C=[1 0];
>> D=[0];
>> [n, d]=ss2tf(A, B, C, D)
n=
    0    1.0000    0.0000
d=
    1.0000    1.0000    1.0000
και αντίστροφα
>> num=[10];
>> den=[111];
>> [A, B, C, D]=tf2ss(num, den)
A=
   -1   -1
    1    0
B=
    1
    0
C=
    1    0
D=
    0
>>
```

Για να μεταβούμε στο MATLAB από το πεδίο συνεχούς χρόνου, στο πεδίο διακριτού χρόνου χρησιμοποιούμε την εντολή c2dm (numc,denc,T), που μετατρέπει το συνεχές σύστημα το οποίο περιγράφεται από τη συνάρτηση μεταφοράς συνεχούς χρόνου numc/denc στο αντίστοιχο διακριτό χρόνο, όπου T ο ρυθμός δειγματοληψίας, όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα:

```
>> numc=1;
>> denc=[1 1];
>> [numd, dend]=c2dm(denc, 1)
numd=
    0    0.6321
dend=
    1.00   -0.3679
>>
```

Αντίστροφα, με τη χρήση της εντολής d2cm (numd,dend,T) γίνεται μετάβαση από το πεδίο του διακριτού χρόνου στο πεδίο του συνεχούς χρόνου.

10.4.2 Άλγεβρα βαθμίδων.

Το περιβάλλον του MATLAB διαθέτει επίσης εντολές για την υλοποίηση πράξεων της άλγεβρας βαθμίδων, οι οποίες είναι εξαιρετικά χρήσιμες στο

σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου. Οι εντολές αυτές είναι οι ακόλουθες (σχ. 10.4α, 10.4β, 10.4γ):

```
>> [num, den]=series(num1, den1, num2, den2)
>> [num, den]=cloop(num1, den1)
>> [num, den]=feedback(num1, den1, num2, den2)
```

Έστω για παράδειγμα, ότι η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος του σχήματος 10.4δ. Είναι:

$$G(s) = 1 / s(s+5)(s+10)$$

και η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή:

$$G_C(s) = K_C$$

Για να βρούμε τη συνάρτηση μεταφοράς του κλειστού βρόχου θα πρέπει αρχικά να βρούμε τη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος Ανοικτού Βρόχου (AB).

$$G_{AB}(s) = G_C(s)G(s) = K_C / s(s+5)(s+10)$$

και η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου (KB) θα είναι:

$$\begin{aligned} G_{KB}(s) &= G_{KB}(s) / [1+G(s)] \\ &= K_C / (s^3 + 15s^2 + 50s + K_C) \end{aligned}$$

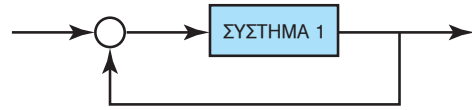
Για να βρούμε τη συνάρτηση μεταφοράς του κλειστού βρόχου στο υπολογιστικό περιβάλλον εξομοίωσης δηλώνουμε αρχικά τις συναρτήσεις μεταφοράς του ελεγκτή και του συστήματος και στη συνέχεια, υπολογίζουμε τη συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου (numolp, denolp). Τέλος υπολογίζουμε τη συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου (numclp, denclp).

```
>> Kc = 50.;
>> numc = Kc;
>> denc = 1;
>> numg = 1;
>> deng = [1 15 50 0];
>> [numolp, denolp] = series(numc, denc,
numg, deng)
numolp =
    0    0    0    50
denolp =
    1   15   50    0
>> [numclp, denclp] = cloop(numolp,
denolp)
numclp =
    0    0    0    50
denclp =
    1   15   50   50
>>
```



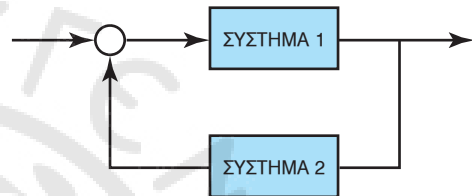
Σχ. 10.4α.

Διάγραμμα βαθμίδων σε σειρά.



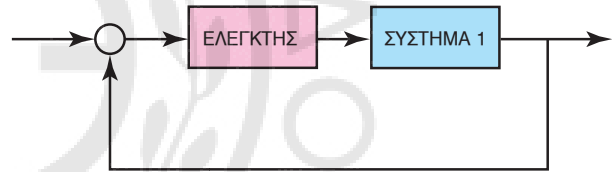
Σχ. 10.4β.

Διάγραμμα βαθμίδων με μοναδιαία ανάδραση.



Σχ. 10.4γ.

Διάγραμμα βαθμίδων με ανάδραση.



Σχ. 10.4δ.

Διάγραμμα βαθμίδων (ελεγκτής, σύστημα) με ανάδραση.

10.4.3 Γεωμετρικός τόπος ριζών.

Η βάση της τεχνικής προσδιορισμού του γεωμετρικού τόπου των ριζών είναι η παρατήρηση ότι η μεταβατική απόκριση ενός συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από τη θέση των πόλων της συναρτήσεως μεταφοράς κλειστού βρόχου στο μιγαδικό επίπεδο. Είναι επομένως αναγκαίο να τοποθετούνται οι πόλοι αυτοί σε θέσεις, που να προκαλούν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Μια συνηθισμένη μέθοδος για το σκοπό αυτό είναι η κατασκευή ενός αριθμού αντισταθμιστικών κυκλωμάτων, τα οποία να εξαρτώνται από μία συνεχή παράμετρο k και στη συνέχεια, η κατασκευή του γεωμετρικού τόπου των ριζών του κλειστού συστήματος που αντιστοιχούν σε διάφορες τιμές του k . Τελικά, επιλέγεται η τιμή του k για την οποία το σύστημα πληροί τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Πολύ συχνά αυτή η παράμετρος είναι το κέρδος k , οπότε σε αυτήν την περί-

πτωση η μέθοδος ονομάζεται **αντιστάθμιση κέρδους** (gain factor compensation).

Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε ως συνάρτηση μεταφοράς την $P(s)$, μια ρητή συνάρτηση, τότε μπορούμε να την εκφράσουμε ως πηλίκο δύο πολυωνύμων $Y(s)$ και $X(s)$ (χαρακτηριστική εξίσωση), ενώ οι πόλοι του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου είναι απλά οι ρίζες του πολυωνύμου $Y(s)+KX(s)$. Έτσι έχουμε:

$$P(s) = 1 / [s(s+2)(s+4)]$$

Στόχος μας είναι να προσδιορίσουμε ένα κέρδος, έτσι ώστε το μιγαδικό ζεύγος των πόλων του συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου να έχει συντελεστή αποσβέσεως $\zeta=0.5$. Πρώτα εμφανίζουμε το γεωμετρικό τόπο ριζών:

```
>>den=[1 6 8 0];
>>num=[0 0 0 1];
>>k=logspace(-2, 2, 50)
>>for n=1:50
    r(:, n)=roots[den+k(n)*num];
end
>>
```

Υπολογίζουμε τα πραγματικά μέρη αυτών των ριζών πληκτρολογώντας:

```
>>pragm=real(r);
```

και τα φανταστικά τους μέρη γράφοντας:

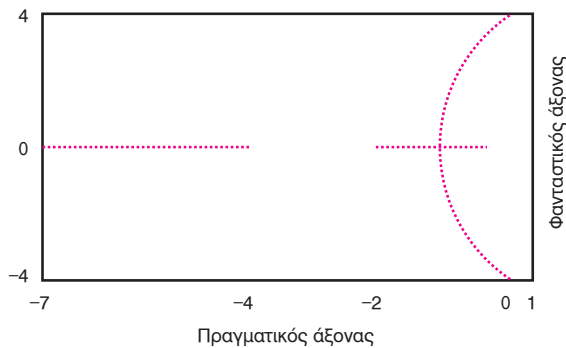
```
>>fad=imag(r);
```

Οι εντολές για γραφική απεικόνιση είναι:

```
>>plot(pragm, fad, 'b+');
>>xlabel('ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ');
>>ylabel('ΦΑΝΤΑΣΤΙΚΟΣ');
```

Η γραφική απεικόνιση που προκύπτει απεικονίζεται στο σχήμα 10.4ε, όπου φαίνεται ότι ο συντελεστής αποσβέσεως καθορίζεται από τη δεύτερη ρίζα:

```
>>plot[pragm(2,:), fad(2,:), 'b+'];
```



Σχ. 10.4ε.
Γεωμετρικός τόπος ριζών.

