



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

Πτυχιακή εργασία

με θέμα

<<ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΛΕΓΚΤΩΝ>>

από τους **Δρόσο Ελευθέριο (Α.Μ:2917), Ντουντουλάκη**
Άρη(Α.Μ:3019)

Εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Εφαρμογών
Φραγκιαδάκη Νικόλαου.

Χανιά, Οκτώβριος 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1^ο

Ιστορική αναδρομή

Κεφάλαιο 2^ο

2.1. Εισαγωγή στο Matlab

2.2. Γραφικές παραστάσεις και διαγράμματα

2.3. Βασικές συναρτήσεις Matlab

2.4. Εισαγωγή στο Simulink

2.5. Μαθηματικά μοντέλα

Κεφάλαιο 3^ο

3.1. Μετασχηματισμός Laplace

3.2. Μετασχηματισμός Laplace – Matlab

3.3. Περιγραφή συστημάτων ελέγχου

3.4. Μπλοκ διαγράμματα

3.5. Συνάρτηση μεταφοράς

3.6. Δομικά διαγράμματα συστημάτων

3.7. Συστήματα αυτόματου ελέγχου ανοιχτού και κλειστού βρόγχου

3.8. Χρονική απόκριση συστημάτων αυτόματου ελέγχου

3.9. Τυποποιημένα σήματα εισόδου

3.10. Χαρακτηριστικά της γραφικής παράστασης της χρονικής απόκρισης

3.11. Βηματική απόκριση

3.12. Κρουστική απόκριση

3.13. Απόκριση γενικά

3.14. Σφάλματα συστημάτων αυτόματου ελέγχου

3.15. Σταθερές σφάλματος μόνιμης κατάστασης

3.15.1. Σταθερά σφάλματος θέσης K_p

3.15.2. Σταθερά σφάλματος ταχύτητας K_v

3.15.3. Σταθερά σφάλματος επιτάχυνσης K_a

3.16. Ευστάθεια συστημάτων αυτόματου ελέγχου

Κεφάλαιο 4^ο

4.1. Ελεγκτές συστημάτων αυτόματου ελέγχου

4.2. Αναλογικός (P) ελεγκτής

- 4.3. Ολοκληρωτικός (I) ελεγκτής
- 4.4. Διαφορικός (D) ελεγκτής
- 4.5. Αναλογικός – ολοκληρωτικός (PI) ελεγκτής
- 4.6. Αναλογικός – διαφορικός (PD) ελεγκτής
- 4.7. Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός (PID) ελεγκτής

Κεφάλαιο 5^ο

- 5.1. Ορισμός αναλογικού ελεγκτή
- 5.2. Μη γραμμικότητες
- 5.3. Παράδειγμα με αναλογικό έλεγχο παλμών
- 5.4. P – ελεγκτής
- 5.5. I – ελεγκτής
- 5.6. Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος πρώτης τάξης
- 5.7. Αναλογικός και ψηφιακός έλεγχος
- 5.8. Αναλογικός έλεγχος με είσοδο ράμπας
- 5.9. Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης
- 5.10. Ηλεκτρονικοί αναλογικοί ελεγκτές

Κεφάλαιο 6^ο

- 6.1. Ψηφιακοί ελεγκτές
- 6.2. Ψηφιακός ελεγκτής PID
- 6.3. Αλγόριθμοι ελέγχου
- 6.4. Μέθοδος ολοκληρώματος
- 6.5. Μέθοδος παραγώγου
- 6.6. Προηγμένος έλεγχος
- 6.7. Ελεγκτής on/off
- 6.8. Αλγόριθμος on/off
- 6.9. Θεωρητικό μέρος on/off
- 6.10. Έλεγχος σειριακής σύζευξης
- 6.11. Έλεγχος ορθής τροφοδοσίας
- 6.12. Προσαρμόσιμοι ελεγκτές
- 6.13. Έλεγχος πολλών μεταβλητών

Κεφάλαιο 7^ο

- 7.1. Προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLC)
- 7.2. Περιγραφή και λειτουργία του PLC

7.3. Πλεονεκτήματα

7.4. Στάδια εργασίας

7.5. Δομή ενός προγραμματιζόμενου λογικό ελεγκτή

7.5.1. Πλαίσιο τοποθέτησης μονάδων

7.5.2. Μονάδα τροφοδοσίας

7.5.3. Κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU)

7.5.4. Μονάδες εισόδων / εξόδων

7.5.5. Συσκευή προγραμματισμού

7.6. Η μνήμη της κεντρικής μονάδας

7.7. Αρχή λειτουργίας ενός προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή

7.8. Κύριες λειτουργίες προγραμματιζόμενων λογικών ελεγκτών

7.9. Βασικά χαρακτηριστικά του PLC

Εισαγωγή

Τις έννοιες ενός σήματος και ενός συστήματος τις συναντάμε σε πολλούς τομείς των τεχνολογικών και εφαρμοσμένων επιστημών. Η χρήση των εννοιών αυτών από τους ερευνητές κατά τα τελευταία 50 περίπου χρόνια βοήθησε κατ' αρχή στην μαθηματική διατύπωση ερωτημάτων τα οποία προέκυπταν από την προσπάθεια για καλύτερη και βαθύτερη κατανόηση πολλών φυσικών, μηχανικών ή οικονομικών φαινομένων και διαδικασιών και στην συνέχεια στην διερεύνηση αντιστοίχων προβλημάτων.

Οι έννοιες ενός σήματος και ενός συστήματος έχουν βασικές κοινές ιδιότητες. Αυτό που ονομάζουμε σήμα αποτελεί πάντα μία μαθηματική συνάρτηση μίας ή περισσότερων 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 ότι ορίζεται. Με τον όρο σύστημα εννοούμε ένα μέρος του φυσικού κόσμου το οποίο θεωρούμε ότι αποτελείται από ένα σύνολο στοιχείων τα οποία λειτουργούν συγχρόνως κατά 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 (Δρ. Βολογιαννίδης Σταύρος, «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου Θεωρία και Εφαρμογές-Διδακτικές σημειώσεις Τμήματος Πληροφορικής και Επικοινωνιών Τ.Ε.Ι. Σερρών»).

Τα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου (Σ.Α.Ε.) είναι σήμερα μία από τις σημαντικότερες περιοχές της επιστήμης και της τεχνολογίας, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι ο αυτοματισμός είναι συνυφασμένος με την ανάπτυξη σχεδόν κάθε μορφής τεχνολογίας. Οι τηλεπικοινωνίες, η ηλεκτρονική, η παραγωγή και κατανομή ηλεκτρικής ενέργειας, η ρομποτική, η αεροναυτική και αστροναυτική, η οικονομία, και οικονομετρία, και ακόμη η νευρολογία, η βιολογία και η ιατρική είναι μερικά μόνο παραδείγματα επιστημονικών περιοχών για τις οποίες τα Σ.Α.Ε. έπαιξαν και παίζουν συνεχώς πολύ

σημαντικό ρόλο στην διατύπωση, ανάλυση, διερεύνηση και λύση προβλημάτων τα οποία τις απασχολούν.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, σύστημα αυτόματου ελέγχου είναι ένα σύστημα που τα διάφορα μέρη του είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπεριφέρονται αυτόματα κατά ένα προκαθορισμένο επιθυμητό τρόπο (Πηγή: Π.Ν. Παρασκευόπουλος, «Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο - Τόμος Α: Θεωρία», Αθήνα 2001).

Το σύστημα λοιπόν αποτελείται από τρία στοιχεία, τα οποία είναι η είσοδος, το σύστημα και η 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 .

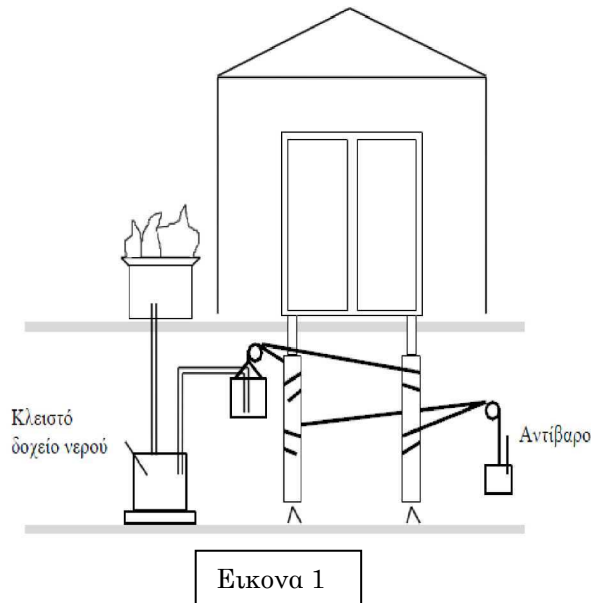
Σ' ένα Σ.Α.Ε. είναι πιθανό να έχουμε περισσότερες από μία εισόδους, οι εισοδοί ονομάζονται και παράμετροι ενώ η έξοδος ονομάζεται και προδιαγραφές. Οι εισοδοί (παράμετροι) μπορεί να είναι δύο ειδών είτε ελέγχου είτε διαταραχής, δηλαδή υπάρχουν εισοδοί τις οποίες μπορούμε να ελέγξουμε (ελέγχου) και εισοδοί τις οποίες δεν μπορούμε να ελέγξουμε (διαταραχής). Σε αντίθεση με τις παραμέτρους που τις ελέγουμε ή δεν τις ελέγουμε 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.

Τα συστήματα που θα μας απασχολήσουν στο μάθημα των Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου είναι : Σταθερά, συστήματα που είναι αμετάβλητα σε σχέση με το χρόνο και Γραμμικά, συστήματα που έχουν την ιδιότητα κάθε γραμμικός συνδυασμός εισόδων να αντιστοιχεί σε ανάλογο γραμμικό συνδυασμό εξόδων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

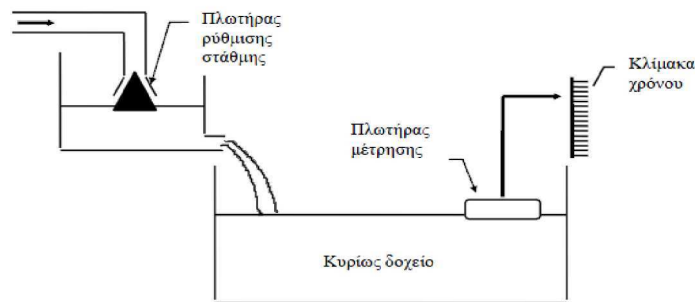
Ιστορική Αναδρομή

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. Η διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 1 και λειτουργούσε ως εξής:



Με το άναμμα της φωτιάς στο βωμό ο αέρας κάτω απ' αυτόν θερμαινόμενος 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 κρυώνει, 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!(Πηγές: 1. Π.Ν. Παρασκευόπουλος, «Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο -Τόμος Α: Θεωρία», Αθήνα 2001. 2. Singer et al : «A history of Technology» vol.2. Oxford University Press, Fair Lawn N.J. 1956).

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, που φαίνεται στην Εικόνα 2 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. Του δοχείου αυτού 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 (επιρεάζει) στην είσοδο του συστήματος που είναι η ροή του νερού προς αυτό (Πηγές: 1.Μ. Σφακιωτάκης, «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου ΙΙ-Διαλέξεις Θεωρίας». 2. Π.Ν. Παρασκευόπουλος, «Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο - Τόμος Α: Θεωρία», Αθήνα 2001).

Κατά καιρούς εμφανίστηκαν και άλλα πρωτόγονα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Το πρώτο όμως που βρήκε (και βρίσκει) ευρεία χρήση, θεωρείται ο φυγοκεντρικός ρυθμιστής ταχύτητας που εφευρέθηκε το 1769 από τον James Watt για τον έλεγχο ταχύτητας των ατμομηχανών. 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 (Πηγές: 1.Μ. Σφακιωτάκης, «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου ΙΙ-Διαλέξεις Θεωρίας». 2.Μ. Καβουσιανός «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου»).

Η χρονική περίοδος πριν το 1868 χαρακτηρίστηκε γενικά από την ανάπτυξη διαφόρων εμπνευσμένων και έξυπνων συστημάτων αυτόματου ελέγχου. 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. Την 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. Σε αντίθεση με όλα αυτά διάφοροι Μαθηματικοί αλλά και διάφοροι εμπειρικοί μηχανικοί στην πρώην Σοβιετική Ένωση ενέπνευσαν και κυριάρχησαν στον χώρο της θεωρίας του αυτόματου ελέγχου. Η θεωρητική προσέγγιση των Σοβιετικών διακατέχεται από μια τάση προς το πεδίο του χρόνου διατυπωμένη κατάλληλα με τη βοήθεια διαφορικών εξισώσεων (Πηγή: Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, «Σύγχρονα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου», 9^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα 2003).

Ισχυρή ώθηση δόθηκε στον Αυτόματο Έλεγχο κατά τη διάρκεια του 2ου 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. 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.

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. Τη 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.

Σήμερα, 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 βέλτιστου ελέγχου. 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.

Το αυτόματο πλυντήριο, η αυτόματη κουζίνα, η αυτοματοποιημένη κεντρική θέρμανση είναι μόνο λίγα από τα παραδείγματα αυτοματοποιημένων 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. 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. Τα 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 σιγά - σιγά παγκοσμίως.

**ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ**

1769	Ο James Watt παρουσιάζει μια συσκευή ελέγχου κινούμενης σφαίρας για τον έλεγχο της περιστροφικής ταχύτητας μιας ατμομηχανής.
1800	Παρουσιάζεται η ιδέα της Eli Whitney για την κατασκευή ανταλλακτικών στην παραγωγή μουσκέτων. Η πρόταση της Whitney αναφέρεται συχνά και ως σημείο αφετηρίας της μαζικής παραγωγής.
1868	Ο James Maxwell διατυπώνει σχετική θεωρία για το σύστημα ελέγχου της ατμομηχανής του James Watt.
1913	Ο Henry Ford κατασκευάζει μια μηχανή συναρμολόγησης για την παραγωγή αυτοκινήτων.
1927	Ο H.W. Bode παρουσιάζει την ανάλυση των ενισχυτών ανάδρασης.
1932	Ο H. Nyquist παρουσιάζει μια μέθοδο ανάλυσης της ευστάθειας των συστημάτων.
1952	Ανάπτυξη του Αριθμητικού Ελέγχου στο Πανεπιστήμιο του M.I.T. για τον έλεγχο εργαλειομηχανών.
1954	Ο G. Devol εξελίσσει το σύστημα «προγραμματιζόμενης μεταφοράς άρθρου» που θεωρείται το πρώτο βήμα στην σχεδίαση των βιομηχανικών ρομπότ.
1960	Εμφάνιση του πρώτου αυτόνομου ρομπότ, βασισμένο στην σχεδίαση Devol. Τέτοια συστήματα εγκαταστάθηκαν το 1961 για την εξυπηρέτηση μηχανών καλουπώματος
1970	Εξέλιξη της μεθόδου Ανάδρασης Καταστάσεων και της θεωρίας του Βέλτιστου Ελέγχου.
1980	Μελετάται ευρύτατα η σχεδίαση Εύρωστων Συστημάτων Ελέγχου.
1990	Οι κατασκευάστριες εξαγωγικές εταιρίες δίνουν έμφαση στον αυτοματισμό.
1994	Ευρεία χρήση του αυτόματου ελέγχου στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η παραγωγή απαιτεί αξιόπιστα και σθεναρά συστήματα.
1997	Το πρώτο αυτόνομο διαστημικό όχημα, γνωστό με την ονομασία «Sojourner», εξερευνά την επιφάνεια του πλανήτη Άρη.

Πηγή : Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, «Σύγχρονα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου», 9^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα 200

2.1. Εισαγωγή στο MatLab

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή το πρώτο κεφάλαιο στοχεύει στο να εισάγει τον σπουδαστή στο περιβάλλον του MatLab, το οποίο είναι το μόνο, αλλά υπεραρκετό, «εργαλείο» που θα χρησιμοποιήσουμε στο μάθημα των Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου. Το πρόγραμμα του MatLab περιέχει πλήθος εντολών, εμείς θα αναλύσουμε αυτές τις οποίες πρόκειται να χρησιμοποιήσουμε κατά τη διάρκεια του μαθήματος.

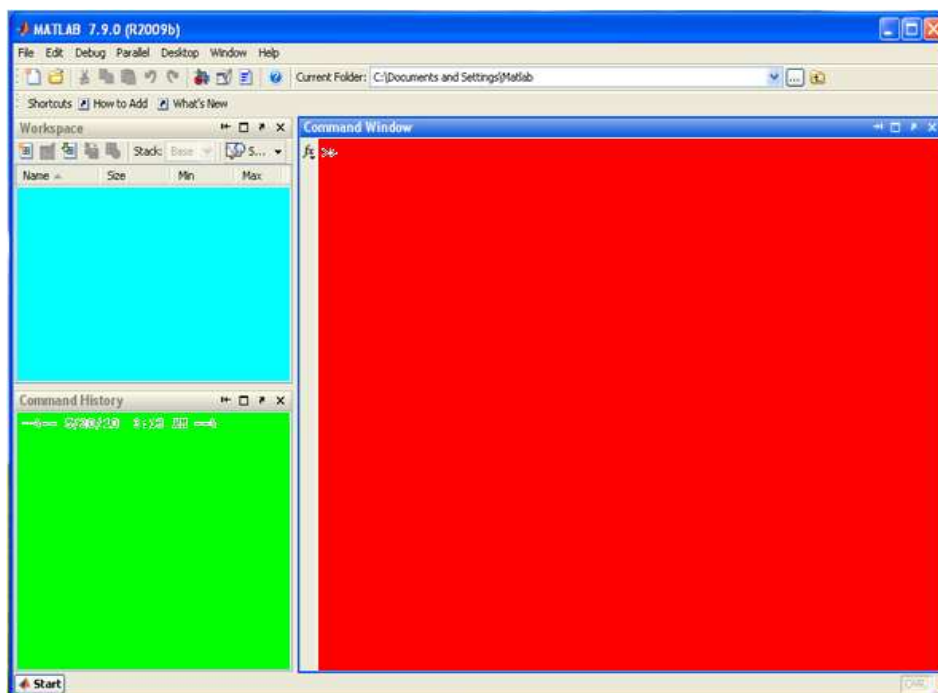
Αρχικά για να ξεκινήσουμε το πρόγραμμα στον υπολογιστή θα πρέπει να επιλέξουμε από την επιφάνεια εργασίας με διπλό κλικ το παρακάτω εικονίδιο :



Μετά από λίγο, αφού το πρόγραμμα φορτώσει, θα εμφανιστεί στην οθόνη μας το παράθυρο έναρξης της MATLAB (MATLAB opening window):

Στο περιβάλλον του προγράμματος εμφανίζονται τέσσερα παράθυρα:

1. Το **κόκκινο** παράθυρο εντολών (Command Window) στα δεξιά. Οι εντολές της MATLAB εισάγονται σ' αυτό το παράθυρο μετά την προτροπή (prompt) `>>`. Τα αποτελέσματα επίσης τυπώνονται-εμφανίζονται στο



παράθυρο αυτό.

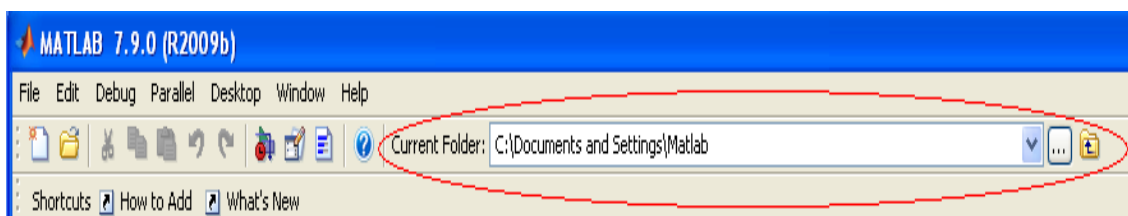
2. Το [σιέλ](#) παράθυρο που δείχνει τα στοιχεία, αλλά και πληροφορίες για αυτά σε ότι αφορά μέγεθος, διαστάσεις κ.τ.λ., που εισάγονται και υπολογίζονται στο παράθυρο εντολών είναι το παράθυρο του χώρου εργασίας (Workspace).

3. ΣΤΜ [σιέλ](#) παράθυρο μπορεί να γίνει εναλλαγή του παραθύρου χώρου εργασίας(Workspace)με τον τρέχοντα φάκελο(ηδη Directory) που μας δείχνει τα αρχεία που περιέχει ο προσωπικός φάκελος που θα εξηγήσουμε στη συνέχεια γιατί είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί στο φάκελο «Τα έγγραφα μου» του υπολογιστή κάθε σπουδαστή.

4. Το [πράσινο](#) παράθυρο κάτω αριστερά δείχνει το ιστορικό εντολών (Command History). Αν δεν εμφανιστεί το παράθυρο αυτό επιλέξτε *Command History* στην επιλογή *View*.

Κατά τη διάρκεια μιας εργασίας στη MATLAB μπορεί να εμφανιστούν αυτόματα και άλλα παράθυρα όταν αυτό απαιτείται όπως παράθυρα κειμένων (document windows), παράθυρα γραφικών (graphics windows) και παράθυρα σύνταξης αρχείων (editing windows).

Σημειώνεται ότι στο χώρο χρήσης ηλεκτρονικών υπολογιστών του τμήματος Ηλεκτρολογίας όπου διεξάγεται το μάθημα των Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου, πρέπει να αλλάξετε τον τρέχοντα φάκελο (Current Directory) επιλέγοντας τον προσωπικό σας φάκελο με την ονομασία «SAE-Im-files» ή όπως εσείς επιθυμείτε, τον οποίο έχετε προηγουμένως δημιουργήσει στον φάκελο του υπολογιστή «Τα έγγραφα μου», κάνοντας την κατάλληλη επιλογή στο χωρίο που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Το περιβάλλον MatLab αποτελεί μια ολοκληρωμένη εφαρμογή επιστημονικών και τεχνικών υπολογισμών. Το πακέτο λογισμικού MatLab αποτελείται από μια ομάδα προγραμμάτων στην οποία περιλαμβάνεται το βασικό εκτελέσιμο πρόγραμμα (εφαρμογή) καθώς επίσης και ένα πλήθος από ερ-

γαλειοθήκες (Toolboxes) μια συλλογή ειδικών αρχείων με την επέκταση «.m» (M-files), τα οποία συμβάλλουν σημαντικά στην λειτουργικότητα του προγράμματος εφαρμογής. Το ομώνυμο πρόγραμμα εφαρμογής σε συνδυασμό με την εργαλειοθήκη αυτόματου ελέγχου (control system toolbox), παρέχουν την δυνατότητα χρήσης του MatLab στην ανάλυση και σχεδίαση συστημάτων αυτόματου ελέγχου.

Οι περισσότερες από τις δηλώσεις, τις συναρτήσεις και τις εντολές που συναντούμε στο περιβάλλον αυτό, είναι ανεξάρτητες από το χρησιμοποιούμενο υπολογιστικό περιβάλλον. Γίνεται χρήση διαφόρων αντικειμένων με την βοήθεια των οποίων μπορούμε να επικοινωνούμε με το βασικό πρόγραμμα: Δηλώσεις και Μεταβλητές, Πίνακες και Διανύσματα, Παράθυρα Γραφικών - σχήματα γραφικών παραστάσεων και Κείμενα συνόλου εντολών (Scripts), τα οποία για συντομία τα καλούμε «προγράμματα». Το περιβάλλον του MatLab λαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες εισόδου από ένα ή περισσότερα από τα παραπάνω αντικείμενα.

2.2. Γραφικές Παραστάσεις και Διαγράμματα

Οι γραφικές παραστάσεις και τα διαγράμματα έχουν πολύ σημαντικό ρόλο στη σχεδίαση και στην ανάλυση των συστημάτων αυτόματου ελέγχου. Το MatLab έχει εξαιρετικές δυνατότητες σε αυτόν τον τομέα και περιέχει αρκετές συναρτήσεις για σχεδίαση. Το MatLab εμφανίζει τις παραστάσεις και τα διαγράμματα σε ένα νέο ανεξάρτητο παράθυρο το οποίο ενεργοποιείται αυτόματα κάθε φορά που δίνουμε εντολή να εκτελεστεί κάποια από τις συναρτήσεις που αφορούν τη σχεδίαση παραστάσεων.

Μια από τις συναρτήσεις σχεδίασης είναι η εντολή-συνάρτηση *plot*, η οποία «ανοίγει» νέο παράθυρο το οποίο ονομάζεται παράθυρο σχήματος (figure). Η συνάρτηση *plot* σχεδιάζει τη κλασική μορφή ενός διαγράμματος, που γνωρίζουμε όλοι, σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Τα δεδομένα-τιμές που αντιστοιχούν στους άξονες X και Y είναι αποθηκευμένα στα ισομήκη διανύσματα που έχουμε προηγουμένως αποθηκεύσει τις τιμές που παίρνει η μεταβλητή μας και τις τιμές που θα παίρνει για την εκάστοτε τιμή της μεταβλητής η συνάρτηση που έχουμε ορίσει. Η συνάρτηση *plot* στην ουσία ενώνει τα

σημεία που ορίζονται από τα στοιχεία των διανυσμάτων με συνεχείς γραμμές, η κλίμακα των αξόνων και ο τύπος των χρησιμοποιούμενων γραμμών επιλέγεται αυτόματα από το ίδιο το πρόγραμμα. Βέβαια μας δίνεται η δυνατότητα αν το επιθυμούμε να αλλάξουμε τον προεπιλεγμένο τύπου γραμμής που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα, οι διάφοροι τύποι που είναι διαθέσιμοι είναι η συνεχής γραμμή, η διακεκομμένη γραμμή, η γραμμή με στίγματα και η διακεκομμένη γραμμή με στίγματα.

