

ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ



*ΜΕΛΕΤΗ ΕΛΕΓΚΤΩΝ
P-I-D*

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του σπουδαστή: ΒΑΓΓΕΛΗ ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ

Υπ. Καθηγητής: ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΟΥ | 5 |
| 1.1 Εισαγωγή..... | 6 |
| 1.2 Ορισμός ενός συστήματος ελέγχου | 7 |
| 1.3 Ιστορία του αυτομάτου ελέγχου | 7 |
| 1.4 Περιγραφή συστημάτων ελέγχου | 12 |
| 1.4.1 Εισαγωγή..... | 12 |
| 1.4.2 Μπλοκ διαγράμματα (Block Diagrams)..... | 12 |
| 1.4.3 Συναρτήσεις μεταφοράς (Transfer Function) | 13 |
| 1.5 Δομή συστημάτων ελέγχου | 14 |
| 1.6 Έλεγχος ανοικτού βρόγχου | 21 |
| 1.7 Έλεγχος κλειστού βρόγχου | 22 |
| 1.7.1 Ορισμός ανάδρασης (feedback) | 22 |
| 1.7.2 Παράδειγμα συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου | 23 |
| 1.7.3 Περιγραφή εξαρτημάτων συστήματος κλειστού βρόγχου | 24 |
| 1.8 Μη γραμμικότητες | 27 |
| 1.9 Πλεονεκτήματα του αυτομάτου ελέγχου | 29 |
| 1.10 Αλλαγές φορτίου | 30 |
| 1.11 Απόσβεση και αστάθεια | 31 |
| 1.12 Στόχοι ενός συστήματος ελέγχου | 33 |
| 1.13 Κριτήρια του καλού ελέγχου | 34 |

| | |
|--|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΥΠΟΙ ΕΛΕΓΚΤΩΝ | 38 |
| 2.1 Κατηγοριοποιήσεις των συστημάτων ελέγχου | 39 |
| 2.2 Αναλογικός και ψηφιακός έλεγχος | 40 |
| 2.3 Συστήματα σταθεροποίησης και follow-up | 41 |
| 2.4 Έλεγχος διαδικασίας..... | 42 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ | 43 |
| 3.1 Εισαγωγή..... | 44 |
| 3.2 Μέθοδοι ελέγχου | 44 |
| 3.2.1 Μέθοδος ελέγχου δύο θέσεων..... | 45 |
| 3.2.2 Κινητή μέθοδος ελέγχου | 47 |
| 3.2.3 Αναλογική μέθοδος ελέγχου, P..... | 48 |
| 3.2.3.1 Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος πρώτης τάξης | 51 |
| 3.2.3.2 Αναλογικός έλεγχος με εισόδο ράμπας | 54 |
| 3.2.3.3 Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης..... | 57 |
| 3.2.4 Μέθοδος ελέγχου ολοκληρώματος, I..... | 58 |
| 3.2.4.1 Έλεγχος ολοκληρώματος ενός συστήματος πρώτης τάξης | 60 |
| 3.2.4.2 Έλεγχος ολοκληρώματος ενός συστήματος δεύτερης τάξης..... | 61 |
| 3.2.5 Αναλογική και ολοκληρωτική μέθοδος ελέγχου, PI..... | 61 |
| 3.2.5.1 PI έλεγχος ενός συστήματος πρώτης τάξης | 64 |
| 3.2.5.2 PI έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης | 65 |

| | |
|---|------------|
| 3.2.6 Διαφορική μέθοδος ελέγχου ή μέθοδος ελέγχου παραγώγου, D | 66 |
| 3.2.7 Αναλογική και διαφορική μέθοδος ελέγχου, PD | 67 |
| 3.2.7.1 PD έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης..... | 69 |
| 3.2.8 Αναλογική – ολοκληρωτική – διαφορική μέθοδος ελέγχου, PID..... | 71 |
| 3.3 Ηλεκτρονικοί αναλογικοί ελεγκτές | 72 |
| 3.4 Ψηφιακοί ελεγκτές | 76 |
| 3.4.1 Ψηφιακός ελεγκτής PID..... | 76 |
| 3.5 Προηγμένος έλεγχος..... | 80 |
| 3.5.1 Έλεγχος σειριακής σύζευξης | 80 |
| 3.5.2 Έλεγχος ορθής τροφοδοσίας..... | 81 |
| 3.5.3 Προσαρμόσιμοι ελεγκτές | 82 |
| 3.5.4 Έλεγχος πολλών μεταβλητών..... | 83 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ..... | 85 |
| 4.1 Εισαγωγή..... | 86 |
| 4.2 Ακέραια ή διαδικασία ράμπας..... | 87 |
| 4.3 Διαδικασία υστέρησης πρώτης τάξης | 90 |
| 4.4 Διαδικασία νεκρού χρόνου | 93 |
| 4.5 Διαδικασία υστέρησης δεύτερης τάξης..... | 95 |
| 4.6 Διαδικασία υστέρησης πρώτης τάξης συν νεκρού χρόνου | 99 |
| <u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u> | 101 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

1.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα ελέγχου είναι παντού γύρω μας, ακόμα και μέσα μας. Πολλά περίπλοκα συστήματα ελέγχου περιλαμβάνονται στις λειτουργίες του ανθρώπινου σώματος. Ένα εξεζητημένο σύστημα ελέγχου που βρίσκεται στον υποθάλαμο του εγκεφάλου διατηρεί την θερμοκρασία του σώματος στους 37° Κελσίου παρά τις αλλαγές στην εξωτερική θερμοκρασία και την σωματική δραστηριότητα. Σ' ένα άλλο περίτεχνο σύστημα, το μάτι, η διάμετρος της κόρης ρυθμίζεται αυτόματα ώστε να ελέγξει το ποσό του φωτός που φτάνει στον αμφιβληστροειδή χιτώνα.

Η πράξη του ραψίματος και η οδήγηση ενός αυτοκινήτου είναι δυο τρόποι κατά τους οποίους το ανθρώπινο σώμα συμπεριφέρεται σαν ένας πολύ εξελιγμένος ελεγκτής. Τα μάτια είναι οι αισθητήρες που ανιχνεύουν την θέση της βελόνας και του νήματος, ή τη θέση του αυτοκινήτου όσον αφορά το κέντρο του δρόμου. Ένας περίπλοκος ελεγκτής, ο εγκέφαλος, συγκρίνει τις δυο θέσεις και καθορίζει τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν για να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Το σώμα εκτελεί την κίνηση του ελέγχου απλά κουνώντας τη βελόνα ή στρέφοντας το τιμόνι του αυτοκινήτου. Ένας έμπειρος οδηγός θα είναι προετοιμασμένος για όλες τις μορφές διαταραχών που μπορεί να εμφανιστούν στο σύστημα όπως ένα κακό σημείο οδοστρώματος ή ένα όχημα που κινείται με χαμηλότερη ταχύτητα. Είναι εξαιρετικά δύσκολο να αναπαράγουμε με τη μορφή ενός συστήματος αυτόματου ελεγκτή τις τόσες πολλές κρίσεις και αποφάσεις που είναι σε θέση να λάβει το μέσο άτομο καθημερινά και ασυναίσθητα.



Εικόνα 1.1 Σύστημα Ελέγχου Εγκατάστασης.

Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται για να ρυθμίζουν την θερμοκρασία σπιτιών, σχολικών και γενικά μεγάλων κτιρίων. Επηρεάζουν επίσης και την παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών καθώς χρησιμοποιούνται για να διασφαλίσουν την αγνότητα και ομοιογένεια του φαγητού που τρώμε καθώς και διατηρώντας την ποιότητα προϊόντων που προέρχονται από χαρτοβιομηχανίες, βιομηχανίες σιδήρου, εργοστάσια χημικών, παραγωγής ενέργειας και άλλους τύπους εργοστασίων παραγωγής. Τα συστήματα ελέγχου βοηθούν στην προστασία του περιβάλλοντος ελαχιστοποιώντας τον όγκο των αποβλήτων που θα πρέπει να πεταχτούν, μειώνοντας έτσι τα κατασκευαστικά κόστη και ελαχιστοποιώντας το πρόβλημα απόρριψης των απορριμμάτων. Τα αποχετευτικά συστήματα και η διαχείριση των αποβλήτων είναι επίσης ένας τομέας ευρείας χρήσης των συστημάτων ελέγχου.

Ένα σύστημα ελέγχου είναι οποιαδήποτε ομάδα από εξαρτήματα η οποία πετυχαίνει ένα επιθυμητό αποτέλεσμα ή διατηρεί την τιμή μιας μεταβλητής σταθερή. Από τα προηγούμενα παραδείγματα είναι φανερό ότι μια μεγάλη γκάμα από εξαρτήματα/ συσκευές μπορεί να είναι μέρος ενός και μόνο συστήματος ελέγχου, είτε αυτά είναι ηλεκτρικά, ηλεκτρονικά, μηχανικά, υδραυλικά, πνευματικά, ανθρώπινα ή οποιοσδήποτε συνδυασμός αυτών. Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι μια τιμή κάποιας μεταβλητής στο σύστημα. Για παράδειγμα, η κατεύθυνση ενός αυτοκινήτου, η θερμοκρασία ενός δωματίου, η στάθμη του υγρού σε μια δεξαμενή ή η πίεση του αέρα σε μια σωλήνα. Η μεταβλητή της οποίας η τιμή ελέγχεται ονομάζεται μεταβλητή ελέγχου (controlled variable).

1.2 Ορισμός ενός συστήματος ελέγχου

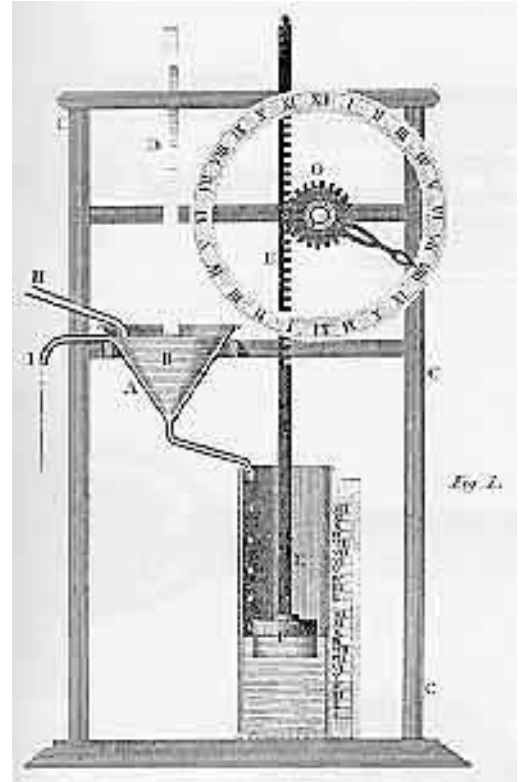
Για να πετύχουμε τον έλεγχο, πρέπει να υπάρχει και άλλη μια μεταβλητή στο σύστημα η οποία να μπορεί να επηρεάσει την μεταβλητή ελέγχου. Τα περισσότερα συστήματα έχουν πολλές τέτοιες μεταβλητές. Το σύστημα ελέγχου διατηρεί το επιθυμητό αποτέλεσμα κατευθύνοντας την τιμή μίας από τις μεταβλητές αυτές. Η μεταβλητή που κατευθύνεται ονομάζεται κατευθυνόμενη μεταβλητή (manipulated variable). Το τιμόνι του αυτοκινήτου είναι ένα παράδειγμα κατευθυνόμενης μεταβλητής.

Ορισμός ενός Συστήματος Ελέγχου: Ένα σύστημα ελέγχου είναι ένα σύνολο από συσκευές που πετυχαίνουν ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα κατευθύνοντας την τιμή μιας άλλης μεταβλητής μέσα στο σύστημα.

1.3 Ιστορία του αυτομάτου ελέγχου

Η χρήση της ανάδρασης στην διαδικασία ελέγχου ενός συστήματος έχει μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα ιστορία. Η πρώτη εφαρμογή ανάδρασης σημειώθηκε στην Αρχαία Ελλάδα με αφορμή την

ανάπτυξη ενός μηχανισμού τύπου φλοτέρ (ρυθμιστής στάθμης υγρών), κατά την περίοδο του 300 π.Χ.. Ο Κτεσίβιος, ένας Έλληνας που ζούσε στην Αλεξάνδρεια, λέγεται ότι δημιούργησε μια αυτορυθμιζόμενη συσκευή ροής η οποία χρησιμοποιήθηκε στα ρολόγια νερού της εποχής. Ένα τέτοιο ρολόι χρησιμοποιεί ένα δείκτη στάθμης ώστε να σημειώνει το πέρασμα της ώρας. Η ακρίβειά του εξαρτάται από το πόσο σταθερή θα είναι η εισροή του νερού στη δεξαμενή. Ο ρυθμός της ροής μπορεί να αλλάξει αν αλλάξει και η πίεση του νερού. Ο Κτεσίβιος εισήγαγε μια δεύτερη δεξαμενή μ' ένα φλοτέρ και μια βαλβίδα σχεδιασμένα να ρυθμίζουν τη ροή του εισερχόμενου νερού στη δεύτερη δεξαμενή. Έτσι το νερό στη δεύτερη δεξαμενή μένει σταθερό και άρα η ροή στην κεντρική δεξαμενή του ρολογιού παρέμεινε σταθερή. Αν υποθέσουμε ότι η ροή αυξάνεται, ανεβαίνει και η στάθμη στην δεύτερη δεξαμενή. Τότε, το φλοτέρ κλείνει την βαλβίδα και μειώνεται η εισροή στη δεύτερη δεξαμενή. Έτσι η στάθμη πέφτει ξανά και τότε η βαλβίδα ανοίγει πάλι. Με τον τρόπο αυτό κατάφερε να διατηρεί σταθερή τη ροή του νερού και άρα πέτυχε τη δημιουργία μιας σταθερής μονάδας μέτρησης του χρόνου.



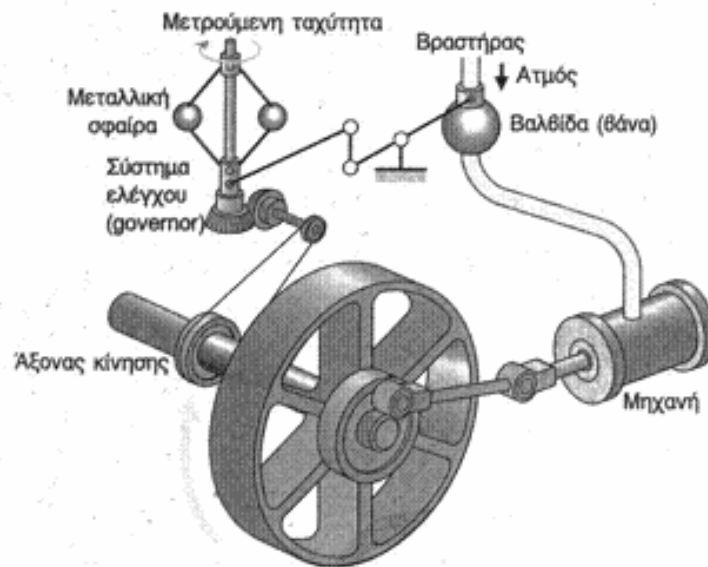
Εικόνα 1.2 Το ρολόι νερού του Κτεσίβιου!

Κατά το 250 π.Χ., ο Φίλωνας παρουσιάζει την πρώτη λάμπα λαδιού στην οποία γίνονταν χρήση ενός μηχανισμού φλοτέρ για την διατήρηση σταθερής στάθμης του καύσιμου λαδιού. Ο Χείρων της Αλεξάνδρειας, που έζησε στον πρώτο αιώνα μ.Χ., εξέδωσε ένα βιβλίο με τίτλο «Pneumatica», όπου αναφέρονταν διάφοροι μηχανισμοί ρύθμισης στάθμης υγρών με χρήση φλοτέρ.

Το πρώτο σύστημα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόγχου που εφευρέθηκε στην Ευρώπη ήταν ο ρυθμιστής θερμοκρασίας του Cornelis Drebbel (1572 – 1633) από την Ολλανδία. Ο Dennis Papin (1647 – 1712) εφηύρε τον πρώτο ρυθμιστή πίεσης σε ατμολέβητες, το 1681. Ο ρυθμιστής πίεσης του Papin αποτελεί μια ασφαλιστική διάταξη παρόμοια με την βαλβίδα εκτόνωσης που χρησιμοποιείται στις χύτρες ταχύτητας.

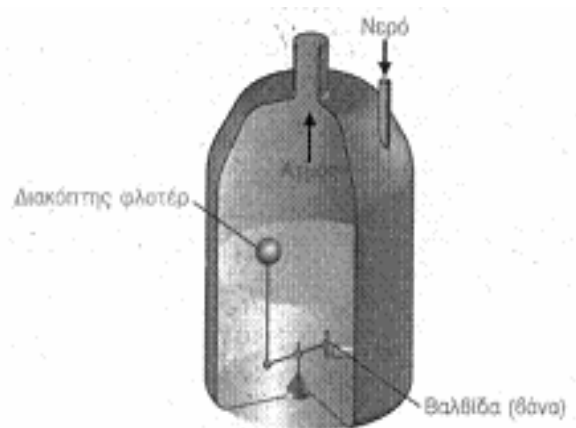
Το πρώτο, κατά γενική ομολογία, σύστημα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόγχου που εφαρμόστηκε σε βιομηχανικό περιβάλλον, ήταν η συσκευή ελέγχου κινούμενης σφαίρας (flyball governor) του James Watt, η οποία εφευρέθηκε το 1769 και αφορούσε σε ένα σύστημα ελέγχου της ταχύτητας μιας ατμομηχανής. Η μηχανική αυτή διάταξη, που φαίνεται στο σχήμα 1.3, μετρούσε την ταχύτητα περιστροφής του άξονα κίνησης και χρησιμοποιούσε την κίνηση μιας μεταλλικής σφαίρας για τον έλεγχο μιας βάνας (βαλβίδας) και κατά συνέπεια το ποσό του ατμού που τροφοδοτούνταν στην μηχανή. Όσο αυξάνονταν η ταχύτητα περιστροφής η σφαίρα εξαιτίας της φυγόκεντρης δύναμης ανασηκώνονταν και η κίνησή της απομακρύνονταν από τον άξονα συμμετρίας του κυλινδρικού άξονα κίνησης προκαλώντας με τον τρόπο αυτό το κλείσιμο της βάνας. Για την κίνηση της σφαίρας απαιτείται

ένα ποσό ενέργειας που προσφέρεται από την ίδια την μηχανή, οπότε η μέτρηση της περιστροφικής ταχύτητας διεξάγεται με σχετικά μικρή ακρίβεια.



Εικόνα 1.3 Η συσκευή ελέγχου κινούμενης σφαίρας «flyball governor» του James Watt.

Το πρώτο ιστορικά, σύστημα αυτομάτου ελέγχου, σύμφωνα με σχετικό ισχυρισμό των Ρώσων, ήταν ένας αυτόματος ρυθμιστής στάθμης νερού με διακόπτη τύπου φλοτέρ που εφευρέθηκε από τον Ι. Polzunov το 1765. Το σύστημα ρύθμισης της στάθμης φαίνεται στο σχήμα 1.4. Ο διακόπτης φλοτέρ ανιχνεύει την στάθμη του νερού ελέγχοντας με τον τρόπο αυτό το άνοιγμα και το κλείσιμο μιας βάνας η οποία με την σειρά της ελέγχει την εισαγωγή νερού στον βραστήρα.



Εικόνα 1.4 Ο ρυθμιστής στάθμης νερού με διακόπτη τύπου φλοτέρ.

Η χρονική περίοδος πριν από το 1868 χαρακτηρίστηκε γενικά από την ανάπτυξη διαφόρων εμπνευσμένων και έξυπνων συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Ταυτόχρονα, οι διάφορες προσπάθειες με σκοπό την αύξηση της ακρίβειας των συστημάτων, οδήγησαν στην εμφάνιση αργών εξασθενίσεων των μεταβατικών ταλαντώσεων καθώς επίσης και σε ασταθή συστήματα. Έτσι δημιουργήθηκε η επιτακτική ανάγκη της ανάπτυξης μιας αντίστοιχης θεωρίας για τον αυτόματο έλεγχο. Ο J. C. Maxwell διατύπωσε 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 στην συνολική του συμπεριφορά. Κατά την ίδια χρονική περίοδο, ο I. A. Vyshnegradskii διατύπωσε μια αντίστοιχη θεωρία βασισμένη στα μαθηματικά, σχετικά με τα συστήματα ρυθμιστών.

Πριν από τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, οι διάφορες θεωρίες που αναπτύχθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες 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 Ηνωμένες Πολιτείες, αποτέλεσε η ανάπτυξη της τηλεφωνίας και των ηλεκτρονικών ενισχυτών ανάδρασης από τους Bode, Nyquist και Black, της εταιρίας Bell Telephone Laboratories. Η έννοια του πεδίου της συχνότητας (frequency domain) χρησιμοποιήθηκε πρωταρχικά με σκοπό να περιγράψει την λειτουργία των ενισχυτών ανάδρασης (feedback amplifiers) σε σχέση με το εύρος ζώνης καθώς επίσης και με άλλες αντίστοιχες μεταβλητές. Σε αντίθεση με όλα αυτά, διάφοροι διαπρεπείς μαθηματικοί αλλά και διάφοροι εμπειρικοί μηχανικοί στην πρώην Σοβιετική Ένωση, ενέπνευσαν και κυριάρχησαν στον χώρο της θεωρίας του αυτομάτου ελέγχου. Έτσι, η θεωρητική προσέγγιση των Σοβιετικών διακατέχεται από μια τάση προς το πεδίο του χρόνου (time domain) διατυπωμένη κατάλληλα με την βοήθεια διαφορικών εξισώσεων.

Μια ακόμη μεγαλύτερη ώθηση στην θεωρία καθώς και την αντίστοιχη πρακτική των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, απετέλεσε η κήρυξη του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, όπου ανέκυψαν διάφορες επιτακτικές ανάγκες για την σχεδίαση και κατασκευή διαφόρων συστημάτων αυτόματων πιλότων, ελέγχου θέσης οπλικών συστημάτων, ελέγχου κεραιών συστημάτων ραδιοναυτιλίας (ραντάρ) καθώς και πλήθος άλλων συστημάτων για στρατιωτική χρήση, που βασίζονταν στην ιδέα ελέγχου με την βοήθεια της ανάδρασης. Η πολυπλοκότητα καθώς και η αναμενόμενη συμπεριφορά των παραπάνω στρατιωτικών συστημάτων δημιούργησε την ανάγκη για επέκταση των διαφόρων τεχνικών του αυτομάτου ελέγχου και έστρεψε το γενικότερο ενδιαφέρον προς τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου καθώς επίσης και στην ανάπτυξη νέων γνωστικών πεδίων και σχετικών μεθόδων. Πριν από το 1940 οι διαδικασίες σχεδίασης των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου βρίσκονταν ως επί το πλείστον σε επίπεδο εμπειρικών μεθόδων βασισμένων σε τεχνικές δοκιμής και σφάλματος (trial and error). Στην διάρκεια της δεκαετίας του 1940 διατυπώνονταν με ταχείς ρυθμούς διάφορες μαθηματικές και αναλυτικές μέθοδοι και προοδευτικά το αντικείμενο του αυτομάτου ελέγχου μετατράπηκε σε επίπεδο ιδιαίτερης εφαρμοσμένης επιστήμης.

Οι διάφορες τεχνικές ανάλυσης στο πεδίο της συχνότητας συνέχισαν να κυριαρχούν στον χώρο του αυτομάτου ελέγχου και μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, με ιδιαίτερη έμφαση στην χρήση των μετασχηματισμών Laplace καθώς και του πεδίου της μιγαδικής συχνότητας. Κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1950, στα πλαίσια της αντίστοιχης θεωρίας του αυτομάτου ελέγχου δόθηκε αρκετή έμφαση στην ανάπτυξη και την χρήση μεθόδων του πεδίου της μιγαδικής μεταβλητής s (s -plane) και ιδιαίτερα της μεθόδου του γεωμετρικού τόπου ριζών. Στην δεκαετία του 1980, η χρήση των ψηφιακών υπολογιστών και των αντίστοιχων σχετικών διεργασιών, ως στοιχεία ελέγχου, γίνεται ρουτίνα. Η

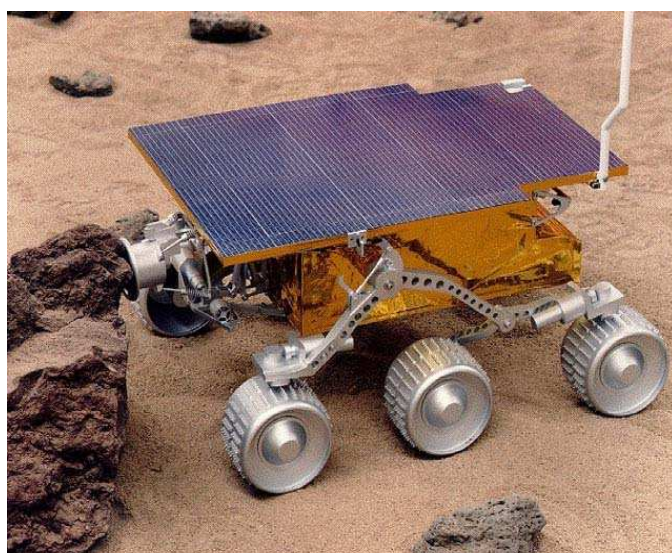


Εικόνα 1.5 Αντιαεροπορικό πυροβόλο ελεγχόμενο από Ραντάρ.

αντίστοιχη τεχνολογία των σύγχρονων για την εποχή εκείνη συστημάτων, με την βοήθεια των οποίων οι διάφοροι υπολογισμοί εκτελούνταν με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια, αποδεικνύονταν απαγορευτική για το σύνολο των μηχανικών σχεδίασης. Σήμερα, στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι εγκατεστημένα περισσότερα από τετρακόσιες χιλιάδες ψηφιακά συστήματα αυτομάτου ελέγχου βασισμένα σε υπολογιστές. Τα διάφορα αυτά συστήματα χρησιμοποιούνται γενικότερα για τον έλεγχο διεργασιών, όπου επιτυγχάνεται η μέτρηση και ο ταυτόχρονος έλεγχος πολλών μεταβλητών του συστήματος από τον υπολογιστή.

Με την αποστολή του διαστημοπλοίου Sputnik και την εμφάνιση της εποχής του διαστήματος, δόθηκε μια νέα μεγάλη ώθηση στον χώρο του αυτομάτου ελέγχου. Έτσι δημιουργήθηκε μια νέα ανάγκη σχεδιασμού πολύπλοκων συστημάτων αυτομάτου ελέγχου υψηλής ακρίβειας για πυραύλους και διατάξεις ανιχνευτών για διαστημική χρήση. Επιπλέον, η ανάγκη ελαχιστοποίησης του συνολικού βάρους των δορυφόρων καθώς επίσης και η ανάγκη ελέγχου υψηλής ακρίβειας, έφερε στο προσκήνιο το αντικείμενο του βέλτιστου ελέγχου. Εξαιτίας των απαιτήσεων αυτών, τις τελευταίες δύο δεκαετίες οι διάφορες μέθοδοι που αναπτύχθηκαν στο πεδίο του χρόνου από τους Liapunov, Minorsky και άλλους, γνώρισαν ιδιαίτερα ζωηρό ενδιαφέρον. Προς την ίδια κατεύθυνση συνεισέφεραν αρκετά και διάφορες σύγχρονες θεωρίες βέλτιστου ελέγχου που αναπτύχθηκαν από τον L. S. Pontryagin στην Σοβιετική Ένωση καθώς και από τον R. Bellman στις Ηνωμένες Πολιτείες, όπως επίσης και διάφορες πρόσφατες μελέτες σχετικά με την τεχνολογία των εύρωστων συστημάτων (robust systems). Σήμερα πλέον είναι ξεκάθαρο ότι τόσο η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο πεδίο της συχνότητας, θα πρέπει να λαμβάνονται εξίσου υπόψη κατά τις διαδικασίες ανάλυσης και σχεδίασης συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

Στο μέλλον, μπορούμε να περιμένουμε σημαντικές εφαρμογές συστημάτων αυτομάτου ελέγχου στα διαστημικά προγράμματα λόγω του μεγάλου κόστους που έχουν οι επανδρωμένες αποστολές. Η χρήση των ρομπότ σε αυτό τον τομέα καθώς και σε άλλους βιομηχανικούς τομείς θα γίνει περισσότερο διαδεδομένη. Η ρομποτική έχει πολλά να συνεισφέρει σε περιοχές όπου η εργασία είναι επικίνδυνη ή ανθυγιεινή. Υψηλής ταχύτητας συστήματα μεταφοράς σε στεριά, θάλασσα και αέρα θα απαιτούν καλύτερα συστήματα ελέγχου ώστε να παρέχεται στους επιβάτες επιπλέον άνεση και ασφάλεια. Επίσης, ελαφρύτερες κατασκευές θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αν εξελιγμένοι ελεγκτές είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα που δημιουργούνται από την ελαστικότητα τέτοιων κατασκευών. Μέσω πιο αυστηρών απαιτήσεων για ασφάλεια και αποδοτικότητα σε όλους τους τομείς, υπάρχει μεγάλη προοπτική ανάπτυξης μέσω της θεωρίας και της πρακτικής των συστημάτων ελέγχου με ανάδραση.



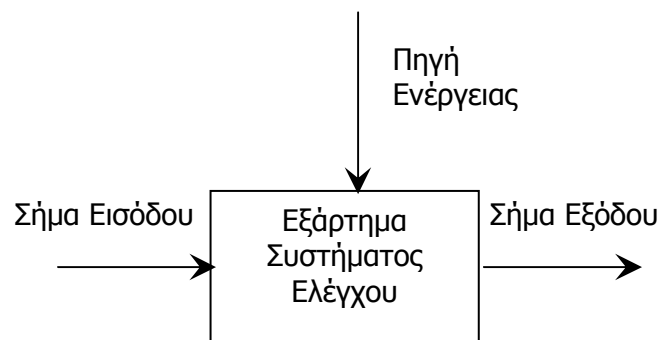
Εικόνα 1.6 Αυτόνομο διαστημικό όχημα «Sojourner».

1.4 Περιγραφή συστημάτων ελέγχου

1.4.1 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/ 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. Τα Μπλοκ Διαγράμματα

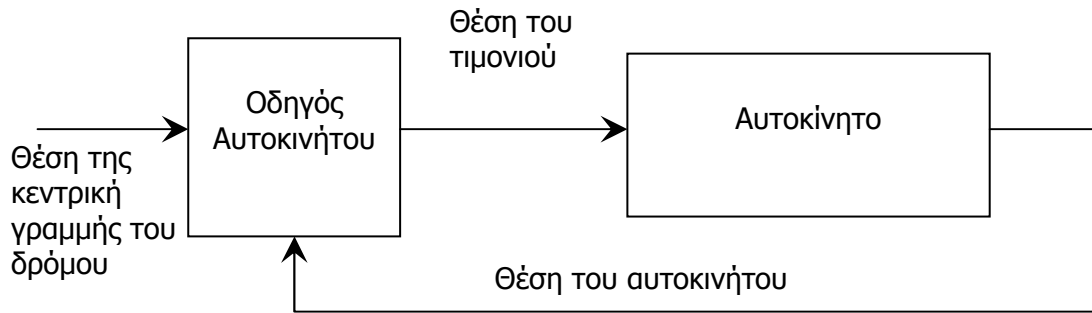
(Block Diagrams) είναι μια μέθοδος αναπαράστασης ενός συστήματος ελέγχου η οποία επικεντρώνεται κυρίως σ' αυτό το γνώρισμα του κάθε εξαρτήματος. Γραμμές σημάτων αναπαριστούν τα σήματα εισόδου και εξόδου των εξαρτημάτων (εικόνα 1.7). Κάθε εξάρτημα λαμβάνει ένα σήμα εισόδου από κάποιο μέρος του συστήματος 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 κλπ.



Εικόνα 1.7 Αναπαράσταση μπλοκ διαγράμματος ενός στοιχείου ελέγχου.

1.4.2 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 σχήμα της εικόνας 1.8 αναπαριστά ένα πολύ απλό μπλοκ διάγραμμα ενός ατόμου που οδηγεί ένα αυτοκίνητο. Η αίσθηση της όρασης του οδηγού μας δίνει τα δυο σήματα εισόδου: την θέση του αυτοκινήτου και την θέση του κέντρου του δρόμου. Ο οδηγός συγκρίνει αυτές τις δυο θέσεις και καθορίζει την θέση του τιμονιού το οποίο θα δώσει τη σωστή θέση στο όχημα.



Εικόνα 1.8 Απλοποιημένο Μπλοκ Διάγραμμα ενός ατόμου που οδηγεί ένα αυτοκίνητο.

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 μια 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 βρόχου.

1.4.3 Συναρτήσεις μεταφοράς (Transfer Function)

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός εξαρτήματος είναι η σχέση μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου. Η σχέση αυτή ερμηνεύεται από τη Συνάρτηση Μεταφοράς (Transfer Function) του εξαρτήματος, και ορίζεται ως ο λόγος του μετασχηματισμένου κατά Laplace σήματος εξόδου προς το μετασχηματισμένο κατά Laplace σήμα εισόδου. Η συνάρτηση μεταφοράς αποτελείται από δυο μέρη. Ένα μέρος είναι η σχέση μεγέθους μεταξύ της εισόδου και της εξόδου και το άλλο μέρος είναι η σχέση τους ως προς το χρόνο ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο. Για παράδειγμα, η σχέση μεγέθους μπορεί να είναι τέτοια ώστε η έξοδος να είναι διπλάσια της εισόδου και η σχέση χρόνου να είναι τέτοια ώστε να υπάρχει καθυστέρηση δυο δευτερολέπτων μεταξύ μιας αλλαγής στην είσοδο και της αντίστοιχης αλλαγής στην έξοδο.