```
>>title('ΚΥΡΙΑΡΧΟΣ ΚΛΑΔΟΣ ΤΟΥ ΓΕΩΜΕΤΡΙ-  
ΚΟΥ ΤΟΠΟΥ ΤΩΝ ΡΙΖΩΝ');
```

Οι προδιαγραφές που τέθηκαν ικανοποιούνται, εφόσον προσδιοριστεί η τιμή του k , για την οποία η αντίστοιχη ρίζα που στο MATLAB είναι η $r = \text{pragm} + \text{sqrt}(-1) * \text{fad}$, στον κύριο κλάδο ικανοποιεί τη σχέση: $\zeta = |\text{pragm}| / |\text{fad}|$. Έτσι, πληκτρολογούμε:

```
>>plot(k, abs(pragm(2, :)) ./ abs(r(2, :)));
>>xlabel('k');
>>ylabel('Damping ratio');
```

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο σχήμα 10.4στ.

10.4.4 Βαθμονόμηση PID ελεγκτών.

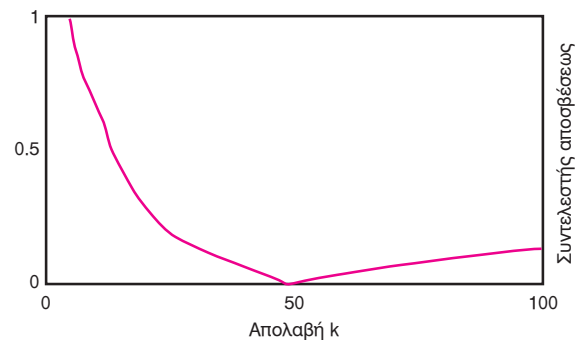
Οι PID ελεγκτές συναντώνται συχνά σε πρακτικές χρήσεις κυρίως στις βιομηχανικές διεργασίες. Η απλότητα στη σχεδίασή τους καθώς και ο μεγάλος αριθμός **αυτορυθμιζόμενων** (autotuning) PID συστημάτων χαμηλού κόστους είναι μερικοί μόνο από τους λόγους για την καθολική επικράτηση των PID ελεγκτών.

Η παλαιότερη και ίσως περισσότερο γνωστή μέθοδος βαθμονόμησης PID ελεγκτών είναι η μέθοδος Zeigler-Nichols (ZN). Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι βαθμονόμησης όπως η μέθοδος Cohen Coon και η μέθοδος RLMS (Rovira, Lopez, Murrill, Smith) με τις παραλλαγές της, οι οποίες ξεφεύγουν από το σκοπό αυτού του βιβλίου.

Η μέθοδος ZN απαιτεί για την εφαρμογή της τη γνώση της κρίσιμης ενισχύσεως K_u και περιόδου P_u του συστήματος. Εάν αυτές είναι γνωστές, τότε οι παράμετροι του ελεγκτή υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$K_C = K_u / \alpha \quad (10.4)$$

$$\tau_1 = 4 \tau_D = P_u / \beta \quad (10.5)$$



Σχ. 10.4στ.
Συντελεστής αποσβέσεως ως προς την απολαβή.

όπου η σταθερά α λαμβάνει την τιμή 2, 2.2 και 1.7 για P, PI και PID ελεγκτή, και αντίστοιχα η σταθερά β λαμβάνει την τιμή 1.2 για PI και την τιμή 2 για τον PID ελεγκτή. Οι παραπάνω σταθερές αναφέρονται στην ακόλουθη μορφή PID ελεγκτή:

$$G_C(s) = K_C [1 + 1/\tau_I s + \tau_D s] \quad (10.6)$$

Η μορφή στην οποία υλοποιείται ο PID ελεγκτής στο simulink είναι η ακόλουθη:

$$G_C(s) = K_P + K_I/s + K_D s \quad (10.7)$$

Οι δύο μορφές είναι προφανώς ισοδύναμες και ισχύει:

$$K_I = K_C / \tau_I \quad (10.8)$$

$$K_D = K_C \tau_D \quad (10.9)$$

Λόγω της σημαντικής επιτυχίας της η μέθοδος ZN έχει τύχει μεγάλου αριθμού βελτιώσεων και τροποποιήσεων (Astrom, Hang και Ho, κ.ά.). Ακολουθεί ένα παράδειγμα σχεδίασης PID ελεγκτή με εξομίωση στο simulink χρησιμοποιώντας τη μεθόδου ZN.

Παράδειγμα.

Σύμφωνα με τη μέθοδο ZN, προκειμένου να βρεθούν οι σταθερές ενός PID ελεγκτή της μορφής (10.7):

$$G_C(s) = K_P + K_I/s + K_D s$$

χρησιμοποιείται η ακόλουθη διαδικασία:

- Ο ελεγκτής τίθεται στη μορφή P-ελεγκτή ($K_I=K_D=0$).
- Η τιμή του K_P αυξάνεται προοδευτικά, έως ότου η έξοδος του συστήματος εμφανίζει αμείωτες ταλαντώσεις. Η τιμή αυτή του K_P είναι η κρίσιμη ενίσχυση K_u , για την οποία το διάγραμμα Nyquist του συστήματος διέρχεται από το σημείο $(-1,0)$.
- Μετρείται η περίοδος P_u , με την οποία ταλαντώνεται η έξοδος του συστήματος.
- Με δεδομένη την κρίσιμη ενίσχυση και κρίσιμη περίοδο υπολογίζουμε τις σταθερές του ελεγκτή PID από τις σχέσεις:

$$K_P = 0.6 K_u \quad (10.10)$$

$$K_I = K_P / (P_u/2) \quad (10.11)$$

$$K_D = K_P (P_u/8) \quad (10.12)$$

Θεωρούμε ότι έχουμε το παρακάτω σύστημα:

$$G(s) = 300 / (s^3 + 30s^2 + 200)$$

το οποίο εξομοιώνουμε σε κλειστό βρόχο με τη χρήση

ση PID ελεγκτή, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.4ζ.

Θέτουμε $K_P=1$ και αυξάνουμε προοδευτικά την τιμή του, έως ότου η έξοδος γίνει αμείωτη ταλάντωση. Αυτό συμβαίνει κοντά στην τιμή $K_P=15$. Για την τιμή αυτή, η έξοδος έχει τη μορφή του σχήματος 10.4η.

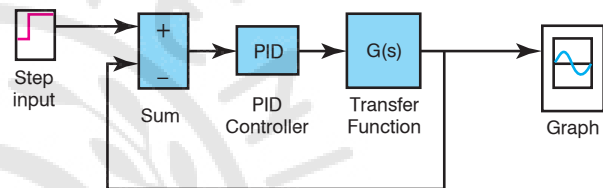
Από το σχήμα 10.4η παρατηρούμε επίσης ότι το P_u είναι περίπου ίσο με 0,42 sec. Έτσι, οι τιμές των σταθερών του PID ελεγκτή θα είναι:

$$K_P = 0.6 K_u = 9$$

$$K_I = K_P / (P_u/2) = 45$$

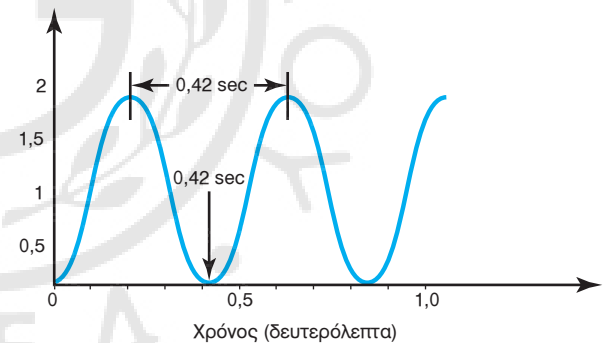
$$K_D = K_P (P_u/8) = 0.47$$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές στον PID ελεγκτή λαμβάνουμε για βηματική αλλαγή του σημείου αναφοράς, την απόκριση του σχήματος 10.4θ.



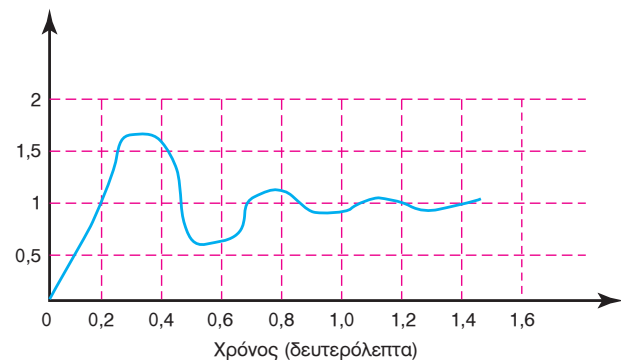
Σχ. 10.4ζ.

Εξομίωση του συστήματος στο simulink.



Σχ. 10.4η.

Εξομίωση του συστήματος στο simulink.



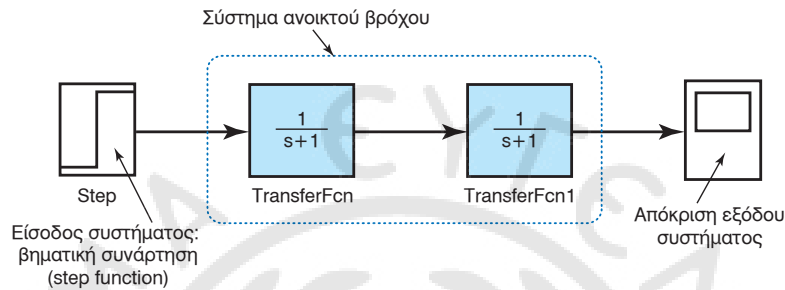
Σχ. 10.4θ.

Απόκριση συστήματος.

10.5 Παραδείγματα.

