

Γεώργιος Χασάπης

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ & ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ



ΕΚΔΟΣΕΙΣ
ΖΗΤΗ

Κάθε γνήσιο αντίτυπο φέρει την υπογραφή του συγγραφέα

ISBN 960-431-756-3

© Copyright: Γ. Χασάπης, Εκδόσεις Ζήτη, Δεκέμβριος 2001, Θεσσαλονίκη

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του Ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.



www.ziti.gr

Φωτοστοιχειοθεσία
Εκτύπωση

Βιβλιοπωλείο

Π. ΖΗΤΗ & ΣΙΑ ΟΕ

18ο χλμ Θεσ/νίκης-Περαιάς

Τ.Θ. 171 • Νέοι Επιβάτες Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19

Τηλ.: 03920 72.222 (5 γραμ.) - Fax: 03920 72.229

e-mail: info@ziti.gr

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ

Αρμενοπούλου 27 • 546 35 Θεσσαλονίκη

Τηλ. 0310 203.720, Fax 0310 211.305

e-mail: sales@ziti.gr

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια μεγάλη προσπάθεια εισαγωγής στην ελληνική βιομηχανία σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων βιομηχανικού αυτοματισμού και ελέγχου. Ο όρος βιομηχανικός αυτοματισμός χρησιμοποιείται συνήθως για να προσδιορίσει τα όργανα, τις μεθόδους και τα ψηφιακά συστήματα με τα οποία είναι δυνατόν να υλοποιηθεί ο διακοπτικός και ακολουθιακός έλεγχος των βιομηχανικών διεργασιών. Τυπικές εφαρμογές τέτοιου τύπου ελέγχου είναι η εκκίνηση, η διακοπή της λειτουργίας και η προστασία κινητήρων, συμπιεστών και άλλων παρόμοιων ηλεκτρομηχανικών διατάξεων αλλά και η εκτέλεση λογικών ακολουθιών ενεργοποίησης ηλεκτρονόμων και διακοπών ισχύος σε υποσταθμούς διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, ο όρος βιομηχανικός έλεγχος τείνει να ταυτιστεί με τον έλεγχο της οδήγησης σε επιθυμητές τιμές φυσικών μεταβλητών που μπορούν να μεταβάλλονται συνεχώς στο χρόνο, και της διατήρησης των τιμών αυτών για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Τυπικές εφαρμογές βιομηχανικού ελέγχου είναι η ρύθμιση μεταβλητών πίεσης, θερμοκρασίας και στάθμης υγρών σε χημικούς αντιδραστήρες, λέβητες και πιεστικά δοχεία. Με τη διατήρηση των μεταβλητών αυτών σε συγκεκριμένες τιμές επιτυγχάνεται ποσοτικός και ποιοτικός έλεγχος του παραγόμενου προϊόντος. Σε κάθε πραγματική βιομηχανία όμως τα προβλήματα του βιομηχανικού αυτοματισμού και ελέγχου συνυπάρχουν, άλλοτε σε μεγαλύτερη κλίμακα του ενός τύπου ελέγχου και άλλοτε του άλλου.

Όμως, στις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες, η έννοια της αυτοματοποίησης έχει επεκταθεί και στα επίπεδα του προγραμματισμού της λειτουργίας των βιομηχανικών μονάδων και της οργάνωσης της παραγωγής, της συντήρησης, αποθήκευσης και διακίνησης των πρώτων υλών και των τελικών προϊόντων και στο στρατηγικό σχεδιασμό των στόχων και των κατευθύνσεων ανάπτυξης της βιομηχανίας. Για την υλοποίηση της ευρύτερης αυτής αυτοματοποίησης που ξεφεύγει από τα όρια του αυτοματισμού και ελέγχου μηχανών και διεργασιών απαιτείται η αυτοματοποίηση της διακίνησης πληροφορίας και γραφειοκρατικών διαδικασιών που συνήθως υλοποιούνται από ανθρώπινες δράσεις μέσα στα πλαίσια ενός οργανογράμματος λειτουργίας του βιομηχανικού οργανισμού. Για αυτή την αυτοματοποίηση της διακίνησης της πληροφορίας και των διαδικασιών χρειάζεται να γίνει ανάπτυξη εξειδικευμένου λογισμικού και διασύνδεση των υπολογιστικών μέσων που χρησιμοποιούνται σε κάθε επίπεδο του βιομηχανικού οργανισμού. Επειδή η αυτοματοποίηση ενός

βιομηχανικού οργανισμού με την ευρύτερη έννοια του όρου που μόλις δόθηκε, ξεκίνησε να υλοποιείται κυρίως από την κατασκευαστική βιομηχανία, ο όρος που χρησιμοποιήθηκε μέχρι τώρα σε ακαδημαϊκούς και βιομηχανικούς κύκλους για να προσδιορίσει τα παραπάνω ήταν Ολοκληρωμένα Συστήματα Παραγωγής (Computer Integrated Manufacturing). Η επέκταση όμως της ιδέας αυτής και στους κλάδους της βιομηχανίας των συνεχούς χρόνου διεργασιών έχει υποκαταστήσει εν μέρει τον προηγούμενο όρο με τον όρο Συνολικά Ολοκληρωμένη Αυτοματοποίηση (Totally Integrated Automation).

Η σχεδίαση και ανάπτυξη συστημάτων βιομηχανικού αυτοματισμού και ελέγχου εντάσσεται πλέον μέσα σε αυτό το γενικό πλαίσιο αυτοματοποίησης βιομηχανικών οργανισμών και πέρα από τις αυστηρές προδιαγραφές που τίθενται από τις ανάγκες του βιομηχανικού αυτοματισμού και ελέγχου, τα συστήματα αυτά πρέπει να δομούνται με δυνατότητες επικοινωνίας με τα υπόλοιπα συστήματα που αυτοματοποιούν διαδικασίες και λειτουργίες του ευρύτερου οργανογράμματος της βιομηχανίας. Χρειάζεται δηλαδή να είναι συμβατά με τους κανόνες, τη μορφή και τις ταχύτητες ανταλλαγής και λήψης δεδομένων που επιβάλλουν τόσο οι ανάγκες των άλλων συστημάτων αυτοματοποίησης σε αυτά αλλά και αυτά στα άλλα συστήματα.

Γενικά, η σχεδίαση και ανάπτυξη των συστημάτων βιομηχανικού αυτοματισμού και ελέγχου μπορεί να διαχωριστεί σε δύο φάσεις, αυτή της εύρεσης των στρατηγικών ελέγχου και περιγραφής των μαθηματικών ή ευρηματικών αλγορίθμων που θα υλοποιήσουν τις στρατηγικές αυτές και αυτή της επιλογής ή σχεδίασης του υλικού των υπολογιστικών μέσων και της ανάπτυξης του σχετικού λογισμικού. Η πρώτη δραστηριότητα καλύπτεται από το γνωστικό αντικείμενο της θεωρίας και πρακτικής των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου και η δεύτερη από το γνωστικό αντικείμενο ενός εξειδικευμένου κλάδου της τεχνολογίας των υπολογιστών που θα τον αποκαλούσαμε βιομηχανική πληροφορική, εφόσον μέσα στον κλάδο αυτό εντάσσαμε όχι μόνο τα υπολογιστικά συστήματα βιομηχανικού αυτοματισμού και ελέγχου αλλά και όλα τα υπόλοιπα συστήματα που απαιτούνται για την αυτοματοποίηση βιομηχανικού οργανισμού της μορφής που περιγράφηκε παραπάνω και στοχεύει στη δημιουργία μιας συνολικά ολοκληρωμένης αυτοματοποίησης του οργανισμού αυτού.

Όσον αφορά το αντικείμενο της θεωρίας των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, υπάρχει επαρκής ελληνική βιβλιογραφία (Παρακευόπουλος 1991a, 1991b, Πετρίδης, Τζαφέστας 1985a, 1985b) ενώ πρόσφατα η βιβλιογραφία αυτή έχει εμπλουτισθεί με συγγράμματα που επικεντρώνονται στους αλγορίθμους και τεχνικές ελέγχου που εφαρμόζονται στη βιομηχανία (Κίνγκ 1996, Κουμπουλής 1999). Όσον αφορά την ελληνική βιβλιογραφία που διαπραγματεύεται το αντικείμενο του βιομηχανικού αυτοματισμού και ελέγχου από την οπτική γωνία της ανάπτυξης του υλικού και του λογισμικού των υπολογιστι-

κών μέσων, η εκτίμηση του γράφοντος είναι ότι αυτή περιορίζεται στην ανάπτυξη λογισμικού για προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (Borelbach 1997, Μαραντίδης 2000, Petruzella 1993, 2000, Ρουμπή 1989), μια ομολογουμένως πολύ διαδεδομένη κατηγορία υπολογιστικών μέσων υλοποίησης αυτοματισμών. Πιστεύοντας ότι υπάρχει ένα κενό στην περιοχή αυτή, αποφασίσθηκε να γραφεί το παρόν σύγγραμμα με στόχο να καλύψει αφενός τις εκπαιδευτικές ανάγκες φοιτητών και σπουδαστών αλλά και να δώσει τη δυνατότητα στους νέους μηχανικούς και τεχνικούς να ενημερωθούν για τις τυπικές κατηγορίες υπολογιστικών μέσων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές βιομηχανικού αυτοματισμού και ελέγχου και να εκπαιδευτούν μόνοι τους στη σύνταξη του σχετικού λογισμικού. Σαν τέτοιες τυπικές κατηγορίες θεωρήθηκαν ότι είναι τα κατανεμημένα συστήματα ελέγχου (Distributed Control Systems) κλειστής αρχιτεκτονικής και οι αποκαλούμενοι από τους κατασκευαστές τους βιομηχανικοί υπολογιστές τύπου προγραμματιζόμενου ελεγκτή ανοικτής αρχιτεκτονικής. Η εκπαίδευση του αναγνώστη συνίσταται στη δυνατότητα που του δίνεται μέσω της χρήσης προσομοιωτή και εργαλείων λογισμικής μηχανικής να εκπονήσει ασκήσεις σύνταξης και αποσφαλμάτωσης προγραμμάτων για τον έλεγχο και αυτοματοποίηση απλών διεργασιών. Τόσο ο προσομοιωτής όσο και τα εργαλεία λογισμικής μηχανικής είναι διαθέσιμα στον αναγνώστη μαζί με το βιβλίο.

Η ύλη του βιβλίου διαμορφώνεται σε 10 κεφάλαια ενώ σε παράρτημα δίνεται ένα ευρετήριο όρων που πιστεύεται ότι θα βοηθήσει τον αναγνώστη να θυμηθεί έννοιες που ανήκουν στα γνωστικά αντικείμενα του κλασσικού αυτόματου ελέγχου, της αρχιτεκτονικής υπολογιστών, ηλεκτρικών κυκλωμάτων, και γλωσσών προγραμματισμού. Λόγω του μεγάλου αριθμού των εμπλεκόμενων γνωστικών αντικειμένων στη σχεδίαση και υλοποίηση συστημάτων βιομηχανικού ελέγχου, η διεξοδική παρουσίαση του βασικού κορμού της ύλης αυτών των αντικειμένων σε παραρτήματα για να αποκτήσει γνωστική αυτοδυναμία το βιβλίο κρίθηκε ανεφάρμοστη και προτιμήθηκε η λύση της συνοπτικής παρουσίασης των εννοιών που χρησιμοποιούνται στο ευρετήριο όρων που αναφέρθηκε.

Η διάρθρωση της ύλης σε κεφάλαια έχει γίνει έτσι ώστε αν ο αναγνώστης δεν επιθυμεί να αποκτήσει και μια σχετική εμπειρία προγραμματισμού να μπορεί μόνο να ενημερωθεί και να αποκτήσει τις σχετικές γνώσεις σε θεωρητικό επίπεδο. Τότε πρέπει να παραλείψει τη μελέτη των κεφαλαίων 5, 6, 9 και 10.

Στα δυο πρώτα κεφάλαια γίνεται μια εισαγωγή στην αρχή της ανατροφοδότησης και του κλειστού βρόχου ελέγχου καθώς επίσης στην ορολογία που χρησιμοποιείται και στα όργανα και διατάξεις που χρειάζονται για την υλοποίηση κλειστών βρόχων ελέγχου με υπολογιστή. Ιδιαίτερα, αναλύονται τα προβλήματα που δημιουργούνται από τη διακριτοποίηση των σημάτων, όπως εί-

ναι η αναπαραγωγή σήματος διαφορετικής συχνότητας από αυτή του πραγματικού λόγω επιλογής λανθασμένου ρυθμού δειγματοληψίας και από τη μετατροπή των αναλογικών σημάτων σε διακριτά. Τέλος, καταγράφονται τα είδη υπολογισμών που πρέπει να γίνονται από τον υπολογιστή για την εισαγωγή φίλτρων στην είσοδο των σημάτων, για την εύρεση των τιμών των φυσικών μεταβλητών από τις τιμές των ηλεκτρικών σημάτων που παράγουν τα μετρητικά όργανα, για την εκτέλεση των αλγορίθμων υπολογισμού των διορθωτικών δράσεων και τέλος για τη μετατροπή των ψηφιακών τιμών των δράσεων σε τιμές αναλογικών ηλεκτρικών σημάτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται ο αλγόριθμος των τριών όρων που εδώ και δεκαετίες αποτελεί τον κυρίαρχο αλγόριθμο βασικής ρύθμισης φυσικών μεταβλητών. Ειδικά, παρουσιάζονται οι διάφορες υλοποιήσεις του αλγορίθμου που μπορούν να γίνουν με υπολογιστή και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε υλοποίησης καθώς επίσης και τα προβλήματα που μπορεί να δημιουργήσει στην ευστάθεια και τον έλεγχο των διεργασιών ο υπολογισμός από τον αλγόριθμο τιμών έξω από τα όρια λειτουργίας των μετρητικών οργάνων και των φυσικών μεταβλητών. Τέλος, αναφέρονται και άλλοι κλασσικοί αλγόριθμοι ελέγχου διεργασιών όπως είναι ο αλγόριθμος της πρόσθιας τροφοδότησης, ο αλγόριθμος του ελέγχου αναλογίας και ο αλγόριθμος του διαδοχικού ελέγχου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται η αρχιτεκτονική του υλικού και του λογισμικού των κατανεμημένων συστημάτων ελέγχου κλειστής αρχιτεκτονικής. Τα συστήματα αυτά είναι τοπικά δίκτυα υπολογιστικών μέσω με λογισμικό που διαθέτει σε μορφή επανεισερχόμενου κώδικα όλους του τυποποιημένους αλγορίθμους που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιγράφει το λογισμικό ενός εκπαιδευτικού προσομοιωτή σε προσωπικό υπολογιστή μέσω του οποίου μπορεί κάποιος να προδιαγράψει τα χαρακτηριστικά του υλικού ενός κατανεμημένου συστήματος ελέγχου, να προγραμματίσει τη στρατηγική ελέγχου μιας διεργασίας και να προσομοιώσει τη λειτουργία της διεργασίας κάτω από τον έλεγχο του κατανεμημένου συστήματος ελέγχου.