Αν το εξάρτημα είναι γραμμικό και το σήμα εισόδου είναι ένα ημιτονοειδές σήμα, η σχέση μεγέθους μετριέται με το κέρδος (gain) και ο χρόνος με τη διαφορά φάσης (phase difference). Το κέρδος του εξαρτήματος είναι ο λόγος του μεγέθους του σήματος εξόδου προς το μέγεθος του σήματος

εισόδου. Η διαφορά φάσης του εξαρτήματος είναι η γωνία φάσης του σήματος εξόδου μείον τη γωνία φάσης του σήματος εισόδου.

Η πολική μορφή σύνθετων αριθμών είναι η πιο βολική μορφή για να περιγράψουμε τις τιμές της εισόδου της εξόδου και της συναρτήσεως μεταφοράς. Αν η είσοδος αναπαριστάται από τον αριθμό $A\angle\alpha$

και η έξοδος από τον $B\angle\beta$. Η συνάρτηση μεταφοράς G , έχει τη μορφή: $G = \frac{B\angle\beta}{A\angle\alpha} = \left(\frac{B}{A}\right)\angle\beta - \alpha$ Έτσι,

η συνάρτηση μεταφοράς G , αναπαρίσταται από τον αριθμό του οποίου το μέγεθος είναι το κέρδος του εξαρτήματος B/A , και του οποίου η γωνία είναι η φάση της εξόδου μείον τη φάση της εισόδου. Συχνά, το κέρδος ενός εξαρτήματος εκφράζεται σαν ο λόγος της αλλαγής στο μέγεθος της εξόδου προς την ανταποκρινόμενη αλλαγή στο μέγεθος της εισόδου.

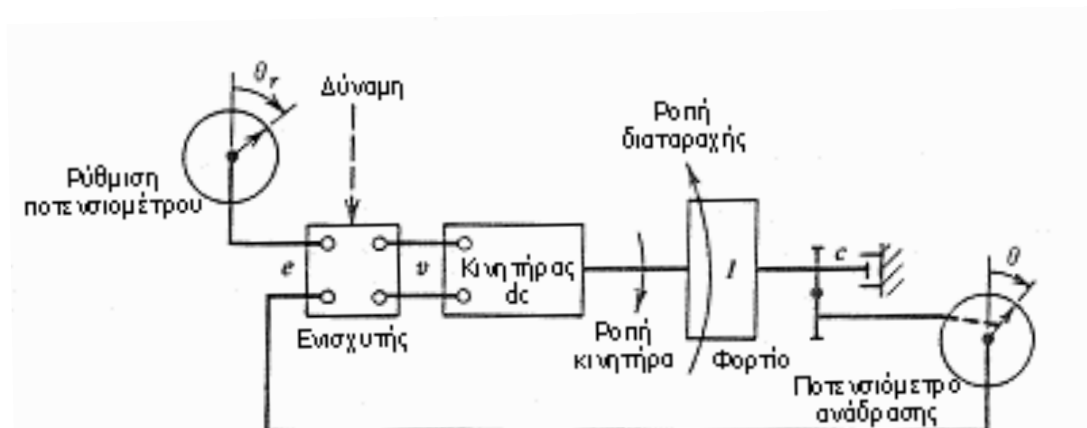
Το κέρδος ενός εξαρτήματος μας δίνει το μέγεθος των μονάδων εξόδου πάνω σ' αυτών της εισόδου. Για παράδειγμα, αν σε έναν ενισχυτή έχουμε 10V αύξηση για κάθε 1V εισόδου τότε αυτός έχει κέρδος 10V ανά Volt. Αν σε ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος έχουμε αύξηση 1000 στροφές το λεπτό για κάθε 1V αλλαγής στην είσοδο τότε αυτός έχει κέρδος 1000σαλ/volt.

Το κέρδος και η διαφορά φάσης ενός εξαρτήματος για μια συγκεκριμένη συχνότητα αναφέρονται σαν απόκριση συχνότητας (frequency response) του εξαρτήματος σ' αυτή τη συχνότητα. Για παράδειγμα, για συχνότητα 1Hz, ένα συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου έχει κέρδος 0.995 και διαφορά φάσης 5.71° ενώ για 100Hz το κέρδος είναι 0.0995 και η διαφορά φάσης 84.29° .

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός εξαρτήματος περιγράφει τη σχέση μεγέθους και χρόνου μεταξύ του σήματος εισόδου και εξόδου.

1.5 Δομή συστημάτων ελέγχου

Το ηλεκτρομηχανικό σύστημα ελέγχου θέσης που παρουσιάζεται στην εικόνα 1.9 εξηγεί τη δομή ενός χαρακτηριστικού συστήματος ελέγχου.

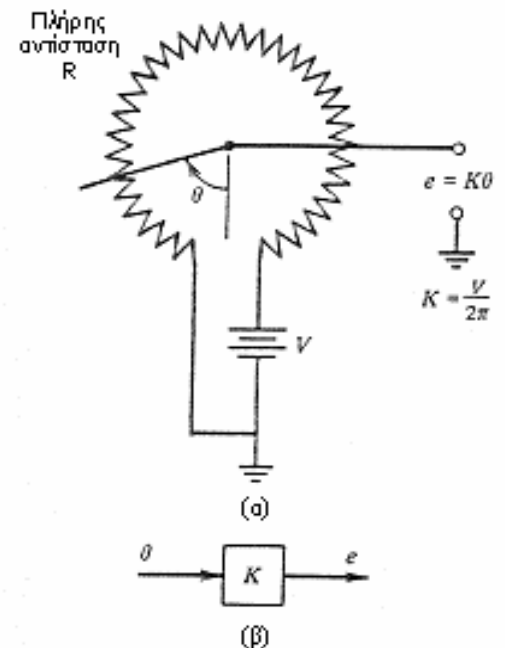


Εικόνα 1.9 Σύστημα ελέγχου θέσης με κινητήρα dc.

Ένα φορτίο A με μια αδράνεια I πρόκειται να τοποθετηθεί σε κάποια επιθυμητή γωνία θ_r . Μια συνεχής μηχανή παρέχεται για αυτόν το λόγο. Το σύστημα περιέχει την απόσβεση και τις πράξεις μιας ροπής διαταραχής T_d στο φορτίο, σε αντίθεση με τη ροπή T της μηχανής. Η προέλευση της ροπής διαταραχής εξαρτάται από την εφαρμογή. Εάν το φορτίο που τοποθετείται είναι, παραδειγματος χάριν, μια κεραία ραντάρ ο αέρας φυσά παράγοντας μια ροπή a της οποίας το μέγεθος και ο χρόνος εμφάνισης του φαινομένου είναι άγνωστος έως ένα συγκεκριμένο βαθμό. Εάν η μηχανή πρόκειται να ελέγξει τη θέση μιας βαλβίδας σε μια γραμμή ροής (όπως μια διάταξη απόσβεσης σε ένα σύστημα θέρμανσης), η ροπή διαταραχής θα προέκυπτε από μια αλλαγή στις ρευστές δυνάμεις που προκαλούνται από μια αλλαγή στην πίεση παροχής στη γραμμή. Και στα δύο παραδείγματα, τα αποτελέσματα της τριβής Coulomb θα μπορούσαν επίσης να διαμορφωθούν ως διαταραχή, υπό την έννοια ότι το μέγεθος μιας τέτοιας ροπής είναι δύσκολο να προβλεφθεί (οι συντελεστές της τριβής δεν υπολογίζονται εύκολα και δεν είναι συνήθως σταθερές).

Λόγω της διαταραχής, η γωνιακή θέση θ του φορτίου δεν θα είναι απαραίτητως ίση με την επιθυμητή τιμή θ_r . Για τον λόγο αυτό, ένα ποτενσιόμετρο χρησιμοποιείται για να μετρήσει την μετατόπιση θ . Ένα ποτενσιόμετρο αποτελείται από ένα τυλιγμένο με σύρμα αντιστάτη και μια συρόμενη ηλεκτρική επαφή ή ψήκτρα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.10, όταν περιστρέφεται η ψήκτρα η αντίσταση μεταξύ της επαφής της ψήκτρας και της γείωσης αλλάζει. Αυτό παράγει μια τάση στην ψήκτρα που είναι συνάρτηση της γωνιακής μετατόπισής της. Εάν η αντίσταση της ψήκτρας είναι ομοιόμορφη και το κύκλωμα ψηκτρών τραβάει αμελητέο ρεύμα, η τάση των ψηκτρών είναι αναλογική προς τη γωνιακή μετατόπιση, έτσι ώστε $e = K\theta$. Μια απλή ανάλυση του κυκλώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει ότι $K = V/2\pi$ όπου V είναι η σταθερά παρεχόμενη τάση στο ποτενσιόμετρο. Τα ποτενσιόμετρα είναι επίσης διαθέσιμα για εφαρμογές στις οποίες η μετατόπιση είναι μια μετακίνηση και όχι περιστροφή.

Η τάση του ποτενσιόμετρου που αναπαριστά την ελεγχόμενη θέση θ , συγκρίνεται με την τάση που παράγεται από το ποτενσιόμετρο εντολής. Αυτή η συσκευή επιτρέπει στο χειριστή να σχηματίσει την επιθυμητή γωνία θ_r . Ο ενισχυτής βλέπει τη διαφορά e μεταξύ των δύο τάσεων των ποτενσιόμετρων. Η βασική λειτουργία του ενισχυτή είναι να αυξηθεί η μικρή τάση σφάλματος e στο επίπεδο της τάσης που απαιτείται από τη μηχανή και να παρασχεθεί το ρεύμα που απαιτείται από τη μηχανή για να οδηγήσει το φορτίο. Επιπλέον, ο ενισχυτής μπορεί να διαμορφώσει το σήμα τάσης με ορισμένους τρόπους ώστε να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος.



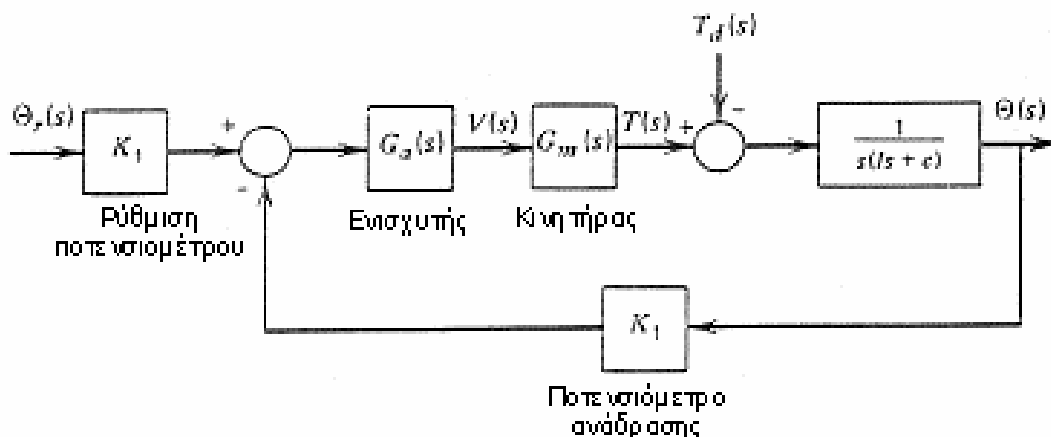
Εικόνα 1.10 Περιστρεφόμενο ποτενσιόμετρο και το μπλοκ διάγραμμά του.

Το σύστημα λειτουργεί ως εξής. Εάν και τα δύο ποτενσιόμετρα έχουν το ίδιο σταθερό K , η τάση σφάλματος είναι

$$e = K(\theta_r - \theta)$$

Όταν το θ δεν είναι ίσο με θ_r , μια διαφορετική από το μηδέν τάση e εμφανίζεται στους ακροδέκτες εισόδου του ενισχυτή. Αν υποθέσουμε τώρα ότι ο ενισχυτής παράγει μια τάση v ανάλογη προς το e και με το ίδιο πρόσημο, δηλαδή $v = K_a e$, όπου το K_a είναι η ενίσχυση των ενισχυτών. Κατόπιν εάν $\theta_r > \theta$, τα e και v είναι θετικά και η μηχανή παράγει μια ροπή T που αυξάνει το θ . Αυτό συνεχίζεται μέχρι $e = 0$ και επομένως $\theta = \theta_r$. Παρόμοια γεγονότα εμφανίζονται εάν $\theta_r < \theta$. Όταν η δράση μιας ροπής διαταραχής αναγκάζει το θ να παρεκκλίνει για θ_r , η ίδια διαδικασία ενεργεί για να αποκαταστήσει το θ στην επιθυμητή τιμή του. Κατά συνέπεια, το σύστημα ελέγχου φαίνεται να παρέχει δύο βασικές λειτουργίες: (1) να αποκρίνεται σε μια εντολή που εισάγεται και ορίζει μια νέα επιθυμητή τιμή για την ελεγχόμενη μεταβλητή και (2) να κρατά την ελεγχόμενη μεταβλητή κοντά στην επιθυμητή τιμή παρά τις διαταραχές. Η παρουσία του συστήματος ανάδρασης, με το οποίο η μέτρηση της ελεγχόμενης μεταβλητής χρησιμοποιείται για να αλλάξει τη λειτουργία της μηχανής, φαίνεται να είναι ζωτικής σημασίας και στις δύο λειτουργίες.

Ένα μπλοκ διάγραμμα αυτού του συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 1.11.



Εικόνα 1.11 Το μπλοκ διάγραμμα του dc συστήματος ελέγχου θέσης της εικόνας 1.9.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να κάνουμε κάποιες υποθέσεις. Τα σε σειρά στοιχεία πρέπει να μην προσδίδουν φορτίο στο σύστημα. Παραδείγματος χάριν, η μηχανή δεν μπορεί άμεσα να επηρεάσει την τάση v που προέρχεται από τον ενισχυτή (εκτός από την περίπτωση που προέρχεται από το σύστημα ανάδρασης). Κατά συνέπεια, η μηχανή πρέπει να έχει μια υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου. Ομοίως, η παραγωγή ποτενσιόμετρων υποθέτει ότι το ρεύμα ψηκτρών είναι αμελητέο, δηλαδή ο ενισχυτής πρέπει να έχει μια υψηλή σύνθετη αντίσταση εισόδου. Εάν αυτές οι υποθέσεις δεν ισχύουν, τότε ολόκληρο το υποσύστημα πρέπει να αντιπροσωπευθεί από μια ενιαία λειτουργία μεταφοράς που προέρχεται από τις

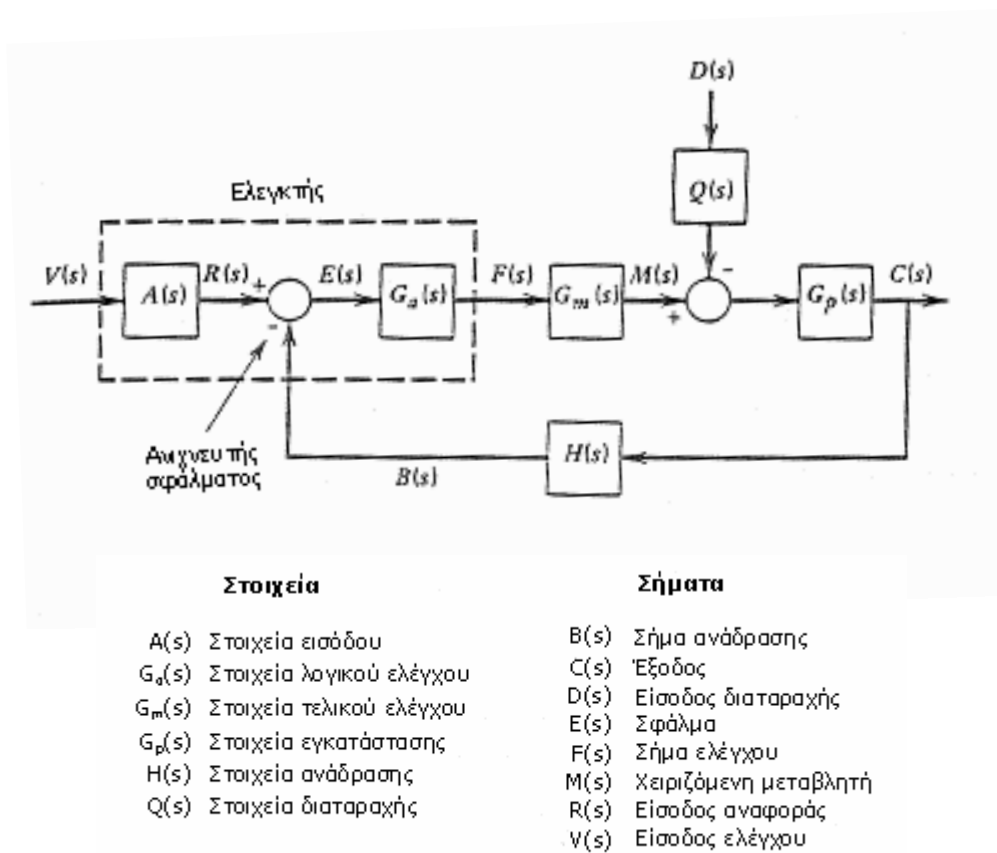
βασικές αρχές παρά από την ανάγωγη σε διάγραμμα.

Οι παροχές ηλεκτρικού ρεύματος που απαιτούνται για τα ποτενσιόμετρα και τον ενισχυτή δεν παρουσιάζονται στα μπλοκ διαγράμματα της λογικής των συστημάτων ελέγχου, επειδή δεν συμβάλλουν στη λογική ελέγχου. Εντούτοις, η ύπαρξή τους δεν μπορεί να αγνοηθεί. Η σχέση ροπής - ρεύματος της μηχανής είναι $T = K_i i$. Επομένως, καθώς το φορτίο στη μηχανή αυξάνεται, απαιτεί περισσότερο ρεύμα από τον ενισχυτή. Εάν το διαθέσιμο ρεύμα είναι περιορισμένο (που ισχύει για όλα τα πραγματικά συστήματα), πρέπει να λάβουμε αυτόν τον περιορισμό υπόψη πριν δεχθούμε οποιοδήποτε σχέδιο ελεγκτών ως τελικό.

Μερικές πρόσθετες προσεγγίσεις διαμόρφωσης μπορούν επίσης να περιληφθούν στο διάγραμμα. Έχουμε πάρει την ροπή της μηχανής, της απόσβεσης και της διαταραχής να ενεργούν στην αδράνεια I του φορτίου. Αυτό υπονοεί ότι η αδράνεια της μηχανής έχει συσσωρευτεί σε αυτή του φορτίου. Στην πραγματικότητα, η ροπή απόσβεσης για παράδειγμα, μπορεί να προκύψει από τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα μέσα στην ίδια τη μηχανή, και η ροπή της μηχανής να επιδρά άμεσα στον ρότορα. Η προσέγγιση όμως είναι συνήθως καλή, ειδικά όταν ο άξονας που συνδέει τη μηχανή και το φορτίο είναι δύσκαμπτος.

Ένα τυποποιημένο διάγραμμα

Το ηλεκτρομηχανικό σύστημα θέσης καθιστά τη γενική δομή ενός συστήματος ελέγχου (σχήμα 1.12). Η εικόνα αυτή δίνει επίσης κάποια τυποποιημένη ορολογία.



Εικόνα 1.12 Βασική δομή ενός συστήματος ελέγχου με ανάδραση.

Ο ελεγκτής θεωρείται γενικά ως στοιχείο λογικής που συγκρίνει το σήμα εντολής με τη μέτρηση του παραγόμενου αποτελέσματος και αποφασίζει τι πρέπει να γίνει. Τα στοιχεία εισόδου και ανάδρασης είναι μετατροπείς και χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή ενός τύπου σήματος σε έναν άλλο. Το ποτενσιόμετρο μετατρέπει τη μετατόπιση σε τάση. Αυτό επιτρέπει στον ανιχνευτή σφάλματος να συγκρίνει άμεσα δύο σήματα του ίδιου τύπου (π.χ.: δύο τάσεις). Όλες οι λειτουργίες δεν παρουσιάζονται ως χωριστά φυσικά στοιχεία. Ο ανιχνευτής σφάλματος στο σχήμα 1.9 είναι απλά τα τερματικά εισόδου του ενισχυτή. Τα στοιχεία λογικού ελέγχου παράγουν το σήμα ελέγχου, το οποίο στέλνεται στα τελικά στοιχεία ελέγχου. Αυτές οι συσκευές είναι που αναπτύσσουν αρκετή ροπή, πίεση, θερμότητα, κ.λ.π., για να επηρεάσουν τα στοιχεία υπό έλεγχο. Κατά συνέπεια, τα τελικά στοιχεία ελέγχου είναι ο "μυς" του συστήματος, ενώ τα στοιχεία λογικού ελέγχου είναι ο "εγκέφαλος".

Το αντικείμενο που ελέγχεται είναι η εγκατάσταση. Η χειριζόμενη μεταβλητή παράγεται από τα τελικά στοιχεία ελέγχου γι' αυτόν το λόγο. Η εισαγωγή διαταραχών επίσης επιδρά στην εγκατάσταση. Αυτό είναι μια εισαγωγή πέρα από την οποία ο σχεδιαστής δεν έχει κανέναν έλεγχο και ίσως για τον οποίο λίγες πληροφορίες είναι διαθέσιμες για το μέγεθος, τη λειτουργική μορφή ή το χρόνο εμφάνισης του φαινομένου. Η διαταραχή μπορεί να είναι μια τυχαία εισαγωγή, όπως τα ρεύματα αέρα σε μια κεραία ραντάρ, ή αιτιοκρατική, όπως τα αποτελέσματα τριβής Coulomb. Στην τελευταία περίπτωση μπορούμε να συμπεριλάβουμε τη δύναμη τριβής στο πρότυπο συστημάτων με τη χρησιμοποίηση μιας τιμής για το συντελεστή της τριβής. Η εισαγωγή διαταραχής θα ήταν έπειτα η απόκλιση της δύναμης τριβής από αυτήν την κατ' εκτίμηση τιμή και θα αντιπροσώπευε την αβεβαιότητα στην εκτίμησή μας.

Διάφορες ταξινομήσεις των συστημάτων ελέγχου μπορούν να γίνουν σε σχέση με το σχήμα 1.12. Ένας ρυθμιστής είναι ένα σύστημα ελέγχου στο οποίο η ελεγχόμενη μεταβλητή πρόκειται να κρατηθεί σταθερή παρά τις διαταραχές. Ένα παράδειγμα είναι το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας για ένα σπίτι. Μόλις τεθεί, για παράδειγμα, η επιθυμητή θερμοκρασία στους 68°F, ο ελεγκτής πρόκειται να κρατήσει τη θερμοκρασία δωματίου κοντά σε αυτήν την τιμή. Η εντολή εισαγωγής για έναν ρυθμιστή είναι το καθορισμένο σημείο του. Αφ' ετέρου, ένα ακόλουθο σύστημα είναι υποτιθέμενο για να κρατήσει την ελεγχόμενη μεταβλητή κοντά στην τιμή εντολής, η οποία αλλάζει με το χρόνο. Ένα παράδειγμα ενός ακόλουθου συστήματος είναι μια εργαλειομηχανή στην οποία μια κεφαλή κοπής πρέπει να επισημάνει μια συγκεκριμένη πορεία προκειμένου να διαμορφωθεί το προϊόν κατάλληλα. Αυτό είναι επίσης ένα παράδειγμα ενός σερβομηχανισμού, ο οποίος είναι ένα σύστημα ελέγχου του οποίου η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι μια μηχανική θέση, μια ταχύτητα ή μια επιτάχυνση. Το σύστημα θερμοστατών δεν είναι ένας σερβομηχανισμός αλλά ένα σύστημα ελέγχου διεργασίας, όπου η ελεγχόμενη μεταβλητή περιγράφει μια θερμοδυναμική διαδικασία. Χαρακτηριστικά, τέτοιες μεταβλητές είναι η θερμοκρασία, η πίεση, το ποσοστό ροής, το υγρό επίπεδο, η χημική συγκέντρωση και ου το καθεξής.

Η συνάρτηση μεταφοράς για το σύστημα που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.12 είναι:

$$\frac{C(s)}{V(s)} = A(s) \frac{G_a(s)G_m(s)G_p(s)}{1 + G_a(s)G_m(s)G_p(s)H(s)}$$

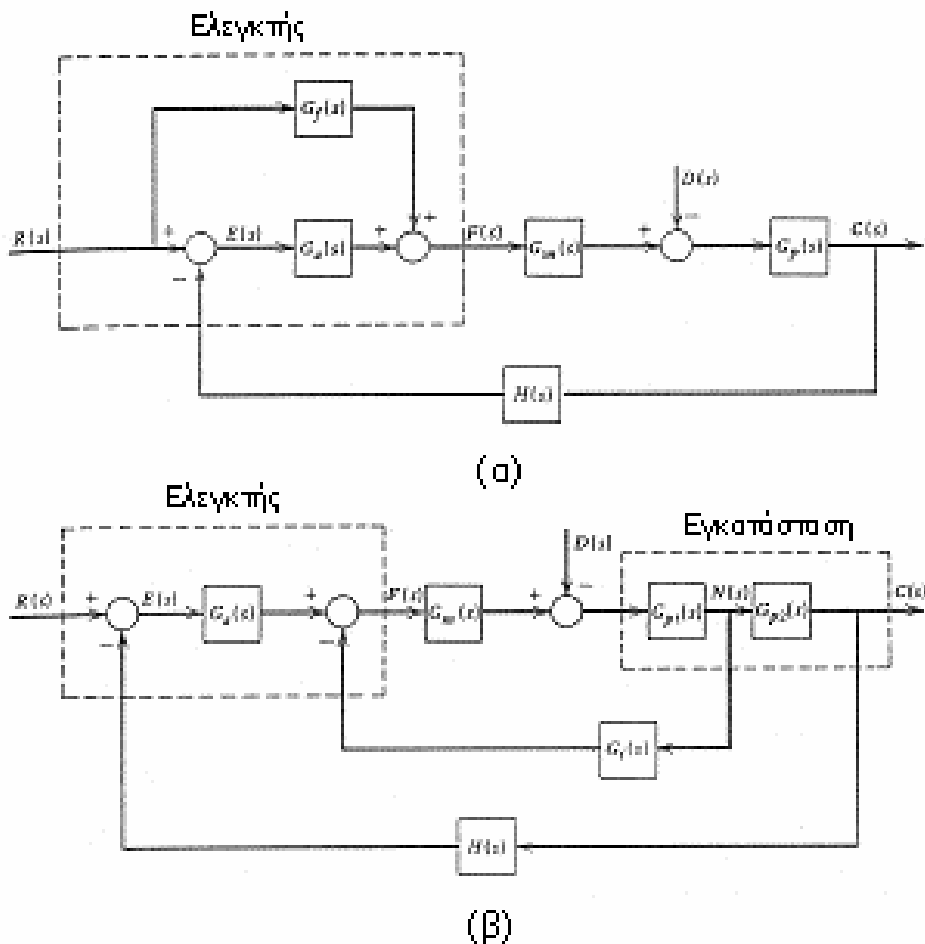
Η συνάρτηση μεταφοράς της διαταραχής είναι:

$$\frac{C(s)}{V(s)} = -Q(s) \frac{G_p(s)}{1 + G_a(s)G_m(s)G_p(s)H(s)}$$

Ένα σημαντικό μέτρο της απόδοσης ενός ελέγχου συστήματος είναι το σήμα σφάλματος $E(s)$. Η άλγεβρα των μπλοκ διαγραμμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει ότι για το σύστημα στο σχήμα 1.12, το $E(s)$ σχετίζεται με το $V(s)$ και το $D(s)$ ως εξής:

$$E(s) = \frac{A(s)V(s) + G_p(s)H(s)Q(s)D(s)}{1 + G_a(s)G_m(s)G_p(s)H(s)}$$

Η διαμόρφωση που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.12 είναι αυτή ενός βασικού συστήματος ελέγχου, αλλά δεν είναι η μόνη χρησιμοποιούμενη. Οι βελτιώσεις στην απόδοση συστημάτων μπορούν μερικές φορές να γίνουν με τη χρησιμοποίηση των διατάξεων που παρουσιάζονται στο σχήμα 1.13.



Εικόνα 1.13 Εναλλακτικές διατάξεις συστήματος ελέγχου.

Το σύστημα που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.13α χρησιμοποιεί την αντιστάθμιση ανατροφοδότησης. Από το μπλοκ διάγραμμα, μπορούμε να γράψουμε τις ακόλουθες σχέσεις:

$$F(s) = G_a E(s) + G_f R(s)$$

$$C(s) = [G_m F(s) - D(s)] G_p$$

$$E(s) = R(s) - HC(s)$$

Αν θέσουμε $D(s) = 0$ και αφαιρέσουμε όλες τις άλλες μεταβλητές εκτός από το $C(s)$ και το $R(s)$ παίρνουμε την αρχική συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_p G_m (G_a + G_f)}{1 + G_a G_m G_p H}$$

Αν αντικαταστήσουμε το $D(s)$, θέσουμε $R(s) = 0$ και αφαιρέσουμε όλες τις μεταβλητές εκτός από τα $C(s)$ και $R(s)$ παίρνουμε την συνάρτηση μεταφοράς της διαταραχής:

$$\frac{C(s)}{D(s)} = \frac{-G_p}{1 + G_a G_m G_p H}$$

Τέλος, η σχέση σφάλματος είναι:

$$E(s) = \frac{(1 - G_f G_m G_p H) R(s) + G_p H D(s)}{1 + G_a G_m G_p H}$$

Το σύστημα που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.13β χρησιμοποιεί την εσωτερική αντιστάθμιση ανατροφοδότησης. Οι εγκαταστάσεις διαμορφώνονται με δύο συναρτήσεις μεταφοράς $G_{p1}(s)$ και $G_{p2}(s)$ και οι ενδιάμεσες εγκαταστάσεις με μεταβλητό $N(s)$ ανατροφοδοτούνται προς χρήση από τον ελεγκτή.

Οι σχέσεις των συστημάτων είναι:

$$F(s) = G_a E(s) - G_i N(s)$$

$$E(s) = R(s) - HC(s)$$

$$C(s) = G_{p2} N(s)$$

$$N(s) = G_{p1} [G_m F(s) - D(s)]$$

Θέτοντας διαδοχικά $D(s) = 0$ και $R(s) = 0$ και αφαιρέσουμε τις μεταβλητές όπως προηγουμένως έχουμε:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{P}$$

$$\frac{C(s)}{D(s)} = \frac{L}{P}$$

$$E(s) = \frac{(1 + G_{p1}G_mG_i)}{P}R(s) - \frac{LH}{P}D(s)$$

όπου:

$$K = G_{p1}G_{p2}G_mG_a$$

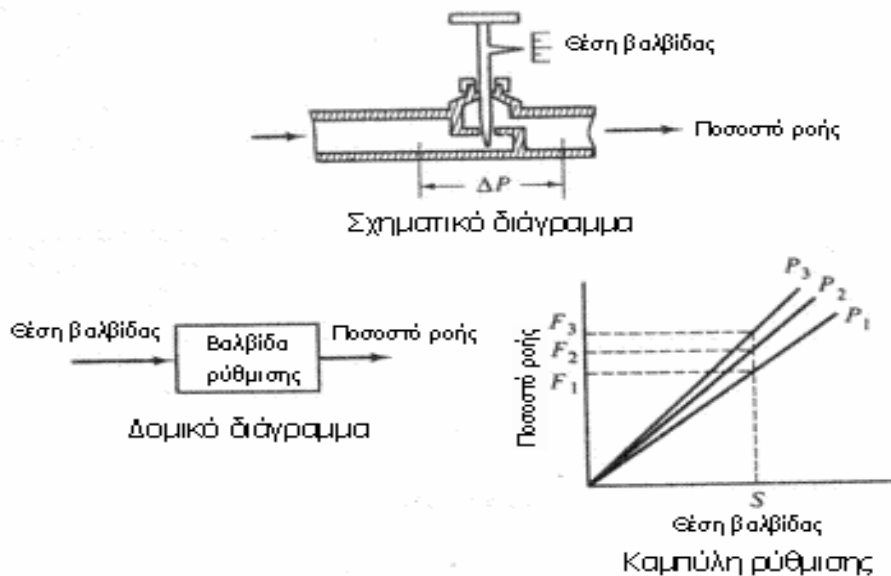
$$L = -G_{p1}G_{p2}$$

$$P = 1 + G_{p1}G_{p2}G_aG_mH + G_{p1}G_mG_i$$

1.6 Έλεγχος ανοικτού βρόγχου

Ένα σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόγχου δεν συγκρίνει το αποτέλεσμα με την επιθυμητή τιμή για να καθορίσει την ενέργεια ελέγχου, αλλά χρησιμοποιεί μια καθορισμένη ρύθμιση νωρίτερα, υπολογισμένη με κάποιου είδους υπολογισμό ή διαδικασία, για να πετύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η βελόνα της βαλβίδας με διαβαθμισμένη ένδειξη είναι ένα παράδειγμα συστήματος ελέγχου ανοικτού βρόγχου. Η καμπύλη ρύθμισης λαμβάνεται μετρώντας την ροή για διάφορες θέσεις της βαλβίδας. Όπως δείχνει η καμπύλη ρύθμισης διαφορετικές γραμμές ρύθμισης λαμβάνονται για διαφορετικές πτώσεις πίεσης. Υποθέτοντας ότι είναι επιθυμητή μια ροή F2 και χρησιμοποιείται μια ρύθμιση S τότε όσο η πτώση πίεσης κατά μήκος της βαλβίδας παραμένει P2, η ροή θα παραμένει F2. Αν η πτώση πίεσης αλλάξει σε P1, η ροή θα αλλάξει σε F1. Ο έλεγχος ανοικτού βρόγχου δεν μπορεί να διορθώσει αναπάντεχες αλλαγές στην αλλαγή της πίεσης.



