



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

Ο ρόλος του ελεγκτή στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου



Πτυχιακή εργασία

Ζαμπουλάκης Γιώργος
Αριθμός Μητρώου:3042

Επιβλέπων καθηγητής: Φραγκιαδάκης Νικόλαος

Χανιά 2014

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ	5
1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	7
1.3 Συστήματα αυτομάτου ελέγχου.....	12
1.3.1 Βασικές μονάδες των συστημάτων αυτόματου ελέγχου	13
2. Ανάλυση Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου	15
2.1 Συνάρτηση μεταφοράς.....	15
2.2 Δομικά διαγράμματα συστημάτων.....	17
2.2.1 Δομικά διαγράμματα σειράς.....	18
2.2.2 Δομικά διαγράμματα παράλληλα	19
2.3 Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου ανοικτού και κλειστού βρόγχου	19
2.4. Ευστάθεια Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου.....	21
3. Ελεγκτές Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου	22
3.1 Ταξινόμηση Ελεγκτών.....	23
3.2. Αναλογικός ελεγκτής (PROPORTIONAL-P)	24
3.2.1 Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος πρώτης τάξης.....	26
3.2.2 Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης	29
3.3 Ολοκληρωτικός ελεγκτής (Integral-I)	30
3.3.1 Ολοκληρωτικός έλεγχος ενός συστήματος πρώτης τάξης.....	32
3.3.2 Ολοκληρωτικός έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης.....	33
3.4 Διαφορικός ελεγκτής (Differential-D).....	34
3.5 Αναλογικός – Ολοκληρωτικός (PI) ελεγκτής	35
3.5.1 Ολοκληρωτικός - Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος πρώτης τάξης.....	36
3.5.2 Ολοκληρωτικός - Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης	37
3.6 Αναλογικός – Διαφορικός (PD) ελεγκτής.....	38

3.6.1 Αναλογικός- Διαφορικός έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης	40
3.7 Αναλογικός – Ολοκληρωτικός – Διαφορικός (PID) ελεγκτής.....	41
4. Τύποι ελεγκτών	43
4.1 Ηλεκτρονικοί αναλογικοί ελεγκτές.....	43
4.2 Ψηφιακοί ελεγκτές	48
4.2.1 Ψηφιακός ελεγκτής PID	48
4.2.2 Μέθοδος ολοκληρώματος	51
4.2.3 Μέθοδος παραγώγου	53
4.3 Προηγμένος έλεγχος	55
4.4 Σειριακός έλεγχος.....	56
4.5 Έλεγχος ορθής τροφοδοσίας	57
4.6 Προσαρμοστικοί ελεγκτές	58
4.7 Πολυμεταβλητός έλεγχος.....	59
5. Προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLC)	61
5.1 Περιγραφή και λειτουργία του PLC.....	62
5.3 Πλεονεκτήματα	64
5.4 Στάδια εργασίας.....	66
5.4 Δομή ενός προγραμματιζόμενου λογικό ελεγκτή.....	67
5.4.1. Πλαίσιο τοποθέτησης μονάδων.....	68
5.4.2 Μονάδα τροφοδοσίας	69
5.4.3. Κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU)	69
5.4.4. Μονάδες εισόδων / εξόδων.....	70
5.4.5 Μνήμη RAM	71
5.4.6 Μνήμη EEPROM	71
5.4.7 Μνήμη ROM	72
5.5 Προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές της αγοράς.....	72
5.6 Προγραμματισμός ενός προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή και οι γλώσσες προγραμματισμού	74
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	77

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το θέμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι ο ρόλος του ελεγκτή στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Τα τμήματα τα οποία αποτελείται έχουν ως εξής:

- Περιγραφή της λειτουργίας και της δομής ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου.
- Κατηγορίες Συστημάτων.
- Περιγραφή Ελεγκτών και του ρόλου τους στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.

PREFACE

The subject of this thesis is the role of the controller in automatic control systems. The parts which are composed as follows :

- Describe the function and structure of an automatic control system.
- Systems Categories.
- Description of controllers and their role in automatic control systems.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

1.1 Εισαγωγή

Η χρήση των εννοιών σήματος και συστήματος από τους ερευνητές κατά τα τελευταία 50 περίπου χρόνια βοήθησε αρχικά στη μαθηματική διατύπωση ερωτημάτων τα οποία προέκυπταν από την προσπάθεια για καλύτερη και βαθύτερη κατανόηση πολλών φυσικών, μηχανικών ή οικονομικών φαινομένων και στη συνέχεια στη διερεύνηση αντιστοίχων προβλημάτων. Οι τηλεπικοινωνίες, η ηλεκτρονική, η παραγωγή και η κατανομή ηλεκτρικής ενέργειας, ο αυτοματισμός και η ρομποτική, η αεροναυτική και αστροναυτική, η οικονομία, και οικονομετρία, η νευρολογία, η βιολογία και η ιατρική είναι μερικά μόνο παραδείγματα επιστημονικών περιοχών, για τις οποίες οι έννοιες αυτές έπαιξαν και παίζουν συνεχώς πολύ σημαντικό ρόλο στην διατύπωση, ανάλυση, διερεύνηση και λύση προβλημάτων τα οποία τις απασχολούν.

Αν και η φύση των σημάτων και των συστημάτων που εμφανίζονται σε διαφορετικές περιοχές του επιστητού διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή, σε όλες τις περιπτώσεις, οι δύο αυτές έννοιες ενός σήματος και ενός συστήματος έχουν βασικές κοινές ιδιότητες. Αυτό που ονομάζουμε σήμα αποτελεί πάντα μία μαθηματική συνάρτηση μίας η περισσοτέρων ανεξαρτήτων μεταβλητών μία από τις οποίες είναι υποχρεωτικά ο χρόνος και τυπικά περιέχει πληροφορίες για τη χρονική εξέλιξη μιας ποσότητας η οποία περιγράφει ένα φαινόμενο ή μία διαδικασία. Ο ακριβής ορισμός της έννοιας του συστήματος είναι πιο δύσκολος. Ένα σύστημα αναγνωρίζεται πιο εύκολα από ό,τι ορίζεται. Με τον όρο σύστημα εννοούμε ένα μέρος του φυσικού κόσμου το οποίο θεωρούμε ότι αποτελείται από ένα σύνολο στοιχείων τα οποία λειτουργούν συγχρόνως κατα προδιαγεγραμμένο τρόπο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται κάποιος στόχος. Ένα σύστημα επικοινωνεί με το περιβάλλον μέσω σημάτων. Τα σήματα που δέχεται ένα σύστημα ονομάζονται διεγέρσεις ή είσοδοι και τα σήματα που παράγει ένα σύστημα λόγω των διεγέρσεων και των μη μηδενικών αρχικών συνθηκών ονομάζονται αποκρίσεις ή έξοδοι (Βολογιαννίδης, Σ.).

Συνοψίζοντας, σύστημα αυτόματου ελέγχου (Σ.Α.Ε.) είναι ένα σύστημα όπου τα διάφορα μέρη του είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε να

συμπεριφέρονται αυτόματα κατά ένα προκαθορισμένο επιθυμητό τρόπο (Παρασκευόπουλος, Π.Ν., 2001).

Ένα τέτοιο σύστημα λοιπόν αποτελείται από τρία στοιχεία :

- Είσοδος
- Σύστημα
- Έξοδος

Αν συμβολίσουμε το σύστημα με το γράμμα « Σ » τότε η συμπεριφορά του συστήματος (δηλαδή η έξοδος ή η απόκριση αυτού) συνδέεται με την είσοδο με μία μαθηματική σχέση : $y(t) = \Sigma * u(t)$

Όπου,

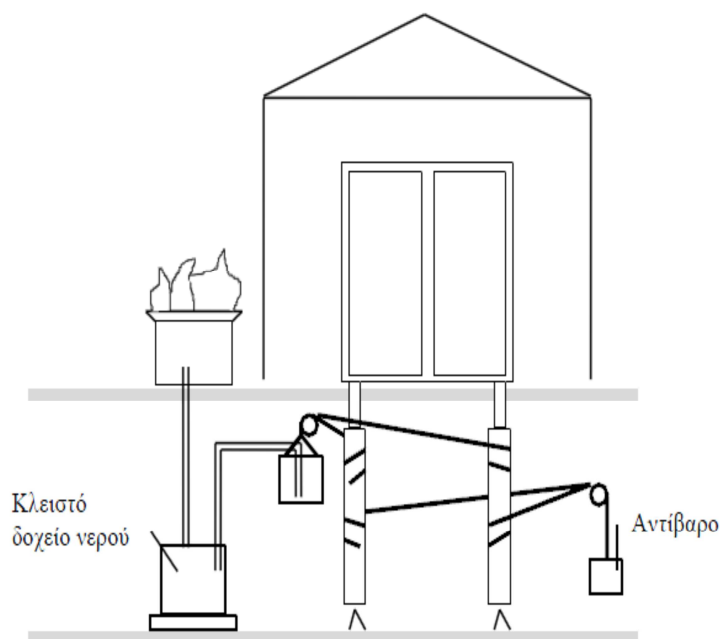
$u(t)$: η είσοδος του συστήματος συναρτήσει του χρόνου και ,

$y(t)$: η έξοδος του συστήματος συναρτήσει του χρόνου

Σ' ένα Σ.Α.Ε. είναι πιθανό να έχουμε περισσότερες από μία εισόδους, οι εισοδοί ονομάζονται και παράμετροι ενώ η έξοδος ονομάζεται και προδιαγραφές. Οι εισοδοί (παράμετροι) μπορεί να είναι δύο ειδών είτε ελέγχου είτε διαταραχής, δηλαδή υπάρχουν εισοδοί τις οποίες μπορούμε να ελέγξουμε (ελέγχου) και εισοδοί τις οποίες δεν μπορούμε να ελέγξουμε (διαταραχής). Σε αντίθεση με τις παραμέτρους που τις ελέγχουμε ή δεν τις ελέγχουμε τις παραμέτρους μπορούμε να τις ορίσουμε. Αν το επιθυμούμε μπορούμε να επεξεργαστούμε την έξοδο του συστήματος και να δούμε αν ταυτίζεται με την προδιαγραφή που έχουμε ορίσει, σε περίπτωση που δεν ισχύει αυτό τότε πρέπει να δράσουμε καταλλήλως στις παραμέτρους ώστε να πετύχουμε έξοδο ίδια με τις προδιαγραφές.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Τα συστήματα αυτόματου ελέγχου είναι σήμερα μία από τις σημαντικότερες περιοχές της επιστήμης και της τεχνολογίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αυτοματισμός είναι συνυφασμένος με την ανάπτυξη σχεδόν κάθε μορφής τεχνολογίας. Ένα από τα πρώτα συστήματα αυτομάτου ελέγχου που αναφέρονται στην ιστορία είναι ο μηχανισμός που επινόησε ο Έρωνας ο Αλεξανδρινός για το αυτόματο άνοιγμα των θυρών ενός αρχαίου ναού (Εικόνα 1) και λειτουργούσε ως έξης:

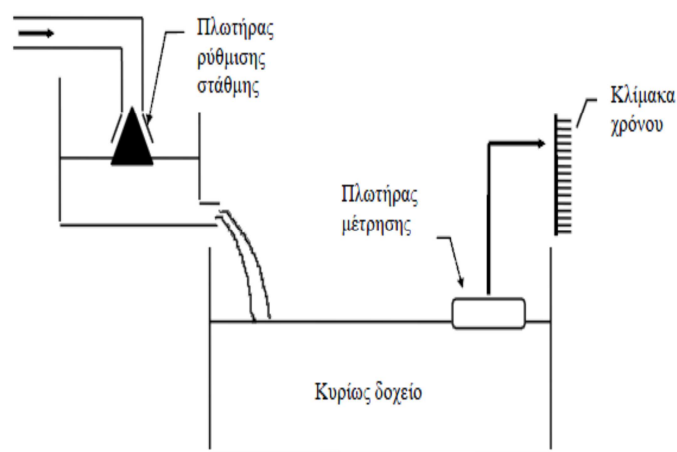


Εικόνα 1: Διάταξη συστήματος αυτομάτου ελέγχου του Έρωνας του Αλεξανδρινού

Με το άναμμα της φωτιάς στο βωμό ο αέρας κάτω απ' αυτόν διαστέλλεται και πιέζει το νερό από το κλειστό δοχείο να ανέβει στο δοχείο. Το δοχείο γίνεται βαρύτερο και κατέρχεται ανοίγοντας τις θύρες με τη βοήθεια σχοινιών, παρασύρει δε και ανυψώνει το αντίβαρο. Η διαδικασία εξελίσσεται αντίστροφα όταν σβήσει η φωτιά. Ο αέρας κρυνώνει, η πίεση του κλειστού δοχείου μικραίνει και συνεπώς το νερό κυλάει από το δοχείο στο κλειστό δοχείο λόγω βαρύτητας. Το δοχείο λοιπόν γίνεται ελαφρύτερο οπότε κάποια στιγμή το αντίβαρο αρχίζει να κατεβαίνει κλείνοντας τις πόρτες. Είναι πιθανόν ότι ο όλος μηχανισμός ενεργοποιείτο όταν οι ιερείς άρχιζαν να ανεβαίνουν τα

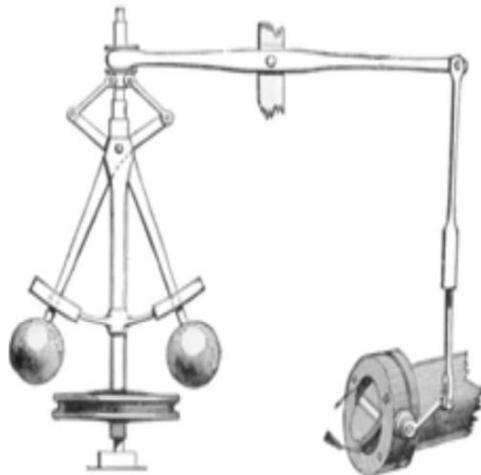
σκαλοπάτια του ναού. Η διάταξη βέβαια δεν ήταν ορατή στους κοινούς θνητούς και έτσι το άνοιγμα αποδίδονταν στους Θεούς (Singer και συν., 1956, Παρασκευόπουλος, Π.Ν., 2001.).

Το πρώτο σύστημα ελέγχου με ανάδραση θεωρείται το υδάτινο ρολόι του Κτησίβιου που κατασκευάστηκε στην Αλεξάνδρεια τον 3^ο π.Χ. αιώνα (Εικόνα 2). Στη διάταξη αυτή, ένα κύριο δοχείο χρησιμεύει για την συγκέντρωση νερού. Αν η ροή προς τη δεξαμενή διατηρείται σταθερή τότε η στάθμη της - κατάλληλα βαθμονομημένη - μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση του χρόνου. Προκειμένου να διατηρήσει τη ροή προς την δεξαμενή σταθερή, ο Κτησίβιος χρησιμοποίησε ένα δεύτερο δοχείο ρύθμισης, όπου έλεγχε την στάθμη με την βοήθεια ενός κωνικού πλωτήρα. Όταν η στάθμη κατέρχεται ο πλωτήρας κατερχόμενος αποκαλύπτει περισσότερο το στόμιο και επιτρέπει να περάσει περισσότερο νερό, άρα η στάθμη ξανανεβαίνει. Η σταθερή στάθμη του νερού στο δευτερεύον δοχείο επιβάλλει σταθερή ροή προς το κύριο (Η ροή από σταθερό στόμιο δοχείου εξαρτάται μόνο από τη στάθμη του νερού σ' αυτό). Ένα μάλλον ογκώδες ρολόι ιδιαίτερα αν συγκριθεί με τα σύγχρονα ηλεκτρονικά. Στο ρολόι του Κτησίβιου συναντάμε την αρχή της ανάδρασης: Η ελεγχόμενη ποσότητα (στάθμη του βοηθητικού δοχείου) ανατροφοδοτείται (επηρεάζει) στην είσοδο του συστήματος που είναι η ροή του νερού προς αυτό (Σφακιωτάκης, Μ., Παρασκευόπουλος, Π.Ν., 2001).



Εικόνα 2: Διάταξη υδάτινου ρολογιού του Κτησίβιου

Μετά τα μέσα του 18^{ου} αιώνα, ο αυτοματισμός αρχίζει σιγά-σιγά να παρουσιάζει αξιόλογες επιτεύξεις. Το έτος 1769, ο James Watt κατασκεύασε τον πρώτο φυγοκεντρικό ρυθμιστή ταχύτητας, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ευρέως στη βιομηχανία για τον αυτόματο έλεγχο ατμομηχανών. Ο μηχανισμός (Εικόνα 3), παρακολουθεί βασικά την περιστροφική ταχύτητα της μηχανής με τη βοήθεια στρεφομένων (από τον άξονα της μηχανής) σφαιριδίων.



Εικόνα 3: Φυγοκεντρικός ρυθμιστής ταχύτητας

Μείωση της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής λόγω π.χ. αυξημένου φορτίου, συνεπάγεται πτώση των σφαιριδίων που μέσω του υδραυλικού μηχανισμού οδηγεί στο άνοιγμα της βαλβίδας του ατμού. Όσο αυξανόταν η ταχύτητα περιστροφής η σφαίρα εξαιτίας της φυγόκεντρης δύναμης ανασηκωνόταν και η κίνηση της απομακρυνόταν από τον άξονα συμμετρίας του κυλινδρικού άξονα κίνησης προκαλώντας με τον τρόπο αυτό το κλείσιμο της βάνας. Ακριβώς το αντίστροφο συμβαίνει όταν η μηχανή τείνει να αυξήσει τις στροφές της. Για την κίνηση της σφαίρας απαιτείται ένα ποσό ενέργειας που προσφέρεται από την ίδια την μηχανή, οπότε η μέτρηση της περιστροφικής ταχύτητας διεξάγεται με σχετικά μικρή ακρίβεια. Ο ρυθμιστής του Watt εξελιγμένος φυσικά χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα για την ρύθμιση στροφών μοντέρνων στροβιλομηχανών. Το σύστημα είναι ενδιαφέρον από άποψη ευστάθειας, και μόνο το 1868 ο Maxwell το μελέτησε αναλυτικά (Σφακιωτάκης, Καβουσιανός, Μ.).

Η χρονική περίοδος πριν το 1868 χαρακτηρίστηκε γενικά από την ανάπτυξη διαφόρων εμπνευσμένων και έξυπνων συστημάτων αυτόματου ελέγχου. Οι διάφορες προσπάθειες με σκοπό την αύξηση της ακρίβειας των συστημάτων οδήγησαν στην επιτακτική ανάγκη της ανάπτυξης μιας αντίστοιχης θεωρίας για τον αυτόματο έλεγχο. Ο J.C. Maxwell διετύπωσε μια θεωρία σχετικά με τον αυτόματο έλεγχο, βασισμένη σε ένα μαθηματικό μοντέλο διαφορικής εξίσωσης ενός ελεγκτή. Η μελέτη αυτή του Maxwell αφορούσε κυρίως στην επίδραση των διαφόρων παραμέτρων του συστήματος πάνω στη συνολική του συμπεριφορά. Κατά την ίδια περίοδο ο I.A. Vyshnegradskii διετύπωσε μια αντίστοιχη θεωρία βασισμένη στα μαθηματικά, σχετικά με τα συστήματα ρυθμιστών.

Πριν από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, οι διάφορες θεωρίες που αναπτύχθηκαν στις Η.Π.Α. και στην Δυτική Ευρώπη είχαν διατυπωθεί με αρκετά διαφορετικό τρόπο σε σχέση με εκείνες που αναπτύχθηκαν από την πλευρά της Ανατολικής Ευρώπης και της Ρωσίας. Στην ώθηση για την χρήση συστημάτων ανάδρασης στις Η.Π.Α. αποτέλεσε η ανάπτυξη της τηλεφωνίας και των ηλεκτρονικών ενισχυτών ανάδρασης από τους Bode, Nyquist και Black της εταιρίας Bell Telephone Laboratories. Η έννοια του πεδίου της συχνότητας χρησιμοποιήθηκε πρωταρχικά με σκοπό να περιγράψει την λειτουργία των ενισχυτών ανάδρασης σε σχέση με το εύρος ζώνης καθώς επίσης και με άλλες αντίστοιχες μεταβλητές. Σε αντίθεση με όλα αυτά διάφοροι Μαθηματικοί αλλά και διάφοροι εμπειρικοί μηχανικοί στην πρώην Σοβιετική Ένωση ενέπνευσαν και κυριάρχησαν στον χώρο της θεωρίας του αυτόμα-του ελέγχου. Η θεωρητική προσέγγιση των Σοβιετικών διακατέχεται από μια τάση προς το πεδίο του χρόνου διατυπωμένη κατάλληλα με τη βοήθεια διαφορικών εξισώσεων (Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, 2003).

Ισχυρή ώθηση δόθηκε στον Αυτόματο Έλεγχο κατά τη διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου. Τότε η επιτακτική ανάγκη για τους εμπόλεμους να κατασκευάζουν συνεχώς τελειότερα όπλα, οδήγησε στην κατασκευή αυτομάτων συστημάτων σκόπευσης πυροβόλων, συστημάτων αυτόματης κατεύθυνσης κεραιών radar, συστημάτων αυτόματης πλοήγησης αεροσκαφών και υποβρυχίων. Δυστυχώς για μια ακόμη φορά ο Ηράκλειτος επαληθεύθηκε : «πόλεμος πατήρ πάντων...». Πριν από το 1940 οι διαδικασίες σχεδίασης των συστημάτων αυτόματου ελέγχου βρισκόταν ως επί το πλείστον σε επίπεδο εμπειρικών μεθόδων βασισμένων σε τεχνικές δοκιμής και

σφάλματος. Στη διάρκεια της δεκαετίας αυτής διατυπώνονταν με γοργούς ρυθμούς διάφορες μαθηματικές και αναλυτικές μέθοδοι και προοδευτικά το αντικείμενο του αυτόματου ελέγχου μετατράπηκε σε επίπεδο ιδιαίτερης εφαρμοσμένης επιστήμης. Οι διάφορες τεχνικές ανάλυσης στο πεδίο της συχνότητας συνέχισαν να κυριαρχούν στον χώρο του αυτόματου ελέγχου και μετά τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο με ιδιαίτερη έμφαση στην χρήση των μετασχηματισμών Laplace καθώς και του πεδίου της μιγαδικής συχνότητας. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950 δόθηκε αρκετή έμφαση στην ανάπτυξη και την χρήση μεθόδων του πεδίου της μιγαδικής μεταβλητής s και ιδιαίτερα της μεθόδου του γεωμετρικού τόπου ριζών. Στη δεκαετία '50-'60 εμφανίστηκαν οι αναλογικοί και στη συνέχεια οι ψηφιακοί υπολογιστές. Τα εργαλεία αυτά έχοντας την ικανότητα να μετρούν μεταβλητές και να εκτελούν ταχύτατα υπολογισμούς, έδωσαν τεράστια ώθηση στον αυτόματο έλεγχο. Στη δεκαετία του 1980 η χρήση των ψηφιακών υπολογιστών και των αντίστοιχων σχετικών διεργασιών ως στοιχεία ελέγχου γίνεται ρουτίνα. Η τεχνολογία των σύγχρονων για την εποχή εκείνη συστημάτων ήταν απαγορευτική για το σύνολο των μηχανικών σχεδίασης.