1. Δημιουργία Εφαρμογής στο Simulink.

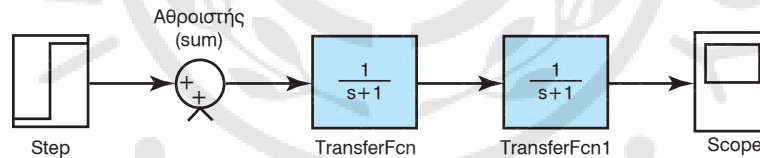
Δημιουργούμε την παρακάτω εφαρμογή στο παράθυρο εργασίας. Η πρώτη συνάρτηση μεταφοράς TransferFcn είναι ενός απλού ολοκληρωτικού ρυθμιστή: $G_C(s) = \frac{1}{s}$ και η δεύτερη συνάρτηση μεταφοράς είναι ενός συστήματος 2ης τάξεως: $G_P(s) = \frac{30}{s^2 + 6s + 13}$. Το εικονίδιο Scope παρέχει τη γραφική παράσταση της δυναμικής αποκρίσεως εξόδου του συστήματος (σχ. 10.5α):



Σχ. 10.5α.

Δημιουργία ενός συστήματος ανοικτού βρόχου (open loop) στο SIMULINK.

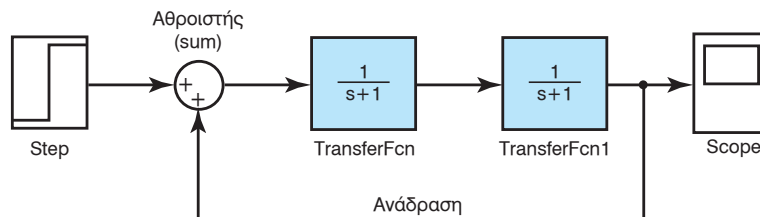
Για τη δημιουργία της ανατροφοδότησης (feedback) αρχικά προσθέτουμε έναν αθροιστή (Sum), (το εικονίδιο του βρίσκεται στη βιβλιοθήκη Simulink => Math Operations). Σβήνουμε το βέλος συνδέσεως μεταξύ των Step και TransferFcn, κατόπιν τοποθετούμε ανάμεσά τους το εικονίδιο του αθροιστή, και τέλος δημιουργούμε τις καινούργιες συνδέσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.5β.



Σχ. 10.5β.

Εισαγωγή αθροιστή στο SIMULINK.

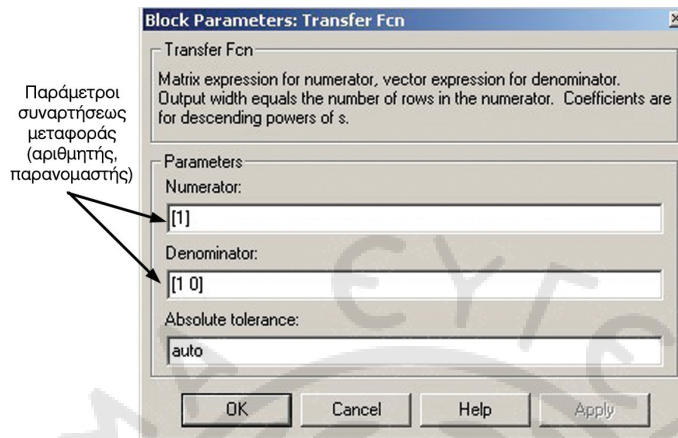
Για τη δημιουργία της ανατροφοδότησης, συνδέουμε την έξοδο του συστήματος με τον Αθροιστή. Τοποθετούμε το ποντίκι (mouse) πάνω στο βέλος που συνδέει τα εικονίδια TransferFcn1 και Scope1, πατάμε και κρατάμε πατημένο το δεξί πλήκτρο του ποντικιού, και σύρουμε το ποντίκι προς τα πάνω, αριστερά και πάνω μέχρι να βρούμε τη δεύτερη είσοδο του αθροιστή, οπότε και το αφήνουμε. Έτσι έχουμε τη σύνδεση συστήματος κλειστού βρόχου (σχ. 10.5γ):



Σχ. 10.5γ.

Εισαγωγή αναδράσεως στο SIMULINK.

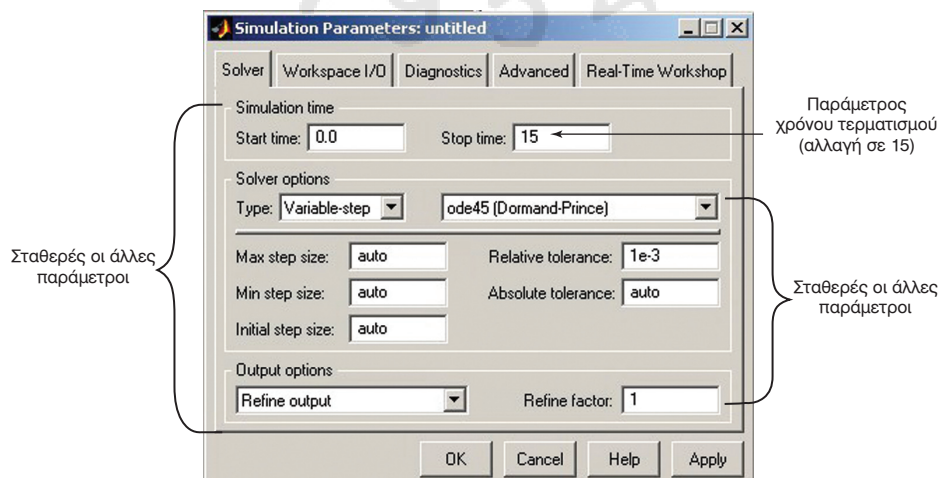
Στην επόμενη φάση του παραδείγματός μας, θα πρέπει να παραμετροποιηθούν τα μαθηματικά μοντέλα που αποτελούν το σύστημά μας. Για να εισάγουμε αυτά τα στοιχεία, κάνουμε διπλό κλικ στο εικονίδιο TransferFcn, ανοίγει το παράθυρο ιδιοτήτων της TransferFcn (Block Parameters:transfer Fcn), και στις παραμέτρους Numerator (αριθμητής) και Denominator (παρονομαστής) εισάγουμε τη συνάρτηση μεταφοράς $G_c(s)$, όπως την εισάγουμε και στο περιβάλλον MATLAB, και επιλέγουμε OK (σχ. 10.5δ). Με τον ίδιο τρόπο εισάγουμε τη συνάρτηση μεταφοράς $G_p(s)$ στο εικονίδιο TransferFcn1.



Σχ. 10.5δ.

Εισαγωγή παραμέτρων συναρτήσεως μεταφοράς TransferFcn στο SIMULINK.

Έπειτα, αλλάζουμε την πράξη του αθροιστή, για να μη δημιουργηθεί θετική ανατροφοδότηση. Κάνουμε διπλό κλικ στο εικονίδιό του, και στο πεδίο List of Signs, από $++$, γράφουμε $+ -$ και επιλέγουμε OK. Στη συνέχεια, κάνουμε διπλό κλικ στο εικονίδιο της βηματικής εισόδου Step και εκεί αν επιθυμούμε, αλλάζουμε τα χαρακτηριστικά της βηματικής εισόδου: χρόνος της αλλαγής (Step time), αρχική τιμή (Initial value) και τελική τιμή (Final Value). Για απλοποίηση, στο παράδειγμά μας, αφήνουμε τις προεπιλεγμένες τιμές (default values) και επιλέγουμε OK. Πριν εκτελέσουμε το παράδειγμα, πρέπει επίσης να καθορίσουμε τις τιμές που θα έχουν οι διάφορες παράμετροι της εξομοιώσεως. Έτσι από το μενού του παραθύρου *untitled* επιλέγουμε Simulation => Simulation Parameters μπορούμε να αλλάξουμε διάφορες παραμέτρους: το χρόνο ενάρξεως (Start time) και τερματισμού (Stop time) της εξομοιώσεως, τον αλγόριθμο αριθμητικής ολοκληρώσεως (Solver Options), καθώς και να κάνουμε και άλλες πιο προχωρημένες αλλαγές σε άλλες παραμέτρους. Στο παράδειγμά μας αλλάζουμε το χρόνο τερματισμού στα 15. Η τελική εικόνα του παραδείγματός μας είναι η εξής (σχ. 10.5ε):



Σχ. 10.5ε.

Επιλογή παραμέτρων εξομοιώσεως στο SIMULINK.

Τέλος, από το μενού του παραθύρου *untitled*, επιλέγουμε File => Save As και αποθηκεύουμε την εφαρμογή με ένα όνομα, π.χ. *paradeigmaSIM1*. Το SIMULINK σώζει το παράδειγμα με το παραπάνω όνομα σε ένα αρχείο *paradeigmaSIM1.mdl*. Προτού εκτελέσουμε την εφαρμογή, πρέπει να ανοίξουμε και την οθόνη του εικονιδίου Scope (διπλό κλικ στο εικονίδιο και ανοίγει ένα καινούργιο παράθυρο) για να μπορέσουμε να δούμε την απόκριση εξόδου του συστήματος. Η εκτέλεση του παραδείγματος (εξομοίωση) γίνεται επιλέγοντας μενού του παραθύρου *paradeigmaSIM1: Simulation => Start*.

2. Υπολογισμός Πόλων-Μηδενικών Συναρτήσεως Μεταφοράς Συστήματος.

Για τον υπολογισμό των πόλων και ριζών μιας συναρτήσεως μεταφοράς στο MATLAB χρησιμοποιούμε τις εντολές *pole* και *zero*. Αρχικά ορίζεται η συνάρτηση μεταφοράς στο *Command Window* του MATLAB:

$$G(s) = \frac{s^2 + 2s + 3}{s^3 + 4s^2 + 5s + 6}$$