Το έκτο κεφάλαιο αφιερώνεται στη πρακτική εξάσκηση του αναγνώστη στον προγραμματισμό και στη αποσφαλμάτωση του λογισμικού ελέγχου τριών κρίσιμων μεταβλητών μιας αποστακτικής στήλης μέσω της χρήσης του εκπαιδευτικού προσομοιωτή.

Στα επόμενα δυο κεφάλαια 7 και 8 παρουσιάζονται οι βιομηχανικοί υπολογιστές τύπου προγραμματιζόμενου ελεγκτή, με τους οποίους μπορεί κανείς να δημιουργήσει κατανεμημένα συστήματα ελέγχου και των οποίων η αρχιτεκτονική τους και η ανάπτυξη του λογισμικού τους ικανοποιούν τις συστάσεις του προτύπου IEC 1131-3. Αναπτύσσονται οι αρχές του προτύπου, το μοντέλο

της αρχιτεκτονικής του λογισμικού που πρέπει να ακολουθείται για την ανάπτυξη του και οι γλώσσες προγραμματισμού.

Στο κεφάλαιο 9 παρουσιάζεται ένα τυπικό πακέτο εργαλείων λογισμικής μηχανικής με το οποίο μπορεί κανείς να συντάξει και να αποσφραγματώσει λογισμικό βιομηχανικών υπολογιστών που έχει συνταχθεί σύμφωνα με τις συστάσεις του προτύπου IEC1131-3. Στο κεφάλαιο 10 επιδεικνύεται η χρήση του πακέτου για τη σύνταξη και αποσφραγμάτωση του λογισμικού ελέγχου της διεργασίας παραγωγής υγρού διαλύματος με συγκεκριμένη οξύτητα (pH). Με το παράδειγμα αυτό ολοκληρώνεται και η παρουσίαση της ύλης του βιβλίου.

Για την πληθώρα των τεχνικών όρων που αναφέρονται στο βιβλίο έγινε προσπάθεια να αποδοθούν στα ελληνικά αλλά για την αποφυγή παρερμηνείας σημειώνονται και οι αντίστοιχοι όροι στην αγγλική γλώσσα.

Τέλος, θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους πρώην φοιτητές του Τμήματος και τώρα συναδέλφους κ.κ. Γιάννο Κωνσταντινίδη, Ανδρέα Πούγιουρο και Νίκο Μαυρατζά για τη βοήθεια που προσέφεραν στην ανάπτυξη του εκπαιδευτικού λογισμικού και των θεμάτων της πρακτικής εξάσκησης που αποτελούν μέρος και αναπόσπαστο συμπλήρωμα του βιβλίου.

Γ. Δ. Χασάπης
Θεσσαλονίκη 2001

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ

Για το βιβλίο αυτό υπάρχει μια ιστοσελίδα μέσω της οποίας προσφέρεται η δυνατότητα στον αναγνώστη να μεταφέρει στον υπολογιστή του τον προσομοιωτή του καταναμημένου συστήματος ελέγχου κλειστής αρχιτεκτονικής (DCS) και το εκπαιδευτικό πακέτο εργαλείων λογισμικής μηχανικής (1131 Expert V.32) της εταιρείας CJ International. Επίσης στην ιστοσελίδα αυτή θα βρει συμπληρωματικό υλικό για το βιβλίο, όπως ασκήσεις, διορθώσεις και παραλείψεις που ενδέχεται να έχουν παρεισφρήσει και σημειώσεις που συμπληρώνουν την ύλη του βιβλίου. Η διεύθυνση της ιστοσελίδας είναι:

<http://indinf.ee.auth.gr>

Επίσης διατηρείται για το βιβλίο μια λίστα ηλεκτρονικού ταχυδρομείου στην οποία μπορεί να εγγραφεί κάθε αναγνώστης του βιβλίου και χρήστης του λογισμικού που διατίθεται με το βιβλίο. Μέσω της λίστας αυτής ο αναγνώστης του βιβλίου μπορεί να επικοινωνεί με το συγγραφέα και τους άλλους χρήστες του

βιβλίου για να υποδείξει βελτιώσεις που κρίνει ότι πρέπει να γίνουν, να καταθέσει την κριτική του ή να ζητήσει διευκρινήσεις και επεξηγήσεις που θα τον βοηθήσουν να κατανοήσει καλύτερα την ύλη του βιβλίου. Αν θέλετε να εγγραφείτε στη λίστα παρακαλείσθε να στείλετε μήνυμα στην ηλεκτρονική διεύθυνση:

ghass@auth.gr

Εφιστάται η προσοχή των χρηστών στο ότι τους δίνεται η άδεια να εγκαταστήσουν το λογισμικό που διατίθεται μέσω της ιστοσελίδας του βιβλίου μόνο σε ένα υπολογιστή και για προσωπική χρήση. Σύμφωνα με τους ισχύοντες νόμους και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας δεν επιτρέπεται ή διανομή και εμπορική χρήση του λογισμικού χωρίς την έγγραφη έγκριση του συγγραφέα και της εταιρείας CJ International.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΩΤΟ ΜΕΡΟΣ

ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

1.1	Εισαγωγή	21
1.2	Στόχοι του βιομηχανικού ελέγχου	23
1.3	Γενικές αρχές και ορολογία των συστημάτων βιομηχανικού ελέγχου	24
1.3.1	Αισθητήρια και Μεταδότες	26
1.3.1.1	<i>Αισθητήρια και μεταδότες αναλογικής τεχνολογίας</i>	28
1.3.2	Ενεργοποιητές και τελικά στοιχεία	30
1.3.3	Έλεγχος με υπολογιστές	33
1.3.3.1	<i>Δειγματοληψία αναλογικών μετρήσεων</i>	35
1.3.3.2	<i>Φίλτρα αναλογικών σημάτων</i>	38

2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

2.1	Εισαγωγή	43
2.2	Λειτουργικά επίπεδα βιομηχανικών οργανισμών	48
2.3	Αρχές οργάνωσης υλικού για την υλοποίηση λειτουργιών άμεσου ελέγχου	52
2.4	Αρχές λειτουργίας των Σταθμών Εποπτείας και Χειρισμών	53
2.4.1	Παραδείγματα γραφικών επιπέδου εποπτικής παρακολούθησης της λειτουργίας ολόκληρου βιομηχανικού συγκροτήματος	57
2.4.2	Παραδείγματα γραφικών απεικόνισης ομάδας μεταβλητών	58
2.4.3	Παραδείγματα γραφικών απεικόνισης μεμονωμένων βρόχων	61
2.5	Πρόγραμμα Έγκαιρης Προειδοποίησης και Μιμικά Διαγράμματα	62
2.6	Πληκτρολόγιο και χειριστήριο	65

2.7	Λογισμικό των Κατανεμημένων Συστημάτων	67
2.7.1	Λογισμικό συστήματος	68
2.7.2	Διαχείριση και δημιουργία βάσεων δεδομένων κατανεμημένων συστημάτων	71
2.7.3	Λογισμικό εφαρμογών	78
2.7.3.1	<i>Συναρτησιακές δομές</i>	79

3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

3.1	Εισαγωγή	81
3.2	Ο αλγόριθμος ελέγχου τριών όρων (PID - Proportional, IIntegral plus DDerivative control)	82
3.2.1	Αναλογικός όρος	82
3.2.2	Ολοκληρωτικός όρος	84
3.2.3	Όρος παραγωγισμού	85
3.2.4	Ψηφιακή υλοποίηση αλγορίθμου τριών όρων	88
3.2.5	Λειτουργική συμπεριφορά ψηφιακού αλγορίθμου τριών όρων	94
3.3	Έλεγχος με Πρόσθια Τροφοδότηση	96
3.4	Έλεγχος αναλογίας	99
3.5	Διαδοχικός Έλεγχος	102

ΔΕΥΤΕΡΟ ΜΕΡΟΣ

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

4.1	Εισαγωγή	107
4.2	Το εκπαιδευτικό σύστημα DCS	109
4.3	Ο Προσομοιωτής του εκπαιδευτικού συστήματος	111
4.3.1	Προσομοίωση βιομηχανικής διεργασίας	112
4.3.1.1	<i>Διαρρύθμιση του προσομοιωτή της βιομηχανικής διεργασίας</i> ...	113
4.4	Λογισμικό και περιβάλλον διαρρύθμισης τοπικής μονάδας ελέγχου	125
4.4.1	Διαρρύθμιση αναλογικής εισόδου	129

4.4.2	Διαρρύθμιση αναλογικής εξόδου	132
4.4.3	Διαρρύθμιση ψηφιακών εισόδων	132
4.4.4	Διαρρύθμιση ψηφιακής εξόδου	133
4.4.5	Διαρρύθμιση λογικών οντοτήτων (Blocks)	133
4.4.6	Διαρρύθμιση αλγοριθμικής οντότητας (slot)	134
4.4.6.1	<i>Περιγραφή αλγορίθμων</i>	138
4.5	Περιβάλλον διαρρύθμισης σταθμών εποπτείας και χειρισμών	141
4.6	Διαρρύθμιση των οθονών εποπτείας και χειρισμών (Overview Displays)	144

5ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΞΑΣΚΗΣΗ στη ΔΙΑΡΡΥΘΜΙΣΗ και ΧΡΗΣΗ του ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

5.1	Έλεγχος αποστακτικής στήλης	147
5.1.1	Προσομοίωση της διεργασίας	152
5.1.2	Διαρρύθμιση DCS	159
5.1.3	Διαρρύθμιση σταθμών εποπτείας και χειρισμών	165
5.1.4	Εποπτεία και χειρισμοί	167

ΤΡΙΤΟ ΜΕΡΟΣ

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

6ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΖΟΜΕΝΟΙ ΛΟΓΙΚΟΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ

6.1	Εισαγωγή	171
6.2	Αρχές λειτουργίας	171
6.3	Κεντρική μονάδα επεξεργασίας	174
6.4	Μνήμη	175
6.4.1	Πίνακας Εισόδων	177
6.4.2	Πίνακας Εξόδων	179
6.4.3	Εσωτερικά ψηφία	179
6.4.4	Εσωτερικοί καταχωρητές	179
6.4.5	Μνήμη λογισμικού εφαρμογής	181
6.5	Σύστημα εισόδων/εξόδων	181

6.5.1	Μονάδες διακριτών εισόδων και εξόδων	184
6.5.1.1	Μονάδες εισόδου τύπου AC/DC	186
6.5.1.2	Μονάδες εισόδου τύπου TTL	187
6.5.1.3	Μονάδες εξόδου τύπου AC και DC	188
6.5.1.4	Μονάδες εξόδου με ηλεκτρομηχανική επαφή	192
6.5.1.5	Μονάδες εξόδου τύπου TTL	192
6.5.2	Μονάδες εισόδου και εξόδου δεδομένων	192
6.5.3	Μονάδες αναλογικών εισόδων /εξόδων	195
6.5.4	Μονάδες καταχώρησης κωδικοποιημένων δεδομένων	197
6.5.4.1	Μονάδες κώδικα ASCII	199
6.5.5	Μονάδες εισόδου / εξόδου ειδικών σημάτων	200
6.5.5.1	Μονάδα εισόδου θερμοστοιχείων	200
6.5.5.2	Μονάδες οδήγησης βηματικών κινητήρων	201
6.5.5.3	Μονάδες ελέγχου σερβομηχανισμών	202
6.6	Καταμεμημένη τοποθέτηση μονάδων εισόδων/εξόδων στο χώρο	205
6.7	Ο Προγραμματιζόμενος Ελεγκτής SIEMENS S5-115U	207

7ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

7.1	Εισαγωγή	213
7.2	Το λογισμικό μοντέλο του προτύπου IEC 1131-3	218
7.3	Αρχιτεκτονική λογισμικού	220
7.4	Σύνολο χαρακτήρων	223
7.5	Αναγνωριστικά	224
7.6	Λέξεις-κλειδιά	224
7.7	Σχόλια	224
7.8	Τύποι δεδομένων	226
7.8.1	Ακέραιοι αριθμοί	226
7.8.2	Αριθμοί κινητής υποδιαστολής	227
7.8.3	Χρονική διάρκεια	228
7.8.4	Ημερομηνία και ώρα	228
7.8.5	Ακολουθία χαρακτήρων	230
7.8.6	Διαδική ακολουθία	231
7.9	Γενετικοί τύποι δεδομένων	231
7.10	Παραγόμενοι τύποι δεδομένων	232
7.11	Μεταβλητές	236