Στη σύγχρονη εποχή, με την αποστολή του διαστημοπλοίου Sputnik και την εμφάνιση της εποχής του διαστήματος δόθηκε μια νέα μεγάλη ώθηση στον χώρο του αυτόματου ελέγχου, έτσι δημιουργήθηκε μια νέα ανάγκη σχεδιασμού πολύπλοκων συστημάτων αυτόματου ελέγχου υψηλής ακρίβειας για πυραύλους και διατάξεις ανιχνευτών για διαστημική χρήση. Επίσης η ανάγκη ελέγχου υψηλής ακρίβειας έφερε στο προσκήνιο το αντικείμενο του βέλτιστουελέγχου. Αποτέλεσμα των παραπάνω απαιτήσεων τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν μέθοδοι στο πεδίο του χρόνου από τους Liapunov, Minorsky και άλλους όπως και διάφορες μελέτες σχετικά με την τεχνολογία των εύρωστων συστημάτων. Είναι ξεκάθαρο ότι τόσο η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας θα πρέπει να λαμβάνονται εξίσου υπόψη κατά τις διαδικασίες ανάλυσης και σχεδίασης συστημάτων αυτόματου ελέγχου.

Το αυτόματο πλυντήριο, η αυτόματη κουζίνα, η αυτοματοποιημένη κεντρική θέρμανση είναι μόνο λίγα από τα παραδείγματα αυτοματοποιημέ-νων συστημάτων που βρίσκονται ήδη στη διάθεση του ανθρώπου. Σήμερα οι ψηφιακοί υπολογιστές έχουν ολοκληρωτικά επικρατήσει των αναλογικών. Εκατομμύρια απ' αυτούς είναι εγκατεστημένοι στη βιομηχανία όπου ελέγχουν διεργασίες παρακολουθώντας και

ελέγχοντας πλήθος μεταβλητών. Ο αυτοματισμός είναι πολύ διαδεδομένος στον τεχνικό κόσμο και δεν είναι υπερβολή να πούμε ότι σ' ένα μεγάλο βαθμό η αυτοματοποίηση με τον ένα ή τον άλλο τρόπο έχει εισβάλλει στη ζωή μας και στο μέλλον θα κυριαρχεί όλο και περισσότερο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένας από τους κύριους σκοπούς της σύγχρονης τεχνολογίας είναι η κατά το δυνατό μείωση της συμμετοχής του ανθρώπου στη λειτουργία των συστημάτων. Η αυτοματοποίηση στις γραμμές παραγωγής των εργοστασίων συντελεί στη συνεχή μείωση του κόστους των καταναλωτικών προϊόντων με παράλληλη βελτίωση της ποιότητας τους. Αυτοκίνητα, ηλεκτρικές/ηλεκτρονικές συσκευές, υπολογιστές παράγονται σε πλήρως αυτοματοποιημένες γραμμές και κατακλύζουν τις αγορές του κόσμου. Σα τελευταία χρόνια τα συστήματα αυτόματου ελέγχου παρουσιάζουν μία εντυπωσιακή εξέλιξη που οφείλεται στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Εξαιτίας της γρήγορης ανάπτυξης και κυρίως στο χαμηλό κόστος των υπολογιστών χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο ώστε να αυτοματοποιηθεί ένα σύστημα ή μια διεργασία, κάτι που μπορεί να απαλλάξει τον άνθρωπο από μονότονες και δύσκολες εργασίες, ήδη τα βιομηχανικά ρομπότ αναλαμβάνουν ακούραστα και αδιαμαρτύρητα να εκτελέσουν πολλές τέτοιες εργασίες. Υπάρχει πάντως και ο φόβος ότι η πλατιά εξάπλωση των συστημάτων αυτόματου ελέγχου στους χώρους δουλειάς οδηγεί στην ανεργία, αφού χάνονται συνεχώς θέσεις εργασίας ανειδίκευτου προσωπικού. Αναμφισβήτητα πολλά επαγγέλματα περνούν κρίση, η λύση είναι η συνεχής μετεκπαίδευση στις νέες τεχνολογίες. Παρ' όλα αυτά, η τεχνολογική ανεργία όπως ονομάζεται απειλεί σοβαρά ένα μεγάλο μέρος των εργαζομένων και αυτό φαίνεται να συνειδητοποιείται σταδιακά παγκοσμίως.

1.3 Συστήματα αυτομάτου ελέγχου

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου (Automatic Control Systems) γράφονται σε συντομία Σ.Α.Ε. *Σύστημα ονομάζεται το σύνολο το οποίο αποτελείται από μία ή και περισσότερες λειτουργικές μονάδες συνδεδεμένες μεταξύ τους κατά λογικό τρόπο, ώστε να επιτελούν συγκεκριμένο έργο.*

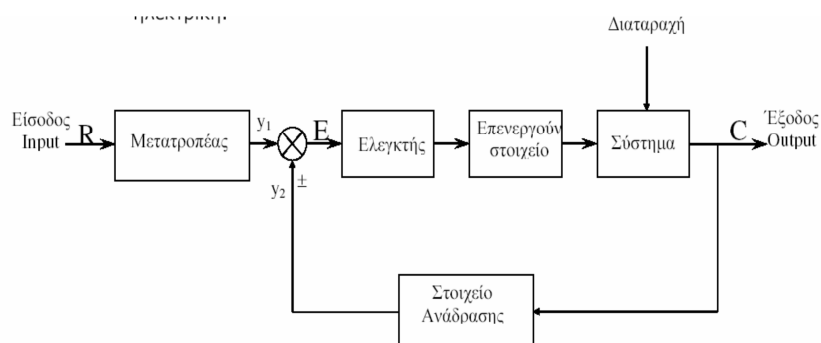
Το αυτόματο σύστημα δέχεται πληροφορίες από κάποιο άλλο σύστημα ή μονάδα, τίθεται σε λειτουργία μόνο του και επιτελεί το προγραμματισμένο έργο. Πιθανόν όμως να δέχεται πληροφορίες και από το ίδιο το σύστημα (αυτοέλεγχος). Ο έλεγχος αφορά τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος. Δηλαδή, η απόδοση του συστήματος ελέγχεται από τις πληροφορίες που θα δεχτεί το σύστημα αρχικά ή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Η πληροφορία με την οποία τροφοδοτείται το σύστημα λέγεται και εντολή. Η πληροφορία είναι συνάρτηση ορισμένων παραμέτρων, μεταβλητών δηλαδή μεγεθών. Όταν οι παράμετροι λάβουν (συνήθως με τη βούληση μας) συγκεκριμένη τιμή, τότε και η πληροφορία λαμβάνει συγκεκριμένη τιμή. Η πληροφορία ή εντολή πολλές φορές αναφέρεται και ως σήμα. Το σήμα μπορεί να είναι η τάση εισόδου V_i (input voltage) σε έναν ενισχυτή τάσης (μπορεί όμως να είναι το ρεύμα εισόδου I_i (input current) όταν αναφερόμαστε σε ενισχυτή ρεύματος. Στη μηχανή καθαρισμού αυτοκινήτων το σήμα είναι ο χρόνος λειτουργίας, η ποσότητα του νερού καθώς και του υγρού απορρυπαντικού. Συνεπώς το σήμα μπορεί να είναι συνάρτηση ενός ή και περισσότερων μεταβλητών (παραμέτρων) ποικίλης φύσεως. Τα συστήματα δυνατόν να είναι απλά αλλά και πολλές φορές πολύπλοκα. Γενικά, σύστημα είναι οτιδήποτε εργάζεται και εκτελεί κάποιο προγραμματισμένο έργο.

1.3.1 Βασικές μονάδες των συστημάτων αυτόματου ελέγχου

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου αποτελούνται γενικά από τις εξής επί μέρους μονάδες:

- 1) **Είσοδος.** Στη μονάδα αυτή παράγεται το επιθυμητό σήμα το οποίο στη συνέχεια θα τροφοδοτήσει την κυρία μονάδα (επεξεργαστή).
- 2) **Επεξεργαστής ως κυρία μονάδα (μετατροπέας)** . Στον επεξεργαστή που αποτελεί και την κύρια μονάδα το σήμα εισόδου επεξεργάζεται π.χ. ενισχύεται (ενισχυτής τάσης ή ρεύματος) ή μετατρέπεται σε άλλου είδους σήμα (π.χ. μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική).
- 3) **Αθροιστής.** Είναι συσκευή που αθροίζει αλγεβρικά τα εισερχόμενα σήματα για να παράγει ένα σήμα εξόδου. Συνήθως αναφέρεται και σαν συγκριτής η ανιχνευτής σφάλματος.

- 4) **Ελεγκτής.** Σε όλα σχεδόν τα συστήματα ελέγχου η είσοδος του ελεγκτή είναι το σφάλμα που παράγεται από τον **αθροιστή** στα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόγχου ή την ίδια την **είσοδο** στα συστήματα ελέγχου ανοιχτού βρόγχου. Είναι μηχανισμός ελέγχου που παράγει μια έξοδο που οδηγεί την ελεγχόμενη διεργασία με σκοπό τον μηδενισμό του σφάλματος και γενικά την βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών του συστήματος.
- 5) **Τροφοδοτική μονάδα (επενεργούν στοιχείο).** Η τροφοδοτική μονάδα παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για τη λειτουργία του συστήματος (π.χ. μονάδα πόλωσης των τρανζίστορ ως ενισχυτών με συνεχή τάση).
- 6) **Μονάδα εξόδου του σήματος (απόδοση).** Από τη μονάδα αυτή λαμβάνεται το σήμα ή τα σήματα για περαιτέρω χρήση (π.χ. ενισχυμένη τάση).
- 7) **Μονάδα ανατροφοδότησης (ανάδραση).** Η μονάδα αυτή παραλαμβάνει από την έξοδο ένα μέρος ή όλο το σήμα. Δομικό διάγραμμα συστήματος αυτομάτου ελέγχου α) ανοικτό β) κλειστό διαμορφώνει κατάλληλα και το επιστρέφει στην είσοδο. Το σήμα ανατροφοδότησης συγκρίνεται με το αρχικό σήμα εισόδου και έτσι επιτυγχάνεται η επιθυμητή τροποποίηση του αρχικού σήματος και συνεπώς η δημιουργία ενός νέου σήματος εισόδου. Η μονάδα αυτή χαρακτηρίζει και τα κλειστά συστήματα.



Εικόνα 4: Βασική δομή ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου.

Οι παραπάνω μονάδες αποτελούν τα βασικά δομικά στοιχεία ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου (Εικόνα 4). Ένα Σ.Α.Ε., πιθανόν να περιλαμβάνει και άλλες μονάδες,

όπως μονάδες για τη μέτρηση και καταγραφή των διαφόρων μεγεθών, αλλά και μονάδες για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

2. Ανάλυση Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου

2.1 Συνάρτηση μεταφοράς

Κατά τη μελέτη των συστημάτων ελέγχου χρησιμοποιούνται συχνά οι συναρτήσεις μεταφοράς που χαρακτηρίζουν τις σχέσεις εισόδου-εξόδου των συστημάτων. Πολλές φορές, για τη μελέτη των Σ.Α.Ε. χρησιμοποιούνται και έννοιες όπως:

- ❖ Μεταβλητή Αναφοράς $X_i(s)$
- ❖ Ελεγχόμενη Μεταβλητή ή $X_0(s)$
- ❖ Συνάρτηση μεταφοράς $G(s)$

Ως μεταβλητή αναφοράς $X_i(s)$, ορίζεται το σήμα εισόδου το οποίο όμως ενδέχεται να είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων, όπως της τάσης του ρεύματος, της ισχύος, της κυκλικής συχνότητας, του χρόνου κλπ. Το σύστημα δηλαδή τροφοδοτείται με πάσης φύσεως πληροφορίες που εμπεριέχονται στη μεταβλητή αναφοράς στην οποία και αναφερόμαστε. Η ελεγχόμενη μεταβλητή $X_0(s)$, ορίζεται ως το σήμα εξόδου του οποίου όμως, η εκάστοτε τιμή ελέγχεται ή καθορίζεται από τη μεταβλητή αναφοράς και τα στοιχεία του Σ.Α.Ε. Η συνάρτηση μεταφοράς $G(s)$, ορίζεται ως η συνάρτηση που εξαρτάται από τις παραμέτρους της εισόδου, της εξόδου και των στοιχείων του Σ.Α.Ε. Με άλλα λόγια, η συνάρτηση μεταφοράς μεταφέρει τις παραμέτρους εισόδου, δηλαδή της μεταβλητής αναφοράς, στην έξοδο και έτσι διαμορφώνει την τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής.

Επιπλέον, η συνάρτηση μεταφοράς είναι μια περιγραφή στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας και ισχύει για μια περιορισμένη κατηγορία συστημάτων και συγκεκριμένα για τα γραμμικά, μη χρονικά μεταβαλλόμενα συστήματα που έχουν μηδενικές αρχικές συνθήκες. Η συνάρτηση μεταφοράς ορίζεται μόνο στη περίπτωση ενός γραμμικού συστήματος με σταθερές παραμέτρους γιατί σε ένα σύστημα μεταβλητών παραμέτρων, το οποίο καλείται συνήθως σύστημα μεταβλητού χρόνου, περιέχει μια ή περισσότερες χρονικά μεταβαλλόμενες μεταβλητές και για τον λόγο αυτόν ενδέχεται να μην ορίζεται ο αντίστοιχος μετασχηματισμός Laplace.

Έτσι, η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος ορίζεται ως ο λόγος μετασχηματισμού Laplace της μεταβλητής που εκφράζει την έξοδο προς τον μετασχηματισμό Laplace της μεταβλητής που εκφράζει την είσοδο, θεωρώντας μηδενικές αρχικές συνθήκες. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος αντιστοιχεί σε μια σχέση με την οποία περιγράφεται η δυναμική του υπό εξέταση συστήματος, επομένως η συνάρτηση μεταφοράς δεν περιέχει καμιά πληροφορία σχετικά με την εσωτερική δομή του συστήματος και της συμπεριφοράς του γενικότερα. Αν θεωρήσουμε το σύστημα του παρακάτω σχήματος:



Τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος θα είναι:

$$G(s) = \frac{\mathcal{L}\{y(t)\}}{\mathcal{L}\{x(t)\}} = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

Η χρήση της συνάρτησης μεταφοράς στην ανάλυση συστημάτων ελέγχου είναι ένα σημαντικό εργαλείο γιατί μας επιτρέπει να ελέγχουμε τη συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος χωρίς να το θέτουμε σε κίνδυνο, αφού μπορούμε να θέσουμε διαφορετικές συναρτήσεις ως εισόδους και με τη βοήθεια της συνάρτησης μεταφοράς να υπολογίζουμε την πιθανή έξοδο με την επίλυση μιας απλής εξίσωσης. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι θέτουμε το σύστημα σε «μαθηματικές μετρήσεις» (μέσω επίλυσης απλών

εξισώσεων, αφού το μόνο ζητούμενο θα είναι η έξοδος του συστήματος) αντί να θέτουμε το σύστημα σε πειραματικές μετρήσεις όπου σε κάποιες περιπτώσεις λανθασμένων διεγέρσεων εισόδου να κινδύνευε το ίδιο το σύστημα. Μπορούμε όταν μας δίνεται η διαφορική εξίσωση ενός συστήματος να βρούμε τη συνάρτηση μεταφοράς του αλλάζοντας, με τη χρήση του μετασχηματισμού Laplace, την εξίσωση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας. Αντιστρόφως όταν μας δίνεται η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος μπορούμε να βρούμε τη διαφορική εξίσωση του συστήματος ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία δηλαδή μετασχηματίζοντας την εξίσωση της συνάρτησης μεταφοράς από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου.

2.2 Δομικά διαγράμματα συστημάτων

Για την περιγραφή συστημάτων συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται τα δομικά διαγράμματα και τα διαγράμματα ροής. Η διαφορά αυτών των δύο μεθόδων εντοπίζεται στο γεγονός ότι τα διαγράμματα ροής αναφέρονται σε συναρτήσεις στο πεδίο του χρόνου ενώ τα δομικά διαγράμματα σε συναρτήσεις μεταφοράς στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας.

Θα προτιμήσουμε τη χρήση των δομικών διαγραμμάτων από τα διαγράμματα ροής επειδή το Simulink του MatLab για τη σχεδίαση των βαθμίδων των συστημάτων χρησιμοποιεί τα δομικά διαγράμματα και επειδή το πεδίο της μιγαδικής συχνότητας παρουσιάζει ευκολία στο χειρισμό των διαγραμμάτων. Σε ένα διάγραμμα βαθμίδων τα βέλη αντιπροσωπεύουν την κατεύθυνση ροής του σήματος. Τα διαγράμματα βαθμίδων συναρτήσεων μεταφοράς είναι μια εικονική αναπαράσταση της σχέσης εισόδου και εξόδου ενός συστήματος και κάθε βαθμίδα χαρακτηρίζεται από μια περιγραφή εισόδου και μια έξοδος όπου και τοποθετούνται αντιστοίχως το σήμα εισόδου και το σήμα εξόδου.

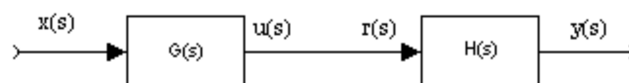
Τα δομικά διαγράμματα περιγράφουν ένα σύστημα εποπτικά και αποτελούν τη σχηματική παράσταση των λειτουργιών των συντελεστών του συστήματος. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των δομικών διαγραμμάτων κατατάσσονται η ευκολία με την οποία καταρτίζονται τα διαγράμματα και οι πληροφορίες που παρέχουν για τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Η μορφή του δομικού διαγράμματος ενός συστήματος

μπορεί να απλουστευθεί ώστε να αποδίδεται με λιγότερες βαθμίδες κάτι που επιτυγχάνεται με την συμπύκνωση των διαδοχικών διασυνδεμένων βαθμίδων σε ισοδύναμα διαγράμματα. Η απλοποίηση του διαγράμματος μας παρουσιάζει με καλύτερο τρόπο τη σχέση μεταξύ της εισόδου, που δρα στο σύστημα αλλά και της εξόδου που απορρέει από αυτό, καθώς και το βαθμό που επιδρούν στην έξοδο τα στοιχεία του συστήματος. Όμως η απλοποίηση συστημάτων έχει ως βασικό μειονέκτημα ότι αποκρύπτει σε ένα βαθμό, εξαιτίας των συμπυκνώσεων που έχουν διενεργηθεί, πληροφορίες για την διασύνδεση επιμέρους στοιχείων του συστήματος. Τέλος τα βασικά βήματα για τη σχεδίαση του διαγράμματος βαθμίδων ενός συστήματος είναι τα εξής:

1. Εντοπισμός των εξισώσεων που περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά των επιμέρους στοιχείων του συστήματος.
2. Υπολογισμός του μετασχηματισμού Laplace των παραπάνω εξισώσεων λαμβάνοντας ως μηδενικές τις αρχικές συνθήκες.
3. Απεικονίζουμε κάθε μία από τις παραπάνω μετασχηματισμένες κατά Laplace εξισώσεις σε μορφή βαθμίδων.
4. Τέλος, συνδυασμός όλων των στοιχείων του συστήματος σε ένα ενιαίο διάγραμμα βαθμίδων.

2.2.1 Δομικά διαγράμματα σειράς

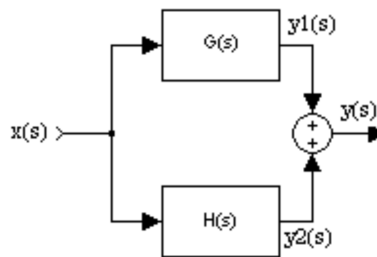
Ανάλογα με τη διασύνδεση των συστημάτων πραγματοποιείται και η ανάλογη απλοποίηση με συγκεκριμένες πράξεις μεταξύ των συναρτήσεων μεταφοράς των συστημάτων και έτσι οι βαθμίδες συμπυκνώνονται σε μια. Στη περίπτωση που έχουμε δύο συστήματα (βαθμίδες) συνδεδεμένα σε σειρά με συναρτήσεις μεταφοράς $G(s)$ και $H(s)$ αντιστοίχως όπως αυτά που παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα:



Τότε μπορούν να απλοποιηθούν σε μία βαθμίδα με συνάρτηση μεταφοράς $F(s) = G(s) * H(s)$. Επομένως αν δύο ή περισσότερες βαθμίδες είναι συνδεδεμένες σε σειρά τότε απλοποιούνται σε μία βαθμίδα με συνάρτηση μεταφοράς το γινόμενο των επιμέρους συναρτήσεων μεταφοράς των βαθμίδων.

2.2.2. Δομικά διαγράμματα παράλληλα

Στην περίπτωση τώρα που τα δύο παραπάνω συστήματα είναι συνδεδεμένα παράλληλα, ομοίως με συναρτήσεις μεταφοράς $G(s)$ και $H(s)$, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Οι δύο βαθμίδες συμπυκνώνονται σε μια βαθμίδα με συνάρτηση μεταφοράς $F(s) = G(s) + H(s)$. Οπότε αν δύο ή περισσότερες βαθμίδες είναι συνδεδεμένες παράλληλα τότε απλοποιούνται σε μία βαθμίδα με συνάρτηση μεταφοράς το άθροισμα ή τη διαφορά (ανάλογα με τα πρόσημα στο σημείο άθροισης) των επιμέρους συναρτήσεων μεταφοράς των βαθμίδων.