Εικόνα 1.14 Παράδειγμα συστήματος ελέγχου ανοικτού βρόγχου.

Η βολή μιας σφαίρας όπλου είναι ένα άλλο παράδειγμα ενός συστήματος ελέγχου ανοικτού βρόγχου. Το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι η σφαίρα να κατευθυνθεί στο κέντρο του στόχου. Το υπαρκτό αποτέλεσμα είναι η κατεύθυνση της σφαίρας κατά τον πυροβολισμό. Ο έλεγχος ανοικτού βρόγχου πραγματοποιείται κατά την στόχευση του όπλου στο κέντρο του στόχου και κατά το τράβηγμα της σκανδάλης. Όταν η σφαίρα φύγει από την κάνη, δεν μπορεί να υπάρξει κάποια μορφή ελέγχου. Εάν υπάρξει ένα ξαφνικό φύσημα του ανέμου, η κατεύθυνση της σφαίρας θα αλλάξει και καμία διόρθωση δεν θα είναι δυνατή.

Το κύριο πλεονέκτημα του ελέγχου ανοικτού βρόγχου είναι ότι είναι λιγότερο ακριβός από αυτόν του κλειστού, λόγω του ότι δεν είναι απαραίτητο να μετρηθεί το υπαρκτό αποτέλεσμα. Εκτός αυτού ο ελεγκτής είναι πολύ πιο απλός διότι δεν χρειάζονται διορθωτικές ενέργειες βασισμένες στο σφάλμα. Το μειονέκτημα του ελέγχου ανοικτού βρόγχου είναι ότι υπάρχουν σφάλματα λόγω αναπάντεχων αναταραχών που δεν διορθώνονται. Συχνά ένας άνθρωπος θα πρέπει να διορθώνει σιγά σιγά τις αναταραχές αυτές χειροκίνητα. Σε αυτήν την περίπτωση ουσιαστικά ο χειριστής κλείνει το βρόγχο καθώς παρέχει ανάδραση.

1.7 Έλεγχος κλειστού βρόγχου

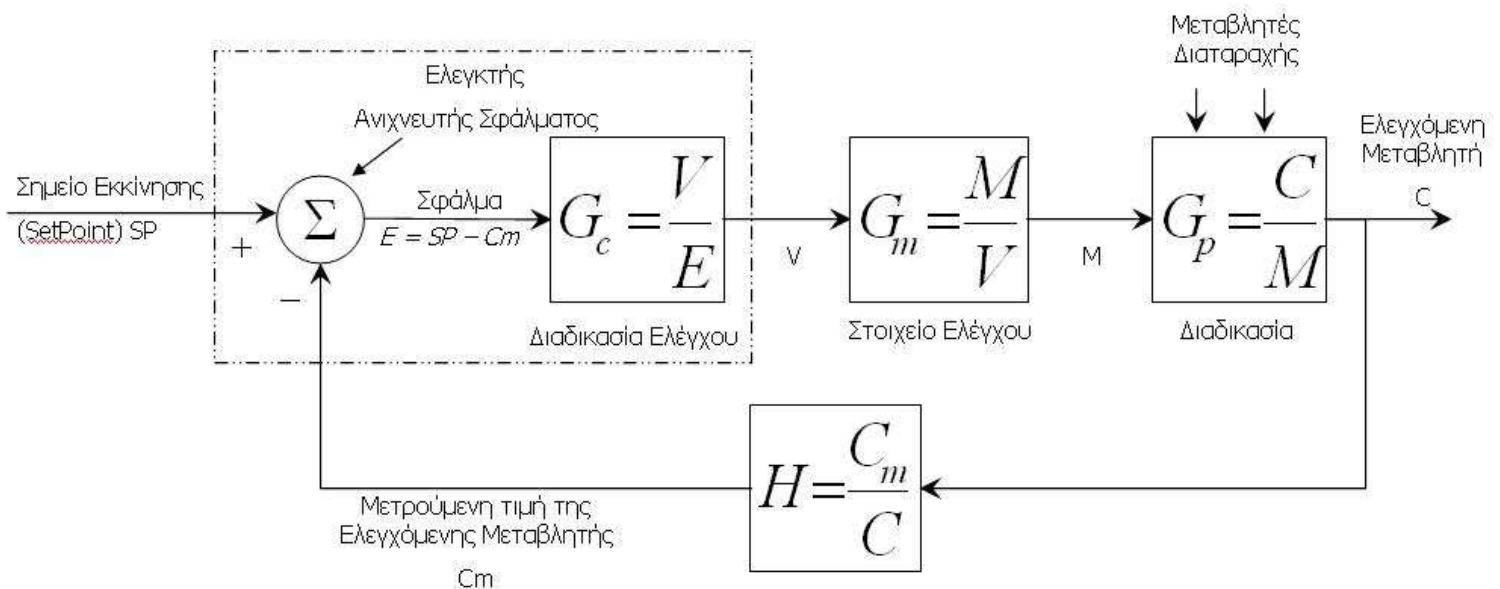
1.7.1 Ορισμός ανάδρασης (feedback)

Ανάδραση είναι η πράξη της μέτρησης της διαφοράς ανάμεσα στο πραγματικό και στο επιθυμητό αποτέλεσμα και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας αυτή τη διαφορά η καθοδήγηση του συστήματος ώστε να πλησιάσουμε στην επιθυμητή τιμή της εξόδου. Ο όρος ανάδραση (feedback) προέρχεται από την

κατεύθυνση στην οποία κινείται η μετρούμενη τιμή στο μπλοκ διάγραμμα. Το σήμα ξεκινάει από την έξοδο του υπό έλεγχο συστήματος και καταλήγει στην είσοδο του ελεγκτή. Η έξοδος του ελεγκτή είναι η είσοδος του υπό έλεγχο συστήματος. Έτσι, η μετρούμενη τιμή του σήματος που προέρχεται από την έξοδο του υπό έλεγχο συστήματος, τροφοδοτείται ξανά στην είσοδο. Ο όρος κλειστός βρόχος αναφέρεται στον βρόχο που δημιουργείται από τη διαδρομή της ανάδρασης.

1.7.2 Παράδειγμα συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα μπλοκ διάγραμμα κλειστού βρόχου ενός συστήματος ελέγχου διαδικασιών. Θα πρέπει κανείς να είναι εξοικειωμένος με τέτοιους όρους καθώς και τις διεργασίες που ακολουθούν οι οποίες σχηματίζουν την βάση των συστημάτων ελέγχου με ανάδραση.



Εικόνα 1.15 Μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος ελέγχου διαδικασιών κλειστού βρόχου.

Λειτουργίες που εκτελούνται από ένα Σύστημα Ελέγχου με Ανάδραση

Μέτρηση: μέτρηση της τιμής της μεταβλητής ελέγχου (controlled variable)

Απόφαση: υπολογισμός του σφάλματος (επιθυμητή τιμή μείον την πραγματική) και χρήση του σφάλματος ώστε να σχηματιστεί μια πράξη ελέγχου.

Χειρισμός: χρήση της πράξης ελέγχου ώστε να χειραγωγηθούν κάποιες μεταβλητές στην διαδικασία με τέτοιο τρόπο ώστε θα τείνουν να μειώσουν το σφάλμα.

Στην εικόνα 1.15 το σημείο ρύθμισης (set point, είναι η τιμή που λέμε στο σύστημα ότι θα πρέπει να έχει, η αναφορά μας) είναι η είσοδος στο σύστημα ελέγχου διεργασιών, και η μεταβλητή ελέγχου (C) είναι η έξοδος. Η ροή της ανάδρασης αποτελείται από ένα εξάρτημα, το αισθητήριο με συνάρτηση

μεταφοράς (H). Η κανονική ροή αποτελείται από τρία εξαρτήματα (το εξάρτημα που διενεργεί τον έλεγχο, αυτό που κάνει το χειρισμό και αυτό της διεργασίας) με συναρτήσεις μεταφοράς G_c, G_m και G_p αντίστοιχα. Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς της κανονικής ροής (G) είναι το γινόμενο των συναρτήσεων μεταφοράς των τριών αυτών εξαρτημάτων.

$$G = G_c G_m G_p$$

Η επίδοση ενός συστήματος ελέγχου βασίζεται συνήθως στη σύγκριση μεταξύ της τιμής εκκίνησης (set point) και της μετρούμενης τιμής της μεταβλητής ελέγχου (C_m , είναι η ελεγχόμενη μεταβλητή, manipulated). Ο λόγος που χρησιμοποιείται η C_m και όχι η C είναι ότι η C_m είναι μετρήσιμη και διαθέσιμη. Έτσι, η συνάρτηση μεταφοράς C_m/SP του συστήματος ελέγχου διεργασιών κλειστού βρόχου προκύπτει όπως φαίνεται παρακάτω:

Έχουμε: $E = SP - C_m$, $C = EG$, $C_m = CH$ και αντικαθιστώντας παίρνουμε:

$$C_m = EGH \Leftrightarrow C_m = (SP - C_m)GH \Leftrightarrow C_m + C_mGH = (SP)GH \Leftrightarrow C_m(1+GH) = (SP)GH \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{C_m}{SP} = \frac{GH}{1+GH} \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) είναι η συνάρτηση μεταφοράς ενός συστήματος ελέγχου διεργασιών κλειστού βρόχου. Παρακάτω ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των εξαρτημάτων του συστήματος αυτού.

1.7.3 Περιγραφή εξαρτημάτων συστήματος κλειστού βρόχου

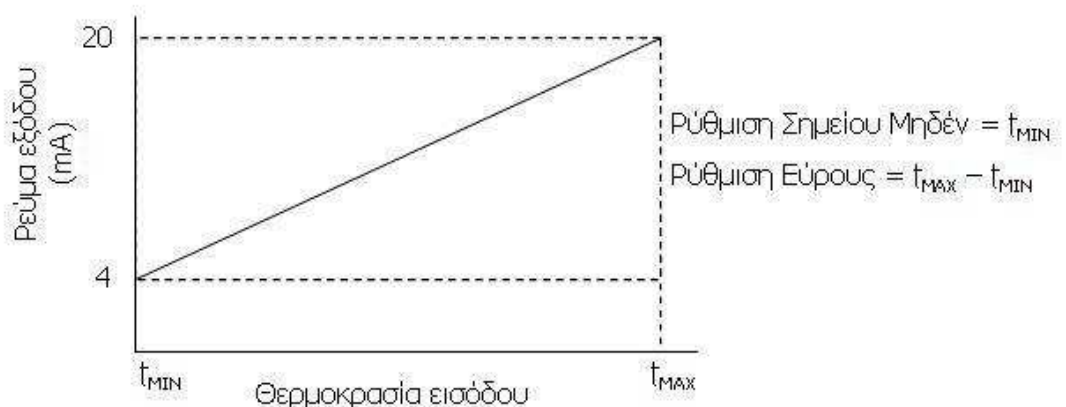
Διεργασία (Process)

Το μπλοκ διεργασίας στην εικόνα 1.15 αντιπροσωπεύει οτιδήποτε εκτελείται μέσα και από τον εξοπλισμό από τον οποίο μια μεταβλητή ελέγχεται. Η διεργασία περιλαμβάνει όλα όσα επηρεάζουν την μεταβλητή ελέγχου ή αλλιώς μεταβλητή διεργασίας εκτός από τον ελεγκτή και το τελικό στοιχείο ελέγχου.

Αισθητήριο (Measuring Transmitter)

Ο εκπομπός μετρήσεων ή αλλιώς αισθητήρας μετράει την τιμή της μεταβλητής ελέγχου και την μετατρέπει σε ένα εύχρηστο σήμα.

Παρόλο που ο αισθητήρας θεωρείται ότι είναι ένα μπλοκ, συνήθως αποτελείται από ένα αισθητήριο στοιχείο και έναν μετατροπέα σήματος. Η εικόνα



Εικόνα 1.16 Γραφική παράσταση εισόδου/εξόδου ενός αισθητήρα μέτρησης θερμοκρασίας.

1.16 δείχνει την καμπύλη εισόδου/ εξόδου ενός αισθητήρα θερμοκρασίας. Το αισθητήριο στοιχείο μπορεί να είναι ένα θερμοζεύγος, μια αντίσταση ή ένα θερμίστορ. Ο μετατροπέας σήματος λαμβάνει την έξοδο του αισθητήριου στοιχείου και παράγει ένα σήμα ηλεκτρικού ρεύματος. Για παράδειγμα, ένα θερμοζεύγος μετατρέπει τη θερμοκρασία σε ένα ηλεκτρικό σήμα της τάξης των millivolt και ο μετατροπέας παίρνει αυτό το σήμα και το μετατρέπει σε ηλεκτρικό ρεύμα της τάξης των 4 – 20 mA.

Ελεγκτής (Controller)

Ο ελεγκτής περιλαμβάνει τον ανιχνευτή σφάλματος και μια μονάδα που εκτελεί τις διάφορες μορφές ελέγχου. Ο ανιχνευτής σφάλματος υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ της μετρούμενης τιμής της μεταβλητής ελέγχου και την επιθυμητής τιμής (της ορισμένης τιμής, setpoint). Η διαφορά τους καλείται σφάλμα και υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Error} = \text{setpoint} - \text{measured value of controlled variable} \Leftrightarrow E = SP - C_m$$

Οι διάφορες μορφές ελέγχου μετατρέπουν το σφάλμα σε μια πράξη ελέγχου ή έξοδο του ελεγκτή η οποία θα τείνει να μειώσει το σφάλμα. Οι τρεις πιο γνωστές μορφές ελέγχου είναι ο αναλογικός (Proportional, P), ο ολοκληρωτικός (Integral, I) και ο παράγωγος (Derivative, D). Στην παρούσα φάση θα εξετάσουμε την λειτουργία των μορφών αυτών και όχι τα μαθηματικά τους μοντέλα.

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.

Ο **Ολοκληρωτικός Έλεγχος(I)** παράγει μια πράξη ελέγχου η οποία συνεχίζει να αυξάνει την διορθωτική της επίδραση για όσο χρονικό διάστημα το σφάλμα παραμένει. Αν το σφάλμα είναι μικρό, η ολοκληρωτική μορφή αυξάνει τη διόρθωση αργά. Αν το σφάλμα είναι μεγάλο, η ολοκληρωτική πράξη αυξάνει τη διόρθωση πιο γρήγορα. Για την ακρίβεια, ο ρυθμός με τον οποίο η διόρθωση αυξάνει είναι ανάλογος του σήματος του σφάλματος. Μαθηματικά, η ολοκληρωτική πράξη ελέγχου επιτυγχάνεται σχηματίζοντας το ολοκλήρωμα του σήματος σφάλματος.

Τέλος, ο **Διαφορικός Έλεγχος(D)** παράγει μια πράξη ελέγχου η οποία είναι ανάλογη του ρυθμού με τον οποίο το σφάλμα αλλάζει. Για παράδειγμα, αν το σφάλμα αυξάνεται απότομα, δεν θα περάσει πολύς χρόνος πριν να έχουμε να αντιμετωπίσουμε ένα πολύ μεγάλο σφάλμα. Αυτή η μορφή ελέγχου επιχειρεί να προλάβει αυτό το μελλοντικό σφάλμα παράγοντας μια διορθωτική ενέργεια αναλογική στο πόσο γρήγορα αλλάζει το σφάλμα. Ο παράγωγος έλεγχος είναι μια προσπάθεια να είμαστε προετοιμασμένοι για ένα μεγάλο σφάλμα και να το αποτρέπουμε με μια διορθωτική κίνηση βασισμένη στο πόσο γρήγορα αλλάζει το σφάλμα. Μαθηματικά, ο παράγωγος έλεγχος επιτυγχάνεται σχηματίζοντας την παράγωγο του σήματος του σφάλματος. Οι μορφές αυτές χρησιμοποιούνται με τους εξής τρόπους: P, PI, PD, PID.

Στοιχείο Χειρισμού (Manipulating Element)

Το στοιχείο χειρισμού χρησιμοποιεί την έξοδο του ελεγκτή ώστε να προσαρμόσει την χειριζόμενη μεταβλητή και συνήθως αποτελείται από δυο μέρη. Το πρώτο μέρος καλείται σκανδαλιστής (actuator) και το δεύτερο καλείται τελικό στοιχείο ελέγχου. Ο σκανδαλιστής μεταφράζει την έξοδο του ελεγκτή σε μια πράξη στο τελικό στοιχείο ελέγχου, και το τελικό στοιχείο ελέγχου απευθείας αλλάζει την τιμή της χειριζόμενης μεταβλητής. Βαλβίδες, πεταλούδες, ανεμιστήρες, αντλίες και στοιχεία θερμότητας είναι παραδείγματα στοιχείων χειρισμού. Η τιμή που ελέγχει τη ροή καυσίμου σε ένα οικιακό σύστημα θέρμανσης είναι άλλο ένα παράδειγμα ενός στοιχείου χειρισμού.

Ονόματα Μεταβλητών (Variable Names)

Η μεταβλητή ελέγχου (controlled variable, C) μιας διαδικασίας είναι η μεταβλητή εξόδου που είναι να ελεγχθεί. Σε ένα σύστημα ελέγχου διαδικασιών, η μεταβλητή ελέγχου είναι συνήθως μια μεταβλητή εξόδου που είναι μια καλή μέτρηση της ποιότητας του προϊόντος. Οι πιο συνηθισμένες μεταβλητές ελέγχου είναι η θέση, ταχύτητα, θερμοκρασία, πίεση, στάθμη και ροή.

Η αναφορά (setpoint, SP) είναι η επιθυμητή τιμή της μεταβλητής ελέγχου.

Η μετρούμενη μεταβλητή (C_m) είναι η μετρούμενη τιμή της μεταβλητής ελέγχου. Είναι η έξοδος των μετρούμενων μέσων και συνήθως διαφέρει κατά ένα πολύ μικρό ποσό από την πραγματική τιμή της μεταβλητής ελέγχου.

Το σφάλμα (E) είναι η διαφορά ανάμεσα στην αναφορά και την μετρούμενη τιμή της μεταβλητής ελέγχου. Υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση: $E = SP - C_m$.

Η έξοδος του ελεγκτή (V) είναι η πράξη ελέγχου που πρόκειται να οδηγήσει τη μετρούμενη τιμή της μεταβλητής ελέγχου προς την τιμή της αναφοράς. Η πράξη ελέγχου εξαρτάται από το σήμα του σφάλματος (E) και από τις μορφές ελέγχου που χρησιμοποιούνται στον ελεγκτή.

Η ελεγχόμενη μεταβλητή (manipulated variable, M) είναι η μεταβλητή που ρυθμίζεται από το τελικό στοιχείο ελέγχου ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή της μεταβλητής ελέγχου. Προφανώς, η ελεγχόμενη μεταβλητή θα πρέπει να είναι ικανή να επιτύχει μια αλλαγή στην μεταβλητή ελέγχου. Η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι μια από τις τιμές εισόδου μιας διαδικασίας. Αλλαγές στο φορτίο μιας διαδικασίας επιβάλλουν αλλαγές στην ελεγχόμενη μεταβλητή ώστε να διατηρηθεί η κατάσταση ισορροπίας του συστήματος. Γι' αυτό το λόγο, η τιμή της μεταβλητής αυτής χρησιμοποιείται σαν μέτρο του φορτίου μιας διαδικασίας.

Οι μεταβλητές διαταραχής (disturbance variable, D) είναι μεταβλητές εισόδου μιας διαδικασίας οι οποίες επηρεάζουν τη μεταβλητή ελέγχου όμως δεν ρυθμίζονται από το σύστημα ελέγχου. Οι μεταβλητές διαταραχής είναι ικανές να μεταβάλλουν το φορτίο μιας διαδικασίας και είναι ο κύριος λόγος που χρησιμοποιούμε συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου.

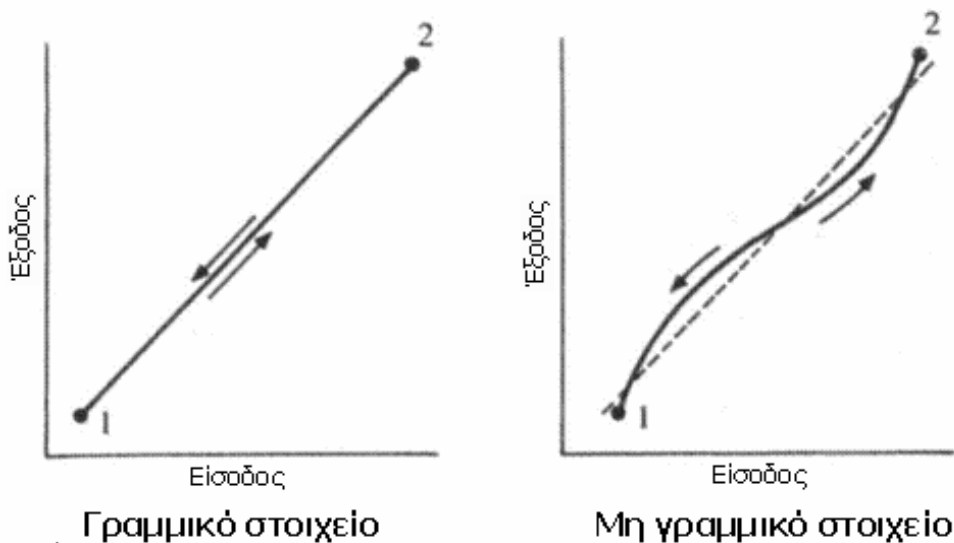
Το κυρίως πλεονέκτημα του ελέγχου κλειστού βρόχου είναι η δυνατότητα για πιο ακριβή έλεγχο μιας διαδικασίας. Υπάρχουν δυο μειονεκτήματα στον έλεγχο κλειστού βρόχου: (1) είναι πιο ακριβός απ' ό,τι ο έλεγχος ανοικτού βρόχου, και (2) η λειτουργία ανάδρασης ενός συστήματος κλειστού βρόχου είναι

πιθανό να προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Ένα ασταθές σύστημα παράγει μια ταλάντωση στη μεταβλητή ελέγχου, συχνά σε πολύ μεγάλη κλίμακα.

Ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου (ή σύστημα ελέγχου με ανάδραση) μετράει τη διαφορά ανάμεσα στην πραγματική τιμή της μεταβλητής ελέγχου και την τιμή της επιθυμητής τιμής (η τιμής θέσης, setpoint) και χρησιμοποιεί τη διαφορά για να οδηγήει την πραγματική τιμή προς το επιθυμητό αποτέλεσμα.

1.8 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.



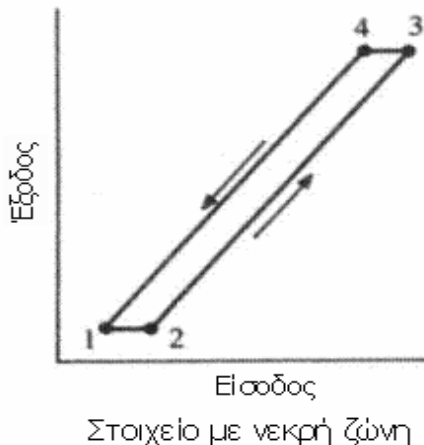
Εικόνα 1.17 Γραφική παράσταση εισόδου/ εξόδου ενός γραμμικού και ενός μη γραμμικού στοιχείου.

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 1.18 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).



Εικόνα 1.18 Γραφική παράσταση εισόδου/ εξόδου ενός στοιχείου με νεκρή ζώνη.

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.

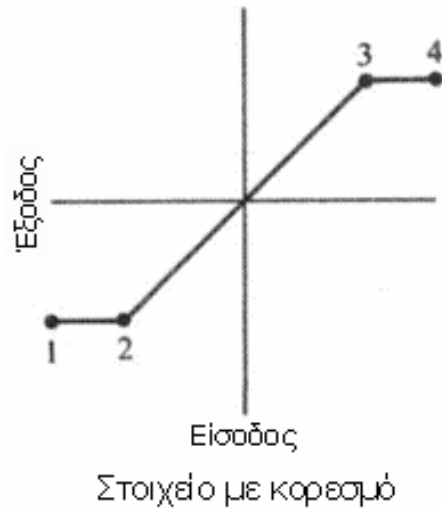
Η υστέρηση(hysteresis) είναι η μη γραμμικότητα που έχει ως αποτέλεσμα η τιμή εξόδου για μια δοσμένη είσοδο να εξαρτάται από τις προηγούμενες τιμές εισόδου. Η γραφική παράσταση



Εικόνα 1.19 Γραφική παράσταση εισόδου/ εξόδου ενός στοιχείου με υστέρηση.

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 1.20 Γραφική παράσταση εισόδου/εξόδου ενός στοιχείου με κορεσμό.

1.9 Πλεονεκτήματα του αυτομάτου ελέγχου

Τα συστήματα ελέγχου γίνονται σταθερά όλο και πιο σημαντικά στην κοινωνία μας. Εξαρτόμαστε από αυτά σε τέτοιο βαθμό ώστε η ζωή μας θα ήταν αφάνταστα δύσκολη χωρίς αυτά. Ο αυτόματος έλεγχος έχει αυξήσει την παραγωγικότητα των εργατών, απελευθερώνοντας τους επιδέξιους εργάτες από εργασίες ρουτίνας αυξάνοντας έτσι την ποσότητα έργου που παράγεται από κάθε εργάτη. Τα συστήματα ελέγχου έχουν βελτιώσει την ποιότητα και την ομοιογένεια των παραγόμενων αγαθών και υπηρεσιών καθώς πολλά από τα προϊόντα που απολαμβάνουμε θα ήταν αδύνατον να παραχθούν χωρίς αυτόματο έλεγχο.

Οι σερβομηχανισμοί θέτουν τεράστια ισχύ στην υπηρεσία μας, δίνοντάς μας την δυνατότητα να ελέγχουμε μεγάλο σε μέγεθος εξοπλισμό όπως αεροσκάφη και υπερωκεάνια.

Τα συστήματα ελέγχου αυξάνουν την απόδοση μειώνοντας την σπατάλη υλικών και ενέργειας καθώς αναζητούμε νέους τρόπους να προστατεύσουμε το περιβάλλον. Η ασφάλεια είναι επίσης άλλο ένα πλεονέκτημα των συστημάτων ελέγχου. Τέλος, τα συστήματα ελέγχου όπως τα οικιακά συστήματα θέρμανσης και η αυτόματη μετάδοση μας παρέχουν αυξημένη άνεση και ευκολία.

Ανακεφαλαιώνοντας, τα πλεονεκτήματα του αυτόματου ελέγχου κατηγοριοποιούνται στις εξής κατηγορίες:

1. Αυξημένη παραγωγικότητα
2. Βελτιωμένη ποιότητα και ομοιογένεια

3. Αυξημένη απόδοση
4. Παροχή ισχύος
5. Ασφάλεια
6. Άνεση και ευκολία

1.10 Αλλαγές φορτίου

Ένα σύστημα ελέγχου πρέπει να εξισορροπεί την ωφέλεια σε υλικό και ισχύ από την διαδικασία σε σχέση με την αντίστοιχη απώλεια, για να διατηρήσει την επιθυμητή τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής. Συνήθως η απώλεια υλικού και ενέργειας στο φορτίο της διαδικασίας και η χειριζόμενη μεταβλητή πρέπει να παρέχουν το υλικό εξισορρόπησης ή την ωφέλεια σε ενέργεια. Παρόλα αυτά μερικές φορές υπάρχει η αντίθετη κατάσταση και η χειριζόμενη μεταβλητή πρέπει να παρέχει την ωφέλεια υλικού ή ενέργειας.

Για να διατηρήσει την επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού ένα οικιακό σύστημα θέρμανσης πρέπει να εξισορροπήσει την θερμότητα που παρέχεται από τον λέβητα σε σχέση με την θερμότητα που χάνεται στο σπίτι. Η χαμένη θερμότητα είναι το φορτίο του συστήματος ελέγχου και η παρεχόμενη στον λέβητα ενέργεια ρυθμίζεται από την χειριζόμενη μεταβλητή.

Για να διατηρήσει το επίπεδο υγρού στην επιθυμητή τιμή, ένα σύστημα ελέγχου υγρού πρέπει να εξισορροπήσει την ροή εισόδου σε σχέση με την ροή εξόδου. Η ροή εξόδου είναι το φορτίο του συστήματος και η ροή εισόδου η χειριζόμενη μεταβλητή.

Για να διατηρήσει την επιθυμητή ταχύτητα άντλησης, ο ελεγκτής ενός μοτέρ μεταβλητής ταχύτητας που χειρίζεται μια αντλία πρέπει να εξισορροπήσει την ισχύ εισόδου στο μοτέρ σε σχέση με την ισχύ που παράγεται στην αντλία. Η ισχύς που παρέχεται στην αντλία είναι το φορτίο του συστήματος και η ισχύς εισόδου η χειριζόμενη μεταβλητή.

Το φορτίο μιας διαδικασίας αντανακλάται πάντα στην χειριζόμενη μεταβλητή. Έτσι, η τιμή της χειριζόμενης μεταβλητής είναι ένα μέτρο του φορτίου του συστήματος. Κάθε αλλαγή φορτίου έχει ως αποτέλεσμα την αντίστοιχη αλλαγή στην χειριζόμενη μεταβλητή και αυτό έχει ως συνέπεια μια αντίστοιχη αλλαγή στην ρύθμιση του τελικού στοιχείου ελέγχου.

Το φορτίο σε ένα σύστημα ελέγχου μετριέται ως η τιμή της χειριζόμενης μεταβλητής που απαιτείται από την διαδικασία σε οποιοδήποτε χρόνο ώστε να διατηρηθεί μια ισορροπημένη κατάσταση.

Το φορτίο ενός συστήματος ελέγχου δεν παραμένει σταθερό. Κάθε μη ελεγχόμενη μεταβλητή που επηρεάζει την ελεγχόμενη μεταβλητή είναι ικανή να προκαλέσει μια αλλαγή φορτίου. Κάθε αλλαγή φορτίου απαιτεί μια αντίστοιχη αλλαγή στην χειριζόμενη μεταβλητή ώστε να διατηρηθεί η ελεγχόμενη

μεταβλητή στην επιθυμητή τιμή. Ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου κάνει αυτόματα τις απαραίτητες αλλαγές στην χειριζόμενη μεταβλητή, αντίθετα ένα σύστημα ανοικτού βρόγχου δεν τις κάνει. Άρα ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου είναι απαραίτητο εάν η αυτόματη προσαρμογή στις αλλαγές φορτίου είναι επιθυμητή.