7.12 Ορισμός συναρτησιακών δομών	243
7.12.1 Παράδειγμα ορισμού νέου τύπου συναρτησιακής δομής	243
7.13 Ορισμός προγράμματος	245
7.14 Ορισμός πόρου	247
7.15 Ορισμός διεργασίας	247
7.16 Ορισμός αρχιτεκτονικής λογισμικού	249

8ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΓΛΩΣΣΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

8.1 Εισαγωγή	253
8.2 Γλώσσα Σχεδίων Επαφών (Ladder Logic Diagram)	254
8.2.1 Γραμμές ισχύος	256
8.2.2 Συνδετικά ευθύγραμμα τμήματα και καταστάσεις	256
8.2.3 Επαφές	257
8.2.4 Πηνία	258
8.2.5 Παράδειγμα προγράμματος σε γλώσσα σχεδίου επαφών	260
8.2.6 Διακλαδώσεις και ετικέτες	261
8.2.7 Δήλωση επιστροφής από πρόγραμμα	262
8.3 Γλώσσα συναρτησιακών διαγραμμάτων Block Diagram)	262
8.3.1 Συναρτήσεις μετατροπής τύπου μεταβλητής	264
8.3.2 Αριθμητικές και τριγωνομετρικές συναρτήσεις μιας μεταβλητής	265
8.3.3 Συναρτήσεις αριθμητικών πράξεων	266
8.3.4 Συναρτήσεις λογικών πράξεων	267
8.3.5 Συναρτήσεις ολίσθησης ακολουθίας δυαδικών ψηφίων	268
8.3.6 Συναρτήσεις επιλογής και σύγκρισης	269
8.3.7 Πρώτο παράδειγμα προγράμματος σε γλώσσα συναρτησιακών διαγραμμάτων	273
8.3.8 Δεύτερο παράδειγμα προγράμματος σε γλώσσα συναρτησιακών διαγραμμάτων	273
8.3.9 Τρίτο παράδειγμα προγράμματος σε γλώσσα συναρτησιακών διαγραμμάτων	274
8.3.10 Συναρτησιακές δομές (Function Blocks)	274
8.3.10.1 Δομή DELAY	280
8.3.10.2 Δομή AVERAGE	281
8.3.10.3 Δομή μαθηματικής ολοκλήρωσης	282

8.3.10.4	Δομή μαθηματικής διαφόρισης	283
8.3.10.5	Δομή HYSTERESIS	283
8.3.10.6	Δομή LIMITS-ALARM	284
8.3.10.7	Δομή PID	286
8.3.10.8	Δομή RAMP	288
8.3.10.9	Δομή σταθμού χειροκίνητης ρύθμισης (manual transfer station)	289
8.4	Γλώσσα λίστας εντολών (Instruction List)	290
8.5	Γλώσσα Δομημένου Κειμένου (Structured Text)	296
8.5.1	Εντολές αντικατάστασης (assignment statement)	296
8.5.2	Εντολή IF---THEN...ELSE...END_IF	298
8.5.3	Εντολή CASE	299
8.5.4	Εντολή WHILE	300
8.5.5	Εντολή FOR...TO...BY...DO...END_FOR	301
8.5.6	Εντολή REPEAT	302
8.5.7	Εντολή RETURN	302
8.5.8	Εντολή EXIT	303
8.6	Γλώσσα ακολουθιακών διαγραμμάτων ροής (Sequential Function Chart)	304
8.6.1	Βήματα και αρχικά βήματα	304
8.6.2	Μεταβάσεις	305
8.6.3	Σύνδεσμοι	306
8.6.4	Δράσεις	308
8.6.5	Μεταβάσεις	312
8.6.6	Κανόνες σύνταξης και δυναμικής εξέλιξης	315
8.6.7	Παράδειγμα προγραμματισμού με ακολουθιακά διαγράμματα ροής	318

9ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

9.1	Εισαγωγή	325
9.2	Εκπαιδευτικό πακέτο εργαλείων λογισμικής μηχανικής	326
9.2.1	Διαχειριστής εφαρμογής	327
9.3	Συντάκτες των γλωσσών προγραμματισμού	331
9.3.1	Συντάκτης γλώσσας σχεδίων επαφών	331
9.3.2	Συντάκτης γλώσσας συναρτησιακών διαγραμμάτων	334
9.3.3	Συντάκτης γλώσσας λίστας εντολών και δομημένου κειμένου	335

9.3.4	Συντάκτης ακολουθιακών διαγραμμάτων ροής	336
9.3.5	Συντάκτης λεξικού μεταβλητών	342
9.3.6	Συντάκτης διασύνδεσης Εισόδων/Εξόδων	344
9.4	Παραγωγή εκτελέσιμου κώδικα	347
9.5	Αποσφαλμάτωση προγράμματος	348
9.6	Προσομοίωση της εκτέλεσης του προγράμματος	349

10ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΥΔΡΟΧΛΩΡΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ

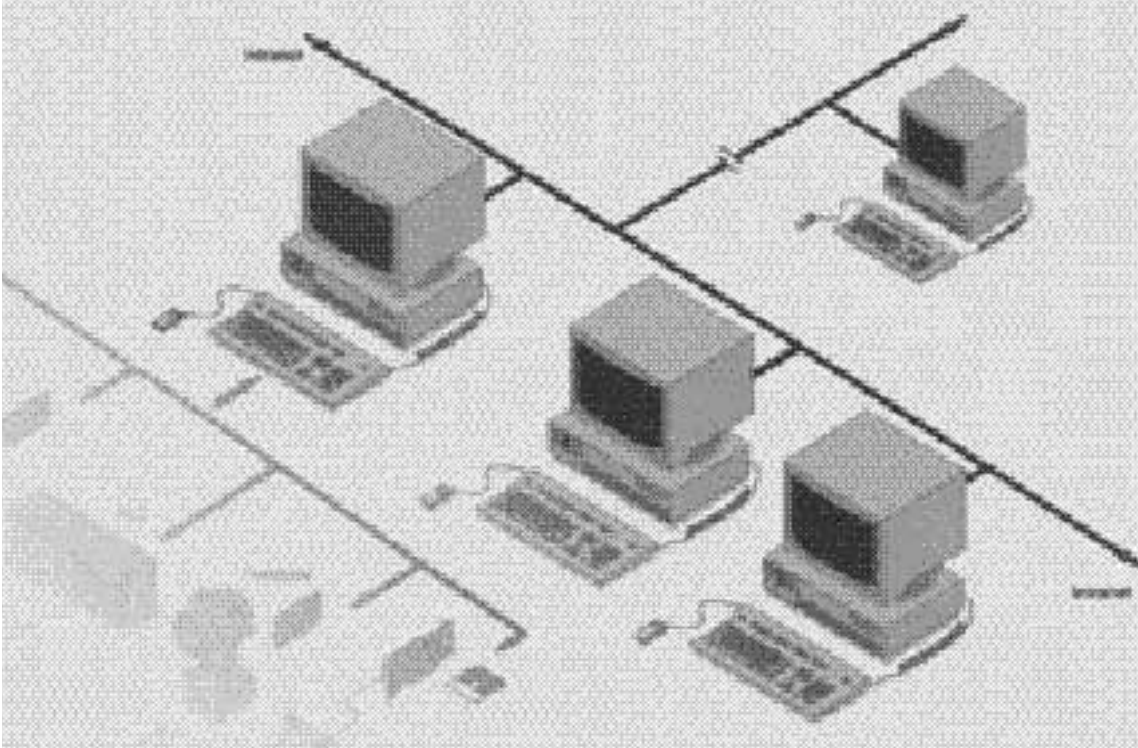
10.1	Εισαγωγή	353
10.2	Περιγραφή της βιομηχανικής διεργασίας	353
10.3	Βρόχοι ελέγχου	356
10.3.1	Σύνταξη της αρχιτεκτονικής του λογισμικού εφαρμογής	358
10.3.2	Σύνταξη προγράμματος Alarm	364
10.3.3	Σύνταξη προγράμματος Main	365
10.3.4	Σύνταξη προγράμματος AcidPID	369
10.3.5	Σύνταξη προγράμματος PumpCtrl	371
10.3.6	Σύνταξη προγράμματος ProdOut	372
10.3.7	Σύνταξη προγράμματος SIM_pH	372
10.3.8	Σύνταξη προγράμματος Graphics	373
10.3.9	Σύνταξη του προγράμματος Temper	375
10.4	Λογισμικό σταθμού εποπτείας και χειρισμών	377
10.5	Προσομοίωση	380

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Γλωσσάριο	385
Βιβλιογραφικές αναφορές	389

Πρώτο Μέρος

Αρχές λειτουργίας
και προγραμματισμού
των συστημάτων βιομηχανικού ελέγχου



1

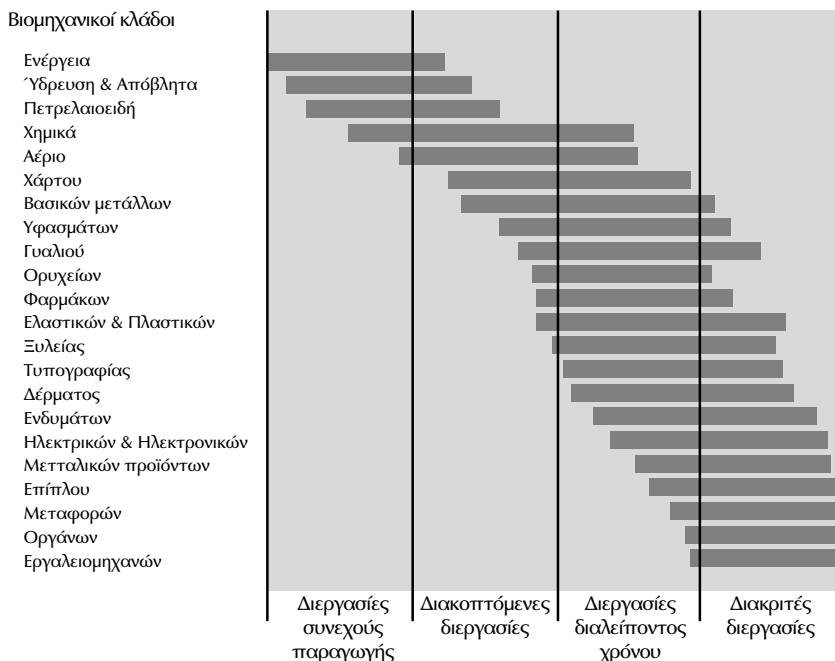
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

1.1 Εισαγωγή

Στο βιβλίο αυτό με τον όρο **βιομηχανικός έλεγχος** γίνεται γενικά αναφορά στις μεθόδους και την τεχνολογία που χρησιμοποιούνται για την όσο το δυνατόν αυτόνομη λειτουργία των βιομηχανικών διεργασιών που παράγουν προϊόντα κυρίως από πρωτογενούς μορφής ύλες όπως είναι ο χάλυβας, τα καύσιμα, το χαρτί, η ηλεκτρική ενέργεια, τα τρόφιμα και τα ποτά. Πολλές φορές όμως στη βιβλιογραφία ο ίδιος όρος χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει επίσης τις μεθόδους και την τεχνολογία αυτοματοποίησης των διεργασιών της αποκαλούμενης κατασκευαστικής βιομηχανίας. Ως τέτοια χαρακτηρίζεται η βιομηχανία κατασκευής σύνθετων προϊόντων, όπως είναι τα αυτοκίνητα, τα αεροσκάφη, οι οικιακές ηλεκτρικές συσκευές και οι υπολογιστές. Τις βιομηχανικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται για τη μαζική επεξεργασία υλών πρωτογενούς μορφής συνήθως τις διακρίνουμε σε **διεργασίες συνεχούς παραγωγής** (*continuous processes*), σε **διακοπτόμενες διεργασίες** (*discontinuous processes*) και σε **διεργασίες διαλείποντος έργου** (*batch processes*). Στις διεργασίες συνεχούς παραγωγής οι πρώτες ύλες, τα ενδιάμεσα και τα τελικά προϊόντα είναι συνήθως ρευστά. Η επεξεργασία των ρευστών αυτών είναι συνεχής και ίδια για μεγάλα χρονικά διαστήματα της τάξης του ενός ή περισσότερων ετών. Τυπικές διεργασίες της κατηγορίας αυτής είναι αυτές που χρησιμοποιούνται σε διυλιστήρια υγρών καυσίμων και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διακοπτόμενες διεργασίες είναι διεργασίες παρόμοιες με αυτές της συνεχούς παραγωγής αλλά οι συνθήκες λειτουργίας τους μπορούν να αλλάζουν συχνά για να είναι δυνατόν να παράγονται διαφορετικά προϊόντα. Τυπικές διεργασίες της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται στην παραγωγή χαρτιού και χαλυβδόφυλλων. Στις διεργασίες διαλείποντος έργου η επεξεργασία των πρώτων υλών γίνεται σύμφωνα με μια προκαθορισμένη ακολουθία βημάτων, όπως είναι η ανάμιξη υλών, η θέρμανση και συμπίεση του μίγματος για ορισμένη χρονική διάρκεια, η πρόσμιξη των πρώτων υλών με άλλες ουσίες και η παραλαβή ολόκληρης της ποσότητας του τελικού προϊόντος πριν από την έναρξη νέου κύ-

κλου παραγωγής ίδιου προϊόντος. Τυπικές διεργασίες της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες τροφίμων και φαρμάκων καθώς επίσης στις βιομηχανίες δέρματος, υφασμάτων και ξυλείας. Αντίθετα, τις διεργασίες που εφαρμόζονται στην κατασκευή διακριτών εξαρτημάτων και στη συναρμολόγηση σύνθετων μηχανολογικών και ηλεκτρονικών προϊόντων με τα εξαρτήματα αυτά, τις χαρακτηρίζουμε ως **διεργασίες διακριτής επεξεργασίας** (*discrete processes*). Προκειμένου να διακρίνουμε τις μηχανολογικές εγκαταστάσεις βιομηχανικών διεργασιών που ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες, όταν αναφερόμαστε σε εγκαταστάσεις των τριών πρώτων κατηγοριών θα χρησιμοποιούμε τον όρο **εργοστάσιο** (*plant*), ενώ όταν αναφερόμαστε σε εγκαταστάσεις της τέταρτης κατηγορίας θα χρησιμοποιούμε τον όρο **κατασκευαστική μονάδα** (*factory*).