2.3 Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου ανοικτού και κλειστού βρόχου

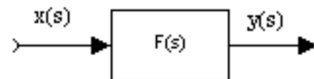
Σε ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου το σήμα εισόδου δίνεται στο σύστημα από ένα «πρόσθετο σύστημα» που το ονομάζουμε αντισταθμιστή ή ρυθμιστή ή ελεγκτή. Στα ανοικτά συστήματα ο αντισταθμιστής είναι κατασκευασμένος ώστε το σήμα που παράγει και τροφοδοτεί το σύστημα να αποτελεί την κατάλληλη διέγερση για να αποφέρει την επιθυμητή έξοδο του συστήματος. Στα κλειστά συστήματα ο αντισταθμιστής διεγείρεται και από την έξοδο του συστήματος οπότε το σήμα που παράγει ο αντισταθμιστής και διεγείρει το σύστημα επηρεάζεται αποφασιστικά από την έξοδο του ίδιου του συστήματος. Με απλά λόγια θα μπορούσαμε να ορίσουμε πως ανοικτό σύστημα είναι

ένα σύστημα που η είσοδος δεν είναι συνάρτηση της εξόδου και κλειστό σύστημα είναι ένα σύστημα που η είσοδος είναι συνάρτηση της εξόδου.

Τα κλειστά συστήματα διαφέρουν από τα ανοικτά συστήματα στην αρχή λειτουργίας τους και η διαφορά αυτή οφείλεται στη λήψη πληροφοριών από την έξοδο στην είσοδο του συστήματος. Επειδή η επιθυμητή απόκριση ενός συστήματος κλειστού βρόγχου είναι γνωστή η έξοδος της ελεγχόμενης διαδικασίας παρακολουθείται, η μέτρηση της οποίας χρησιμοποιείται ως σήμα ανάδρασης στο σύστημα ελέγχου όπου και συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή της εξόδου. Στη συνέχεια το σήμα σφάλματος που υπολογίζεται αξιοποιείται κατάλληλα από τον ελεγκτή με σκοπό να μειωθεί ώστε η διαδικασία να οδηγηθεί προς το επιθυμητή τιμή εξόδου και παράγεται ένα σήμα το οποίο αντιστοιχεί στο σφάλμα-διαφορά που εμφανίζεται μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής μετρούμενης απόκρισης του συστήματος. Η χρήση αυτού του σήματος για τον έλεγχο όλης της διεργασίας έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας σειράς λειτουργιών μέσα στο κλειστό βρόγχο, η σειρά λειτουργιών αυτή ονομάζεται σύστημα ελέγχου με ανάδραση ή σύστημα αυτόματου ελέγχου κλειστού βρόγχου και διαδραματίζει βασικό ρόλο στα συστήματα αυτόματου ελέγχου. Στην επιθυμητή τιμή εξόδου της διαδικασίας η έξοδος ταυτίζεται με την επιθυμητή έξοδο αναφοράς και το σφάλμα είναι μηδενικό, κάτι που σημαίνει ότι με τη χρήση κλειστού βρόγχου με ανάδραση η συμπεριφορά ενός συστήματος βελτιώνεται με τη χρήση ανάδρασης.

Τα κλειστά συστήματα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις αυτοματισμού είναι μεγάλες ενώ τα ανοικτά συστήματα χρησιμοποιούνται σε απλές περιπτώσεις αυτοματισμού. Για τον παραπάνω λόγο τα κλειστά συστήματα είναι πιο πολύπλοκα στη σχεδίαση και στην υλοποίηση από τα ανοικτά. Τα ανοικτά που είναι λιγότερα πολύπλοκα έχουν χαμηλότερο κόστος, δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα ευστάθειας σε αντίθεση με τα κλειστά. Για τα ανοικτά συστήματα η ακρίβεια που πετυχαίνουν στον έλεγχο της διεργασίας εξαρτάται από το κατά πόσο είναι γνωστή η συμπεριφορά της διεργασίας για δεδομένο σήμα εισόδου ενώ τα κλειστά έχουν υψηλό βαθμός ακρίβειας ακόμα και με περιορισμένη γνώση των παραμέτρων της διεργασίας. Τυχόν διαταραχές και μεταβολές της ακρίβειας των στοιχείων ενός ανοιχτού συστήματος συνεπάγονται με εκτροπή της εξόδου από την επιθυμητή απόκριση ενώ τα κλειστά μπορούν να αντεπεξέλθουν σε εξωτερικές διαταραχές και σε μεταβολές των παραμέτρων

της ελεγχόμενης διεργασίας. Αντιλαμβανόμαστε ότι τα κλειστά συστήματα υπερτερούν των ανοικτών συστημάτων και για αυτό χρησιμοποιούνται περισσότερο στη πράξη. Ένα σύστημα ανοικτού βρόγχου που λειτουργεί χωρίς ανάδραση και παράγει απευθείας σήμα εξόδου ως απόκριση του συστήματος σε συγκεκριμένο σήμα εισόδου, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Ένα σύστημα κλειστού βρόγχου που λαμβάνει ένα δείγμα του σήματος εξόδου το οποίο συγκρίνεται συνεχώς με την επιθυμητή έξοδο έτσι ώστε να παράγεται ένα σήμα σφάλματος που εφαρμόζεται ως σήμα εισόδου, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



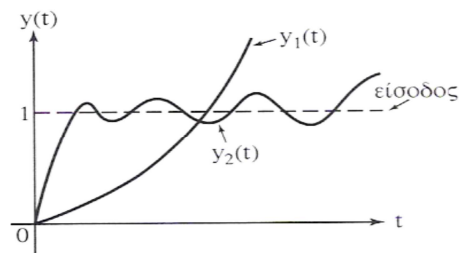
Το παραπάνω σύστημα αν θέλουμε να το απλοποιήσουμε σε μια βαθμίδα τότε η νέα βαθμίδα θα έχει συνάρτηση μεταφοράς. Το σύστημα αυτό ονομάζεται και σύστημα μοναδιαίας ανάδρασης αφού η ανάδραση που έχουμε είναι ίση με τη μονάδα.

2.4. Ευστάθεια Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου

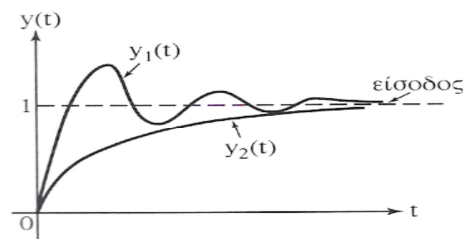
Ένα από τα χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτόματου ελέγχου που διαδραματίζουν το βασικότερο ρόλο στη συμπεριφορά τους είναι η ευστάθεια, γι' αυτό κατά τη σχεδίαση ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου επιδιώκεται πρώτα και πάνω από όλα η εξασφάλιση της ευστάθειας. Μετά την εξασφάλιση της ευστάθειας του συστήματος επιδιώκεται η ικανοποίηση άλλων απαιτήσεων σχεδίασης όπως η ταχύτητα, η ακρίβεια απόκρισης, το εύρος ζώνης, το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση κ.λπ. Ένα σύστημα είναι ευσταθές αν για πεπερασμένη είσοδο παρουσιάζει πεπερασμένη απόκριση. Αντιθέτως, ένα σύστημα ονομάζεται ασταθές αν έστω και για μια

πεπερασμένη είσοδο δεν παρουσιάζει πεπερασμένη απόκριση. Ένα ασταθές σύστημα κλειστού βρόγχου δεν παρουσιάζει πρακτικά ενδιαφέρον γιατί η έξοδος ενός ασταθούς συστήματος αυξάνει θεωρητικά προς το άπειρο σε αντίθεση με ένα ευσταθές σύστημα κλειστού βρόγχου όπου η έξοδος του βρίσκεται μέσα σε επιτρεπτά όρια. Για το λόγο αυτό αναζητούμε μεθόδους οι οποίες μας βοηθούν να αναλύουμε και να σχεδιάζουμε ευσταθή συστήματα.

Η απόκριση ενός ασταθούς συστήματος είναι της μορφής:



Η απόκριση ενός ευσταθούς συστήματος είναι της μορφής:



3. Ελεγκτές Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου

Στα συστήματα αυτόματου ελέγχου χρησιμοποιούμε συνδεσμολογίες ελεγκτών οι οποίοι αποσκοπούν στη βελτίωση των χαρακτηριστικών του συστήματος που μελετάμε. Με τη χρήση ελεγκτών μπορούμε να πετύχουμε καλύτερες επιδόσεις του συστήματος

δηλαδή να γίνει το σύστημα πιο γρήγορο, πιο ακριβές, πιο ευσταθές, να μην επηρεάζεται από τυχόν διαταραχές κ.λπ.

Συνοψίζοντας, ελεγκτές είναι τα κύρια στοιχεία που ελέγχουν και καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας των διάφορων ενεργειακών συστημάτων ανάλογα με τις παραμέτρους που παίρνουν, έτσι ώστε η μεταβλητή που παίρνουμε στην έξοδο τους να είναι μέσα στην επιθυμητή για μας τιμή. Η κύρια δουλειά του κάθε ελεγκτή είναι να μας κρατεί την έξοδο σε επιθυμητή τιμή ανεξαρτήτως από της όποιες ανωμαλίες προκύπτουν στην διαδικασία. Αν και είναι συχνά πολύ δύσκολο να το πετύχουμε αυτό, μπορούμε να έχουμε πολύ καλά αποτελέσματα με την ανατροφοδότηση της εξόδου της διαδικασίας.

Ο ελεγκτής αποτελείται από έναν ανιχνευτή λάθους και μια μονάδα τρόπου ελέγχου. Ο ανιχνευτής λάθους υπολογίζει το λάθος αφαιρώντας την μετρούμενη μεταβλητή (cm) από το setpoint (SP)(σημείο εκκίνησης). Η μονάδα ελέγχου χρησιμοποιεί το σήμα λάθους για να παραγάγει τη δράση ελέγχου (v). Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός ελεγκτή είναι ο τρόπος που χρησιμοποιεί το λάθος για να διαμορφώσει τη δράση ελέγχου. Οι διαφορετικοί τρόποι που ο ελεγκτής διαμορφώνει τη δράση ελέγχου καλούνται τρόποι ελέγχου.

Έτσι λοιπόν, ο ελεγκτής μπορεί να εφαρμοστεί από τα πνευματικά κυκλώματα, αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα, ή ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα. Οι πνευματικοί ελεγκτές χρησιμοποιούν ένα πνευματικό αντίτιμο του λειτουργικού ενισχυτή για να παραγάγουν τη δράση ελέγχου. Οι ηλεκτρονικοί αναλογικοί ελεγκτές χρησιμοποιούν ένα ανθεκτικό κύκλωμα για να υπολογίσουν το λάθος και έναν λειτουργικό ενισχυτή για να παραγάγουν τη δράση ελέγχου. Οι ψηφιακοί ελεγκτές χρησιμοποιούν έναν μικροεπεξεργαστή και έναν αλγόριθμο ελέγχου για να παραγάγουν τη δράση ελέγχου.

3.1 Ταξινόμηση Ελεγκτών

Σύμφωνα με το κανονισμό DIN (19225), οι ελεγκτές μπορούν να διακριθούν

α) Ανάλογα με το είδος της ελεγχόμενης μεταβλητής σε:

- Ελεγκτές θερμοκρασίας

- Ελεγκτές ροής
- Ελεγκτές στροφών
- Ελεγκτές θέσης κτλ.

β) Ανάλογα με τον τρόπο μεταβολής της επιθυμητής τιμής σε:

- Ελεγκτές σταθερής επιθυμητής τιμής. Στους ελεγκτές αυτούς η επιθυμητή τιμή είναι σταθερή.
- Ελεγκτές ακολουθίας, όπου η επιθυμητή τιμή αλλάζει σε σχέση με το χρόνο.
- Ελεγκτές με χρονικά μεταβαλλόμενη επιθυμητή τιμή, όπου η επιθυμητή τιμή μεταβάλλεται με βάση ένα προκαθορισμένο πρόγραμμα.

γ) Ανάλογα με τη μεταβολή του σήματος εξόδου σε:

- Συνεχείς ελεγκτές
- Περιοδικούς ελεγκτές: ελεγκτές δυο και τριών θέσεων
- Δειγματοληπτικούς ελεγκτές

δ) Ανάλογα με τη βηματική χρονική τους απόκριση

- Αναλογικούς ελεγκτές (ελεγκτής-P)
- Ολοκληρωτικούς ελεγκτές (ελεγκτής-I)
- Διαφορικούς ελεγκτές(ελεγκτής-D)
- Αναλογικούς / Ολοκληρωτικούς ελεγκτές (ελεγκτής-PI)
- Αναλογικούς / Διαφορικούς ελεγκτές (ελεγκτής-PD)
- Αναλογικούς / Ολοκληρωτικούς/Διαφορικούς ελεγκτές (ελεγκτής-PID)

ε) Ανάλογα με τη μορφή του σήματος εξόδου σε:

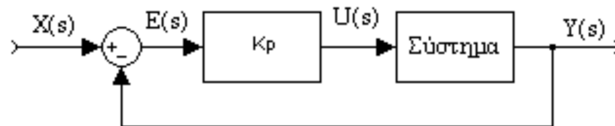
- Αναλογικούς και
- Ψηφιακούς ελεγκτές

στ) Ανάλογα με το είδος της ενέργειας τροφοδοσίας (βοηθητική τροφοδοσία) σε:

- Ελεγκτές χωρίς βοηθητική ενέργεια
- Ελεγκτές με βοηθητική ενέργεια

3.2. Αναλογικός ελεγκτής (PROPORTIONAL-P)

Ο αναλογικός ελεγκτής (Proportional Control) δίνει στην έξοδο του σήμα ανάλογο του σφάλματος που δέχεται στην είσοδο και στην ουσία πρόκειται για μια διάταξη ενίσχυσης του σήματος σφάλματος με κέρδος K_p . Ο αναλογικός ελεγκτής έχει την μορφή που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Είναι φανερό από το σχήμα ότι η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι:

$$P_{(s)} = K_p$$

Ο αναλογικός ελεγκτής αυξάνει την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος, αλλά πιθανόν να δημιουργεί σφάλμα μόνιμης κατάστασης αναλόγως τον τύπο του συστήματος, ενώ για μηδενικό σφάλμα όπως είναι λογικό θα έχει και μηδενική έξοδο.

Ο αναλογικός ελεγκτής P βοηθά στη βελτίωση της συμπεριφοράς των συστημάτων στην μεταβατική αλλά και στη μόνιμη κατάσταση. Από μόνος του όμως δεν μπορεί να αντιμετωπίσει όλες τις πιθανές διαταραχές που μπορούν να συμβούν σε ένα σύστημα και για αυτό απαιτείται ο συνδυασμός του με τους άλλους ελεγκτές. Η χρησιμοποίηση ενός αναλογικού ελεγκτή (P) έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του χρόνου ανύψωσης (κάνει το σύστημα πιο γρήγορο) αλλά δεν μπορεί ποτέ να εξαλείψει το μόνιμο σφάλμα. Ο αναλογικός έλεγχος είναι πολύ διαδεδομένος τόσο στην βιομηχανία όσο και στην ρομποτική, πιθανόν λόγω απλής κατασκευής αλλά και χαμηλού κόστους.

Σε περίπτωση που το σύστημα είναι 1^{ης} τάξης με συνάρτηση μεταφοράς $G_{(s)} = \frac{1}{s+A}$ τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου με P-ελεγκτή είναι:

$$G_{c(s)} = \frac{\frac{K_p}{s+A}}{1 + \frac{K_p}{s+A}} \leftrightarrow G_{c(s)} = \frac{K_p}{s+A+K_p}$$

Επομένως αν διεγείραμε το σύστημα με σήμα εισόδου μοναδιαία βηματική θα βρίσκαμε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης από τη σχέση:

$$G_c(s) = \frac{\frac{K_p}{s^2 + s * A + B}}{1 + \frac{K_p}{s^2 + s * A + B}} \leftrightarrow G_c(s) = \frac{K_p}{s^2 + s * A + B + K_p}$$

Συμπεραίνουμε ότι το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μειώνεται όσο αυξάνουμε το κέρδος του αναλογικού ελεγκτή, όμως στη πράξη δεν γίνεται να αυξήσουμε απεριόριστα το κέρδος.

Στη περίπτωση τώρα που το σύστημα είναι 2^{ης} τάξης με συνάρτηση μεταφοράς $G(s) = \frac{1}{s^2 + s * A + B}$, τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόγχου με P-ελεγκτή είναι:

Ομοίως αν διεγείραμε το σύστημα με σήμα εισόδου μοναδιαία βηματική θα βρίσκαμε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης από τη σχέση:

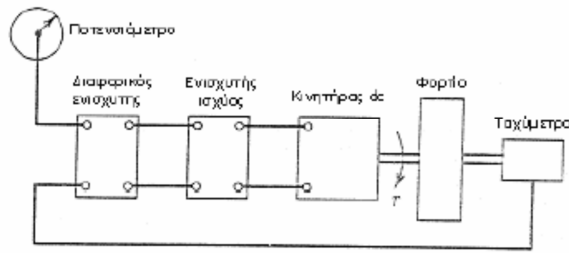
$$e_{ss} = 1 - \lim_{s \rightarrow 0} \left(s * G_c(s) * \frac{1}{s} \right) = 1 - \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_p}{s^2 + s * A + B + K_p} \leftrightarrow e_{ss} = 1 - \frac{K_p}{B + K_p}$$

Επομένως και στο σύστημα 2^{ης} τάξης η χρήση P-ελεγκτή μειώνει το σφάλμα όσο αυξάνεται το κέρδος του ελεγκτή και αυξάνεται και η φυσική συχνότητα του συστήματος $\omega_n (= \sqrt{B + K_p})$ ενώ χωρίς τον ελεγκτή $\omega_n = \sqrt{B}$ κάτι που προσδίδει στο σύστημα ταχύτερη απόκριση. Στο σύστημα με αναλογικό ελεγκτή το A ισούται με $A = 2 * \zeta * \omega_n$ ομοίως με το σύστημα χωρίς ελεγκτή και παραμένει σταθερό με τη διαφορά όμως ότι αυξάνεται η φυσική συχνότητα του συστήματος ενώ μειώνεται ο συντελεστής απόσβεσης ζ του συστήματος κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της υπερύψωσης στη βηματική απόκριση του συστήματος.

Ένας αναλογικός ελεγκτής αντιδρά άμεσα στην ύπαρξη σφάλματος επιτυγχάνει μείωση του σφάλματος μόνιμης κατάστασης όμως αδυνατεί να το εξαλείψει τελείως αφού για μέγιστη μείωση του σφάλματος χρειάζονται μη ρεαλιστικές υψηλές τιμές κέρδους, αυξάνει την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος αλλά δημιουργεί σημαντική υπερύψωση και ταλαντώσεις με την αύξηση του κέρδους K_p .

3.2.1 Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος πρώτης τάξης

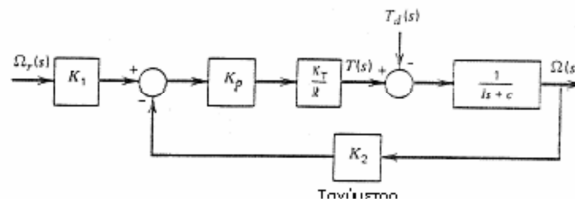
Η συμπεριφορά του αναλογικού ελέγχου, μπορεί να προσδιορισθεί από το σύστημα ελέγχου ταχύτητας όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 5.



Εικόνα 5: Ταχύτητα ενός συστήματος ελέγχου που χρησιμοποιεί ένα dc κινητήρα

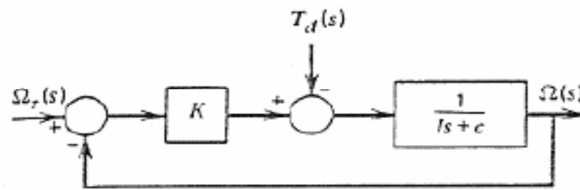
Ένας γραμμικός διαφορικός ενισχυτής παράγει μια έξοδο ανάλογη προς τη διαφορά μεταξύ των τάσεων εισόδου. Εάν ο ενισχυτής ισχύος είναι επίσης γραμμικός, μπορούμε να συνδυάσουμε τα κέρδη τους σε ένα, δείχνοντας το K_p . Το σύστημα φαίνεται έτσι να έχει τον ανάλογο έλεγχο στον οποίο η τάση των κινητήρων είναι ανάλογη προς τη διαφορά μεταξύ της τάσης εντολής και της τάσης ανάδρασης από το ταχύμετρο.

Υποθέτουμε ότι ο κινητήρας είναι ένας τομέας ελέγχου με μια αμελητέα ηλεκτρική χρονική σταθερά. Η διαταραχή είναι μια ροπή T_d , π.χ. ως αποτέλεσμα της τριβής. Επιλέγουμε τον όρο ισορροπίας αναφοράς να είναι $T_d = T = 0$ και $\omega_r = \omega = 0$. Το Block διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικόνα 6.



Εικόνα 6: Μπλοκ διάγραμμα της ταχύτητας του συστήματος ελέγχου

Ένα σημαντικό σήμα σφάλματος που παράγεται, τα K_1 και K_2 πρέπει να είναι ίσα. Με αυτήν την απλοποίηση, το διάγραμμα γίνεται σε αυτό που παρουσιάζεται στην εικόνα 7 όπου $K = K_1 K_p K_T / R$.



Εικόνα 7: απλουστευμένη μορφή της εικόνας 6

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι :

$$\Omega(s)/\Omega_r(s) = K / Is + c + K \quad (1)$$

$$\Omega(s)/T_d(s) = -1 / Is + c + K \quad (2)$$

Μια αλλαγή στην επιθυμητή ταχύτητα μπορεί να πραγματοποιηθεί από ένα βήμα που εισάγεται στο ω_r . Η γραμμικότητα επιτρέπει σε μας να χρησιμοποιήσουμε ένα μοναδιαίο βήμα και να τοποθετήσουμε τα αποτελέσματα αναλόγως. Για $\Omega_r(s) = 1/s$, έχουμε $\Omega(s) = K / Is + c + K 1/s$. Η απόκριση μπορεί να υπολογιστεί από τη μερική επέκταση κλάσματος όπως πριν. Η ταχύτητα πλησιάζει την τιμή της σταθερής κατάστασης $\Omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s K/Is + c + K 1/s = K/c + K < 1$ όπου $s \rightarrow 0$.