```
gs=tf([1 2 3],[1 4 5 6]);
```

Για να βρούμε τους πόλους της, πληκτρολογούμε:

```
pole(gs)
```

η απόκριση του MATLAB είναι:

```
ans =
-3.0000
-0.5000 + 1.3229i
-0.5000 - 1.3229i
```

Επί πλέον, για να βρούμε τα μηδενικά της, πληκτρολογούμε:

```
zero(gs)
```

και η απόκριση του MATLAB είναι η ακόλουθη:

```
ans =
-1.0000 + 1.4142i
-1.0000 - 1.4142i
```

Για τη γραφική απεικόνιση των πόλων και των μηδενικών γίνεται χρήση της εντολής *pzmap*:

```
pzmap(gs)
```

και λαμβάνομε το διάγραμμα πόλων-μηδενικών της συναρτήσεως μεταφοράς $G(s)$ (σχ. 10.5στ).

3. Χρονική απόκριση συστήματος με βοήθεια M-file.

Το MATLAB περιέχει τις ειδικές εντολές *step*, *impulse* και *lsim* για την απόκριση των γραμμικών συστημάτων. Αντίστοιχα υπολογίζουν τη βηματική, την κρουστική απόκριση και την απόκριση του συστήματος για τυχαία είσοδο ενός γραμμικού συστήματος, του οποίου η συνάρτηση μεταφοράς έχει ήδη οριστεί. Στο παράδειγμα αυτό, ορίζομε τη συνάρτηση μεταφοράς ως εξής:

```
gs = tf([10],[1 2 10])
```

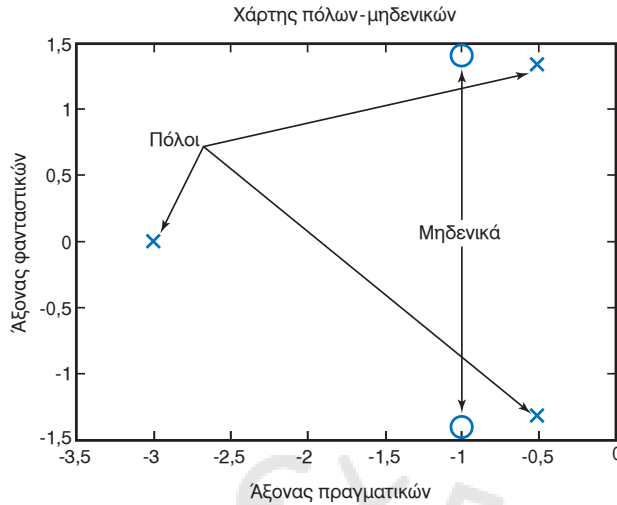
Με την εντολή:

```
figure(1), step(gs)
```

λαμβάνομε τη βηματική απόκριση του συστήματος, ενώ με την εντολή:

```
figure(2), impulse(gs)
```

λαμβάνομε την κρουστική απόκριση του συστήματος.



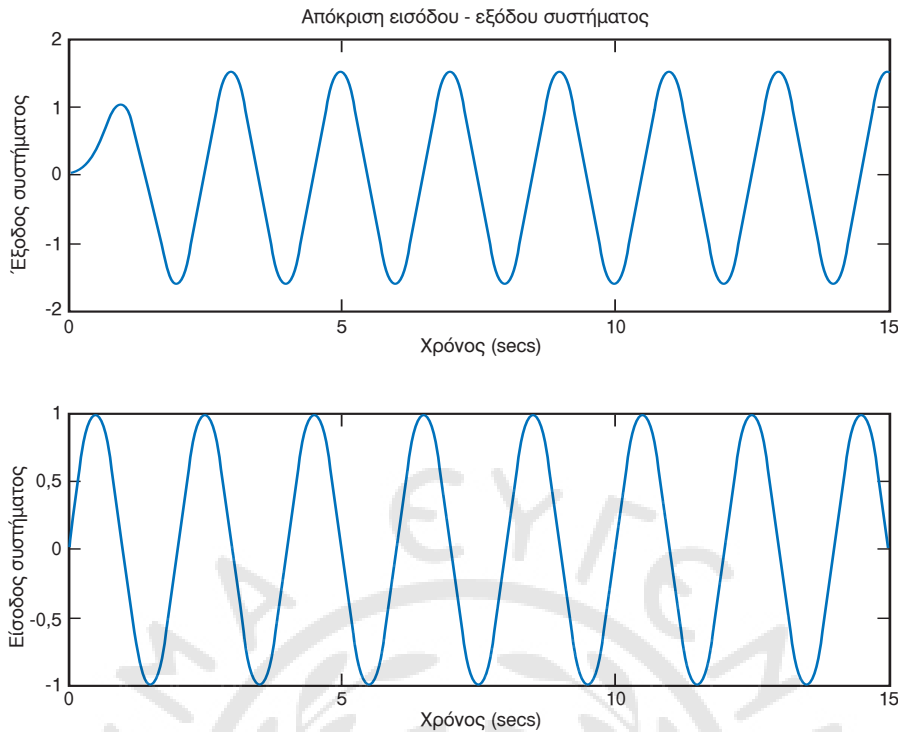
Σχ. 10.5στ.

Διάγραμμα πόλων-μηδενικών της συναρτήσεως μεταφοράς.

Το M-file είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιεί τις προγραμματιστικές δυνατότητες του MATLAB (εντολές, δομές ελέγχου, συναρτήσεις κ.λπ.). Θα χρησιμοποιήσουμε το M-file για εντολή *lsim* που είναι πιο γενική και υπολογίζει την απόκριση του συστήματος για τυχαία είσοδο. Το παρακάτω M-file (δημιουργείται από το **Command Window** όπου επιλέγουμε File =>New=>M-file και πληκτρολογούμε τον κώδικά του) δημιουργεί ένα διάγραμμα ημιτονοειδούς εισόδου με συχνότητα $\omega = \pi \text{ rad/sec}$, χρησιμοποιεί την εντολή *lsim* για να υπολογίσει και να σχεδιάσει την έξοδο του συστήματος. Ακολουθεί ο κώδικας του συγκεκριμένου M-file:

```
clear all, close all, clc
w = pi; % σε rad/sec
f = w/2/pi; % σε cycles ανά second
T = 1/f; % περίοδος cycle σε secs;
Dt = T/20; % περίοδος δειγματοληψίας
time = [0:Dt:15]'; % ορισμός πίνακα χρόνου
u = sin(w*time); % ορισμός πίνακα εισόδων
gs = tf([10], [1 2 10]); % ορισμός συναρτήσεως
% μεταφοράς
y = lsim(gs, u, time); % υπολογισμός πίνακα εξόδου
subplot(2,1,2), plot(time,u) % τμήμα σχεδιάσεως
% αποκρίσεως
xlabel('Χρόνος (secs)') % σχεδίαση X άξονα
ylabel('Είσοδος συστήματος') % σχεδίαση Y άξονα
subplot(2,1,1), plot(time,y) % τμήμα σχεδιάσεως
% αποκρίσεως
xlabel('Χρόνος (secs)') % σχεδίαση X άξονα
ylabel('Έξοδος συστήματος') % σχεδίαση Y άξονα
title('Απόκριση εισόδου-εξόδου
συστήματος') % τίτλου γραφήματος
```

Εκτελώντας το M-file, θα λάβουμε το παρακάτω γράφημα (σχ. 10.5ζ):



Σχ. 10.5ζ.

Απόκριση γραμμικού συστήματος σε ημιτονοειδή είσοδο.

10.6 Ερωτήσεις.

1. Σχεδιάστε τη γραφική απεικόνιση των συναρτήσεων:

- $y(t) = e^{-2t} \cos(2\pi t)$, για $0 \leq t \leq 2$
- $Z = f(x, y) = (x^4 - 8x^2 + 15) - (y^3 - y^2 - 1)$, για $-4 \leq x \leq 4$, $-4 \leq y \leq 4$.

2. Να βρεθεί η ολική συνάρτηση μεταφοράς του σχήματος 10.6.

Όπου:

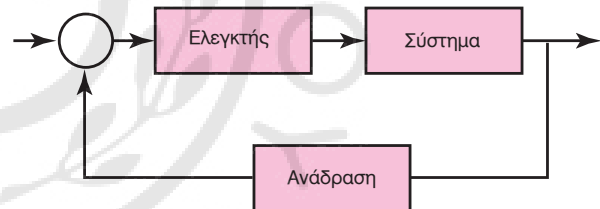
Συνάρτηση μεταφοράς συστήματος:

$$G(s) = 1 / s^2 + 5.$$

Συνάρτηση μεταφοράς ελεγκτή: $G_C(s) = K_C$.

Συνάρτηση μεταφοράς αναδράσεως: $G_F(s) = s + 2$.

3. Θεωρήστε το ακόλουθο σύστημα:



Σχ. 10.6.

$$G(s) = 1 / [(5s+1)(2s+1)(10s+1)]$$

Να γίνουν οι βαθμονομήσεις ενός PID ελεγκτή με τη μέθοδο Zeigler-Nichols και να εξομοιώσετε το σύστημα στο παραθυρικό περιβάλλον simulink για μοναδιαία βηματική μεταβολή του σημείου αναφοράς: $K_u = 12.6$, $P_u = 15.1$.

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ ΒΑΣΙΚΩΝ ΟΡΩΝ

αισθητήριο, αισθητήρας	sensor
ακολουθιακό σύστημα	sequential system
άλγεβρα βαθμίδων	block algebra
ανάδραση, ανατροφοδότηση	feedback
αναλογικό στοιχείο	analog element
αναλογικό σύστημα	analog system
αναλογικός ελεγκτής	proportional controller
αναλογο-ψηφιακός μετατροπέας	AD converter
ανοικτός βρόχος	open loop
αντηλεκτρεγερτική δύναμη	back emf
αντιστάθμιση	compensation
αντισταθμιστής	compensator
απαριθμητής	counter
απαριθμητής αυξήσεως	up counter
απαριθμητής αυξομειώσεως	up-down counter
απαριθμητής μειώσεως	down counter
απολαβή, κέρδος	gain
απόλυτη ευστάθεια	absolute stability
αρμονική συνάρτηση μεταφοράς	frequency transfer function
αρχή της υπερθέσεως	superposition principle
ασαφής λογική	fuzzy logic
ατιμούδροθάλαμος	boiler drum
αυτόματος έλεγχος	closed loop automatic control
βαθμίδα,	block
βηματική απόκριση	step response
βηματικός κινητήρας	step motor
γραμμική προσέγγιση	linearisation
γραμμικό σύστημα	linear system
διάγραμμα βαθμίδων	block diagram
διάγραμμα ροής σημάτων	signal flow diagram
διάνυσμα κατάσταση	state vector
διάταξη πόλων και ριζών	pole-zero configuration
διαταραχή	perturbation
διαφορικός ελεγκτής	derivative controller
διαφοριστής	differentiator

διεργασία	process
δράση ελέγχου	control action
δυαδικός έλεγχος	binary control
είσοδος	input
είσοδος αναφοράς	reference input
είσοδος συστήματος	system input
ελεγκτής	controller
ελεγκτής ακολουθίας	following controller
ελεγχόμενη μεταβλητή	controlled variable
έλεγχος	control
έλεγχος αναδράσεως	feedback control
έλεγχος αναλογίας	proportional control (P)
έλεγχος διαδοχικός	cascade control
έλεγχος διαφορίσεως	differential control (D)
έλεγχος δύο θέσεων	two point control
έλεγχος λόγου	ratio control
έλεγχος ολοκληρώσεως	integral control (I)
έλεγχος on-off	on -off control
έλεγχος τριών όρων	PID control
ενεργοποιητής	actuator
ελεύθερη απόκριση	free response
ενισχυτής	amplifier
εξαναγκασμένη απόκριση	forced response
εξασθένηση	attenuation
εξίσωση καταστάσεως	state equation
έξοδος	output
εποπτικός έλεγχος	superisory control
ευαισθησία	sensitivity
ευστάθεια	stability
ευφρές σύστημα	intelligent system
θερμοστοιχείο	thermocouple
θόρυβος	noise
κέρδος	gain
κλειστός βρόχος	closed loop
κόρος	saturation
λειτουργικό διάγραμμα βαθμίδων	functional block diagram
μεταβατική απόκριση	transient response
μετατροπέας	converter (A/D D/A)
μετατροπή καταρράκτη	flash conversion
μετρητής	detector
μετρητής τάσεως	strain gage
μέτρο	magnitude
μη γραμμικό σύστημα	non linear system
μοναδιαία ανοδική συνάρτηση	unit ramp function
μοναδιαία βηματική συνάρτηση	unit step function

μοναδιαία παλμική συνάρτηση	unit impulse function
μόνιμη απόκριση	steady state response
μορφομετροπέας	transducer
ολοκληρωτής	integrator
ολοκληρωτικός ελεγκτής	integral controller
παλμική απόκριση	impulse response
πηγή	source
πίνακας αληθείας	truth table
πολικό διάγραμμα	polar plot
πολλαπλό σύστημα	multivariable system
πολλαπλός έλεγχος	multiple control
πόλοι	poles
πολυπλέκτης	multiplexer
προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής	programmable logic controller
ρίζες, μηδενικές τιμές	roots, zeros
ρύθμιση	regulation
ρυθμιστής	regulator
ρυθμιστής ταχύτητας	speed governor
σεισμική μάζα	seismic mass
σερβοκινητήρας	servomotor
σημείο ρυθμίσεως	set point
σκεπτόμενο σύστημα ελέγχου	thinking control system
σταθερά χρόνου	time constant
στοιχείο δράσεως	actuator
συγκριτής	comparator
σύγχρονο	synchro
συγχρονοδιαφορικό	differential synchro
συνάρτηση βάρους	weight function
συνάρτηση δέλτα	delta function
συνάρτηση μεταφοράς	transfer function
συνδυαστικός αυτοματισμός	combinatorial control