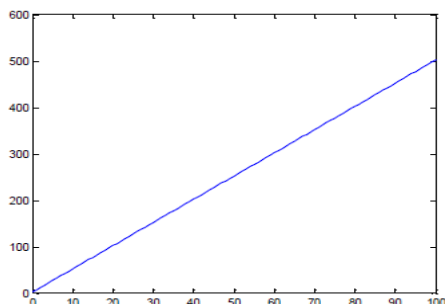
Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια συνάρτηση $f(x) = 5 * x + 2$ και θέλουμε να σχεδιάσουμε τη γραφική της παράσταση τιμές της μεταβλητή X από 0 έως 100, θα πρέπει αρχικά να δώσουμε ένα διάνυσμα με τις τιμές τις μεταβλητές, στη συνέχεια να «τρέξουμε» τη συνάρτηση για τις τιμές της μεταβλητής οπότε στην ουσία φτιάχνουμε ένα δεύτερο διάνυσμα ίδιου μήκους με αυτό της μεταβλητής και τέλος καλούμε τη συνάρτηση plot, για να γίνει κατανοητό ακολουθεί εικόνα με τις παραπάνω εντολές.

```

Command Window
>> x = [0 : 100] ;
>> y = 5 * x + 2 ;
>> plot (x , y)
    
```

Εικόνα 15

Μετά την εντολή plot ανοίγει ένα νέο παράθυρο που παρουσιάζει την παρακάτω γραφική παράσταση.



εικόνα 16

Η plot είναι η συνάρτηση την οποία θα χρησιμοποιήσουμε σε μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια του μαθήματος των συστημάτων αυτόματου ελέγχου. Εκτός όμως από αυτή υπάρχουν και άλλες συναρτήσεις που θα ήταν καλό να

τις αναφέρουμε. Η συνάρτηση *loglog* χρησιμοποιείται με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιούμε την *plot*, δηλαδή μας επιστρέφει το διάγραμμα του διανύσματος x συναρτήσει του διανύσματος y με τη διαφορά ότι και οι δυο άξονες του γραφήματος είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Η συνάρτηση *semilogx* μας επιστρέφει τη γραφική παράσταση του διανύσματος x συναρτήσει του διανύσματος y με διαφορά ότι ο άξονας x είναι σε λογαριθμική κλίμακα ενώ ο άξονας y είναι σε γραμμική κλίμακα. Τέλος η συνάρτηση *semilogy* μας επιστρέφει τη γραφική παράσταση του διανύσματος x συναρτήσει του διανύσματος y με διαφορά ότι ο άξονας y είναι σε λογαριθμική κλίμακα ενώ ο άξονας x είναι σε γραμμική κλίμακα.

Παρατηρώντας το παραπάνω γράφημα που μας επιστρέφει η εντολή *plot* βλέπουμε ότι είναι ένα γράφημα «γυμνό» από πληροφορίες. Μπορούμε λοιπόν με τη χρήση άλλων συναρτήσεων να εμπλουτίσουμε το γράφημα με πληροφορίες που θέλουμε, όπως ονομασίες αξόνων, ετικέτα, υπόμνημα κτλ. Οι συναρτήσεις που διαχειριζόμαστε τις γραφικές παραστάσεις αλλά και τι εκτελούν αυτές ακολουθούν στον παρακάτω πίνακα:

ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΩΝ	
Little (κείμενο)	Εισάγει μια επικεφαλίδα στο πάνω μέρος του παραθύρου της γραφικής παράστασης
Legend (όνομα 1, όνομα 2, ...)	Εισάγει ένα υπόμνημα στο διάγραμμα χρησιμοποιώντας ως ετικέτες για τις γραφικές τις ονομασίες που έχουμε δώσει.
xlabel (κείμενο)	εισάγει στον άξονα x ετικέτα με την ονομασία που έχουμε δώσει.
Ylabel (κείμενο)	Εισάγει στον άξονα y ετικέτα με την ονομασία που έχουμε δώσει.
Grid on	Προσθέτει γραμμές πλέγματος στο διάγραμμα
Grid off	Αφαιρεί τις γραμμές πλέγματος στο διάγραμμα

Τις παραπάνω εντολές τις τοποθετούμε μετά την εντολή *plot* όπως φαίνεται στην Εικόνα



```
Command Window
>> plot(x,y);title('grafima');xlabel('aksonas x');ylabel('aksonas y');grid on;
```

Εικόνα 17

Οι παραπάνω εντολές μας δίνουν ως αποτέλεσμα το γράφημα, το οποίο εμφανίζεται στην επόμενη σελίδα. Παρατηρούμε ότι είναι αρκετά διαφορετικό σε σχέση με αυτό που μας δίνει αυτόματα το πρόγραμμα ως προεπιλογή.

Οι παραπάνω προσθήκες μπορούν να γίνουν είτε μέσω του παραθύρου εντολών και δίνοντας τις κατάλληλες εντολές είτε από το ίδιο το παράθυρο γραφικών που εμφανίζεται μέσω του μενού Insert, επιλέγοντας το με το ποντίκι μας θα εμφανιστούν οι επιλογές μέσω των οποίων μπορούμε να αλλάξουμε τα στοιχεία του γραφήματος.

Σε περίπτωση που θελήσουμε να δημιουργήσουμε νέα γραφική παράσταση χωρίς όμως να χάσουμε την προηγούμενη, η εντολή figure μας δίνει τη δυνατότητα να σχεδιαστεί μια γραφική παράσταση σε νέο παράθυρο σχεδίασης, η εντολή αυτή σε αντίθεση με τις εντολές που αναφέραμε για τη διαχείριση των γραφικών παραστάσεων δεν ακολουθεί αλλά προηγείται της εντολής plot. Αν επιθυμούμε όμως να σχεδιάσουμε μια νέα γραφική παράσταση στο ήδη υπάρχον παράθυρο σχεδίασης χωρίς όμως να χάσουμε την προηγούμενη γραφική ώστε να μπορούμε να τις συγκρίνουμε μεταξύ τους υπάρχει η εντολή hold που μας δίνει αυτή τη δυνατότητα. Με τη χρήση αυτής της εντολής μπορούμε να σχεδιάσουμε αρκετές γραφικές παραστάσεις στο ίδιο παράθυρο σχεδίασης.

Τέλος θα αναφερθούμε στην εντολή subplot η οποία μας επιτρέπει να διαιρέσουμε το παράθυρο που εμφανίζεται μια γραφική παράσταση σε μικρότερα παράθυρα. Η εντολή δίνεται με τη μορφή subplot(a,b,c) όπου: *a*: ο αριθμός των γραμμών που θα διαιρεθεί το παράθυρο, *b*: ο αριθμός των γραφημάτων ανά γραμμή και *c*: η θέση του γραφήματος στο οποίο θέλουμε να εισάγουμε την παράσταση.

Ειδικότερα μπορούμε να πούμε ότι η παραπάνω εντολή διαμερίζει το παράθυρο σχεδίασης σε $a \times b$ υπο-παράθυρα και τοποθετεί το επόμενο γράφημα στη θέση c . Για να γίνει αντιληπτή η παραπάνω εντολή ακολουθεί παράδειγμα όπου δηλώνουμε τέσσερις διαφορετικές συναρτήσεις ως προς x και στη συνέχεια σχεδιάζουμε τη γραφική παράσταση κάθε συνάρτησης σε ένα παράθυρο χωρισμένο σε υπο-παράθυρα, για να γίνει πιο εύκολη η κατανόηση ως προς το πώς εισάγουμε τα γραφήματα στην εκάστοτε θέση έχουμε δώσει τίτλους σε κάθε γράφημα ώστε να είναι εμφανής η θέση του.

2.3. Βασικές συναρτήσεις MatLab

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι σημαντικότερες συναρτήσεις και εντολές του MatLab.

Βασικές συναρτήσεις του MatLab	
sin(x)	Ημίτονο του x
cos(x)	Σνημίτονο του x
tan(x)	Εφαπτομένη του x
asin(x)	Τόξο ημιτόνου του x
acos(x)	Τόξο σνημίτονου του x
atan(x)	Τόξο εφαπτομένης του x
exp(x)	Εκθετική συνάρτηση (e^x)
log(x)	Συνάρτηση φυσικού λογαρίθμου ($\ln(x)$)
log10(x)	Συνάρτηση δεκαδικού λογαρίθμου του x
log2(x)	Συνάρτηση λογαρίθμου του x με βάση το 2
sqrt(x)	Τετραγωνική ρίζα του x
abs(x)	Απόλυτη τιμή του x

2.4. Εισαγωγή στο Simulink

Το Simulink είναι ενσωματωμένο με το MatLab, είναι μια γραφική επέκταση για την μοντελοποίηση και προσομοίωση συστημάτων. Μας παρέχει άμεση πρόσβαση σε ένα ευρύ φάσμα εργαλείων που μας επιτρέπουν να αναπτύξουμε με ταχύτητα και ακρίβεια υπολογιστικά μοντέλα συστημάτων χρησιμοποιώντας μπλοκ διαγράμματα. Στο περιβάλλον του Simulink είναι εύκολο να υλοποιούνται πολύπλοκα μοντέλα μη γραμμικών συστημάτων, να επεξεργαζόμαστε αναλογικά ή ψηφιακά σήματα και είναι δυνατή η δημιουργία

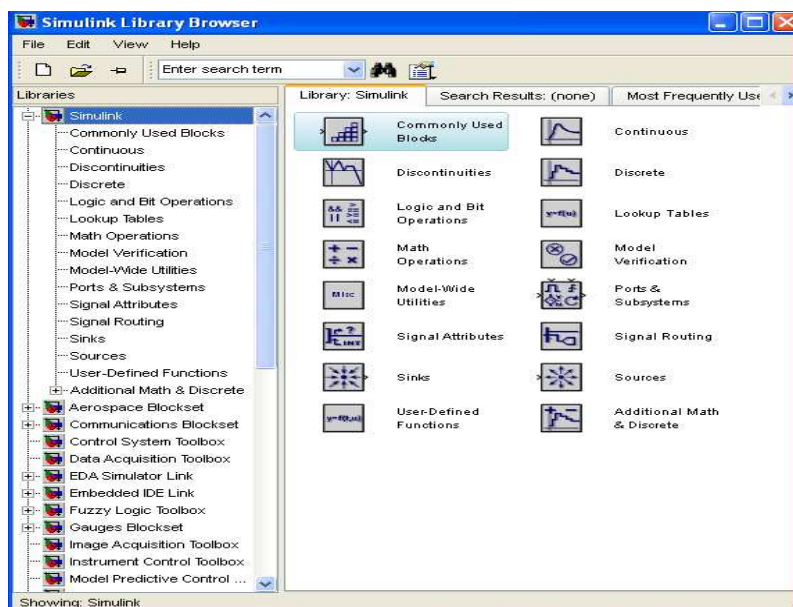
γραφικών παραστάσεων που δείχνουν τη συμπεριφορά της προσομοίωσης κάτι που μας βοηθά στην κατανόηση της συμπεριφοράς του φυσικού συστήματος.

Το Simulink όπως αναφέραμε είναι ενσωματωμένο με το MatLab και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει άμεση πρόσβαση μεταξύ των δύο με αποτέλεσμα να μεγαλώνει το φάσμα των λειτουργιών που μπορεί να εκτελέσει. Στο πρόγραμμα υπάρχει μια βιβλιοθήκη με ποικιλία μπλοκ διαγραμμάτων για το σχεδιασμό, την προσομοίωση, την εφαρμογή και δοκιμή χρονικών μεταβαλλόμενων σημάτων εισόδου αλλά και δυνατότητα παρακολούθησης της εξόδου των συστημάτων κάτι που το καθιστά ένα πάρα πολύ καλό εργαλείο για την ανάλυση συστημάτων αυτόματου ελέγχου.

Για να εκκινήσουμε το πρόγραμμα του Simulink υπάρχουν δύο τρόποι:

- Στο παράθυρο εντολών του MatLab πληκτρολογούμε την εντολή Simulink και πατάμε το πλήκτρο enter,
- Ο δεύτερος τρόπος είναι να πατήσουμε με τον κέρσορα στο εικονίδιο του Simulink που βρίσκεται στην γραμμή εργαλείων του MatLab. Οι δύο αυτοί τρόποι παρουσιάζονται στην εικόνα .

Όταν ενεργοποιηθεί το πρόγραμμα του Simulink θα εμφανιστεί στην οθόνη μας το πρόγραμμα περιήγησης Simulink που είναι το εξής παράθυρο:



Το παράθυρο παρατηρούμε ότι έχει δομή δέντρου και είναι το βασικό παράθυρο αναζήτησης αντικειμένων των βιβλιοθηκών του Simulink που είναι εγκατεστημένες στον υπολογιστή. Από όλες αυτές τις βιβλιοθήκες που παρουσιάζονται στο παράθυρο εμείς θα χρησιμοποιήσουμε κατά κύριο την βιβλιοθήκη που φαίνεται στην Εικόνα επιλεγμένη μέσα σε μπλε πλαίσιο με την ονομασία Simulink. Βλέπουμε ότι περιέχει 16 υποκατηγορίες που περιέχουν μπλοκ διαγράμματα υπεραρκετά για τα μοντέλα που θα σχεδιάσουμε τόσο στα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου I αλλά και στα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου II. Για να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο υπάρχουν δύο τρόποι:

- Στο menu εντολών του παραθύρου περιήγησης βιβλιοθηκών Simulink επιλέγουμε File — New — Model και στην συνέχεια ανοίγει ένα μικρότερο παράθυρο μέσα στο οποίο σχεδιάζουμε το μοντέλο.

- Στο παράθυρο περιήγησης βιβλιοθηκών Simulink στη γραμμή εργαλείων και ακριβώς κάτω από την επιλογή File του menu εντολών υπάρχει ένα εικονίδιο μιας λευκής σελίδας, πατάμε αυτό το εικονίδιο και ανοίγει το παράθυρο σχεδίασης.

Ένα μοντέλο είναι ένα σύνολο από μπλοκ διαγράμματα που θα πρέπει να αντιπροσωπεύει σε γενικές γραμμές το σύστημα που θέλουμε να προσομοιώσουμε. Για να μεταφέρουμε στο νέο παράθυρο σχεδίασης μοντέλου τα μπλοκ διαγράμματα που επιθυμούμε είτε τα μετακινούμε με το ποντίκι από τη βιβλιοθήκη του Simulink είτε επιλέγοντας τα με δεξί κλικ στο ποντίκι επιλέγουμε την εντολή 'Add to untitled'. 'Untitled' είναι η ονομασία που δίνει το πρόγραμμα σε ένα μοντέλο που δεν έχουμε ακόμα ονομάσει, σε περίπτωση που ήδη έχουμε αποθηκεύσει το μοντέλο μας τότε στη θέση του 'untitled' θα υπάρχει η ονομασία που έχουμε δώσει στο μοντέλο μας.

2.5. Μαθηματικά Μοντέλα

Κατά τη μελέτη, την ανάλυση και το σχεδιασμό συστημάτων αυτόματου ελέγχου χρησιμοποιούμε μαθηματικά μοντέλα που αντικαθιστούν τα διάφορα φυσικά πολύπλοκα συστήματα. Η συμπεριφορά των φυσικών συστημάτων μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια διαφορικών εξισώσεων επειδή τα διάφορα συστήματα που μας απασχολούν είναι συνήθως δυναμικά συστήματα. Οι

διαφορικές εξισώσεις, που χρησιμοποιούμε στο ισοδύναμο μοντέλο του συστήματος που θέλουμε να μελετήσουμε, καταγράφονται με τη βοήθεια των φυσικών νόμων που διέπουν τη λειτουργία του συστήματος. Στη συνέχεια με διάφορα μαθηματικά εργαλεία βρίσκουμε μια λύση η οποία μας περιγράφει μαθηματικά τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί το σύστημα. Η διαδικασία με την οποία μελετάμε τα διάφορα δυναμικά συστήματα αποτελείται από τα εξής βήματα :

1. Ορίζουμε το σύστημα και τα στοιχεία που το αποτελούν.
2. Ορίζουμε το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος.
3. Διατυπώνουμε τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία του συστήματος.
4. Εξετάζουμε και μελετάμε τις λύσεις.
5. Αν δεν μας ικανοποιούν οι λύσεις και θεωρηθεί αναγκαίο αναλύουμε και επανασχεδιάζουμε το σύστημα από την αρχή.

Τα περισσότερα φυσικά συστήματα είναι γραμμικά. Γραμμικό θεωρούμε ένα σύστημα το οποίο ικανοποιεί τις αρχές της ομογένειας και της επαλληλίας. Παρά το γεγονός ότι τα περισσότερα συστήματα είναι γραμμικά σχεδόν όλα συμπεριφέρονται μη γραμμικά όταν οι μεταβλητές που επηρεάζουν τα συστήματα αυξάνονται απεριόριστα. Ένα πολύ χρήσιμο μαθηματικό εργαλείο για τη μελέτη και τη σχεδίαση γραμμικών μη χρονικά μεταβαλλόμενων συστημάτων, με τα οποία θα ασχοληθούμε κατά τη διάρκεια του μαθήματος, είναι ο μετασχηματισμός Laplace. Ο μετασχηματισμός Laplace μας βοηθά στην ευκολότερη επίλυση των εξισώσεων του μαθηματικού μοντέλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1. Μετασχηματισμός Laplace

Ο μετασχηματισμός Laplace ανάγει την λύση μίας δύσκολης γραμμικής διαφορικής εξίσωσης με σταθερούς συντελεστές σε λύση μιας αλγεβρικής εξίσωσης. Αυτό επιτυγχάνεται παίρνοντας τις διαφορικές εξισώσεις του μοντέλου που μελετάμε και υπολογίζουμε τον αντίστοιχο μετασχηματισμό Laplace των εξισώσεων αυτών, από αυτή τη διαδικασία προκύπτουν αλγεβρικές εξισώσεις τις οποίες επιλύουμε ως προς τη μεταβλητή που μας απασχολεί. Ο μετασχηματισμός Laplace μας δίνει τη δυνατότητα να αλλάξουμε το πεδίο ορισμού μιας συνάρτησης, μας επιτρέπει δηλαδή μια συνάρτηση του χρόνου $f(t)$ να τη μεταβάλλουμε σε συνάρτηση της μιγαδικής συχνότητας $f(s)$. Αυτό μας επιτρέπει να μελετήσουμε τη συνάρτηση ενός συστήματος και στο πεδίο του χρόνου αλλά και στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας και να λάβουμε περισσότερες πληροφορίες και συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της συνάρτησης άρα και του συστήματος.

Ο μετασχηματισμός Laplace μιας συνάρτησης $f(t)$ ορίζεται ως:

$$F_{(s)} = L \{ f_{(t)} \} = \int_0^{\infty} f_{(t)} e^{-st} dt$$

Όπου, $F(s)$ είναι η συνάρτηση στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας, $f(t)$ είναι η συνάρτηση στο πεδίο του χρόνου, $L \{ \}$ συμβολίζει το μετασχηματισμό Laplace και

s είναι η μιγαδική μεταβλητή που ισούται με $s = \sigma + j \omega$ όπου σ πεπερασμένος θετικός αριθμός.

3.2. Μετασχηματισμός Laplace – MatLab

Ο λόγος που χρησιμοποιούμε τον μετασχηματισμό Laplace στα συστήματα αυτόματου ελέγχου είναι ότι μπορούμε να δημιουργήσουμε μια συνάρτηση η οποία να εκφράζει τη λειτουργία του συστήματος στο πεδίο της συχνότητας και εμείς να τη μετατρέψουμε στο πεδίο του χρόνου και να μας επιστρέψει το MatLab γράφημα με τη συμπεριφορά του συστήματος σε χρονική περίοδο που εμείς έχουμε ορίσει. Μέσω αυτών των γραφημάτων μπορούμε να βγάλουμε

ασφαλή συμπεράσματα για τη λειτουργία του πραγματικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

3.3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

Εισαγωγή

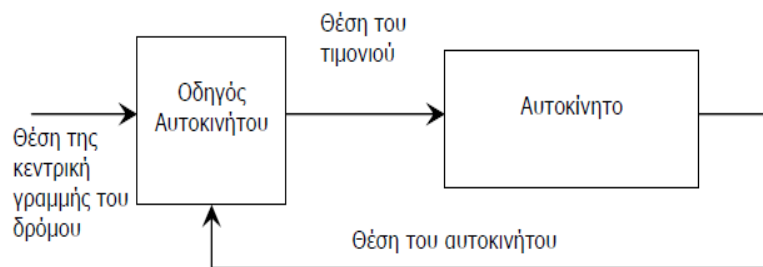
Οποιοδήποτε σύστημα ελέγχου μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων οι οποίες προσδιορίζουν τα χαρακτηριστικά του κάθε εξαρτήματος που περιλαμβάνει. Μια μεγάλη ποικιλία από προβλήματα ελέγχου τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν ή να επηρεάζουν διαδικασίες, εργαλειομηχανές, σερβομηχανισμούς, διαστημόπλοια, συγκοινωνίες, οικονομικά και άλλα, μπορούν να αναλυθούν με τις ίδιες μαθηματικές μεθόδους. Το σημαντικό χαρακτηριστικό του κάθε εξαρτήματος είναι κατά πόσο αυτό επηρεάζει το σύστημα. Το Μπλοκ Διαγράμματα (Block Diagrams), είναι μία μέθοδος αναπαράστασης ενός συστήματος ελέγχου η οποία επικεντρώνεται κυρίως σε αυτό το γνώρισμα του κάθε εξαρτήματος. Γραμμές σημάτων αναπαριστούν τα σήματα εισόδου και εξόδου των εξαρτημάτων. Κάθε εξάρτημα λαμβάνει ένα σήμα εισόδου από κάποιο μέρος του συστήματος και παράγει το σήμα εξόδου για κάποιο άλλο μέρος του συστήματος. Τα σήματα μπορεί να είναι ηλεκτρικά, ρεύματος, τάσης, πίεσης αέρα, ροής υγρών, θερμοκρασίας, ταχύτητας, επιτάχυνσης, θέσης, κατεύθυνσης και άλλα, καθώς επίσης και οι διαδρομές που αυτά ακολουθούν μπορεί να είναι ηλεκτρικά καλώδια, υδραυλικοί σωλήνες, μηχανικοί σύνδεσμοι κ.λ.π.

3.4. Μπλοκ Διαγράμματα (BLOCK DIAGRAMS)

Ένα μπλοκ διάγραμμα αποτελείται από ένα τετράγωνο που αντιπροσωπεύει το κάθε εξάρτημα σε ένα σύστημα ελέγχου και συνδέεται με γραμμές οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις διαδρομές των σημάτων. Το παρακάτω σχήμα αναπαριστά ένα πολύ απλό μπλοκ διάγραμμα ενός ατόμου που οδηγεί ένα αυτοκίνητο. Η αίσθηση της όρασης του οδηγού μας δίνει τα δύο σήματα εισόδου: την θέση του αυτοκινήτου και την θέση του κέντρου του δρόμου. Ο οδηγός συγκρίνει αυτές τις δύο θέσεις και καθορίζει την θέση του τιμονιού το οποίο θα δώσει τη σωστή θέση στο όχημα.

Την εφαρμογή της απόφασης αναλαμβάνουν τα χέρια του οδηγού και κατευθύνουν το τιμόνι στη σωστή θέση. Το όχημα ανταποκρίνεται στην αλλαγή της θέσης του τιμονιού με την αντίστοιχη αλλαγή της κατεύθυνσής του. Αφού περάσει ένα μικρό χρονικό διάστημα, η νέα κατεύθυνση μετακινεί το όχημα στη νέα του θέση. Έτσι διαπιστώνουμε ότι υπάρχει μια καθυστέρηση ανάμεσα στην αλλαγή της θέσης του τιμονιού και την θέση του αυτοκινήτου. Η καθυστέρηση αυτή περιλαμβάνεται στην μαθηματική εξίσωση του μπλοκ που αναπαριστά το αυτοκίνητο.

Η γραμμή που κλείνει τον κύκλο (loop) του σήματος στο μπλοκ διάγραμμα μαρτυρά μία θεμελιώδη έννοια ελέγχου. Η πραγματική θέση του αυτοκινήτου χρησιμοποιείται σαν σήμα εισόδου για να καθοριστεί η απαραίτητη διόρθωση ώστε να διατηρηθεί η επιθυμητή θέση. Η έννοια αυτή λέγεται ανάδραση (feedback), και τα συστήματα ελέγχου με ανάδραση λέγονται και συστήματα ελέγχου κλειστού βρόγχου.



ΣΧΗΜΑ:ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΝΟΣ ΑΤΟΜΟΥ ΠΟΥ ΟΔΗΓΕΙ ΕΝΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ

3.5. Συνάρτηση Μεταφοράς

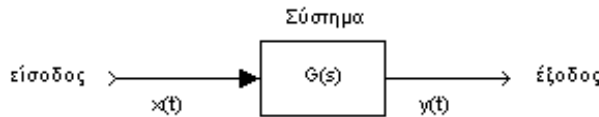
Κατά τη μελέτη των συστημάτων ελέγχου χρησιμοποιούνται συχνά οι συναρτήσεις μεταφοράς που χαρακτηρίζουν τις σχέσεις εισόδου-εξόδου των συστημάτων.

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.

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος ορίζεται ως ο λόγος μετασχηματισμού Laplace της μεταβλητής που εκφράζει την έξοδο $y_{(t)}$ προς τον μετασχηματισμό Laplace της μεταβλητής που εκφράζει την είσοδο $x_{(t)}$, 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. Η συνάρτηση συμβολίζεται συνήθως με κεφαλαίο γράμμα του αγγλικού αλφαβήτου σε μορφή συνάρτησης τη μιγαδικής συχνότητας π.χ. $G_{(s)}$.