Κατά συνέπεια, η τελική αξία είναι μικρότερη από την επιθυμητή αξία 1, αλλά μπορεί να είναι αρκετά κοντά εάν η απόσβεση c είναι μικρή. Ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει σε αυτήν την τιμή είναι περίπου τέσσερις χρονικές σταθερές, ή $4\tau = 4I / (c + K)$. Μια ξαφνική αλλαγή στη ροπή φορτίων μπορεί επίσης να διαμορφωθεί από μια συνάρτηση μοναδιαίου βήματος $T_d(s) = 1/s$. Η απόκριση που οφείλεται απλώς στη διαταραχή βρίσκεται από την παρακάτω σχέση $\Omega(s) = -1/Is + c + K 1/s$.

Η επίδραση της σταθερής κατάστασης της διαταραχής βρίσκεται με το θεώρημα τελικής τιμής και είναι $-1/(c + K)$. Εάν $(c + K)$ είναι μεγάλο, τότε το σφάλμα θα είναι μικρό. Η απόδοση του ανάλογου νόμου ελέγχου μπορεί επίσης να συνοψιστεί ως εξής.

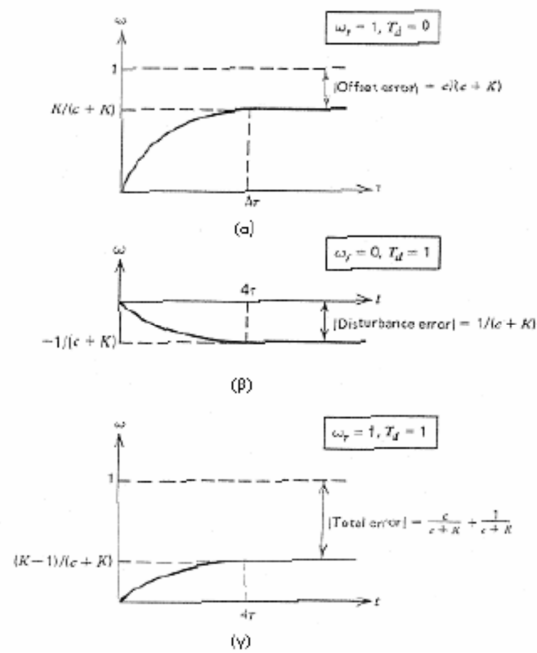
Για ένα σύστημα πρώτης τάξης του οποίου οι είσοδοι είναι οι βηματικές συναρτήσεις

1) Η έξοδος δεν φθάνει ποτέ στην επιθυμητή τιμή της, ακόμη και απουσία μιας διαταραχής εάν η αντίσταση είναι $(c \neq 0)$, αν και μπορεί να προσεγγιστεί με την επιλογή ενός αρκετά μεγάλου κέρδους K .

2) Η έξοδος πλησιάζει την τελική τιμή της χωρίς ταλάντωση. Ο χρόνος για να επιτευχθεί αυτή η τιμή είναι αντιστρόφως ανάλογος προς το K .

3) Το σφάλμα εξόδου λόγω της διαταραχής της σταθερής κατάστασης είναι αντιστρόφως ανάλογο προς το κέρδος K . Αυτό το σφάλμα είναι παρόν ακόμη και απουσία της αντίστασης ($c=0$).

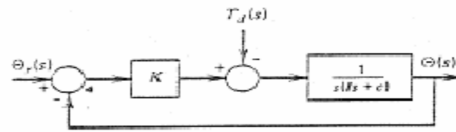
❖ Τύποι σφαλμάτων σε ένα σύστημα αναλογικού ελέγχου πρώτης τάξης



Ένα πλεονέκτημα στον αναλογικό έλεγχο είναι ότι το σήμα ελέγχου αποκρίνεται στο σφάλμα στιγμιαία (θεωρητικά τουλάχιστον). Χρησιμοποιείται στις εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη δράση. Οι διαδικασίες με χρονικές σταθερές πολύ μικρές για τη χρήση του ελέγχου των δύο θέσεων είναι πιθανοί υποψήφιοι για τον αναλογικό έλεγχο.

3.2.2 Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης

Ο αναλογικός έλεγχος μιας ουδέτερης σταθερής εγκατάστασης δεύτερου βαθμού αντιπροσωπεύεται από τον ελεγκτή θέσης στην εικόνα 8, εάν η συνάρτηση μεταφοράς του κινητήρα είναι μια σταθερά $G_a(s) = K_a$. Η συνάρτηση μεταφοράς του κινητήρα είναι $G_m(s) = K_T/R$ όπως πριν.



Εικόνα 8: Μπλοκ διάγραμμα ενός σερβομηχανισμού θέσης με αναλογικό έλεγχο

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι :

$$\Theta(s)/\Theta_r(s) = K / Is^2 + cs + K \quad (1)$$

$$\Theta(s)/T_d(s) = -1 / Is^2 +cs + K \quad (2)$$

Το σύστημα κλειστού βρόγχου είναι σταθερό εάν I , c και K είναι θετικοί. Για καμία απόσβεση ($c = 0$), το κλειστό σύστημα βρόχων είναι σταθερό. Χωρίς τη διαταραχή και μια εντολή μοναδιαίου βήματος, $\Theta_r(s) = 1/s$, η έξοδος σταθερής κατάστασης είναι $\theta_{ss} = K/K = 1$.

Το offset είναι μηδέν εάν το σύστημα είναι σταθερό ($c > 0$, $K > 0$). Η απόκλιση της εξόδου λόγω μιας διαταραχής μοναδιαίου βήματος είναι $-1/K$. Αυτή η απόκλιση μπορεί να μειωθεί με την επιλογή του μεγαλύτερου K . Σημειώνεται ότι το λάθος offset για τον αναλογικό έλεγχο ενός συστήματος δεύτερης τάξης δεν είναι πάντα μηδέν. Η παροδική συμπεριφορά υποδεικνύεται από την αναλογία απόσβεσης. $\zeta = c / 2\sqrt{IK}$ Για τη μικρή απόσβεση, η απόκριση σε μια βηματική εισαγωγή θα είναι πολύ ταλαντωμένη και πολύ υπερυψωμένη. Η κατάσταση επιδεινώνεται εάν το κέρδος K γίνει μεγάλο για να μειώσει την απόκριση λόγω της διαταραχής. Το σφάλμα σταθερής κατάστασης αυτού του συστήματος για μια μοναδιαία είσοδο κεκλιμένων ραμπών είναι $ess = c/K$. Κατά συνέπεια, εάν το c είναι μεγάλο, το σύστημα δεν είναι πολύ ταλαντωμένο, αλλά το σφάλμα των κεκλιμένων ραμπών είναι μεγάλο. Για μια διαταραχή κεκλιμένων ραμπών, $ess = \infty$. Καταλήγουμε επομένως ότι ο αναλογικός έλεγχος αυτού του τύπου της δεύτερης τάξης των εγκαταστάσεων δεν είναι μια καλή επιλογή.

3.3 Ολοκληρωτικός ελεγκτής (Integral-I)

Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής (Integral Control) πήρε αυτή την ονομασία επειδή δίνει στην έξοδο του σήμα ανάλογο του ολοκληρώματος του σφάλματος που δέχεται στην είσοδο. Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής περιέχει και μια παράμετρο την K_i η οποία έχει μονάδα μέτρησης το sec^{-1} και ονομάζεται συντελεστής ολοκλήρωσης. Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής έχει την μορφή που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής εισάγει στο σύστημα ένα πόλο και είναι φανερό από το σχήμα ότι η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι:

$$I(s) = \frac{K_i}{s}$$

Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής για βηματική διέγερση απαιτεί κάποιο χρονικό διάστημα για να «πιάσει» την είσοδο δηλαδή η έξοδος του έχει μορφή αναρρίχησης και όταν το σφάλμα μηδενίζεται η έξοδος του ελεγκτή παραμένει σταθερή. Σε περίπτωση που το σύστημα είναι $1^{\text{ης}}$ τάξης με συνάρτηση μεταφοράς $G(s) = \frac{1}{s+A}$ τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου με I ελεγκτή είναι:

$$G_{c(s)} = \frac{\frac{K_i}{s * (s + A)}}{1 + \frac{K_i}{s * (s + A)}} \leftrightarrow G_{c(s)} = \frac{K_i}{s * (s + A) + K_i} \leftrightarrow G_{c(s)} = \frac{K_i}{s^2 + A * s + K_i}$$

Επομένως αν διεγείραμε το σύστημα με σήμα εισόδου μοναδιαία βηματική θα βρίσκαμε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης από τη σχέση:

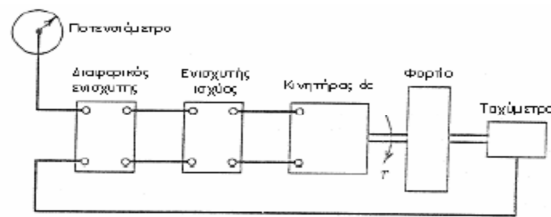
$$e_{ss} = 1 - \lim_{s \rightarrow 0} \left(s * G_{c(s)} * \frac{1}{s} \right) = 1 - \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_i}{s^2 + A * s + K_i} \leftrightarrow e_{ss} = 1 - \frac{K_i}{K_i} \leftrightarrow e_{ss} = 0$$

Άρα το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μηδενίζεται με τη χρήση ολοκληρωτικού ελεγκτή. Παρατηρούμε ότι το σύστημα με τη χρήση του ολοκληρωτικού ελεγκτή από $1^{\text{ης}}$ τάξης μετατράπηκε σε $2^{\text{ης}}$ τάξης, όπου η τιμή του συντελεστή ολοκλήρωσης είναι ίδια με της φυσικής συχνότητας του συστήματος. Όσο αυξάνεται ο συντελεστής ολοκλήρωσης αυξάνεται η φυσική συχνότητα του συστήματος άρα έχουμε ταχύτερη απόκριση του συστήματος και μειώνεται ο συντελεστής απόσβεσης, αφού το γινόμενο $2 * \zeta * \omega_n$ παραμένει σταθερό και ίσο με A , με συνέπεια την αύξηση της υπερύψωσης στη βηματική απόκριση του συστήματος. Ένας ολοκληρωτικός ελεγκτής εξαλείφει το

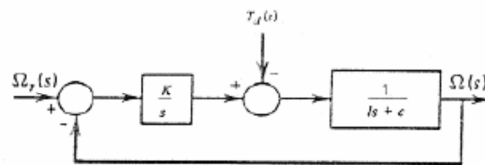
σφάλμα μόνιμης κατάστασης για σταθερή είσοδο αναφοράς και επιπλέον αντιμετωπίζει με επιτυχία αποκλίσεις από πιθανό διαταραχές του συστήματος.

3.3.1 Ολοκληρωτικός έλεγχος ενός συστήματος πρώτης τάξης

Ο ολοκληρωτικός έλεγχος της ταχύτητας παρουσιάζεται στο παρακάτω σύστημα



Το μπλοκ διάγραμμα του παραπάνω σχήματος είναι



Εικόνα 9: Διάγραμμα της ταχύτητας ενός συστήματος με ολοκληρωτικό έλεγχο

$$\text{όπου } K = K_1 K_2 K_T / R.$$

Οι συναρτήσεις μεταφοράς για το σύστημα κλειστού βρόχων είναι:

$$\Omega(s)/\Omega_r(s) = K / (s^2 + cs + K) \quad (1)$$

$$\Omega(s)/T_d(s) = -s / (s^2 + cs + K) \quad (2)$$

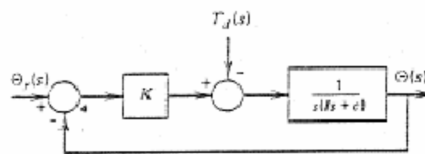
Το σύστημα ελέγχου είναι σταθερό για τα I , c , και K θετικά. Για μια μοναδιαία είσοδο, $\omega_{ss} = K/K = 1$, έτσι το σφάλμα μετατόπισης είναι μηδέν. Για μια διαταραχή μοναδιαίου βήματος η απόκλιση σταθερής κατάστασης είναι μηδέν εάν το σύστημα είναι σταθερό. Η

απόδοση σταθερής κατάστασης που χρησιμοποιεί τον ολοκληρωτικό έλεγχο είναι άριστη για αυτές τις εγκαταστάσεις με βηματικές εισόδους. Η αναλογία απόσβεσης είναι : $\zeta = c / 2\sqrt{IK}$.

Για τη μικρή απόσβεση, η απόκριση θα είναι ταλαντευόμενη και όχι εκθετική όπως με τον αναλογικό έλεγχο. Η βελτιωμένη απόδοση σταθερής κατάστασης έχει ληφθεί εις βάρος της υποβιβασμένης μεταβατικής απόδοσης. Η σύγκρουση μεταξύ της σταθερής κατάστασης και των παροδικών προδιαγραφών είναι ένα κοινό θέμα στο σχεδιασμό των συστημάτων ελέγχου. Εφ' όσον το σύστημα είναι underdamped, η χρονική σταθερά είναι $\tau = 2I/c$ και δεν είναι επηρεασμένη από το κέρδος K , όπου επηρεάζει μόνο τη συχνότητα ταλάντωσης σε αυτήν την περίπτωση. Μπορεί να είναι φυσικά δυνατό να γίνει το K αρκετά μικρό έτσι ώστε $\zeta \geq 1$, αλλά η απόκριση θα τείνει να είναι αργή. Οι παροδικές προδιαγραφές για τη γρήγορη απόκριση απαιτούν συχνά $\zeta < 1$. Η δυσκολία με το $\zeta < 1$ είναι ότι το τ καθορίζεται από το c και το I . Εάν c και I είναι τέτοια έτσι ώστε $\zeta < 1$, τότε το τ είναι μεγάλο εάν $I \gg c$.

3.3.2 Ολοκληρωτικός έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης

Ο αναλογικός έλεγχος της θέσης του σερβομηχανισμού στο παρακάτω σχήμα και δίνει μια διαφορετική από τη μηδενική απόκλιση της σταθερής κατάστασης λόγω της διαταραχής.



Ο ολοκληρωτικός έλεγχος που εφαρμόζεται σε αυτό το σύστημα έχει τις ακόλουθες συναρτήσεις μεταφοράς:

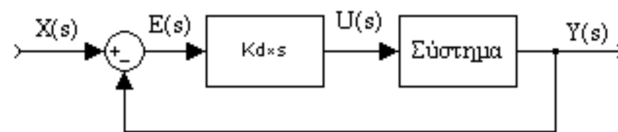
$$\Theta(s)/\Theta_r(s) = K / (s^2 + cs + K) \quad (1)$$

$$\Theta(s)/T_d(s) = -s / (s^2 + cs + K) \quad (2)$$

Με το κριτήριο Routh, αμέσως βλέπουμε ότι το σύστημα δεν είναι σταθερό λόγω του ελλείποντος όρου s . Κατά συνέπεια, το θεώρημα τελικής τιμής δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Ο ολοκληρωτικός έλεγχος είναι χρήσιμος στη βελτίωση της απόδοσης της σταθερής κατάστασης, αλλά γενικά το τ δεν βελτιώνει και μπορεί ακόμη και να υποβιβάσει την μεταβατική απόδοση. Εσφαλμένα εφαρμοσμένο, μπορεί να παραγάγει ένα ασταθές σύστημα ελέγχου. Χρησιμοποιείται καλύτερα από κοινού με άλλους τρόπους ελέγχου.

3.4 Διαφορικός ελεγκτής (Differential-D)

Ο διαφορικός ελεγκτής (Differential Control) όταν το σήμα του σφάλματος στην είσοδο του έχει τη μορφή βηματικής διέγερσης τότε η έξοδος του ελεγκτή είναι η κρουστική συνάρτηση με θεωρητικά άπειρο πλάτος για $t=0$. Όταν το σφάλμα είναι σταθερό τότε η έξοδος του διαφορικού ελεγκτή είναι μηδέν.



Ο διαφορικός ελεγκτής εισάγει στο σύστημα ένα μηδενικό και η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι:

$$D(s) = K_d * s$$

Ο διαφορικός ελεγκτής περιορίζει το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση κατά το στάδιο της μεταβατικής απόκρισης των συστημάτων όμως στη πράξη δεν χρησιμοποιείται ποτέ αποκλειστικά διαφορικός ελεγκτής.

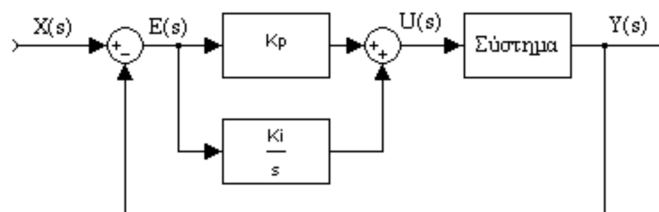
Το κύριο χαρακτηριστικό του διαφορικού ελέγχου είναι ότι μπορεί να αντιληφτεί τις απότομες αλλαγές του σφάλματος, οι οποίες συνήθως προέρχονται από εξωτερικές πηγές (διαταραχές, θόρυβος κτλ) και προκαλούν αστάθεια στο σύστημα μας. Όπως είπαμε η δουλειά του διαφορικού ελεγκτή είναι να αντιδρά στις απότομες αλλαγές του συστήματος. Ο διαφορικός τρόπος ελέγχου αλλάζει την έξοδο του αναλογικού ελεγκτή

προς το ποσοστό αλλαγής του σήματος λάθους. Αυτή η αλλαγή μπορεί να προκληθεί από μια παραλλαγή στη μετρούμενη μεταβλητή, στο setpoint (σημείο εκκίνησης). ή και στα δύο. Ο διαφορικός τρόπος είναι μια προσπάθεια να προβλεπτή ένα λάθος παρατηρώντας πόσο γρήγορα το σφάλμα αλλάζει, και χρησιμοποιώντας το ποσοστό αλλαγής για να παραγάγει μια δράση ελέγχου που θα μειώσει το αναμενόμενο σφάλμα.

Ο διαφορικός τρόπος συμβάλλει στην έξοδο του ελεγκτή μόνο όταν το σφάλμα αλλάζει. Για αυτόν τον λόγο, ο διαφορικός τρόπος ελέγχου χρησιμοποιείται πάντα σε συνδυασμό με τον αναλογικό, αναλογικός συν ολοκληρωτικός.

3.5 Αναλογικός – Ολοκληρωτικός (PI) ελεγκτής

Ο αναλογικός – ολοκληρωτικός ελεγκτής συνδυάζει αθροιστικά τον αναλογικό και τον ολοκληρωτικό έλεγχο. Η συνδεσμολογία του αναλογικού – ολοκληρωτικού ελέγχου είναι η συνδεσμολογία του παρακάτω σχήματος.



Ο αναλογικός – ολοκληρωτικός ελεγκτής εισάγει ένα πόλο στο μηδέν και ένα μηδενικό - $\frac{K_i}{K_p}$ στο συμπέρασμα που προκύπτει από τη συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή.

$$PI_{(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{s * K_p + K_i}{s} \leftrightarrow PI_{(s)} = K_p * \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s}$$

Η χρήση του όρου ολοκλήρωσης αποσκοπεί στην εξάλειψη του σφάλματος στη μόνιμη κατάσταση και μεταβάλλει το DC-κέρδος του συστήματος ενώ ο αναλογικός όρος αυξάνει τη ταχύτητα απόκρισης και βελτιώνει την ευστάθεια του συστήματος. Αν το σύστημα που ελέγχουμε είναι πρώτης τάξης με συνάρτηση μεταφοράς $G_{(s)} = \frac{1}{s+A}$ τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου με PI ελεγκτή είναι:

$$G_{c(s)} = \frac{\frac{s * K_p + K_i}{s} * \frac{1}{s + A}}{1 + \frac{s * K_p + K_i}{s} * \frac{1}{s + A}} \leftrightarrow G_{c(s)} = \frac{\frac{s * K_p + K_i}{s * (s + A)}}{\frac{s * (s + A) + s * K_p + K_i}{s * (s + A)}} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow G_{c(s)} = \frac{s * K_p + K_i}{s^2 + A * s + s * K_p + K_i} \leftrightarrow G_{c(s)} = \frac{s * K_p + K_i}{s^2 + (A + K_p) * s + K_i}$$

Το σύστημα γίνεται 2^{ης} τάξης με: $\omega_n = K_i$

και

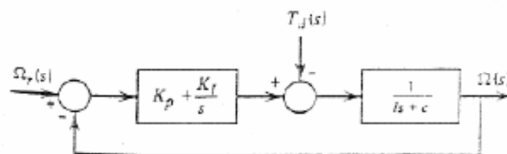
$$2 * \zeta * \omega_n = A + K_p$$

Άρα όταν χρησιμοποιούμε τον PI ελεγκτή με την αύξηση του ολοκληρωτικού όρου K_i αυξάνεται η φυσική συχνότητα ω_n του συστήματος και με την αύξηση του αναλογικού συντελεστή K_p αυξάνεται το γινόμενο $2 * \zeta * \omega_n$, αλλά χωρίς να μεταβάλλεται η ω_n , οπότε αυξάνεται ο συντελεστής απόσβεσης του συστήματος με αποτέλεσμα τη μείωση της υπερύψωσης. Η ακριβής επίδραση του PI ελεγκτή στην μεταβατική απόκριση του συστήματος εξαρτάται από μηδενικό $s = -\frac{K_i}{K_p}$ που εισάγει ο ελεγκτής στο σύστημα.

Τέλος, με την εισαγωγή του όρου ολοκλήρωσης το σύστημα για βηματική είσοδο παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

3.5.1 Ολοκληρωτικός - Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος πρώτης τάξης

Η αναλογική συν την ολοκληρωτική δράση ελέγχου που απευθύνεται στην ταχύτητα του ελεγκτή, δίνει το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα



Εικόνα 10: Διάγραμμα ενός σερβομηχανισμού ταχύτητας με έλεγχο PI

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι

$$\Omega(s)/\Omega_r(s) = K_p s + K_I / Is^2 + (c + K_p)s + K_I \quad (1)$$

$$\Omega(s)/T_d(s) = -s / Is^2 + (c + K_p)s + K_I \quad (2)$$

όπου K_p και K_I τα κέρδη.

Το σύστημα είναι σταθερό για τις θετικές τιμές K_p και K_I . Για $\Omega_r(s) = 1/s$, $\omega_{ss} = K_I / K_I = 1$, και το σφάλμα μετατόπισης είναι μηδέν, όπως και με την ολοκληρωτική δράση. Ομοίως, η απόκλιση λόγω μιας διαταραχής μοναδιαίου βήματος είναι μηδενική στη σταθερή κατάσταση.