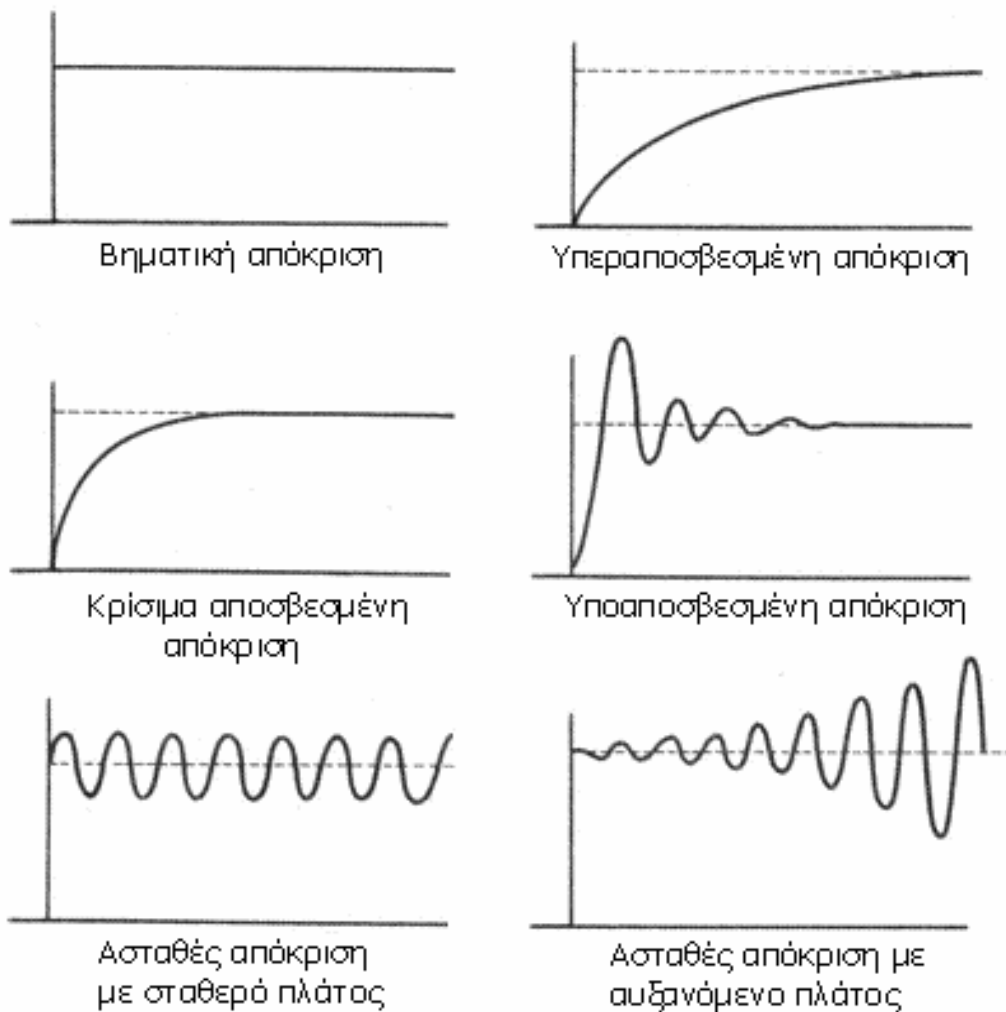
Συνήθως υπάρχουν πολλές μη ελεγχόμενες καταστάσεις σε μία διαδικασία που είναι ικανές να προκαλέσουν μια αλλαγή φορτίου. Κάποια παραδείγματα αλλαγών φορτίου είναι:

1. Μια αλλαγή στην απαίτηση από το ελεγχόμενο μέσο. Για παράδειγμα, ανοίγοντας την πόρτα του σπιτιού τον χειμώνα απαιτεί περισσότερη θερμότητα προκειμένου να διατηρηθεί η θερμοκρασία στην επιθυμητή τιμή. Κλείνοντας την πόρτα χρειάζεται λιγότερη θερμότητα. Και οι δύο αυτές αλλαγές είναι αλλαγές στο φορτίο.
2. Μια αλλαγή στην ποιότητα της χειριζόμενης μεταβλητής. Για παράδειγμα μια αλλαγή στο θερμικό περιεχόμενο του καυσίμου που παρέχεται στον καυστήρα απαιτεί μια αλλαγή στον ρυθμό παροχής αυτού του καυστήρα.
3. Μια αλλαγή στις εξωτερικές συνθήκες. Για παράδειγμα, αν η εξωτερική θερμοκρασία πέσει, χρειάζεται περισσότερη θερμότητα για να διατηρηθεί η επιθυμητή θερμοκρασία στο σπίτι.
4. Μια αλλαγή στην ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται ή παρέχεται μέσα στην διαδικασία. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας την κουζίνα μαγειρέματος για την προετοιμασία δείπνου, παρέχεται στο σπίτι μια μεγάλη ποσότητα θερμότητας. Άρα παράγεται λιγότερη θερμότητα από τον λέβητα για να διατηρηθεί η επιθυμητή θερμοκρασία.

1.11 Απόσβεση και αστάθεια

Η ενίσχυση του ελεγκτή καθορίζει ένα πολύ βασικό χαρακτηριστικό της απόκρισης του συστήματος ελέγχου. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ο τύπος της απόσβεσης ή αστάθειας που παρουσιάζει το σύστημα σαν απόκριση σε μια αναταραχή. Όσο η ενίσχυση του ελεγκτή αυξάνεται, η απόκριση αλλάζει στην ακόλουθη σειρά: υπεραποσβεσμένο (overdamped), κρίσιμα αποσβεσμένο (critically damped), υποαποσβεσμένο (underdamped), ασταθές με σταθερό πλάτος (unstable with constant amplitude) και ασταθές με αυξανόμενο πλάτος (unstable with increasing amplitude). Προφανώς, ούτε η ασταθής απόκριση ούτε η υπεραποσβεσμένη ικανοποιούν τον στόχο της μείωσης του σφάλματος. Τυπικά, η βέλτιστη απόκριση είναι είτε κρίσιμα αποσβεσμένη ή ελαφρώς υποαποσβεσμένη. Ακριβώς πόση απόσβεση είναι βέλτιστη εξαρτάται από την διαδικασία.

Περισσότερες λεπτομέρειες για την απόσβεση μπορούν να αποκτηθούν θεωρώντας ένα πολύ γνωστό σύστημα ταλάντωσης, το ντριπλάρισμα της μπάλας από ένα παιδί. Η μπάλα θα συνεχίσει να αναπηδά όσο το παιδί την σπρώχνει και αυτή κινείται κάτω (όσο δηλαδή η δύναμη είναι στην ίδια κατεύθυνση με την κίνηση της μπάλας). Η αναπήδηση θα τελειώσει σύντομα αν το παιδί σπρώξει κάτω



Εικόνα 1.21 Οι πέντε γενικές καταστάσεις της απόκρισης.

την μπάλα ενώ αυτή κινείται πάνω (δηλαδή η δύναμη είναι στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κατεύθυνσης της κίνησης της μπάλας). Οι ταλαντώσεις της μπάλας αποσβένονται από μία δύναμη αντίθετη σε κατεύθυνση από αυτή της κίνησης. Επεκτείνοντας αυτή την ιδέα στα συστήματα ελέγχου, η απόσβεση (damping) είναι μία δύναμη ή ένα σήμα αντίθετης κατεύθυνσης της κίνησης (ή του ρυθμού αλλαγής) της ελεγχόμενης μεταβλητής.

Υπάρχουν πολλές σταθεροποιητικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την απόσβεση σε ένα σύστημα και έτσι να επιτρέψουν μια μεγαλύτερη ενίσχυση στον ελεγκτή. Η γενική ιδέα είναι να βρεθεί μια δύναμη ή σήμα που θα αντικρούει τις αλλαγές στην ελεγχόμενη μεταβλητή. Ένα τέτοιο σήμα είναι ο ρυθμός αλλαγής της ελεγχόμενης μεταβλητής. Στα μαθηματικά η παράγωγος μιας μεταβλητής είναι ίση με τον ρυθμό μεταβολής της και αυτό το σήμα αναφέρεται ως η παράγωγος της ελεγχόμενης μεταβλητής. Η απόσβεση αυξάνεται αν η παράγωγος της ελεγχόμενης μεταβλητής αφαιρεθεί από το σήμα σφάλματος πριν αυτό φθάσει στον ελεγκτή. Αυτή η τεχνική ονομάζεται κάποιες φορές απόσβεση παραγώγου εξόδου (output derivative damping).

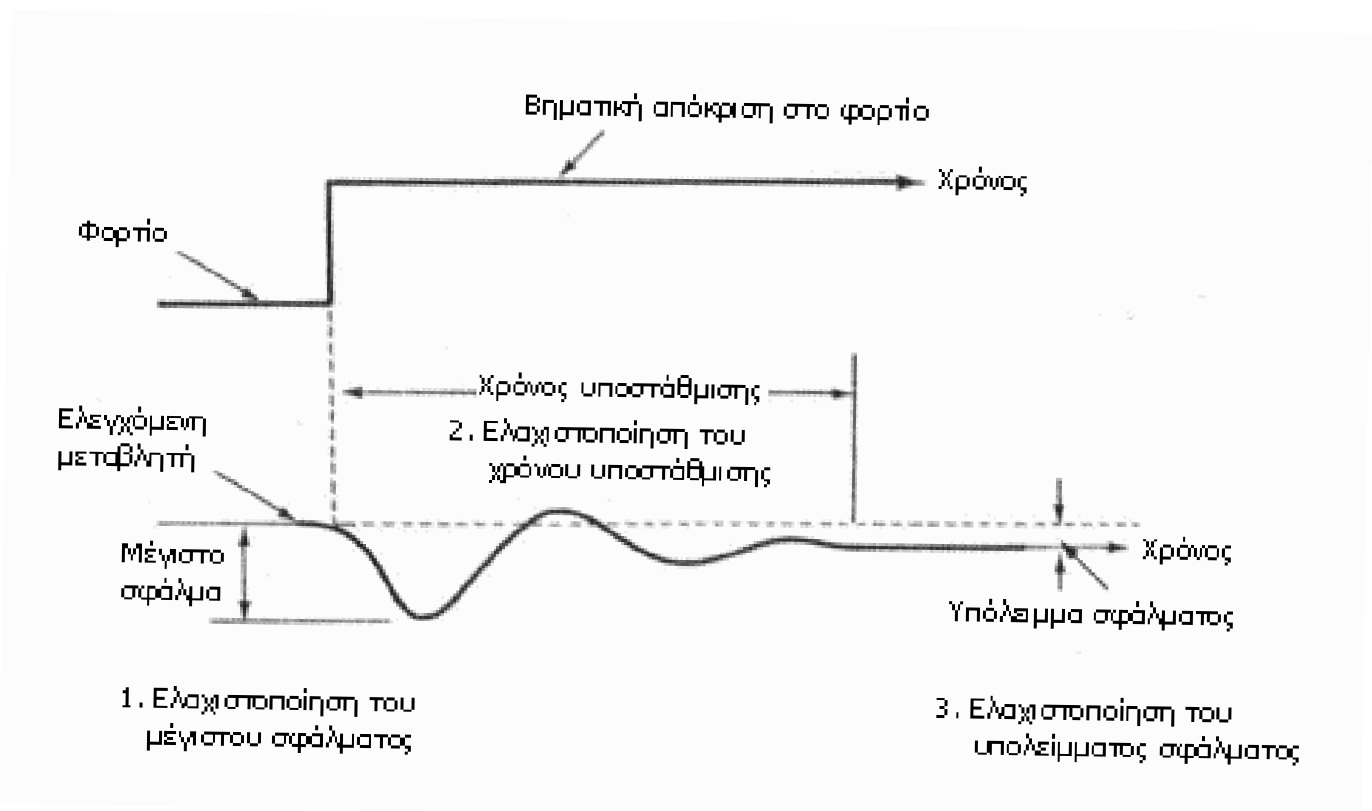
Ένα άλλο σταθεροποιητικό σήμα είναι η παράγωγος του σήματος σφάλματος. Αν η ρυθμιζόμενη τιμή είναι σταθερή, το σήμα αυτό είναι ίσο με την αντίθετη τιμή της παραγώγου της ελεγχόμενης

μεταβλητής. Η απόσβεση αυξάνεται αν η παράγωγος του σήματος σφάλματος προστεθεί στο σήμα σφάλματος πριν αυτό φθάσει στον ελεγκτή. Αυτή η τεχνική ονομάζεται μέθοδος ελέγχου παραγώγου(derivative control mode).

Η κολλώδης απόσβεση είναι μια σταθεροποιητική τεχνική που χρησιμοποιείται κάποιες φορές στα συστήματα ελέγχου θέσης. Λειτουργεί με βάση το γεγονός ότι οι δυνάμεις τριβής αντιτίθενται πάντα στην κίνηση.

1.12 Στόχοι ενός συστήματος ελέγχου

Με την πρώτη ματιά, ο στόχος ενός συστήματος ελέγχου είναι να διατηρεί την τιμή της ελεγχόμενης μεταβλητής πάντα σταθερή σε ένα σημείο ρύθμισης, ασχέτως των αλλαγών φορτίου ή των αλλαγών του σημείου ρύθμισης. Για να το επιτύχει αυτό, το σύστημα πρέπει να ανταποκριθεί σε μια αλλαγή πριν συμβεί το σφάλμα. Δυστυχώς όμως, η ανάδραση δεν είναι ποτέ τέλεια διότι δεν ενεργεί πριν συμβεί το σφάλμα. Πρώτον, η αλλαγή φορτίου πρέπει να αλλάξει την ελεγχόμενη μεταβλητή, όμως αυτό παράγει ένα σφάλμα. Έπειτα ο ελεγκτής ενεργεί πάνω στο λάθος για να παράγει μια αλλαγή στην



Εικόνα 1.22 Οι τρεις στόχοι ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου.

χειριζόμενη μεταβλητή. Τέλος, η αλλαγή στην χειριζόμενη μεταβλητή κατευθύνει την ελεγχόμενη μεταβλητή προς το σημείο ρύθμισης. Είναι περισσότερο ρεαλιστικό για εμάς να περιμένουμε από ένα

σύστημα ελέγχου να διατηρεί μια όσο το δυνατόν τελειότερη λειτουργία. Εφόσον τα σφάλματα σε ένα σύστημα ελέγχου παρουσιάζονται μετά από αλλαγές φορτίου ή αλλαγές στο σημείο ρύθμισης, φαίνεται φυσικό να ορίσουμε τους στόχους σε όρους της αντίδρασης σε τέτοιες αλλαγές.

Ένας προφανής στόχος είναι να ελαχιστοποιήσουμε την μέγιστη τιμή του σήματος σφάλματος. Μερικά συστήματα ελέγχου (με τη μέθοδο του ολοκληρώματος) θα μειώσουν σταδιακά το σφάλμα στο μηδέν, ενώ άλλα απαιτούν ένα υπόλειμμα σφάλματος για να ισοσταθμίσουν μια αλλαγή φορτίου. Σε οποιαδήποτε περίπτωση το σύστημα ελέγχου πρέπει τελικά να μεταφέρει το σφάλμα σε μία σταθερή τιμή. Ο χρόνος που χρειάζεται για να επιτευχθεί αυτό ονομάζεται χρόνος υποστάθμισης (settling time). Ένας δεύτερος στόχος ενός συστήματος ελέγχου είναι να ελαχιστοποιήσει τον χρόνο υποστάθμισης. Ένας τρίτος στόχος είναι να ελαχιστοποιήσει το υπόλειμμα σφάλματος μετά την υποστάθμιση.

Δυστυχώς, αυτοί οι στόχοι τείνουν να είναι ασυμβίβαστοι. Για παράδειγμα, το πρόβλημα της μείωσης του υπολείμματος σφάλματος μπορεί να επιλυθεί αυξάνοντας την ενίσχυση του ελεγκτή ώστε να χρειάζεται ένα μικρότερο υπόλειμμα λάθους για να παραχθεί η αναγκαία διορθωτική ενέργεια ελέγχου. Παρόλα αυτά μια αύξηση στην ενίσχυση τείνει να αυξήσει τον χρόνο υποστάθμισης και επομένως να αυξήσει και την μέγιστη τιμή του σφάλματος.

Στόχοι του ελέγχου:

Μετά από μια αλλαγή φορτίου ή σημείου ρύθμισης, το σύστημα ελέγχου πρέπει:

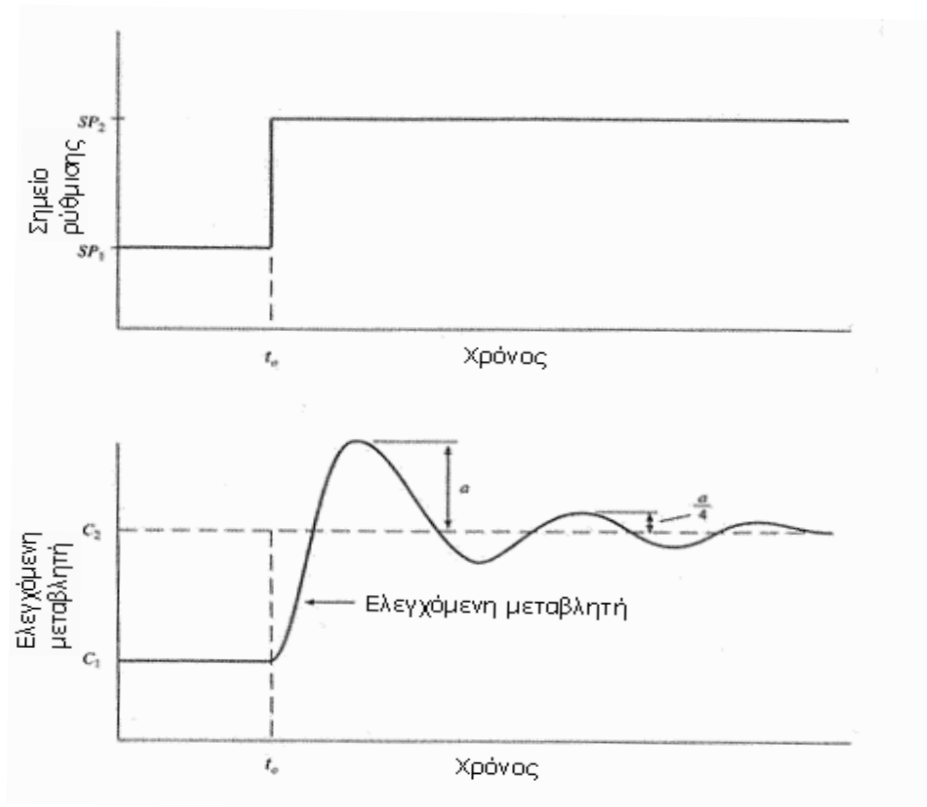
1. Να ελαχιστοποιήσει την μέγιστη τιμή του σφάλματος.
2. Να ελαχιστοποιήσει τον χρόνο υποστάθμισης.
3. Να ελαχιστοποιήσει το υπόλειμμα σφάλματος.

1.13 Κριτήρια του καλού ελέγχου

Για να αξιολογηθεί ένα σύστημα ελέγχου αποδοτικά, πρέπει να παρθούν δύο αποφάσεις: (1) Πρέπει να οριστεί η διαδικασία ελέγχου και (2) Πρέπει να επιλεχθούν τα κριτήρια του καλού ελέγχου. Μια βηματική αλλαγή στο φορτίο ή στο σημείο ρύθμισης είναι η πιο κοινή δοκιμή. Μια τυπική δοκιμή απεικονίζεται στην εικόνα 1.22. Τα τρία πιο κοινά κριτήρια καλού ελέγχου είναι: (1) Η φθορά τετάρτου του πλάτους, (2) Η κρίσιμη απόσβεση και (3) Το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής του σφάλματος. Ας περιγράψουμε όμως ξεχωριστά το κάθε κριτήριο:

1. Η φθορά τετάρτου του πλάτους. Αυτό το κριτήριο ορίζει μια μετριασμένη ταλάντωση στην οποία κάθε διαδοχική θετική τιμή κορυφής του σήματος είναι το ένα τέταρτο της προηγούμενης θετικής τιμής κορυφής. Η φθορά τετάρτου του πλάτους είναι ένα πολύ δημοφιλές κριτήριο διότι είναι

εύκολο να εφαρμοστεί στην πράξη και παρέχει σχεδόν βέλτιστο συμβιβασμό ανάμεσα στους τρεις στόχους ελέγχου.

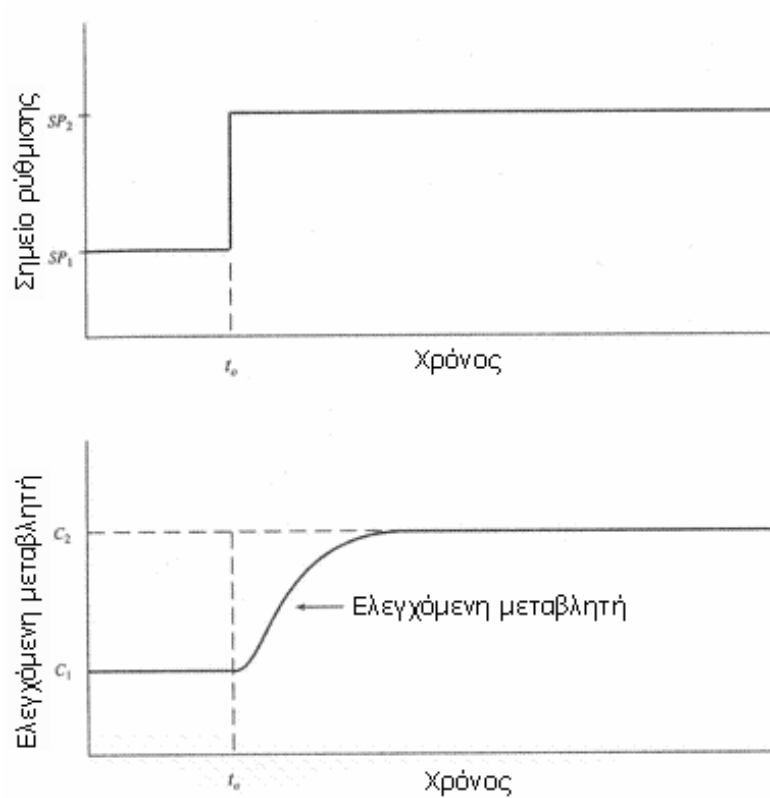


Εικόνα 1.23 Γραφική παράσταση φθοράς τετάρτου του πλάτους.

Μια παραλλαγή της φθοράς τετάρτου του πλάτους είναι η υπέρβαση ποσοστού κορυφής (peak percent overshoot, PPO). Είναι ένα μέτρο υπέρβασης της κορυφής της ελεγχόμενης μεταβλητής ανάλογα με το μέγεθος του βήματος. Το PPO 50% είναι σχεδόν ισότιμο με την φθορά του τετάρτου του πλάτους. Το PPO δίνεται από την εξίσωση:

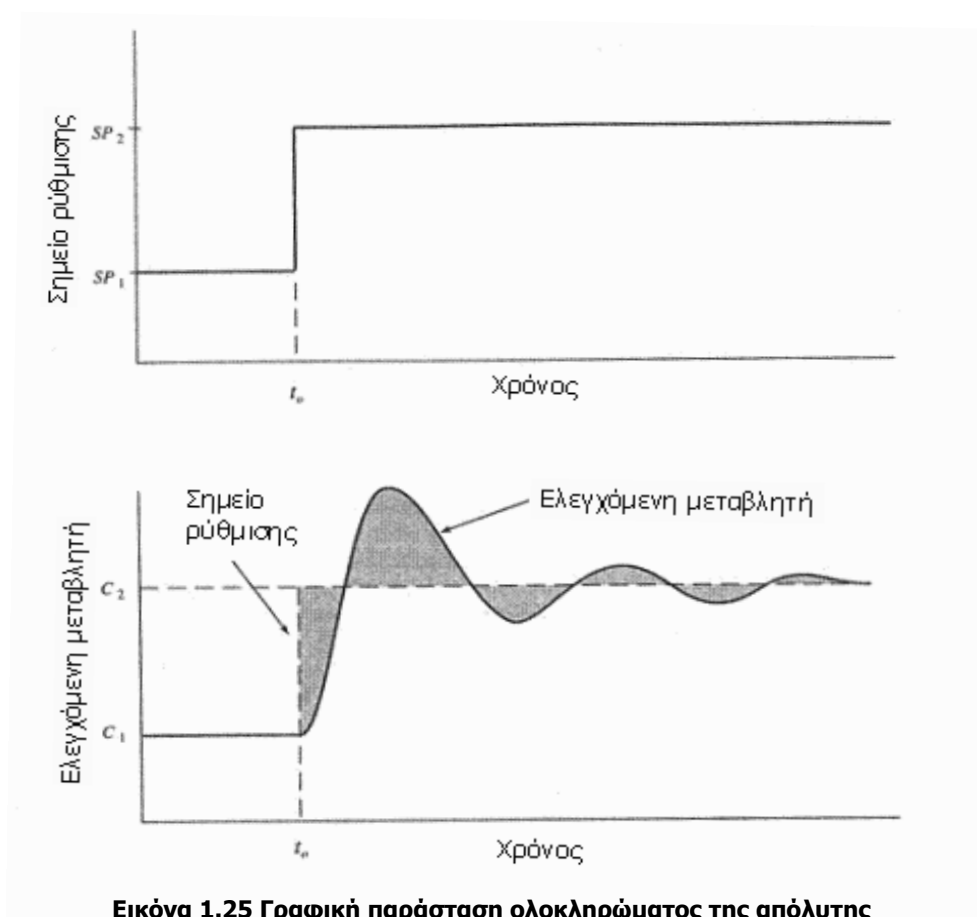
$$PPO = 100 \left(\frac{a}{C_2 - C_1} \right)$$

2. Η κρίσιμη απόσβεση. Αυτό το κριτήριο χρησιμοποιείται όταν η υπέρβαση του σημείου ρύθμισης είναι ανεπιθύμητη. Η κρίσιμη απόσβεση είναι η ελάχιστη ποσότητα απόσβεσης που θα παράγει μια απόκριση χωρίς υπέρβαση και ταλάντωση. Τα ηλεκτρικά όργανα μέτρησης και μερικές διαδικασίες χρησιμοποιούν κρίσιμη απόσβεση.



Εικόνα 1.24 Γραφική παράσταση κρίσιμης απόσβεσης.

3. Το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής του σφάλματος. Το κριτήριο αυτό ορίζει ότι η ολική επιφάνεια κάτω από την καμπύλη σφάλματος πρέπει να είναι ελάχιστη.



Εικόνα 1.25 Γραφική παράσταση ολοκληρώματος της απόλυτης τιμής του σφάλματος.

Το σφάλμα είναι η απόσταση μεταξύ του C_2 και της καμπύλης της ελεγχόμενης μεταβλητής. Το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής σφάλματος είναι η ολική σκιασμένη περιοχή στην καμπύλη. Αυτό το κριτήριο είναι εύκολο να χρησιμοποιηθεί όταν χρησιμοποιείται μαθηματικό μοντέλο για να αξιολογήσει ένα σύστημα ελέγχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΥΠΟΙ ΕΛΕΓΚΤΩΝ

2.1 Κατηγοριοποιήσεις των συστημάτων ελέγχου

Τα συστήματα ελέγχου κατηγοριοποιούνται με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους.

Κατηγοριοποιούνται σε ανοικτού ή κλειστού βρόγχου ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν ανάδραση, σε αναλογικά ή ψηφιακά ανάλογα με την φύση του συστήματος, σε διακριτά ή συνεχή, σε συστήματα σταθεροποίησης ή follow up ανάλογα αν το σημείο ρύθμισης είναι σταθερό ή όχι. Κατηγοριοποιούνται επίσης σε συστήματα ελέγχου διαδικασιών ή συστήματα ελέγχου μηχανών και ανάλογα με τη βιομηχανία που χρησιμοποιούνται σε επεξεργασία ή κατασκευή διακριτών μερών. Η επεξεργασία αναφέρεται σε βιομηχανίες που παράγουν προϊόντα όπως φαγητό, πετρέλαιο, χημικές ουσίες και ηλεκτρική ενέργεια. Η κατασκευή διακριτών μερών αναφέρεται σε βιομηχανίες που κατασκευάζουν και συναρμολογούν προϊόντα όπως αυτοκίνητα, αεροπλάνα, ηλεκτρικές συσκευές και υπολογιστές. Κατηγοριοποιούνται έπειτα σε συνεχή ή διακριτά ανάλογα με την ροή των προϊόντων από την διαδικασία, συνεχής ή διακοπτόμενη και περιοδική. Τέλος, κατηγοριοποιούνται ως κεντροποιημένα ή κατανεμημένα ανάλογα με το που βρίσκονται οι ελεγκτές, σε ένα κεντρικό δωμάτιο ελέγχου ή κοντά στους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές. Περαιτέρω κατηγορίες περιλαμβάνουν σερβομηχανισμούς, αριθμητικού ελέγχου, ρομποτικής, ελέγχου ομάδας, ακολουθιακού ελέγχου, ελέγχου ακολουθίας χρόνου, ελέγχου ακολουθίας γεγονότων και προγραμματιζόμενων ελεγκτών. Αυτές οι γενικές κατηγορίες συνοψίζονται παρακάτω.

Κατηγοριοποιήσεις συστημάτων ελέγχου:

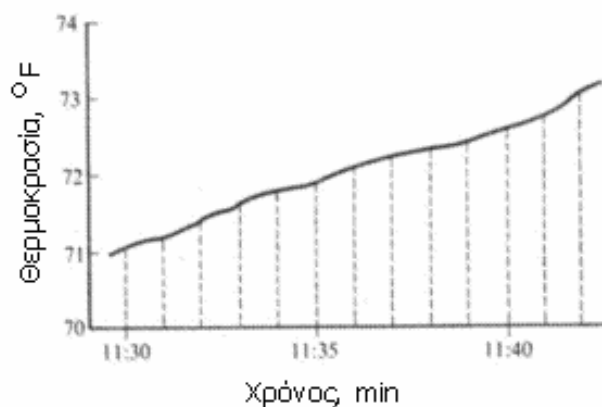
1. *Ανάδραση*
 - a. Χωρίς ανάδραση – ανοικτού βρόγχου
 - b. Με ανάδραση – κλειστού βρόγχου
2. *Τύπος σήματος*
 - a. Συνεχές – αναλογικό
 - b. Διακριτό – ψηφιακό
3. *Σημείο ρύθμισης*
 - a. Σπάνια μεταβολή – σύστημα σταθεροποίησης
 - b. Συχνή μεταβολή – σύστημα follow-up
4. *Βιομηχανία*
 - a. Επεξεργασία – έλεγχος διαδικασίας
 - (1) Συνεχές σύστημα
 - (2) Μεταβαλλόμενο σύστημα
 - b. Κατασκευή διακριτών μερών – έλεγχος μηχανών
 - (1) Σύστημα αριθμητικού ελέγχου
 - (2) Σύστημα ρομποτικού ελέγχου
5. *Τοποθεσία των ελεγκτών*

- a. Κεντρικό δωμάτιο ελέγχου – κεντρικοποιημένος έλεγχος
 - b. Κοντά στους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές – κατανεμημένος έλεγχος
6. Άλλες κατηγορίες
- a. Σερβομηχανισμοί
 - b. Ακολουθιακός έλεγχος
 - (1) Έλεγχος ακολουθίας γεγονότων
 - (2) Έλεγχος ακολουθίας χρόνου
 - c. Προγραμματιζόμενοι ελεγκτές

2.2 Αναλογικός και ψηφιακός έλεγχος

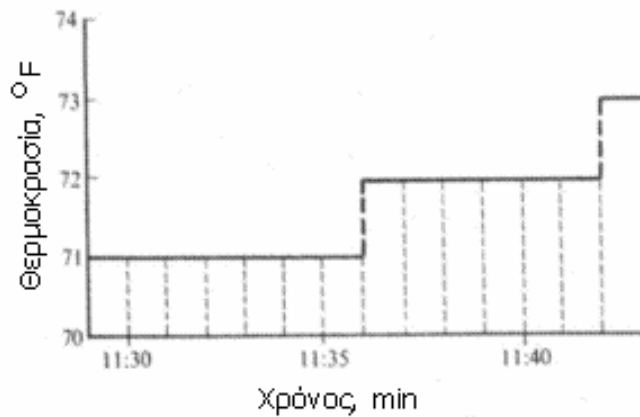
Τα σήματα σε ένα σύστημα ελέγχου χωρίζονται σε δύο γενικές κατηγορίες: τα αναλογικά και τα ψηφιακά.

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).



Εικόνα 2.1 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.



Εικόνα 2.2 Ψηφιακό σήμα εξωτερικής θερμοκρασίας αέρα.

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

2.3 Συστήματα σταθεροποίησης και follow-up

Τα συστήματα ελέγχου κατηγοριοποιούνται σε συστήματα σταθεροποίησης ή follow-up ανάλογα με το πώς χρησιμοποιούνται. Ένα σύστημα σταθεροποίησης είναι ένα σύστημα ελέγχου ανάδρασης στο οποίο το σημείο ρύθμισης σπάνια αλλάζει και η κύρια λειτουργία του είναι να διατηρεί την ελεγχόμενη μεταβλητή σταθερή παρά τις όποιες ανεπιθύμητες αλλαγές φορτίου. Ένα οικιακό σύστημα θέρμανσης, ένας σταθεροποιητής πίεσης και ένας σταθεροποιητής τάσης είναι συνήθη παραδείγματα συστημάτων σταθεροποίησης. Πολλά συστήματα ελέγχου διαδικασιών χρησιμοποιούνται για να διατηρήσουν σταθερές τις συνθήκες επεξεργασίας και επομένως είναι συστήματα σταθεροποίησης.

Ένα σύστημα follow-up είναι ένα σύστημα ελέγχου ανάδρασης στο οποίο το σημείο ρύθμισης αλλάζει συχνά. Η κύρια λειτουργία του είναι να κρατά την ελεγχόμενη μεταβλητή σε κοντινή αντιστοιχία με το σημείο ρύθμισης ενώ αυτό αλλάζει. Σε ένα σύστημα follow-up το σημείο ρύθμισης ονομάζεται συχνά μεταβλητή αναφοράς. Ένα σύστημα ελέγχου αναλογίας και η θέση της κεραίας ενός συστήματος εντοπισμού ραντάρ είναι παραδείγματα συστημάτων follow-up. Πολλοί σερβομηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για να διατηρήσουν μια μεταβλητή θέσης σε κοντινή αντιστοιχία με ένα σήμα εισόδου αναφοράς είναι συστήματα follow-up.

2.4 Έλεγχος διαδικασίας

Ο **έλεγχος διαδικασίας** εμπλέκει την ρύθμιση των μεταβλητών σε μια διαδικασία. Σε αυτό το θέμα, μια διαδικασία είναι οποιοσδήποτε συνδυασμός υλικών και εξοπλισμού που παράγει ένα επιθυμητό αποτέλεσμα μέσα από αλλαγές στην ενέργεια ή τις φυσικές και χημικές ιδιότητες. Μια συνεχής διαδικασία παράγει μια αδιάκοπη ροή ενός προϊόντος για μια εκτεταμένη χρονική περίοδο. Αντίθετα μια διαδικασία ομάδας, έχει μια διακοπτόμενη και περιοδική ροή προϊόντος. Παραδείγματα διαδικασιών περιλαμβάνουν μια γαλακτοκομική μονάδα, ένα διυλιστήριο πετρελαίου, ένα εργοστάσιο λιπάσματος, μια μονάδα επεξεργασίας τροφής, ένα εργοστάσιο ζαχαρωτών, μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ένα οικιακό σύστημα θέρμανσης. Οι συνηθέστερα ελεγχόμενες μεταβλητές σε μια διαδικασία είναι η θερμοκρασία, η πίεση, ο ρυθμός ροής και η στάθμη καθώς επίσης και η πυκνότητα, η σύσταση, το χρώμα, η αγωγιμότητα, το pH και η σκληρότητα. Τα περισσότερα συστήματα ελέγχου διαδικασίας διατηρούν σταθερές κάποιες συνθήκες επεξεργασίας και επομένως είναι συστήματα σταθεροποίησης.