Αν θεωρήσουμε το σύστημα του παρακάτω σχήματος:



Τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος θα είναι:

$$G_{(s)} = \frac{L\{y_{(t)}\}}{L\{x_{(t)}\}} = \frac{Y_{(s)}}{X_{(s)}}$$

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-άγνωστο 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.

Τα γραμμικά χρονικά αμετάβλητα συστήματα, μπορούν να περιγραφούν από γραμμικές συναρτήσεις της μορφής:

$$a_i \frac{d^i c_{(t)}}{dt^i} + a_{i-1} \frac{d^{i-1} c_{(t)}}{dt^{i-1}} + \dots + a_0 c_{(t)} = b_k \frac{d^k r_{(t)}}{dt^k} + b_{k-1} \frac{d^{k-1} r_{(t)}}{dt^{k-1}} + \dots + b_0 r_{(t)}$$

Όπου $c_{(t)}$ η συνάρτηση εξόδου και $r_{(t)}$ η συνάρτηση εισόδου, με χρήση του μετασχηματισμού Laplace η παραπάνω διαφορική μετατρέπεται:

$$\begin{aligned} a_i s^i c_{(s)} + a_{i-1} s^{i-1} c_{(s)} + \dots + a_0 c_{(s)} &= b_k s^k R_{(s)} + b_{k-1} s^{k-1} R_{(s)} + \dots + b_0 R_{(s)} \rightarrow \\ \rightarrow (a_i s^i + a_{i-1} s^{i-1} + \dots + a_0) c_{(s)} &= (b_k s^k + b_{k-1} s^{k-1} + \dots + b_0) R_{(s)} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{C_{(s)}}{R_{(s)}} &= \frac{a_i s^i + a_{i-1} s^{i-1} + \dots + a_0}{b_k s^k + b_{k-1} s^{k-1} + \dots + b_0} \end{aligned}$$

Ο παραπάνω λόγος εξόδου-εισόδου στην πραγματικότητα μας δίνει τη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος οπότε η συνάρτηση μεταφοράς από μαθηματική άποψη είναι ένας πίνακας i γραμμών και k στηλών με στοιχεία ρητές συναρτήσεις με μεταβλητή τη μιγαδική συχνότητα s που έχουν βαθμό αριθμητή μέχρι και ίσο με τον βαθμό του παρανομαστή δηλαδή $i \leq k$.

Η εντολή με την οποία ορίζουμε στο περιβάλλον του MatLab μια συνάρτηση μεταφοράς είναι η `tf` η οποία προέρχεται από τα αρχικά της αγγλικής φράσης *transfer function* που μεταφράζεται συνάρτηση μεταφοράς. Η σύνταξή της είναι η ακόλουθη:

$$G = tf([num],[den])$$

Όπου, num πολυώνυμο με τους σταθερούς όρους του αριθμητή και den πολυώνυμο με τους σταθερούς όρους του παρανομαστή.

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος είναι ο λόγος δύο πολυωνύμων του αριθμητή και του παρανομαστή, οι ρίζες των πολυωνύμων αυτών έχουν σημασία στην ανάλυση των συστημάτων αυτόματου ελέγχου. Η ευστάθεια ενός συστήματος και η ταχύτητα απόκρισης, είναι κάποια από τα χαρακτηριστικά του συστήματος που επηρεάζονται από τις ρίζες αυτών των δύο πολυωνύμων. Οι ρίζες του αριθμητή ονομάζονται μηδενικά της συνάρτησης μεταφοράς ή του συστήματος ενώ οι ρίζες του παρανομαστή ονομάζονται πόλοι της συνάρτησης μεταφοράς ή του συστήματος.


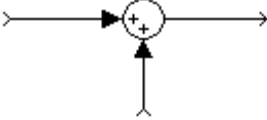
Η τιμή της συνάρτησης μεταφοράς ενός συστήματος για $s=0$ ονομάζεται συνεχές κέρδος (dc-gain) και τις περισσότερες φορές είναι μεγαλύτερο από τη μονάδα.

Τέλος από τη συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος εντοπίζεται και η τάξη του συστήματος. Η τάξη του συστήματος δίνεται από τη μεγαλύτερη δύναμη στην οποία είναι υψωμένη η μιγαδική συχνότητα s στο πολυώνυμο του παρανομαστή, στην ουσία η τάξη ενός συστήματος μας δίνει τον αριθμό των πόλων του συστήματος.

3.6. 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. Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός δομικού διαγράμματος ή διαγράμματος βαθμίδων είναι τα εξής.

ΒΑΣΙΚΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΜΙΚΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	
	<p>Η βαθμίδα που σχεδιάζεται ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και αντιστοιχεί σε ένα σύστημα στο οποίο δρα ένα σήμα εισόδου και ένα σήμα εξόδου που απορρέει.</p>
	<p>Ο κύκλος που συνοδεύεται από κατάλληλο αριθμό πρόσημων και σημάτων που καταλήγουν σε αυτόν ονομάζεται σημείο άθροισης(μπορεί όμως να πραγματοποιηθεί και αφαίρεση σημάτων).</p>
	<p>Σημείο λήψης</p>

Είναι φανερό ότι σε ένα διάγραμμα βαθμίδων τα βέλη αντιπροσωπεύουν την κατεύθυνση ροής του σήματος. Στα 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 εξόδου 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. Στα 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

3.7. Συστήματα Αυτόματου ελέγχου ανοιχτού και κλειστού βρόγχου

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.

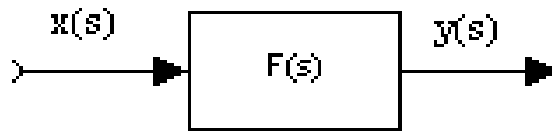
Τα κλειστά συστήματα διαφέρουν από τα ανοικτά συστήματα στην αρχή λειτουργίας τους και η διαφορά αυτή οφείλεται στη λήψη πληροφοριών από την έξοδο στην είσοδο του συστήματος. Επειδή η επιθυμητή απόκριση ενός συστήματος κλειστού βρόγχου είναι γνωστή η έξοδος της ελεγχόμενης

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.

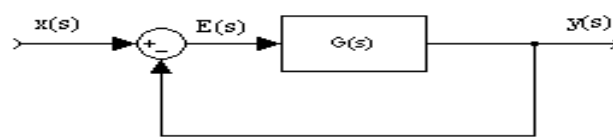
Τα κλειστά συστήματα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις αυτοματισμού είναι μεγάλες ενώ τα ανοικτά συστήματα χρησιμοποιούνται σε απλές περιπτώσεις αυτοματισμού. Για τον παραπάνω λόγο τα κλειστά συστήματα είναι πιο πολύπλοκα στη σχεδίαση και στην υλοποίηση από τα ανοικτά. Στα ανοικτά που 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 ανοικτού 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 $\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)}$. Το σύστημα αυτό ονομάζεται και σύστημα μοναδιαίας ανάδρασης αφού η ανάδραση που έχουμε είναι ίση με τη μονάδα. Η συνάρτηση μεταφοράς προκύπτει από τα εξής:

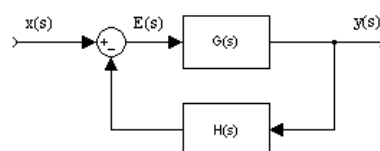
$$\begin{aligned} \frac{y(s)}{E(s)} &= G(s) \rightarrow y(s) = G(s) * E(s) \rightarrow y(s) = G(s) * (x(s) - y(s)) \rightarrow \\ \rightarrow y(s) &= G(s) * x(s) - G(s) * y(s) \rightarrow y(s) + G(s) * y(s) = G(s) * x(s) \rightarrow \\ \rightarrow (1+G(s)) * y(s) &= G(s) * x(s) \rightarrow y(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} * x(s) \rightarrow \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)} \end{aligned}$$

Το σήμα σφάλματος του παραπάνω κλειστού βρόγχου,

$$E(s) = \frac{1}{1+G(s)} * x(s)$$

Οπότε για να ελαχιστοποιήσουμε το σήμα σφάλματος θα πρέπει $(1+G(s)) > 1$ για όλες τις τιμές της μιγαδικής συχνότητας s .

Εκτός από τη μοναδιαία ανάδραση έχουμε και τη μορφή ανάδρασης που παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Με συνάρτηση μεταφοράς $\frac{y_{(s)}}{x_{(s)}} = \frac{G_{(s)}}{1 + H_{(s)} * G_{(s)}}$ το οποίο αποδεικνύεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{y_{(s)}}{E_{(s)}} = G_{(s)} &\rightarrow y_{(s)} = G_{(s)} * E_{(s)} \rightarrow y_{(s)} = G_{(s)} * (x_{(s)} - H_{(s)} * y_{(s)}) \rightarrow \\ \rightarrow y_{(s)} &= G_{(s)} * x_{(s)} - G_{(s)} * H_{(s)} * y_{(s)} \rightarrow y_{(s)} + G_{(s)} * H_{(s)} * y_{(s)} = G_{(s)} * x_{(s)} \rightarrow \\ \rightarrow (1 + G_{(s)} * H_{(s)}) * y_{(s)} &= G_{(s)} * x_{(s)} \rightarrow y_{(s)} = \frac{G_{(s)}}{1 + H_{(s)} * G_{(s)}} * x_{(s)} \rightarrow \\ \rightarrow \frac{y_{(s)}}{x_{(s)}} &= \frac{G_{(s)}}{1 + H_{(s)} * G_{(s)}} \end{aligned}$$

Σε αυτή τη περίπτωση το σήμα σφάλματος είναι,

$$E_{(s)} = \frac{1}{1 + H_{(s)} * G_{(s)}} * x_{(s)}$$

Επομένως για να ελαχιστοποιήσουμε το σήμα σφάλματος θα πρέπει $1 + H_{(s)} * G_{(s)} \gg 1$.

Στη συνέχεια ακολουθεί πίνακας με τους πιο σημαντικούς μετασχηματισμούς δομικών διαγραμμάτων.

ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΔΟΜΙΚΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		

3.8. Χρονική απόκριση Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου

Με τον όρο χρονική απόκριση ενός συστήματος εννοούμε τη συμπεριφορά του συστήματος με τη πάροδο του χρόνου σε μια συγκεκριμένη είσοδο. Μπορούμε δηλαδή αν μας δίνεται ένα σύστημα περιγραφόμενο από την συνάρτηση μεταφοράς του και μας δοθεί η είσοδος $X_{(t)}$ ως συνάρτηση του χρόνου να υπολογιστεί η έξοδος $y_{(t)}$.

Η χρονική απόκριση ενός συστήματος ελέγχου αποτελείται από δύο μέρη: Την μεταβατική απόκριση (transient response) και την απόκριση μόνιμης κατάστασης (steady state response).

Με τον όρο μεταβατική εννοούμε την απόκριση του συστήματος αμέσως μετά τη διέγερση του και πριν από τη σταθεροποίηση της εξόδου του, είναι δηλαδή το μέρος εκείνο της απόκρισης που τείνει στο μηδέν καθώς ο χρόνος μεγαλώνει.

Με τον όρο μόνιμη απόκριση εννοούμε το μέρος της απόκρισης το οποίο εμφανίζεται αφού πρώτα έχει εξασθενήσει το μεταβατικό μέρος. Η μόνιμη απόκριση μπορεί να είναι μια σταθερά, μια ταλάντωση με σταθερό πλάτος, μια συνάρτηση που αυξάνει με το χρόνο κ.λπ.

Επειδή τα περισσότερα συστήματα είναι από τη φύση τους δυναμικά, η αντίστοιχη συμπεριφορά τους καθορίζεται συνήθως συναρτήσει τόσο της μεταβατικής τους απόκρισης, όσο και της απόκρισης τους στη μόνιμη κατάσταση.

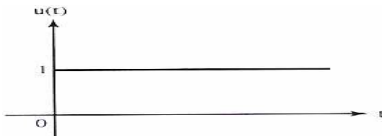

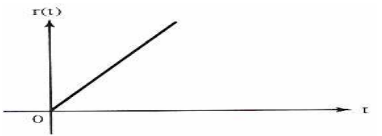
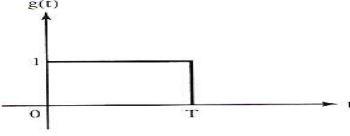
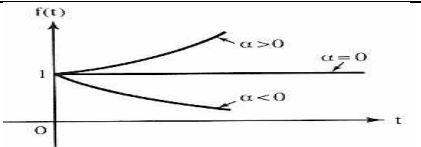
Οι προδιαγραφές της συμπεριφοράς ενός συστήματος που ορίζονται στο πεδίο του χρόνου αποτελούν πολύ σημαντικές παραμέτρους επειδή τα διάφορα συστήματα ελέγχου είναι από την ίδια τους την φύση συστήματα που λειτουργούν στο πεδίο του χρόνου. Αυτό σημαίνει ουσιαστικά ότι η χρονική απόκριση ενός συστήματος είναι κατά κύριο λόγο εκείνο το χαρακτηριστικό που μας ενδιαφέρει περισσότερο. Η απόκριση ενός συστήματος σε ένα σήμα εισόδου μας παρέχει πολλές πληροφορίες σχετικά με την γενικότερη συμπεριφορά του συστήματος.

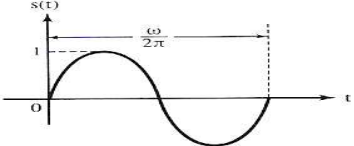
3.9. Τυποποιημένα Σήματα Εισόδου

Επειδή η πραγματική μορφή των διαφόρων σημάτων εισόδου μας είναι συνήθως άγνωστη, χρησιμοποιούμε κάποια τυποποιημένα σήματα διέγερσης. Στα συνηθέστερα σήματα διέγερσης είναι η συνάρτηση βαθμίδας, η συνάρτηση αναρρίχησης, η κρουστική συνάρτηση, η εκθετική συνάρτηση και η ημιτονοειδής συνάρτηση.

Η μέθοδος χρήσης τυποποιημένων σημάτων είναι αρκετά χρήσιμη αφού μας προσδίδει σε μεγάλο βαθμό μια συσχέτιση μεταξύ της απόκρισης ενός συστήματος στην τυποποιημένη διέγερση και της ικανότητας λειτουργίας του συστήματος υπό κανονικές συνθήκες επομένως μας επιτρέπει να συγκρίνουμε διάφορες σχεδιαστικές προτάσεις για το ίδιο σύστημα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τυποποιημένα σήματα εισόδου, οι γραφικές τους παραστάσεις και οι μετασχηματισμοί Laplace.

ΣΗΜΑ	ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ	ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ Laplace
Μοναδιαία Βηματική συνάρτηση $u(t)$		$U_{(s)} = \frac{1}{s}$
Μοναδιαία Κρουστική συνάρτηση $\delta(t)$		$D_{(s)} = 1$
Μοναδιαία συνάρτηση Αναρρίχησης $r(t)$		$R_{(s)} = \frac{1}{s^2}$
Μοναδιαίος Παλμός $y(t)$		$Y_{(s)} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s} * e^{-Ts}$
Εκθετική συνάρτηση $y(t)$		$Y_{(s)} = \frac{1}{s - a}$

Ημιτονοειδής συνάρτηση $y(t)$		$Y_{(s)} = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
-------------------------------------	---	---

3.10. Χαρακτηριστικά της γραφικής παράστασης της χρονικής απόκρισης

Τα χαρακτηριστικά της γραφικής παράστασης της χρονικής απόκρισης είναι τα στοιχεία αυτά τα οποία μας δίνουν μια εποπτική εικόνα της συμπεριφοράς του συστήματος, τα οποία είναι τα εξής:

➤ **Μέγιστη υπερύψωση(Mp):** Είναι η διαφορά της μέγιστης τιμής και της τελικής τιμής της εξόδου και συνηθίζεται να εκφράζεται σε ποσοστό επί τις εκατό. Έστω y_m η μέγιστη τιμή της εξόδου και y_f η τελική τιμή της εξόδου

τότε το ποσοστό υπερύψωσης ορίζεται:
$$M_p = \frac{y_m - y_f}{y_f} * 100\%$$

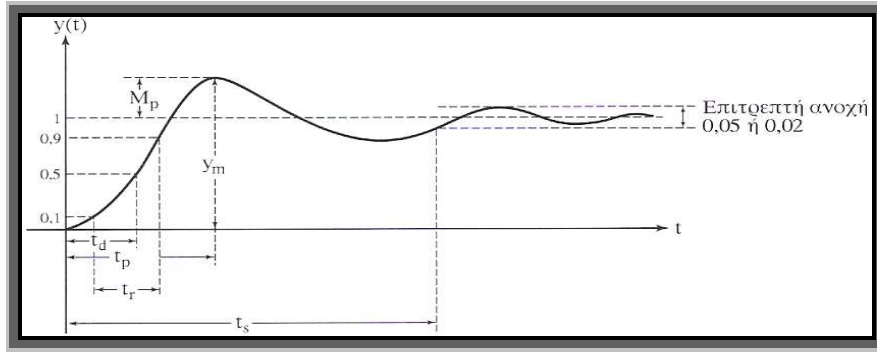
➤ **Χρόνος ανύψωσης (tr, rise time):** Είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να ανέλθει η απόκριση από το 10% στο 90% της τελικής της τιμής.

➤ **Χρόνος κορυφής (tp, peak time):** Είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει η απόκριση στην μέγιστη τιμή της εξόδου.

➤ **Χρόνος αποκατάστασης (ts ,settling time):** Είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει και να παραμείνει η καμπύλη απόκρισης ανάμεσα στο $\pm 2\%$ ή στο $\pm 5\%$ της τελικής τιμής.

➤ **Χρόνος καθυστέρησης (td, delay time):** Είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει η απόκριση για πρώτη φορά το 50% της τελικής τιμής.

Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε μια γενική μορφή της απόκρισης ενός γραμμικού συστήματος, στο οποίο παριστάνονται και τα χαρακτηριστικά της γραφικής παράστασης της χρονικής απόκρισης.



3.11. Βηματική απόκριση

Θα χρησιμοποιούμε τον όρο βηματική απόκριση όταν θα θέλουμε να υπολογίσουμε την έξοδο-απόκριση ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου το οποίο διεγείρουμε με σήμα εισόδου τη μοναδιαία βηματική συνάρτηση. Δηλαδή αν $G_{(s)}$ η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος τότε η βηματική απόκριση του θα ισούται με:

$$G_{(s)} = \frac{Y_{(s)}}{X_{(s)}} \rightarrow Y_{(s)} = \frac{G_{(s)}}{s} \rightarrow y_{(t)} = L^{-1}\left\{\frac{G_{(s)}}{s}\right\}$$

Εκτός από το να υπολογίζουμε την απόκριση του συστήματος το MatLab μας δίνει τη δυνατότητα με την εντολή step και να τη σχεδιάσουμε. Για το παράδειγμα που χρησιμοποιήσαμε παραπάνω σχεδιάζουμε την βηματική απόκριση του συστήματος με τις παρακάτω εντολές (για σταθερά χρόνου T=2).

```
G=tf([1],[2 1])

Transfer function:
      1
-----
 2 s + 1

step(G);grid on;
```

3.12. Κρουστική απόκριση

Θα χρησιμοποιούμε τον όρο κρουστική απόκριση όταν θα θέλουμε να υπολογίσουμε την έξοδο-απόκριση ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου το οποίο διεγείρουμε με σήμα εισόδου τη μοναδιαία κρουστική συνάρτηση. Αν

$G_{(s)}$ η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος τότε η κρουστική απόκριση του

θα ισούται με:

$$G_{(s)} = \frac{Y_{(s)}}{X_{(s)}} \rightarrow Y_{(s)} = \frac{G_{(s)}}{1} \rightarrow y_{(t)} = L^{-1}\{G_{(s)}\}$$

Στη ουσία η κρουστική απόκριση ενός συστήματος είναι ο αντίστροφος μετασχηματισμός Laplace της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος.

Όπως και με τη βηματική το MatLab μας δίνει τη δυνατότητα με την εντολή `impulse` και να τη σχεδιάσουμε. Ομοίως για το παράδειγμα που χρησιμοποιήσαμε παραπάνω σχεδιάζουμε την κρουστική απόκριση του συστήματος με τις παρακάτω εντολές (για σταθερά χρόνου T=2).

```
G=tf([1],[2 1]);
impulse(G);grid on;
```

3.13. Απόκριση Γενικά

Σε παράδειγμα που αναφέρθηκε είδαμε πως μπορούμε να υπολογίσουμε την έξοδο-απόκριση του συστήματος για οποιοδήποτε σήμα εισόδου. Αν όμως επιθυμούμε να σχεδιάσουμε την απόκριση του συστήματος για οποιοδήποτε σήμα εισόδου εκτός της μοναδιαίας βηματικής και κρουστικής συνάρτησης το MatLab μας δίνει τη δυνατότητα αυτή με τη χρήση της εντολής `lsim`. Η ιδιαιτερότητα αυτής της εντολής σε σχέση με τις προηγούμενες δύο είναι ότι δεν αρκεί να γνωρίζουμε μόνο την συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος. Θα πρέπει να γνωρίζουμε και την είσοδο την οποία θα εισάγουμε με τη μορφή διανύσματος (σ' αυτό χρησιμεύουν τα βασικά σήματα) και θα πρέπει να δηλώσουμε και το χρονικό ορίζοντα της απόκρισης κάτι που στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις το MatLab έκανε αυτόματα. Η εντολή έχει την εξής μορφή `lsim(G,u,T)` όπου G η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος του οποίου θέλουμε να σχεδιάσουμε την απόκριση, u το διάνυσμα εισόδου και T ο χρονικός ορίζοντας. Σύμφωνα με τη μοναδιαία συνάρτηση αναρρίχησης και για σταθερό χρόνο ίση με 2, θα σχεδιάζαμε την απόκριση του συστήματος με τις εξής εντολές:

```
G=tf([1],[2 1]);
T=0:0.1:15;
u=T;
lsim(G,u,T);grid on;
```

3.14. Σφάλματα Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου

Ένας σημαντικός παράγοντας στη λειτουργία και την ανάλυση των συστημάτων αυτόματου ελέγχου είναι το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι το σφάλμα που εμφανίζεται στην έξοδο του συστήματος μετά τη πάροδο της μεταβατικής απόκρισης του συστήματος.

Το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ενός συστήματος ανοιχτού βρόχου με συνάρτηση μεταφοράς $G_{(s)}$ είναι:

$$E_{(s)} = X_{(s)} - Y_{(s)} \rightarrow E_{(s)} = X_{(s)} - G_{(s)} * X_{(s)} \rightarrow E_{(s)} = X_{(s)} * (1 - G_{(s)})$$

Για να υπολογίσουμε τη τιμή του σφάλματος χρησιμοποιούμε το θεώρημα τελικής τιμής και είσοδο μοναδιαία βηματική συνάρτηση επομένως:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} e_{(t)} &= \lim_{s \rightarrow 0} (s * E_{(s)}) \rightarrow e_{(\infty)} = \lim_{s \rightarrow 0} (s * X_{(s)} * (1 - G_{(s)})) \rightarrow \\ &\rightarrow e_{(\infty)} = \lim_{s \rightarrow 0} (s * \frac{1}{s} * (1 - G_{(s)})) \rightarrow e_{(\infty)} = \lim_{s \rightarrow 0} ((1 - G_{(s)})) \rightarrow \\ &\rightarrow e_{(\infty)} = 1 - G_{(0)} \end{aligned}$$

Η τιμή της συνάρτησης μεταφοράς για $s = 0$, είναι συνήθως μεγαλύτερη από τη μονάδα οπότε το σύστημα παρουσιάζει μια αξιοπρόσεκτη τιμή σφάλματος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Όμως αν ρυθμίσουμε κατάλληλα τον όρο $G_{(0)}$ έτσι ώστε να είναι ίσος με τη μονάδα μπορεί το σύστημα ανοιχτού βρόχου να παρουσιάσει μηδενικό σφάλμα. Σε ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο με μεταβολή των παραμέτρων της συνάρτησης μεταφοράς οπότε σε περίπτωση πιθανών εξωτερικών μεταβολών-διαταραχών που επηρεάζουν το σύστημα κατά τη λειτουργία του, κάποια στιγμή η τιμή του

όρου $G_{(0)}$ δεν θα είναι ίση με τη μονάδα οπότε το σφάλμα πάλι δε θα είναι μη μηδενικό έως να μεταβάλλουμε πάλι τις παραμέτρους της συνάρτησης μεταφοράς.