Η αναλογία απόσβεσης είναι

$$\zeta = c + K_p / 2 \sqrt{IK_I}$$

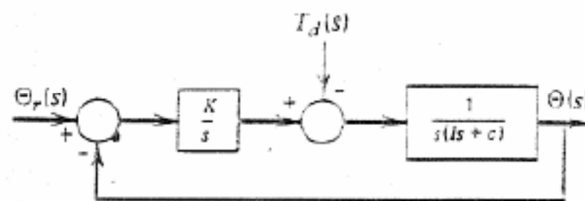
Η παρουσία του K_p επιτρέπει στην αναλογία απόσβεσης να επιλεγεί χωρίς το καθορισμό της αξίας της κυρίαρχης χρονικής σταθεράς. Π.χ., εάν το σύστημα είναι underdamped, η χρονική σταθερά είναι

$$\tau = 2I / c + K_p, (\zeta < 1)$$

Το κέρδος K_p μπορεί να επιλεγεί για να λάβει την επιθυμητή χρονική σταθερά, ενώ το K_I χρησιμοποιείται για να θέσει την αναλογία απόσβεσης. Μια παρόμοια ευελιξία υπάρχει εάν $\zeta = 1$.

3.5.2 Ολοκληρωτικός - Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης

Ο ολοκληρωτικός έλεγχος για το σερβομηχανισμό θέσης συν τον ολοκληρωτικό τρόπο που εφαρμόζεται μας δίνει το ακόλουθο μπλοκ διάγραμμα στο παρακάτω σχήμα



Εικόνα 11: μπλοκ διάγραμμα ενός σερβομηχανισμού θέσης με έλεγχο ολοκληρώματος

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι

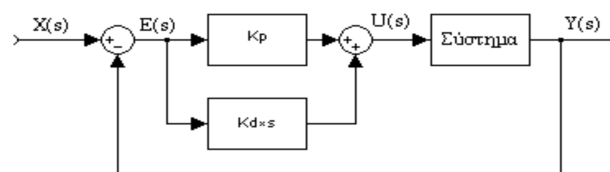
$$\Theta(s)/\Theta_r(s) = K_p s + K_I / (s^3 + cs^2 + K_p s + K_I) \quad (1)$$

$$\Theta(s)/T_d(s) = -s / (s^2 + cs^2 + K_p s + K_I) \quad (2)$$

Η απόδοση σταθερής κατάστασης είναι αποδεκτή όπως πριν εάν το σύστημα είναι σταθερό. Αυτό ισχύει εάν το κριτήριο Routh είναι ικανοποιημένο, δηλαδή εάν I , c , K_p , και K_I είναι θετικοί και $cK_p - IK_I > 0$. Η δυσκολία εμφανίζεται εδώ όταν η απόσβεση είναι μικρή. Για μικρό c , το κέρδος K_p πρέπει να είναι μεγάλο προκειμένου να ικανοποιηθεί ο τελευταίος όρος, και αυτό μπορεί να είναι δύσκολο να εφαρμοστεί φυσικά.

3.6 Αναλογικός – Διαφορικός (PD) ελεγκτής

Ο αναλογικός – διαφορικός ελεγκτής συνδυάζει αθροιστικά τον αναλογικό και το διαφορικό έλεγχο. Η συνδεσμολογία του αναλογικού – διαφορικού ελέγχου είναι η συνδεσμολογία του παρακάτω σχήματος.



Ο αναλογικός – διαφορικός εισάγει ένα πόλο $-\frac{K_p}{K_d}$ στο συμπέρασμα που προκύπτει από τη συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή:

$$PD(s) = K_p + s * K_d \Leftrightarrow PD(s) = s + \frac{K_p}{K_d}$$

Ο PD ελεγκτής αυξάνει την απόσβεση του συστήματος και περιορίζει την υπερύψωση όμως δεν μειώνει άμεσα το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Η χρήση του διαφορικού όρου προκαλεί την αυξημένη απόσβεση του συστήματος που επιτρέπει την αύξηση του αναλογικού κέρδους που έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση του σφάλματος μόνιμης κατάστασης και την αύξηση της ταχύτητας απόκρισης του συστήματος. Στην πράξη ο PD έλεγχος εξαιτίας του διαφορικού όρου ενισχύει το θόρυβο, ο οποίος μπορεί να εμφανιστεί στην απόκριση του συστήματος, επίσης είναι πιθανό να δημιουργηθούν προβλήματα στην περίπτωση που υπάρχουν απότομες αλλαγές στο σήμα αναφοράς γιατί έχουν ως συνέπεια ο διαφορικός όρος να παράγει έξοδο κρουστικής μορφής.

Αν το σύστημα που ελέγχουμε είναι 2^{ης} τάξης με συνάρτηση μεταφοράς $G_{(s)}$ = $\frac{1}{s^2 A s + B}$ τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου με PD ελεγκτή είναι:

$$G_{c(s)} = \frac{(K_p + s * K_d) * \frac{1}{s^2 + A * s + B}}{1 + (K_p + s * K_d) * \frac{1}{s^2 + A * s + B}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow G_{c(s)} = \frac{\frac{(K_p + s * K_d)}{s^2 + A * s + B}}{\frac{s^2 + A * s + B + K_p + s * K_d}{s^2 + A * s + B}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow G_{c(s)} = \frac{K_p + s * K_d}{s^2 + (A + K_d) * s + (B + K_p)}$$

Το νέο σύστημα 2^{ης} τάξης έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

$$\omega_n = B + K_p$$

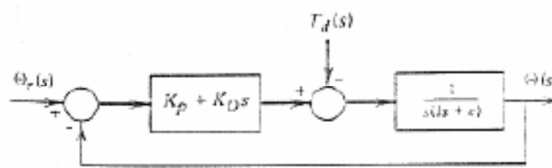
και

$$2 * \zeta * \omega_n = A + K_d$$

Άρα η αύξηση του αναλογικού κέρδους K_p οδηγεί σε αύξηση της φυσικής συχνότητας του συστήματος επομένως και σε ταχύτερη απόκριση του συστήματος. Η αύξηση του διαφορικού συντελεστή K_d οδηγεί σε αύξηση του γινομένου $2 * \zeta * \omega_n$ με αμετάβλητη τη φυσική συχνότητα άρα αυξάνεται ο συντελεστής απόσβεσης του συστήματος που οδηγεί στη μείωση της υπερύψωσης της απόκρισης του συστήματος. Το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μειώνεται όσο αυξάνουμε το αναλογικό κέρδος ενώ δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή του διαφορικού συντελεστή.

3.6.1 Αναλογικός- Διαφορικός έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης

Ο σχεδιασμός ενός ελεγκτή και με τους τρεις τρόπους αυξάνει το κόστος του συστήματος (εκτός ίσως για τα ψηφιακά συστήματα, όπου οι μόνες αλλαγές είναι μια τροποποίηση λογισμικού). Υπάρχουν εφαρμογές της θέσης του σερβομηχανισμού στον οποίο μια διαφορετική από το μηδέν απόκλιση ως αποτέλεσμα της διαταραχής μπορεί να ανεχτεί, αλλά επιδιώκουμε μια βελτίωση στην παροδική αντίδραση πέρα από το αναλογικό αποτέλεσμα ελέγχου. Η ολοκληρωτική δράση δεν θα απαιτηθεί, και ο ρυθμός ενέργειας μπορεί να αντικατασταθεί για να βελτιώσει την μεταβατική απόκριση. Η εφαρμογή ενός PD ελέγχου σε αυτό το σύστημα δίνει το μπλοκ διάγραμμα στην εικόνα 12.



Εικόνα 12: μπλοκ διάγραμμα ενός σερβομηχανισμού θέσης με PD έλεγχο

και τις ακόλουθες συναρτήσεις μεταφοράς

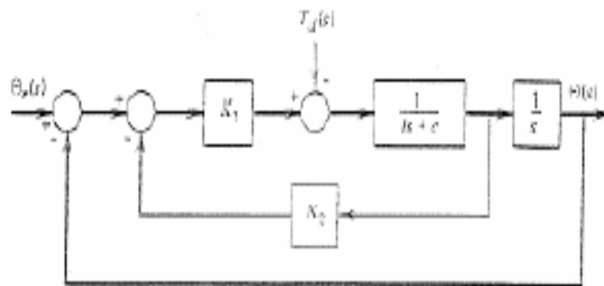
$$\Theta(s)/\Theta_r(s) = K_p + K_D s / Is^2 + (c + K_D)s + K_p \quad (1)$$

$$\Theta(s)/T_d(s) = -1 / Is^2 + (c + K_D)s + K_p \quad (2)$$

Το σύστημα είναι σταθερό για τις θετικές τιμές K_D και K_p . Η παρουσία του ρυθμού ενέργειας δεν έχει επιπτώσεις στην απόκριση της σταθερής κατάστασης για τις βηματικές εισόδους, και τα αποτελέσματα της σταθερής κατάστασης είναι ίδια με εκείνων του P έλεγχου, δηλαδή, μηδενικό σφάλμα μετατόπισης και μια απόκλιση $-1/K_p$ λόγω της διαταραχής. Η αναλογία απόσβεσης είναι

$$\zeta = c + K_D / 2\sqrt{IK_p}$$

Για τον P έλεγχο, $\zeta = c/2\sqrt{IK_p}$. Η εισαγωγή του ρυθμού ενέργειας επιτρέπει στο ανάλογο κέρδος K_p να είναι μεγάλο για να μειώσει την απόκλιση της σταθερής κατάστασης, ενώ το K_D μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτύχει μια αποδεκτή αναλογία απόσβεσης. Ο ρυθμός ενέργειας βοηθά επίσης να σταθεροποιήσει το σύστημα με την προσθήκη της απόσβεσης (εάν $c = 0$, το σύστημα με το P έλεγχο δεν είναι σταθερό). Το μπλοκ διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικόνα 13



Εικόνα 13: μπλοκ διάγραμμα ενός ταχύμετρου ρύθμισης της ανατροφοδότησης ενός σερβομηχανισμού θέσης με PD έλεγχο

Το κέρδος του συνδυασμού ενισχυτής-μηχανή-ποτενσιόμετρο είναι K_1 , και K_2 και είναι το κέρδος του ταχυμέτρου.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι

$$\Theta(s)/\Theta_r(s) = K_1 / Is^2 + (c + K_1K_2)s + K_1 \quad (1)$$

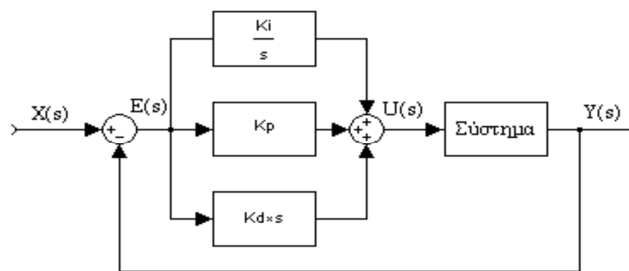
$$\Theta(s)/T_d(s) = -1 / Is^2 + (c + K_1K_2)s + K_1 \quad (2)$$

Αυτό το σύστημα επομένως θα είναι κάπως πιο αργό από το σύστημα με τον καθαρό PD έλεγχο. Τα κέρδη K_1 και K_2 μπορούν να επιλεγούν για να παραγάγουν την επιθυμητή αναλογία απόκλισης και απόσβεσης της σταθερής κατάστασης όπως έγινε με το K_p και K_D .

3.7 Αναλογικός – Ολοκληρωτικός – Διαφορικός (PID) ελεγκτής

Ο τρόπος ελέγχου PID είναι ένας συνδυασμός των αναλογικών, ολοκληρωτικών, και διαφορικών τρόπων ελέγχου. Ένας ελεγκτής PID αναφέρεται επίσης ως ελεγκτής τριών μεθόδων. Ο ολοκληρωτικός τρόπος χρησιμοποιείται για να αποβάλει το ανάλογο offset που προκαλείται από τις μεγάλες αλλαγές φορτίων. Ο διαφορικός τρόπος μειώνει την τάση σε σχέση με τις ταλαντώσεις και παρέχει μια δράση ελέγχου που προλαμβάνει τις αλλαγές στο σήμα λάθους. Ο διαφορικός τρόπος είναι ιδιαίτερα χρήσιμος όταν η διαδικασία έχει ξαφνικές αλλαγές φορτίων.

Η δημοτικότητα του ελεγκτή PID οφείλεται κατά ένα μέρος στην πολύ καλή συμπεριφορά του έναντι μιας αρκετά ευρείας κλίμακας λειτουργικών συνθηκών και κατά ένα άλλο μέρος στη σχετική του απλότητα η οποία επιτρέπει έναν εύκολο και αξιόπιστο χειρισμό. Ο PID έλεγχος συνδυάζει αθροιστικά την επίδραση των τριών βασικών όρων ελέγχου. Η συνδεσμολογία του PID ελέγχου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Ο PID ελεγκτής εισάγει στο υπό έλεγχο σύστημα ανοιχτού βρόγχου ένα πόλο στο μηδέν και δύο μηδενικά. Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι η εξής:

$$PID_{(s)} = K_p + s * K_d + \frac{K_i}{s} \leftrightarrow PID_{(s)} = \frac{K_d * s^2 + K_p * s + K_i}{s}$$

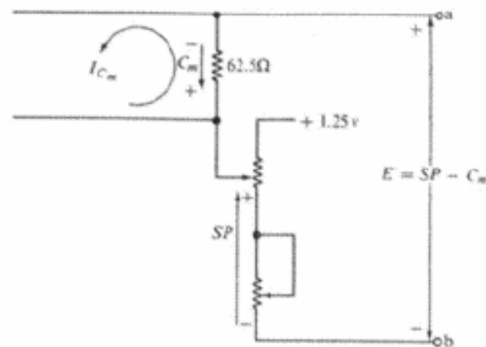
Πολλές διεργασίες βιομηχανικού τύπου ελέγχονται με την βοήθεια μονάδων ελεγκτών PID. Ο PID ελεγκτής έχει την καλύτερη συνολικά απόδοση καθώς το σύστημα εμφανίζει ταχεία απόκριση, μηδενική υπερύψωση και μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Για να χρησιμοποιήσουμε ένα τέτοιου είδους ελεγκτή θα πρέπει να σχεδιαστεί με κατάλληλη επιλογή των τριών παραμέτρων του αναλογικού κέρδους, του ολοκληρωτικού συντελεστή και του διαφορικού συντελεστή έτσι ώστε το σύστημα

κλειστού βρόγχου να έχει τα πλεονεκτήματα όλων των ελεγκτών που συνδυάζονται στον PID ελεγκτή. Στην ουσία το πιο δύσκολο στη σχεδίαση ενός PID ελεγκτή είναι να δοθούν οι κατάλληλες τιμές στα K_p , K_d και K_i έτσι ώστε το ένα μην επιδρά αρνητικά στη λειτουργία του άλλου.

4. Τύποι ελεγκτών

4.1 Ηλεκτρονικοί αναλογικοί ελεγκτές

Ένας ηλεκτρονικός αναλογικός ελεγκτής έχει δύο κύρια μέρη: α) τον ανιχνευτή σφάλματος, β) και τη μονάδα ελέγχου. Ένα παράδειγμα ενός ηλεκτρικού ανιχνευτή σφάλματος είναι διευκρινισμένο στην εικόνα 14.



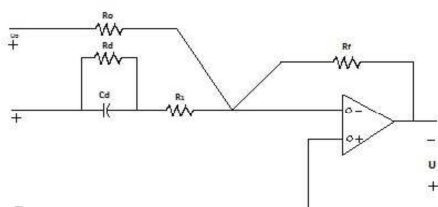
Εικόνα 14: ανιχνευτής ηλεκτρικού σφάλματος

Η έξοδος του πομπού μέτρησης είναι ένα σήμα ηλεκτρικής ροής 4 -εως-20mA. Κάθε αξία του ρεύματος αντιπροσωπεύει μια μοναδική τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής (c). Το σήμα 4- mA αντιπροσωπεύει την ελάχιστη τιμή του c, και το 20- mA σήμα αντιπροσωπεύει τη μέγιστη τιμή. Το σήμα του ρεύματος εφαρμόζεται σε μια αντιστάτη 62,5Ω- , καταλήγοντας στα 0,25- με 1,25-V .

Το σήμα setpoint (σημείο ρύθμισης) παράγεται από ένα ποτενσιόμετρο με έξοδο στα 0,25- 1.25 V. Τα δύο σήματα τάσης είναι συνδεδεμένα αντίθετα έτσι ώστε η τάση μεταξύ των σημείων α και β να είναι ίση με το σήμα setpoint μείον το μετρημένο σήμα .

$$e = s p - c m$$

Η μονάδα ελέγχου καλείται μερικές φορές "ελεγκτής", αν και είναι πραγματικά ένα μέρος της μονάδας που καλείται συνήθως από εκείνο το όνομα. Ο ηλεκτρονικός αναλογικός ελεγκτής χρησιμοποιεί έναν απλό ενισχυτή λειτουργίας και μερικές αντιστάσεις και πυκνωτές για να διαμορφώσει τη μονάδα ελέγχου. Ο ενισχυτής λειτουργίας χρησιμοποιείται ως γεννήτρια, και οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές κανονίζονται για να εφαρμόσουν τη λειτουργία μεταφοράς του επιθυμητού τρόπου ελέγχου ή το συνδυασμό αυτών. Ο αναλογικός ελεγκτής χρησιμοποιεί τρεις αντιστάσεις για να διαμορφώσει έναν ανάστροφο ενισχυτή εικόνα 15.



Εικόνα 15: Ο αναλογικός ελεγκτής είναι ουσιαστικά ένας op-amp αναστρέφων ενισχυτής

Συνάρτηση μεταφοράς

$$= \frac{V}{E} = P \left[\frac{1+Ds}{1+aDs} \right]$$

$$P = \frac{R_f}{R_i + R_d} = \text{κέρδος}$$

$$D = R_d C_d$$

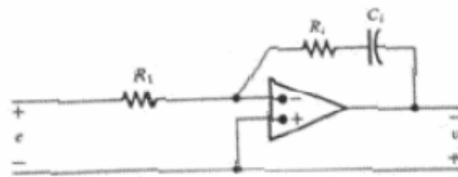
$$a = \frac{R_i}{R_i + R_d}$$

$$R_0 = R_f$$

Το κύκλωμα έχει δύο εισόδους, το λάθος (e) και το offset της εξόδου (v_0). Το αναλογικό κέρδος (P) είναι ίσο με την αντίσταση ανατροφοδότησης (R_f) που διαιρείται με την αντίσταση λάθους της εισόδου (R_i). Το offset της αντίστασης (R_0) πρέπει να είναι

ίσο με την αντίσταση ανατροφοδότησης (R_f) για να ικανοποιήσει την εξίσωση του χρόνου. Οι γραμμές της εξόδου μπορούν να διατηρηθούν για να καταστήσουν την έξοδο είτε θετική είτε αρνητική όσον αφορά το σφάλμα. Μερικές εφαρμογές του ελεγκτή θα απαιτήσουν μια θετική είσοδο για το σφάλμα, και άλλες εφαρμογές θα απαιτήσουν μια αρνητική έξοδο για ένα θετικό σφάλμα.

Ο αναλογικός συν τον ολοκληρωτικό ελεγκτή χρησιμοποιεί δύο αντιστάσεις και ένα πυκνωτή για να εφαρμόσει την PI συνάρτηση μεταφοράς.



Συνάρτηση μεταφοράς

$$= \frac{V}{E} = K \left[\frac{1+s}{s} \right]$$

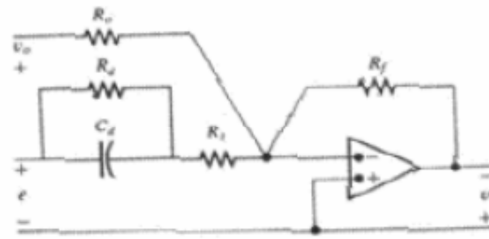
$$P = \frac{R1}{Ri} = \text{κέρδος}$$

$$I = 1/(RiCi)$$

Εικόνα 16: Αναλογικός ελεγκτής PI

Ο πυκνωτής (C_i) τοποθετείται σε σειρά με την αντίσταση ανατροφοδότησης (R_i). Το κέρδος (P) είναι ίσο με την αντίσταση ανατροφοδότησης (R_i) που διαιρείται με την αντίσταση εισόδου (R_1). Το ολοκληρωτικό ποσοστό δράσης ισούται με το αντίστροφο κλάσμα της αντίστασης της εισόδου (R_1) και του πυκνωτή (C_i).

Ο αναλογικός συν τον διαφορικό ελεγκτή χρησιμοποιεί τέσσερις αντιστάσεις και έναν πυκνωτή για να εφαρμόσει τον PD τρόπο



Εικόνα 17: Αναλογικός ελεγκτής PD

Συνάρτηση μεταφοράς

$$= \frac{V}{E} = P \left[\frac{1+Ds}{1+aDs} \right]$$

$$P = \frac{Rf}{Ri+Rd} = \text{κέρδος}$$

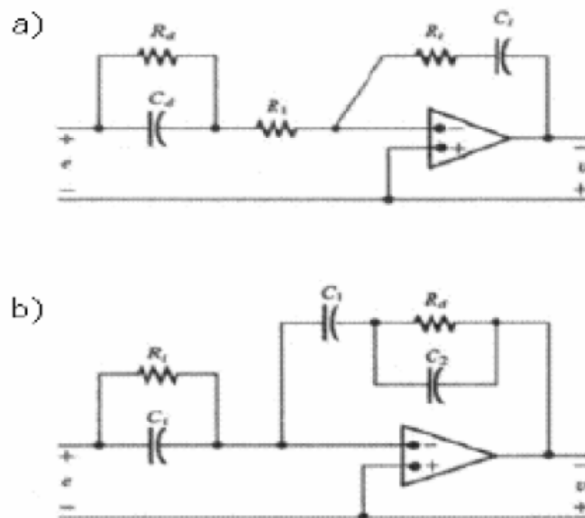
$$D = RdCd$$

$$a = \frac{Ri}{Ri+Rd}$$

$$R_0 = R_f$$

Το κύκλωμα είναι αναλογικός ελεγκτής με έναν παράλληλο συνδυασμό αντίστασης (Rd) και πυκνωτή (Cd) που τοποθετείται στη σειρά με την είσοδο και την ολοκληρωτική δράση από την πλευρά της εξόδου.