συντελεστής αποσβέσεως	damping ratio
συντελεστής υπερυψώσεως	overshoot coefficient
σύστημα ελέγχου	control system
σύστημα συλλογής δεδομένων και εποπτικού ελέγχου	SCADA
σφάλμα ελέγχου	control error
σχετική ευστάθεια	relative stability
τελεστικός ενισχυτής	operational amplifier
τεχνητή νοημοσύνη	artificial intelligence
υπερύψωση, υπερακόντιση	overshoot
υποπρόγραμμα	sub-programme
υποπρόγραμμα εκτελέσεως	programm block
υποπρόγραμμα λειτουργίας	function block
υποπρόγραμμα οργάνωσης	organization block
υπορουτίνα	sub-routine

φάση, γωνία φάση	phase, phase angle
φυσική συχνότητα	natural frequency
φωτομετρητής, φωτοαισθητήρας	photo-detector
χαρακτηριστική εξίσωση	characteristic equation
χρονικά μεταβαλλόμενος συντελεστής	time variables coefficient
χρονική απόκριση	time response
χρόνος ανυψώσεως	rise time
ψηφιακός έλεγχος	digital control



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βαφειάδη Π., Μαθήματα Συστημάτων Ελέγχου, Αθήνα, 1983.
- Βελώνη Α., Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, εκδ. Παπασωτηρίου, 1997.
- Καλλιγερόπουλος Δ., Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Τόμοι 1, 2, εκδ. Ολυμπιάς, 1991.
- Κινγκ Ρ. Ε., Πληροφορικός Έλεγχος, εκδ. Παπασωτηρίου, 1994.
- Κινγκ Ρ. Ε., Υπολογιστική Νοημοσύνη στον Έλεγχο Συστημάτων, εκδ. Π. Τραυλός, 1998.
- Κότσαλος Ε., Χ. Κουτουλάκος και Γ. Χαμηλοθώρης, Εισαγωγή στους Αυτοματισμούς, διδακτικό βιβλίο του Τομέα Ηλεκτρολογίας των ΤΕΕ, εκδ. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, 2000.
- Κουμπουλής Φ., Βιομηχανικός Έλεγχος, εκδ. Νέων Τεχνολογιών, 1999.
- Λιγνός Ι., Π. Μπούσλης, Γ. Πολίτης και Γ.Ε. Χαμηλοθώρης, Συστήματα Αυτοματισμών, διδακτικό βιβλίο του Τομέα Ηλεκτρολογίας των ΤΕΕ, εκδ. Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, 2001.
- Πακτίης Σπ., Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Θεωρία και Προβλήματα, εκδ. ΙΩΝ, 2004.
- Πανταζή Ν., Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Θεωρία και Εργαστήριο, Αθήνα, 1994.
- Παρασκευόπουλος Π., Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο, Αθήνα, 1991.
- Πετρίδη Β., Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Τόμοι 1, 2, Θεσσαλονίκη, 1986.
- Ρούτουλας Α. Τ., Υδραυλικά - Πνευματικά Συστήματα, Εφαρμογές, εκδ. Εμμανουηλίδης, 2003.
- Σταματέλος Α. Μ., Θερμομετρία-Θερμογραφία, επιμ. Δ. Ζιώγου, Εργαστ. Θερμοδυναμική 7 Θερμικών Μηχανών, τμ. Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2007.
- Σύρκος Γ. Π., Κούκος Ι. Κ., Εισαγωγή στη Σχεδίαση Συστημάτων Ελέγχου με το MATLAB, Αθήνα, 2003.
- Σύρκος Γ. Π., Ψηφιακός Έλεγχος, Κλασικός-Σύγχρονος-Εξελικτικός με MATLAB, Αθήνα, 2003.
- Τζαφέστα Σ., Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Τόμοι 1,2,3, Πάτρα-Αθήνα, 1975.
- Τσελές Δ., CAD-CAM, εκδ. Σύγχρονη Εκδοτική, 2003.
- Τσιαντής Κ., Κασσιδάς Αθ., Παπαχρήστος Δ., Σημειώσεις Ελέγχου Ενεργειακών Συστημάτων με Matlab, Εργαστήριο Ελέγχου Ενεργειακών Συστημάτων, Τμήμα Ενεργειακής Τεχνολογίας, ΤΕΙ Αθήνας, 2005.
- Χρησιτίδου Α., Νασόπουλος Κ., Σημειώσεις Πνευματικού Ελέγχου, Εργαστήριο Αυτοματισμού, Σχολή Αξ/κών Μηχανικών ΕΝ, ΑΕΝ Ασπροπύργου, 2003.
- Haberle G., Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά, εκδ. ΕΤΕ, 1996.



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Γενικά	1
1.2	Ιστορική εξέλιξη	1
1.3	Γενική περιγραφή συστημάτων αυτομάτου ελέγχου	3
1.3.1	Συστήματα ανοικτού βρόχου (open loop)	3
1.3.2	Συστήματα κλειστού βρόχου (closed loop)	3
1.4	Σύγκριση συστημάτων ανοικτού και κλειστού βρόχου	4
1.5	Παραδείγματα	5
1.6	Ερωτήσεις	6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

2.1	Μετασχηματισμοί Laplace	7
2.1.1	Εισαγωγή	7
2.1.2	Ιδιότητες μετασχηματισμού Laplace	7
2.1.3	Αντίστροφος μετασχηματισμός Laplace	9
2.2	Συνάρτηση μεταφοράς	9
2.3	Χρονική απόκριση	11
2.3.1	Γενικά	11
2.3.2	Χρονικές συναρτήσεις εισόδου	12
2.3.3	Μορφές χρονικής αποκρίσεως	13
2.4	Χαρακτηριστικά και επιδόσεις συστημάτων ελέγχου	15
2.4.1	Εισαγωγή	15
2.4.2	Πλεονεκτήματα χρήσεως της αναδράσεως στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου	15
2.4.3	Μειονεκτήματα της αναδράσεως στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου	16
2.4.4	Ευαισθησία συστημάτων σε μεταβολές παραμέτρων	17
2.4.5	Σφάλματα στη μόνιμη κατάσταση	17
2.5	Ευστάθεια και μεταβατική συμπεριφορά	18
2.5.1	Ευστάθεια (stability)	18
2.5.2	Κριτήριο Routh	20
2.5.3	Σχετική ευστάθεια	20
2.5.4	Κριτήριο Nyquist	21
2.5.5	Μεταβατική συμπεριφορά	21
2.6	Αρμονική απόκριση	22
2.6.1	Γενικά	22
2.6.2	Διαγράμματα μέτρου - φάσεως	22
2.7	Άλγεβρα βαθμίδων και διαγραμμάτων ροής σημάτων	22
2.7.1	Άλγεβρα βαθμίδων	22
2.7.2	Άλγεβρα διαγραμμάτων ροής σημάτων	24
2.8	Παραδείγματα	25
2.9	Ερωτήσεις	36

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΟΡΓΑΝΩΝ

3.1	Εισαγωγή	39
3.2	Ηλεκτρικά και ηλεκτρομηχανολογικά εξαρτήματα	39
3.2.1	Ποτενσιόμετρο για τη μέτρηση της τάσεως	39
3.2.2	Ποτενσιόμετρο για μέτρηση σφάλματος (συγκριτής)	39
3.2.3	Μορφομετατροπείς	40
3.2.4	Συγχρονισμοί	41
3.2.5	Σερβοκινητήρες	42
3.2.6	Ταχύμετρο	44
3.3	Ηλεκτρονικά εξαρτήματα	44
3.3.1	Τελεστικός ενισχυτής	44
3.3.2	Μη αναστροφικός ενισχυτής	46
3.3.3	Διαφορικός ενισχυτής	46
3.3.4	Ολοκληρωτής	47
3.3.5	Διαφοριστής	47
3.3.6	Ειδικά κυκλώματα	47
3.4	Πνευματικά εξαρτήματα	47
3.4.1	Μετατροπέας ρεύματος σε πίεση	47
3.4.2	Πνευματικός επενεργητής	48
3.5	Μηχανικά εξαρτήματα	49