Γενικά, θα πρέπει να τονισθεί ότι η ένταξη κάθε βιομηχανικής διεργασίας σε μια κατηγορία είναι κάπως τεχνητή και εξυπηρετεί τις ανάγκες προσδιορισμού μεγάλων ειδοποιών διαφορών και αναγκών ελέγχου που δεν μπορούν να λυθούν με τις ίδιες μεθόδους και τεχνολογία. Στην πραγματικότητα πολλές βιομηχανίες περιλαμβάνουν διεργασίες δυο ή και περισσότερων κατηγοριών. Στο διάγραμμα του σχήματος 1.1 γίνεται μια καταγραφή των κλάδων βιομηχανικής παραγωγής που συναντά κανείς σε παγκόσμια κλίμακα και σημειώνεται ο τύπος των διεργασιών που συναντώνται σε κάθε κλάδο (Bernard 1989, σελ.12).



Σχήμα 1.1: Ταξινόμηση βιομηχανικών κλάδων σύμφωνα με τον τύπο των διεργασιών που περιλαμβάνουν οι βιομηχανικές μονάδες του κάθε κλάδου.

Όπως αναφέρθηκε και στον πρόλογο, ο στόχος του βιβλίου αυτού είναι η παρουσίαση της τεχνολογίας των υπολογιστικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται κυρίως στο βιομηχανικό έλεγχο διεργασιών συνεχούς παραγωγής, διακοπτόμενων διεργασιών και διεργασιών διαλείποντος έργου. Γι' αυτό στη συνέχεια του βιβλίου εκτίθενται οι βασικές αρχές των μεθόδων που εφαρμόζονται στον έλεγχο τέτοιων διεργασιών και οι αρχιτεκτονικές με βάση τις οποίες δομούνται τα υπολογιστικά συστήματα που υλοποιούν τις μεθόδους αυτές.

1.2 Στόχοι του βιομηχανικού ελέγχου

Η λειτουργία κάθε βιομηχανικού οργανισμού χαρακτηρίζεται από ροή ενέργειας, ροή υλών και ροή πληροφορίας. Ο βασικός στόχος ελέγχου του οργανισμού είναι ο βέλτιστος χειρισμός με μηχανικά μέσα των ροών ενέργειας και υλών μέσω της παρακολούθησης της ροής πληροφορίας. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος απαιτείται συνήθως να γίνει ένας συμβιβασμός μεταξύ κάποιων οικονομικών και ποιοτικών παραγόντων που θα οδηγήσει σε κάποια άλλα οφέλη. Τα οφέλη που προκύπτουν από τον έλεγχο του βιομηχανικού οργανισμού είναι:

- αύξηση του όγκου παραγωγής λόγω της καλύτερης αξιοποίησης των δυνατοτήτων των μέσων παραγωγής, π.χ. λειτουργώντας τη βιομηχανική μονάδα στα ανώτερα δυνατά όρια της,
- μείωση του κόστους παραγωγής ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος, λόγω βελτιστής χρήσης των εσωτερικών πηγών ενέργειας και μείωσης του κόστους εργασίας,
- βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων λόγω της δυνατότητας να διατηρούνται οι συνθήκες λειτουργίας μέσα σε στενά όρια ανοχών,
- ευελιξία παραγωγής κάτω από συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες αγοράς.

Τυπικό παράδειγμα είναι οι βιομηχανίες διεργασιών διαλείποντος έργου στις οποίες απαιτούνται συχνές ρυθμίσεις για την παραγωγή διαφορετικών προϊόντων μέσα στην ίδια ημέρα. Ο ρόλος του υπολογιστή στην περίπτωση αυτή είναι να παράγει γρήγορα το πρόγραμμα παραγωγής, επιτυγχάνοντας βέλτιστη αξιοποίηση των μέσων παραγωγής και των αποθεμάτων.

Εκτός από τα οικονομικά οφέλη, υπάρχουν και άλλα οφέλη μη δυνάμενα να εκτιμηθούν ποσοτικά όπως είναι ο εξανθρωπισμός των συνθηκών εργασίας και η μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Όσον αφορά τον εξανθρωπισμό των συνθηκών εργασίας, με τον έλεγχο της βιομηχανικής διεργα-

σίας απαλλάσσονται οι χειριστές από μονότονες και επικίνδυνες εργασίες όπως είναι η χειροκίνητη ρύθμιση βαλβίδων που επιτρέπουν ή στραγγαλίζουν τη ροή θερμών και δηλητηριωδών αερίων ή υγρών. Όσον αφορά τη μείωση της ρύπανσης της ατμόσφαιρας, με τον έλεγχο μπορούν να μειωθούν αέριοι ρύποι, όπως είναι τα εκλυόμενα αέρια από την καύση. Έτσι, το μονοξείδιο του άνθρακος στα αέρια της καύσης μπορεί να μειωθεί λόγω της δυναμικής ρύθμισης της αναλογίας καυσίμου προς οξυγόνο που μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ηλεκτρομηχανικών και υπολογιστικών μέσων. Η ρύθμιση αυτή είναι αδύνατον να γίνεται τόσο γρήγορα και τόσο συχνά μόνο με ανθρώπινους χειρισμούς.

1.3 Γενικές αρχές και ορολογία των συστημάτων βιομηχανικού ελέγχου

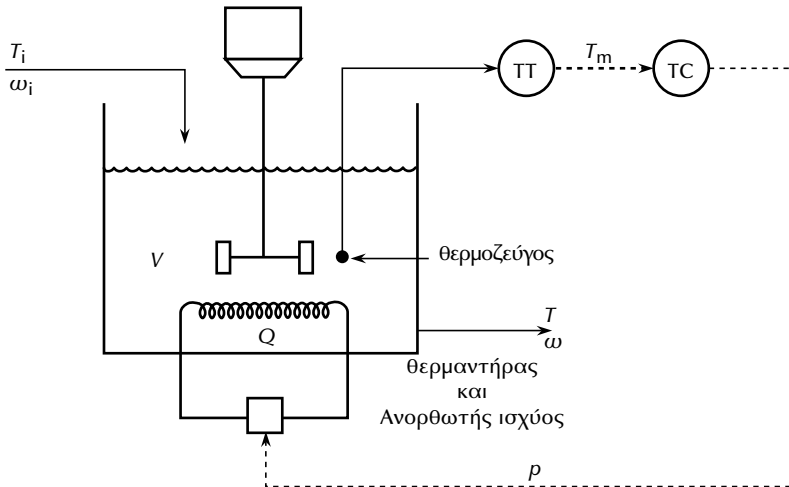
Όπως είναι ήδη γνωστό, στα πρώτα συστήματα ελέγχου οι μηχανισμοί αναγνώρισης της πληροφορίας και ρύθμισης της ροής των υλών ήταν ενσωματωμένοι σε μια μηχανική ή ηλεκτρομηχανική διάταξη. Τυπικό παράδειγμα ενός τέτοιου αυτοματισμού είναι ο φυγοκεντρικός ρυθμιστής ατμού. Από τη δεκαετία του 30 και μετά επεκράτησε η αρχή του ελέγχου με **βρόχο ανατροφοδότησης**. Σύμφωνα με την αρχή αυτή, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή μετράται η φυσική μεταβλητή που είναι επιθυμητό να ελεγχθεί και στη συνέχεια η μέτρηση αυτή χρησιμοποιείται για να υπολογισθεί η τιμή μιας άλλης φυσικής μεταβλητής που μπορεί να επηρεάσει τη ρύθμιση της πρώτης μεταβλητής. Από το σημείο αυτό και μετά θα χρησιμοποιούμε τον όρο **ελεγχόμενη μεταβλητή (controlled variable)** για κάθε μεταβλητή που μετράται με σκοπό να ελεγχθεί μέσω δράσεων που θα λάβουν χώρα σε μια άλλη μεταβλητή. Αυτή τη δεύτερη μεταβλητή θα την αποκαλούμε **χειριζόμενη μεταβλητή (manipulated variable)**.

Ως αποτέλεσμα της επικράτησης της αρχής του βρόχου ανατροφοδότησης αναπτύχθηκε μια τεχνολογία διακριτών διατάξεων για τη μέτρηση κάθε μιας φυσικής μεταβλητής, για τον υπολογισμό της διορθωτικής δράσης που πρέπει να γίνει επί της χειριζόμενης μεταβλητής και για οδήγηση της χειριζόμενης μεταβλητής στην τιμή που υποδεικνύει η διορθωτική δράση. Η υλοποίηση των διατάξεων αυτών βασίσθηκε αρχικά στη χρήση της τεχνολογίας των αναλογικών ηλεκτρονικών. Οι εξελίξεις όμως στην τεχνολογία των ψηφιακών ηλεκτρονικών και η εμφάνιση των μικροϋπολογιστών επηρέασαν σημαντικά τον τρόπο σχεδίασης και κατασκευής των διατάξεων αυτών και ιδιαίτερα εκείνων που υπολογίζουν τις ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν στις χειριζόμενες μεταβλητές. Ανεξάρτητα από την ηλεκτρονική τεχνολογία υλοποίησής

τους μπορούμε τις διατάξεις αυτές να τις διαχωρίσουμε στις τρεις παρακάτω ομάδες:

- τα **αισθητήρια**, που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση της τιμής μιας φυσικής μεταβλητής και την παραγωγή ηλεκτρικού μεγέθους ανάλογου της τιμής αυτής,
- τους **μεταδότες**, που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση και μετάδοση της τιμής του αισθητηρίου στη διάταξη που υπολογίζει τη διορθωτική δράση,
- τους **ελεγκτές**, που υπολογίζουν τις διορθωτικές δράσεις,
- τους **ενεργοποιητές**, που ρυθμίζουν την ενέργεια που πρέπει να παρασχεθεί στα τελικά στοιχεία για να προκαλέσουν την αλλαγή στη χειριζόμενη μεταβλητή που αντιστοιχεί στην έξοδο του ελεγκτή.
- τα **τελικά στοιχεία**, που υλοποιούν τις διορθωτικές δράσεις.

Ας δούμε τώρα μέσω ενός παραδείγματος (Seborg, Edgar, Mellichamp, 1989, σ.184) πως υλοποιείται ο έλεγχος μιας φυσικής μεταβλητής χρησιμοποιώντας την αρχή της ανατροφοδότησης. Στο σχήμα 1.2 απεικονίζεται σχηματικά ένα δοχείο μέσα στο οποίο χύνεται υγρό με σταθερό ρυθμό.



Σχήμα 1.2: Παράδειγμα διεργασίας που ελέγχεται με βρόχο ανατροφοδότησης.

Το υγρό αυτό αφού θερμανθεί και αναδευτεί τροφοδοτείται με επίσης σταθερό ρυθμό σε επόμενη διεργασία. Η τροφοδοσία του δοχείου με υγρό γίνεται μέσω ενός αγωγού από την κορυφή του δοχείου ο ρυθμός της ροής της μάζας του οποίου δηλώνεται με ω_i και η εκάστοτε θερμοκρασία του με T_i . Το περιεχόμενο του δοχείου θερμαίνεται από ένα ηλεκτρικό θερμαντήρα που μπορεί να αποδίδει θερμότητα Q watts. Υποτίθεται ότι οι μεταβολές της θερ-

μοκρασίας του υγρού είναι μικρές και κατά συνέπεια οι αλλαγές στην πυκνότητά του που προκαλούνται από τις θερμοκρασιακές μεταβολές μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Επιπλέον υποθέτοντας ότι και οι ρυθμοί των ροών εισόδου και εξόδου στο δοχείο είναι ίδιοι, μπορεί κανείς να θεωρήσει ότι σε κάθε χρονική στιγμή ο όγκος του υγρού μέσα στο δοχείο είναι σταθερός. Για την αποδοτική λειτουργία της επόμενης διεργασίας είναι απαραίτητο το υγρό που τροφοδοτείται από το δοχείο στη διεργασία να έχει πάντοτε σταθερή θερμοκρασία και να μην εξαρτάται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας του υγρού εισόδου. Δηλαδή χρειάζεται ένα σύστημα ελέγχου που θα ρυθμίζει τη θερμότητα που θα δίνεται στο εντός του δοχείου υγρό με βάση τις θερμοκρασιακές μεταβολές του υγρού που εισρέει στο δοχείο. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2 το σύστημα ελέγχου που εγκαταστάθηκε περιλαμβάνει ένα θερμοζεύγος τοποθετημένο στα τοιχώματα του δοχείου και ένα ενισχυτή (ΤΤ) της ασθενούς τάσης των mvolts που παράγεται από το θερμοζεύγος. Μια αναλογική ηλεκτρονική διάταξη (ΤC) υπολογίζει την ποσότητα θερμότητας που χρειάζεται να δοθεί στο υγρό και παράγει μια συνεχή ηλεκτρική τάση ανάλογη της θερμότητας που υπολογίσθηκε. Ένας ανορθωτής ισχύος (Silicon Controlled Rectifier) μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα ικανό να προκαλέσει την παραγωγή θερμότητας από το θερμαντικό στοιχείο ίσης με αυτή που υπολογίσθηκε από την αναλογική ηλεκτρονική διάταξη (ΤC). Το σύστημα ελέγχου που περιγράφηκε συνιστά ένα τυπικό βρόχο ελέγχου με ανατροφοδότηση. Το θερμοζεύγος είναι το αισθητήριο, ο ενισχυτής έχει τη θέση του μεταδότη, η ηλεκτρονική διάταξη υπολογισμών τη θέση του ελεγκτή του βρόχου, η διάταξη ισχύος τη θέση του ενεργοποιητή και το θερμαντικό στοιχείο είναι το τελικό στοιχείο του βρόχου.