Δυο εκδόσεις του αναλογικού ελεγκτή PID παρουσιάζονται στην εικόνα 18 (a,b). Η μια έκδοση (εικόνα 18a) σχηματίζει την διαφορική δράση στη μεριά της εισόδου και την ολοκληρωτική δράση στη μεριά της εξόδου. Η άλλη εκδοχή (εικόνα 18b) κάνει ακριβώς το αντίθετο και διαμορφώνει την ολοκληρωτική δράση από την πλευρά της εισόδου και την διαφορική δράση από την πλευρά της εξόδου.



Συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{V}{E} = P \left[\frac{1+s}{s} \right] \left[\frac{1+Ds}{1+aDs} \right]$$

a) $P = \frac{Ri}{Ri+Rd}$

b) $P = C/Ci$

$$a = \frac{Ri}{Ri+Rd}$$

$$a = \frac{C2}{C1+C2}$$

$$I = 1/(RiCi)$$

$$I = 1/(R2C2)$$

$$D = RdCd$$

$$D = Rd(C1+C2)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς για τον αναλογικό ελεγκτή PID είναι μια τροποποιημένη έκδοση της εξίσωσης

$$\frac{V}{E} = P \left(\frac{I+S+Ds}{S+aDs} \right)$$

Η τροποποίηση γίνεται για λόγους οικονομίας. Η εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης για κάθε μέθοδο απαιτεί τρεις λειτουργικούς ενισχυτές.

Οι διαφορικοί και ολοκληρωτικοί όροι πρέπει να διαμορφωθούν παράλληλα και να αθροιστούν έπειτα με έναν ενισχυτή αθροίσματος. Η τροποποίηση αποτελείται από

την παρεμβολή ενός όρου αλληλεπίδρασης (PIDE) στην εξίσωση του χρόνου όπως παρουσιάζεται κατωτέρω.

$$v = Pe + PIDE + PI \int_0^t e \, dt + PD \, de/dt - aD \, dv/dt + v_0$$

Ένας μετασχηματισμός Laplace της ανωτέρω εξίσωσης με $v_0 = 0$ δίνει την ακόλουθη εξίσωση πεδίου συχνότητας:

$$V = PE + PIDE + P(1/s) E + PDsE - aDsV$$

Η επίλυση για το λόγο V/E δίνει την ακόλουθη συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{V}{E} = \frac{P + PID + \frac{PI}{s} + PDs}{1 + aDs^2} \quad (1)$$

ή

$$\frac{V}{E} = P \left(\frac{I + (1+ID)s + Ds^2}{s + aDs^2} \right) \quad (2)$$

4.2 Ψηφιακοί ελεγκτές

Οι ψηφιακοί ελεγκτές (digital controllers), είναι βασισμένοι σε μικροεπεξεργαστές και χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικά συστήματα ελέγχου. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για την μεγάλη απήχηση των ψηφιακών ελεγκτών. Η ισχύς των μικροεπεξεργαστών παρέχει εξελιγμένες δυνατότητες όπως προσαρμόσιμη αυτορύθμιση, έλεγχος πολλών μεταβλητών και έμπειρα συστήματα. Η ικανότητα του μικροεπεξεργαστή να επικοινωνεί μέσω ενός διαύλου ή ενός τοπικού δικτύου είναι ένας ακόμη λόγος για την ευρεία απήχηση του ψηφιακού ελεγκτή. Οι ψηφιακοί ελεγκτές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο κλειστού βρόγχου υλοποιούν τις μεθόδους ελέγχου PI, PD ή PID.

4.2.1 Ψηφιακός ελεγκτής PID

➤ Δειγματοληψία (sampling)

Ένας ψηφιακός ελεγκτής μετρά την ελεγχόμενη μεταβλητή σε συγκεκριμένους χρόνους, που χωρίζονται από ένα χρονικό διάστημα που ονομάζεται χρόνος δειγματοληψίας (sampling time), Δt . Κάθε δείγμα (ή μέτρηση) της ελεγχόμενης

μεταβλητής μετατρέπεται σε έναν δυαδικό αριθμό έτσι ώστε να του επιτραπεί η είσοδος του σε έναν ψηφιακό υπολογιστή ή μικροϋπολογιστή. Ο υπολογιστής αφαιρεί κάθε δείγμα της μετρήσιμης μεταβλητής από το σημείο ρύθμισης για να υπολογίσει ένα σύνολο από δείγματα σφάλματος.

$e_1 = sp - cm_1 =$ πρώτο δείγματα σφάλματος

$e_2 = sp - cm_2 =$ δεύτερο δείγμα σφάλματος

$e_3 = sp - cm_3 =$ τρίτο δείγμα σφάλματος

$e_n = sp - cm_n =$ n-οστό δείγμα σφάλματος

➤ Αλγόριθμοι ελέγχου

Μετά τον υπολογισμό κάθε δείγματος σφάλματος, ένας ψηφιακός ελεγκτής PID ακολουθεί μια διαδικασία που ονομάζεται αλγόριθμος PID για να υπολογίσει την έξοδο του ελεγκτή βασιζόμενος στα δείγματα σφάλματος $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$. Ο αλγόριθμος PID έχει δύο εκδοχές: (α) την εκδοχή θέσης και (β) την εκδοχή αύξησης. Ο αλγόριθμος PID θέσης (positional PID algorithm) υπολογίζει την θέση της βαλβίδας, V_n , βασιζόμενος στα σήματα σφάλματος. Η παρακάτω εξίσωση είναι μια απλοποιημένη εκδοχή του αλγόριθμου θέσης.

$$v_n = P e_n + PI \Delta t \sum_{j=1}^{j=n} e_j + PD \frac{\Delta e_n}{\Delta t}$$

Όπου,

$v_n =$ η θέση της βαλβίδας, επί τοις εκατό

$P =$ κέρδος του ελεγκτή

$e_n =$ δείγμα σφάλματος, επί τοις εκατό

$t =$ ο χρόνος του δείγματος, σε second

$I =$ το αναλογικό ποσοστό, σε second-1

D= διαφορική χρονική σταθερά, σε second

$e_n = e_n - e_{n-1}$ = αλλαγή στο σήμα σφάλματος

Ένα διάγραμμα ροής ενός αλγόριθμου PID θέσης παρουσιάζεται στην εικόνα. Ο αλγόριθμος αύξησης PID υπολογίζει την αλλαγή στην θέση της βαλβίδας, $\Delta v_n = v_n - v_{n-1}$, βασιζόμενος στα δείγματα σφάλματος. Ο αλγόριθμος αύξησης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση

$$v_n = P e_n + PI \Delta t \sum_{j=1}^{j=n} e_j + PD \frac{\Delta v_n}{\Delta t}$$

για να βρεθούν τα v_n και v_{n-1} και έπειτα αφαιρώντας εξάγουμε την παρακάτω εξίσωση:

$$v_{n-1} = P e_{n-1} + PI \Delta t \sum_{j=1}^{j=n-1} e_j + PD \frac{\Delta v_{n-1}}{\Delta t}$$

$$\Delta v_n = P \Delta e_n + PI \Delta t e_n + PD \left(\frac{\Delta v_n - \Delta v_{n-1}}{\Delta t} \right)$$

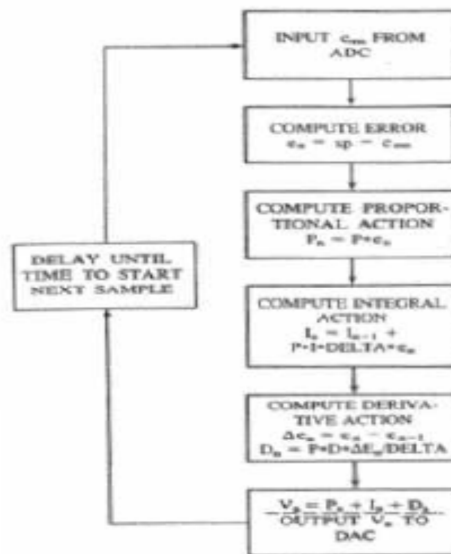
Όπου,

$$\Delta v_n = v_n - v_{n-1}$$

$$\Delta e_n = e_n - e_{n-1}$$

$$\Delta e_n - \Delta e_{n-1} = e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}$$

Ένα διάγραμμα ροής ενός αλγορίθμου θέσης PID παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 50.



Εικόνα 18: Διάγραμμα ροής ενός αλγόριθμου PID

Ο αλγόριθμος αύξησης ταιριάζει πολύ καλά σε αυξητικές συσκευές εξόδου όπως τα βηματικά μοτέρ. Ο αλγόριθμος θέσης είναι περισσότερο φυσικός και έχει το λεονέκτημα ότι ο ελεγκτής "θυμάται" την θέση της βαλβίδας. Αν ο χρόνος δείγματος, Δt , είναι πολύ μικρότερος της σταθεράς χρόνου ενέργειας ολοκληρώματος, ο αλγόριθμος θέσης θα παράγει μια συμπεριφορά παρόμοια με έναν αναλογικό ελεγκτή.

4.2.2 Μέθοδος ολοκληρώματος

Η μέθοδος ολοκληρώματος στην εξίσωση

$$v_n = P e_n + PI \Delta t \sum_{j=1}^n e_j + PD \frac{de_n}{dt}$$

παρουσιάζει υπολογιστικά προβλήματα που μπορεί να παράγουν μη ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η μέθοδος ολοκληρώματος δίνεται από τον ακόλουθο όρο:

Όρος ολοκληρώματος:

$$= PI \Delta t \sum_{j=1}^{j=n} \epsilon_j$$

Για κάθε δείγμα η μέθοδος ολοκληρώματος πρέπει να παράγει μια αλλαγή που δίνεται από:

$$\text{Αλλαγή μεθόδου ολοκληρώματος} = PI \Delta t \epsilon_f$$

Όταν η τιμή του $PI \Delta t$ είναι μικρότερη του 1, είναι βολικότερο να εργαστούμε με τον αντίστροφο του $PI \Delta t$, που μπορεί να αποθηκευτεί στον υπολογιστή ως ακέραιος. Σε αυτή την περίπτωση η παραπάνω εξίσωση πρέπει να αναθεωρηθεί ως εξής:

$$I_{DIV} = 1/ PI \Delta t$$

Αν η τιμή του $PI \Delta t$ είναι πολύ μικρή, ο υπολογιστής μπορεί να αγνοήσει σχετικά μεγάλα σφάλματα λόγω ελλιπούς ανάλυσης. Για παράδειγμα, αν έχουμε έναν ψηφιακό ελεγκτή με μήκος λέξης 12 bit, η ανάλυση ενός αριθμού 12 bit είναι 1 μέρος στα 4096. Ας υποθέσουμε ότι ένας δυαδικός αριθμός 12 bit χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει ένα εύρος σφαλμάτων από -2048 έως 2047. Αν $P=0,5$, $\Delta t=1s$ και $I=0,002s^{-1}$, τότε:

$$PI \Delta t = (0.5)(1)(0.002) = 0.001$$

$$I_{DIV} = 1000$$

Κάθε τιμή σφάλματος μεγαλύτερη του -1000 και μικρότερη του +1000(48% του εύρους της πλήρους κλίμακας) θα έχει ως αποτέλεσμα μια αλλαγή στη μέθοδο ολοκληρώματος μικρότερη του 1 η οποία θα αγνοηθεί. Αυτή η μικρή αλλαγή θα χαθεί, εκτός αν υπάρξει ειδική μνεία ώστε να ενσωματώσουμε την αλλαγή σε επόμενους υπολογισμούς για το ίδιο δείγμα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα μόνιμο σφάλμα μετατόπισης που η μέθοδος ολοκληρώματος δεν μπορεί να εξαλείψει. Μία λύση σε αυτό

το πρόβλημα είναι να αυξηθεί η ακρίβεια αυξάνοντας το μήκος λέξης του υπολογιστή. Ένα μήκος λέξης 16 bit έχει ακρίβεια 1 μέρος στα 65536 και μπορεί να παραστήσει ένα εύρος σφάλματος από -32768 έως +32767. Αυτό θα μείωνε το σφάλμα μετατόπισης στο περίπου 3% της κλίμακας πλήρους εύρους.

Μια άλλη λύση είναι η πρόσθεση του αχρησιμοποίητου μέρους του αθροίσματος των δειγμάτων σφάλματος στο τρέχων δείγμα σφάλματος, επ, πριν υπολογιστεί η αλλαγή μεθόδου ολοκληρώματος. Στο προηγούμενο παράδειγμα ένα λάθος με μέγεθος 900 σε δύο διαδοχικά δείγματα δεν θα προκαλέσει μια αλλαγή μεθόδου ολοκληρώματος διότι κάθε δείγμα είναι κάτω από 1000. Παρόλα αυτά αν στο πρώτο δείγμα διατηρηθεί το άθροισμα με μέγεθος 1800 θα προκαλέσει μια αλλαγή $1800/1000=1$ με υπόλοιπο 800. Το υπόλοιπο 800 μπορεί να διατηρηθεί για να προστεθεί στο επόμενο δείγμα σφάλματος. Κάθε φορά που το συσσωρευμένο υπόλοιπο συν το τρέχων σφάλμα είναι μεγαλύτερο από 1000, μια ακόμη αύξηση θα προστίθεται στην αλλαγή μεθόδου ολοκληρώματος.

4.2.3 Μέθοδος παραγώγου

Η μέθοδος παραγώγου στην εξίσωση

$$v_n = Pe_n + PI \Delta t \sum_{j=1}^{n-1} u_j + PD \frac{de_n}{dt}$$

παρουσιάζει υπολογιστικά προβλήματα που μπορεί να παράγουν μη ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ένα αργά μεταβλητό σήμα, για παράδειγμα, έχει ως αποτέλεσμα μία μη ομαλή ενέργεια μεθόδου παραγώγου. Η μέθοδος παραγώγου δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$= PD (e_n - e_{n-1}) / \Delta t$$

Ο όρος $(e_n - e_{n-1})/\Delta t$ είναι ουσιαστικά μια εκτίμηση του ρυθμού αλλαγής του σφάλματος, de/dt . Δεδομένου ότι το t καθορίζεται από το ποσοστό δειγματοληψίας, η προσοχή μας θα εστιάσει στον όρο $(e_n - e_{n-1})$ τον οποίο θα εκφράσουμε ως est_1 . Ο διαφορικός όρος που παράγεται από το est_1 θα αποκαλείται D_1 .

$$est_1 = e_n - e_{n-1}$$

$$D_1 = PD \ est_1 / \Delta t$$

If $P=6$, $\Delta t=1s$, and $D=100s$, then

$$D_1 = (6) (100/1) (est_1) = (600)(est_1)$$

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τον διαφορικό όρο που παράγεται από μια ελεγχόμενη μεταβλητή που μειώνεται στο ποσοστό 0,5 τοις εκατό ανά δευτερόλεπτο. Σημειώνεται πώς ο διαφορικός όρος (D_1) πηδά πέρα δώθε μεταξύ 0 και 600, επειδή η εκτίμηση του est_1 , ταλαντεύεται μεταξύ 0 και 1. Αυτό που απαιτείται είναι μια καλύτερη εκτίμηση του e . Ωστόσο, ένα απλό παράδειγμα θα επιδείξει πώς ένας καλός εκτιμητής μπορεί να απαλύνει τον διαφορικό όρο. Η ιδέα ενός εκτιμητή είναι να χρησιμοποιηθούν τα προηγούμενα δείγματα για να βελτιώσει την εκτίμηση. Για το παράδειγμά μας, χρησιμοποιούμε έναν εκτιμητή που χρησιμοποιεί τα τελευταία τέσσερα δείγματα για να υπολογίσει το e . Θα καλέσουμε αυτήν την εκτίμηση est_2 , και τον διαφορικό όρο που παράγει, D_2 .

$$est_2 = (e_n + e_{n-1}) - (e_{n-2} + e_{n-3})$$

$$D_2 = PD \ est_2 / 2^2 \Delta t$$

If $P=6$, $\Delta t=1s$, and $D=100s$,

τότε

$$D_2 = 6 (100/4) \ est_2 = 150est_2$$

n	c	c _m	e	est ₁	D1	est ₂	D2
1	9.5	9	0	0	0	0	0
2	9.0	9	0	0	0	0	0
3	8.5	8	1	1	600	1	150
4	8.0	8	1	0	0	2	300
5	7.5	7	2	1	600	2	300
6	7.0	7	2	0	0	2	300
7	6.5	6	3	1	600	2	300
8	6.0	6	3	0	0	2	300
9	5.5	5	4	1	600	2	300
10	5.0	5	4	0	0	2	300

Πίνακας 1: Derivative Action Produced by Two Estimators

Setpoint, sp =9%

Ο πίνακας 1 επιδεικνύει πώς ο απλός εκτιμητής μας έχει απαλύνει τον διαφορικό όρο. Ο est2 εκτιμητής έχει μια αποτελεσματική περίοδο δειγμάτων 2 s. χρησιμοποίησε δύο δείγματα για να υπολογίσει το e_n και δύο περισσότερα δείγματα για να υπολογίσει το e_{n-2} . Ο όρος 22 στην εξίσωση D2 αποτελεί το διπλασιασμό της περιόδου δειγμάτων και τη χρήση δύο δειγμάτων για να καθορίσει έναν μέσο όρο. Η ιδέα του est2 εκτιμητή μπορεί να επεκταθεί για να συμπεριλάβει περισσότερα προηγούμενα δείγματα. Ένας est5 εκτιμητής θα αύξανε τον αποτελεσματικό χρόνο δειγμάτων σε 5 s και θα χρησιμοποιούσε πέντε δείγματα για να υπολογίσει το e_n και πέντε δείγματα για να υπολογίσει το e_{n-5} .

$$est_5 = (e_n + e_{n-1} + e_{n-2} + e_{n-3} + e_{n-4}) - (e_{n-5} + e_{n-6} + e_{n-7} + e_{n-8} + e_{n-9})$$

$$D_5 = PD \text{ est}_5 / 5^2 \Delta t$$

4.3 Προηγμένος έλεγχος

Ο προηγμένος έλεγχος αναφέρεται στις διάφορες μεθόδους του απλού βρόγχου μιας μεταβλητής ανάδρασης του συστήματος έλεγχου με τρεις τρόπους ελέγχου. Ο

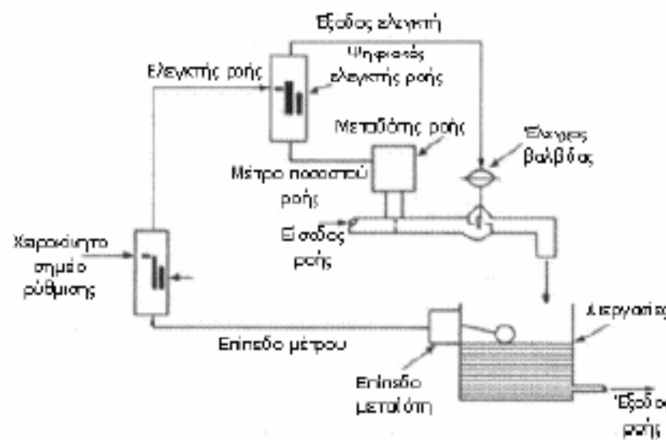
προηγμένος έλεγχος περιλαμβάνει τον σειριακό έλεγχο , τον έλεγχο ορθής τροφοδοσίας , τους προσαρμοστικούς **self-tuning** (αυτορυθμιζόμενους) ελεγκτές, και τα πολυμεταβλητά συστήματα ελέγχου.

4.4 Σειριακός έλεγχος

Ο σειριακός έλεγχος περιλαμβάνει δύο ελεγκτές με την έξοδο του αρχικού ελεγκτή που παρέχει το setpoint του δεύτερου ελεγκτή. Ο βρόχος ελέγχου παρέχει μια άριστη εφαρμογή του σειριακού ελέγχου. Οι αλλαγές στη στάθμη εμφανίζονται αργά λόγω της χωρητικότητας της δεξαμενής. Αντίθετα, οι αλλαγές στη ροή εμφανίζονται πολύ γρήγορα. Όταν μια διαταραχή προκαλεί μια αλλαγή στο ποσοστό ροής της εισόδου, υπάρχει μια ιδιαίτερη καθυστέρηση προτού να αλλάξει αρκετά η στάθμη για να διορθώσει τη διαταραχή.

Η διαταραχή αλλάζει συχνά προτού να γίνει η διόρθωση. Η αργή διόρθωση των διαταραχών οδηγεί στις διακυμάνσεις της στάθμης. Ο σειριακός έλεγχος χρησιμοποιείται για να βελτιώσει το σύστημα ελέγχου στάθμης.

Ένας πομπός σημάτων ροής και ένας δευτερεύον ελεγκτής χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν έναν βρόχο ελέγχου ροής μέσα στο βρόχο ελέγχου στάθμης. Η έξοδος του ελεγκτή στάθμης είναι το ελάχιστο setpoint του ελεγκτή ροής. Ο βρόχος ελέγχου ροής αποκρίνεται γρήγορα στις διαταραχές ροής, αποβάλλοντας ουσιαστικά τις διακυμάνσεις στάθμης που προκληθήκαν σε έναν απλό βρόχο ελέγχου στάθμης. Οι βιομηχανικές διαδικασίες έχουν πολλές εφαρμογές του σειριακού ελέγχου.



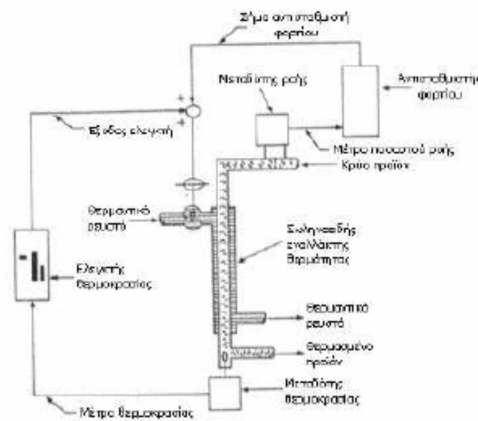
Εικόνα 19: Εφαρμογή σειριακού ελέγχου

4.5 Έλεγχος ορθής τροφοδοσίας

Ο έλεγχος ορθής τροφοδοσίας χρησιμοποιεί ένα μοντέλο της διαδικασίας για να κάνει τις αλλαγές στην έξοδο του ελεγκτή σε απάντηση στις αλλαγές σε μια σημαντική μεταβλητή φορτίων χωρίς να περιμένει το σφάλμα να εμφανιστεί. Το ποσοστό ροής του προϊόντος είναι το κύριο φορτίο στη διαδικασία. Μια αύξηση στο ποσοστό ροής του προϊόντος απαιτεί μια αύξηση στο ποσοστό ροής της θερμότητας για να διατηρήσει τη θερμοκρασία του προϊόντος στο setpoint. Στην εικόνα 20, ένας πομπός αποστολής σημάτων ροής μετρά το ποσοστό ροής προϊόντων και στέλνει το σήμα σε ένα αντισταθμίζων φορτίο.