Τα συστήματα ελέγχου διαδικασίας μπορεί να είναι ανοικτού ή κλειστού βρόγχου, με αυτά του κλειστού βρόγχου να είναι συνηθέστερα. Η βιομηχανία ελέγχου διαδικασιών έχει αναπτύξει πρότυπους και ευέλικτους ελεγκτές διαδικασιών για συστήματα κλειστού βρόγχου. Στο πέρασμα του χρόνου αυτοί οι ελεγκτές έχουν εξελιχθεί από πνευματικούς αναλογικούς ελεγκτές σε ηλεκτρονικούς αναλογικούς ελεγκτές και από αυτούς σε ψηφιακούς ελεγκτές βασισμένους σε μικροεπεξεργαστή (μικροελεγκτές). Η κινητήριος δύναμη σε αυτή την εξέλιξη ήταν οι αυξημένες δυνατότητες και η ευελιξία, ειδικά στους μικροελεγκτές, που αξιοποίησαν την ισχύ των μικροεπεξεργαστών.

Οι περισσότεροι ελεγκτές διαδικασιών μοιράζονται έναν αριθμό κοινών λειτουργιών. Καταδεικνύουν την τιμή του ρυθμιζόμενου σημείου, την μεταβλητή διαδικασίας και την έξοδο του ελεγκτή σε αναλογική ή ψηφιακή ένδειξη. Επιτρέπουν στον χειριστή να μεταβάλει το σημείο ρύθμισης και να επιλέξει ανάμεσα σε αυτόματο ή χειροκίνητο έλεγχο. Όταν επιλεγεί ο χειροκίνητος έλεγχος, επιτρέπουν στον χειριστή να ρυθμίσει την έξοδο του ελεγκτή να τροποποιήσει την χειριζόμενη μεταβλητή σε μια κατάσταση ελέγχου ανοικτού βρόγχου. Επιτρέπουν επίσης στον χειριστή να ρυθμίσει τις μεθόδους ελέγχου προκειμένου να "συντονίσει τον ελεγκτή" για μέγιστη απόκριση. Πολλοί ελεγκτές παρέχουν τη δυνατότητα για απομακρυσμένη ρύθμιση του σημείου ρύθμισης από ένα εξωτερικό σήμα, όπως για παράδειγμα η έξοδος ενός άλλου ελεγκτή. Ένας διακόπτης είναι αυτός που επιτρέπει στον χειριστή να μεταβεί από την μια κατάσταση ρύθμισης στην άλλη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Μια συνεχής διαδικασία έχει αδιάκοπες εισόδους και εξόδους. Η τιμή τουλάχιστον μιας εισόδου αλλάζει με τέτοιο τρόπο που τείνει να διατηρεί την ελεγχόμενη μεταβλητή σταθερή στο σημείο ρύθμισης. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός ελεγκτή είναι ο τρόπος που χρησιμοποιεί το σφάλμα για να δημιουργήσει την ενέργεια ελέγχου. Οι διαφορετικοί τρόποι που ο ελεγκτής δημιουργεί την ενέργεια ελέγχου ονομάζονται **μέθοδοι ελέγχου (modes of control)**. Η έξοδος ενός ελεγκτή συνεχούς διαδικασίας καθορίζεται από μία ή περισσότερες μεθόδους ελέγχου. Οι συνήθεις μέθοδοι ελέγχου περιλαμβάνουν (1) την μέθοδο ελέγχου δύο θέσεων, (2) την κινητή μέθοδο ελέγχου, (3) την αναλογική μέθοδο ελέγχου, (4) την μέθοδο ελέγχου ολοκληρώματος και (5) την διαφορική μέθοδο ελέγχου.

Οι ελεγκτές συνεχών διαδικασιών μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: (1) σε αυτούς που το σημείο ρύθμισης είναι σταθερό για μεγάλο χρονικό διάστημα και (2) σε αυτούς που το σημείο ρύθμισης αλλάζει συνεχώς. Τα συστήματα ελέγχου της πρώτης κατηγορίας ονομάζονται σταθεροποιητές και της δεύτερης σερβοσυστήματα. Παρόλα αυτά οι μέθοδοι ανάλυσης και σχεδίασης συστημάτων ελέγχου δουλεύουν εξίσου καλά σε συστήματα και των δυο κατηγοριών.

3.2 Μέθοδοι ελέγχου

Τα στοιχεία λογικού ελέγχου σχεδιάζονται για να ενεργήσουν στο σήμα (σφάλματος) ενεργοποίησης για να παραγάγουν το σήμα ελέγχου. Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται για αυτόν το λόγο είναι ο νόμος ελέγχου ή η ενέργεια ελέγχου. Ένα μη μηδενικό σήμα σφάλματος προκύπτει είτε από μια αλλαγή στην εντολή είτε από μια διαταραχή. Ο γενικός ρόλος του ελεγκτή είναι να κρατήσει την ελεγχόμενη μεταβλητή κοντά στην επιθυμητή της τιμή όταν αυτή εμφανίζεται. Πιο συγκεκριμένα, οι στόχοι ελέγχου μπορούν να δηλωθούν ως εξής:

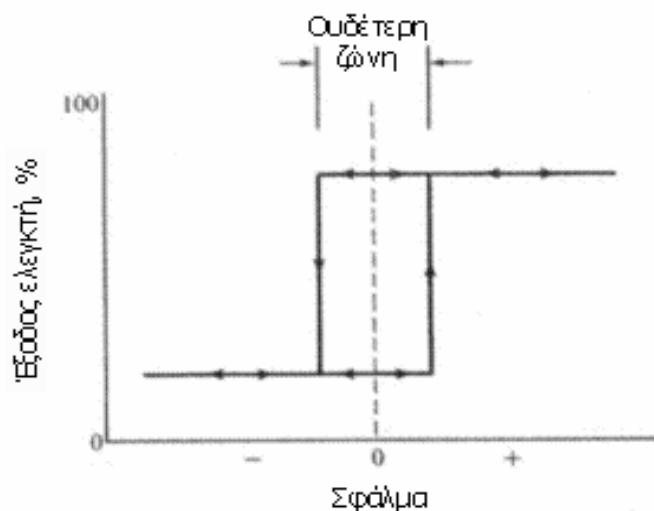
- 1 Ελαχιστοποίηση του σφάλματος σταθερής κατάστασης.
- 2 Ελαχιστοποίηση του χρόνου διευθέτησης.
- 3 Ικανοποίηση άλλων παροδικών προδιαγραφών, όπως η ελαχιστοποίηση της μέγιστης υπέρβασης.

Από πρακτικής άποψης, οι προδιαγραφές σχεδίασης για ένα ελεγκτή είναι πιο λεπτομερές. Παραδείγματος χάριν, το εύρος ζώνης πρέπει επίσης να διευκρινιστεί μαζί με ένα περιθώριο ασφάλειας για τη σταθερότητα. Δεν ξέρουμε ποτέ με βεβαιότητα τις αληθινές αριθμητικές τιμές των παραμέτρων του συστήματος, επομένως κάποια σχέδια ελεγκτών μπορούν να είναι πιο ευαίσθητα σε τέτοιες αβεβαιότητες παραμέτρου από κάποια άλλα σχέδια.

Οι ακόλουθοι δύο νόμοι ελέγχου αποτελούν τη βάση πολλών συστημάτων ελέγχου.

3.2.1 Μέθοδος ελέγχου δύο θέσεων

Η μέθοδος ελέγχου δύο θέσεων (**two-position control mode**) είναι η απλούστερη και λιγότερο δαπανηρή μέθοδος ελέγχου. Η έξοδος του ελεγκτή έχει μόνο δύο πιθανές τιμές, ανάλογα με το πρόσημο του λάθους. Αν οι δύο θέσεις είναι πλήρως ανοικτό και πλήρως κλειστό, ο ελεγκτής ονομάζεται "ελεγκτής on-off". Οι περισσότεροι ελεγκτές δύο σημείων έχουν μια ουδέτερη ζώνη για να αποτρέψουν την άσκοπη λειτουργία. Η ουδέτερη ζώνη είναι ένα εύρος τιμών κοντά στο 0 όπου δεν εκτελείται καμία ενέργεια ελέγχου. Το σφάλμα πρέπει να περάσει από αυτή την ουδέτερη ζώνη πριν οποιαδήποτε ενέργεια ελέγχου αρχίσει να εκτελείται.



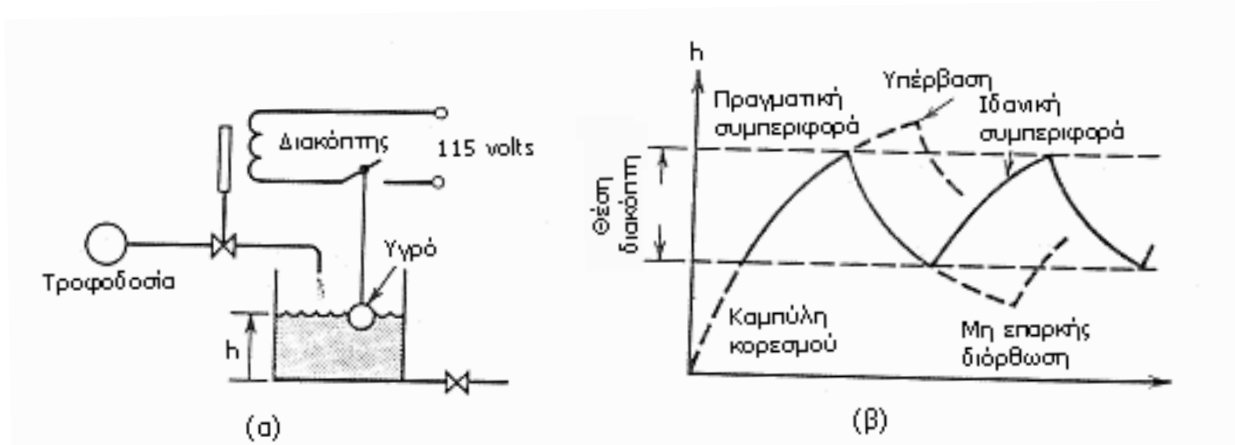
Εικόνα 3.1 Καμπύλη εισόδου/ εξόδου ενός ελεγκτή δύο θέσεων.

Η μέθοδος ελέγχου δύο θέσεων παρέχει παλμούς ενέργειας στην διαδικασία, οι οποίοι προκαλούν μια επαναλαμβανόμενη κίνηση στην ελεγχόμενη μεταβλητή. Το πλάτος της κυκλικής αυτής κίνησης εξαρτάται από τρεις παράγοντες: (1) την χωρητικότητα της διαδικασίας, (2) την υστέρηση νεκρού χρόνου της διαδικασίας και (3) το μέγεθος της αλλαγής φορτίου που είναι ικανή να χειριστεί η διαδικασία. Το πλάτος της ταλάντωσης μειώνεται είτε αυξάνοντας την χωρητικότητα, είτε μειώνοντας την υστέρηση νεκρού χρόνου, είτε μειώνοντας το μέγεθος της αλλαγής φορτίου που μπορεί να διαχειριστεί η διαδικασία. Ο έλεγχος δύο θέσεων είναι κατάλληλος για διαδικασίες που έχουν αρκετά μεγάλη χωρητικότητα για να αντικρούσουν την συνδυασμένη επίδραση της υστέρησης νεκρού χρόνου και της δυνατότητας αλλαγής του φορτίου της διαδικασίας. Ο έλεγχος δύο θέσεων είναι απλός και φτηνός. Η χρήση του προτιμάται όπου η επαναλαμβανόμενη κίνηση μπορεί να μειωθεί σε ανεκτό βαθμό.

Ένα παράδειγμα μιας εφαρμογής ενός on-off ελεγκτή είναι ένα σύστημα επιπέδου υγρού που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2α. Η χρονική απόκριση φαίνεται στην εικόνα 3.2β και απεικονίζεται με τη σκούρα γραμμή για ένα ιδανικό σύστημα στο οποίο η βαλβίδα ελέγχου ενεργεί στιγμιαία. Η ελεγχόμενη μεταβλητή παλινδρομεί με ένα πλάτος που εξαρτάται από το πλάτος της ουδέτερης ζώνης. Αυτή η ζώνη αποτρέπει το συνεχές άνοιγμα και κλείσιμο το οποίο μπορεί να μικρύνει τον χρόνο ζωής της συσκευής. Η κυκλική συχνότητα εξαρτάται επίσης από την χρονική σταθερά της ελεγχόμενης διαδικασίας και του μεγέθους του σήματος ελέγχου.

Σε ένα πραγματικό σύστημα, σε αντιδιαστολή με το ιδανικό, ο αισθητήρας και η βαλβίδα ελέγχου δεν θα αποκρίθουν στιγμιαία, αλλά θα έχουν τις χρονικές σταθερές τους. Η βαλβίδα δεν θα κλείσει τη στιγμή που το ύψος θα φθάσει στο επιθυμητό επίπεδο, αλλά θα υπάρξει κάποια καθυστέρηση κατά τη

διάρκεια της οποίας η ροή συνεχίζεται στη δεξαμενή. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται από τη διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 3.2β. Το αντίθετο εμφανίζεται όταν ανοίγεται η βαλβίδα. Αυτή η ανεπιθύμητη επίδραση μπορεί να μειωθεί με τη μείωση της ουδέτερης ζώνης, αλλά αυξάνεται η συχνότητα εάν γίνεται αυτό.



Εικόνα 3.2 (α) Έλεγχος στάθμης υγρού με έναν on – off ελεγκτή. (β) Χρονική απόκριση.

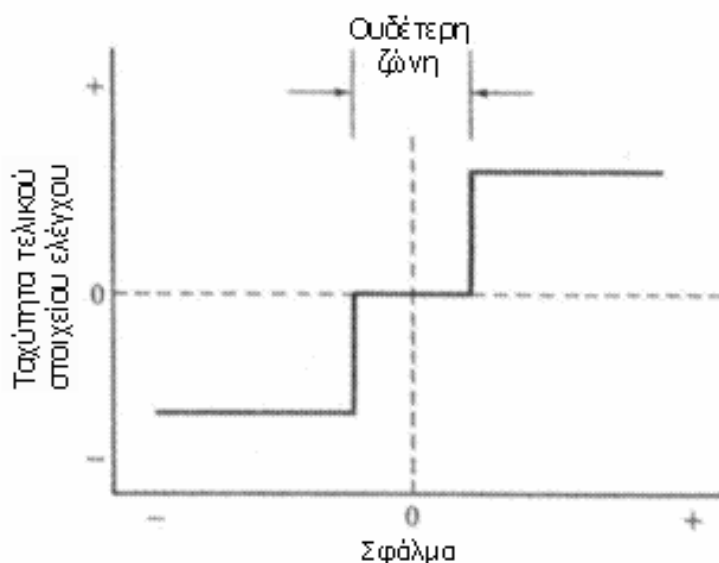
Η υπέρβαση και μη επαρκής διόρθωση στον on-off έλεγχο είναι αποδεκτά μόνο όταν η σταθερά χρόνου της διαδικασίας είναι μεγάλη σε σχέση με την χρονική καθυστέρηση των στοιχείων ελέγχου. Αυτή η καθυστέρηση σχετίζεται με τις χρονικές σταθερές των στοιχείων καθώς επίσης και με την απόστασή τους από τις εγκαταστάσεις. Εάν η βαλβίδα ελέγχου στο σχήμα 3.2α είναι μακριά προς τα πάνω από τη δεξαμενή, μια σημαντική καθυστέρηση μπορεί να υπάρξει μεταξύ του χρόνου της δράσης ελέγχου και της επίδρασής της στις εγκαταστάσεις. Μια άλλη πηγή χρονικής καθυστέρησης είναι η ικανότητα του ίδιου του ελεγκτή.

Ένα οικιακό σύστημα θέρμανσης είναι ένα άλλο παράδειγμα ενός συστήματος ελέγχου δύο θέσεων. Ο αέρας στο σπίτι έχει μια σχετικά μεγάλη θερμική χωρητικότητα και ο νεκρός χρόνος υστέρησης είναι μικρός. Ο ρυθμός εισαγωγής θερμότητας από τον λέβητα είναι ικανός να θερμάνει το σπίτι στην χειρότερη μέρα του χειμώνα, και είναι μικρός σε σύγκριση με την χωρητικότητα του δωματίου. Η θερμότητα του δωματίου ταλαντώνεται σε ένα πλάτος που είναι αρκετά ανεκτό για τα όρια της ανθρώπινης άνεσης. Αυτό είναι ένα καλό παράδειγμα της μεθόδου ελέγχου δύο σημείων. Οι δύο θέσεις παρέχουν εισόδους ίσες με το μέγιστο και το ελάχιστο φορτίο της διαδικασίας (από καθόλου θερμότητα μέχρι θερμότητα ικανή για την πιο κρύα ημέρα). Μια κακή σχεδίαση είναι αυτή που χρησιμοποιεί έναν λέβητα 10 φορές μεγαλύτερο από ότι χρειάζεται. Ο μεγάλος ρυθμός εισόδου θερμότητας από έναν υπερμεγέθη λέβητα έχει ως αποτέλεσμα μεγάλο πλάτος ταλάντωσης.

Η μέθοδος ελέγχου δύο σημείων χρησιμοποιείται σε διαδικασίες με χωρητικότητα αρκετά μεγάλη ώστε να μειωθεί η ταλάντωση σε έναν ανεκτό βαθμό. Αυτό προϋποθέτει μια διαδικασία με μεγάλη χωρητικότητα, μικρό νεκρό χρόνο υστέρησης και μικρές αλλαγές φορτίου.

3.2.2 Κινητή μέθοδος ελέγχου

Η **κινητή μέθοδος ελέγχου (floating control mode)** είναι μια ειδική εφαρμογή της μεθόδου δύο σημείων στην οποία το τελικό στοιχείο ελέγχου είναι στάσιμο όσο το σφάλμα παραμένει στην ουδέτερη ζώνη. Όταν το σφάλμα είναι εκτός της νεκρής ζώνης, το τελικό στοιχείο ελέγχου αλλάζει με έναν σταθερό ρυθμό σε μια κατεύθυνση που καθορίζεται από το πρόσημο του σφάλματος. Το τελικό στοιχείο ελέγχου συνεχίζει να αλλάζει, μέχρι το σφάλμα να επιστρέψει στην νεκρή ζώνη ή μέχρι το τελικό στοιχείο ελέγχου να φτάσει στις οριακές του θέσεις. Η καμπύλη εισόδου /εξόδου ενός ελεγκτή κινητής μεθόδου απεικονίζεται στην εικόνα 3.3.



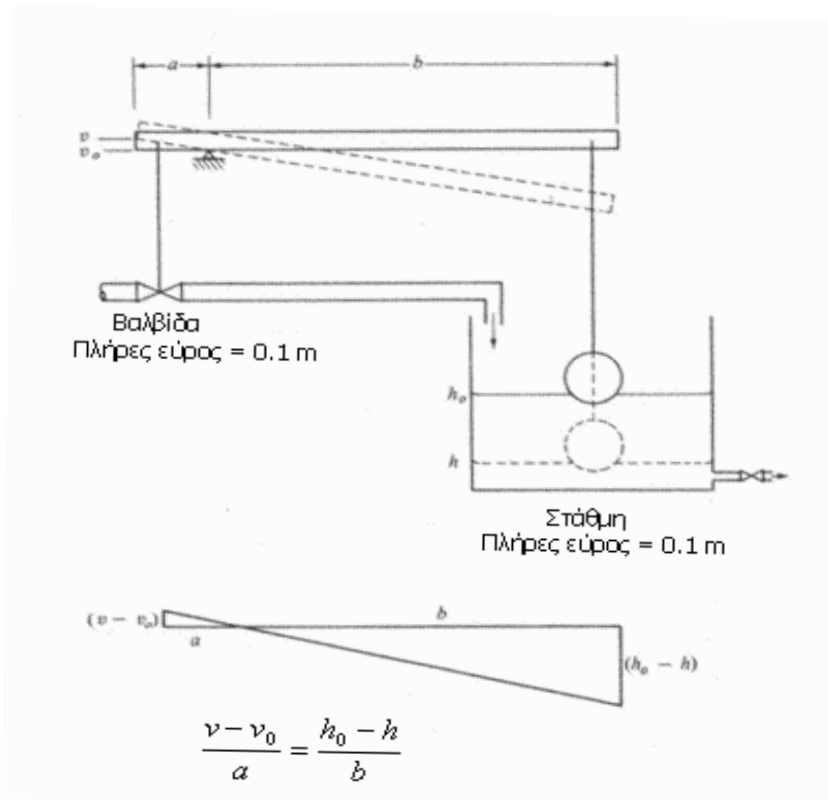
Εικόνα 3.3 Καμπύλη εισόδου/ εξόδου ενός ελεγκτή κινητής μεθόδου.

Η μέθοδος αυτή έχει την τάση να παρουσιάζει ταλάντωση στην ελεγχόμενη μεταβλητή. Το πλάτος της ταλάντωσης εξαρτάται από τον νεκρό χρόνο υστέρησης της διαδικασίας, την χωρητικότητα της διαδικασίας και την ταχύτητα με την οποία ο ελεγκτής αυξομειώνει το τελικό στοιχείο ελέγχου. Η ταχύτητα του τελικού στοιχείου ελέγχου καθορίζει την γρηγορότερη αλλαγή φορτίου με την οποία μπορεί να συγχρονιστεί ο ελεγκτής, αλλά όχι και το μέγεθος αυτής. Το κύριο πλεονέκτημα του κινητού ελέγχου είναι η ικανότητα του να χειρίζεται αλλαγές φορτίου ρυθμίζοντας σταδιακά το τελικό στοιχείο ελέγχου. Όπως και με τον έλεγχο δύο σημείων, το πλάτος μειώνεται αυξάνοντας την χωρητικότητα, μειώνοντας τον νεκρό χρόνο υστέρησης ή μειώνοντας την ταχύτητα του τελικού στοιχείου ελέγχου. Ο κινητός έλεγχος χρησιμοποιείται όταν προσμένονται μεγάλες αλλαγές φορτίου και η χωρητικότητα είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αντικρούσει την επίδραση του νεκρού χρόνου υστέρησης και την ταχύτητα του τελικού στοιχείου ελέγχου. Ο κινητός έλεγχος χρησιμοποιείται συχνά διότι είναι εγγενής στον τύπο του ενεργοποιητή που χρησιμοποιείται για να κατευθύνει το τελικό στοιχείο ελέγχου (για παράδειγμα ηλεκτρικά μοτέρ και υδραυλικοί κύλινδροι που λειτουργούν με ρελέ on-off ή σωληνοειδής βαλβίδες).

Η κινητή μέθοδος ελέγχου χρησιμοποιείται σε διαδικασίες με μεγάλες, αργά μεταβαλλόμενες αλλαγές φορτίου και με χωρητικότητα αρκετά μεγάλη ώστε να περιορίσει την ταλάντωση σε ανεκτό επίπεδο. Αυτό προϋποθέτει μια διαδικασία με μεγάλη χωρητικότητα και μικρό νεκρό χρόνο υστέρησης. Η κινητή μέθοδος ελέγχου είναι εγγενής σε μερικά τελικά στοιχεία ελέγχου.

3.2.3 Αναλογική μέθοδος ελέγχου, P

Η **αναλογική μέθοδος ελέγχου (proportional control mode)** παράγει μια αλλαγή στην έξοδο του ελεγκτή που είναι ανάλογη του σήματος σφάλματος. Υπάρχει μια σταθερή γραμμική σχέση μεταξύ της τιμής της ελεγχόμενης μεταβλητής και της θέσης του τελικού στοιχείου ελέγχου. Ένα απλό παράδειγμα ενός ελεγκτή αναλογικού ελέγχου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.4 Παράδειγμα ενός ελεγκτή αναλογικού ελέγχου.

Η ελεγχόμενη μεταβλητή είναι η στάθμη του υγρού στην δεξαμενή. Το φλοτέρ είναι το όργανο μέτρησης, η βαλβίδα είναι η χειριζόμενη μεταβλητή και ο μοχλός παρέχει την ενέργεια ελέγχου. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια διαφορετική θέση της βαλβίδας για κάθε στάθμη. Η επιθυμητή στάθμη είναι η h_0 και η θέση της βαλβίδας που ανταποκρίνεται στο h_0 είναι η v_0 (v_0 είναι η θέση της βαλβίδας όπου το σφάλμα είναι 0). Η θέση της βαλβίδας δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{v - v_0}{a} = \frac{h_0 - h}{b}$$

$$\text{Σήμα σφάλματος} = e = h_0 - h$$

$$v = \left(\frac{a}{b}\right)e + v_0$$

όπου: v = η θέση της βαλβίδας, (m)

v_0 = η θέση της βαλβίδας με μηδενικό σφάλμα, (m)

e = το σήμα σφάλματος, (m)

Η **ενίσχυση(P)** του ελεγκτή αναλογικού ελέγχου όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4 είναι η αλλαγή στην θέση της βαλβίδας, διαιρούμενη με την αντίστοιχη αλλαγή στην στάθμη. Και οι δύο αυτές αλλαγές εκφράζονται ως ποσοστά του πλήρους εύρους.

$$\text{Ποσοστό αλλαγής στην θέση της βαλβίδας} = \frac{100(v - v_0)}{0.1} = 1000(v - v_0)$$

$$\text{Ποσοστό αλλαγής στην στάθμη} = \frac{100(h_0 - h)}{1} = 100(h_0 - h)$$

$$\text{Ενίσχυση, P} = \frac{1000(v - v_0)}{100(h_0 - h)} = 10 \left(\frac{v - v_0}{h_0 - h} \right) = 10 \left(\frac{a}{b} \right)$$

Η εικόνα 3.5 περιλαμβάνει τις γραφικές παραστάσεις εισόδου/ εξόδου ελεγκτών αναλογικού ελέγχου με ενίσχυση 0.5, 1 και 2 αντίστοιχα.

Γενικά μια αύξηση στην ενίσχυση μειώνει το μέγεθος του σφάλματος που χρειάζεται για να παράγει μια αλλαγή 100% στην θέση της βαλβίδας. Με άλλα λόγια μια υψηλή ενίσχυση απαιτεί ένα μικρό σφάλμα για να παράγει την αλλαγή στην βαλβίδα που

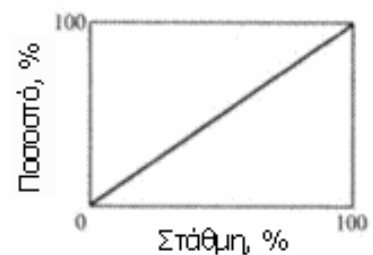
Πλήρες εύρος:
βαλβίδα = 0.1 m
επίπεδο βαλβίδας = 1 m

$$\text{Αναλογική ενίσχυση} = 10(a/b)$$

$$\text{Αναλογική ενίσχυση} = 1$$

$$b = 10a$$

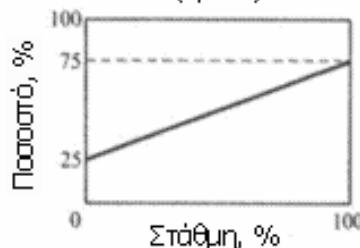
$$a = 10(a/10a) = 1$$



$$\text{Αναλογική ενίσχυση} = 0.5$$

$$b = 20a$$

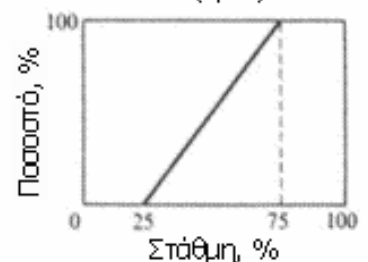
$$a = 10(a/20a) = 0.5$$



$$\text{Αναλογική ενίσχυση} = 2$$

$$b = 5a$$

$$a = 10(a/5a) = 2$$



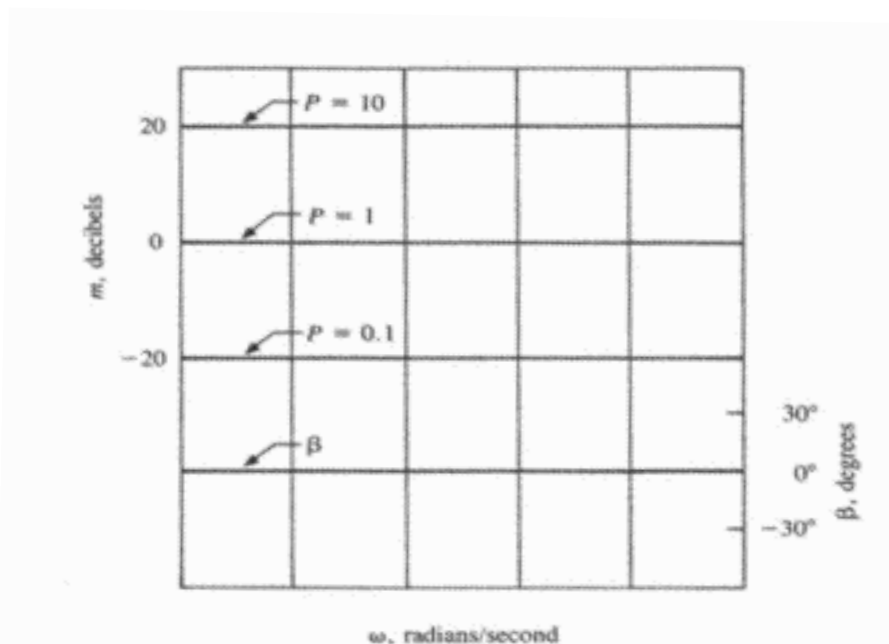
Εικόνα 3.5 Γραφικές παραστάσεις εισόδου/ εξόδου ελεγκτών αναλογικού ελέγχου με ενίσχυση 0.5, 1 και 2.

είναι απαραίτητο για να ισορροπήσει η διαδικασία. Παρόλο που αυτό φαινομενικά σημαίνει ότι η ενίσχυση θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη, δυστυχώς, αυξάνοντας την ενίσχυση αυξάνεται και η τάση της ταλάντωσης της ελεγχόμενης μεταβλητής. Επομένως είναι απαραίτητος ένας συμβιβασμός στον οποίο η ενίσχυση να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη χωρίς να παράγει ανεπιθύμητες ταλαντώσεις.

Ένα πρόβλημα με την μέθοδο αναλογικού ελέγχου είναι ότι δεν μπορεί να εξαλείψει ολοκληρωτικά το σφάλμα που προκύπτει από μια αλλαγή φορτίου. Ένα υπόλειμμα σφάλματος είναι πάντα αναγκαίο για να διατηρηθεί η βαλβίδα σε μια άλλη θέση εκτός της v_0 . Αυτό είναι προφανές στην εξίσωση $v = \left(\frac{a}{b}\right)e + v_0$, και είναι το ίδιο προφανές και στο απλό σύστημα που απεικονίζεται στην εικόνα

3.4. Αυτή η αλλαγή ή υπόλειμμα σφάλματος ονομάζεται αναλογική μετατόπιση. Το μέγεθος της μετατόπισης είναι ανάλογο του μεγέθους των αλλαγών φορτίου και αντιστρόφως ανάλογο της ενίσχυσης. Η αναλογική μέθοδος ελέγχου χρησιμοποιείται όταν η ενίσχυση μπορεί να γίνει αρκετά μεγάλη ώστε να μειώσει την αναλογική μετατόπιση σε ένα ανεκτό επίπεδο για την μέγιστη αναμενόμενη αλλαγή φορτίου.

Η απόκριση της αναλογικής μεθόδου ελέγχου είναι στιγμιαία. Δεν υπάρχει υστέρηση μεταξύ μιας αλλαγής στην στάθμη και μιας αντίστοιχης αλλαγής στην θέση της βαλβίδας. Το διάγραμμα Bode της εικόνας 3.6 είναι ένας άλλος τρόπος θέασης της απόκρισης της αναλογικής μεθόδου ελέγχου.



Εικόνα 3.6 Διάγραμμα Bode της αναλογικής μεθόδου ελέγχου για τιμές της ενίσχυσης 0.1, 1 και 10.

Παρατηρούμε ότι η φάση της γωνίας είναι 0^0 για όλες τις τιμές της συχνότητας. Η απουσία οποιασδήποτε υστέρησης φάσης είναι άλλη μια ένδειξη της απόκρισης της αναλογικής μεθόδου ελέγχου. Η ενίσχυση είναι επίσης σταθερή για όλες τις τιμές της συχνότητας, με το επίπεδο decibel να ορίζεται από την τιμή της ενίσχυσης P .

Η αναλογική μέθοδος ελέγχου χρησιμοποιείται σε διαδικασίες με μικρή χωρητικότητα και γρήγορες αλλαγές φορτίου, όταν η ενίσχυση μπορεί να γίνει αρκετά μεγάλη ώστε να μειώσει την μετατόπιση σε ένα ανεκτό επίπεδο. Αυτό προϋποθέτει μια διαδικασία με χωρητικότητα που είναι πολύ μικρή για να επιτρέψει ένα σύστημα ελέγχου δύο θέσεων ή μια κινητή μέθοδο ελέγχου.

ΑΝΑΛΟΓΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ P

Εξίσωση στο πεδίο του χρόνου

$$v = P_e + v_0$$

Εξίσωση στο πεδίο της συχνότητας

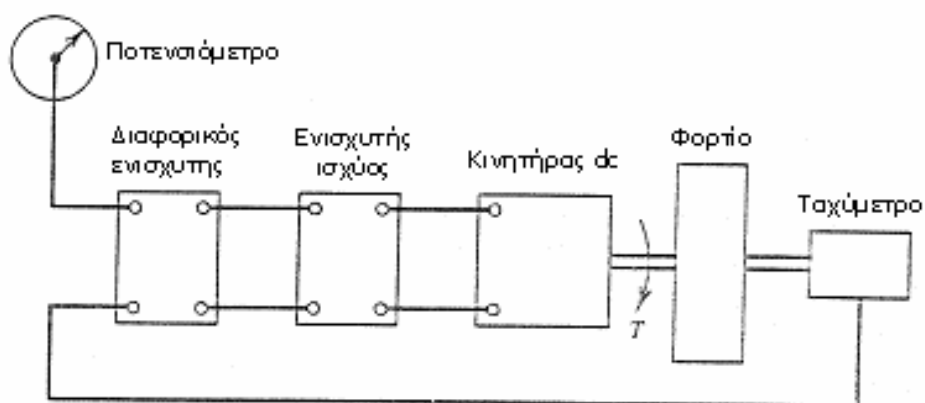
$$V = PE$$

Συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{V}{E} = P$$

3.2.3.1 Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος πρώτης τάξης

Για να ερευνήσουμε τη συμπεριφορά του αναλογικού ελέγχου, θεωρούμε το σύστημα ελέγχου ταχύτητας που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.7 και είναι το ίδιο με τον ελεγκτή θέσης που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.9 εκτός από το ότι ένα ταχύμετρο αντικαθιστά το ποτενσιόμετρο ανάδρασης.

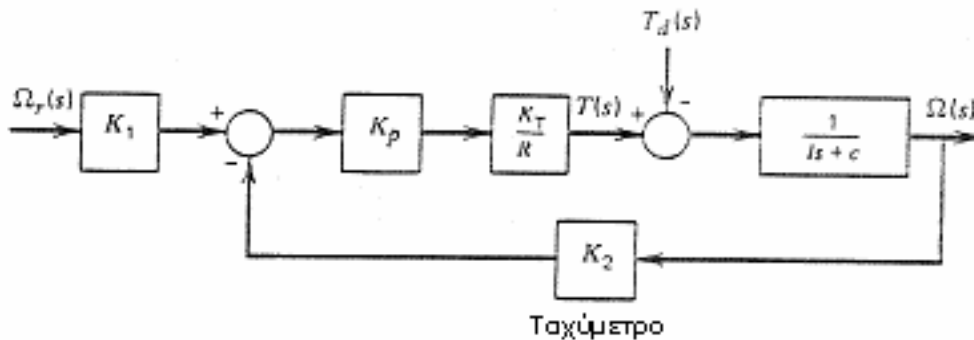


Εικόνα 3.7 Ταχύτητα ενός συστήματος ελέγχου που χρησιμοποιεί έναν κινητήρα dc.

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

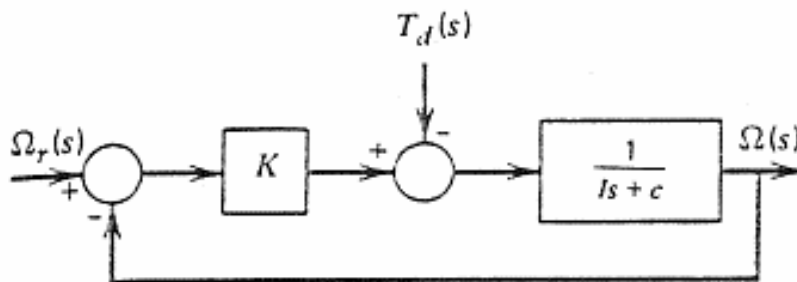
σε ένα, το K_p . Το σύστημα φαίνεται έτσι ότι έχει ανάλογο έλεγχο στον οποίο η τάση μηχανών είναι ανάλογη προς τη διαφορά μεταξύ της τάσης εντολής και της τάσης ανάδρασης από το ταχύμετρο.

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 3.8.



Εικόνα 3.8 Μπλοκ διάγραμμα της ταχύτητας του συστήματος ελέγχου της εικόνας 3.7.

Για ένα σημαντικό σήμα σφάλματος που παράγεται, το K_1 και το K_2 πρέπει να επιλεγτούν ώστε να είναι ίσα. Με αυτήν την απλοποίηση, το διάγραμμα γίνεται αυτό που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9, όπου $K = K_1 K_p K_T / R$.



Εικόνα 3.9 Απλοποίηση της εικόνας 3.7.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι:

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega_r(s)} = \frac{K}{Is + c + K}$$

$$\frac{\Omega(s)}{T_d(s)} = \frac{-1}{Is + c + K}$$

Μια αλλαγή στην επιθυμητή ταχύτητα μπορεί να προσομοιωθεί από μια εισαγωγή βημάτων καθώς η γραμμικότητα μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα μοναδιαίο βήμα και να χρησιμοποιήσουμε έπειτα μια κατάλληλη κλίμακα. Για $\Omega_r(s) = 1/s$,

$$\Omega(s) = \frac{K}{Is + c + K} \frac{1}{s}$$

Η απόκριση μπορεί να υπολογιστεί με τη μερική επέκταση κλάσματος όπως πριν. Η ταχύτητα πλησιάζει την τιμή σταθερής κατάστασης

$$\omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{K}{Is + c + K} \frac{1}{s} = \frac{K}{c + K} < 1$$

Κατά συνέπεια, η τελική τιμή είναι μικρότερη από την επιθυμητή τιμή του 1, αλλά μπορεί να είναι αρκετά κοντά εάν η απόσβεση c είναι μικρή. Ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει σε αυτήν την τιμή είναι κατά προσέγγιση τέσσερις χρονικές σταθερές, ή $4\tau = 4I(c + K)$.

Μια ξαφνική αλλαγή στη ροπή του φορτίου μπορεί επίσης να μοντελοποιηθεί από μια συνάρτηση μοναδιαίου βήματος $T_d(s) = 1/s$. Η απόκριση που οφείλεται απλώς στη διαταραχή βρίσκεται από την

εξίσωση
$$\frac{\Omega(s)}{T_d(s)} = \frac{-1}{Is + c + K}.$$

$$\Omega(s) = \frac{K}{Is + c + K} \frac{1}{s}$$

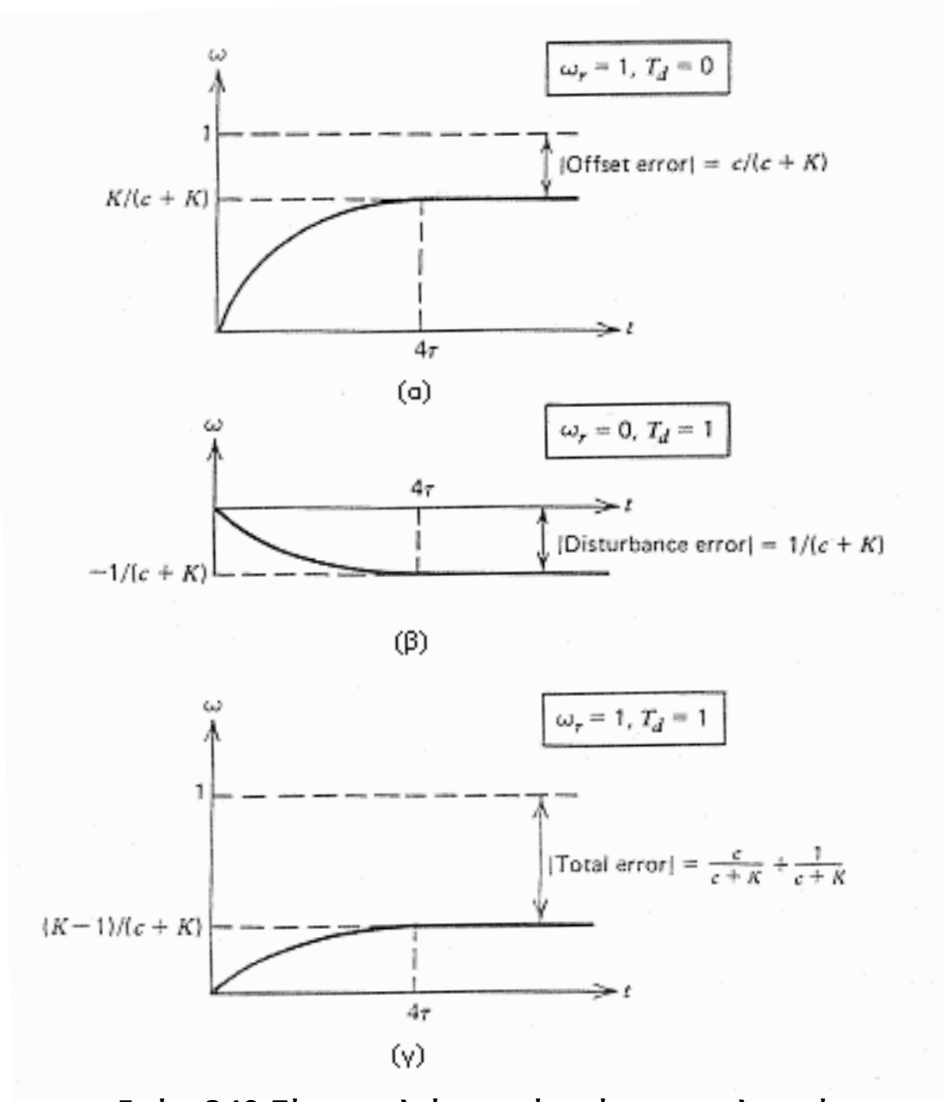
Η επίδραση σταθερής κατάστασης της διαταραχής βρίσκεται με το θεώρημα τελικής τιμής και είναι $-1/(c + K)$. Εάν το $(c + K)$ είναι μεγάλο, τότε το σφάλμα θα είναι μικρό.

Η απόδοση του ανάλογου κανόνα ελέγχου μπορεί ως εδώ να συνοψιστεί ως εξής. Για ένα σύστημα πρώτης τάξης του οποίου οι είσοδοι είναι βηματικές συναρτήσεις:

1. Η έξοδος δεν φθάνει ποτέ στην επιθυμητή της τιμή ακόμη και ελλείψει μιας διαταραχής εάν η αντίσταση είναι ($c \neq 0$), αν και μπορεί να προσεγγιστεί κατά πολύ με την επιλογή μιας αρκετά μεγάλης ενίσχυσης K . Αυτό είναι το σφάλμα μετατόπισης.
2. Η έξοδος πλησιάζει την τελική της τιμή χωρίς ταλάντωση. Ο χρόνος για να επιτευχθεί αυτή η τιμή είναι αντιστρόφως ανάλογος προς το K .
3. Το σφάλμα εξόδου λόγω της διαταραχής στην σταθερή κατάσταση είναι αντιστρόφως ανάλογο προς το ενίσχυση K . Αυτό το σφάλμα είναι παρόν ακόμη και ελλείψει της αντίστασης ($c = 0$).

Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζονται δύο τύποι σφαλμάτων κατάστασης που μπορεί να υπάρχουν σε αυτό το σύστημα. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται, επιθυμούμε η ταχύτητα να είναι $\omega = 1$. Κατά συνέπεια, $\Omega_p(s) = 1/s$. Στην εικόνα 3.10α δεν ενεργεί καμία διαταραχή και το σφάλμα μετατόπισης είναι όπως παρουσιάζεται. Στην εικόνα 3.10β, θέτουμε προσωρινά $\Omega_r(s) = 0$ για να δούμε την επίδραση της διαταραχής. Η ταχύτητα που φαίνεται είναι για μια διαταραχή μοναδιαίου βήματος $T_d(s) = 1/s$. Το σφάλμα σταθερής κατάστασης λόγω της διαταραχής είναι $-1/(c + K)$. Εάν και οι δύο είσοδοι ενεργούν ταυτόχρονα στο σύστημα, η πραγματική ταχύτητα συμπεριφέρεται όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11γ. Το συνολικό σφάλμα είναι το ποσό του σφάλματος μετατόπισης και του σφάλματος λόγω της διαταραχής.

Δεδομένου ότι το κέρδος K αυξάνεται, η χρονική σταθερά γίνεται μικρότερη και η απόκριση γρηγορότερη. Κατά συνέπεια, το κύριο μειονέκτημα του αναλογικού ελέγχου είναι ότι οδηγεί στα



Εικόνα 3.10 Τύποι σφαλμάτων σε ένα σύστημα αναλογικού ελέγχου πρώτης τάξης.

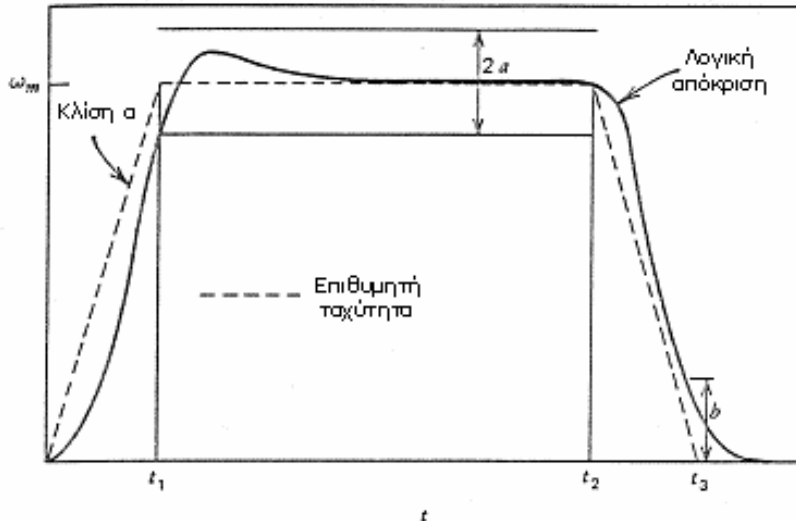
σφάλματα σταθερής κατάστασης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν μπορεί η ενίσχυση να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μειώσει την επίδραση της μεγαλύτερης αναμενόμενης διαταραχής. Δεδομένου ότι ο αναλογικός έλεγχος δίνει μηδενικό σφάλμα για μια μόνο κατάσταση φορτίου, ο χειριστής πρέπει να αλλάξει τη χειροκίνητη επανατοποθέτηση με το χέρι (ως εκ τούτου και το όνομα).

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

3.2.3.2 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.

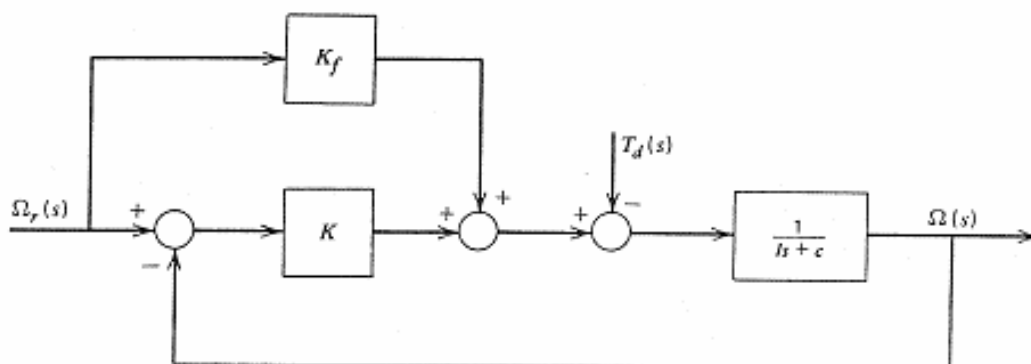


Εικόνα 3.11 Διάγραμμα της τυπικής επιθυμητής ταχύτητας ενός συστήματος.

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 3.12, η σχέση σφάλματος



Εικόνα 3.12 Μπλοκ διάγραμμα αφαίρεσης της αντιστάθμισης εισόδου.

μπορεί να βρεθεί από $E(s) = \frac{(1 - G_f G_m G_p H)R(s) + G_p HD(s)}{1 + G_a G_m G_p H}$ με $T_d(s) = 0$ και 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 είναι:

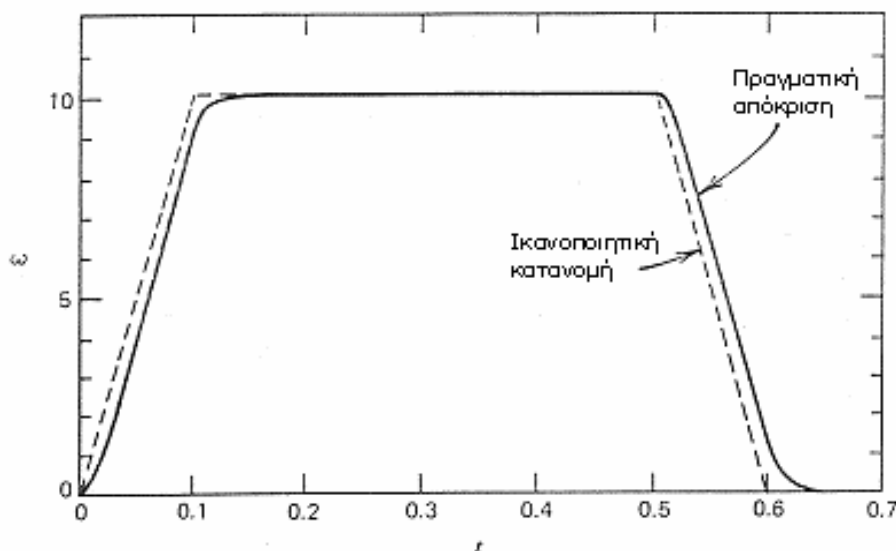
$$e_{ss} = \begin{cases} \infty, & K_f \neq c \\ \frac{aI}{c+K}, & K_f = c \end{cases}$$

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 .

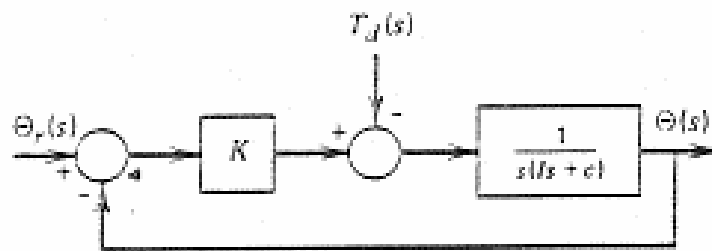
Σαν απεικόνιση, υποθέτουμε ότι $I = c = 1$, $a = 100$, $t_1 = 0.1$, $t_2 = 0.5$ και $t_3 = 0.6$. Εάν απαιτήσουμε ότι $a = b = 1$ και $\tau = 0.01$, τότε οι απαραίτητες ενισχύσεις θα είναι $K = 99$ και $K_f = 1$. Το επιθυμητό σχεδιάγραμμα ταχύτητας και η προκύπτουσα απόκριση παρουσιάζονται στο σχήμα 3.13, από το οποίο φαίνεται ότι οι προδιαγραφές έχουν ικανοποιηθεί.



Εικόνα 3.13 Διάγραμμα σύγκρισης της επιθυμητής ταχύτητας με την πραγματική απόκριση ενός ελεγκτή.

3.2.3.3 Αναλογικός έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης

Ο αναλογικός έλεγχος μιας ουδέτερης σταθερής εγκατάστασης δευτέρου βαθμού αντιπροσωπεύεται από τον ελεγκτή θέσης στο σχήμα 3.14 εάν η συνάρτηση μεταφοράς του ενισχυτή είναι μια σταθερά $G_d(s) = K_d$. Ας υποθέσουμε ότι η συνάρτηση μεταφοράς του κινητήρα είναι $G_m(s) = K_T/R$ όπως προηγουμένως. Το τροποποιημένο μπλοκ διάγραμμα δίνεται στο σχήμα 3.14, με $K = K_1 K_d K_T/R$.



Εικόνα 3.14 Μπλοκ διάγραμμα ενός σερβομηχανισμού θέσης με αναλογικό έλεγχο.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι:

$$\frac{\Theta(s)}{\Theta_r(s)} = \frac{K}{Is^2 + cs + K}$$

$$\frac{\Theta(s)}{T_d(s)} = \frac{-1}{Is^2 + cs + K}$$

Το σύστημα κλειστού βρόγχου είναι σταθερό εάν το I , το c , και το K είναι θετικά. Για καμία απόσβεση ($c = 0$), το σύστημα κλειστού βρόγχου είναι φυσικά σταθερό.

Χωρίς τη διαταραχή και με μια εντολή μοναδιαίου βήματος, $\Theta_r(s) = 1/s$, η έξοδος σταθερής κατάστασης είναι:

$$\theta_{ss} = \frac{K}{K} = 1$$

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 3.14).

Η μεταβατική αυτή συμπεριφορά υποδεικνύεται από την αναλογία απόσβεσης:

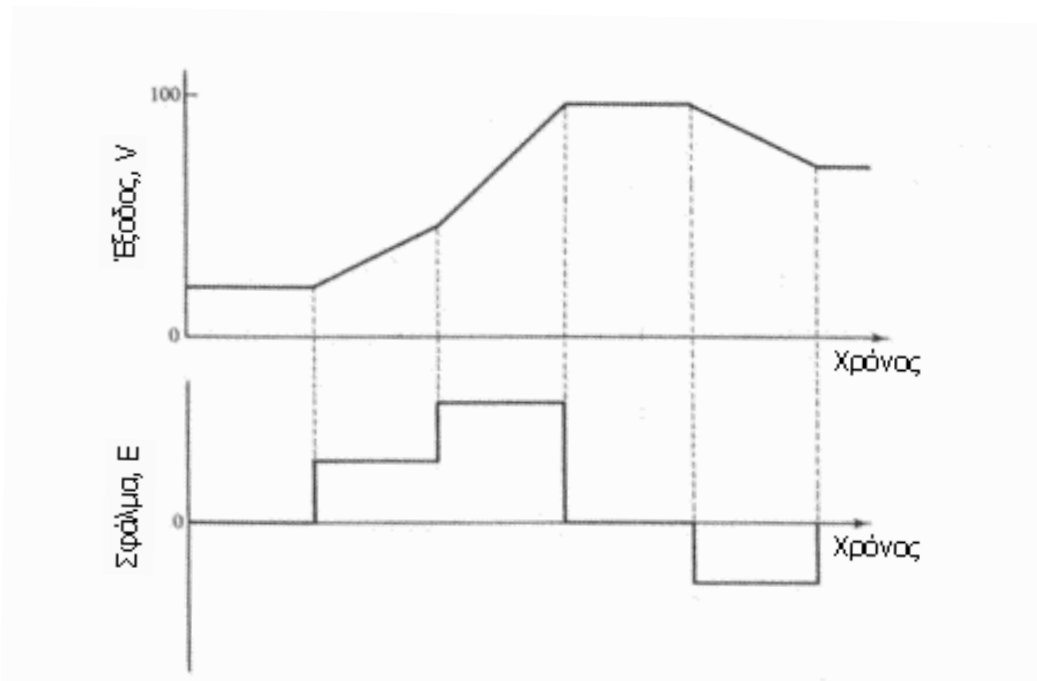
$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{IK}}$$

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.

3.2.4 Μέθοδος ελέγχου ολοκληρώματος, I

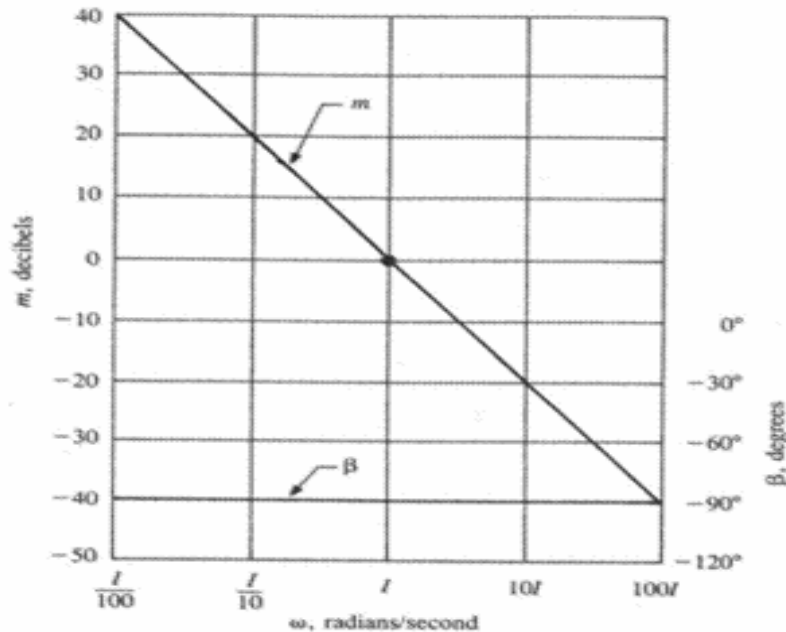
Η **μέθοδος ελέγχου ολοκληρώματος (integral control mode)** αλλάζει την έξοδο του ελεγκτή κατά ένα ποσό ανάλογο του ολοκληρώματος του σήματος σφάλματος. Όσο υπάρχει σφάλμα, η μέθοδος ελέγχου ολοκληρώματος θα αλλάζει την έξοδο με ρυθμό ανάλογο του μεγέθους του σφάλματος.



Εικόνα 3.15 Γραφική παράσταση της σχέσης του σήματος σφάλματος σήματος και της εξόδου του ελεγκτή.

Η εικόνα 3.15 απεικονίζει την σχέση ανάμεσα στο σήμα σφάλματος και την έξοδο του ελεγκτή. Παρατηρούμε ότι ο ρυθμός αλλαγής της εξόδου του ελεγκτή είναι ανάλογος του σήματος σφάλματος (ο ρυθμός αλλαγής είναι ίσος με την κλίση της γραφικής παράστασης).

Το διάγραμμα bode της μεθόδου ελέγχου ολοκληρώματος παρουσιάζεται στην εικόνα 3.16.



Εικόνα 3.16 Διάγραμμα Bode της μεθόδου ελέγχου ολοκληρώματος.

Η ενίσχυση μειώνεται με ρυθμό 20 dB ανά αύξηση δεκάδας στην συχνότητα και περνάει από τα 0 dB σε γωνιακή συχνότητα ίση με I, όπου I είναι ο ρυθμός ενεργειών του ολοκληρώματος. Η φάση της γωνίας είναι στις -90° για όλες τις τιμές της συχνότητας. Η μέθοδος ελέγχου ολοκληρώματος χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα με την αναλογική μέθοδο ελέγχου.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑΤΟΣ Ι

Εξίσωση στο πεδίο του χρόνου

$$v = 1 \int_0^1 e dt + v_0$$

Εξίσωση στο πεδίο της συχνότητας

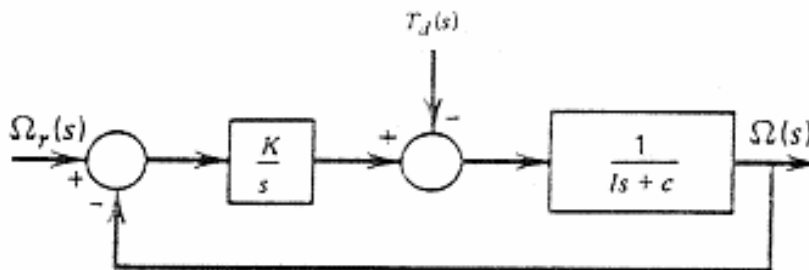
$$V = \left(\frac{1}{s} \right) E$$

Συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{V}{E} = \frac{1}{s}$$

3.2.4.1 Έλεγχος ολοκληρώματος ενός συστήματος πρώτης τάξης

Ο έλεγχος ολοκληρώματος της ταχύτητας στο σύστημα του σχήματος 3.7 παρουσιάζεται στο μπλοκ διάγραμμα στο σχήμα 3.17, όπου $K = K_1 K_I K_T / R$.



Εικόνα 3.17 Μπλοκ διάγραμμα της ταχύτητας ενός συστήματος με έλεγχο ολοκληρώματος.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς του κλειστού βρόγχου είναι:

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega_r(s)} = \frac{K}{Is^2 + cs + K}$$

$$\frac{\Omega(s)}{T_d(s)} = \frac{-s}{Is^2 + cs + K}$$

Το σύστημα ελέγχου είναι σταθερό για I , c και K θετικά. Για μια είσοδο μοναδιαίας βηματικής εντολής, το $\omega_{ss} = K/K = 1$, ώστε το σφάλμα μετατόπισης να είναι μηδέν. Για μια διαταραχή μοναδιαίου βήματος η απόκλιση σταθερής κατάστασης είναι μηδέν εάν το σύστημα είναι σταθερό. Έτσι η απόδοση σταθερής κατάστασης που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ολοκληρώματος είναι άριστη για αυτές τις εγκαταστάσεις με βηματικές εισόδους.

Η αναλογία απόσβεσης είναι:

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

Για μια μικρή απόσβεση, η απόκριση θα είναι ταλαντευόμενη και όχι εκθετική όπως με τον αναλογικό έλεγχο. Η βελτιωμένη απόδοση σταθερής κατάστασης έχει ληφθεί έτσι, με κόστος την υποβιβασμένη μεταβατική απόδοση. Η σύγκρουση μεταξύ της σταθερής κατάστασης και των παροδικών προδιαγραφών είναι ένα κοινό θέμα στο σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου. Εφ' όσον το σύστημα είναι υποαποσβεσμένο, η χρονική σταθερά είναι $\tau = 2I/c$ και δεν επηρεάζεται από την ενίσχυση K , η οποία σε αυτήν την περίπτωση επηρεάζει μόνο τη συχνότητα ταλάντωσης. Φυσικά είναι δυνατόν το K να είναι αρκετά μικρό έτσι ώστε $\zeta \geq 1$, και να ανακτηθεί το μη ταλαντευόμενο χαρακτηριστικό γνώρισμα του αναλογικού ελέγχου, αλλά η απόκριση θα τείνει πάντα να είναι αργή. Οι παροδικές προδιαγραφές για τη γρήγορη

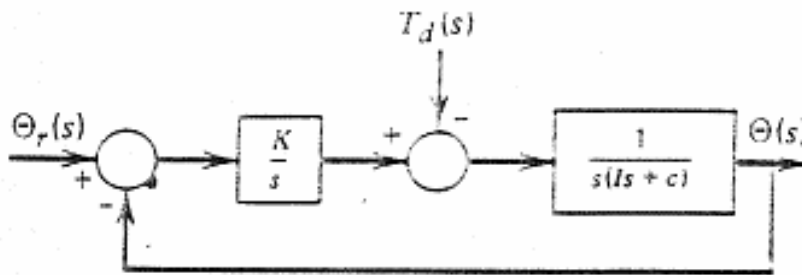
απόκριση απαιτούν συχνά $\zeta < 1$. Η δυσκολία με $\zeta < 1$ είναι ότι το τ καθορίζεται από το c και το I . Εάν τα c και I είναι τέτοια που $\zeta < 1$, τότε το τ είναι μεγάλο αν $I \gg c$.

3.2.4.2 Έλεγχος ολοκληρώματος ενός συστήματος δεύτερης τάξης

Ο αναλογικός έλεγχος του σερβομηχανισμού θέσης στο σχήμα 3.14 δίνει μια διαφορετική από το μηδέν απόκλιση σταθερής κατάστασης λόγω της διαταραχής. Ο έλεγχος ολοκληρώματος που εφαρμόζεται σε αυτό το σύστημα οδηγεί στο μπλοκ διάγραμμα του σχήματος 3.18 και τις συναρτήσεις μεταφοράς:

$$\frac{\Theta(s)}{\Theta_r(s)} = \frac{K}{Is^3 + cs^2 + K}$$

$$\frac{\Theta(s)}{T_d(s)} = \frac{-s}{Is^3 + cs^2 + K}$$



Εικόνα 3.18 Μπλοκ διάγραμμα ενός σερβομηχανισμού θέσης με έλεγχο ολοκληρώματος.