1.3.1 Αισθητήρια και Μεταδότες

Ανάλογα με το είδος της φυσικής μεταβλητής και την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την μέτρηση και τη μετάδοση της τιμής της, το αισθητήριο και ο μεταδότης μπορεί να είναι δυο διακριτές διατάξεις ή να συνιστούν μια ενιαία διάταξη. Σε αυτή τη δεύτερη περίπτωση συνήθως λέμε ότι η διάταξη αυτή είναι ένας **μετατροπέας μέτρησης**. Γενικά, μπορούμε να δώσουμε μια ευρύτερη ερμηνεία στον όρο του μετατροπέα και να ορίσουμε σαν τέτοιο κάθε διάταξη που μπορεί να μετατρέψει το μέγεθος μιας φυσικής μεταβλητής, π.χ. ρυθμό ροής κάποιου υγρού, πίεση, θερμοκρασία, στάθμη, συγκέντρωση, κτλ., σε ένα ηλεκτρικό σήμα που μπορεί να σταλεί κατευθείαν στον ελεγκτή. Στην περίπτωση που αισθητήριο και μεταδότης είναι διακριτές διατάξεις τότε το πρώτο χρησιμοποιείται για να μετατρέψει τη μετρούμενη τιμή της φυσικής μεταβλητής στην τιμή μιας άλλης φυσικής μεταβλητής που είναι περισσότερο κα-

τάλληλη για μηχανική ή ηλεκτρική επεξεργασία από τον μεταδότη. Μερικές μεταβλητές όπως ο ρυθμός της ροής υγρού, η πίεση και η στάθμη μετριοούνται σχετικά εύκολα. Άλλες, όπως είναι η χημική σύνθεση, και η ροή στερεών σωμάτων είναι δύσκολο να μετρηθούν, ενώ η αδυναμία εύρεσης αρχών πάνω στις οποίες θα μπορούσε να στηριχθεί η δημιουργία αισθητηρίων μέτρησης αρκετών άλλων μεταβλητών έχει καταστήσει αδύνατο τον έλεγχο των μεταβλητών αυτών.

Η τεχνολογία των αισθητηρίων και μεταδοτών έχει και αυτή εξελιχθεί για να γίνει συμβατή κυρίως με τις περισσότερες επαναστατικές εξελίξεις στην τεχνολογία των ελεγκτών. Μέχρι τη δεκαετία του 1950 τα όργανα στις βιομηχανίες, όπως λεγόταν το σύνολο των αισθητηρίων, μεταδοτών, ελεγκτών, μετατροπέων και τελικών στοιχείων, χρησιμοποιούσαν αποκλειστικά σήματα πεπιεσμένου αέρα για να μεταδώσουν την πληροφορία μέτρησης και να εκτελέσουν τους υπολογισμούς ελέγχου. Τα σήματα αυτά τυποποιήθηκαν στην περιοχή των 3-15 psig. Μετά το 1960, επεκράτησαν τα ηλεκτρονικά όργανα που χρησιμοποιούσαν αναλογικά και ηλεκτρικά σήματα στις περιοχές των 1-5 mA, 4-20 mA, 10-50 mA, 0-5 VDC και -10 μέχρι +10 VDC. Με την πάροδο του χρόνου οι μεταδότες, οι μετατροπείς και οι ελεγκτές τυποποιήθηκαν στη χρήση σημάτων 4-20 mA και 1-5VDC, ενώ η χρήση πνευματικών σημάτων διατηρήθηκε μόνο για την οδήγηση πνευματικών τελικών στοιχείων, όπως είναι οι βαλβίδες ρύθμισης της ροής υγρών, σε βιομηχανικούς χώρους στους οποίους διακινούνται ουσίες σε αέρια ή υγρά φάση υψηλής εκρηκτικότητας. Ενώ η τεχνολογία των ελεγκτών γρήγορα ακολούθησε τις εξελίξεις της μικροηλεκτρονικής και πρακτικά σήμερα η χρήση υπολογιστών αντικατέστησε τους αναλογικούς ελεγκτές, αυτό δε συνέβη με τα υπόλοιπα όργανα, παρόλο που εμφανίστηκαν τεχνικές μετάδοσης των μετρήσεων με ψηφιακά σήματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το κόστος της ψηφιακής μετάδοσης των μετρήσεων δεν ήταν τόσο ανταγωνιστικό με αυτό των κλασικών οργάνων. Έτσι η χρήση των αναλογικής τεχνολογίας μεταδοτών και μετατροπέων συνεχίζεται μέχρι σήμερα ενώ για τη δυνατότητα ανάγνωσης των παραγόμενων αναλογικών σημάτων οι ψηφιακής τεχνολογίας ελεγκτές εξοπλίστηκαν με τους κατάλληλους μετατροπείς αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά (A/D converters) και ψηφιακών σημάτων σε αναλογικά (D/A converters). Οι πρόσφατες όμως νέες εξελίξεις στην τεχνολογία των βιομηχανικών τοπικών δικτύων και η μετατροπή των μεταδοτών σε υπολογιστικές μονάδες μικρής μεν υπολογιστικής ισχύος, αλλά ικανών να μεταδίδουν τις μετρήσεις μέσω ενός κοινού μέσου επικοινωνίας, ίσως πετύχει αυτό που δεν επετεύχθη με την προγενέστερη ψηφιακή τεχνολογία. Η προγενέστερη αυτή ψηφιακή τεχνολογία, όπως και η κλασική τεχνολογία των αναλογικών ηλεκτρονικών, είχε την ανάγκη χρήσης ενός ζεύγους καλωδίων για την μετάδοση κάθε μιας μέτρησης

χωριστά και κατά συνέπεια είχε εξίσου υψηλό κόστος εγκατάστασης ανά μέτρηση.

1.3.1.1 Αισθητήρια και μεταδότες αναλογικής τεχνολογίας

Όπως εξηγήθηκε και στα προηγούμενα ο μεταδότης μετατρέπει την έξοδο του αισθητηρίου σε ένα ηλεκτρικό σήμα η στάθμη του οποίου είναι μέσα στην περιοχή τιμών του ηλεκτρικού σήματος που μπορεί να τροφοδοτείται στην είσοδο του ελεγκτή, π.χ. 4-20 mA. Οι μεταδότες γενικά κατασκευάζονται έτσι ώστε η στάθμη του σήματος της εξόδου τους να αυξάνεται όταν και η τιμή της μεταβλητής αυξάνεται και να μειώνεται όταν αντίστοιχα και η τιμή της μεταβλητής μειώνεται. Επιπλέον, οι περισσότεροι μεταδότες που διατίθενται στην αγορά έχουν την δυνατότητα να ρυθμίζονται έτσι ώστε να μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικές περιοχές μεταβολών της φυσικής μεταβλητής. Σαν παράδειγμα, παρουσιάζουμε ένα μεταδότη θερμοκρασίας που μπορεί να ρυθμισθεί για τις θερμοκρασιακές μεταβολές στην περιοχή λειτουργίας ενός θερμοστοιχείου πλατίνας, που είναι 50 μέχρι 150 °C. Στην περίπτωση αυτή θα υπάρχει η ακόλουθη αντιστοίχιση των ορίων θερμοκρασίας της περιοχής λειτουργίας του θερμοστοιχείου με τα όρια του ηλεκτρικού σήματος εξόδου του μεταδότη.

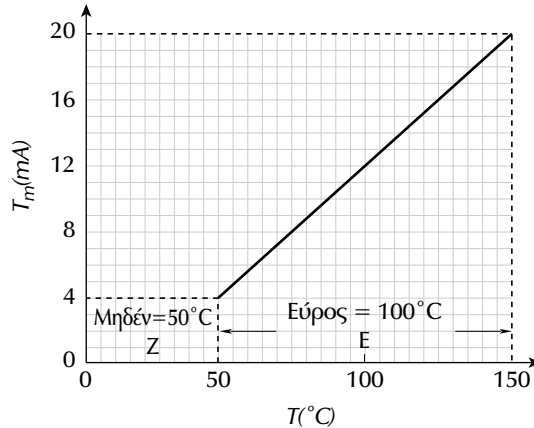
Είσοδος	Έξοδος
50 °C	4 mA
150 °C	20 mA

Συνήθως το κάτω όριο της κλίμακας στην οποία ρυθμίζεται να λειτουργεί ο μεταδότης το αποκαλούμε το **μηδέν (zero)** του μεταδότη ενώ τον αριθμό που χρειάζεται να προσθέσουμε στο κάτω αυτό όριο για να προκύψει το άνω όριο της ίδιας κλίμακας τον αποκαλούμε **εύρος (span)** του μεταδότη. Κάθε μεταδότης σχεδιάζεται και κατασκευάζεται για να συνεργάζεται με διαφορετικούς τύπους αισθητηρίων και γι' αυτό το μηδέν και το εύρος του μπορούν να ρυθμίζονται. Η δυναμική απόκριση των μεταδοτών σε μεταβολές του σήματος εισόδου είναι γενικά ταχύτατη και η σχέση μεταξύ των τιμών του σήματος εισόδου και εξόδου είναι κατά κανόνα γραμμική μέσα στην περιοχή λειτουργίας που καθορίζεται από το μηδέν και το εύρος του μεταδότη. Τα αισθητήρια όμως δεν έχουν πάντοτε γραμμική δυναμική σχέση μεταξύ των τιμών που μετριοούνται και των τιμών του ηλεκτρικού σήματος που παράγουν. Έτσι η απόκριση του συνδυασμού αισθητήριο-μεταδότης σε πολλές περιπτώσεις είναι μη γραμμική. Όταν η απόκριση είναι γραμμική, τότε η σχέση μεταξύ της εξόδου του μεταδότη και της φυσικής μεταβλητής, όπως αυτή δείχνεται

στο παράδειγμα του σχήματος 1.3, είναι επίσης γραμμική και εκφράζεται από την εξίσωση:

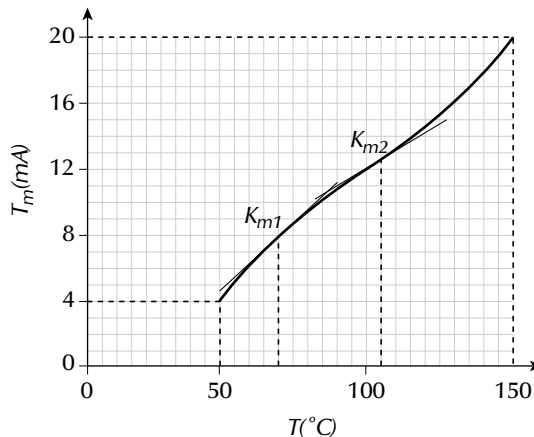
$$T_m(\text{mA}) = \left(\frac{20\text{mA} - 4\text{mA}}{E} \right) (T - Z) + 4\text{mA} \quad (1.1)$$

όπου E είναι το εύρος και Z το μηδέν της απόκρισης.



Σχήμα 1.3: Χαρακτηριστική καμπύλη αισθητήριου-μεταδότη με γραμμική απόκριση.

Ο λόγος του εύρους του ηλεκτρικού σήματος εξόδου του μεταδότη προς το εύρος των μεταβολών της φυσικής μεταβλητής ορίζεται ως το κέρδος, K_m , της μετατροπής των τιμών της φυσικής μεταβλητής σε αντίστοιχες τιμές ηλεκτρικού μεγέθους. Σε μη γραμμική απόκριση το κέρδος αυτό δεν είναι σταθερό για όλη την περιοχή μετρήσεων αλλά εξαρτάται από την εκάστοτε τιμή της φυσικής μεταβλητής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.4.



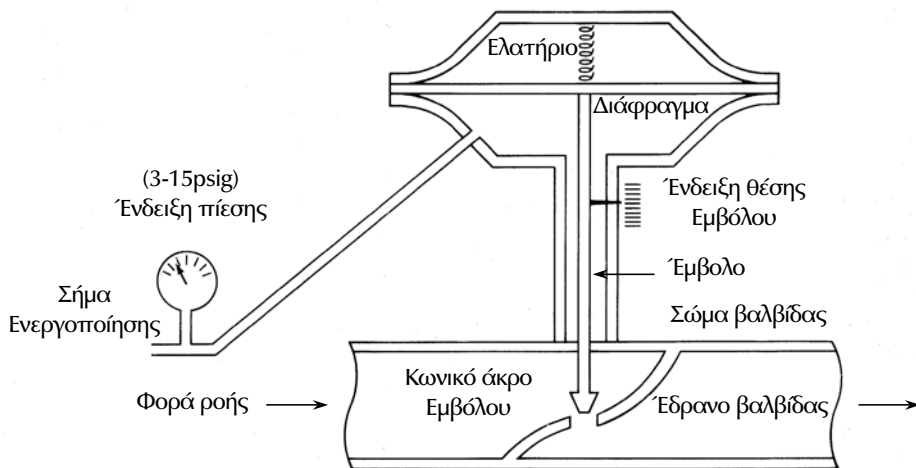
Σχήμα 1.4: Χαρακτηριστική καμπύλη αισθητήριου-μεταδότη με μη γραμμική απόκριση.

Το κέρδος αυτό σε κάθε σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης προσδιορίζεται από την κλίση της εφαπτομένης στην καμπύλη στο συγκεκριμένο σημείο.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο χρόνος απόκρισης του μεταδότη είναι πολύ μικρός και συνήθως η επίδραση του στο χρόνο μέτρησης της μεταβλητής μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Αυτό όμως δεν ισχύει και για το αισθητήριο, η δυναμική απόκριση του οποίου πρέπει να λαμβάνεται πολλές φορές υπόψη, γιατί αλλιώς τα λάθη μέτρησης μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά το χρόνο απόκρισης και την ευστάθεια των βρόχων ελέγχου.