Ο αντισταθμιστής φορτίων υπολογίζει την απαραίτητη διόρθωση για να ρυθμίσει για το ποσοστό ροής του προϊόντος. Η έξοδος του αντισταθμιστή προστίθεται στην έξοδο του ελεγκτή θερμοκρασίας. Η διόρθωση γίνεται μόλις μετριέται η αλλαγή στο ποσοστό ροής του προϊόντος. Ο όρος ορθή τροφοδοσία προέρχεται από το γεγονός ότι το σήμα αντισταθμιστής ταξιδεύει στην ίδια κατεύθυνση με το προϊόν. Αυτό είναι σε αντίθεση με το μετρημένο σήμα θερμοκρασίας, το οποίο ταξιδεύει στην αντίθετη κατεύθυνση με το προϊόν, για αυτό το λόγο δίνουμε το όνομα ορθή τροφοδοσία για τον αρχικό βρόχο. Εάν

η αντιστάθμιση ορθής τροφοδοσίας είναι τέλεια και δεν υπάρχει καμία άλλη μεταβλητή διαταραχής στη διαδικασία, ο βρόγχος ανάδρασης μπορεί να εξαληφθεί.



Εικόνα 20: Εφαρμογή έλεγχου ορθής τροφοδοσίας

Αυτές οι ιδανικές συνθήκες δεν εμφανίζονται ποτέ στην πράξη, έτσι τα συστήματα ελέγχου ορθής τροφοδοσίας σταθερά περιλαμβάνουν ένα βρόγχο ανάδρασης για να κάνουν τις τελικές προσαρμογές.

4.6 Προσαρμοστικοί ελεγκτές

Οι προσαρμοστικοί ελεγκτές αλλάζουν τις παραμέτρους των ελεγκτών "που προσαρμόζονται" στις αλλαγές της διαδικασίας. Παραδείγματος χάριν, μια αλλαγή στο ποσοστό ροής του προϊόντος στο σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας θα αλλάξει το νεκρό χρόνο της διαδικασίας. Μια αλλαγή στο νεκρό χρόνο διαδικασίας σημαίνει ότι μια αλλαγή στις παραμέτρους ελεγκτών είναι απαραίτητη για "να συντονίσει" τον ελεγκτή κατά τη διαδικασία. Ένας προσαρμοστικός ελεγκτής καθορίζει τις τιμές του P, I, and D απαραίτητο να προσαρμοστεί στους νέους όρους διαδικασίας και κάνει τις απαραίτητες αλλαγές. Πολλές διαφορετικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για "να προσαρμόσουν" τον ελεγκτή στις αλλαγές κατά την διαδικασία.

Οι αυτορυθμιζόμενοι ελεγκτές εμπίπτουν σε δύο γενικές κατηγορίες:

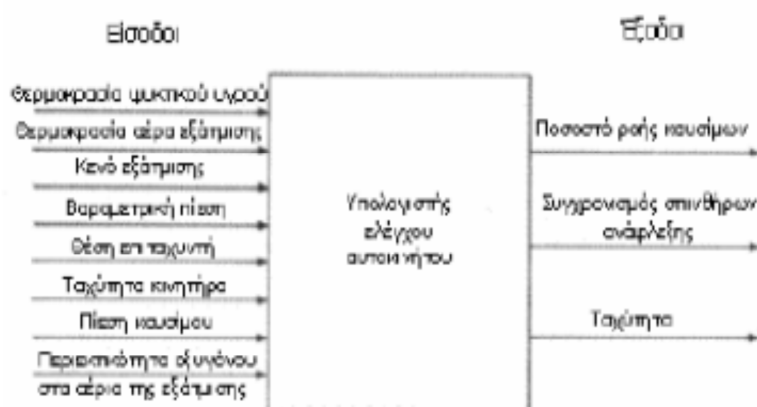
- εκείνοι που χρησιμοποιούν ένα πρότυπο της διαδικασίας ως βάση του συντονισμού και
- εκείνων που χρησιμοποιούν την αναγνώριση σχεδίων και την αποθηκευμένη γνώση ως βάση.

Ένας χαρακτηριστικός προσαρμοστικός ελεγκτής εισάγει μια βηματική αλλαγή στο setpoint και παρατηρεί την προκύπτουσα απόκριση της διαδικασίας. Ο ελεγκτής διαμορφώνει έπειτα ένα μοντέλο της διαδικασίας βασισμένος στην βηματική αλλαγή. Η λειτουργία "αυτοδιδασκαλίας" επαναλαμβάνεται και οι παράμετροι προτύπων και συντονισμού ρυθμίζονται και ταιριάζουν με την πραγματική διαδικασία. Η προσέγγιση της αναγνώρισης προτύπων στον προσαρμοστικό έλεγχο χρησιμοποιεί μια γραφική παράσταση των σφαλμάτων ανά το χρόνο.

Ο ελεγκτής εξετάζει συνεχώς την απόκριση στις φυσικές διαταραχές, ψάχνοντας την παρουσία ή την απουσία κορυφών, το χρονικό διάστημα μεταξύ των αιχμών, και του ανάλογου offset. Μετά από μια διαταραχή, ο ελεγκτής υπολογίζει αυτόματα P,I, και το D βασισμένο στο παρατηρούμενο πρότυπο απόκρισης και τη γνώση αποθήκευσης στη μνήμη του ελεγκτή.

4.7 Πολυμεταβλητός έλεγχος

Ο πολυμεταβλητός έλεγχος χρησιμοποιεί τις μετρήσεις διάφορων μεταβλητών της διαδικασίας και μπορεί να περιλαμβάνει το χειρισμό περισσότερων από μιας μεταβλητής διαδικασίας. Τα συστήματα ελέγχου υπολογιστών που χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν τους ψεκαστές καυσίμου και τον χρονισμό του μπουζί στα αυτοκίνητα είναι ένα άριστο παράδειγμα ενός πολυμεταβλητού συστήματος ελέγχου. Η εικόνα 21 επεξηγεί ένα αντιπροσωπευτικό αυτοκινούμενο σύστημα ελέγχου.



Εικόνα 21: Εφαρμογή πολυμεταβλητού ελέγχου

Ο σκοπός του συστήματος που παρουσιάζεται στην εικόνα είναι να ελεγχθεί το ποσοστό ροής του ψεκαστή καυσίμων, το χρονισμό των μπουζί και της ταχύτητας του ρελαντί.

Οι είσοδοι στον ελεγκτή περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία ψυκτικού υγρού , θερμοκρασία αέρα εξάτμισης, , βαρομετρική πίεση, τη θέση επιταχυντή, την ταχύτητα του κινητήρα, την πίεση καυσίμων, και την περιεκτικότητα σε οξυγόνο στα αέρια της εξάτμισης. Ένας απλός υπολογιστής ελέγχει και τις τρεις μεταβλητές εξόδου. Το σύστημα ελέγχου έχει οκτώ εισόδους και τρεις εξόδους, που το κάνουν ένα πολυμεταβλητό σύστημα ελέγχου.

Οι σημαντικότεροι λειτουργικοί τρόποι του συστήματος ελέγχου είναι:

1. **Έναρξη.** Ο ελεγκτής ποικίλλει το ποσό καυσίμων που ψεκάζονται στην πολλαπλή ποσότητα εισόδου σύμφωνα με τη θερμοκρασία ψυκτικού του κινητήρα. Μια κρύα μηχανή λαμβάνει περισσότερα καύσιμα από μια ζεστή μηχανή. Το σύστημα εκκίνησης παράγει το χρονισμό των μπουζί εσωτερικά και αγνοεί τα σήματα συγχρονισμού από τον υπολογιστή.

2. **Κανονική λειτουργία.** Ο υπολογιστής χρησιμοποιεί τέσσερα σήματα εισόδου για να διατηρήσει μια σχεδόν ιδανική αναλογία αέρα/καύσιμα(περίπου 14.7:1). Οι τέσσερις μεταβλητές εισόδου είναι θερμοκρασία αέρα,κενό εξάτμισης, πίεση καυσίμων, και η περιεκτικότητα σε οξυγόνο. Ο υπολογιστής τροποποιεί επίσης το συγχρονισμό ανάφλεξης βασισμένο στην ταχύτητα της μηχανής, το κενό εξάτμισης, τη θερμοκρασία ψυκτικού μέσου μηχανών, και τη βαρομετρική πίεση.
3. **Ψυχρή λειτουργία.** Ο υπολογιστής παρέχει τα πρόσθετα καύσιμα όταν η θερμοκρασία ψυκτικού είναι κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή.
4. **Επιτάχυνση.** Ο υπολογιστής παρέχει τα πρόσθετα καύσιμα κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης.
5. **Επιβράδυνση.** Ο υπολογιστής μειώνει το ποσό καυσίμων κατά την επιβράδυνση για να μειώσει τη ρύπανση που παράγεται από τη μηχανή.

6. **Ρελαντί .** Η ταχύτητα του ρελαντί αυξάνεται όταν η θερμοκρασία ψυκτικού είναι κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή. Η ταχύτητα του ρελαντί αυξάνεται επίσης όταν η τάση μπαταριών είναι χαμηλή, όταν μετατοπίζεται η μετάδοση στην κίνηση ή αντίστροφα, και όταν λειτουργεί το κλιματιστικό του αυτοκινήτου.

5. Προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLC)

Ήδη από τη δεκαετία του `60 στην Ευρώπη άρχισε η μετάβαση στα συστήματα με ψηφιακά ηλεκτρονικά. Αυτό δεν άλλαξε μόνο τον τρόπο σκέψης των κατασκευαστών αλλά και τη δομή και το τρόπο λειτουργίας εγκαταστάσεων και μηχανών. Υπήρξαν όμως και αρνητικά σημεία αφού απαιτήθηκε η γνώση υψηλής ηλεκτρονικής για τη σωστότερη εγκατάσταση και συντήρησή τους. Οι πρώτοι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLC – Programmable Logic Controllers) στην αρχή της δεκαετίας του `70 χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για την αντικατάσταση των ρελέ. Η μεγάλη απαίτηση για μείωση του κύκλου παραγωγής άρχισε στην αρχή της δεκαετίας του `80. Η τεχνολογία γινόταν γρηγορότερη και αναπτυσσόταν συνεχώς, παράλληλα με τις απαιτήσεις του

χρήστη. Όπως σε όλους τους τομείς έτσι κι εδώ, η επικοινωνία και η πληροφορία έγιναν η σημαντικότερη βάση για αποδοτική παραγωγή. Οι νέες συσκευές επεξεργάζονται πλέον δεδομένα και ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους ή με υπερκείμενους υπολογιστές.

Οι διαδικασίες παραγωγής γίνονται πιο σύνθετες, οι νεκροί χρόνοι στη παραγωγή μειώνονται συνεχώς, οι απαιτήσεις για αυξημένη ποιότητα αυξάνονται. Αλλάζει και ο ρόλος του ανθρώπου στη παραγωγική διαδικασία, τώρα σχεδιάζει, κατασκευάζει, προγραμματίζει, επιτηρεί κι επισκευάζει. Κι ενώ η τεχνολογία προχωρά, φθάνουμε στη δεκαετία του '90 όπου τεχνολογικά έγινε μεγάλο άλμα (συσκευές μικρότερες, φθηνότερες, με σημαντικά αυξημένες δυνατότητες συγκριτικά με αυτές της προηγούμενης δεκαετίας) αλλά παράλληλα αυξήθηκε δυσανάλογα το κόστος εκπόνησης των προγραμμάτων και της θέσης σε λειτουργία των εγκαταστάσεων.

Οι κατασκευαστές ρίχνουν πλέον σημαντικό βάρος στο λογισμικό όπου παρέχονται έτοιμες λύσεις για τομείς του αυτοματισμού με τη βοήθεια βιβλιοθηκών, εκμεταλλεύονται την πρόοδο των ηλεκτρονικών υπολογιστών και χρησιμοποιούν την εξέλιξη στο λειτουργικό τους σύστημα (τεχνολογία Windows) για να μειώσουν τους χρόνους στον προγραμματισμό των PLC (σχόλια προγράμματος, αντιγραφή τμημάτων προγράμματος από ένα πρόγραμμα σ' ένα άλλο κ.λ.π). Εμφανίζονται νέες γλώσσες προγραμματισμού για τεχνολόγους σε γραφική μορφή, όπου ο χρήστης μέσω βιβλιοθηκών κι έχοντας γνώση μόνο της παραγωγικής διαδικασίας "συνθέτει" τον αυτοματισμό του. Τα υπόλοιπα γίνονται αυτόματα στο παρασκήνιο για λογαριασμό του. Υποστηρίζεται τέλος και η εξέλιξη στις γλώσσες προγραμματισμού των ηλεκτρονικών υπολογιστών (Pascal, C++) για χρήστες που είναι εξοικειωμένοι σε τέτοια περιβάλλοντα.

Τέλος ιδιαίτερη έμφαση δίνεται πλέον στη δικτύωση - ασύρματη ή ενσύρματη για τον προγραμματισμό / επιτήρηση εξ αποστάσεως μέσω ειδικών συσκευών επικοινωνίας και λογισμικού για ηλεκτρονικό υπολογιστή (SCADA) καθώς και στις επικοινωνίες Internet.

5.1 Περιγραφή και λειτουργία του PLC

Το PLC είναι μία ηλεκτρονική διάταξη η οποία από την άποψη της λειτουργίας θα μπορούσε να προσομοιωθεί με έναν πίνακα αυτοματισμού. Έχει δηλαδή εισόδους και εξόδους που συνδέονται με τα στοιχεία μιας εγκατάστασης και βέβαια έναν αλγόριθμο που καθορίζει ότι κάποιος συνδυασμός εισόδων παράγει ένα αποτέλεσμα στις εξόδους (π.χ. η ενεργοποίηση ενός τερματικού διακόπτη σταματά τον κινητήρα μιας μεταφορικής ταινίας). Οι ομοιότητες όμως σταματούν εδώ μιας και το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των PLC είναι ότι οι "κανόνες" που καθορίζουν την συμπεριφορά των εξόδων δεν είναι σταθεροί και "καλωδιωμένοι" όπως σε ένα κλασικό πίνακα αυτοματισμού αλλά μπορούν να μεταβάλλονται με την επέμβαση στο πρόγραμμα του PLC χωρίς καμία επέμβαση στο Hardware του συστήματος. Δηλαδή η λογική της λειτουργίας που ενσωματώνεται στο PLC μέσω του προγραμματισμού του είναι μεταβαλλόμενη.

Έτσι σε ότι αφορά το υλικό όλα τα PLC αποτελούνται από την CPU, η οποία περιέχει την λογική του αυτοματισμού και η οποία αφού διαβάσει την κατάσταση των καρτών εισόδου (input modules) ενεργοποιεί τις κάρτες εξόδου (output modules) σύμφωνα με τους κανόνες (πρόγραμμα) που έχουμε αποθηκεύσει στην μνήμη του. Βέβαια το σύστημα συμπληρώνεται από το τροφοδοτικό και πιθανόν από διατάξεις ενδείξεων και χειρισμών (operator panel, operator display). Η CPU με την βοήθεια της κάρτας εισόδου γνωρίζει κάθε στιγμή την κατάσταση ενός διακόπτη εάν δηλαδή είναι διεγερμένος ή όχι. Επιπλέον με τη βοήθεια της κάρτας εξόδου οπλίζει ένα ρελέ και μέσω αυτού ενεργοποιεί μία διάταξη κίνησης, φωτισμού κλπ.

Αυτό που απομένει είναι η "λογική", δηλαδή πότε πρέπει να οπλίσει το ρελέ. Αυτή η λογική είναι το πρόγραμμα του PLC που συντάσσεται σε συγκεκριμένη γλώσσα με την βοήθεια ειδικού λογισμικού και αποθηκεύεται στην μνήμη του PLC. Έτσι τώρα το σύνολο του συστήματος λειτουργεί ως εξής:

Αρχικά η CPU διαβάζει τις εισόδους, δηλαδή παρατηρεί την κάθε είσοδο, και αν σε αυτή έχει εμφανισθεί τάση (που σημαίνει ότι έχει κλείσει ο διακόπτης) καταχωρεί ένα λογικό 1 σε μία περιοχή της μνήμης του που είναι ειδική για αυτό τον σκοπό (Input Image). Η περιοχή αυτή περιέχει σε κάθε στιγμή την κατάσταση των εισόδων και λειτουργεί σαν ενδιάμεσος σταθμός ανάμεσα στον "έξω κόσμο" και την CPU. Στην συνέχεια εκτελείται το πρόγραμμα, δηλαδή εξετάζεται η τιμή των εισόδων και

αποφασίζεται η τιμή της εξόδου η οποία και καταχωρείται σε μία αντίστοιχη περιοχή μνήμης εξόδου (Output Image). Τέλος η περιοχή της μνήμης εξόδου μεταφέρεται στην κάρτα εξόδου και διεγείρει με την σειρά της το ρελέ.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται από την αρχή και διαρκώς. Η διαδικασία αυτή λέγεται κυκλική επεξεργασία στο PLC. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό εδώ να τονιστεί ότι η πληροφορία για την κατάσταση της εισόδου αποκτάται μόνο στην αρχή του κύκλου και θεωρείται σταθερή κατά τον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος (πράγμα που βεβαίως μπορεί και να μην συμβαίνει), όμως ο κύκλος του PLC είναι τόσο σύντομος (τυπικά μερικά msec) πού ακόμα και αν αλλάξει κατάσταση η είσοδος, η CPU θα το αντιληφθεί στον αμέσως επόμενο κύκλο (π.χ. μετά από 3 ms) και θα δράσει ανάλογα με καθυστέρηση μόνο χιλιοστών του δευτερολέπτου. Φυσικά για ιδιαίτερα κρίσιμες εισόδους υπάρχουν τεχνικές που επιτρέπουν την ακαριαία πληροφόρηση και δράση της CPU (Event driven interrupt). Εδώ θα πρέπει να επίσης να υπογραμμιστεί, όπως εξάλλου φάνηκε και πιο πάνω, ότι το αποτέλεσμα του αυτοματισμού (διέγερση εξόδου) καθορίζεται απ' το πρόγραμμα και όχι απ' τις καλωδιώσεις.

Διατηρώντας τις ίδιες ακριβώς καλωδιώσεις και αλλάζοντας μόνο το πρόγραμμα, το σύστημα μπορεί να συμπεριφέρεται εντελώς διαφορετικά. Αυτή είναι βέβαια και η μεγάλη διαφορά του PLC από οποιοδήποτε άλλο σύστημα αυτοματισμού που καθορίζει και το όνομα του δηλαδή προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής.

5.3 Πλεονεκτήματα

Συγκριτικά με τον κλασικό αυτοματισμό τα πλεονεκτήματα του προγραμματισμού με PLC είναι πάρα πολλά. Ενδεικτικά μπορεί να γίνει αναφορά σε ότι:

- Το κόστος κατασκευής ενός PLC είναι σημαντικά μικρότερο από το κόστος παραγωγής ενός μεγάλου αριθμού βοηθητικών ηλεκτρονόμων, χρονικών και απαριθμητών.

- Ο χρόνος κατασκευής του αυτοματισμού είναι μηδαμινός σε σχέση με την κατασκευή ενός κλασικού πίνακα αυτοματισμού.
- Είναι συσκευές γενικής χρήσεως - δεν είναι κατασκευασμένοι για ένα συγκεκριμένο είδος παραγωγής.
- Δεν ενδιαφέρει ο συνολικός αριθμός των επαφών, χρονικών, απαριθμητών κ.λ.π., που θα χρησιμοποιηθούν μιας και αποτελούν στοιχεία μνήμης της CPU και όχι φυσικές οντότητες.
- Η λειτουργία του αυτοματισμού μπορεί ν' αλλάξει σε οποιοδήποτε στάδιο θελήσουμε (μελέτη, κατασκευή, Θέση σε λειτουργία ή αργότερα) χωρίς επέμβαση στο υλικό.
- Εύκολος οπτικός εντοπισμός με μία ματιά, της λειτουργίας ή μη στοιχείων της εγκατάστασης με τη βοήθεια των LED που υπάρχουν σε όλες τις κάρτες εισόδου / εξόδου. Με τη βοήθεια συσκευής προγραμματισμού μπορεί να παρακολουθηθεί και η ροή εκτέλεσης του προγράμματος.
- Η κατασκευή του πίνακα που θα τοποθετηθεί το PLC γίνεται παράλληλα με τον προγραμματισμό του, πράγμα το οποίο οδηγεί στη συντομότερη παράδοση του αυτοματισμού. Επιλογή τύπου και μονάδων PLC.
- Πολύ συχνό είναι το φαινόμενο ο τεχνικός να κληθεί να επισκευάσει μια βλάβη και να δει έκπληκτος ότι άλλα υπάρχουν στα σχέδια και άλλα βλέπει αυτός στην εγκατάσταση. Το πρόβλημα αυτό δεν υπάρχει στα PLC αφού πάντα υπάρχει μόνο ένα "σχέδιο" αποθηκευμένο – το τελευταίο πρόγραμμα που του έχουμε περάσει. Εάν απαιτούνται περισσότερα προγράμματα, αυτό είναι δυνατό με τη χρήση δισκετών.

- Τα PLC ως ηλεκτρονικές συσκευές καταλαμβάνουν πολύ μικρότερο χώρο στο πίνακα σε σχέση με τα υλικά του κλασικού αυτοματισμού και καταναλώνουν πολύ λιγότερη ενέργεια από αυτά.
- Τοποθετούνται άφοβα και σε πεδία ισχύος - ο κατασκευαστής δίνει οδηγίες γι' αυτές τις περιπτώσεις οι οποίες πρέπει να τηρούνται (αποστάσεις, γειώσεις κ.λ.π.).
- Η γλώσσες προγραμματισμού καλύπτουν όλο το φάσμα των ανθρώπων που καλούνται να ασχοληθούν με την τεχνολογία αυτή - υπάρχει γλώσσα προγραμματισμού γι' ανθρώπους με γνώση στο συμβατικό αυτοματισμό (Ladder), γλώσσες για όσους έχουν υπόβαθρο σε υπολογιστές (Statement List, SCL, FBD, C++) καθώς και γλώσσες εξειδικευμένες για διάφορες τεχνολογίες (GRAPH 7, HIGRAPH, CSF).
- Τέλος, σαν ψηφιακές συσκευές σήμερα πια δίνουν τη δυνατότητα να συνδεθούν επάνω τους οθόνες, εκτυπωτές, πληκτρολόγια και να καταργηθούν έτσι τα κλασικά μιμικά διαγράμματα και οι πίνακες χειρισμών. Εύκολη είναι επίσης και η διασύνδεση μεταξύ τους για ανταλλαγή πληροφοριών, ο τηλεχειρισμός και η τηλεοπτεία, ο εξ' αποστάσεως προγραμματισμός τους και η σύνδεσή τους στο Internet.