3.5.1	Μορφομετατροπέας μετατοπίσεως	49
3.5.2	Μετρητής τάσεως	49
3.5.3	Επιταχυνσιόμετρο	50
3.5.4	Μορφομετατροπέας πίεσεως	50
3.5.5	Μορφομετατροπέας ροής	51
3.5.6	Οδοντωτοί τροχοί	51
3.5.7	Υδραυλικός σερβοκινητήρας	52
3.6	Μετρητές θερμοκρασίας	52
3.7	Ερωτήσεις	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ ΕΛΕΓΚΤΕΣ

4.1	Εισαγωγή	55
4.2	Τύποι ελέγχου	55
4.2.1	Έλεγχος μοναδικού βρόχου	55
4.2.2	Έλεγχος λόγου	56
4.2.3	Διαδοχικός έλεγχος	56
4.2.4	Έλεγχος προσμείξεως	56
4.3	Συντονισμός ελεγκτών	56
4.4	Έλεγχος τριών όρων	57
4.5	Τεχνολογία ελεγκτών	59
4.5.1	Πνευματικά και υδραυλικά συστήματα (ελεγκτές)	59
4.5.2	Ηλεκτρικοί ελεγκτές	62
4.5.3	Ηλεκτρονικοί ελεγκτές	62
4.5.4	Ψηφιακοί ελεγκτές	65
4.6	Ερωτήσεις	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΘΕΩΡΙΑ

5.1	Εισαγωγή	69
-----	----------------	----

5.2	Μεταβλητές καταστάσεις	69
5.3	Μετασχηματισμός Z	70
5.4	Ψηφιακά συστήματα ελέγχου	71
5.5	Ηλεκτρονικά κυκλώματα προσαρμογής (interface)	72
5.6	Μη γραμμικά συστήματα ελέγχου	74
5.7	Ευφυής έλεγχος	75
5.8	Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	77
5.9	Ερωτήσεις	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΛΟΓΙΚΟΥ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

6.1	Γενικά	79
6.2	Η διαδικασία σχεδιάσεως	79
6.3	Λογικός αυτοματισμός και συνδυαστικός αυτοματισμός	79
6.3.1	Διατύπωση πίνακα αληθείας	80
6.3.2	Οι λογικές πράξεις και οι λογικές πύλες	82
6.3.3	Η λογική παράσταση	83
6.4	Ακολουθιακός αυτοματισμός	84
6.4.1	Μέθοδος προδιαγραφής GRAFCET	84
6.4.2	Κανόνες της GRAFCET	85
6.5	Ερωτήσεις	86

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΖΟΜΕΝΟΙ ΛΟΓΙΚΟΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ

7.1	Εισαγωγή	87
7.2	Κύρια μέρη του ΠΛΕ	87
7.2.1	Επεξεργαστής	88
7.3	Λειτουργία και χαρακτηριστικά του ΠΛΕ	88
7.4	Διαχείριση δεδομένων	89
7.4.1	Η μεταφορά των δεδομένων στον ΠΛΕ	91
7.4.2	Η χρήση της μεταφοράς δεδομένων στον προγραμματισμό	93
7.5	Οργάνωση προγράμματος	94
7.5.1	Εντολές κλήσεως υποπρογράμματος	96
7.5.2	Το υποπρόγραμμα λειτουργιών (function)	96
7.6	Απαριθμητές – Συγκριτές	98
7.6.1	Δομή της λέξεως του απαριθμητή	98
7.6.2	Λειτουργίες των απαριθμητών	98
7.6.3	Είδη και λειτουργία των συγκριτών	102
7.7	Αναλογικές εισόδοι	103
7.7.1	Αναлого-ψηφιακή μετατροπή	104
7.7.2	Η εφαρμογή αναλογικών εισόδων στους ΠΛΕ	106
7.8	Αναλογικές εξόδοι	107
7.8.1	Ο τελεστικός ενισχυτής ως βαθμίδα εξόδου	107
7.8.2	Μετατροπή με αθροιστή	108
7.8.3	Η εφαρμογή αναλογικών εξόδων στους ΠΛΕ	109
7.9	Διόρθωση και ανίχνευση βλαβών	110
7.10	Ερωτήσεις	110

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΩΟ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΖΟΜΕΝΩΝ ΛΟΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ

8.1	Γενικά	111
-----	--------	-----

8.2	Διαδικασία επιλύσεως και τεκμηριώσεως	111
8.3	Περιγραφή του προβλήματος	111
8.3.1	Περιβάλλον του συστήματος αυτοματισμού	111
8.3.2	Στόχος του συστήματος αυτοματισμού	112
8.4	Περιγραφή σημάτων και συνδέσεων	112
8.4.1	Είσοδοι	112
8.4.2	Έξοδοι	114
8.5	Περιγραφή της λύσεως αυτοματισμού	115
8.6	Συνδεσμολογία και προγραμματισμός του ΠΛΕ	116
8.7.	Παράδειγμα: έλεγχος θέσεως	117
8.7.1	Περιβάλλον και στόχος του συστήματος αυτοματισμού	117
8.7.2	Περιγραφή εισόδων	118
8.7.3	Περιγραφή εξόδων	119
8.7.4	Περιγραφή της λύσεως αυτοματισμού	120
8.7.5	Συνδεσμολογία και προγραμματισμός του ΠΛΕ	120
8.8	Παράδειγμα: έλεγχος στάθμης	121
8.8.1	Περιβάλλον και στόχος του συστήματος αυτοματισμού	121
8.8.2	Περιγραφή εισόδων και εξόδων	122
8.8.3	Περιγραφή της λύσεως αυτοματισμού	123
8.8.4	Συνδεσμολογία και προγραμματισμός του ΠΛΕ	124
8.9	Ερωτήσεις	124

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ ΠΛΟΙΩΝ

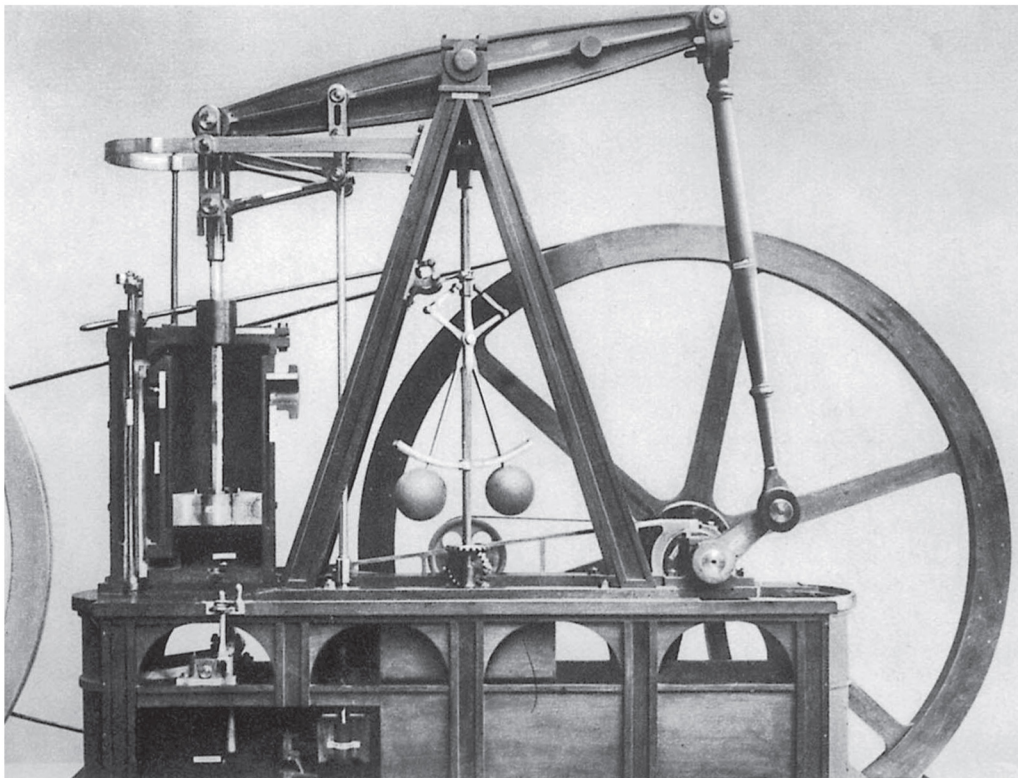
9.1	Γενικά	125
9.2	Πνευματικός έλεγχος στάθμης ατμοϋδροθαλάμου λέβητα	125
9.2.1	Το πρόβλημα του ελέγχου	125
9.2.2	Το σύστημα ελέγχου της στάθμης	126
9.2.3	Σύνοψη	128
9.3	Υδραυλικός ρυθμιστής στροφών κινητήρα (Woodward Governor)	128
9.3.1	Το πρόβλημα του ελέγχου	129
9.3.2	Ο φυγοκεντρικός ρυθμιστής στροφών	129
9.3.3	Σύνοψη	131
9.4	Ηλεκτρονικός έλεγχος θερμοκρασίας λιπαντικού κύριας μηχανής	131
9.4.1	Το πρόβλημα του ελέγχου	131
9.4.2	Ο ηλεκτρονικός ρυθμιστής θερμοκρασίας	132
9.4.3	Σύνοψη	133
9.5	Αυτόματη ρύθμιση στροφών έλικας πλοίου	133
9.5.1	Το πρόβλημα του ελέγχου	133
9.5.2	Ο ηλεκτρονικός έλεγχος στροφών ηλεκτροκινητήρα	134
9.5.3	Σύνοψη	134
9.6	Έλεγχος της πορείας του πλοίου	134
9.6.1	Το πρόβλημα του ελέγχου πορείας	134
9.6.2	Το σύστημα ελέγχου πορείας	135
9.6.3	Σύνοψη	135
9.7	Ερωτήσεις	136

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ MATLAB

10.1	Γενικά	137
10.2	Εισαγωγή στο MATLAB	137
10.2.1	Είσοδος – έξοδος από το MATLAB	137
10.2.2	Χειρισμός διανυσμάτων	137

10.2.3 Χειρισμός πινάκων	138
10.2.4 Συναρτήσεις	139
10.2.5 Γραφικές παραστάσεις	140
10.2.6 Προγραμματισμός στο MATLAB	141
10.2.7 Πολύωνυμα	141
10.2.8 Διαχείριση αρχείων	142
10.3 Εισαγωγή στο παραθυρικό περιβάλλον (SIMULINK)	143
10.4 Αυτόματος έλεγχος και MATLAB	144
10.4.1 Περιγραφή συναρτήσεως μεταφοράς	144
10.4.2 Άλγεβρα βαθμίδων	144
10.4.3 Γεωμετρικός τόπος ριζών	145
10.4.4 Βαθμονόμηση PID ελεγκτών	146
10.5 Παραδείγματα	148
10.6 Ερωτήσεις	152
Γλωσσάρι βασικών όρων	153
Βιβλιογραφία	157
Πίνακας περιεχομένων	159





Ατμομηχανή (τέλη του 18ου αι.), εφοδιασμένη με ρυθμιστή του Watt για την αυτόματη διατήρηση σταθερής ταχύτητας περιστροφής.