Ακολουθώντας όμοια μέθοδο με τα συστήματα ανοιχτού βρόγχου στα συστήματα κλειστού βρόγχου το σφάλμα μόνιμης κατάστασης λειτουργίας ισούται (για μοναδιαίο κλάδο ανάδραση):

$$\begin{aligned} E_{(s)} = X_{(s)} - Y_{(s)} &\rightarrow E_{(s)} = X_{(s)} - \frac{G_{(s)}}{1+G_{(s)}} * X_{(s)} \rightarrow E_{(s)} = X_{(s)} * \left(1 - \frac{G_{(s)}}{1+G_{(s)}}\right) \rightarrow \\ &\rightarrow E_{(s)} = X_{(s)} * \left(\frac{1+G_{(s)} - G_{(s)}}{1+G_{(s)}}\right) \rightarrow E_{(s)} = X_{(s)} * \frac{1}{1+G_{(s)}} \end{aligned}$$

Με το θεώρημα τελικής τιμής και είσοδο μοναδιαία βηματική συνάρτηση υπολογίζουμε το σφάλμα:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} e_{(t)} = \lim_{s \rightarrow 0} (s * E_{(s)}) &\rightarrow e_{(\infty)} = \lim_{s \rightarrow 0} \left(s * X_{(s)} * \frac{1}{1+G_{(s)}}\right) \rightarrow \\ &\rightarrow e_{(\infty)} = \lim_{s \rightarrow 0} \left(s * \frac{1}{s} * \frac{1}{1+G_{(s)}}\right) \rightarrow e_{(\infty)} = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{1}{1+G_{(s)}}\right) \rightarrow \\ &\rightarrow e_{(\infty)} = \frac{1}{1+G_{(0)}} \end{aligned}$$

Αντίθετα με τα συστήματα ανοιχτού βρόγχου τα συστήματα κλειστού βρόγχου παρουσιάζουν μικρό σφάλμα μόνιμης κατάστασης αφού όσο μεγαλύτερος είναι ο όρος $G_{(0)}$ δηλαδή το dc κέρδος του συστήματος τόσο μειώνεται το σφάλμα. Επίσης τα συστήματα κλειστού βρόγχου μπορούν να κρατούν σε χαμηλά επίπεδα ανεξάρτητα από τυχών εξωτερικές μεταβολές- διαταραχές αφού συνεχώς λαμβάνουν πληροφορίες από την έξοδο στην είσοδο του συστήματος οπότε ελέγχουν συνεχώς τη τιμή του σφάλματος και σκοπεύουν την μείωση του.

Το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ενός συστήματος κλειστού βρόγχου είναι αρκετά μικρότερο από ότι σε ένα σύστημα ανοιχτού βρόγχου γεγονός που αποτελεί το βασικότερο λόγο που χρησιμοποιούμε την ανάδραση παρά τη πολυπλοκότητα και το κόστος της.

3.15. Σταθερές Σφάλματος μόνιμης κατάστασης

Η απόδοση ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου κλειστού βρόγχου σε σχέση με το σφάλμα μόνιμης κατάστασης εξαρτάται από τις τρεις ακόλουθες σταθερές σφάλματος που περιγράφουν την ικανότητα του συστήματος να περιορίσει ή να εξαλείψει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης:

- Σταθερά σφάλματος θέσης K_p
- Σταθερά σφάλματος ταχύτητας K_v
- Σταθερά σφάλματος επιτάχυνσης K_a

3.15.1. Σταθερά σφάλματος θέσης K_p

Η σταθερά σφάλματος θέσης αναφέρεται σε βηματική είσοδο. Στο σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση ενός συστήματος με διέγερση στην είσοδο βηματικής συνάρτησης με πλάτος A είναι:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} (s * X_{(s)} * \frac{1}{1+G_{(s)}}) = \lim_{s \rightarrow 0} (s * \frac{A}{s} * \frac{1}{1+G_{(s)}}) = \frac{A}{1+G_{(0)}}$$

Ο σταθερός όρος συμβολίζεται με K_p και αποτελεί το συντελεστή σφάλματος θέσης, οπότε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης για βηματική είσοδο πλάτους A γράφεται:

$$e_{ss} = \frac{A}{1 + K_p}$$

3.15.2 Σταθερά σφάλματος ταχύτητας K_v

Η σταθερά σφάλματος ταχύτητας αναφέρεται σε είσοδο αναρρίχησης. Το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση ενός συστήματος με διέγερση στην είσοδο συνάρτησης αναρρίχησης με κλίση A είναι:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} (s * X_{(s)} * \frac{1}{1+G_{(s)}}) = \lim_{s \rightarrow 0} (s * \frac{A}{s^2} * \frac{1}{1+G_{(s)}}) = \lim_{s \rightarrow 0} (\frac{A}{s} * \frac{1}{1+G_{(s)}}) \rightarrow$$

$$\rightarrow e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} (\frac{A}{s+s*G_{(s)}}) \rightarrow e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} (\frac{A}{s*G_{(s)}})$$

Το K_v ονομάζεται συντελεστής σφάλματος ταχύτητας και ορίζεται με τη σχέση:

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} (s * G_{(s)})$$

Οπότε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης για είσοδο αναρρίχησης με κλίση A γράφεται:

$$e_{ss} = \frac{A}{K_v}$$

3.15.3 Σταθερά σφάλματος επιτάχυνσης K_a

Η σταθερά σφάλματος ταχύτητας αναφέρεται σε παραβολική είσοδο. Το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση ενός συστήματος με διέγερση στην είσοδο

παραβολική συνάρτηση της μορφής $x_{(t)} = \frac{A * t^2}{2}$ είναι:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} (s * X_{(s)} * \frac{1}{1+G_{(s)}}) = \lim_{s \rightarrow 0} (s * \frac{A}{s^3} * \frac{1}{1+G_{(s)}}) = \lim_{s \rightarrow 0} (\frac{A}{s^2} * \frac{1}{1+G_{(s)}}) \rightarrow$$

$$\rightarrow e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} (\frac{A}{s^2 + s^2 * G_{(s)}}) \rightarrow e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} (\frac{A}{s^2 * G_{(s)}})$$

Το K_a ονομάζεται συντελεστής σφάλματος ταχύτητας και ορίζεται με τη σχέση:

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} (s^2 * G_{(s)})$$

Οπότε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης για είσοδο αναρρίχησης με κλίση A γράφεται:

$$e_{ss} = \frac{A}{K_{\alpha}}$$

Η σημασία των παραπάνω σταθερών σφάλματος είναι μεγάλη αφού οι τιμές τους ορίζουν και το σφάλμα μόνιμης κατάστασης του συστήματος. Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των σταθερών σφάλματος τόσο μικρότερο είναι το σφάλμα μόνιμης κατάστασης του συστήματος για το αντίστοιχο σήμα εισόδου. Εάν κάποια από τις παραπάνω σταθερές είναι μηδενική τότε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης είναι άπειρο στο αντίστοιχο σήμα εισόδου, κάτι που σημαίνει ότι το σύστημα δεν μπορεί να παρακολουθήσει το σήμα αναφοράς.

Αυτό επιδιώκουμε είναι η αύξηση των τιμών και των τριών σταθερών σφάλματος, σε περίπτωση που δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη αύξηση της σταθερά σφάλματος ταχύτητας (K_v) και της σταθερά σφάλματος επιτάχυνσης (K_a) προτεραιότητα θα δίνουμε στη σταθερά σφάλματος ταχύτητας (K_v).

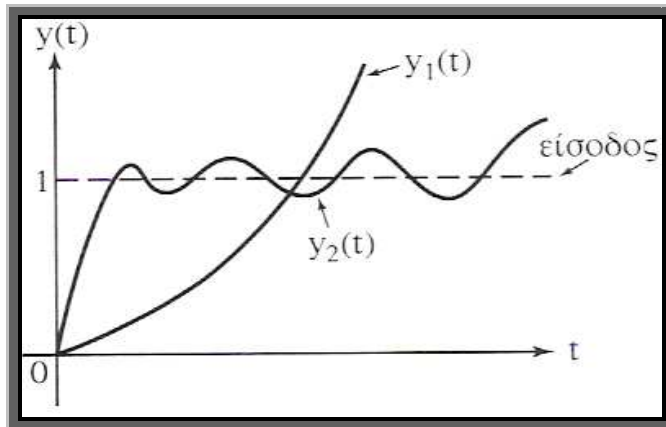
3.16. Ευστάθεια Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου

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.

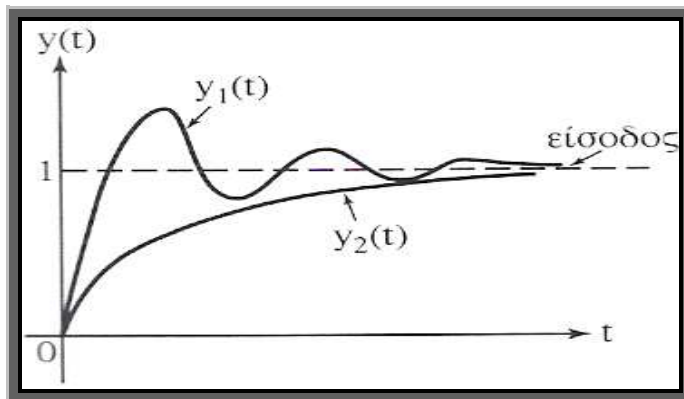
Ένα σύστημα είναι ευσταθές αν για πεπερασμένη είσοδο παρουσιάζει πεπερασμένη απόκριση. Αντιθέτως ένα σύστημα ονομάζεται ασταθές αν έστω και για μια πεπερασμένη είσοδο δεν παρουσιάζει πεπερασμένη απόκριση.

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:

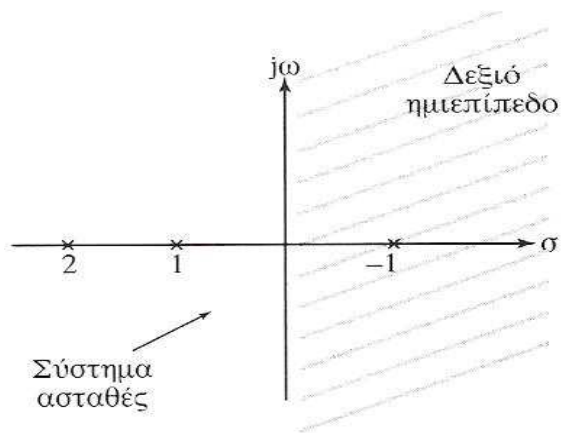
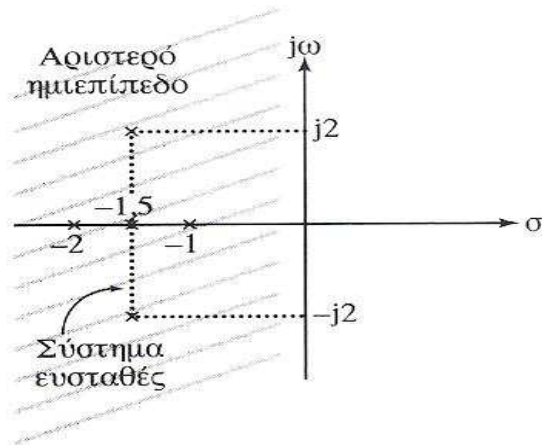


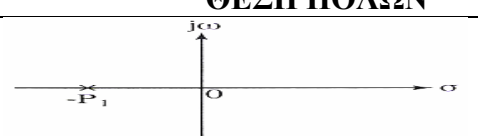
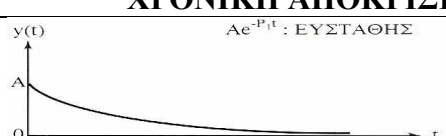
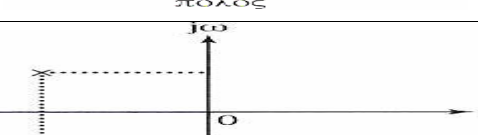
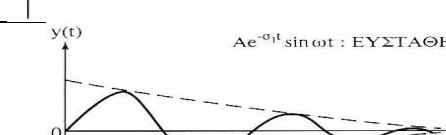
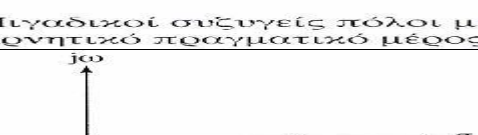
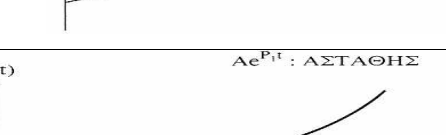
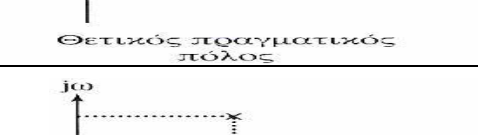
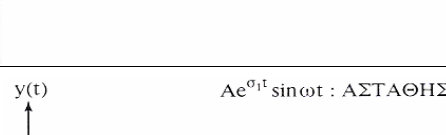
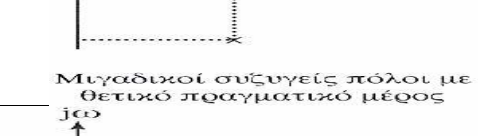
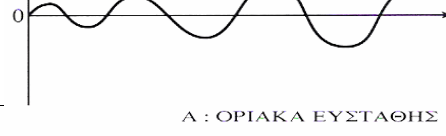
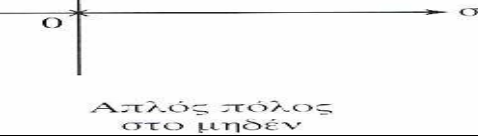
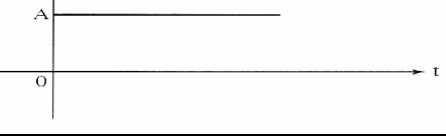

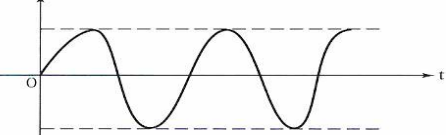

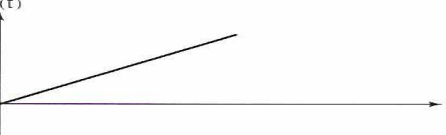
Για ένα σύστημα κλειστού βρόχου με συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου $G(s)$ και συνάρτηση μεταφοράς της ανάδρασης $H(s)$ τότε το πολυώνυμο του παρονομαστή της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος $\frac{G(s)}{1+G(s)*H(s)}$, το $1+G(s)*H(s)$ ονομάζεται χαρακτηριστικό πολυώνυμο ενώ η εξίσωση $1+G(s)*H(s)=0$ ονομάζεται χαρακτηριστική εξίσωση της συνάρτησης μεταφοράς κλειστού βρόχου.

Για την κατηγορία των γραμμικών μη χρονικά μεταβαλλόμενων συστημάτων που θα μελετήσουμε η ευστάθεια τους συνδέεται με τη θέση των ριζών της χαρακτηριστικής εξίσωσης στο μιγαδικό επίπεδο. Σε αυτή τη περίπτωση ένα σύστημα είναι ευσταθές αν όλες οι ρίζες του χαρακτηριστικού πολυωνύμου βρίσκονται στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο. Αν έστω και μια ρίζα του

χαρακτηριστικού πολυωνύμου βρίσκεται στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο το σύστημα είναι ασταθές.

Ένα σύστημα είναι ευσταθές όταν όλοι οι πόλοι του βρίσκονται στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η σχέση των πόλων και της ευστάθειας του συστήματος.



ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΑΠΟΚΡΙΣΕΙΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΠΟΛΩΝ ΣΤΟ ΜΙΓΑΔΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	
ΘΕΣΗ ΠΟΛΩΝ	ΧΡΟΝΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ
 <p>Αρνητικός πραγματικός πόλος</p>	 <p>$y(t)$ $Ae^{-p_1 t}$: ΕΥΣΤΑΘΗΣ</p>
 <p>Μιγαδικοί συζυγείς πόλοι με αρνητικό πραγματικό μέρος</p>	 <p>$y(t)$ $Ae^{-\sigma t} \sin \omega t$: ΕΥΣΤΑΘΗΣ</p>
 <p>Θετικός πραγματικός πόλος</p>	 <p>$y(t)$ $Ae^{p_1 t}$: ΑΣΤΑΘΗΣ</p>
 <p>Μιγαδικοί συζυγείς πόλοι με θετικό πραγματικό μέρος</p>	 <p>$y(t)$ $Ae^{0t} \sin \omega t$: ΑΣΤΑΘΗΣ</p>
 <p>Απλός πόλος στο μηδέν</p>	 <p>$y(t)$ A : ΟΡΙΑΚΑ ΕΥΣΤΑΘΗΣ</p>
 <p>Συζυγείς φανταστικοί πόλοι</p>	 <p>$y(t)$ $A \sin \omega t$: ΟΡΙΑΚΑ ΕΥΣΤΑΘΗΣ</p>
 <p>Διπλός πόλος στο μηδέν</p>	 <p>$y(t)$ $A t$: ΑΣΤΑΘΗΣ</p>
 <p>Διπλοί συζυγείς φανταστικοί πόλοι</p>	 <p>$y(t)$ $(A_1 + A_2 t) \sin \omega t$: ΑΣΤΑΘΗΣ</p>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1. Ελεγκτές Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου

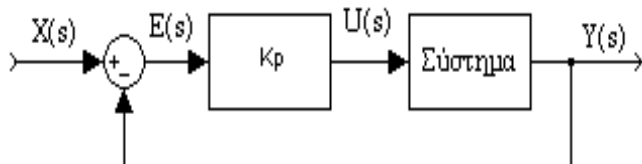
Στα συστήματα αυτόματου ελέγχου χρησιμοποιούμε συνδεσμολογίες ελεγκτών οι οποίοι αποσκοπούν στη βελτίωση των χαρακτηριστικών του συστήματος που μελετάμε. Με τη χρήση ελεγκτών μπορούμε να πετύχουμε καλύτερες επιδόσεις του συστήματος δηλαδή να γίνει το σύστημα πιο γρήγορο, πιο ακριβές, πιο ευσταθές, να μην επηρεάζεται από τυχόν διαταραχές κ.λπ.

Η μέθοδος με την οποία οι ελεγκτές πετυχαίνουν το στόχο τους είναι η εισαγωγή πόλων ή μηδενικών ή και των δύο στη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος ανοιχτού βρόγχου του οποίου τη συμπεριφορά θέλουμε να βελτιώσουμε. Υπάρχουν διάφορα είδη ελεγκτών τα οποία στην πραγματικότητα αποτελούν συνδυασμό των τριών βασικών ελεγκτών. Η πιο ευρύτατα χρησιμοποιημένη μονάδα ελεγκτή είναι ο ελεγκτής PID ο οποίος ονομάζεται και ελεγκτής τριών όρων γιατί στη ουσία αποτελεί συνδυασμό το τριών βασικών ελεγκτών. Ο ελεγκτής PID περιλαμβάνει έναν αναλογικό, ένα διαφορικό και ένα ολοκληρωτικό όρο. Υπάρχουν όμως και ελεγκτές που περιέχουν τους δύο από τους τρεις όρους.

ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΑ ΕΙΔΗ ΕΛΕΓΚΤΩΝ

4.2. Αναλογικός (P) ελεγκτής

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.

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

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

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

$$e_{ss} = 1 - \lim_{s \rightarrow 0} (s * G_{c(s)} * \frac{1}{s}) = 1 - \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_p}{s+A+K_p} = 1 - \frac{K_p}{A+K_p}$$

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

Αν όμως το σύστημα είναι σε συνάρτηση μεταφοράς $G_{(s)} = \frac{1}{s^2 + s * A + B}$, τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου με P ελεγκτή είναι:

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

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

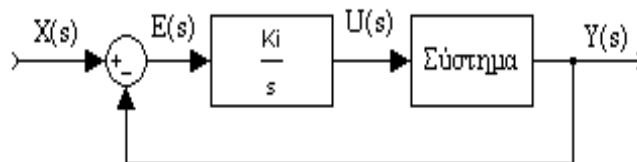
$$e_{ss} = 1 - \lim_{s \rightarrow 0} (s * G_{c(s)} * \frac{1}{s}) = 1 - \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_p}{s^2 + s * A + B + K_p} \quad \chi_{ss} = 1 - \frac{K_p}{B + K_p}$$

Άρα και η χρήση P ελεγκτή μειώνει το σφάλμα όσο αυξάνεται το κέρδος του ελεγκτή και αυξάνεται και η φυσική συχνότητα $\omega_n (= \sqrt{B + K_p})$ ενώ χωρίς τον ελεγκτή $\omega_n = \sqrt{B}$ του συστήματος 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 .

4.3.Ολοκληρωτικός (I) ελεγκτής

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 εξής μορφή:



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.

Αν όμως το σύστημα είναι σε συνάρτηση μεταφοράς $G_{(s)} = \frac{1}{s+A}$, τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου με I ελεγκτή είναι:

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

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

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

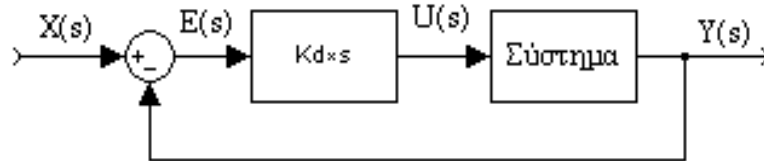
Άρα το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μηδενίζεται με τη χρήση ολοκληρωτικού ελεγκτή.

Παρατηρούμε ότι το σύστημα με τη χρήση του ολοκληρωτικού ελεγκτή από το ένα σύστημα μετατράπηκε σε άλλο σύστημα, όπου η τιμή του συντελεστή ολοκλήρωσης είναι ίδια με ένας 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 ένας 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.

4.4. Διαφορικός (D) ελεγκτής

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.



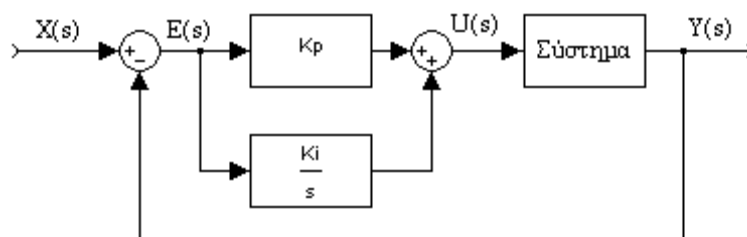
Ο διαφορικός ελεγκτής εισάγει στο σύστημα ένα μηδενικό και η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι:

$$D_{(s)} = K_d * s$$

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.

4.5. 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 στο $-\frac{K_i}{K_p}$ συμπέρασμα που προκύπτει από τη συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή.

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

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

$$G_{(s)} = \frac{1}{s + A}, \text{ τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου με PI}$$

ελεγκτή είναι:

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

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

Το σύστημα αλλάζει και γίνεται 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

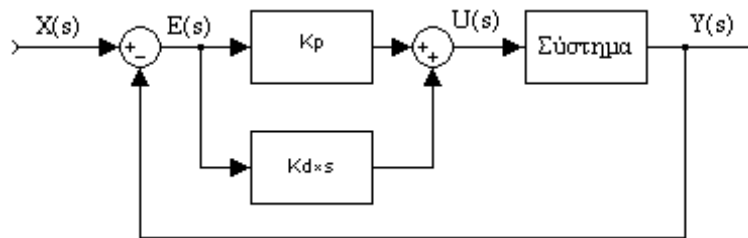
εισάγει ο ελεγκτής στο σύστημα. Τέλος με την εισαγωγή του όρου ολοκλήρωσης το σύστημα για βηματική είσοδο παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

Το m-file του PI ελεγκτή είναι το εξής:

```
function Gc=PIcontrol(H,A,Kp,Ki)
PI=tf([Kp Ki],[1 0]);%Συνάρτηση μεταφοράς του PI-ελεγκτή
Gc=feedback(series(PI,H),A);
```

4.6.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 στο $-\frac{K_p}{K_d}$ συμπέρασμα που προκύπτει από τη συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή:

$$PD_{(s)} = K_p + s * K_d \rightarrow PD_{(s)} = s + \frac{K_p}{K_d}$$

Ο PD ελεγκτής αυξάνει την απόσβεση του συστήματος και περιορίζει την υπερύψωση της 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, της 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 σε συνάρτηση μεταφοράς

$G_{(s)} = \frac{1}{s^2 + A*s + B}$, τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού

βρόχου με PD ελεγκτή είναι:

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

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

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

Το νέο σύστημα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

$$\omega_n = B + K_p \text{ και } 2 * \zeta * \omega_n = A + K_d$$

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.

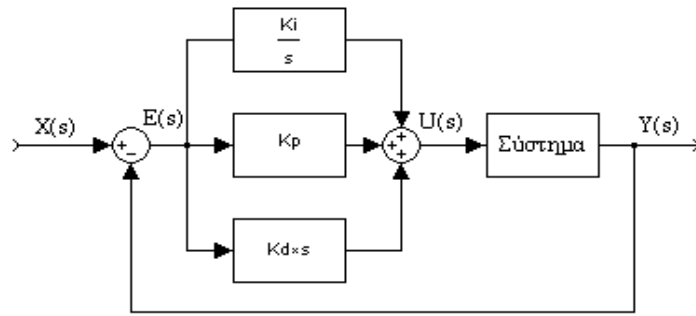
Το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μειώνεται όσο αυξάνουμε το αναλογικό κέρδος ενώ δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή του διαφορικού συντελεστή.

Το m-file του PD ελεγκτή είναι το εξής:

```
function Gc=PDcontrol(H,A,Kp,Kd)
PD=tf([Kd Kp],1);%Συνάρτηση μεταφοράς του PD-ελεγκτή
Gc=feedback(series(PD,H),A);
```

4.7.Αναλογικός – Ολοκληρωτικός – Διαφορικός (PID) ελεγκτής

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:

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

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. Στη 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.