5.4 Στάδια εργασίας

Έξι είναι τα στάδια εργασίας που πρέπει ν' ακολουθηθούν για να υλοποιηθεί ένας αυτοματισμός:

Τεχνική περιγραφή - Καταγραφή δηλαδή των απαιτήσεων του πελάτη όσο αφορά τη σημερινή κατάσταση της εγκατάστασης, τις απαιτήσεις από τον αυτοματισμό αλλά και τις πιθανές μελλοντικές της επεκτάσεις.

Επιλογή τύπου και μονάδων PLC- Η επιλογή γίνεται πάντα με βάση τεχνικοοικονομικά κριτήρια, τη καλύτερη τεχνική λύση δηλαδή με το χαμηλότερο κόστος, μέσα από μια πληθώρα συστημάτων και των συνιστωσών τους.

Εκπόνηση σχεδίων - Κατασκευή πίνακα όπου θα τοποθετηθεί το PLC.

Προγραμματισμός - Υλοποίηση των προδιαγραφών που έθεσε ο πελάτης. Το πρόγραμμα δοκιμάζεται εν μέρει για τη σωστή του λειτουργία, αφού μια ολοκληρωμένη δοκιμή του είναι πρακτικά αδύνατη στο γραφείο καθώς οι συνθήκες είναι συνήθως πολύ πιο διαφορετικές από αυτές της εγκατάστασης.

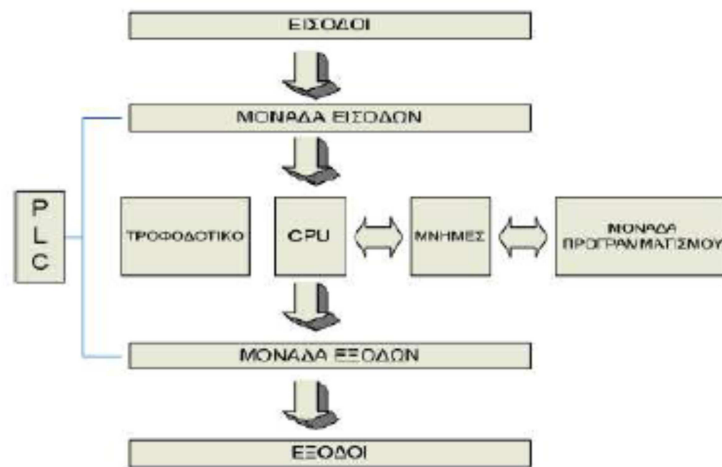
Τοποθέτηση / Ενεργοποίηση - Το PLC τοποθετημένο στο πίνακα μεταφέρεται και τοποθετείται στην εγκατάσταση, συρματώνεται με τα περιφερειακά στοιχεία (κινητήρες, βάνες, τερματικούς), γίνεται έλεγχος για την σωστή συρμάτωση και τέλος μεταφέρεται το πρόγραμμα στο PLC. Εδώ γίνεται ο οριστικός έλεγχος της σωστής σύμφωνα με τη τεχνική περιγραφή λειτουργίας του αυτοματισμού.

Φάκελος έργου - Δημιουργείται φάκελος του έργου με τα τελικά διορθωμένα σχέδια και το πρόγραμμα εκτυπωμένο με επεξηγηματικά σχόλια.

5.4 Δομή ενός προγραμματιζόμενου λογικό ελεγκτή

Στην αγορά υπάρχουν σήμερα πάρα πολλά μοντέλα PLC κατασκευασμένα από πολλές εταιρίες. Η επιλογή ενός προγραμματιζόμενου ελεγκτή (τύπος, μέγεθος, κόστος) εξαρτάται από το πλήθος των στοιχείων που δίνουν εντολή σ' αυτόν (είσοδοι) και το πλήθος των στοιχείων που δέχονται εντολή απ' αυτόν (έξοδοι), καθώς και από το πλήθος των λειτουργιών που απαιτείται να κάνει ο αυτοματισμός (μέγεθος προγράμματος, δηλ. απαιτούμενη μνήμη και δυνατότητες της κεντρικής μονάδας).

Ανεξάρτητα όμως από τον τύπο και το μέγεθος, ένας προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής, συνίσταται από τα εξής απαραίτητα στοιχεία: Πλαίσιο τοποθέτησης των μονάδων, Μονάδα τροφοδοσίας, Κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) που αποτελεί τον εγκέφαλο του PLC, Μονάδες εισόδων / εξόδων, Συσκευή προγραμματισμού.



Δομή PLC (Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή)

Εικόνα 22: Δομή PLC (Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή)

5.4.1. Πλαίσιο τοποθέτησης μονάδων

Όλες οι μονάδες, από τις οποίες αποτελείται ένας προγραμματιζόμενος ελεγκτής, πρέπει να τοποθετηθούν σε ένα κεντρικό πλαίσιο. Σ' αυτό είναι ενσωματωμένο το σύστημα αγωγών (BUS), μέσω των οποίων επικοινωνούν οι διάφορες μονάδες μεταξύ τους για την ανταλλαγή πληροφοριών και για την τροφοδοσία τους.

Αν οι θέσεις του κεντρικού πλαισίου που διατίθεται, δεν επαρκούν για να τοποθετηθούν οι μονάδες εισόδων και εξόδων που απαιτούνται σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή, τότε χρησιμοποιούνται περισσότερα πλαίσια επέκτασης για την τοποθέτηση

των επιπλέον μονάδων. Κάθε πλαίσιο επέκτασης συνδέεται με το κεντρικό πλαίσιο ή με τα άλλα πλαίσια μέσω ειδικής μονάδας διασύνδεσης και καλωδίου.

5.4.2 Μονάδα τροφοδοσίας

Η μονάδα τροφοδοσίας χρησιμεύει για να δημιουργήσει από την τάση του δικτύου τις απαραίτητες εσωτερικές τάσεις για την τροφοδοσία αποκλειστικά των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, που υπάρχουν μέσα στον προγραμματιζόμενο ελεγκτή (τρανζίστορ, ολοκληρωμένα κλπ). Οι τυπικές εσωτερικές τάσεις των ελεγκτών είναι συνήθως: DC 5V, DC 9V, DC 24V.

Σε ορισμένα μοντέλα PLC, όταν το PLC δεν τροφοδοτείται από το δίκτυο, η μονάδα τροφοδοσίας διατηρεί το περιεχόμενο της μνήμης του PLC με την βοήθεια μιας μπαταρίας που διαθέτει. Ενώ σε άλλα μοντέλα PLC η παραπάνω μπαταρία βρίσκεται στην Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας.

5.4.3. Κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU)

Είναι η βασική μονάδα του ελεγκτή, η οποία είναι υπεύθυνη για τη λειτουργία του αυτοματισμού. Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας είναι στην ουσία ένας μικροϋπολογιστής και διακρίνουμε σ' αυτήν όλα τα κύρια μέρη ενός μικροϋπολογιστή, δηλαδή τον μικροεπεξεργαστή και τη μνήμη. Ο μικροεπεξεργαστής είναι ο αυτός που εκτελεί όλες τις λειτουργίες του προγραμματιζόμενου ελεγκτή.



Εικόνα 23: Κεντρική μονάδα επεξεργασίας και μονάδες εισόδων ενός PLC

5.4.4. Μονάδες εισόδων / εξόδων

Οι μονάδες των εισόδων και των εξόδων αποτελούν τις μονάδες επικοινωνίας της κεντρικής μονάδας με τον έξω κόσμο, δηλ. με τους αισθητήρες, τους διακόπτες, τα μπουτόν κ.α., που δίνουν τις πληροφορίες (εντολές) στη κεντρική μονάδα, καθώς και με τα ρελέ ισχύος των κινητήρων, ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες, ενδεικτικές λυχνίες και γενικά τους αποδέκτες που εκτελούν τις εντολές της κεντρικής μονάδας.

Η κεντρική μονάδα μπορεί να δεχτεί ψηφιακά σήματα εισόδου και εξόδου χαμηλής τάσης και πολύ μικρού ρεύματος. Η τάση που δέχεται είναι συνήθως 0 Volt για το λογικό "0" και 24Vdc για το λογικό "1". Το ρεύμα εισόδου καθώς και το ρεύμα εξόδου δεν μπορεί να ξεπεράσει τα λίγα mA. Οι μονάδες εισόδων και εξόδων αναλαμβάνουν να προσαρμόσουν τα σήματα εισόδου και εξόδου, που έχουμε στον αυτοματισμό, σε σήματα που μπορεί να δεχτεί η κεντρική μονάδα, τόσο από άποψη τάσεων όσο και από άποψη ρευμάτων. Η προσαρμογή αυτή γίνεται με χρήση ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος, είτε με τη χρήση κατάλληλων μικρόρελέ.

Κάθε σύστημα PLC καταλήγει πάντα σε ακροδέκτες (κλέμες). Οι ακροδέκτες αυτοί ανήκουν στις μονάδες εισόδων και εξόδων του. Στους ακροδέκτες εισόδων καταλήγουν οι αγωγοί που έρχονται από αισθητήρες ή τερματικούς διακόπτες, πιεζοστάτες, διακόπτες μπουτόν, κτλ. Στους ακροδέκτες εξόδων καταλήγουν οι αγωγοί

που τροφοδοτούν πηνία ρελέ ισχύος, ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες, λυχνίες ένδειξης και λοιπούς αποδέκτες.

Στους διάφορους τύπους των PLC που υπάρχουν, οι μονάδες εισόδων και εξόδων αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο. Γενικά όμως ισχύουν τα παρακάτω:

- ✓ Μια μονάδα εισόδων ή εξόδων μπορεί να λειτουργεί με συνεχή τάση ή με εναλλασσόμενη τάση. Τυπικές τάσεις λειτουργίας είναι: DC 24V, 48V, 60V & AC 24V, 48V, 115V, 230V, με συνηθέστερες τις DC 24V, AC 115V & AC 230V.
- ✓ Τα κυκλώματα και οι τάσεις των εισόδων είναι τελείως ανεξάρτητα από τα αντίστοιχα κυκλώματα των εξόδων. Επομένως η τάση για τις εισόδους μπορεί να είναι διαφορετική από την τάση για τις εξόδους. Αν τώρα αυτές οι τάσεις είναι ίδιες μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο τροφοδοτικό (για συνεχείς τάσεις), ή μετασχηματιστής χειρισμού (για AC τάσεις) για τις εισόδους και για τις εξόδους.
- ✓ Η τάση εισόδων (δηλ. η τάση που φτάνει σε μια είσοδο, όταν ενεργοποιηθεί ο αντιστοίχος αισθητήρας) συνήθως διαχωρίζεται γαλβανικά από το υπόλοιπο εσωτερικό κύκλωμα του PLC. Τα ίδια ισχύουν και για τις εξόδους. Αν σε κάποιες μονάδες εξόδων δεν έχουμε γαλβανική απομόνωση πρέπει να προσέξουμε ιδιαίτερα το θέμα των γειώσεων.
- ✓ Στο συγκεκριμένο PLC η τάση τροφοδοσίας είναι 230V~AC η οποία παρέχεται από το δίκτυο. Οι εισοδοί δέχονται τάση DC. Οι έξοδοι είναι διακόπτες ρελέ ή ημιαγωγοί (τρανζίστορ) και δίνουν την τάση που έχουν στα άκρα τους .

5.4.5 Μνήμη RAM

Η μνήμη RAM είναι εκείνη στην οποία μπορούμε να γράφουμε και να σβήνουμε, και η οποία σβήνει μόλις λείψει η ηλεκτρική τροφοδοσία της. Στη μνήμη RAM αποθηκεύει μια σειρά από πληροφορίες σε ξεχωριστές περιοχές εργασίας.

5.4.6 Μνήμη EEPROM

Πρόκειται για μνήμη που δεν σβήνει, όταν μείνει χωρίς τροφοδοσία, στην οποία μπορούμε να γράφουμε, να σβήνουμε και να ξαναγράφουμε μέσω ειδικού μηχανήματος.

5.4.7 Μνήμη ROM

Στη μνήμη ROM ο κατασκευαστής του PLC αποθηκεύει το λειτουργικό σύστημα του PLC, δηλαδή τις οδηγίες για όλες τις βασικές λειτουργίες που είναι απαραίτητες για να δουλέψει το PLC.

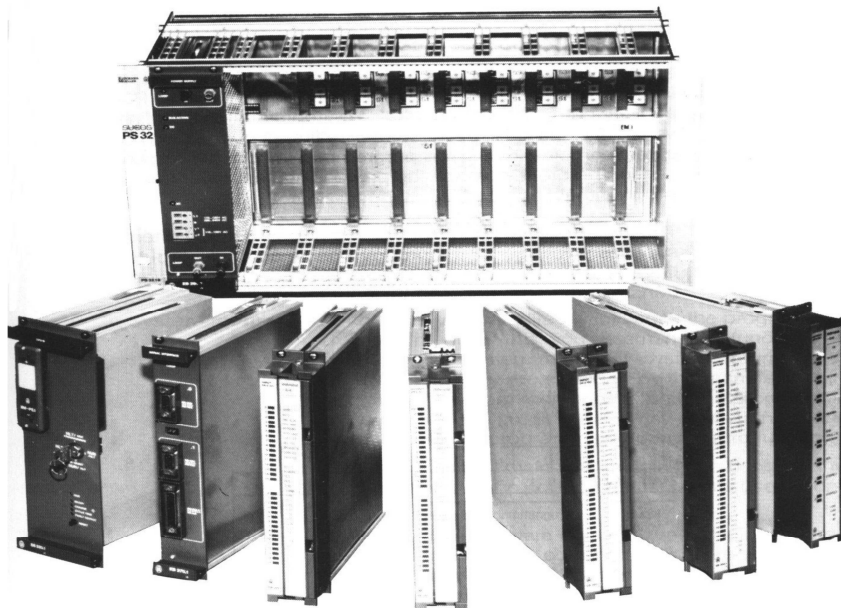
5.5 Προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές της αγοράς

Η κατάσταση που έχει διαμορφωθεί σήμερα στην αγορά από τις εταιρίες κατασκευών PLC έχει ως εξής:

1. Τα Modular PLC (μεγαλύτερου μεγέθους PLC)

Στην περίπτωση αυτή το PLC πωλείται κομμάτι-κομμάτι και τα βασικά κομμάτια είναι:

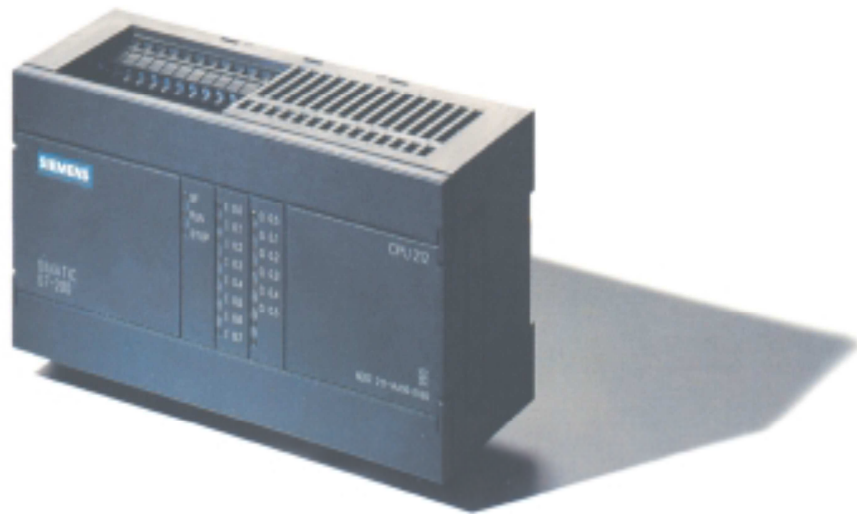
- Η μονάδα τροφοδοσίας
- Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας
- Οι μονάδες εισόδων και εξόδων



Εικόνα 24: Modular PLC

2. Τα COMPACT (συμπαγή) PLC (μικρότερου μεγέθους PLC)

Είναι μικρά PLC στα οποία όλες οι μονάδες τους (τροφοδοσία, κεντρική μονάδα και μοναδες εισόδων-εξόδων) είναι ενσωματωμένες σε μια συσκευή. Σ'αυτού του είδους τα PLC έχουν περίπου 20 εισόδους και εξόδους και έχουν τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά.



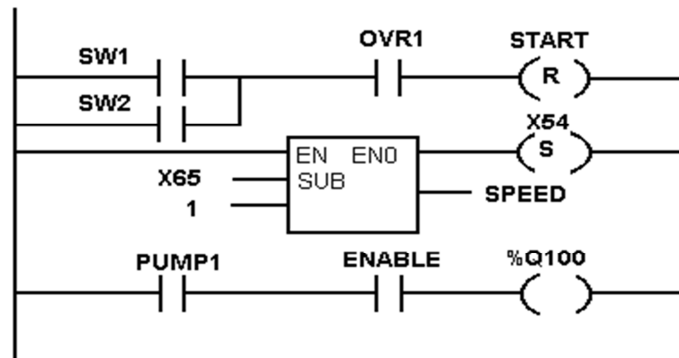
Εικόνα 25: Compact PLC

5.6 Προγραμματισμός ενός προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή και οι γλώσσες προγραμματισμού

Το βασικότερο κομμάτι σε ένα σύστημα αυτοματισμού με PLC δεν είναι το υλικό μέρος αλλά το λογισμικό, δηλαδή το πρόγραμμα που υλοποιεί τον επιθυμητό αυτοματισμό. Το πρόγραμμα αναπτύσσεται σε μια γλώσσα προγραμματισμού. Δυστυχώς στα PLC δεν υπήρξε τυποποίηση σε κανέναν τομέα, λόγω ανταγωνισμού των εταιρειών, ούτε βέβαια στο θέμα των γλωσσών προγραμματισμού. Δηλαδή δεν υπάρχουν γλώσσες προγραμματισμού για PLC που να ισχύουν ανεξάρτητα από εταιρεία. Παρ' όλα αυτά οι γλώσσες των PLC μοιάζουν πολύ μεταξύ τους οπότε μπορούμε να μιλάμε για μια "τυποποίηση της αγοράς".

Οι κυριότερες κατηγορίες γλωσσών προγραμματισμού για PLC είναι 3 και τις συναντούμε με μικρές διαφορές στα PLC όλων των εταιρειών:

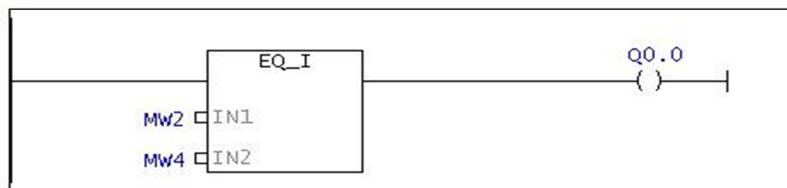
- Γλώσσα LADDER ή γλώσσα ηλεκτρολογικών γραφικών



- Γλώσσα λίστα εντολών (STL) ή γλώσσα λογικών εντολών

Network 2: LAD to STL conversion

Comment:



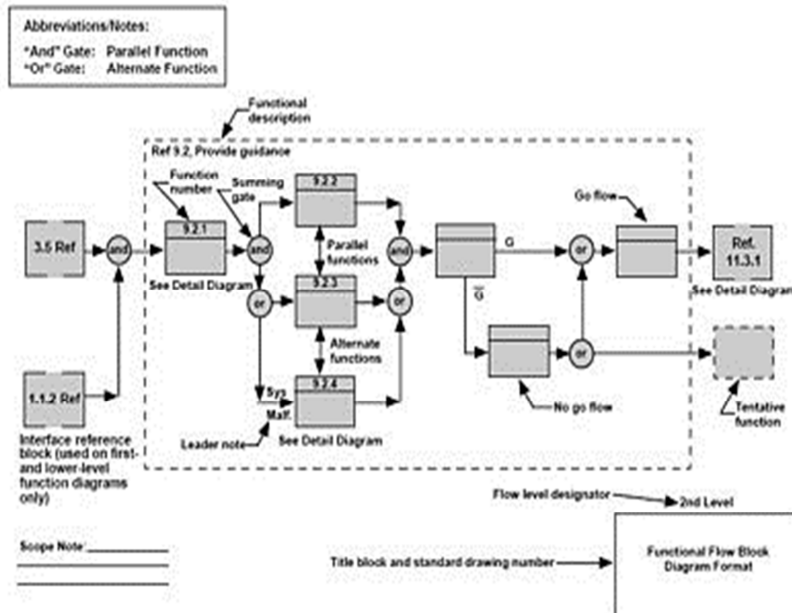
Translates to:

Network 2: LAD to STL conversion

Comment:

L	MW	2
L	MW	4
==I		
=	Q	0.0

- Γλώσσα λογικών γραφικών ή λογικού διαγράμματος



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ❖ Ζούλης Ν., Καφφετζάκης Π., Σούλτης Γ. Συστήματα Αυτοματισμών Β' τόμος, Αθήνα 2000.
- ❖ Richard C. Dorf – Robert H. Bishop, «Ύγχρονα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου», 9η έκδοση, εκδόσεις Σζιόλα.
- ❖ Αναστασία Ν. Βελώνη, «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου - Λυμένες Ασκήσεις», εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- ❖ Σταύρος Βολογιαννίδης, «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου Θεωρία και Εφαρμογές».
- ❖ Μανώλης Καβουσιανός, «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου».
- ❖ Νίκος Καραμπετάκης, «Εισαγωγή στα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου».
- ❖ Παρασκευάς Ν. Παρασκευοπούλου, «Εισαγωγή στον Αυτό-ματο Έλεγχο, Σόμος Α : Θεωρία», Πρώτη Έκδοση Αθήνα 2001.
- ❖ Μιχάλης Σφακιωτάκης, «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου II – Διαλέξεις Θεωρίας», Δεκέμβριος 2009.
- ❖ Robert N. Bateson, INTRODUCTION TO CONTROL SYSTEM TECHNOLOGY, 1998
- ❖ William J. Palm III, Control Systems Engineering, 1986