1.3.2 Ενεργοποιητές και τελικά στοιχεία

Κάθε βρόχος ελέγχου περιλαμβάνει ένα τελικό στοιχείο, που μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει την τιμή μιας χειριζόμενης μεταβλητής. Στις περισσότερες συνεχείς διεργασίες τα τελικά στοιχεία ρυθμίζουν το ρυθμό της ροής υλών, στερεών, υγρών και αερίων, και έμμεσα τους ρυθμούς μεταφοράς ενέργειας προς και από τις διεργασίες. Όσον αφορά τα υγρά η απλούστερη διάταξη που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της ροής τους είναι η **βαλβίδα ελέγχου**. Η κάθετη τομή μιας τυπικής βαλβίδας δίνεται στο σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: Τομή πνευματικής βαλβίδας ελέγχου.

Το έμβολο στο κυρίως σώμα της βαλβίδας οδηγείται μέσω ενός μηχανισμού κίνησης προς τα κάτω ή προς τα πάνω ανάλογα με την επιδιωκόμενη μεταβολή στη χειριζόμενη μεταβλητή. Ο μηχανισμός κίνησης του εμβόλου μπορεί να είναι ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος ή ένας βηματικός κινητήρας ή

ένα πνευματικά πιεζόμενο διάφραγμα συνδεδεμένο με το άνω άκρο του εμβόλου, όμοιο με αυτό που δείχνεται στο σχήμα 1.5. Όπως θα εξηγηθεί παρακάτω ο βηματικός κινητήρας είναι ένας μηχανισμός κίνησης ιδιαίτερα συμβατός με τους ελεγκτές που υλοποιούνται με υπολογιστές. Σε πολλούς τύπους γραμμικών και μη γραμμικών τελικών στοιχείων λόγω της κατασκευής του μηχανισμού οδήγησής τους, αύξηση της τιμής του σήματος εξόδου του ελεγκτή δεν συνεπάγεται πάντοτε την ανάλογη αύξηση της τιμής της χειριζόμενης μεταβλητής αλλά αντίθετα ανάλογη μείωση της. Μια τέτοια περίπτωση συναντάται και στις πνευματικές βαλβίδες ελέγχου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5 αύξηση της τιμής του σήματος ενεργοποίησης συνεπάγεται παραμόρφωση του διαφράγματος που παρασύρει το έμβολο προς τα πάνω και κατά συνέπεια αύξηση της ροής του υγρού. Αντίθετα αν η σύνδεση του σήματος ενεργοποίησης γίνει στο επάνω μέρος του θαλάμου μέσα στον οποίο είναι το διάφραγμα, τότε αύξηση του σήματος αυτού θα συνεπαγόταν ανάλογη μείωση της διερχόμενης ροής. Επομένως οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες του τελικού στοιχείου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό της τιμής και του πρόσημου της εξόδου του ελεγκτή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση της βαλβίδας, αυτή χαρακτηρίζεται “air-to-open(A-O)” αν μηδενίζοντας το σήμα ενεργοποίησης η βαλβίδα κλείνει και διακόπτει πλήρως τη ροή, ή “air-to-close(A-C)” αν μηδενίζοντας το σήμα ενεργοποίησης επιτρέπεται η διέλευση της μέγιστης ροής. Γενικά η επιλογή τελικού στοιχείου που να περιορίζει ή να αυξάνει την τιμή της χειριζόμενης μεταβλητής όταν αυξάνεται ή μειώνεται το σήμα ελέγχου ή το αντίστροφο εξαρτάται από το πως εξασφαλίζεται η ασφαλής διακοπή της λειτουργίας μιας διεργασίας σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης. Πολλές φορές η αναφορά σε A-C ή A-O βαλβίδα γίνεται με τους όρους “**fail-open**” και “**fail-closed**” αντίστοιχα

Η σχέση μεταξύ του σήματος εισόδου σε ένα τελικό στοιχείο και των μεταβολών στη χειριζόμενη μεταβλητή που προκαλεί το σήμα αυτό, όπως συμβαίνει και στα αισθητήρια μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική ανάλογα με τον τύπο του στοιχείου. Ένα παράδειγμα στοιχείου με γραμμική σχέση των τιμών εισόδου-μεταβολών χειριζόμενης μεταβλητής είναι η διάταξη ισχύος SCR, που περιλαμβάνεται στο σχήμα 1.2. Αντίθετα η βαλβίδα ελέγχου είναι ένα τυπικό παράδειγμα μη γραμμικού τελικού στοιχείου. Η σχέση που συνδέει τη διερχόμενη ροή σαν συνάρτηση της απόστασης του εμβόλου από το τέλος της διαδρομής του είναι:

$$q = C_v f(\ell) \frac{\sqrt{\Delta p_v}}{g_s} \quad (1.2)$$

όπου q είναι ο ρυθμός της ροής, $f(\ell)$ είναι μια συνάρτηση που χαρακτηρίζει τον τρόπο λειτουργίας της βαλβίδας, ℓ είναι η απόσταση του εμβόλου της βαλβί-

δας εκφρασμένη ως κλάσμα ($0 \leq \ell \leq 1$) του μέγιστου μήκους της διαδρομής του από τη εντελώς κλειστή θέση του. Η ποσότητα Δp_v είναι η πτώση πίεσης κατά μήκος της βαλβίδας και g_s είναι το ειδικό βάρος του υγρού. Συνήθως κατασκευάζονται τριών τύπων βαλβίδες:

- οι βαλβίδες γρήγορου ανοίγματος,
- οι βαλβίδες των ίσων μεταβολών της ροής και
- οι βαλβίδες γραμμικού ανοίγματος εμβόλου.

Όταν η διαφορά πίεσης είναι σταθερή, τότε η χαρακτηριστική συνάρτηση για κάθε ένα από τους παραπάνω τύπους βαλβίδων προσδιορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

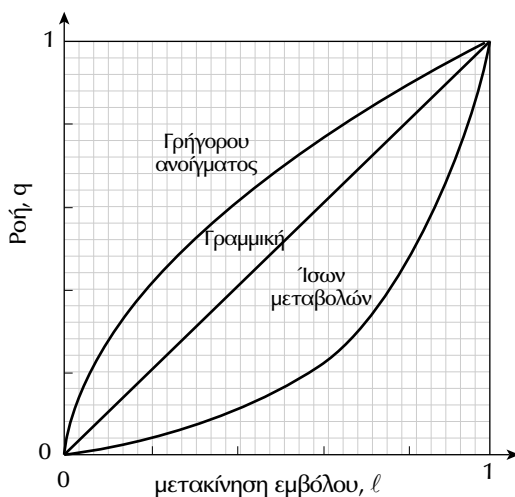
$$\text{γραμμική βαλβίδα} \quad f = \ell \quad (1.3)$$

$$\text{ίσων μεταβολών} \quad f = \sqrt{\ell} \quad (1.4)$$

$$\text{γρήγορου ανοίγματος} \quad f = R^{\ell+1} \quad (1.5)$$

όπου R είναι μια σχεδιαστική παράμετρος της βαλβίδας, προσδιοριζόμενη από τον κατασκευαστή και η τιμή της οποίας μπορεί κυμαίνεται από 20 μέχρι 50.

Η γραφική παράσταση των χαρακτηριστικών καμπυλών των τριών τύπων βαλβίδας παρουσιάζεται στο σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6: Χαρακτηριστικές καμπύλες βαλβίδων ελέγχου

Ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο μηχανισμό κίνησης του εμβόλου, κινητήρα συνεχούς ρεύματος ή διάφραγμα ή βηματικό κινητήρα, επιλέγεται και ο ενεργοποιητής του βρόχου. Η σχέση που συνδέει την πίεση του αέρα στο διάφραγμα ή την τροφοδοτούμενη ισχύ στα τυλίγματα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ή τον αριθμό των βημάτων περιστροφής του βηματικού κινητήρα με τη μετατόπιση του εμβόλου είναι συνήθως γραμμική. Η αντικατάσταση της μετατόπισης του εμβόλου στις προηγούμενες σχέσεις από την τιμή του σήματος εξόδου του ελεγκτή πολλαπλασιασμένη με το συνολικό κέρδος μετατροπής του σε ισχύ ή πίεση αέρα ή αριθμό βημάτων μπορεί να δώσει την τελική έκφραση υπολογισμού της ροής που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη τιμή της εξόδου του ελεγκτή.

Επομένως για την επίτευξη της επιθυμητής ρύθμισης της χειριζόμενης μεταβλητής κατά τον υπολογισμό του σήματος εξόδου του ελεγκτή η χαρακτηριστική καμπύλη του τελικού στοιχείου πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη.

1.3.3 Έλεγχος με υπολογιστές

Η μεγάλη ευελιξία που παρουσιάζει ο ψηφιακός υπολογιστής στην αλλαγή των μαθηματικών αλγορίθμων χωρίς να χρειάζεται η επανασυρμάτωση του συστήματος ελέγχου τον κατέστησε την κυρίαρχη διάταξη στην υλοποίηση τόσο των λειτουργιών ενός ή περισσότερων ελεγκτών βρόχων ελέγχου όσο και της συλλογής δεδομένων από τις διεργασίες που γίνεται με στόχο την ηλεκτρονική καταγραφή τους και την εποπτική παρουσίαση τους. Για την αξιοποίηση όμως της τεχνολογίας των ψηφιακών υπολογιστών στον έλεγχο των βιομηχανικών διεργασιών χρειάστηκε να λυθούν νέα τεχνικά προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη χρήση της. Τα προβλήματα αυτά σχετίζονται με την αδυναμία του ψηφιακού υπολογιστή να δεχθεί, αναγνωρίσει και δημιουργήσει τα αναλογικά σήματα που παράγουν οι μεταδότες των μετρήσεων και δέχονται οι ενεργοποιητές των εξόδων των ελεγκτών. Για να καταστεί δυνατή η επικοινωνία των αναλογικών μονάδων με τον υπολογιστή απαιτείται καταρχήν η χρήση κυκλωμάτων μετατροπής των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά και τανάπαλιν. Στις βιομηχανικές διεργασίες οι μεταβολές μέσα στο χρόνο του μεγαλύτερου αριθμού των φυσικών ποσοτήτων που θέλουμε να μετρούμε και να παρακολουθούμε είναι αναλογικές. Οι ποσότητες αυτές μπορούν δηλαδή να λάβουν τιμή που μπορεί να είναι οποιοσδήποτε πραγματικός αριθμός εντός μιας προκαθορισμένης περιοχής αριθμών, με τον περιορισμό βέβαια ότι οι αριθμοί αυτοί εμπίπτουν μέσα στην ακρίβεια του οργάνου που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των ποσοτήτων αυτών. Έτσι, η μέτρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό ενός αντιδραστήρα μπορεί να βρεθεί ότι είναι 251, 250.9, 250.92 °C ανάλογα με την ακρίβεια του ορ-

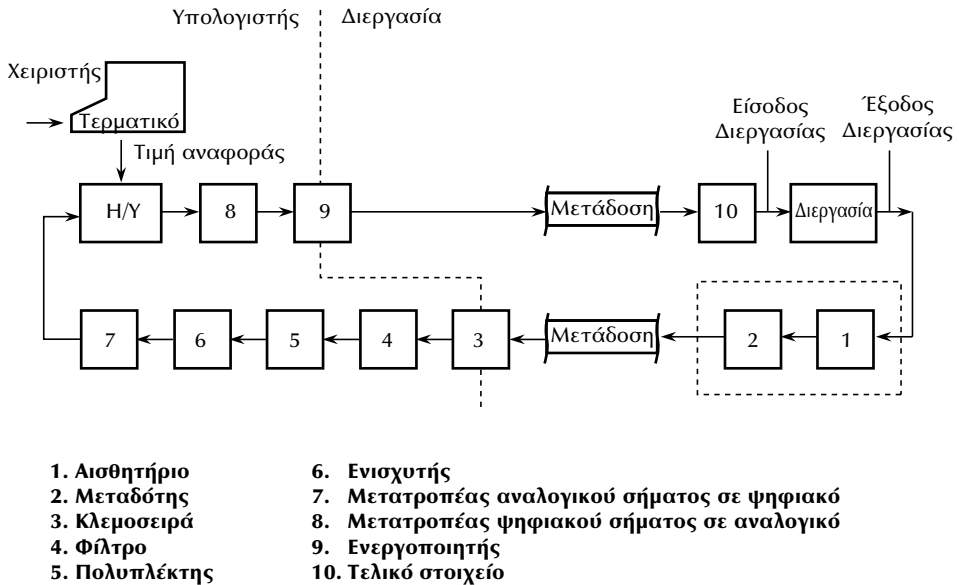
γάνου μέτρησης. Αντίθετα οι τιμές μιας φυσικής μεταβλητής για να αποτελέσουν πληροφορία αξιοποιήσιμη από τον υπολογιστή πρέπει να αναπαράσταθούν σαν ψηφιακοί αριθμοί με πεπερασμένο αριθμό δυαδικών ψηφίων. Επειδή κάθε αναλογική πληροφορία που έχει σχέση με μέτρηση φυσικής ποσότητας μετατρέπεται σε αναλογικό ηλεκτρικό σήμα, για την ψηφιακή αναπαράσταση της μέτρησης απαιτείται η αντίστοιχη μετατροπή της εκάστοτε τιμής του αναλογικού ηλεκτρικού σήματος σε αντίστοιχο ψηφιακό αριθμό. Σε κάθε ψηφιακό υπολογιστή που χρησιμοποιείται σαν ελεγκτής υπάρχει μια ηλεκτρονική διάταξη που μετατρέπει καταρχήν την εκάστοτε λαμβανόμενη τιμή του ηλεκτρικού σήματος σε ένα ψηφιακό κώδικα που βρίσκεται σε άμεση σχέση με την τιμή του ηλεκτρικού σήματος. Η διάταξη αυτή ονομάζεται μετατροπέας αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D converter). Με επεξεργασία που λαμβάνει χώρα επί του κώδικα προκύπτει ο ψηφιακός αριθμός που αντιστοιχεί στην τιμή που μετρήθηκε. Η αντίστροφη διαδικασία μετατροπής του αποτελέσματος των μαθηματικών πράξεων που εκτέλεσε ο ελεγκτής σε αναλογικό ηλεκτρικό σήμα επιτυγχάνεται με μια άλλη διάταξη που συνήθως αποκαλείται μετατροπέας ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (D/A Converter). Και στην περίπτωση αυτή χρειάζεται να γίνει επεξεργασία του ψηφιακού αποτελέσματος για να προκύψει ο ψηφιακός κώδικας που θα μετατραπεί σε αναλογικό σήμα.