Το m-file του PID ελεγκτή είναι το εξής:

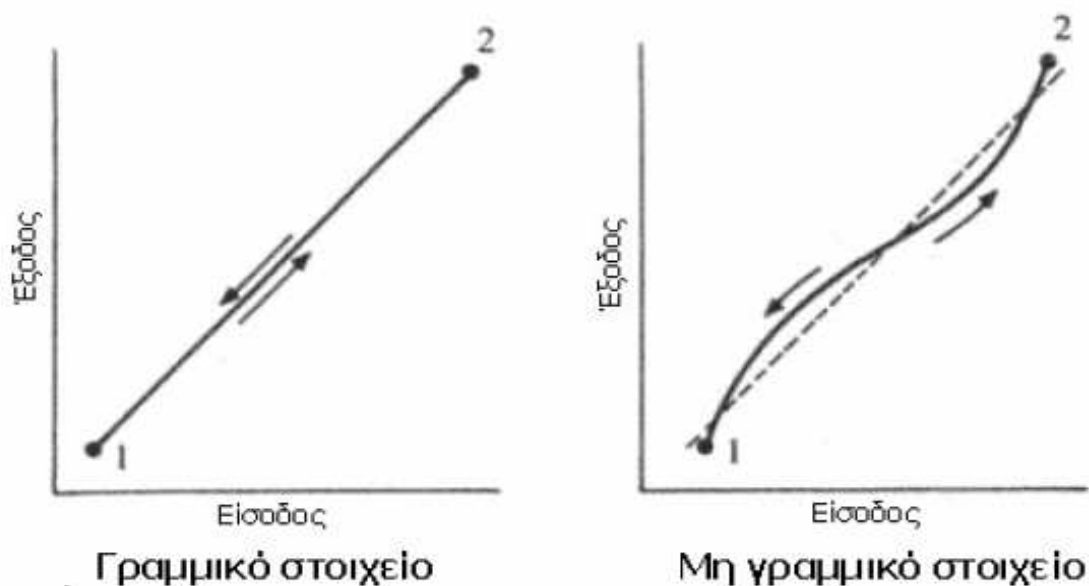
```
function Gc=PIDcontrol(H,A,Kp,Kd,Ki)
PID=tf([Kd Kp Ki],[1 0]);%Συνάρτηση μεταφοράς του PID-ελεγκτή
Gc=feedback(series(PID,H),A);
```


5.1. Ορισμός αναλογικού ελέγχου

Ο Αναλογικός Έλεγχος (P), είναι η πιο απλή μορφή ελέγχου. Παράγει μια ενέργεια ελέγχου η οποία είναι αναλογική ως προς το σφάλμα. Αν το σφάλμα είναι μικρό, τότε η αναλογική μορφή ελέγχου παράγει μια μικρή πράξη ελέγχου. Αν το σφάλμα είναι μεγάλο, αντίστοιχο θα είναι και το μέγεθος της πράξης ελέγχου. Η αναλογική μορφή επιτυγχάνεται απλά πολλαπλασιάζοντας το σφάλμα με μια σταθερά κέρδους, K.

5.2. Μη γραμμικότητες

Το μεγαλύτερο μέρος της ανάλυσης και σχεδίασης των συστημάτων ελέγχου γίνεται με την παραδοχή ότι όλα τα στοιχεία στο σύστημα είναι γραμμικά. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν πολλές μορφές μη γραμμικότητας που προκύπτουν στα στοιχεία. Γραμμικότητα (linearity), σημαίνει ότι η γραφική παράσταση εισόδου/ εξόδου(I/O) του στοιχείου είναι μια τέλεια ευθεία.

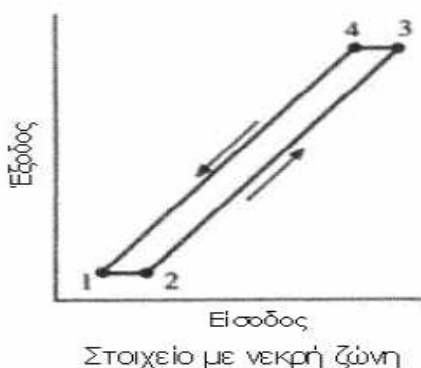


ΣΧΗΜΑ: ΓΡΑΦΙΚΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ/ ΕΞΟΔΟΥ ΕΝΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΝΟΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Ο όρος γραμμικότητα επίσης αναφέρεται στο πόσο πιστά το γράφημα της εισόδου/ εξόδου(I/O) του στοιχείου προσεγγίζει μια ευθεία. Η γραμμικότητα εκφράζεται ως η μέγιστη παρέκκλιση μεταξύ μιας μέσης γραφικής παράστασης I/O και μιας ευθείας γραμμής τοποθετημένης έτσι ώστε να ελαχιστοποιεί την

μέγιστη παρέκκλιση. Η μέση γραφική παράσταση I/O κατασκευάζεται παίρνοντας τον μέσο όρο των τιμών από τουλάχιστον δύο πλήρεις διαδρομές στις τιμές εισόδου σε κάθε κατεύθυνση. Άρα μετράμε μη γραμμικότητα και την εκφράζουμε ως γραμμικότητα.

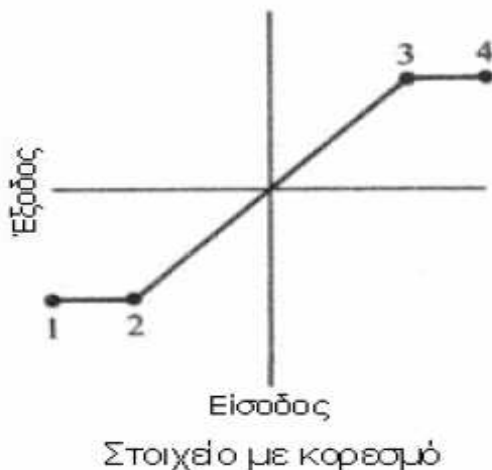
Η νεκρή ζώνη(dead band), είναι το εύρος των τιμών όπου η τιμή εισόδου μπορεί να αλλάξει χωρίς να παράγει καμία εμφανή διαφορά στην έξοδο. Το πατινάρισμα στα γρανάζια είναι ένα παράδειγμα νεκρής ζώνης και ο όρος πατινάρισμα (backlash) χρησιμοποιείται στη θέση του όρου νεκρή ζώνη. Η εικόνα, δείχνει την γραφική παράσταση I/O ενός στοιχείου με νεκρή ζώνη. Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων εισόδου σε σχέση την έξοδο, μπορεί να πέσει στην γραμμή (2-3), στην γραμμή (1-4), ή οπουδήποτε αλλού ανάμεσα. Όταν η είσοδος αυξάνεται, ο γεωμετρικός τόπος των σημείων I/O πρώτα κινείται οριζόντια μέχρι που φτάνει την γραμμή (2-3). Όσο η είσοδος συνεχίζει να αυξάνεται τόσο ο γεωμετρικός τόπος των σημείων I/O κινείται στην γραμμή (2-3). Αν η είσοδος πάρει αντίθετη κατεύθυνση και αρχίσει να μειώνεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων I/O κινείται πρώτα οριζόντια πάνω στην (4-1). Όσο η είσοδος συνεχίζει να μειώνεται, τόσο ο γεωμετρικός τόπος κινείται προς τα κάτω στην γραμμή (4-1). Η γραμμή (2-3) είναι η αύξουσα γραμμή I/O και η γραμμή (4-1) η φθίνουσα. Κάθε φορά που η είσοδος αλλάζει κατεύθυνση ο γεωμετρικός τόπος των σημείων I/O πρέπει πρώτα να μετακινηθεί οριζόντια από μια από αυτές τις γραμμές στην άλλη. Η νεκρή ζώνη, είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ της φθίνουσας και της αύξουσας γραμμής I/O. Η νεκρή ζώνη μετριέται αυξάνοντας (ή μειώνοντας), αργά την είσοδο μέχρι να υπάρξει κάποια αλλαγή στην έξοδο, καταγράφοντας την τιμή εισόδου όταν παρατηρήθηκε η πρώτη αλλαγή στην έξοδο. Τότε, αλλάζουμε αργά την είσοδο προς την αντίθετη κατεύθυνση μέχρι να παρατηρηθεί ξανά αλλαγή στην έξοδο, καταγράφοντας ξανά την τιμή εισόδου στο σημείο αυτό. Η νεκρή ζώνη είναι η διαφορά μεταξύ των δύο καταγεγραμμένων τιμών εισόδου. Η νεκρή ζώνη μπορεί επίσης να εκφραστεί ως η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής εξόδου για ένα κύκλο δοκιμής. Αυτό γίνεται συνήθως όταν το στοιχείο έχει νεκρή ζώνη και υστέρηση ταυτόχρονα.



Εικόνα: γραφική παράσταση εισόδου/ εξόδου ενός στοιχείου με νεκρή ζώνη.

Η υστέρηση(hysteresis), είναι η μη γραμμικότητα που έχει ως αποτέλεσμα η τιμή εξόδου για μια δοσμένη είσοδο να εξαρτάται από τις προηγούμενες τιμές εισόδου. Η γραφική παράσταση I/O ενός στοιχείου με υστέρηση σχηματίζει έναν βρόγχο όταν η είσοδος αλλάξει από μία τιμή σε μία άλλη και μετά ξανά στην πρώτη. Η υστέρηση εκφράζεται ως η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής εξόδου για έναν απλό κύκλο δοκιμής.

Ο κορεσμός(saturation), αναφέρεται στα όρια του εύρους τιμών εξόδου για ένα στοιχείο. Όλα τα πραγματικά στοιχεία φθάνουν σ' ένα όριο κορεσμού, όταν η είσοδος αυξάνεται ή μειώνεται πέρα από την οριακή τιμή τους. Για παράδειγμα, μία βαλβίδα ελέγχου μπορεί να πάει από την κλειστή στην ανοικτή θέση όσο η πίεση στον ενεργοποίηση αυξάνεται από τα 3 στα 15 psi. Η βαλβίδα παραμένει κλειστή αν η πίεση πέσει κάτω από 3 psi και παραμένει ανοικτή αν η πίεση αυξηθεί πάνω από 15 psi. Λέμε ότι η βαλβίδα φτάνει τον κορεσμό όταν η πίεση είναι κάτω από 3 psi ή πάνω από 15 psi.



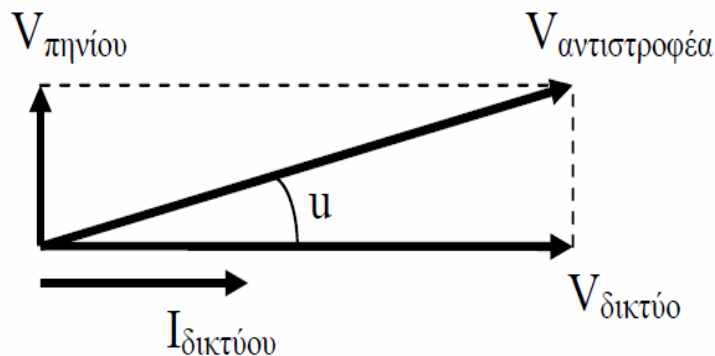
Εικόνα: παράσταση εισόδου / εξόδου ενός στοιχείου με κορεσμό.

γραφική

5.3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΠΑΛΜΩΝ

Παράδειγμα αναλογικού ελέγχου έχουμε όταν για την παραγωγή των παλμών που θα οδηγήσουν τα MOSFET του αντιστροφέα, θα χρησιμοποιήσουμε έναν αναλογικό ελεγκτή P.I., ο οποίος θα παίρνει κάποια σήματα ως είσοδο και θα δίνει στην έξοδο του ένα σήμα που θα αποτελεί την μοναδική είσοδο του μικροελεγκτή με βάση το οποίο, ο τελευταίος θα παράγει τους παλμούς κάθε διακοπτικού στοιχείου του αντιστροφέα.

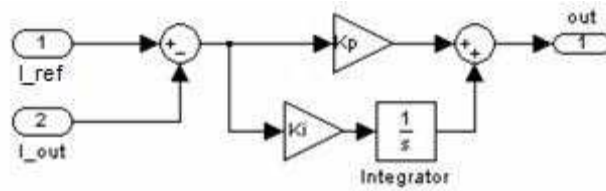
Στο Σχήμα, παρουσιάζεται η λογική μεταφοράς ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Με $V_{\text{πηνίου}}$ συμβολίζουμε το διάνυσμα της τάσης στα άκρα του πηνίου, με $V_{\text{δικτύου}}$ και $I_{\text{δικτύου}}$ τα αντίστοιχα διανύσματα της τάσης και του ρεύματος του δικτύου ενώ με $V_{\text{αντιστροφέα}}$ τη βασική αρμονική της τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα. Ως τάση στο πηνίο εννοούμε τόσο την τάση που εφαρμόζεται στις επαγωγές σκέδασης του μετασχηματιστή όσο και την τάση στο πηνίο του φίλτρου εξόδου του αντιστροφέα. Έτσι, παρατηρούμε ότι η βασική αρμονική της τάσης του αντιστροφέα θα πρέπει να προηγείται κατά μία γωνία « u » της τάσης του δικτύου για να μην μεταφέρεται άεργος ισχύς από το δίκτυο στις επαγωγές του συστήματος. Ακόμη, για να επιτευχθεί μεταφορά πραγματικής ισχύος από το σύστημα μας προς το δίκτυο, η γωνία αυτή θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από εκείνη που φαίνεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Διανύσματα τάσεων και ρευμάτων για τον έλεγχο των παλμών.

Ο αναλογικός ελεγκτής θα δέχεται ως είσοδο την τάση του δικτύου για να δημιουργήσει ένα σήμα τάσης ανάλογο του ρεύματος αναφοράς το οποίο θέλουμε να είναι συμφασικό με την τάση του δικτύου ώστε να έχουμε μηδενική άεργος ισχύ που παίρνουμε από το δίκτυο. Αυτό το σήμα θα το συγκρίνει με το σήμα τάσης που προέρχεται από το μετρητικό του ρεύματος που δίνει το σύστημα στο

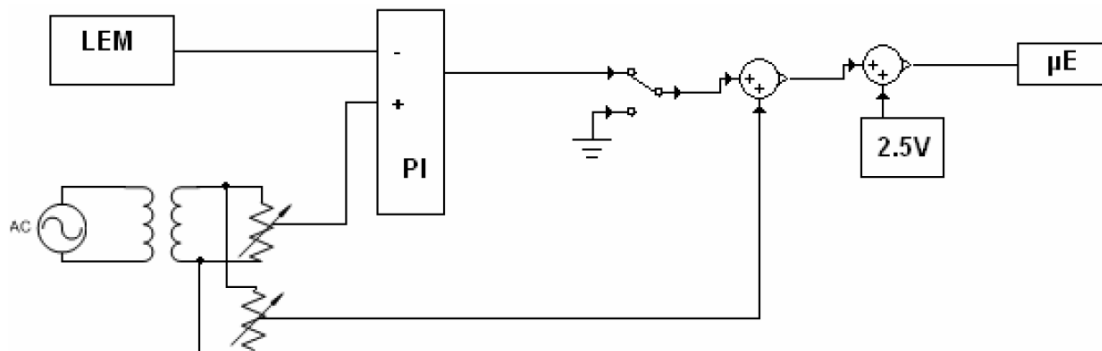
δίκτυο και η διαφορά τους θα αποτελεί την είσοδο του αναλογικού ελεγκτή P.I. όπως μπορούμε να δούμε στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Ελεγκτής P.I.

Παράγεται, ακόμη, ένα δεύτερο σήμα τάσης που είναι ανάλογο της Vδικτύου και το οποίο θα προστεθεί στην έξοδο του σήματος τάσης του P.I. ελεγκτή. Στο Σχήμα 5.3 βλέπουμε τη μονάδα του αναλογικού ελέγχου όπως την περιγράψαμε.

Το ρεύμα αναφοράς το παίρνουμε από την τάση του δικτύου με τη χρήση ενός μετασχηματιστή χαμηλής ισχύος 380V/6V και με μία μεταβλητή αντίσταση (ποτενσιόμετρο) με όνομα «λ1» ρυθμίζουμε το πλάτος του ημιτονικού σήματος τάσης. Με μια άλλη μεταβλητή αντίσταση «λ2», από την έξοδο του ίδιου μετασχηματιστή θα πάρουμε και το σήμα που θα προστεθεί στην έξοδο του ελεγκτή P.I. και το οποίο είναι ανάλογο της τάσης του δικτύου.



Σχήμα 5.3: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος αναλογικού ελέγχου.

Η συνάρτηση μεταφοράς στο πεδίο του χρόνου του P.I. ελεγκτή είναι

$$h(t) = K_p (I_{ref} - I_{out}) + K_I \cdot \int (I_{ref} - I_{out}) dt \quad (5.1)$$

ενώ στο πεδίο της συχνότητας, με μετασχηματισμό Laplace προκύπτει

$$H(s) = (I_{ref} - I_{out})(K_p + \frac{K_I}{s}) \quad (5.2)$$

Συγκεκριμένα το κύκλωμα του αναλογικού ελέγχου περιλαμβάνει έναν αθροιστή στον οποίο θα έρχονται δύο τάσεις ανάλογες της τάσης του δικτύου και της τάσης XLIL. Η πρώτη λαμβάνεται από το δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης ενώ η δεύτερη είναι αποτέλεσμα του ελεγκτή P.I. Ο ελεγκτής P.I. λαμβάνει ως εισόδους την αναφορά ρεύματος και το πραγματικό ρεύμα που μετράται μέσω αισθητήρα ρεύματος στην έξοδο της διάταξης. Επειδή, το επιθυμητό ρεύμα εξόδου της διάταξης πρέπει να είναι συμφασικό με την τάση του δικτύου η αναφορά ρεύματος δεν είναι άλλη από μια έννοια της τάσης του δικτύου, ρυθμιζόμενης από μια μεταβλητή αντίσταση, την λ1.

Από προσομοιώσεις για τον ψηφιακό έλεγχο προέκυψε ότι με KP=4 και KI=0,5 τα

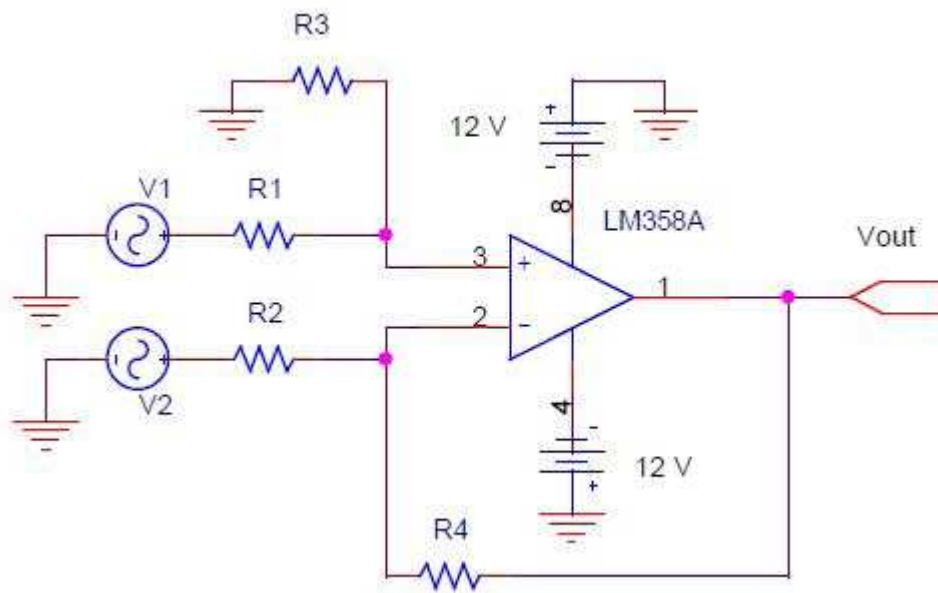
αποτελέσματα του P.I. ελέγχου είναι πολύ ικανοποιητικά. Για τον αναλογικό έλεγχο χρησιμοποιήσαμε τελεστικούς ενισχυτές. Το ολοκληρωμένο LM358 περιέχει δύο τελεστικούς ενισχυτές τον A και τον B και μπορεί να επεξεργαστεί σήματα με μέγιστο ρεύμα εισόδου τα 10 mA. Η τροφοδοσία του ολοκληρωμένου ήταν θετική και αρνητική όταν είχε ως έξοδο εναλλασσόμενο σήμα ενώ θετική με γείωση όταν είχε συνεχές σήμα στην έξοδό του.

5.4. P – Ελεγκτής

Ο ελεγκτής P έχει συνάρτηση μεταφοράς στο χρόνο

$$h_p(t) = K_p (V_1 - V_2) \quad (5.3)$$

Η υλοποίησή του με τελεστικό ενισχυτή γίνεται όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 5.4: Αναλογικός αφαιρέτης τάσης με κέρδος R_2/R_1 .

Η συνάρτηση μεταφοράς του παραπάνω αναλογικού αφαιρέτη τάσης είναι:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1}(V_1 - V_2) \quad \text{όταν} \quad \frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \quad (5.4)$$

Για να πετύχουμε λοιπόν το επιθυμητό κέρδος $K_P=4$ πρέπει $\frac{R_2}{R_1} = 4$. Για

να έχουμε ρεύμα στην είσοδο του LM358 στα επιτρεπτά όρια και για να πετύχουμε αυτό το κέρδος χρησιμοποιήσαμε αντιστάσεις $R_1=R_2=51k\Omega$ και $R_3=R_4=220k\Omega$. Έτσι, το κέρδος έγινε λίγο μεγαλύτερο από 4 αλλά προσθέτοντας μια μεταβλητή αντίσταση (K_p) στην έξοδο του αφαιρέτη μπορούμε να μειώσουμε την τιμή αυτή σε επιθυμητά όρια και προσφέρεται επιπλέον η δυνατότητα μεταβολής του συντελεστή K_P .

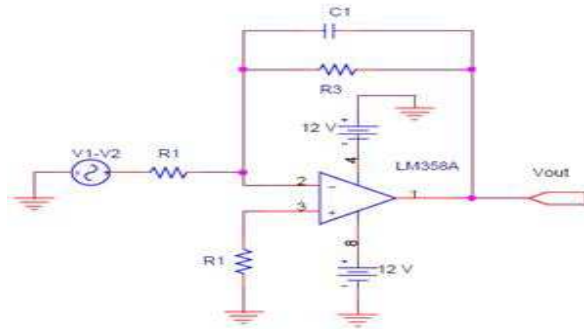
Όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, οι τάσεις V_1 και V_2 δεν είναι άλλες από το σήμα του ρεύματος αναφοράς και το σήμα από τη μέτρηση του ρεύματος εξόδου του μετασχηματιστή ισχύος.

5.5. I – Ελεγκτής

Ο I - ελεγκτής έχει συνάρτηση μεταφοράς στο πεδίο του χρόνου

$$h_I(t) = K_I \cdot \int (V_{\delta i k t} - I_{out}) dt \quad (5.5)$$

Για την υλοποίηση της διάταξης αυτής χρησιμοποιούμε δύο βαθμίδες. Η μία είναι ένας αφαιρέτης τάσης με κέρδος μονάδα και η άλλη είναι ένας ολοκληρωτής με κέρδος K_I . Για τον αφαιρέτη χρησιμοποιήσαμε αντιστάσεις $R1=R2=R3=R4=120k\Omega$ για διάταξη ίδια με εκείνη του Σχήματος 5.4. Για την υλοποίηση της βαθμίδας του ολοκληρωτή χρησιμοποιήσαμε και πάλι τελεστικό ενισχυτή με την κυκλωματική διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Αναλογικός Ολοκληρωτής

Η συνάρτηση μεταφοράς της παραπάνω διάταξης είναι:

$$V_{out} = -\frac{1}{R_1 C} \int (V_1 - V_2) dt \quad (5.6)$$

Παρατηρούμε δηλαδή, ότι το κέρδος του I-ελεγκτή προκύπτει ίσο με

$$K_I = \frac{1}{R_1 C} \quad (5.7)$$

όταν η προς ολοκλήρωση διαφορά σημάτων είναι V_2-V_1 η οποία προκύπτει από έναν

αναλογικό αφαιρέτη με μοναδιαίο κέρδος και τιμές αντιστάσεων εκείνες που αναφέραμε παραπάνω.

Για τον ολοκληρωτή θα πρέπει να προσέξουμε τις τιμές των στοιχείων που θα χρησιμοποιήσουμε, καθώς αφενός θα πρέπει ο ολοκληρωτής να δίνει μια διαφορά φάσης στην έξοδο 90ο από τη φάση στην είσοδο και αφετέρου θα πρέπει να ικανοποιεί το επιθυμητό κέρδος χωρίς να αυξάνεται επικίνδυνα το ρεύμα στην είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Για την επιλογή των τιμών των

στοιχείων θα πρέπει η συχνότητα του σήματος εισόδου (50Hz) να είναι ανάμεσα στους δυο πόλους που καθορίζουν οι αντιστάσεις R1 και R3. Πρέπει δηλαδή,

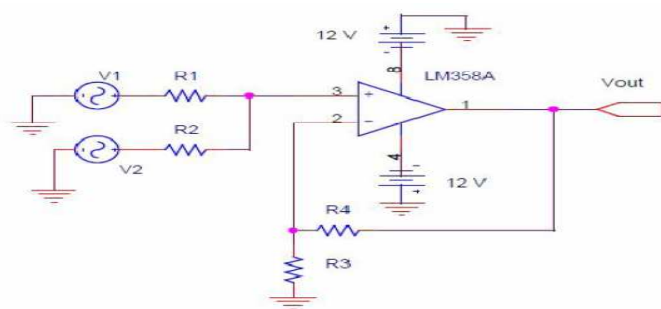
$$f_1 < 50Hz < f_2 \Rightarrow \frac{1}{2\pi R_1 C} < 50Hz < \frac{1}{2\pi R_2 C} \quad (5.8)$$

Οι τιμές των R1, R3 και C της διάταξης του ολοκληρωτή που επιλέχθηκαν και πληρούν τις προηγούμενες προϋποθέσεις είναι 3kΩ, 30kΩ και 1μF αντίστοιχα. Με αυτές τις τιμές το κέρδος που προκύπτει είναι πολύ μεγάλο, περίπου 333, αλλά με την τοποθέτηση μιας μεταβλητής αντίστασης, 500kΩ (Ki), πετυχαίνουμε διαίρεση τάσης ώστε να ρυθμίζουμε το κέρδος KI σε τιμές από σχεδόν μηδενικές, περίπου 0,001, έως 333.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι στην έξοδο του P.I. ελεγκτή συνδέθηκε ένα ποτενσιόμετρο (CL) το οποίο προσφέρει τη δυνατότητα σταδιακής εισαγωγής του ελέγχου P.I. στο σύστημα, ώστε να αποφευχθεί η απότομη εισαγωγή του με τα έντονα μεταβατικά φαινόμενα που ενδέχεται να καταστρέψουν το σύστημα.