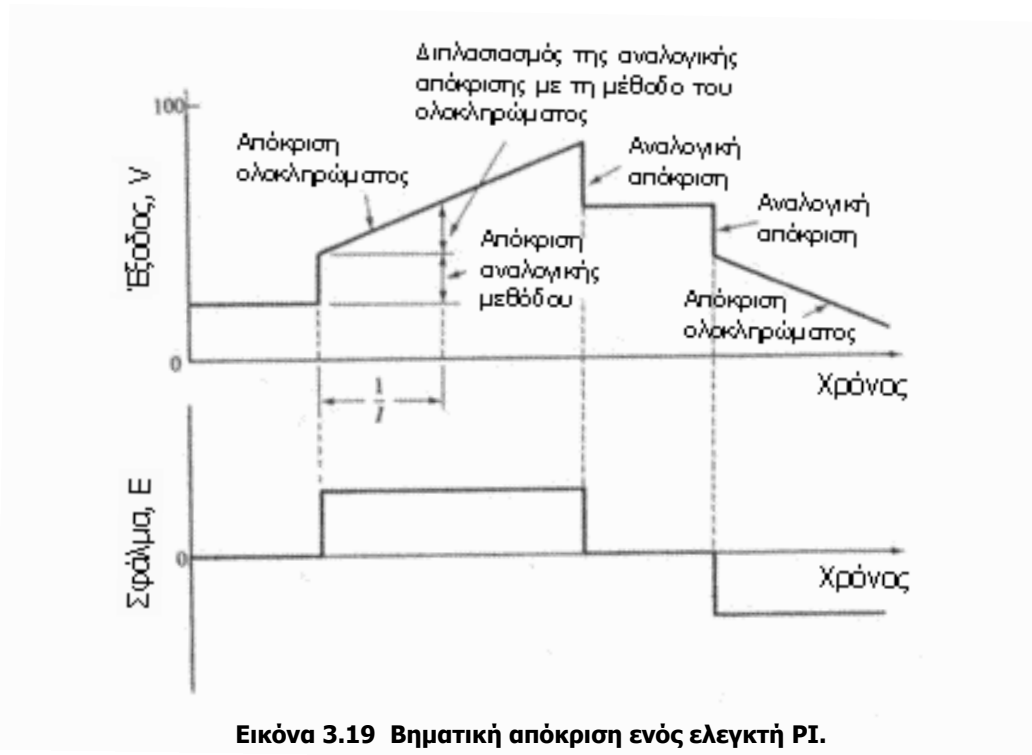
Σύμφωνα με το κριτήριο Routh, βλέπουμε αμέσως ότι το σύστημα δεν είναι σταθερό λόγω του απόντα όρου s . Έτσι το θεώρημα τελικής τιμής δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Ο έλεγχος ολοκληρώματος είναι χρήσιμος για την βελτίωση της απόδοσης σταθερής κατάστασης, αλλά γενικά δεν βελτιώνει και αντίθετα μπορεί ακόμη και να χειροτερεύσει την μεταβατική απόδοση. Εάν εφαρμοστεί εσφαλμένα μπορεί να παράγει ένα ασταθές σύστημα ελέγχου γι' αυτό και χρησιμοποιείται καλύτερα από κοινού με άλλους τρόπου ελέγχου.

3.2.5 Αναλογική και ολοκληρωτική μέθοδος ελέγχου, PI

Η μέθοδος ολοκληρώματος συνδυάζεται συχνά με την αναλογική μέθοδο για να παρέχει μια αυτόματη ενέργεια επαναφοράς που εξαλείφει την αναλογική μετατόπιση. Ο συνδυασμός αναφέρεται ως

αναλογική και ολοκληρωτική μέθοδος ελέγχου (proportional plus integral control mode, PI).

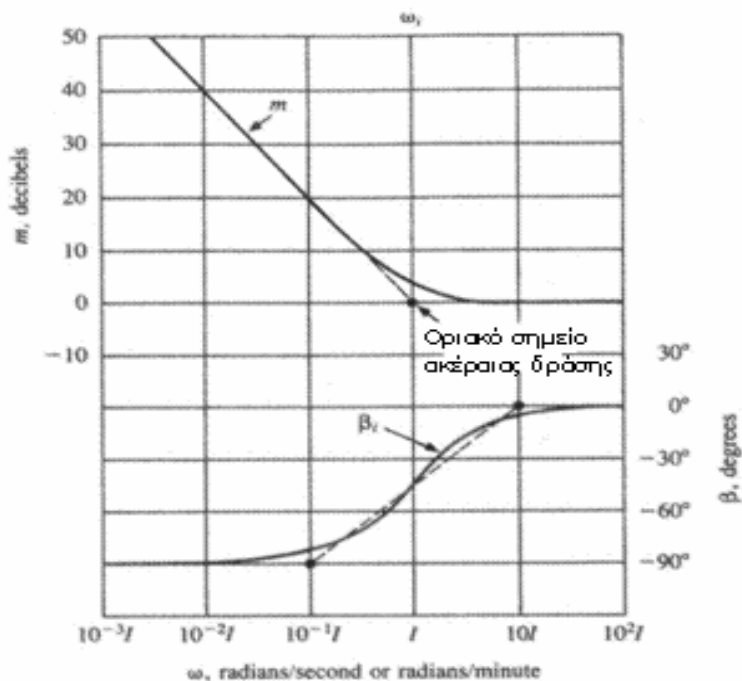
Η μέθοδος ολοκληρώματος παρέχει την ενέργεια επαναφοράς αλλάζοντας συνεχώς την έξοδο του ελεγκτή μέχρι το σφάλμα να μηδενιστεί. Η εικόνα 3.19 απεικονίζει την απόκριση ενός ελεγκτή PI.



Η αναλογική μέθοδος παρέχει μια αλλαγή στην έξοδο του ελεγκτή που είναι ανάλογη του σήματος σφάλματος. Η μέθοδος ολοκληρώματος παρέχει μια επιπρόσθετη αλλαγή στην έξοδο που είναι ανάλογη του ολοκληρώματος του σήματος σφάλματος. Ο αντίστροφος του ρυθμού ενέργειας ολοκληρώματος (I) είναι ο χρόνος που χρειάζεται η μέθοδος ολοκληρώματος για να ταυτιστεί με την αλλαγή στην έξοδο που παράγει η αναλογική μέθοδος.

Ένα πρόβλημα με την μέθοδο ολοκληρώματος είναι ότι αυξάνει την τάση της ταλάντωσης της ελεγχόμενης μεταβλητής. Η ενίσχυση του ελεγκτή αναλογικής μεθόδου πρέπει να μειωθεί όταν συνδυάζεται με την μέθοδο ολοκληρώματος. Αυτό μειώνει την ικανότητα του ελεγκτή να ανταποκριθεί σε απότομες αλλαγές φορτίου. Αν η διαδικασία έχει μεγάλο νεκρό χρόνο υστέρησης, το σήμα σφάλματος δεν θα αντανakλά αμέσως το πραγματικό σφάλμα στην διαδικασία. Αυτή η υστέρηση συνήθως έχει ως αποτέλεσμα την υπερσύνδεση της μεθόδου ολοκληρώματος, δηλαδή η μέθοδος ολοκληρώματος συνεχίζει να αλλάζει την έξοδο του ελεγκτή ενώ το σφάλμα έχει μειωθεί στο μηδέν διότι ενεργεί σε ένα "παλιό" σήμα.

Το διάγραμμα Bode της μεθόδου PI παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 3.20 Διάγραμμα Bode της μεθόδου ελέγχου ΠΙ.

Το διάγραμμα χωρίζεται σε δύο μισά από τη συχνότητα οριακού σημείου της ενέργειας ολοκληρώματος που είναι ίση με τον ρυθμό ενέργειας ολοκληρώματος.

$$\omega_i = I$$

Στο αριστερό μέρος του διαγράμματος ($\omega < \omega_i$) η ενέργεια του ολοκληρώματος κυριαρχεί με την ενίσχυση να μειώνεται κατά 20dB ανά δεκάδα και την φάση γωνίας να είναι ίση με -90° . Στην δεξιά πλευρά του διαγράμματος ($\omega > \omega_i$), η ενέργεια της αναλογικής μεθόδου κυριαρχεί με γωνία φάσης 0° και με μέτρο που καθορίζεται από την αναλογική ενίσχυση P. Η περιοχή μεταξύ $0.1\omega_i$ και $10\omega_i$ είναι μια μεταβατική ζώνη μεταξύ των δύο πλευρών του διαγράμματος. Στην εικόνα 3.20 η αναλογική ενίσχυση P είναι ίση με 1 και η οποία δίνει ένα μέτρο 0 dB στο διάγραμμα Bode. Η επίδραση αναλογικής ενίσχυσης διάφορης του 1 είναι για να αυξήσει ή να μειώσει την καμπύλη ενίσχυσης χωρίς να επηρεάσει την καμπύλη φάσης. Μια ενίσχυση $P = 10$ για παράδειγμα θα ανέβαζε όλη την καμπύλη ενίσχυσης κατά 20 dB. Μια ενίσχυση 0.1 θα κατέβαζε την καμπύλη ενίσχυσης κατά 20 dB.

Η μέθοδος ελέγχου ΠΙ χρησιμοποιείται σε διαδικασίες με μεγάλες αλλαγές φορτίου όταν η αναλογική μέθοδος δεν είναι ικανή από μόνη της να ελαττώσει την μετατόπιση σε ένα ανεκτό επίπεδο. Η μέθοδος ολοκληρώματος παρέχει μια ενέργεια επαναφοράς που εξαλείφει την αναλογική μετατόπιση.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΙ

Εξίσωση στο πεδίο του χρόνου

$$v = P_e + PI \int_0^t e dt + v_0$$

Εξίσωση στο πεδίο της συχνότητας

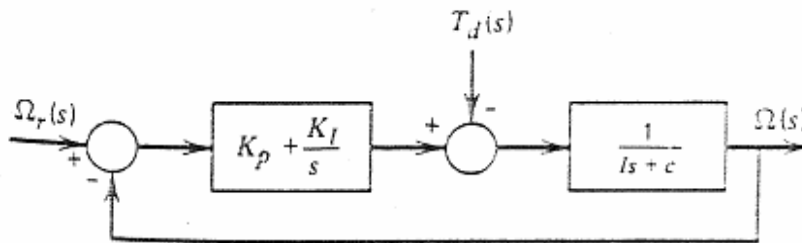
$$V = PE + P\left(\frac{I}{s}\right)E$$

Συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{V}{E} = P\left(\frac{I+s}{s}\right)$$

3.2.5.1 ΡΙ έλεγχος ενός συστήματος πρώτης τάξης

Η αναλογική και ολοκληρωτική ενέργεια ελέγχου που εφαρμόζεται στον ελεγκτή ταχύτητας στο σχήμα 6.29 δίνει το μπλοκ διάγραμμα που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.21.



Εικόνα 3.21 Μπλοκ διάγραμμα ενός σερβομηχανισμού ταχύτητας με ΡΙ έλεγχο.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι:

$$\frac{\Omega(s)}{\Omega_r(s)} = \frac{K_p s + K_I}{Is^2 + (c + K_p)s + K_I}$$

$$\frac{\Omega(s)}{T_d(s)} = \frac{-s}{Is^2 + (c + K_p)s + K_I}$$

όπου τα κέρδη K_p και K_I σχετίζονται με τις ενισχύσεις των στοιχείων. Το σύστημα είναι σταθερό για τις θετικές τιμές των K_p και K_I . Για $\Omega_r(s) = 1/s$ και $\omega_{ss} = K_I/K_I = 1$, το σφάλμα μετατόπισης είναι μηδέν, όπως και με την ενέργεια ολοκληρώματος. Ομοίως, η απόκλιση λόγω μιας διαταραχής μοναδιαίου βήματος είναι μηδέν στην σταθερή κατάσταση. Η αναλογία απόσβεσης είναι:

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

Η παρουσία της K_p επιτρέπει στην αναλογία απόσβεσης να επιλεγεί χωρίς καθορισμό της τιμής της κυρίαρχης χρονικής σταθεράς. Παραδείγματος χάριν, εάν το σύστημα είναι υποαποσβεσμένο, η χρονική σταθερά είναι:

$$\tau = \frac{2I}{c + K_p}, \quad (\zeta < 1)$$

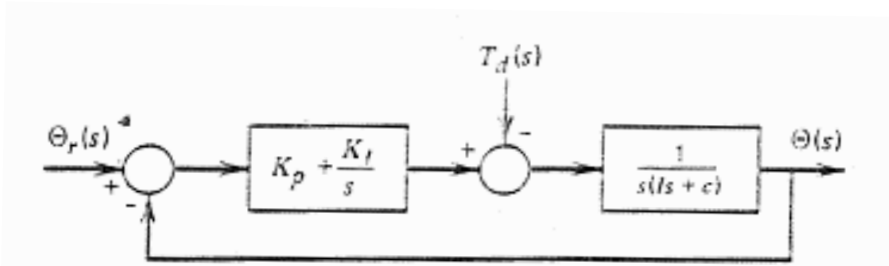
Η ενίσχυση K_p μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε να ληφθεί η επιθυμητή χρονική σταθερά, ενώ η K_I χρησιμοποιείται για να θέσει την αναλογία απόσβεσης.

3.2.5.2 PI έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης

Ο έλεγχος ολοκληρώματος για τον σερβομηχανισμό θέσης στο σχήμα 3.18 οδήγησε σε ένα σύστημα τρίτου βαθμού που είναι ασταθές. Με έναν αναλογικό όρο, το διάγραμμα γίνεται όπως φαίνεται στην εικόνα 3.22, με τις συναρτήσεις μεταφοράς να είναι:

$$\frac{\Theta(s)}{\Theta_r(s)} = \frac{K_p s + K_I}{Is^3 + cs^2 + K_p s + K_I}$$

$$\frac{\Theta(s)}{T_d(s)} = \frac{-s}{Is^2 + cs^2 + K_p s + K_I}$$

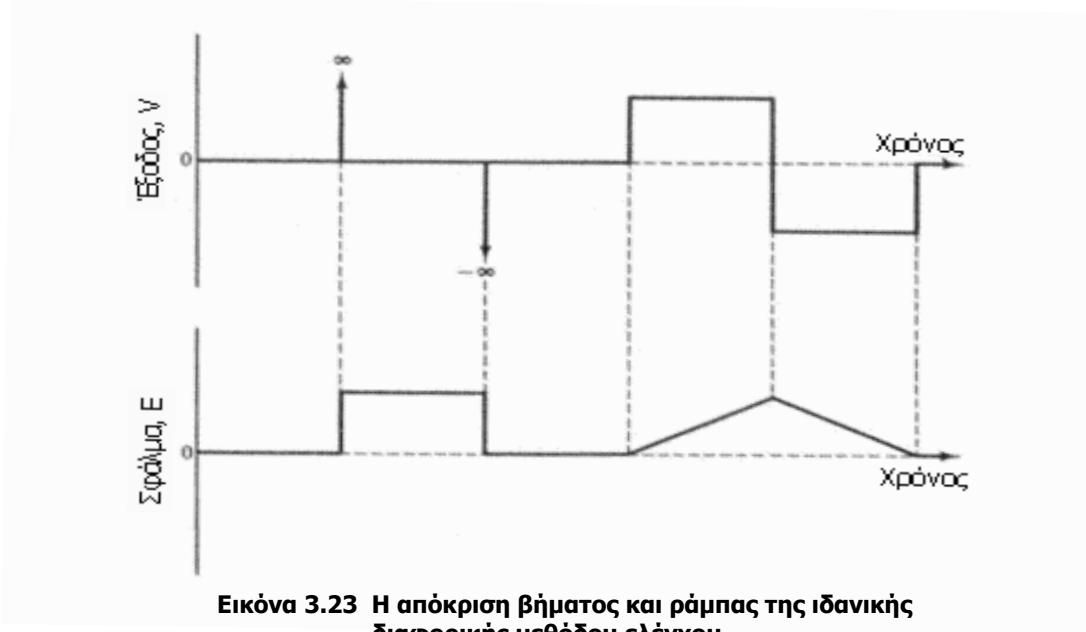


Εικόνα 3.22 Μπλοκ διάγραμμα ενός σερβομηχανισμού θέσης με PI έλεγχο.

Η απόδοση σταθερής κατάστασης είναι αποδεκτή όπως πριν, εάν υποθέσουμε ότι το σύστημα είναι σταθερό. Αυτό ισχύει εάν ικανοποιείται το κριτήριο Routh δηλαδή εάν τα I , c , K_p και K_I είναι θετικά και $cK_p - IK_I > 0$. Η δυσκολία εδώ εμφανίζεται όταν η απόσβεση είναι μικρή. Για μικρό c , η ενίσχυση K_p πρέπει να είναι μεγάλη προκειμένου να ικανοποιηθεί ο τελευταίος όρος, και γι' αυτό μπορεί να είναι δύσκολο να εφαρμοστεί. Ένας τέτοιος όρος μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μια ανεπαρκή χρονική σταθερά.

3.2.6 Διαφορική μέθοδος ελέγχου ή μέθοδος ελέγχου παραγώγου, D

Η **διαφορική μέθοδος ελέγχου (derivative control mode)** αλλάζει την έξοδο του ελεγκτή αναλογικά με το ρυθμό αλλαγής του σήματος σφάλματος. Αυτή η αλλαγή μπορεί να προκύψει από μια διαφορά στην μετρήσιμη μεταβλητή, στο σημείο ρύθμισης ή και στα δύο. Η διαφορική μέθοδος είναι μια προσπάθεια πρόβλεψης ενός σφάλματος παρατηρώντας πόσο γρήγορα αλλάζει το σφάλμα μέχρι κάποια στιγμή και χρησιμοποιεί τον ρυθμό αυτό για να παραχθεί μία ενέργεια που θα μειώσει το αναμενόμενο σφάλμα. Η διαφορική μέθοδος συμβάλει στην έξοδο του ελεγκτή μόνο όταν το σφάλμα αλλάζει. Για αυτόν τον λόγο η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται πάντα σε συνδυασμό με την αναλογική μέθοδο ή την μέθοδο PI.



Οι αποκρίσεις βήματος και ράμπας της ιδανικής διαφορικής μεθόδου ελέγχου δίνονται στην παραπάνω εικόνα.

Σε κάθε στιγμή η έξοδος της διαφορικής μεθόδου ελέγχου είναι ανάλογη της κλίσης ή του ρυθμού αλλαγής του σήματος σφάλματος. Η βηματική απόκριση αναδεικνύει τον λόγο που η ιδανική διαφορική μέθοδος ελέγχου δεν χρησιμοποιείται ποτέ σε πραγματικούς ελεγκτές. Η καμπύλη σφάλματος έχει άπειρη κλίση όταν συμβαίνει η βηματική αλλαγή. Η ιδανική διαφορική μέθοδος ελέγχου πρέπει να ανταποκριθεί με μία άπειρη αλλαγή στην έξοδο του ελεγκτή. Στους πραγματικούς ελεγκτές η απόκριση της διαφορικής μεθόδου σε ταχέως μεταβλητά σήματα είναι περιορισμένη. Αυτό μειώνει κατά πολύ την ευαισθησία του ελεγκτή σε ανεπιθύμητες αιχμές θορύβου που παρουσιάζονται συχνά στην πραγματικότητα.

Το διάγραμμα bode της ιδανικής διαφορικής μεθόδου ελέγχου είναι το αντίθετο από αυτό της μεθόδου ολοκληρώματος. Η ενίσχυση αυξάνεται με ρυθμό 20 dB ανά δεκάδα αύξησης στην συχνότητα

και περνά από τα 0 dB στην γωνιακή συχνότητα ίση με 1/D. Η γωνία φάσης είναι σταθερή στις +90° σε όλες της τιμές συχνοτήτων.

Διαφορική μέθοδος ελέγχου D

Εξίσωση στο πεδίο του χρόνου

$$v = D \frac{de}{dt}$$

Εξίσωση στο πεδίο της συχνότητας

$$V = DsE$$

Συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{V}{E} = Ds$$

3.2.7 Αναλογική και διαφορική μέθοδος ελέγχου, PD

Η διαφορική μέθοδος χρησιμοποιείται κάποιες φορές με την αναλογική μέθοδο για να μειώσει την τάση για ταλαντώσεις και να επιτρέψει μεγαλύτερη αναλογική ενίσχυση. Ο συνδυασμός της αναλογικής και της διαφορικής μεθόδου αναφέρεται ως μέθοδος ελέγχου PD. Η αναλογική μέθοδος παρέχει μια αλλαγή στην έξοδο του ελεγκτή που είναι ανάλογη του σήματος σφάλματος. Η διαφορική μέθοδος παρέχει μια επιπρόσθετη αλλαγή στην έξοδο του ελεγκτή που είναι ανάλογη του ρυθμού αλλαγής του σήματος σφάλματος. Η διαφορική μέθοδος προσμένει την μελλοντική τιμή του σφάλματος και αλλάζει κατάλληλα την έξοδο του ελεγκτή. Αυτή η ενέργεια προσμονής καθιστά την διαφορική μέθοδο χρήσιμη στον έλεγχο διαδικασιών με ξαφνικές αλλαγές φορτίου. Γι' αυτόν τον λόγο η διαφορική μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως με την αναλογική μέθοδο ή την μέθοδο PI, όταν οι ξαφνικές αλλαγές φορτίου παράγουν υπερβολικά σφάλματα. Η διαφορική μέθοδος ελέγχου αντικρούει την αλλαγή της ελεγχόμενης μεταβλητής και αυτό βοηθά στην απόσβεση των ταλαντώσεων της ελεγχόμενης μεταβλητής.

Η μέθοδος PD χρησιμοποιείται σε διαδικασίες με ξαφνικές αλλαγές φορτίου όταν η αναλογική μέθοδος από μόνη της δεν είναι ικανή να περιορίσει το σφάλμα σε ένα ανεκτό επίπεδο. Η διαφορική μέθοδος παρέχει μια ενέργεια προσμονής που μειώνει το μέγιστο σφάλμα που προκαλείται από ξαφνικές αλλαγές φορτίου. Επίσης επιτρέπει μεγαλύτερη ενίσχυση η οποία βοηθά στην μείωση της αναλογικής μετατόπισης.

Αναλογική και διαφορική μέθοδος ελέγχου, PD

Εξίσωση στο πεδίο του χρόνου

$$v = P_e + PD \frac{de}{dt} - aD \frac{dv}{dt} + v_0$$

όπου: P_e = η ενέργεια της αναλογικής μεθόδου.

$$PD \frac{de}{dt} = \text{η ιδανική ενέργεια της διαφορικής μεθόδου.}$$

$$aD \frac{dv}{dt} = \text{ο όρος που περιορίζει την απόκριση που παράγεται από τα ταχέως μεταβλητά σήματα.}$$

Εξίσωση στο πεδίο της συχνότητας

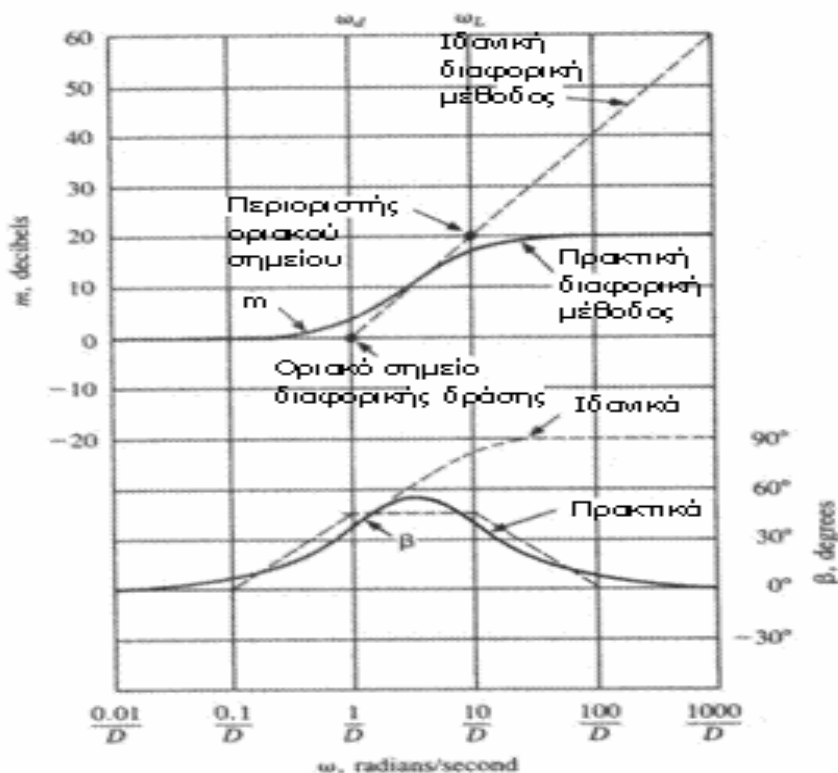
$$V = PE + PDsE - aDsV$$

Συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{V}{E} = P \left(\frac{1 + Ds}{1 + aDs} \right)$$

$$0 < a < 1$$

Το διάγραμμα Bode μιας μεθόδου ελέγχου PD φαίνεται στην εικόνα 3.24. Η αναλογική μέθοδος κυριαρχεί στην αριστερή μεριά του διαγράμματος (όπου $\omega < \omega_i = 1/D$). Η αναλογική ενίσχυση αυξάνει ή μειώνει ολόκληρη την καμπύλη ενίσχυσης, όπως έκανε και στην μέθοδο PI. Η διαφορική μέθοδος προκαλεί το ανέβασμα της καμπύλης ενίσχυσης στα 20 dB δηλαδή στο οριακό σημείο ενέργειας παραγώγου. Ο περιοριστής παραγώγου προκαλεί την επαναφορά της ενίσχυσης σε οριζόντια γραμμή στο οριακό



Εικόνα 3.24 Διάγραμμα Bode μιας πρακτικής διαφορικής μεθόδου ελέγχου με $a = 0.1$.

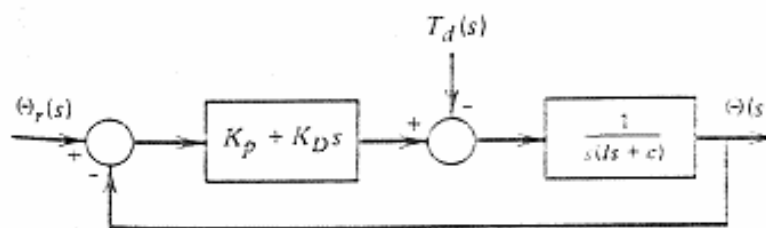
σημείο αυτού. Το διάγραμμα δείχνει ξεκάθαρα πως η διαφορική μέθοδος ενισχύει τα σήματα υψηλής συχνότητας και πως ο περιοριστής παραγώγου μειώνει την ενίσχυση αυτών. Παρατηρούμε επίσης ότι ο περιοριστής προκαλεί την επαναφορά της γωνίας φάσης στις 0° στις υψηλές συχνότητες. Ουσιαστικά η μέθοδος ελέγχου PD παρέχει μια καθοδήγηση φάσης σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Ο σχεδιασμός ελεγκτών εμπλέκει την τοποθέτηση αυτής της καθοδηγήσας φάσης εκεί που θα έχει την μεγαλύτερη ωφέλεια.

3.2.7.1 PD έλεγχος ενός συστήματος δεύτερης τάξης

Ο σχεδιασμός ενός ελεγκτή και με τις τρεις μεθόδους αυξάνει το κόστος του συστήματος (εκτός ίσως για τα ψηφιακά συστήματα, όπου η μόνη αλλαγή είναι μια τροποποίηση λογισμικού). Υπάρχουν εφαρμογές του σερβομηχανισμού θέσης στις οποίες μπορούμε να ανεχτούμε μια διαφορετική από το μηδέν απόκλιση ως αποτέλεσμα της διαταραχής, αλλά επιδιώκουμε μια βελτίωση στην μεταβατική απόκριση πέρα από το αναλογικό αποτέλεσμα ελέγχου. Η ενέργεια ολοκληρώματος δεν θα απαιτούνταν και ο ρυθμός ενέργειας μπορεί να αντικατασταθεί για να βελτιώσει την μεταβατική απόκριση. Η εφαρμογή του ελέγχου PD σε αυτό το σύστημα δίνει το μπλοκ διάγραμμα στο σχήμα 3.25 και τις ακόλουθες συναρτήσεις μεταφοράς:

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

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



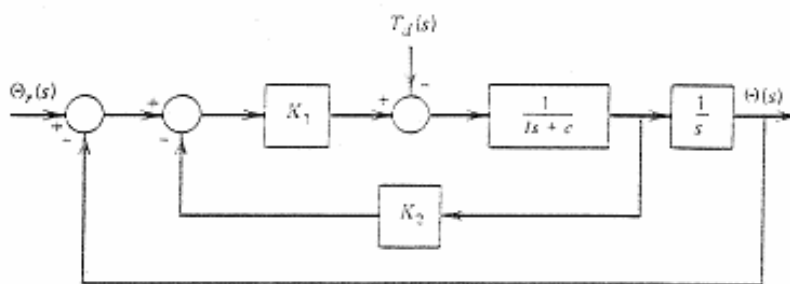
Εικόνα 3.25 Μπλοκ διάγραμμα ενός σερβομηχανισμού θέσης με PD έλεγχο.

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

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

Για τον έλεγχο P έχουμε $\zeta = c/2\sqrt{IK_p}$. Η εισαγωγή του ρυθμού ενέργειας επιτρέπει στην αναλογική ενίσχυση K_p να είναι αρκετά μεγάλη προκειμένου να μειώσει την απόκλιση σταθερής κατάστασης, ενώ η K_D μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτύχει μια αποδεκτή αναλογία απόσβεσης. Ο ρυθμός ενέργειας βοηθά επίσης να σταθεροποιηθεί το σύστημα με την προσθήκη της απόσβεσης (εάν $c = 0$, το σύστημα δεν είναι σταθερό με έλεγχο P).

Η δυνατότητα κατασκευής μιας συσκευής διαφόρισης αντικρούεται από την αρχή της ακέραιας αιτίας. Εντούτοις, στο επόμενο τμήμα, παρουσιάζονται οι τεχνικές για τη εξαγωγή μιας προσέγγισης μιας τέτοιας συσκευής. Εδώ πρέπει να σημειώνουμε ότι στο παρόν παράδειγμα, το αντίστοιχο της ενέργειας παράγωγου μπορεί να ληφθεί με τη χρησιμοποίηση ενός ταχυμέτρου που μετρά τη γωνιακή ταχύτητα του φορτίου. Το μπλοκ διάγραμμα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.26.



Εικόνα 3.26 Μπλοκ διάγραμμα ενός ταχυμέτρου ρύθμισης της ανατροφοδότησης ενός σερβομηχανισμού θέσης με PD έλεγχο.

Η ενίσχυση του συνδυασμού ενισχυτής – μηχανή - ποτενσιόμετρο είναι K_1 και K_2 είναι η ενίσχυση του ταχυμέτρου. Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι:

$$\frac{\Theta(s)}{\Theta_r(s)} = \frac{K_1}{Is^2 + (c + K_1K_2)s + K_1}$$

$$\frac{\Theta(s)}{T_d(s)} = \frac{-1}{Is^2 + (c + K_1K_2)s + K_1}$$

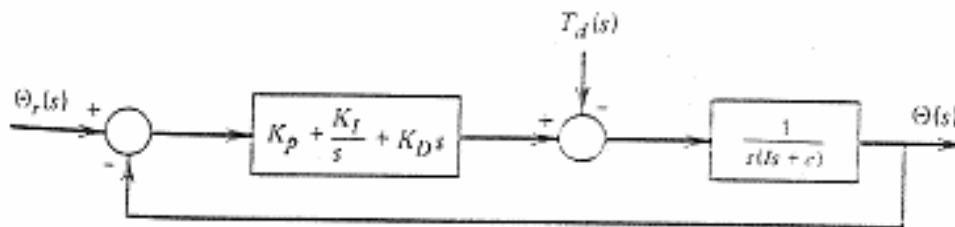
Η σύγκριση των παραπάνω εξισώσεων με τις εξισώσεις (1) και (2) δείχνει ότι το σύστημα με την ανατροφοδότηση του ταχυμέτρου δεν περιλαμβάνει τον δυναμικό αριθμητή. Αυτό το σύστημα επομένως θα είναι κάπως πιο αργό στην απόκριση από το σύστημα με τον καθαρό PD έλεγχο. Διαφορετικά, η ρύθμιση ανατροφοδότησης του ταχυμέτρου δίνει μια παρόμοια χαρακτηριστική εξίσωση. Οι ενισχύσεις K_1 και K_2 μπορούν να επιλεχθούν για να παράγουν την επιθυμητή αναλογία απόκλισης και απόσβεσης σταθερής κατάστασης όπως έγινε με τα K_p και K_D . Το αντισταθμισμένο σύστημα με ταχύμετρο έχει ένα μεγαλύτερο σφάλμα σταθερής κατάστασης στην απόκριση σε μια εντολή ράμπας και τα δύο συστήματα έχουν ένα άπειρο σφάλμα σταθερής κατάστασης για μια διαταραχή ράμπας.

3.2.8 Αναλογική – ολοκληρωτική – διαφορική μέθοδος ελέγχου, PID

Ο σχεδιασμός σερβομηχανισμών θέσης με έλεγχο PI δεν είναι απολύτως ικανοποιητικός λόγω των δυσκολιών που συναντιούνται όταν η απόσβεση c είναι μικρή. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με τη χρησιμοποίηση του πλήρους PID κανόνα ελέγχου. Από το σχήμα 3.27, παράγονται οι ακόλουθες συναρτήσεις μεταφοράς:

$$\frac{\Theta(s)}{\Theta_r(s)} = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{I s^3 + (c + K_D) s^2 + K_p s + K_I}$$

$$\frac{\Theta(s)}{T_d(s)} = \frac{-s}{I s^3 + (c + K_D) s^2 + K_p s + K_I}$$



Εικόνα 3.27 Μπλοκ διάγραμμα ενός σερβομηχανισμού θέσης με PID έλεγχο.