Εκτός από την μετατροπή του μεγέθους των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακό αριθμό, για να παρακολουθηθούν οι μεταβολές των τιμών των σημάτων αυτών με την πάροδο του χρόνου χρειάζεται να μετατραπεί σε ψηφιακό αριθμό και ο χρόνος. Η μετατροπή αυτή προσδιορίζεται από το πόσο συχνά πρέπει να λαμβάνονται δείγματα των τιμών κάθε αναλογικού σήματος και να αποθηκεύονται στον υπολογιστή. Ο ρυθμός με τον οποίο αποφασίζεται να διαβάζονται οι τιμές κάθε αναλογικού σήματος ονομάζεται συνήθως ρυθμός δειγματοληψίας. Η επιλογή του ρυθμού αυτού είναι μια κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζει τον έλεγχο της διεργασίας.

Ένα τελευταίο πρόβλημα που μπορεί να επηρεάζει τη σωστή μετατροπή των τιμών ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακές είναι η ύπαρξη θορύβου κατά τη μετάδοση του σήματος. Επειδή ο θόρυβος αυτός μπορεί να αλλοιώνει τη σωστή τιμή του αναλογικού σήματος τη στιγμή που λαμβάνεται το δείγμα, πριν από την χρησιμοποίηση της ψηφιακής αναπαράστασης κάποιας μέτρησης πρέπει να γίνει η επεξεργασία μείωσης της επίδρασης του θορύβου που είναι γνωστή ως φιλτράρισμα του σήματος. Η μορφή που παίρνει ένας βρόχος ελέγχου στον οποίο ο αναλογικός ελεγκτής έχει αντικατασταθεί από υπολογιστή δείχνεται στο σχήμα 1.7.

Όλες οι διατάξεις που απαιτούνται, σύμφωνα με τα όσα αναπτύχθηκαν παραπάνω, σημειώνονται στο σχήμα αυτό. Στη συνέχεια γίνεται μια διεξοδι-

κότερη ανάπτυξη της επεξεργασίας που απαιτείται για τη δειγματοληψία, την εύρεση της ψηφιακής αναπαράστασης των αναλογικών σημάτων και μείωσης των επιδράσεων του θορύβου.



Σχήμα 1.7: Τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένας βρόχος ελέγχου με υπολογιστή.

1.3.3.1 Δειγματοληψία αναλογικών μετρήσεων

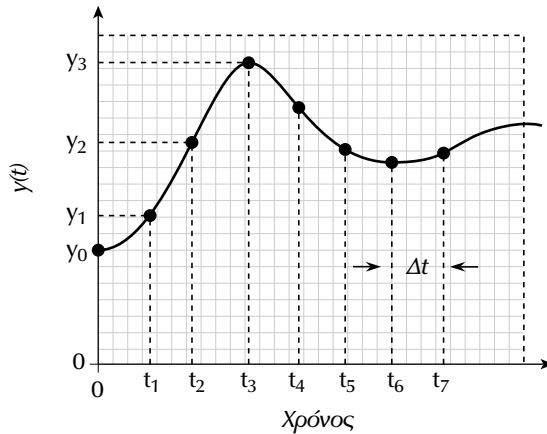
Όπως εξηγήθηκε στα προηγούμενα όταν χρησιμοποιείται υπολογιστής για τον έλεγχο διεργασιών, για να εισαχθεί στον υπολογιστή αυτό η πληροφορία που μεταδίδεται από τα όργανα μέτρησης με αναλογικά σήματα, λαμβάνονται πρώτα δείγματα των σημάτων αυτών σε τακτά χρονικά διαστήματα και μετά οι τιμές που αντιστοιχούν στα δείγματα αυτά μετατρέπονται σε ψηφιακή μορφή και αποθηκεύονται στη μνήμη του υπολογιστή. Στο σχήμα 1.8 παρουσιάζεται μια ιδανική λειτουργία δειγματοληψίας και η καμπύλη του διαγράμματος 1.8α είναι η γραφική απεικόνιση της αναλογικής μορφής του σήματος ενώ το διάγραμμα 1.8β είναι η μορφή που παίρνει το σήμα μετά την δειγματοληψία.

Βέβαια από πρακτικής πλευράς η τιμή κάθε δείγματος δεν εμφανίζεται στιγμιαία τη χρονική στιγμή της δειγματοληψίας, όπως δείχνεται στο σχήμα 1.8β, αλλά διατηρείται σταθερά για μια ολόκληρη περίοδο δειγματοληψίας και μέχρις ότου ληφθεί ένα νέο δείγμα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλεκτρονικού κυκλώματος που η συμπεριφορά του περιγράφεται μαθηματικά από το μοντέλο του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό μηδενικού βαθμού

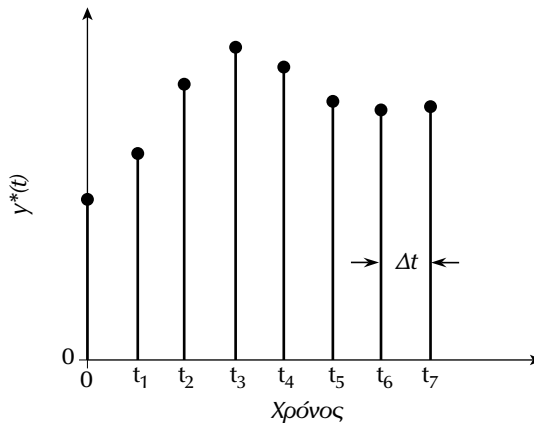
(zero-order-hold). Η μαθηματική έκφραση του μοντέλου αυτού είναι:

$$y_H(t) = y_{n-1}, \quad t_{n-1} \leq t \leq t_n \quad (1.6)$$

όπου y_{n-1} είναι η τιμή του δείγματος την αμέσως προηγούμενη στιγμή δειγματοληψίας και $y_H(t)$ η έξοδος του μετατροπέα μηδενικού βαθμού κατά τη χρονική διάρκεια t που προσδιορίζεται στη σχέση 1.6.



(α) Αναλογικό σήμα $y(t)$ και δείγματα



(β) Σήμα μετά από δειγματοληψία

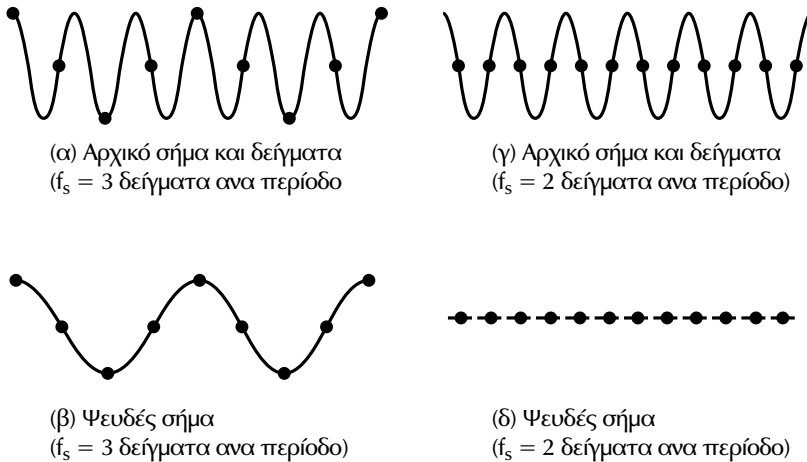
Σχήμα 1.8 Ιδανική περιοδική δειγματοληψία

Η επιλογή της τιμής του ρυθμού δειγματοληψίας πρέπει να είναι τέτοια ώστε:

- (1) ο υπολογιστής να μπορεί να λαμβάνει δείγματα με το ρυθμό αυτό από όλα τα σήματα μέτρησης χωρίς να καθυστερεί την εκτέλεση των άλλων λει-

τουργιών που του έχουν ανατεθεί (π.χ. εκτέλεση αλγορίθμων ελέγχου) και (2) να μη χάνεται πληροφορία εξαιτίας του προβλήματος του ψευδούς φαινομένου (aliasing).

Η πληροφορία που μπορεί να χαθεί κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας δείχνεται παραστατικά στο σχήμα 1.9



Σχήμα 1.9: Λήψη ψευδούς σήματος λόγω αργού ρυθμού δειγματοληψίας.

Στο σχήμα αυτό λαμβάνονται δείγματα από το ημιτονοειδές σήμα (α) με ρυθμό 4 δειγμάτων ανά περίοδο του σήματος. Το σήμα που αναπαράγεται από τα δείγματα είναι το ημιτονοειδές σήμα (β) η περίοδος του οποίου είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της περιόδου του αρχικού σήματος. Για να αποφευχθεί το πρόβλημα αυτό σύμφωνα με το θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon, (Franklin, Pawell, 1980, Åström, Wittenmark, 1984, Ogata, 1987) η περίοδος δειγματοληψίας ενός ημιτονοειδούς σήματος πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το διπλάσιο της περιόδου του σήματος. Το ψευδές φαινόμενο μπορεί να συμβεί και κατά τη δειγματοληψία μιας φυσικής μεταβλητής που δεν ακολουθεί ημιτονοειδή καμπύλη. Γενικά αν λαμβάνονται δείγματα μιας μεταβλητής με συχνότητα ω_s , τότε ημιτονοειδείς συνιστώσες της μεταβλητής με συχνότητες μεγαλύτερες από $\omega_s/2$ εμφανίζονται σαν χαμηλής συχνότητας συνιστώσες ($\omega(\omega_s/2)$) στο σήμα που παράγεται από τον υπολογιστή μετά τη δειγματοληψία. Αυτές οι συνιστώσες μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στον έλεγχο αυτής ή άλλων μεταβλητών αν οι συχνότητες τους συμπέσουν με τη συχνότητα των φυσικών αλλαγών της μεταβλητής (κρίσιμη συχνότητα ω_c). Άρα ένα από τα κριτήρια επιλογής του ρυθμού δειγματοληψίας είναι η απαλοιφή του ψευδούς φαινομένου. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να απαλειφθεί με τη χρήση των φίλτρων που αναφέρονται στη συνέχεια.

Επιπλέον η επιλογή της περιόδου δειγματοληψίας πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να μη μειώνεται η ικανότητα του βρόχου ανατροφοδότησης να εξουδετερώνει τις επιδράσεις των διαταραχών. Στην ακραία περίπτωση που η περίοδος δειγματοληψίας είναι μεγαλύτερη από το χρόνο απόκρισης της μεταβλητής τότε μια διαταραχή μπορεί να επηρεάσει τη μεταβλητή και η επίδραση της αυτή να παύσει να υφίσταται πριν ο ελεγκτής προλάβει να δράσει διορθωτικά. Άρα τα δυναμικά χαρακτηριστικά της μεταβλητής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή της περιόδου δειγματοληψίας. Αν όμως λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά αυτά προκύψει πολύ μικρή περίοδος αυτό μπορεί να έχει σαν κόστος τη μείωση του αριθμού των σημάτων από τα οποία μπορεί ταυτόχρονα να λαμβάνει δείγματα ένας υπολογιστής και να απαιτείται αύξηση της υπολογιστικής του ισχύος για να καλύψει τον αρχικό αριθμό σημάτων. Ένας τρίτος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι και ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Για μικρούς λόγους μικρές τιμές περιόδων πρέπει να αποφεύγονται διότι οι αλλαγές στην τιμή της μεταβλητής μεταξύ δύο διαδοχικών στιγμών δειγματοληψίας μπορεί να οφείλεται στο θόρυβο υψηλής συχνότητας που υπάρχει επί του σήματος.

Όπως αντιλαμβάνεται κανείς η επιλογή του ρυθμού δειγματοληψίας είναι περισσότερο τέχνη παρά επιστήμη και η εύρεση μιας τιμής θα πρέπει να είναι το αποτέλεσμα συμβιβασμού μεταξύ των αντιφατικών απαιτήσεων. Ένας μεγάλος αριθμός από εμπειρικούς κανόνες και οδηγίες αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Seborg, Edgar, Mellichamp, 1989, σ. 535-538, Κινγκ, 1996, σ.188) για τον πλέον διαδεδομένο αλγόριθμο ελέγχου, τον αλγόριθμο των τριών όρων (PID).

1.3.3.2 Φίλτρα αναλογικών σημάτων

Στο βιομηχανικό έλεγχο ο θόρυβος που ενυπάρχει στα μεταδιδόμενα αναλογικά σήματα μπορεί να προέρχεται τόσο από το αισθητήριο, όσο από το μεταδότη και αυτή την ίδια τη φυσική διεργασία. Η επίδραση του θορύβου που προέρχεται από τις ηλεκτρικές διατάξεις μπορεί να περιορισθεί θωρακίζοντας και γειώνοντας τα καλώδια. Ο θόρυβος που προέρχεται από τη φυσική διεργασία μπορεί να παράγεται κατά τη στιγμή ανάμιξης υλών, στροβιλώδους ροής και ανομοιόμορφων πολυφασικών ροών. Όταν η επίδραση θορύβου προερχόμενου από τις παραπάνω πηγές δεν μπορεί να μειωθεί με άλλα μέσα τότε η μείωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση αναλογικών ή ψηφιακών φίλτρων.