Το άθροισμα των σημάτων από τον ανοικτό βρόχο και του σήματος από τον P.I. ελεγκτή όπως φαίνονται στο Σχήμα 5.3 γίνεται με τη χρήση ενός αναλογικού αθροιστή. Ο αναλογικός αθροιστής με τελεστικό ενισχυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6 και έχει συνάρτηση μεταφοράς.

$$V_{out} = V_1 + V_2 \quad \text{όταν } R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \quad (5.9)$$

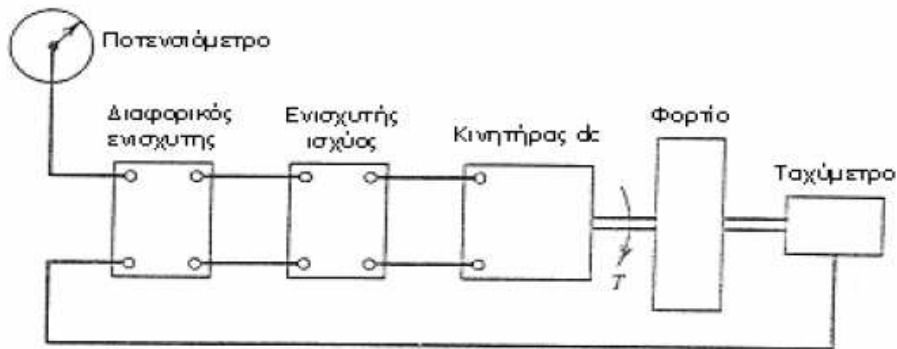


Σχήμα 5.6: Αναλογικός αθροιστής

Τέλος, στην έξοδο του αναλογικού ελέγχου προστίθεται μια συνεχής συνιστώσα +2,5V στο σήμα που οδηγείται στον μικροελεγκτή καθώς αυτός δεν μπορεί να λειτουργήσει με αρνητικές τάσεις ως σήμα στην είσοδο του. Αυτή η συνιστώσα προστίθεται με έναν επιπλέον άρθρο.

5.6. Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος πρώτης τάξης

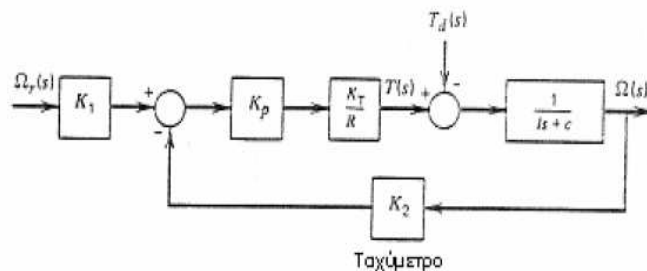
Για να ερευνήσουμε τη συμπεριφορά του αναλογικού ελέγχου, θεωρούμε το σύστημα έλεγχου ταχύτητας που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.7 και είναι το ίδιο με τον ελεγκτή θέσης που παρουσιάζεται στο σχήμα εκτός από το ότι ένα ταχύμετρο αντικαθιστά το ποτενσιόμετρο ανάδρασης.



Σχήμα: ταχύτητα ενός συστήματος ελέγχου που χρησιμοποιεί έναν κινητήρα dc.

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 τις ενισχύσεις τους σε ένα, το K_p . Το σύστημα φαίνεται έτσι ότι έχει ανάλογο έλεγχο στον οποίο η τάση μηχανών είναι ανάλογη προς τη διαφορά μεταξύ της τάσης εντολής και της τάσης ανάδρασης από το ταχύμετρο.

Ας υποθέσουμε ότι η μηχανή είναι ελεγχόμενη από πεδίο με μια αμελητέα ηλεκτρική χρονική σταθερά. Η διαταραχή για παράδειγμα είναι μια ροπή T_d ως αποτέλεσμα της τριβής. Επιλέγουμε τον όρο ισορροπίας αναφοράς έτσι ώστε $T_d = T = 0$ και $\omega_r = \omega = 0$. Το μπλοκ διάγραμμα παρουσιάζεται στο σχήμα.

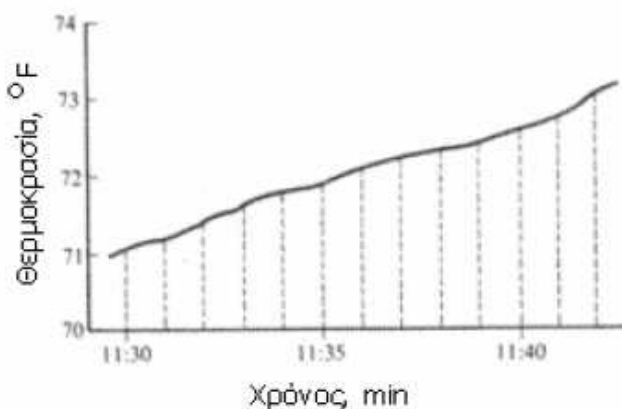


Σχήμα: μπλοκ διάγραμμα της ταχύτητας του συστήματος ελέγχου

5.7. Αναλογικός και ψηφιακός έλεγχος

Τα σήματα σε ένα σύστημα ελέγχου χωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες: τα αναλογικά και τα ψηφιακά.

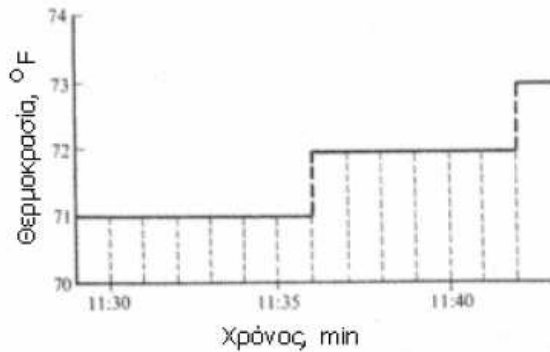
Ένα αναλογικό σήμα διαφέρει με έναν συνεχή τρόπο και μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή ανάμεσα στα όριά του. Ένα παράδειγμα αναλογικού σήματος είναι η συνεχής μέτρηση της εξωτερικής θερμοκρασίας του αέρα. Η καταγραφή είναι μια συνεχής γραμμή (ένα χαρακτηριστικό όλων των αναλογικών σημάτων).



Σχήμα: Αναλογικό σήμα εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα

Ένα ψηφιακό σήμα διαφέρει με έναν διακριτό τρόπο και μπορεί να πάρει διακριτές τιμές ανάμεσα στα όριά του. Ένα παράδειγμα διακριτού σήματος είναι μια πινακίδα που απεικονίζει την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα στον κοντινότερο βαθμό Κελσίου και αλλάζει μία φορά κάθε λεπτό. Η γραφική παράσταση που προκύπτει από το σήμα της πινακίδας μένει στάσιμη στο χρονικό διάστημα ανάμεσα στις αλλαγές, αλλά μπορεί να πηδήξει απότομα σε μια νέα τιμή στο επόμενο διάστημα.

Ο αναλογικός έλεγχος αναφέρεται σε συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούν αναλογικά σήματα και ο ψηφιακός έλεγχος σε αυτά που χρησιμοποιούν ψηφιακά.

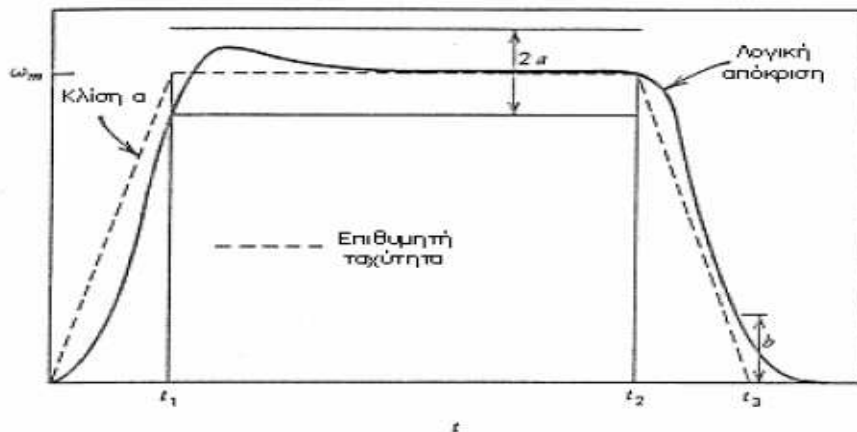


Σχήμα: Ψηφιακό σήμα εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα

5.8. Αναλογικός έλεγχος με είσοδο ράμπας

Μια εντολή εισόδου που είναι μια συνάρτηση ράμπας είναι μια καλή δοκιμή της δυνατότητας ενός συστήματος ελέγχου να ακολουθεί μια συνεχώς μεταβαλλόμενη εντολή. Αν και η συνάρτηση ράμπας

συνεχίζει να αυξάνεται χωρίς όριο, στην πράξη ενδιαφερόμαστε για την απόκριση του συστήματος μόνο έως ότου εξαφανιστεί η μεταβατική απόκριση. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.11. Το σχήμα αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό σχεδιάγραμμα περιστροφικής ταχύτητας που αντιπροσωπεύει την επιθυμητή ταχύτητα για παράδειγμα ενός κυλίνδρου ταινιών υπολογιστών.



Σχήμα: διάγραμμα της τυπικής επιθυμητής ταχύτητας ενός συστήματος

Προκειμένου να επιτευχθεί το τέντωμα της ταινίας όσο το δυνατόν γρηγορότερα, ο κύλινδρος πρέπει να κινηθεί με τη μέγιστη ταχύτητά του ω_m . Ο κύλινδρος όμως μπορεί να επιταχύνει και να επιβραδύνει όχι γρηγορότερα από κάποιο ποσοστό a λόγω των περιορισμών ροπής του μοτέρ και αντοχής στην πίεση της ταινίας.

Προκειμένου να ακολουθήσει μια τέτοια εισαγωγή εντολής, ο ελεγκτής πρέπει να είναι σε θέση να εξετάσει και το βήμα και την εντολή ράμπας(η βηματική εντολή αντιστοιχεί στη σταθερή ταχύτητα ω_m). Οι προδιαγραφές απόδοσης μπορούν να δοθούν ως εξής: Η ταχύτητα ω πρέπει να είναι ανάμεσα σε $\omega_m \pm a$ για $t_1 \leq t \leq t_2$, και το ω πρέπει να ικανοποιεί $0 \leq \omega(t_3) \leq b$, όπου t_1, t_2, t_3, a και b είναι δοσμένοι αριθμοί στο σχήμα.

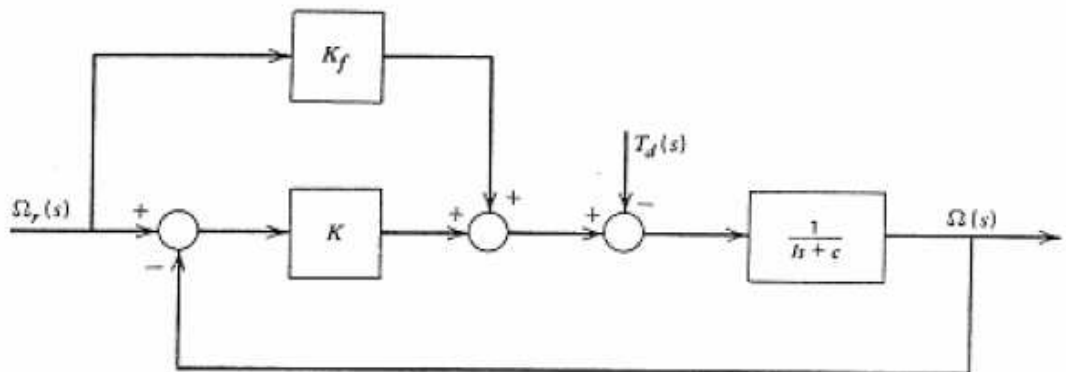
Ας εξετάσουμε αν ο αναλογικός έλεγχος θα μπορούσε να ικανοποιήσει αυτές τις προδιαγραφές. Με τη ρύθμιση εμπρόσθιας ανατροφοδότησης που παρουσιάζεται στο σχήμα, η σχέση σφάλματος, μπορεί να βρεθεί από:

$$E(s) = \frac{(1 - G_f G_m G_p H)R(s) + G_p H D(s)}{1 + G_a G_m G_p H} \quad \text{με} \quad T_d(s) = 0 \quad \text{και}$$

$$\text{είναι: } E(s) = \frac{Is + c - K_f}{Is + c + K} \Omega_r(s)$$

Για $\Omega_r(s) = a / s^2$ το σφάλμα σταθερής κατάστασης

$$\text{είναι: } e_{ss} = \begin{cases} \infty, & K_f \neq c \\ \frac{aI}{c+K}, & K_f = c \end{cases}$$



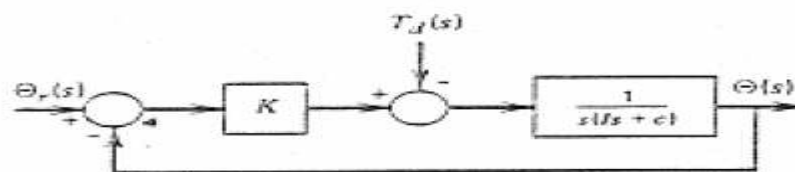
Σχήμα: μπλοκ διάγραμμα αφαίρεσης της αντιστάθμισης εισόδου

Αν και το προβλέψιμο e_{ss} είναι ∞ για $K_f \neq c$, η είσοδος ράμπας θετικής κλίσης σε αυτήν την εφαρμογή δεν υπάρχει για $t > t_1$. Μπορούμε να κάνουμε $|e_{ss}(t_1)| < a$ όπως απαιτείται, με την αντιστάθμιση εμπρόσθιας τροφοδότησης και την κατάλληλη επιλογή του K . εντούτοις, αυτό απαιτεί μια μέθοδο ανάλυσης δοκιμής και σφάλματος (trial and error) για να βρεθεί το K . Εάν ξέρουμε το c με αρκετή ακρίβεια, ο απλούστερος τρόπος είναι να θέσουμε $K_f = c$ και να επιλέξουμε το K έτσι ώστε $e_{ss} = \frac{aI}{c + K} = a$.

Κατά συνέπεια, το $K = (aI - ac) / a$ θα δώσει $|e(t_1)| \leq a$ όπως απαιτείται. Απομένει να φανεί εάν το υπόλοιπο των προδιαγραφών θα ικανοποιηθεί. Η απόκριση στο σχεδιάγραμμα ταχύτητας μπορεί να βρεθεί αναλυτικά ή από την προσομοίωση με τις υπολογισμένες τιμές του K και K_f .

5.9. Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης

Ο αναλογικός έλεγχος μιας ουδέτερης σταθερής εγκατάστασης δεύτερου βαθμού αντιπροσωπεύεται από τον ελεγκτή θέσης στο σχήμα, εάν η συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή είναι μια σταθερά $G_0(s) = K_0$. Ας υποθέσουμε ότι η συνάρτηση μεταφοράς του κινητήρα είναι $G_m(s) = K_r / R$ όπως προηγουμένως. Το τροποποιημένο μπλοκ διάγραμμα δίνεται στο σχήμα, με $K = K_1 K_0 K_r / R$.



Σχήμα: μπλοκ διάγραμμα ενός σερβομηχανισμού θέσης με αναλογικό έλεγχο

Το σφάλμα μετατόπισης είναι μηδέν, εάν το σύστημα είναι σταθερό ($c > 0, K > 0$). Η απόκλιση στην έξοδο λόγω της διαταραχής μοναδιαίου βήματος είναι $-1/K$. αυτή η απόκλιση μπορεί να μειωθεί με την επιλογή μεγάλου K .

Το σφάλμα μετατόπισης για τον αναλογικό έλεγχο ενός συστήματος δεύτερης τάξης δεν είναι πάντα μηδέν. Εάν η συνάρτηση μεταφοράς των εγκαταστάσεων ήταν $1/(Is^2 + cs + k)$, τότε το σφάλμα μετατόπισης είναι $k/(k + k)$. Το σφάλμα μηδενικής μετατόπισης στο συγκεκριμένο παράδειγμα εμφανίζεται επειδή $k = 0$ και το οποίο μας δείχνει ότι η συνάρτηση μεταφοράς των εγκαταστάσεων περιέχει έναν καθαρό ολοκληρωτή (αυτός ο ολοκληρωτής παρουσιάζεται μέσα από παραγοντοποιημένη μορφή στο σχήμα).

Η μεταβατική αυτή συμπεριφορά υποδεικνύεται από την αναλογία απόσβεσης:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{IK}}$$

Για μια μικρή απόσβεση, η απόκριση σε μια βηματική εισαγωγή θα έχει πολλές ταλαντώσεις και μεγάλη υπέρβαση. Η κατάσταση επιδεινώνεται εάν η ενίσχυση K αυξηθεί για να μειώσει την απόκλιση λόγω της διαταραχής.

Το σφάλμα σταθερής κατάστασης αυτού του συστήματος για μια μοναδιαία είσοδο ράμπας είναι $e_{ss} = c/K$. Κατά συνέπεια, εάν το c είναι μεγάλο, το σύστημα δεν έχει πολλές ταλαντώσεις και επομένως το σφάλμα ράμπας είναι μεγάλο. Για μια διαταραχή ράμπας το $e_{ss} = \infty$. Επομένως καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο αναλογικός έλεγχος αυτού του τύπου σε εγκαταστάσεις δεύτερης τάξης δεν είναι μια καλή επιλογή.

5.10. Ηλεκτρονικοί αναλογικοί ελεγκτές

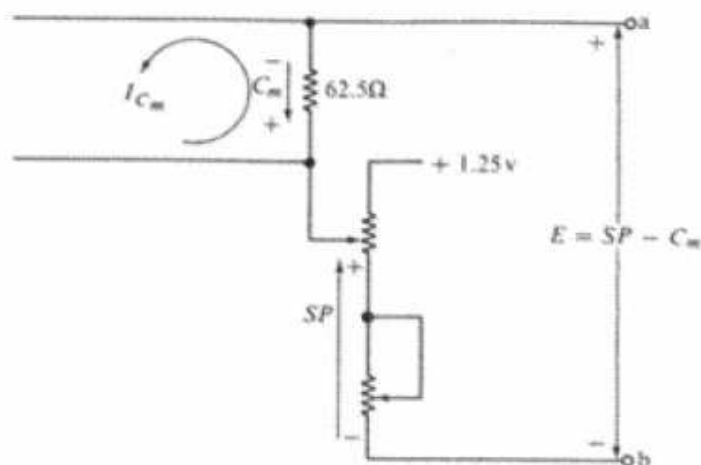
Ένας ηλεκτρονικός αναλογικός ελεγκτής έχει δύο κύρια μέρη: (1) τον ανιχνευτή σφάλματος και (2) την μονάδα μεθόδου ελέγχου. Ένα παράδειγμα ενός ανιχνευτή ηλεκτρικού σφάλματος απεικονίζεται στην εικόνα 3.29. Η έξοδος του πομπού μέτρησης είναι ένα σήμα ηλεκτρικής ροής 4 έως 20 mA. Κάθε τιμή της ροής αναπαριστά μία μοναδική τιμή της ελεγχόμενης

μεταβλητής(ο). Τα 4 mA αναπαριστούν την ελάχιστη τιμή του c και τα 20 mA την μέγιστη. Το ηλεκτρικό σήμα εφαρμόζεται σε μία αντίσταση των 62.5Ω , και έχει ως αποτέλεσμα ένα σήμα τάσης 0.25 έως 1.25 V κατά μήκος της αντίστασης.

Το σημείο ρύθμισης παράγεται από ένα ποτενσιόμετρο με εύρος εξόδου από 0.25 έως 1.25 V. Τα δύο σήματα τάσης είναι συνδεδεμένα αντίθετα έτσι ώστε η τάση μεταξύ των σημείων a και b να είναι ίση με το σήμα του σημείου ρύθμισης μείον την μετρήσιμη τιμή του σήματος.

$$e = sp - c_m$$

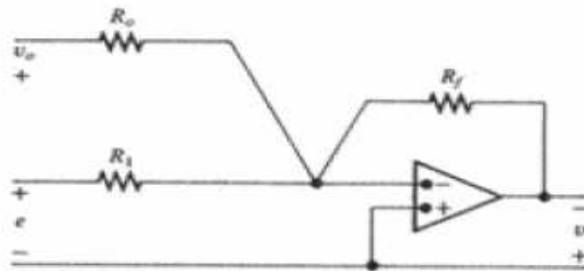
Η μονάδα μεθόδου ελέγχου καλείται μερικές φορές ως "ελεγκτής", παρόλα αυτά είναι πραγματικά ένα κομμάτι της μονάδας του ελεγκτή. Ο ηλεκτρονικός αναλογικός ελεγκτής χρησιμοποιεί έναν λειτουργικό ενισχυτή και μερικές αντιστάσεις και πυκνωτές για να σχηματίσει την μονάδα μεθόδου ελέγχου. Ο λειτουργικός ενισχυτής χρησιμοποιείται σαν γεννήτρια συναρτήσεως και οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές είναι κατανομημένοι ώστε να υλοποιούν την συνάρτηση μεταφοράς της επιθυμητής μεθόδου ελέγχου ή συνδυασμού μεθόδων.



Σχήμα: ανιχνευτής ηλεκτρικού σφάλματος

Ο αναλογικός ελεγκτής αναλογικής μεθόδου χρησιμοποιεί τρεις αντιστάσεις για να σχηματίσει έναν ενισχυτή αντιστροφής. Το κύκλωμα έχει δύο εισόδους, ένα σφάλμα(β) και μια έξοδο μετατόπισης(ν). Η αναλογική

ενίσχυση(P) είναι ίση με την ανάδραση της αντίστασης(P₀ δια την αντίσταση εισόδου σφάλματος(P_i). Η αντίσταση μετατόπισης πρέπει να είναι ίση με την αντίσταση ανάδρασης(P_i) για να ικανοποιήσει την εξίσωση στο πεδίο του χρόνου. Οι γραμμές εξόδου μπορούν να αντιστραφούν για να κάνουν την έξοδο είτε θετική είτε αρνητική ανάλογα με το πρόσημο του σφάλματος. Μερικές εφαρμογές του ελεγκτή θα απαιτούν θετική έξοδο για το θετικό σφάλμα και άλλες αρνητική έξοδο για το θετικό σφάλμα.



Συνάρτηση στο πεδίο του χρόνου: $v = Pe + v_0$

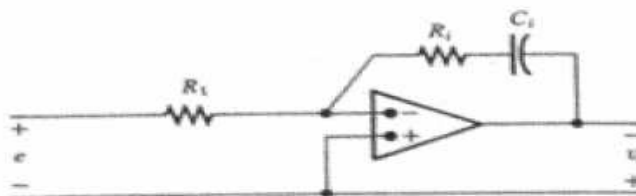
Συνάρτηση μεταφοράς: $P = \frac{V}{E}$

$$P = \frac{R_f}{R_i}$$

$$R_o = R_f$$

Σχήμα: αναλογικός ελεγκτής αναλογικής μεθόδου

Ο ελεγκτής PI χρησιμοποιεί δύο αντιστάσεις και έναν πυκνωτή για να υλοποιήσει την συνάρτηση μεταφοράς PI. Ο πυκνωτής(O_i) είναι τοποθετημένος σε σειρά με την αντίσταση ανάδρασης(P_i). Η ενίσχυση(P) είναι ίση με την αντίσταση ανάδρασης(P_i) δια την αντίσταση εισόδου(P_i). Ο ρυθμός ενέργειας ολοκληρώματος είναι ίσος με τον αντίστροφο του γινομένου της αντίστασης εισόδου και του πυκνωτή.



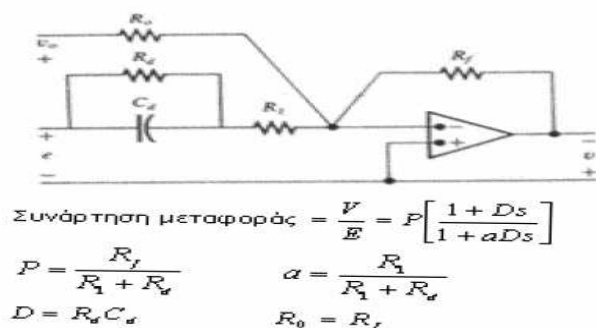
Συνάρτηση μεταφοράς $= \frac{V}{E} = P \left[\frac{I + S}{S} \right]$

$$I = \frac{1}{R_i C_i}$$

$$P = R_i / R_o$$

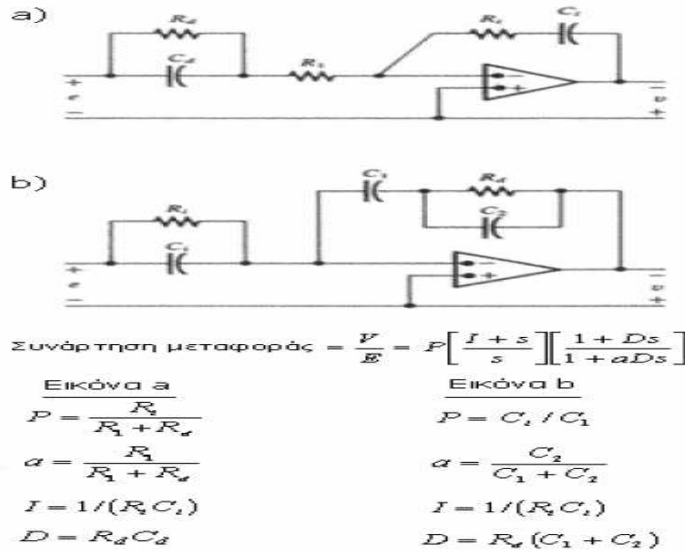
Σχήμα: αναλογικός ελεγκτής PI

Ο ελεγκτής PD χρησιμοποιεί τέσσερις αντιστάσεις και έναν πυκνωτή για να υλοποιήσει την μέθοδο PD . Το κύκλωμα είναι ένας ελεγκτής αναλογικής μεθόδου με έναν παράλληλο συνδυασμό αντιστάσεων(R_d) και έναν πυκνωτή(C_d) τοποθετημένους σε σειρά με την αντίσταση εισόδου(R_1). Οι εξισώσεις για την ενίσχυση, σταθερά χρόνου ενέργειας παραγώγου και ο συντελεστής περιοριστή παραγώγου δίνονται στην εικόνα. Μια τυπική τιμή του α είναι 0.1.