Τα αναλογικά φίλτρα έχουν χρησιμοποιηθεί εδώ και πολλά χρόνια για να εξαγάγουν από πειραματικά δεδομένα που έχουν διαβρωθεί από θόρυβο, τη χρήσιμη πληροφορία. Το πιο γνωστό φίλτρο είναι εκείνο που η λειτουργία του

περιγράφεται από τη διαφορική εξίσωση

$$\tau_F \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t) \quad (1.7)$$

όπου x είναι η μετρούμενη τιμή (η είσοδος του φίλτρου), y είναι η επεξεργασμένη τιμή (η έξοδος του φίλτρου) και τ_F η σταθερά χρόνου του φίλτρου. Το χαρακτηριστικό του φίλτρου αυτού είναι το ότι επιτρέπει τη διέλευση των χαμηλής συχνότητας συνιστωσών του σήματος εισόδου και εισάγει μεγάλη απόσβεση στο πλάτος των υψηλής συχνότητας συνιστωσών. Για αυτό και ανήκει στην κατηγορία των χαμηλοπερατών φίλτρων. Συνήθως στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως **εκθετικό φίλτρο**, ή **φίλτρο RC** διότι μπορεί να κατασκευασθεί από ένα απλό κύκλωμα αντίστασης - πυκνωτή (RC). Επίσης, επειδή χρησιμοποιείται για να απομακρύνει τις συνιστώσες των υψηλών συχνοτήτων από αναλογικά σήματα μετρήσεων πριν από τη δειγματοληψία τους με σχετικά χαμηλούς ρυθμούς, αναφέρεται και ως **αντί-ψευδές φίλτρο**. Με τη χρήση του φίλτρου αυτού μπορεί να γίνει η επιλογή του ρυθμού δειγματοληψίας σχεδόν ανεξάρτητα από την επεξεργασία του σήματος και χωρίς να χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η πιθανή δημιουργία ενός χαμηλής συχνότητας σήματος από αυτό της υψηλής συχνότητας. Για σήματα που μεταβάλλονται σχετικά αργά, δηλαδή απαιτείται τιμή τ_F μεγαλύτερη των 3 δευτερολέπτων, είναι οικονομικότερο να υλοποιούμε το απαιτούμενο εκθετικό φίλτρο ψηφιακά στον υπολογιστή που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των αλγορίθμων ελέγχου. Η απαιτούμενη περίοδος δειγματοληψίας δεν θα είναι πολύ μικρή και έτσι η επιβάρυνση του υπολογιστή θα είναι μικρή. Καθώς το κόστος των μικροϋπολογιστών νέας γενεάς μειώνεται δραστικά και η τεχνολογία των κυκλωμάτων ASICs (Application Specific Integrated Circuits) γίνεται περισσότερο προσιτή και ανταγωνιστική, οι περιπτώσεις που θα χρειάζονται αναλογικά φίλτρα θα μειώνονται σημαντικά και οι ψηφιακές υλοποιήσεις φίλτρων με πολύ μικρότερες σταθερές φίλτρου θα καθίστανται εφικτές.

Η εισαγωγή φίλτρων στο βρόχο ελέγχου δεν γίνεται χωρίς προβλήματα. Αν η σταθερά χρόνου του φίλτρου δεν είναι κατά πολύ μικρότερη από τη κυρίαρχη σταθερά χρόνου της διεργασίας τότε εισάγεται σημαντική καθυστέρηση φάσης στο βρόχο ανατροφοδότησης. Η καθυστέρηση αυτή μπορεί να ανατρέψει την ευστάθεια του βρόχου ή να αυξήσει το χρόνο αποκατάστασης της χρονικής απόκρισης της ελεγχόμενης μεταβλητής. Γενικά η επιλογή της σταθεράς χρόνου του φίλτρου πρέπει να είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη κυρίαρχη σταθερά του βρόχου ανατροφοδότησης για το λόγο που μόλις εξηγήθηκε, αλλά ταυτόχρονα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με τη μεγαλύτερη περίοδο των συνιστωσών του θορύβου που πιστεύεται ότι υπάρχει στο σήμα, για να καταστεί δυνατή η μείωση της επίδρασης της από το φίλτρο. Αν ω_{\max} είναι η

κυρίαρχη συχνότητα του βρόχου ανατροφοδότησης και ω_N η χαμηλότερη συχνότητα του θορύβου, τότε σύμφωνα με τα προηγούμενα η τ_F πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε:

$$\omega_{\max} < \omega_F < \omega_N \quad (1.8)$$

όπου
$$\omega_F = \frac{1}{\tau_F} \text{ και } \omega_{\max} = \frac{1}{\tau_{\max}} .$$

Αν και έχει αναπτυχθεί πληθώρα αλγορίθμων υλοποίησης χαμηλοπερατών φίλτρων με εξαιρετικές επιδόσεις, στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τους τέσσερις δημοφιλέστερους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία για τη ψηφιακή επεξεργασία των αναλογικών σημάτων μέτρησης. Η υπολογιστική επιβάρυνση των αλγορίθμων αυτών είναι μικρή ενώ η απόσβεση του θορύβου που επιτυγχάνεται είναι επαρκής για την ακρίβεια των μετρήσεων που χρειάζονται οι υπολογισμοί των αλγορίθμων ελέγχου.

- **Εκθετικό φίλτρο.** Είναι η ψηφιακή υλοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς του εκθετικού αναλογικού φίλτρου. Ας υποθέσουμε ότι $x_{n-1}, x_n \dots$ είναι δείγματα της μετρούμενης μεταβλητής και $y_{n-1}, y_n \dots$ είναι οι αντίστοιχες έξοδοι του φίλτρου. Ο δείκτης n αναφέρεται στο δείγμα που λαμβάνεται την τρέχουσα χρονική στιγμή. Η παράγωγος στην εξίσωση (1.7) μπορεί να προσεγγισθεί τη χρονική στιγμή n από τη διαφορά

$$\frac{dy}{dt} = \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t} \quad (1.9)$$

Αντικαθιστώντας την παράγωγο στην εξίσωση (1.7) με την ισοδύναμη διαφορά της, τις $y(t)$ και $x(t)$ αντίστοιχα με y_n και x_n και λύνοντας ως προς y_n προκύπτει ότι

$$y_n = \frac{\Delta t}{\tau_F + \Delta t} x_n + \frac{\tau_F}{\tau_F + \Delta t} y_{n-1} \quad (1.10)$$

Η παραπάνω εξίσωση δηλώνει ότι η ομαλοποιημένη μέτρηση την παρούσα χρονική στιγμή προκύπτει ως το άθροισμα του ληφθέντος την παρούσα στιγμή δείγματος του αναλογικού σήματος x_n , πολλαπλασιασμένου με ένα συντελεστή βαρύτητας, και της ομαλοποιημένης τιμής του δείγματος που ελήφθη την αμέσως προηγούμενη χρονική στιγμή y_{n-1} , πολλαπλασιασμένη επίσης με ένα άλλο συντελεστή βαρύτητας. Χρησιμοποιώντας άλλες προσεγγίσεις για το διαφορικό της εξίσωσης (1.7) μπορούν να προκύψουν μαθηματικές εκφράσεις για την εξαγωγή της μέτρησης του δείγματος από το θόρυβο με μεγαλύτερη ακρίβεια, εφόσον βέβαια η ακρίβεια αυτή απαιτείται από τους αλγορίθμους ελέγχου του βρόχου.

- **Διπλό εκθετικό φίλτρο.** Το φίλτρο αυτό έχει μια συνάρτηση μεταφοράς δεύτερης τάξης που δημιουργείται από τη σύνδεση σε σειρά δύο απλών εκθετικών φίλτρων. Το πλεονέκτημα του φίλτρου αυτού είναι ότι μειώνει περισσότερο την επίδραση των υψηλής συχνότητας συνιστωσών του θορύβου στο μετρούμενο αναλογικό σήμα. Το δεύτερο απλό αναλογικό φίλτρο δρα επί της εξόδου του πρώτου απλού εκθετικού φίλτρου. Η εξίσωση του δεύτερου αυτού φίλτρου θα είναι:

$$\bar{y}_n = y_n + (1-\gamma)\bar{y}_{n-1} \quad (1.11)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση αυτή την ισοδύναμη έκφραση (1.10) για τη τιμή y_n , προκύπτει η εξίσωση

$$\bar{y}_n = \gamma\alpha x_n + \gamma(1-\alpha)y_{n-1} + (1-\gamma)\bar{y}_{n-1} \quad (1.12)$$

Η εξίσωση (1.11) για την προηγούμενη χρονική στιγμή παίρνει τη μορφή

$$\bar{y}_{n-1} = y_{n-1} + (1-\gamma)\bar{y}_{n-2} \quad (1.13)$$

Επιλύοντας την (1.13) ως προς y_{n-1} και αντικαθιστώντας την στην (1.12) προκύπτει η εξίσωση του διπλού εκθετικού φίλτρου

$$\bar{y}_n = \gamma\alpha x_n + (2-\gamma-\alpha)\bar{y}_{n-1} - (1-\alpha)(1-\gamma)\bar{y}_{n-2} \quad (1.14)$$

Οι παράμετροι α και γ ορίζονται από τις σχέσεις

$$\alpha = \frac{1}{\tau_F/\Delta t + 1} \quad (1.15)$$

και

$$\gamma = \frac{1}{\tau'_F/\Delta t + 1} \quad (1.16)$$

όπου τ_F και τ'_F είναι οι σταθερές χρόνου αντίστοιχα του πρώτου και δεύτερου απλού εκθετικού φίλτρου. Μια συνηθισμένη απλοποίηση του διπλού εκθετικού φίλτρου είναι να τίθεται $\alpha = \gamma$. Είναι προφανές ότι η χρήση του φίλτρου αυτού λόγω του μεγαλύτερου κόστους υλοποίησης που έχει είναι περιορισμένη σε σχέση με αυτή του απλού εκθετικού φίλτρου.

- **φίλτρο του κινούμενου μέσου όρου.** Το φίλτρο αυτό υπολογίζει το μέσο όρο ενός αριθμού προηγούμενων δειγμάτων δίνοντας τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας σε κάθε δείγμα. Η εξίσωση που αντιστοιχεί στο φίλτρο αυτό είναι

$$y_n = \frac{1}{J} \sum_{i=n-J+1}^n x_i \quad (1.17)$$

όπου J είναι ο αριθμός των δειγμάτων που ελήφθησαν τις J προηγούμενες χρονικές στιγμές. Για την εύρεση αναδρομικής σχέσης υπολογισμού αφαιρούμε από τη μορφή που παίρνει η (1.17), όταν $n=n-1$, την ίδια την (1.17). Η σχέση που προκύπτει είναι η

$$y_n = y_{n-1} + \frac{1}{J} (x_n - x_{n-1}) \quad (1.18)$$

Γενικά το φίλτρο του κινούμενου μέσου όρου δεν είναι τόσο αποτελεσματικό όσο τα δύο προηγούμενα εκθετικά φίλτρα στις συνηθισμένες περιπτώσεις θορύβου (ημιτονοειδούς ή τυχαίου), διότι δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στα πλέον πρόσφατα δείγματα. Όταν όμως ο θόρυβος δεν είναι μόνιμος αλλά εμφανίζεται στιγμιαία το φίλτρο αυτό καθώς επίσης και εκείνο που περιγράφεται στη συνέχεια μπορεί να έχουν καλύτερα αποτελέσματα.

- **φίλτρο ακίδας θορύβου.** Όταν το πλάτος του θορύβου που υπάρχει σε ένα αναλογικό σήμα αλλάζει απότομα και λαμβάνει εξαιρετικά μεγάλη τιμή σε σχέση με αυτή που είχε στην προηγούμενη περίοδο δειγματοληψίας και λαμβάνει την αρχική του τιμή στην επόμενη περίοδο δειγματοληψίας, τότε ενδείκνυται η χρήση του φίλτρου που περιγράφεται από την ακόλουθη μαθηματική σχέση

$$y_n = \begin{cases} x_n & \text{αν } |x_n - y_{n-1}| \leq \Delta x \\ y_{n-1} - \Delta x & \text{αν } (y_{n-1} - x_n) > \Delta x \\ y_{n-1} + \Delta x & \text{αν } (y_{n-1} - x_n) < -\Delta x \end{cases} \quad (1.19)$$

Οι απότομες και μικρής διάρκειας μεταβολές του πλάτους του θορύβου αποκαλούνται συνήθως **ακίδες θορύβου (noise-Spikes)** και προκαλούνται από ηλεκτρικές τάσεις που επάγονται στο περιβάλλον των αισθητηρίων κατά την εκκίνηση κινητήρων, ή από υπερκείμενες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Υπάρχουν πολλοί άλλοι τύποι πολύπλοκων φίλτρων που θα μπορούσαν να εφαρμοσθούν στο βιομηχανικό αυτόματο έλεγχο με πιθανόν θεαματικά αποτελέσματα (Oppenheim, Shafer, 1983, Santina et al, 1994). Ιδιαίτερα τώρα που το κόστος επεξεργασίας μειώνεται σημαντικά και γίνονται διαθέσιμοι για εφαρμογές αυτομάτου ελέγχου επεξεργαστές με μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ, η χρήση νέων αλγορίθμων γίνεται περισσότερο εφικτή. Προς το παρόν όμως οι νέοι αυτοί αλγόριθμοι δεν έχουν τύχει ευρύτερης αποδοχής, ενώ οι τέσσερις αλγόριθμοι που εκτέθηκαν παραπάνω προσφέρονται σε βιβλιοθήκες προγραμμάτων σχεδόν σε όλα τα εμπορικά συστήματα υπολογιστών κατάλληλων για εφαρμογές βιομηχανικού ελέγχου.