Σχήμα: αναλογικός ελεγκτής PD

Δύο εκδόσεις του αναλογικού ελεγκτή PID παρουσιάζονται στην εικόνα . Η μία έκδοση, σχηματίζει την ενέργεια παραγώγου στην πλευρά της εισόδου και την ενέργεια ολοκληρώματος στην πλευρά της εξόδου. Η άλλη έκδοση, κάνει απλώς το αντίθετο.



Σχήμα: αναλογικός ελεγκτής PID

Η συνάρτηση μεταφοράς για τον αναλογικό ελεγκτή PID είναι μια αλλαγμένη έκδοση της εξίσωσης $\frac{V}{E} = p \left(\frac{I+s+Ds^2}{s+aDs^2} \right)$. Η αλλαγή γίνεται για

λόγους οικονομίας και αποτελείται από δύο δίκτυα πρώτης τάξης σε σειρά. Η υλοποίηση της παραπάνω εξίσωσης είναι η ακριβής του μορφή και απαιτεί τρεις λειτουργικούς ενισχυτές. Οι όροι παραγώγου και ολοκληρώματος πρέπει να σχηματισθούν παράλληλα και έπειτα να αθροιστούν από τον ενισχυτή άθροισης. Η αλλαγή αποτελείται από την είσοδο ενός όρου αλληλεπίδρασης (PIDe) στην εξίσωση του πεδίου του χρόνου όπως φαίνεται παρακάτω:

$$v = P_i + PIDe + PI \int_0^t edt + PD \frac{de}{dt} - aD \frac{dv}{dt} + v_0$$

Ένας μετασχηματιστής Laplace της παραπάνω εξίσωσης με $v_0 = 0$ δίνει την εξής εξίσωση στο πεδίο των συχνοτήτων:

$$V = PE + PIDe + P \left\{ \frac{1}{s} \right\} E + PDsE - aDsV$$

Λύνοντας τον λόγο V/E παίρνουμε την ακόλουθη συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{V}{E} = \frac{P + PID + PI / s + PDs}{1 + aDs} \quad \text{ή}$$

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

6.1. ΨΗΦΙΑΚΟΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ

Ορισμός:

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.

6.2. 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.

$$e_1 = sp - c_{m1} = \text{πρώτο δείγμα σφάλματος}$$

$$e_2 = sp - c_{m2} = \text{δεύτερο δείγμα σφάλματος}$$

$$e_3 = sp - c_{m3} = \text{τρίτο δείγμα σφάλματος}$$

⋮

$$e_n = sp - c_{mn} = \text{n-οστό δείγμα σφάλματος}$$

6.3. 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 παρούσα θέση της βαλβίδας, επί τοις εκατό του συνόλου

P = η ενίσχυση του ελεγκτή

e_n = το παρόν δείγμα σφάλματος, επί τοις εκατό του συνόλου

Δt = ο χρόνος του δείγματος, σε sec

I = το αναλογικό ποσοστό, σε sec^{-1}

D = η διαφορική χρονική σταθερά, σε sec

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

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

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

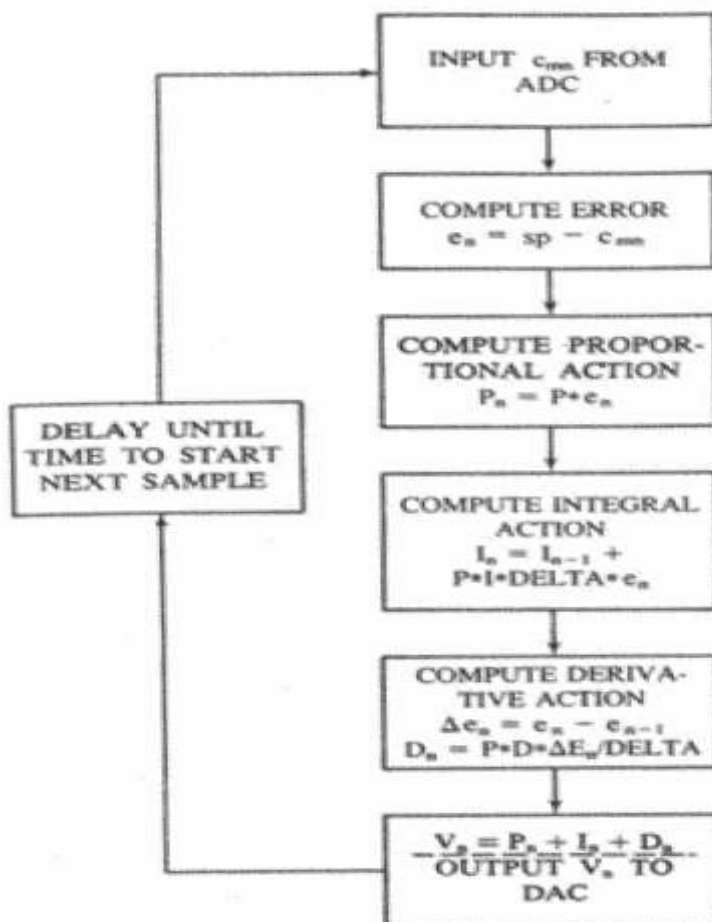
$$v_{n-1} = P e_{n-1} + PI \Delta t \sum_{j=1}^{j=n-1} e_j + PD \frac{\Delta e_{n-1}}{\Delta t}$$

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

όπου: $\Delta v_n = v_n - v_{n-1}$

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

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



Σχήμα: 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 πλεονέκτημα ότι ο ελεγκτής "θυμάται" την θέση της βαλβίδας. Αν ο χρόνος δείγματος, Δt , είναι πολύ μικρότερος της σταθεράς χρόνου ενέργειας ολοκληρώματος, $T_i = 1/I$, ο αλγόριθμος θέσης θα παράγει μια συμπεριφορά παρόμοια με έναν αναλογικό ελεγκτή.

6.4. Μέθοδος ολοκληρώματος

Η μέθοδος ολοκληρώματος στην εξίσωση $v_n = Pe_n + PI\Delta t \sum_{f=1}^{f-n} e_f + PD \frac{\Delta e_n}{\Delta t}$,

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

$$\text{Όρος ολοκληρώματος} = PI\Delta t \sum_{f=1}^{f-n} e_f$$

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

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

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:

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

$$\text{Αλλαγή μεθόδου ολοκληρώματος} = \frac{e_j}{I_{DIV}}$$

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 $I=0,002 \text{ s}^{-1}$, 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, e_n , 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.

6.5. Μέθοδος παραγώγου

Η μέθοδος παραγώγου στην εξίσωση $v_n = Pe_n + PI\Delta t \sum_{f=1}^{f-n} e_f + PD \frac{\Delta e_n}{\Delta t}$ 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

τον ακόλουθο όρο:

$$\text{Όρος παραγώγου} = PD \left(\frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta t} \right)$$

Ο όρος $(e_n - e_{n-1})/\Delta t$ είναι ουσιαστικά μια εκτίμηση του ρυθμού αλλαγής του σφάλματος, de/dt .

6.6. Προηγμένος έλεγχος

Ο προηγμένος έλεγχος (advanced control) αναφέρεται σε διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιούν κάτι περισσότερο από ένα σύστημα ελέγχου ενός βρόγχου, μιας μεταβλητής ανάδρασης και τριών μεθόδων ελέγχου. Επομένως ο προηγμένος έλεγχος περιλαμβάνει τον έλεγχο σειριακής σύζευξης (cascade control), τον έλεγχο ορθής τροφοδοσίας (feedforward control), τους ελεγκτές προσαρμόσιμης αυτό-ρύθμισης και τα συστήματα ελέγχου πολλών μεταβλητών.

6.7. Ελεγκτής ON/OFF

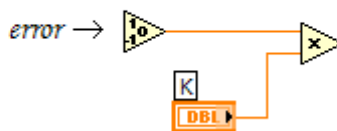
Ο ON/OFF ελεγκτής θεωρείται ένας από τους απλούστερους ελεγκτές. Αν θεωρήσουμε σύστημα Σ και ένα σήμα αναφορά, το οποίο συμβολίζει και την επιθυμητή μου έξοδο, τότε για να εισάγω τον ελεγκτή αρκεί σε κάθε επανάληψη να πολλαπλασιάσω το πρόσημο του σφάλματος μεταξύ της πραγματικής εξόδου του Σ και της επιθυμητής με μία σταθερά u_{\max} . Η έξοδος του ελεγκτή δίνεται συνεπώς από τη σχέση: $u = \begin{cases} u_{\max}, & e \geq 0 \\ -u_{\max}, & e < 0 \end{cases} \Rightarrow u = u_{\max} \text{sign}(e)$. Η έξοδος του ελεγκτή αποτελεί ταυτόχρονα και την είσοδο για το σύστημα. Για να υλοποιήσω ένα on/off ελεγκτή, χρειάζεται να ορίσω το u_{\max} .

Η μεταβατική απόκριση του συστήματος εξαρτάται από την απόσταση της αρχικής εξόδου του Σ από την επιθυμητή και από το μέγεθος του u_{\max} . Όσο μεγαλύτερο, τόσο γρηγορότερη είναι η σύγκλιση. Πάντα θα πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί με τα επίπεδα στα οποία κυμαίνεται το u_{\max} , μιας και αν ξεφύγει από ένα εύρος τότε το σύστημα μπορεί να οδηγηθεί σε αστάθεια. Η απόκριση ενός συστήματος με on/off ελεγκτή στη μόνιμη κατάσταση

παρουσιάζει ταλαντώσεις. Το εύρος και η περίοδος αυτών εξαρτώνται από το σύστημα και από τις προεπιλεγθείσες παραμέτρους.

6.8. Αλγόριθμος ON/OFF

Ο on/off, όπως αναφέρθηκε, είναι ένας από τους πιο απλούς ελεγκτές. Στο σχήμα βλέπουμε την υλοποίησή του σε περιβάλλον LabVIEW. Ως «error» αναφέρεται το σφάλμα που προκύπτει σε κάθε επανάληψη από τη σύγκριση μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής ταχύτητας. Εν συνεχεία διαβάζεται το πρόσημο αυτού και πολλαπλασιάζεται με το αριθμό K , ο οποίος ελέγχεται από το panel χειρισμού. Το αποτέλεσμα σε κάθε επανάληψη αποτελεί τη τιμή κατά την οποία διορθώνεται η συχνότητα.



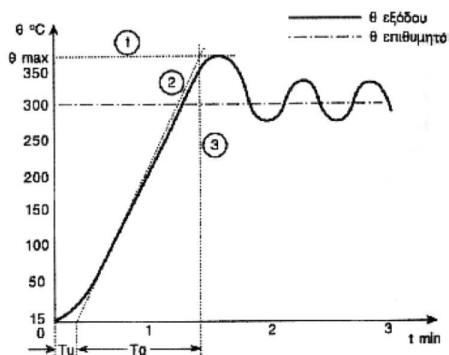
Σχήμα: Υλοποίηση του on/off ελεγκτή

6.9. Θεωρητικό μέρος ON/OFF

Η θερμοκρασία είναι μια από τις σημαντικότερες μεταβλητές λειτουργίας των βιομηχανικών διεργασιών. Από τη θερμοκρασία εξαρτάται η απόδοση, η ποιότητα και η ασφάλεια των διεργασιών αυτών και για αυτό το λόγο δίνεται μεγάλη προσοχή στη ρύθμιση των παραμέτρων των ελεγκτών τύπου PID.

Από τις βασικότερες μεθόδους ρύθμισης των παραμέτρων αυτών, είναι αυτή των Ziegler- Nichols.

Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο, πρέπει αρχικά να μετρηθεί πειραματικά η βηματική απόκριση του συστήματος (φούρνος στην προκειμένη περίπτωση), με τη μέθοδο ελέγχου ON/OFF. Από τις πειραματικές μετρήσεις προκύπτει η γραφική απόκριση του συστήματος (σχήμα), από την οποία κατόπιν υπολογίζονται οι σταθερές T_u και T_g (χρόνος υστέρησης και χρόνος εξισορρόπησης αντίστοιχα).



Σχήμα: απόκριση συστήματος σε έλεγχο on/off

Από το λόγο T_u/T_g συμπεραίνουμε την ποιότητα προσέγγισης του πραγματικού συστήματος, στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η δυνατότητα ελέγχου του συστήματος σύμφωνα με το λόγο T_u/T_g .

Λόγος T_u/T_g	Δυνατότητα Ελέγχου
$\frac{T_u}{T_g} \leq 0.1$	Πολύ καλή
$0.1 < \frac{T_u}{T_g} < 0.2$	Καλή
$0.2 < \frac{T_u}{T_g} < 0.33$	Μέτρια
$0.33 \leq \frac{T_u}{T_g}$	Αδύνατη

Πίνακας: προσδιορισμός της δυνατότητας ελέγχου του συστήματος

Κατόπιν πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί για την εύρεση των παραμέτρων του ελεγκτή ανάλογα με τη δομή του.

➤ Για ελεγκτή P: $X_p = \theta_{\max} \cdot \frac{T_u}{T_g} (^{\circ}C)$

➤ Για ελεγκτή PI: $X_p = 1,2 \cdot \theta_{\max} \cdot \frac{T_u}{T_g} (^{\circ}C)$
 $T_n = 3,3 \cdot T_u$ (sec)

➤ Για ελεγκτή PD:

$$X_p = 0,83 \cdot \theta_{\max} \cdot \frac{T_u}{T_g} (^\circ C)$$

$$T_v = 0,25 \cdot T_u (\text{sec})$$

➤ Για ελεγκτή PID:

$$X_p = 0,83 \cdot \theta_{\max} \cdot \frac{T_u}{T_g} (^\circ C)$$

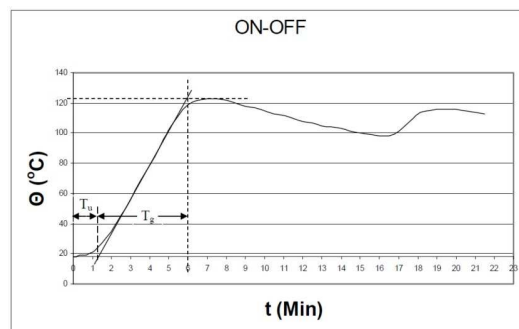
$$T_n = 2 \cdot T_u (\text{sec})$$

$$T_v = 0,4 \cdot T_u (\text{sec})$$

Μετατρέπουμε την αναλογική περιοχή X_p του ελεγκτή P σε X_p % της πλήρους κλίμακας που μπορεί να ρυθμιστεί από τον ελεγκτή σύμφωνα με τον

τύπο: $X_p \% = \frac{X_p \cdot 100}{\theta_{\text{contr,max}}}$

Όπου $\theta_{\text{contr,max}}$: Η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί ο ελεγκτής να ρυθμίσει.

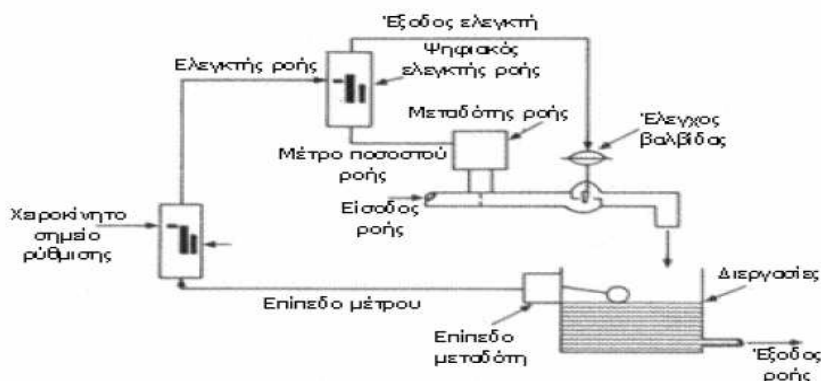


Γράφημα: η μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το χρόνο για τον ελεγκτή θερμοκρασίας on/off

6.10. Έλεγχος σειριακής σύζευξης

Ο έλεγχος αυτός χρησιμοποιεί δύο ελεγκτές με την έξοδο του κύριου ελεγκτή να παρέχει το σημείο ρύθμισης για τον δευτερεύων ελεγκτή. Ο βρόγχος ελέγχου στάθμης της εικόνας παρέχει μια εξαιρετική εφαρμογή του ελέγχου σειριακής σύζευξης. Οι αλλαγές στην στάθμη συμβαίνουν αργά λόγω της χωρητικότητας της δεξαμενής. Αντίθετα, οι αλλαγές στην ροή συμβαίνουν πολύ γρήγορα. Όταν μια αναταραχή προκαλεί μια αλλαγή στον ρυθμό ροής εισόδου, υπάρχει μια σημαντική υστέρηση πριν η στάθμη αλλάξει αρκετά ώστε να διορθωθεί η αναταραχή. Η αναταραχή συνήθως αλλάζει πριν γίνει η

διόρθωση. Η βραδέως κινούμενη διόρθωση έχει ως αποτέλεσμα διακυμάνσεις στην στάθμη. Ο έλεγχος σειριακής σύζευξης χρησιμοποιείται για να βελτιώσει το σύστημα ελέγχου στάθμης.



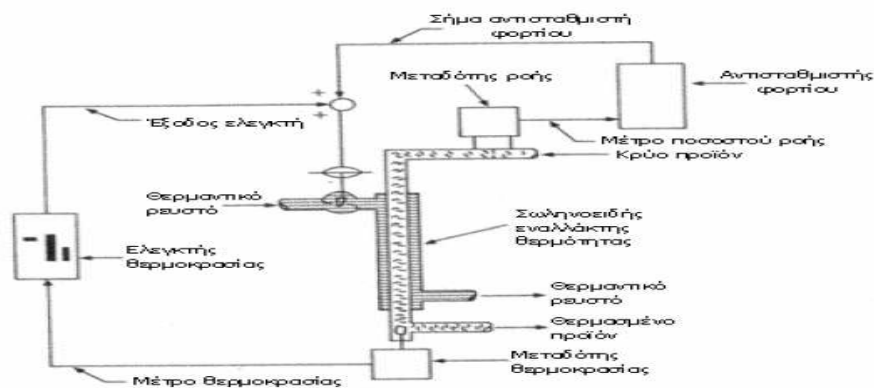
Σχήμα: εφαρμογή ελέγχου σειριακής σύζευξης

Ένας μεταδότης ροής και ένας δευτερεύων ελεγκτής χρησιμοποιούνται για να σχηματίσουν έναν βρόγχο ελέγχου ροής μέσα στον βρόγχο ελέγχου στάθμης. Η έξοδος του ελεγκτή στάθμης είναι το απομακρυσμένο σημείο ρύθμισης του ελεγκτή ροής. Ο βρόγχος ελέγχου ροής ανταποκρίνεται γρήγορα στις αναταραχές ροής, θεωρητικά εξαλείφοντας τις διακυμάνσεις στάθμης που προκαλούνται σε έναν απλό βρόγχο ελέγχου στάθμης. Οι βιομηχανικές διαδικασίες έχουν πολλές εφαρμογές για τον έλεγχο σειριακής σύζευξης.

6.11. Έλεγχος ορθής τροφοδοσίας

Ο έλεγχος αυτός χρησιμοποιεί ένα μοντέλο της διαδικασίας για να κάνει αλλαγές στην έξοδο του ελεγκτή σε απόκριση των μετρήσιμων αλλαγών σε μία κύρια μεταβλητή φορτίου χωρίς να περιμένει να συμβεί το σφάλμα. Ο βρόγχος ελέγχου σωληνοειδή εναλλάκτη θερμότητας στην εικόνα 3.20 είναι ο κύριος υποψήφιος για τον έλεγχο ορθής λειτουργίας. Ο ρυθμός ροής προϊόντος είναι το κύριο φορτίο στην διαδικασία. Μια αύξηση στον ρυθμό ροής του προϊόντος απαιτεί μια αύξηση στον ρυθμό ροής του θερμαντικού υγρού για να διατηρηθεί η θερμοκρασία του προϊόντος στο σημείο ρύθμισης.

Στην εικόνα , ένας μεταδότης ροής μετρά τον ρυθμό ροής του προϊόντος και στέλνει το σήμα σε έναν αντισταθμιστή φορτίου. Ο αντισταθμιστής φορτίου υπολογίζει την απαραίτητη διόρθωση για να ρυθμίσει τον ελεγκτή θερμότητας. Η διόρθωση πραγματοποιείται από την στιγμή που μετρείται η αλλαγή στο ρυθμό ροής του προϊόντος. Ο όρος ορθή τροφοδοσία προέρχεται από το γεγονός τού ότι το σήμα αντιστάθμισης κινείται στην ίδια κατεύθυνση με το προϊόν. Αυτό αντιτίθεται στο σήμα της μετρήσιμης θερμότητας που κινείται στην αντίθετη κατεύθυνση, έτσι δικαιολογείται και ο όρος ανάδραση για τον κύριο βρόγχο.



Σχήμα: εφαρμογή ελέγχου ροής τροφοδοσίας

Αν η αντιστάθμιση ορθής τροφοδοσίας είναι τέλεια και δεν υπάρχουν άλλες μεταβλητές αναταραχής στην διαδικασία, ο βρόγχος ανάδρασης μπορεί να εξαλειφθεί. Αυτές οι ιδανικές συνθήκες όμως δεν συμβαίνουν ποτέ στην πραγματικότητα και έτσι τα συστήματα ελέγχου ορθής τροφοδοσίας εμπεριέχουν έναν βρόγχο ανάδρασης για τις τελικές διορθώσεις.

6.12. Προσαρμόσιμοι ελεγκτές

Οι προσαρμόσιμοι ελεγκτές, αλλάζουν τις παραμέτρους ελέγχου για να "προσαρμοστούν" σε αλλαγές στην διαδικασία. Για παράδειγμα μια αλλαγή στον ρυθμό ροής προϊόντος στο σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας στην εικόνα 3.36 θα αλλάξει τον νεκρό χρόνο της διαδικασίας. Μια αλλαγή στον νεκρό χρόνο της διαδικασίας σημαίνει ότι είναι απαραίτητη μια αλλαγή στις

παραμέτρους του ελεγκτή για να "συντονιστεί" αυτός με την διαδικασία. Ένας προσαρμόσιμος ελεγκτής υπολογίζει τις απαραίτητες τιμές των P, I, D για την προσαρμογή στις νέες συνθήκες της διαδικασίας και κάνει τις απαραίτητες αλλαγές. Πολλές διαφορετικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για την "προσαρμογή" του ελεγκτή στις αλλαγές της διαδικασίας.

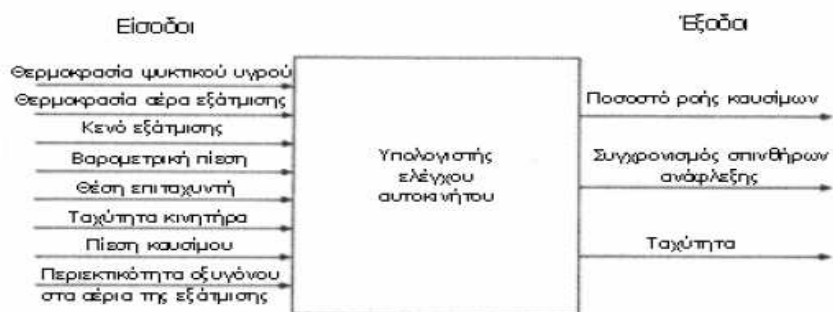
Οι αυτορυθμιζόμενοι ελεγκτές χωρίζονται σε δυο γενικές κατηγορίες: (α) αυτούς που χρησιμοποιούν ένα μοντέλο της διαδικασίας ως βάση για τον συντονισμό και (β) αυτούς που χρησιμοποιούν ως βάση αναγνώριση προτύπων και αποθηκευμένη γνώση.

Ένας τυπικός προσαρμόσιμος ελεγκτής βασισμένος σε μοντέλο εισάγει μια βηματική αλλαγή στο σημείο ρύθμισης και παρατηρεί της απόκριση της διαδικασίας. Ο ελεγκτής έπειτα σχηματίζει ένα μοντέλο της διαδικασίας βασισμένο στην βηματική αλλαγή. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται ρυθμίζοντας το μοντέλο και τις παραμέτρους συντονισμού μέχρι να προσαρμοστούν στην πραγματική διαδικασία.

Η προσέγγιση της αναγνώρισης προτύπων στον προσαρμόσιμο έλεγχο χρησιμοποιεί ένα γράφημα των σφαλμάτων ανά τον χρόνο. Ο ελεγκτής εξετάζει συνεχώς την απόκριση στις φυσικές αναταραχές, ψάχνοντας για την παρουσία ή την απουσία κορυφών, το χρονικό διάστημα μεταξύ αυτών και την αναλογική μετατόπιση. Ακολουθώντας μια αναταραχή, ο ελεγκτής υπολογίζει αυτόματα τα P, I, D βασιζόμενος στο παρατηρούμενο πρότυπο απόκρισης και της γνώσης που είναι αποθηκευμένη στην μνήμη του ελεγκτή.

6.13. Έλεγχος πολλών μεταβλητών

Ο έλεγχος πολλών μεταβλητών χρησιμοποιεί μετρήσεις πολλών μεταβλητών φορτίου της διαδικασίας και μπορεί να εμπλέκει και τον χειρισμό περισσότερων της μίας μεταβλητών διαδικασίας. Τα συστήματα ελέγχου υπολογιστών που χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν τους ψεκαστές καυσίμου και τον χρονισμό των μπουζί στα αυτοκίνητα είναι ένα πολύ καλό παράδειγμα συστημάτων πολλών μεταβλητών.



Σχήμα: εφαρμογή ελέγχου πολλών μεταβλητών

Ο σκοπός του συστήματος που απεικονίζεται στην εικόνα, είναι να ελέγξει τον ρυθμό ροής του ψεκαστή καυσίμου, τον χρονισμό των μπουζί και της ταχύτητας ρελαντί.

Οι είσοδοι στον ελεγκτή περιλαμβάνουν θερμοκρασία ψυκτικού υγρού, θερμοκρασία αέρα εξάτμισης, κενό εξάτμισης, βαρομετρική πίεση, θέση επιταχυντή(γκάζι), ταχύτητα κινητήρα, πίεση καυσίμου και την περιεκτικότητα οξυγόνου στα αέρια της εξάτμισης. Ένας υπολογιστής ελέγχει και τις τρεις μεταβλητές εξόδου. Το σύστημα ελέγχου έχει 8 εισόδους και τρεις εξόδους καθιστώντας το ένα σύστημα ελέγχου πολλών μεταβλητών.

Οι κύριες καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος ελέγχου είναι:

1. *Έναρξη.* Ο ελεγκτής διαβαθμίζει την ποσότητα του καυσίμου που ψεκάζεται στην πολλαπλή εισαγωγής ανάλογα με την θερμοκρασία ψυκτικού του κινητήρα. Ένας ψυχρός κινητήρας λαμβάνει περισσότερο καύσιμο από έναν θερμό. Το σύστημα εκκίνησης παράγει τον χρονισμό των μπουζί εσωτερικά και αγνοεί τα σήματα χρονισμού του υπολογιστή.

2. *Κανονική λειτουργία.* Ο υπολογιστής χρησιμοποιεί τέσσερα σήματα εισόδου για να διατηρήσει μια σχεδόν ιδανική αναλογία αέρα/καυσίμου(περίπου 14.7:1). Οι τέσσερις μεταβλητές εισόδου είναι θερμοκρασία αέρα, κενό εξάτμισης, πίεση καυσίμου και περιεκτικότητα οξυγόνου. Ο υπολογιστής επίσης αλλάζει τον χρονισμό ανάφλεξης βασιζόμενος στην ταχύτητα της μηχανής, το κενό εξάτμισης, την θερμοκρασία του ψυκτικού και την βαρομετρική πίεση.

3. *Ψυχρή λειτουργία.* Ο υπολογιστής παρέχει παραπάνω καύσιμο όταν η θερμοκρασία του ψυκτικού είναι κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή.

4. *Επιτάχυνση.* Ο υπολογιστής παρέχει παραπάνω καύσιμο κατά την επιτάχυνση.

5. *Επιβράδυνση.* Ο υπολογιστής περιορίζει την ποσότητα καυσίμου κατά την επιβράδυνση για να μειώσει την ρύπανση που παράγεται από τον κινητήρα.

6. *Ρελαντί* Η ταχύτητα του ρελαντί αυξάνεται όταν η θερμοκρασία του ψυκτικού είναι κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή. Η ταχύτητα ρελαντί αυξάνεται επίσης όταν η τάση της μπαταρίας είναι χαμηλή, όταν η σχέση ταχύτητας αλλάζει σε όπισθεν, και όταν λειτουργεί το κλιματιστικό του αυτοκινήτου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

7.1. ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΖΟΜΕΝΟΙ ΛΟΓΙΚΟΙ ΕΛΕΓΚΤΕΣ (PLC)

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

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.

7.2. 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 διαβάσει 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) που 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.

7.3. Πλεονεκτήματα

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

- ✓ 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.

✓ 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.

7.4. Στάδια εργασίας

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

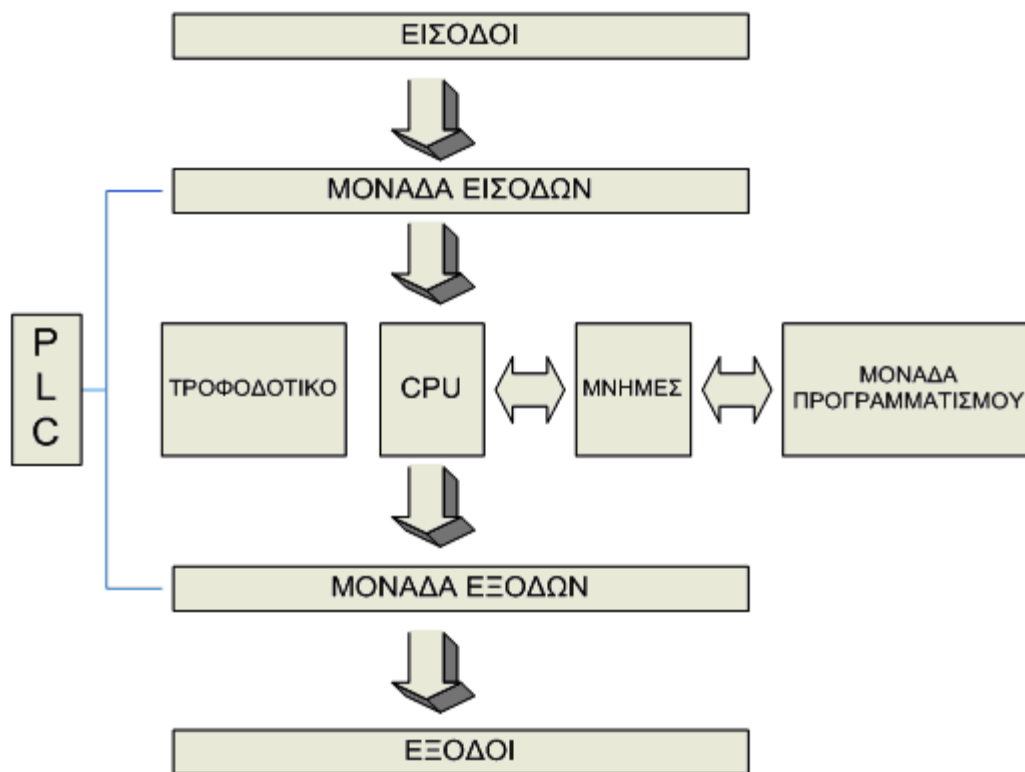
✓ **Τεχνική περιγραφή** - Καταγραφή δηλαδή των απαιτήσεων του πελάτη όσο αφορά τη σημερινή κατάσταση της εγκατάστασης, τις απαιτήσεις από τον αυτοματισμό αλλά και τις πιθανές μελλοντικές της επεκτάσεις.

- ✓ **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.

7.5. 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.



Σχήμα: Δομή PLC (Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή)

7.5. 1. Πλαίσιο τοποθέτησης μονάδων

Όλες οι μονάδες, από τις οποίες αποτελείται ένας προγραμματιζόμενος ελεγκτής, πρέπει να τοποθετηθούν σε κάποιο 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.

7.5.2 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.

7.5.3. 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.

7.5.4. 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 μικρό-ρελέ.

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 αντίστοιχος 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 .

7.5.5.Συσκευή προγραμματισμού

Η συσκευή προγραμματισμού είναι μια τελείως ξεχωριστή συσκευή από τη μονάδα αυτοματισμού. Χρησιμοποιείται για την εισαγωγή του προγράμματος στο PLC και την παρακολούθηση της εξέλιξης του αυτοματισμού μέσα από την οθόνη που διαθέτει. Με έναν μόνο προγραμματιστή μπορεί να γίνει ο χειρισμός όλων των μονάδων της ίδιας εταιρίας PLC σε μια αυτοματοποιημένη εγκατάσταση.

7.6. Η μνήμη της κεντρικής μονάδας

Η μνήμη της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας (CPU) διακρίνεται σε μνήμη RAM, ROM και EEPROM.

Μνήμη RAM: Η μνήμη RAM (Random Access Memory, μνήμη τυχαίας προσπέλασης) είναι εκείνη στην οποία μπορούν να γραφτούν και να σβηστούν δεδομένα, και η οποία χάνει τα περιεχόμενα της μόλις πέσει η τροφοδοσία της. Στη μνήμη RAM η κεντρική μονάδα αποθηκεύει μια σειρά από πληροφορίες σε ξεχωριστές περιοχές εργασίας. Μπορούν να διακριθούν οι εξής περιοχές:

- ✓ Περιοχή μνήμης όπου αποθηκεύονται οι καταστάσεις των εισόδων και των εξόδων. Η περιοχή αυτή ονομάζεται για τις εισόδους "εικόνα εισόδου" και για τις εξόδους "εικόνα εξόδου".
- ✓ Περιοχή μνήμης όπου αποθηκεύονται οι ενδιάμεσες πληροφορίες που αφορούν τη λειτουργία του αυτοματισμού.
- ✓ Περιοχή μνήμης των χρονικών.
- ✓ Περιοχή μνήμης των απαριθμητών.
- ✓ Περιοχή μνήμης όπου αποθηκεύονται τα προγράμματα του χρήστη, δηλαδή τα προγράμματα που λειτουργούν ένα συγκεκριμένο αυτοματισμό.

Μνήμη ROM: Στη μνήμη ROM (Read Only Memory) ο κατασκευαστής του προγραμματιζόμενου ελεγκτή αποθηκεύει το λειτουργικό σύστημα του PLC, δηλαδή το πρόγραμμα για όλες τις βασικές λειτουργίες που είναι απαραίτητες για να δουλέψει το PLC.

Μνήμη EEPROM: Επειδή η μνήμη RAM με την απώλεια της τροφοδοσίας χάνει τα δεδομένα της (εκτός αν χρησιμοποιείται μπαταρία), τα PLC χρησιμοποιούν έναν άλλο τύπο μνήμης, την EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory), η οποία προγραμματίζεται και σβήνει ηλεκτρικά. Πρόκειται για μνήμη που με την πτώση της τροφοδοσίας διατηρεί τα δεδομένα της και μπορεί να γραφτεί και να σβηστεί μέσω ειδικού μηχανήματος.

7.7. Αρχή λειτουργίας ενός προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή

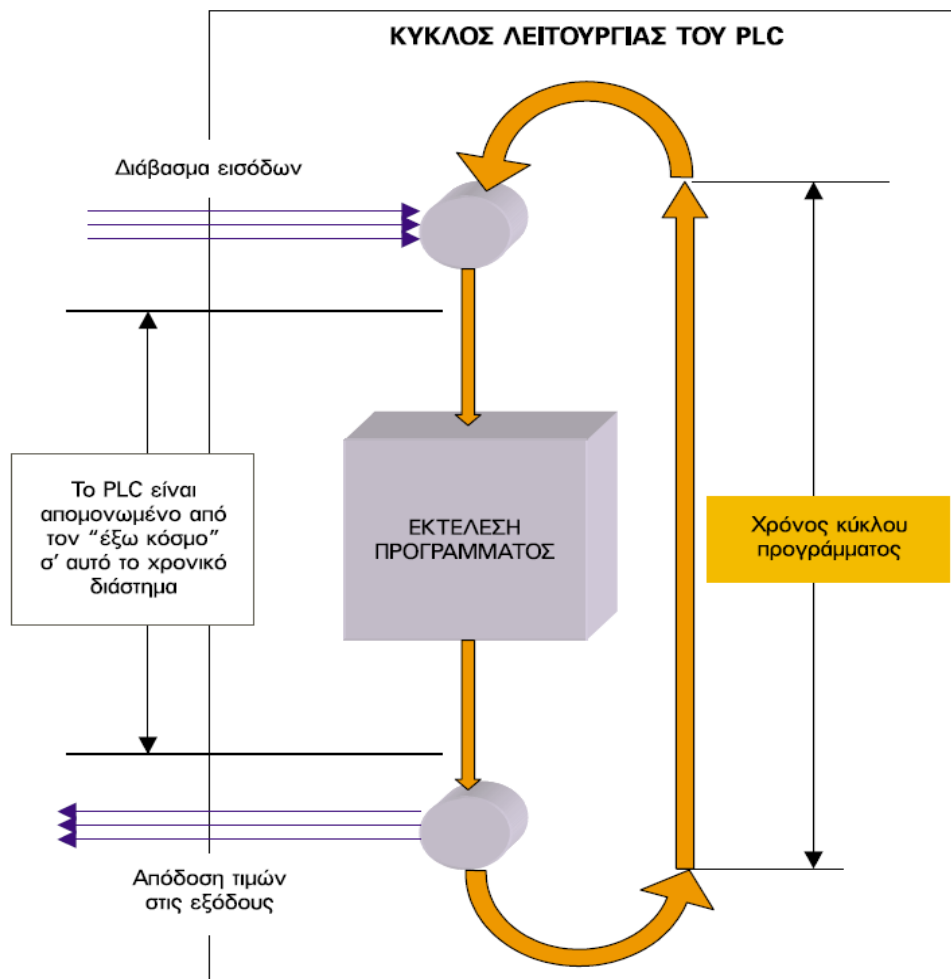
Έστω ότι ένα PLC βρίσκεται σε κατάσταση εκτέλεσης του αυτοματισμού (RUN). Τα βήματα που ακολουθεί κατά τη λειτουργία του είναι τα εξής:

Βήμα 1^ο: Στην αρχή ο μικροεπεξεργαστής "διαβάζει" της εισόδους. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε είσοδο ελέγχει αν έχει "υψηλή" τάση (λογικό "1") ή "χαμηλή" τάση (λογικό "0"). Η τιμή "0" ή "1" για κάθε είσοδο αποθηκεύεται σε μια ειδική περιοχή της μνήμης η οποία ονομάζεται εικόνα εισόδων (input image). Την εικόνα εισόδων μπορείτε να την φανταστείτε σαν έναν πίνακα, όπου ο μικροεπεξεργαστής σημειώνει τις τιμές που διάβασε. Π.χ. είσοδος I1="1", I2="0", I3="0" κ.ο.κ.

Βήμα 2ο: Στη συνέχεια ο μικροεπεξεργαστής χρησιμοποιώντας σαν δεδομένα τις τιμές των εισόδων, που διάβασε, εκτελεί τις εντολές του προγράμματος. Το πρόγραμμα αυτό στην ουσία περιέχει μια σειρά από λογικές πράξεις. Η εκτέλεση του προγράμματος θα δώσει αποτελέσματα για τις εξόδους. Τα αποτελέσματα αυτά αποθηκεύονται στην ειδική περιοχή της μνήμης που ονομάζεται εικόνα εξόδων (output image). Όπως η εικόνα εισόδων, έτσι και η εικόνα εξόδων περιέχει την τιμή ("0" ή "1") για κάθε έξοδο. Σημειώνουμε ότι οι τιμές αυτές προκύπτουν από την εκτέλεση των λογικών πράξεων του προγράμματος.

Βήμα 3°: Στη συνέχεια ο μικροεπεξεργαστής θέτει τις τιμές της εικόνας εξόδων στις εξόδους. Αυτό σημαίνει ότι θα δοθεί "υψηλή" τάση σε όποια έξοδο έχει "1" και χαμηλή τάση σε όποια έξοδο έχει "0".

Με τη συμπλήρωση του 3ου βήματος συμπληρώνεται ένας πλήρης κύκλος λειτουργίας και η διαδικασία αρχίζει από την αρχή. Ο κύκλος λειτουργίας εκτελείται συνεχώς όσο το PLC βρίσκεται σε κατάσταση RUN. Δηλαδή ένα PLC εκτελεί συνεχώς τα βήματα του κύκλου λειτουργίας. Στο σχήμα φαίνεται ένας κύκλος λειτουργίας PLC.



Σχήμα: Κύκλος λειτουργίας PLC

Ο χρόνος που χρειάζεται για να εκτελέσει το PLC ένα πλήρη κύκλο λειτουργίας ονομάζεται χρόνος κύκλου και εξαρτάται από την ταχύτητα του επεξεργαστή του PLC, αλλά και από τον αριθμό και το είδος των εντολών του

προγράμματος. Δηλαδή στο ίδιο PLC για ένα μεγαλύτερο πρόγραμμα έχουμε μεγαλύτερο χρόνο κύκλου.

Ο χρόνος κύκλου αποτελεί ένα μέτρο σύγκρισης μεταξύ των PLC. Για να μπορούν να συγκριθούν τα PLC ως προς την ταχύτητα εκτέλεσης ενός προγράμματος, ορίζουμε τον μέσο χρόνο κύκλου, σαν το χρόνο κύκλου ενός προγράμματος που περιλαμβάνει 1 Kbytes δυαδικές εντολές. Πάντως στη χειρότερη περίπτωση και σε ένα αργό PLC, ο χρόνος κύκλου δεν ξεπερνά τις μερικές εκατοντάδες millisecond.

7.8. Κύριες λειτουργίες προγραμματιζόμενων λογικών ελεγκτών

Τα PLC σήμερα έχουν και επιπλέον λειτουργίες που βοηθούν στην δημιουργία του αυτοματισμού. Οι λειτουργίες αυτές αυξάνουν συνεχώς καθώς τα PLC εξελίσσονται με ταχύτερους ρυθμούς. Αναφέρονται ενδεικτικά οι σημαντικότερες από αυτές.

✓ **Λειτουργία απαριθμητών.** Οι απαριθμητές αποτελούν ακόμα ένα πολύ σημαντικό στοιχείο των PLC. Οι απαριθμητές μπορούν να απαριθμήσουν εξωτερικούς ή εσωτερικούς παλμούς. Η απαρίθμηση μπορεί να είναι προς τα πάνω (count up) ή προς τα κάτω (count down). Η λειτουργία των απαριθμητών δεν είναι ίδια σε όλα τα PLC.

✓ **Δυνατότητα πραγματικού ρολογιού,** μέσω του οποίου μπορούμε να προγραμματίσουμε κάποιες εξόδους σε πραγματικό χρόνο, ημερομηνία και ώρα.

✓ **Αριθμητικές επεξεργασίες.** Τα σύγχρονα PLC έχουν προσεγγίσει πάρα πολύ τις δυνατότητες των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Σχεδόν όλα τα PLC έχουν σήμερα τη δυνατότητα να επεξεργάζονται αριθμητικές πράξεις.

✓ **Αναλογικές εισοδοί-εξοδοί.** Τα PLC ενώ αρχικά ήρθαν για να αντικαταστήσουν τους αυτοματισμούς καλωδιωμένης λογικής (αυτοματισμούς με ρελέ), οι δυνατότητές τους έχουν εξαπλωθεί με προοπτική να καλύψουν πλήρως και τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, όπως είναι αναλογικοί έλεγχοι θερμοκρασίας, πίεσης, στάθμης, στροφών κινητήρων κλπ. Αυτό γίνεται δυνατό με την δυνατότητα των PLC να δέχονται και να επεξεργάζονται αναλογικές εισόδους, όπως και να παρέχουν αναλογικές

εξόδους. Το PLC μετατρέπει τις αναλογικές τιμές των εισόδων σε ψηφιακές τιμές και στη συνέχεια επεξεργάζεται τις τιμές αυτές αξιοποιώντας τις δυνατότητες για επεξεργασία ψηφιακών αριθμών όπως ήδη προαναφέρθηκε. Η δυνατότητα επεξεργασίας αναλογικών σημάτων έχει δώσει άλλη δυναμική στην εξέλιξη στα PLC.

✓ **Δικτύωση PLC** – Συνεργασία μεταξύ τους και με ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Η εξέλιξη των PLC σήμερα αλλάζει τη μορφή της βιομηχανίας. Τα PLC μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους ανταλλάσσοντας πληροφορίες, όπως και να συνεργάζονται με ηλεκτρονικούς υπολογιστές, οι οποίοι ασχολούνται με τον έλεγχο όλης της παραγωγής και ακόμη με τον έλεγχο της αποθήκης και του λογιστηρίου του εργοστασίου. Όλα αυτά μαζί αποτελούν ένα βασικό Βιομηχανικό Δίκτυο Αυτοματισμού (Computer Automatic Network, CAN).

7.9. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ PLC

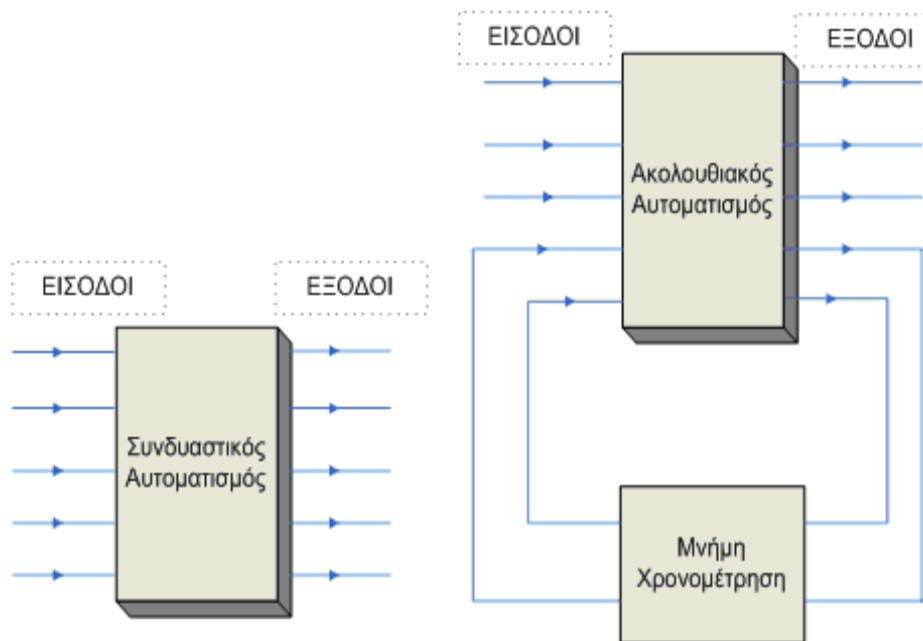
Ανάπτυξη προγράμματος σε προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή

Οι ενότητες που ακολουθούν δείχνουν γενικά πως προγραμματίζεται ένα PLC. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ηλεκτρολογικό σχέδιο του αυτοματισμού δεν είναι απαραίτητο προκειμένου να αναπτυχθεί το πρόγραμμα σε PLC για τον αυτοματισμό. Σε σύνθετους πολύπλοκους αυτοματισμούς η ανάπτυξη του ηλεκτρολογικού σχεδίου του αυτοματισμού είναι πολύ δυσκολότερη από την ανάπτυξη του προγράμματος. Μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις είναι πιο εύκολο να αναπτυχθεί το πρόγραμμα άμεσα από τα δεδομένα του αυτοματισμού παρά χρησιμοποιώντας ένα έτοιμο ηλεκτρολογικό σχέδιο του αυτοματισμού.

Εδώ θα παρουσιαστεί ο προγραμματισμός των PLC σε δύο ενότητες. Στην πρώτη ενότητα θα γίνει προγραμματισμός σ' ένα PLC με **συνδυαστικούς αυτοματισμούς** και στη δεύτερη ενότητα με **ακολουθιακούς αυτοματισμούς**. Αυτό γίνεται, γιατί οι βασικές διαφορές στον προγραμματισμό των PLC εμφανίζονται όταν υπάρχει χρήση χρονικών, απαριθμητών και των λοιπών ειδικών συναρτήσεων των ακολουθιακών αυτοματισμών.

Συνδυαστικός αυτοματισμός: Είναι ο αυτοματισμός στον οποίο οι εξοδοί εξαρτώνται μόνο από τις εισόδους. Αυτό σημαίνει ότι οι κινητήρες, βαλβίδες και οι υπόλοιποι αποδέκτες του αυτοματισμού λαμβάνουν εντολές μόνο από τους αισθητήρες και τους διακόπτες εισόδου και δεν εξαρτώνται από το χρόνο ή από προηγούμενες καταστάσεις των εξόδων.

Ακολουθιακός αυτοματισμός: Είναι ο αυτοματισμός στον οποίο οι εξοδοί εξαρτώνται όχι μόνο από τις εισόδους, αλλά και από το χρόνο ή και από προηγούμενες καταστάσεις των εξόδων. Σχηματικά οι δύο κατηγορίες των αυτοματισμών φαίνονται στο σχήμα.



Σχήμα: Κατηγορίες αυτοματισμού

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Richard C. Dorf – Robert H. Bishop, «Σύγχρονα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου», 9η έκδοση, εκδόσεις Σζιόλα.
- 2) Αναστασία Ν. Βελώνη, «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου - Λυμένες Ασκήσεις», εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- 3) Σταύρος Βολογιαννίδης, «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου Θεωρία και Εφαρμογές».
- 4) Γιώργος Γεωργίου – Φρίστος Ξενοφώντος, «Εισαγωγή στη MATLAB».
- 5) Μανώλης Καβουσιανός, «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου».
- 6) Δημήτρης Καλλιγερόπουλος, «Αναλογική Εξομοίωση Συστημάτων».
- 7) Νίκος Καραμπετάκης, «Εισαγωγή στα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου».
- 8) Παρασκευάς Ν. Παρασκευοπούλου, «Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο, Τόμος Α : Θεωρία», Πρώτη Έκδοση Αθήνα 2001.
- 9) Μιχάλης Σφακιωτάκης, «Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου II – Διαλέξεις Θεωρίας», Δεκέμβριος 2009.
- 10) Γεώργιος Φ. Φραγκούλης, «Εισαγωγή στο MATLAB – SI-MULINK».
- 11) Διαδίκτυο