Ένα σταθερό σύστημα δημιουργείται αν όλες οι ενισχύσεις είναι θετικές και αν:

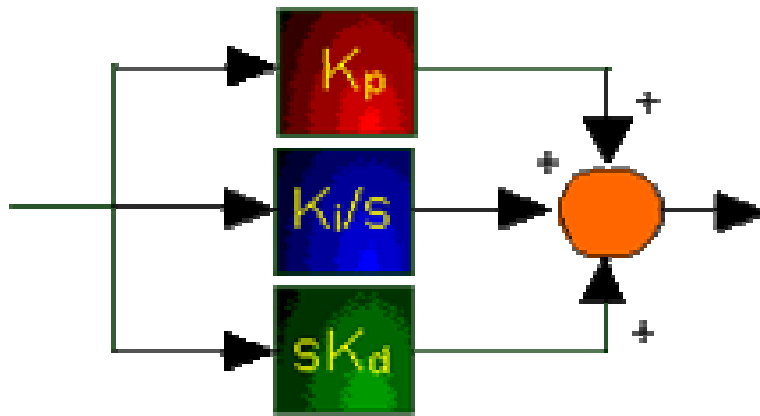
$$(c + K_D)K_p - IK_I > 0$$

Η παρουσία του K_D χαλαρώνει κάπως την απαίτηση να είναι αρκετά μεγάλο το K_p ώστε να επιτευχθεί η σταθερότητα. Τα σφάλματα σταθερής κατάστασης είναι μηδέν και η μεταβατική απόκριση μπορεί να βελτιωθεί επειδή τρεις από τους συντελεστές της χαρακτηριστικής εξίσωσης μπορούν να επιλεγτούν.

Όπως φαίνεται και πιο πάνω η μέθοδος ελέγχου PID είναι ένας συνδυασμός των μεθόδων P,I και D. Ένας ελεγκτής PID αναφέρεται και ως **ελεγκτής τριών όρων**. Η μέθοδος ολοκληρώματος χρησιμοποιείται για να εξαλείψει την αναλογική μετατόπιση που προκαλείται από μεγάλες αλλαγές φορτίου. Η διαφορική μέθοδος μειώνει την τάση για ταλαντώσεις και παρέχει μια ενέργεια ελέγχου που αναμένει αλλαγές στο σήμα σφάλματος. Η διαφορική μέθοδος είναι πολύ χρήσιμη όταν η διαδικασία έχει ξαφνικές αλλαγές φορτίου.

Η εξίσωση για έναν ιδανικό ελεγκτή τριών όρων είναι:

$$v = P_e + PI \int_0^t e dt + PD \frac{de}{dt} + v_0$$



Εικόνα 3.28 Μπλοκ διάγραμμα ενός ελεγκτή PID.

Αναλογική – ολοκληρωτική – διαφορική μέθοδος ελέγχου, PID

Εξίσωση στο πεδίο του χρόνου

$$v = P_e + PI \int_0^t e dt + PD \frac{de}{dt} - aD \frac{dv}{dt} + v_0$$

Εξίσωση στο πεδίο της συχνότητας

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

Συνάρτηση μεταφοράς

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

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

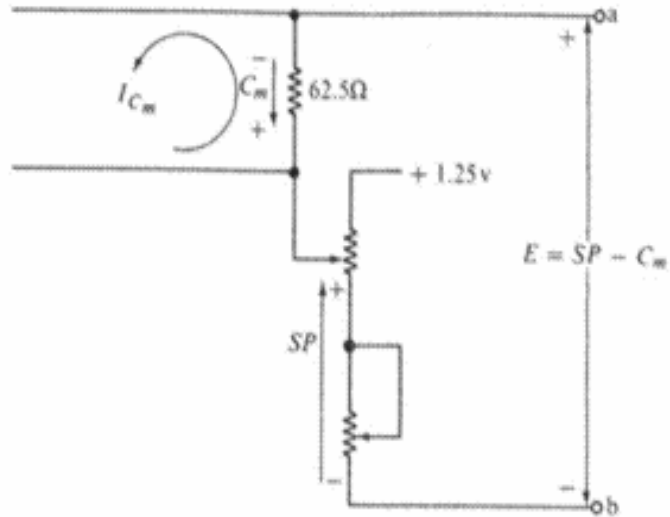
Το σημείο ρύθμισης παράγεται από ένα ποτενσιόμετρο με εύρος εξόδου από 0.25 έως 1.25 V. Τα δύο σήματα τάσης είναι συνδεδεμένα αντίθετα έτσι ώστε η τάση μεταξύ των σημείων a και b να είναι ίση με το σήμα του σημείου ρύθμισης μείον την μετρήσιμη τιμή του σήματος.

$$e = sp - c_m$$

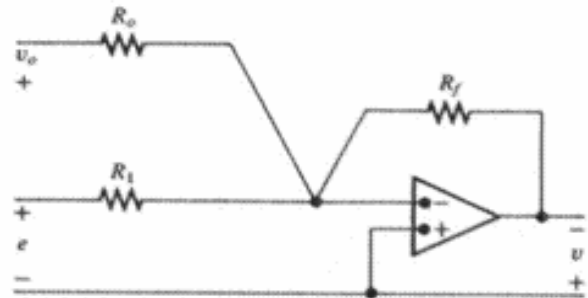
Η μονάδα μεθόδου ελέγχου καλείται μερικές φορές ως "ελεγκτής", παρόλα αυτά είναι πραγματικά ένα κομμάτι της μονάδας του ελεγκτή. Ο ηλεκτρονικός αναλογικός ελεγκτής χρησιμοποιεί έναν λειτουργικό ενισχυτή και μερικές αντιστάσεις και πυκνωτές για να σχηματίσει την μονάδα μεθόδου ελέγχου. Ο λειτουργικός 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.

Ο αναλογικός ελεγκτής αναλογικής μεθόδου χρησιμοποιεί τρεις αντιστάσεις για να σχηματίσει έναν ενισχυτή αντιστροφής. Το κύκλωμα έχει δύο εισόδους, ένα σφάλμα (e) και μια έξοδο μετατόπισης (v₀). Η αναλογική ενίσχυση (P) είναι ίση με την ανάδραση της αντίστασης (R_f) δια την αντίσταση εισόδου σφάλματος (R_i). Η αντίσταση μετατόπισης πρέπει να είναι ίση με την αντίσταση ανάδρασης (R_f) 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.

Ο ελεγκτής PI χρησιμοποιεί δύο αντιστάσεις και έναν πυκνωτή για να υλοποιήσει την συνάρτηση μεταφοράς PI. Ο πυκνωτής (C_i) είναι τοποθετημένος σε σειρά με την αντίσταση ανάδρασης (R_i). Η ενίσχυση (P) είναι ίση με την αντίσταση ανάδρασης (R_i) δια την αντίσταση εισόδου (R₁). Ο ρυθμός



ΕικόνΑ 3.29 Ανιχνευτής ηλεκτρικού σφάλματος.



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

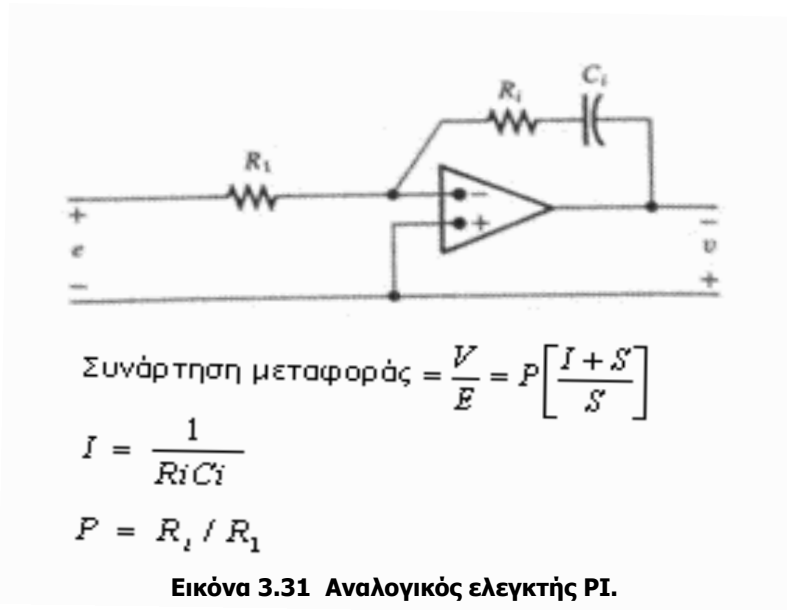
Συνάρτηση μεταφοράς: $P = \frac{V}{E}$

$$P = \frac{R_f}{R_1}$$

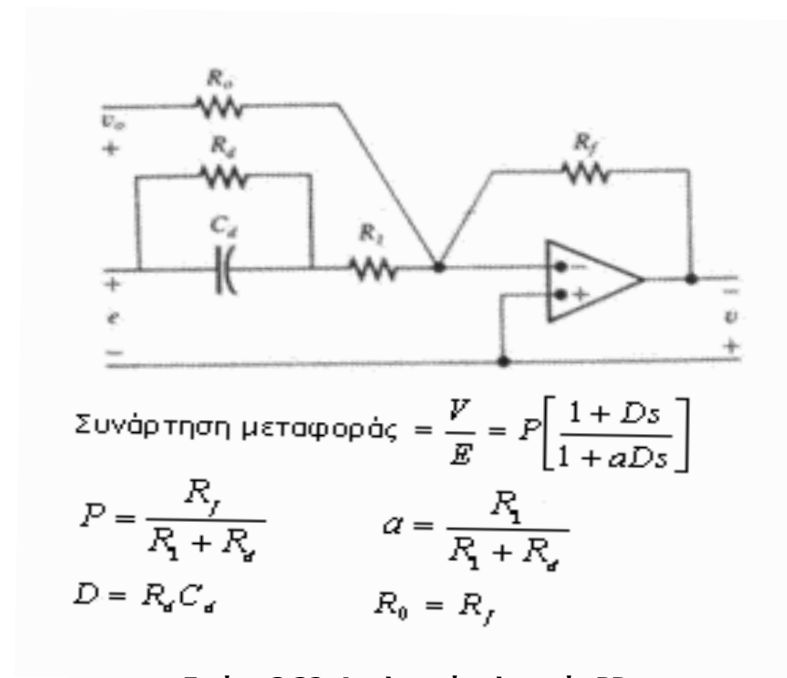
$$R_o = R_f$$

ΕικόνΑ 3.30 Αναλογικός ελεγκτής αναλογικής μεθόδου.

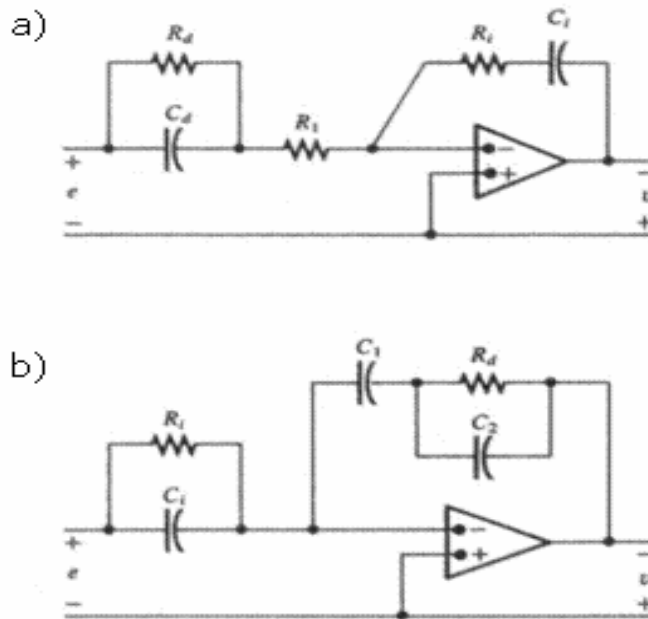
ενέργειας ολοκληρώματος είναι ίσος με τον αντίστροφο του γινομένου της αντίστασης εισόδου και του πυκνωτή.



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 3.32. Μια τυπική τιμή του a είναι 0.1.



Δύο εκδόσεις του αναλογικού ελεγκτή PID παρουσιάζονται στην εικόνα 3.33. Η μία έκδοση (εικόνα 3.33a) σχηματίζει την ενέργεια παραγώγου στην πλευρά της εισόδου και την ενέργεια ολοκληρώματος στην πλευρά της εξόδου. Η άλλη έκδοση (εικόνα 3.33b) κάνει απλώς το αντίθετο.



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

$$\text{Εικόνα a} \\ P = \frac{R_i}{R_1 + R_d}$$

$$a = \frac{R_1}{R_1 + R_d}$$

$$I = 1/(R_i C_i)$$

$$D = R_d C_d$$

$$\text{Εικόνα b} \\ P = C_i / C_1$$

$$a = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

$$I = 1/(R_i C_i)$$

$$D = R_d (C_1 + C_2)$$

Εικόνα 3.33 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.

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

Ένας μετασχηματισμός 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:

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

ή

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

3.4 Ψηφιακοί ελεγκτές

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

3.4.1 Ψηφιακός ελεγκτής PID

α. 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.

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

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

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

⋮

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

β. 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.

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

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 3.34. 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

$$v_n = Pe_n + PI\Delta t \sum_{j=1}^{j=n} e_j + PD \frac{\Delta e_n}{\Delta t} \text{ για να βρεθούν τα } v_n \text{ και } v_{n-1} \text{ και έπειτα αφαιρώντας εξάγουμε την}$$

παρακάτω εξίσωση:

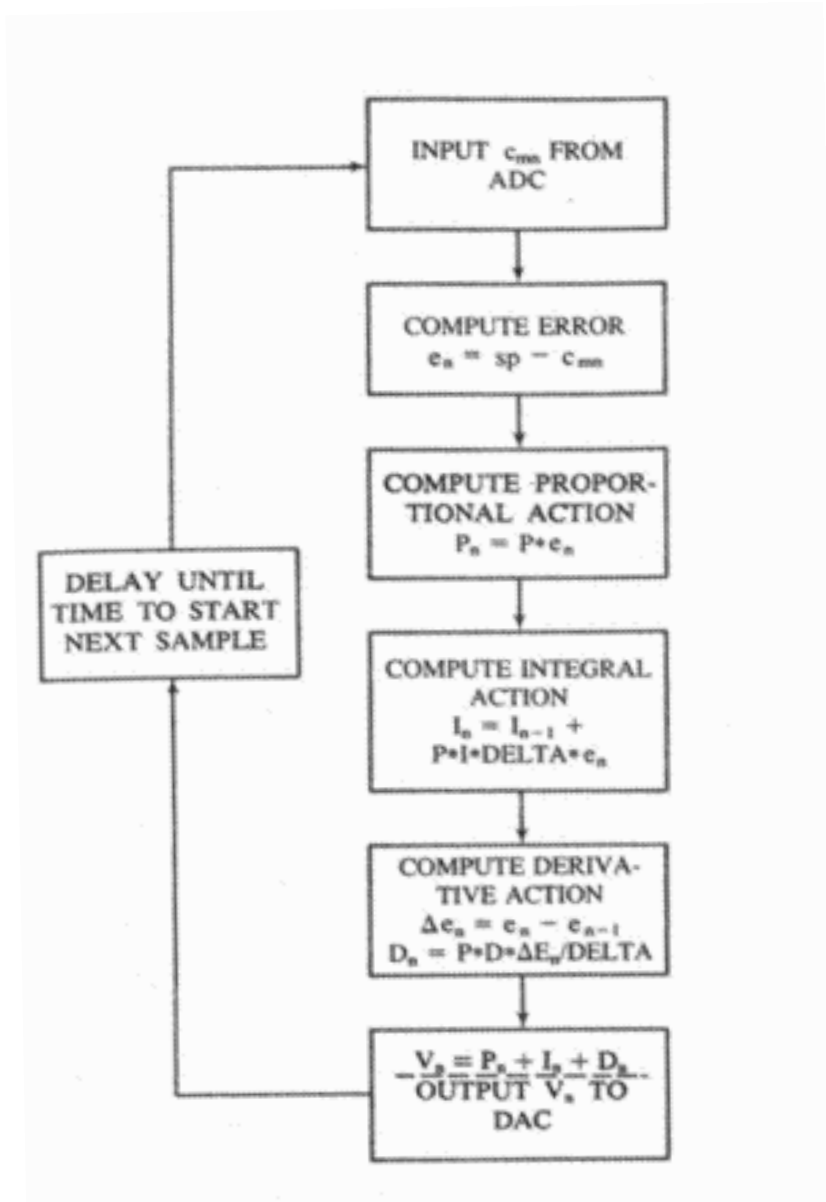
$$v_{n-1} = Pe_{n-1} + PI\Delta t \sum_{j=1}^{j=n-1} e_j + PD \frac{\Delta e_{n-1}}{\Delta t}$$

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

όπου: $\Delta v_n = v_n - v_{n-1}$

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

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



Εικόνα 3.34 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.

γ. Μέθοδος ολοκληρώματος

Η μέθοδος ολοκληρώματος στην εξίσωση $v_n = P e_n + P I \Delta t \sum_{j=1}^{j=n} e_j + P D \frac{\Delta e_n}{\Delta t}$ παρουσιάζει

υπολογιστικά προβλήματα που μπορεί να παράγουν μη ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η μέθοδος

ολοκληρώματος δίνεται από τον ακόλουθο όρο:

$$\text{Όρος ολοκληρώματος} = PI\Delta t \sum_{j=1}^{j=n} e_j$$

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

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

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 $I=0.002 s^{-1}$, 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 μειώνει 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.

δ. Μέθοδος παραγώγου

Η μέθοδος παραγώγου στην εξίσωση $v_n = Pe_n + PI\Delta t \sum_{j=1}^{j=n} e_j + PD \frac{\Delta e_n}{\Delta t}$ 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:

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

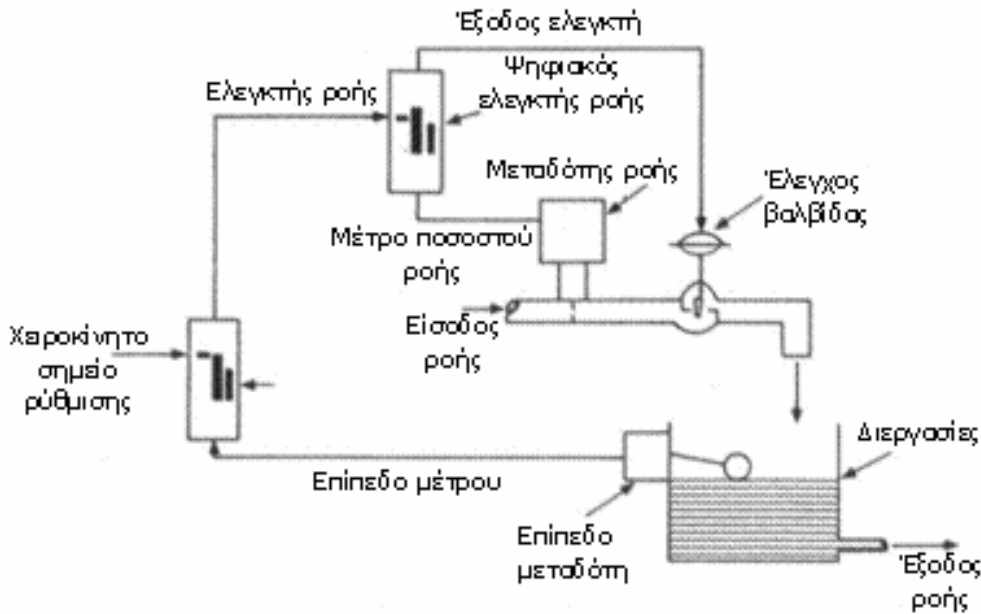
Ο όρος $(e_n - e_{n-1})/\Delta t$ είναι ουσιαστικά μια εκτίμηση του ρυθμού αλλαγής του σφάλματος, de/dt .

3.5 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 προσαρμοσίμης αυτό-ρύθμισης και τα συστήματα ελέγχου πολλών μεταβλητών.

3.5.1 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 3.35 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.



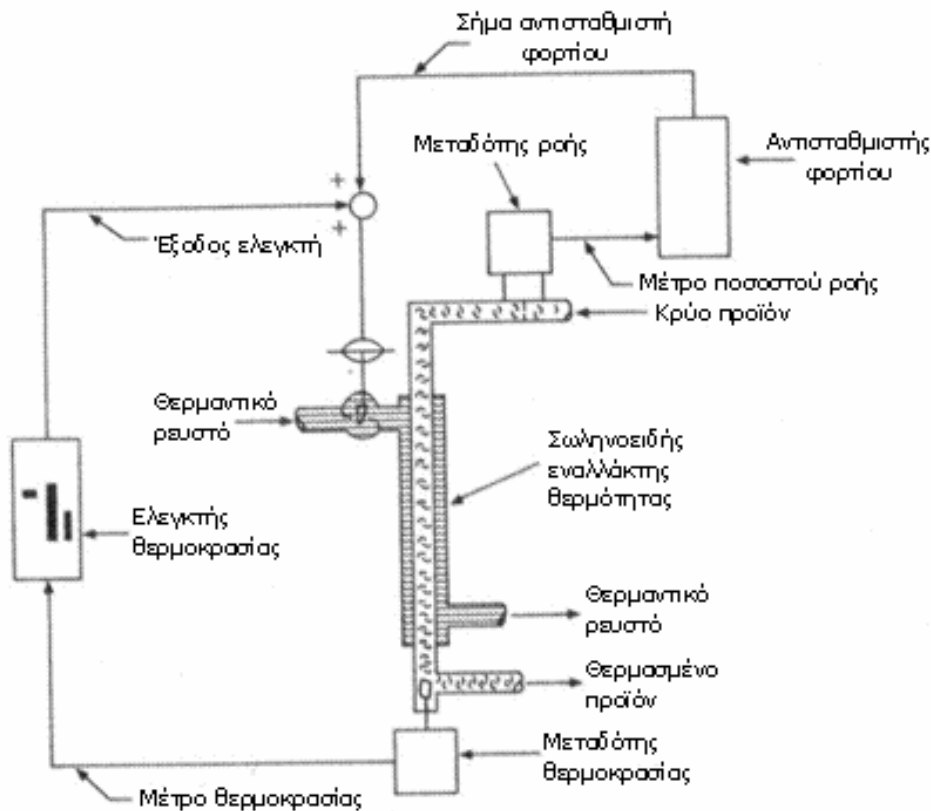
Εικόνα 3.35 Εφαρμογή ελέγχου συριακής σύζευξης.

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.

3.5.2 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 3.36, 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



Εικόνα 3.36 Εφαρμογή ελέγχου ορθής τροφοδοσίας.

ανάδραση για τον κύριο βρόγχο.

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.

3.5.3 Προσαρμόσιμοι ελεγκτές

Οι προσαρμόσιμοι ελεγκτές (adaptive controllers) 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.

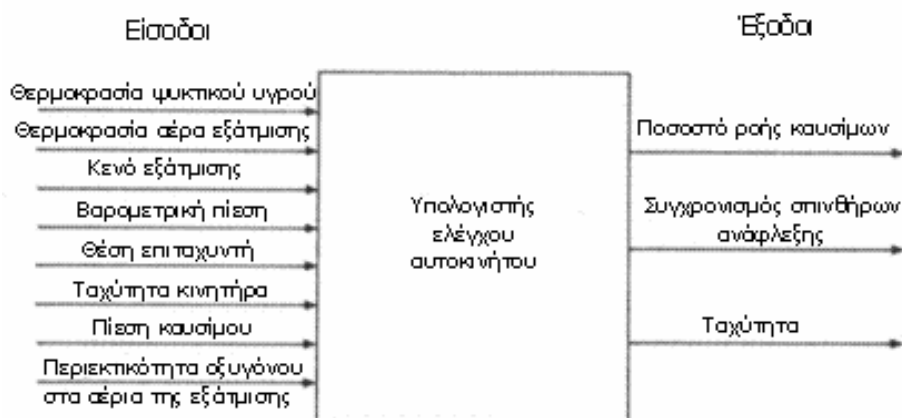
Ένας τυπικός προσαρμόσιμος ελεγκτής βασισμένος σε μοντέλο εισάγει μια βηματική αλλαγή στο σημείο ρύθμισης και παρατηρεί της απόκριση της διαδικασίας. Ο ελεγκτής έπειτα σχηματίζει ένα μοντέλο της διαδικασίας βασισμένο στην βηματική αλλαγή. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται ρυθμίζοντας το μοντέλο και τις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

3.5.4 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 των χρονισμό των μπουζί στα αυτοκίνητα είναι ένα πολύ καλό παράδειγμα συστημάτων πολλών μεταβλητών.

Ο σκοπός του συστήματος που απεικονίζεται στην εικόνα 3.37 είναι να ελέγξει τον ρυθμό ροής του ψεκαστή καυσίμου, τον χρονισμό των μπουζί και της ταχύτητας ρελαντί.



Εικόνα 3.37 Εφαρμογή ελέγχου πολλών μεταβλητών.

Οι εισοδοι 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 μπουζι 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 4

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Μια διαδικασία ή ένα στοιχείο χαρακτηρίζεται από την σχέση μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου. Είναι αυτή η σχέση εισόδου /εξόδου (I/O) που καθορίζει τις απαιτήσεις σχεδίασης ενός ελεγκτή. Αν η σχέση I/O της διαδικασίας είναι πλήρως ορισμένη, ο σχεδιαστής μπορεί να καθορίσει τις βέλτιστες παραμέτρους για τον ελεγκτή. Αν η σχέση I/O είναι φτωχά ορισμένη, ο σχεδιαστής πρέπει να παρέχει μια μεγάλη προσαρμογή των παραμέτρων του ελεγκτή, έτσι ώστε οι βέλτιστες παράμετροι να μπορούν να καθοριστούν κατά την εκκίνηση του συστήματος. Επομένως για την σχεδίαση ενός ελεγκτή πρέπει να καθοριστεί η σχέση I/O των ακολούθων τύπων διαδικασιών:

- a. Ακέραια ή διαδικασία ράμπας.
- b. Υστέρησης πρώτης τάξης.
- c. Νεκρού χρόνου.
- d. Υστέρησης δεύτερης τάξης.
- e. Υστέρησης πρώτης τάξης συν νεκρού χρόνου.

Η σχέση I/O μιας διαδικασίας μπορεί να οριστεί με κάποιο ή όλα από τα ακόλουθα:

1. Την εξίσωση στο πεδίο του χρόνου.
2. Την συνάρτηση μεταφοράς.
3. Το γράφημα βηματικής απόκρισης.
4. Το γράφημα απόκρισης συχνότητας.

Η **εξίσωση στο πεδίο του χρόνου (time-domain equation)** ορίζει την σχέση μεγέθους ανά χρόνο μεταξύ του σήματος εισόδου και εξόδου. Οι εξισώσεις αυτές εκφράζονται σε όρους των βασικών στοιχείων και συχνά περιέχουν όρους παραγώγων και ολοκληρωμάτων. Η **συνάρτηση μεταφοράς** μιας διαδικασίας εξάγεται μετασχηματίζοντας την εξίσωση στο πεδίο του χρόνου σε μία αλγεβρική εξίσωση στο πεδίο των συχνοτήτων και έπειτα επιλύοντας για τον λόγο της εξόδου προς την είσοδο. Η συνάρτηση μεταφοράς ορίζει την σχέση ενίσχυσης και διαφοράς φάσης ανά την συχνότητα μεταξύ των σημάτων εισόδου και εξόδου. Το **γράφημα βηματικής απόκρισης** είναι το χρονικό γράφημα του σήματος εξόδου ακολουθούμενο από μια βηματική αλλαγή στο σήμα εισόδου από μία τιμή σε μία άλλη. Το **γράφημα απόκρισης συχνότητας (ή διάγραμμα Bode)** είναι ένα διπλό γράφημα της ενίσχυσης προς την συχνότητα και της διαφοράς φάσης προς την συχνότητα.

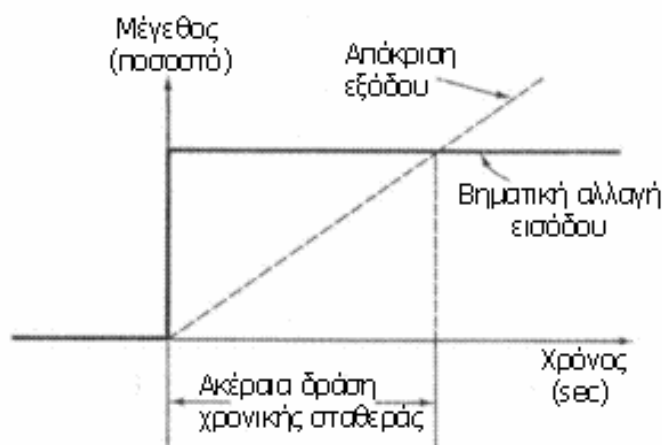
Τα χαρακτηριστικά μια διαδικασίας εξαρτώνται από τα βασικά της στοιχεία (αντίσταση, χωρητικότητα, νεκρό χρόνο, αδράνεια), και όχι από τον τύπο του συστήματος (θερμικό, ηλεκτρικό, μηχανικό, κτλ.). Δύο διαφορετικά συστήματα μπορεί να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά διαδικασίας.

Δηλαδή μπορεί να έχουν την ίδια εξίσωση στο πεδίο του χρόνου, την ίδια συνάρτηση μεταφοράς, την ίδια βηματική απόκριση και το ίδιο διάγραμμα Bode. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να επεκτείνουμε την γνώση μας περί ενός συστήματος σε όλα τα άλλα συστήματα που έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά διαδικασίας. Για παράδειγμα συστήματα όπως τα ηλεκτρικά, τα ροής υγρού, τα ροής αερίου και τα θερμικά καθυστέρησης πρώτης τάξης χαρακτηρίζονται όλα από μια σταθερά χρόνου που είναι ίση με το γινόμενο της αντίστασης επί την χωρητικότητα ($\tau = RC$).

4.2 Ακέραια ή διαδικασία ράμπας

Η ακέραια ή διαδικασία ράμπας αποτελείται από ένα στοιχείο χωρητικότητας ρυθμισμένο έτσι ώστε η ροή εξόδου του υλικού ή της ενέργειας να είναι ανεξάρτητη από την ποσότητα υλικού ή ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο στοιχείο χωρητικότητας. Η ποσότητα αυτή παραμένει σταθερή μόνο αν ο ρυθμός ροής εισόδου είναι ίσος με τον ρυθμό ροής εξόδου. Αν ο ρυθμός ροής εισόδου είναι μεγαλύτερος τότε η ποσότητα θα αυξάνεται αναλογικά με την διαφορά. Αν συμβαίνει το αντίθετο θα μειώνεται ανάλογα με την διαφορά. Ο ρυθμός ροής εισόδου είναι το σήμα εισόδου στην διαδικασία ολοκληρώματος, ενώ αντίθετα ο ρυθμός ροής εξόδου δεν είναι η έξοδος. Το σήμα εξόδου της διαδικασίας ολοκληρώματος είναι μια μεταβλητή, όπως για παράδειγμα η στάθμη υγρού που είναι ένα μέτρο του υλικού ή της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο στοιχείο χωρητικότητας.

Η βηματική απόκριση μιας διαδικασίας ολοκληρώματος απεικονίζεται στην εικόνα 4.1.

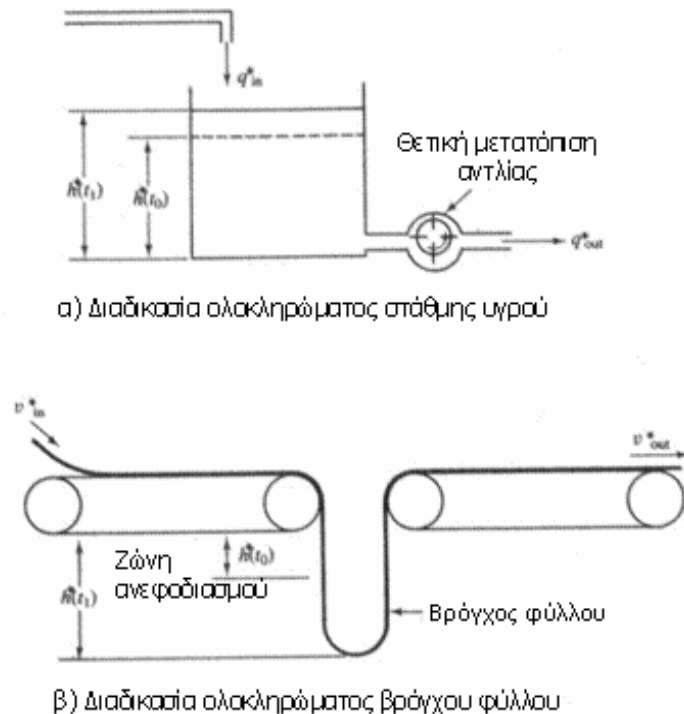


Εικόνα 4.1 Βηματική απόκριση της διαδικασίας ολοκληρώματος.

Πριν την βηματική αλλαγή, ο ρυθμός ροής εισόδου είναι ίσος με τον ρυθμό ροής εξόδου και η στάθμη διατηρείται σταθερή. Μετά την βηματική αλλαγή ο ρυθμός ροής εισόδου είναι μεγαλύτερος και η στάθμη αυξάνεται με έναν σταθερό ρυθμό. Ο όρος διαδικασία ράμπας εξάγεται από το σχήμα του γραφήματος απόκρισης εξόδου. Η βηματική απόκριση μιας ακέραιας διαδικασίας μετρείται από την σταθερά χρόνου

ενέργειας ολοκληρώματος, που είναι ο αριθμός των δευτερολέπτων που απαιτούνται ώστε η έξοδος να φτάσει το ίδιο ποσοστό αλλαγής με την είσοδο.

Δύο ακέριες διαδικασίες απεικονίζονται στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 Παραδείγματα διαδικασιών ολοκληρώματος.

Στην διαδικασία ολοκληρώματος στάθμης υγρού, το σήμα εισόδου είναι ο ρυθμός ροής εισόδου, και το σήμα εξόδου είναι η στάθμη του υγρού στην δεξαμενή. Στην διαδικασία ολοκληρώματος βρόγχου φύλλου, το σήμα εισόδου είναι η ταχύτητα εισόδου φύλλων και το σήμα εξόδου είναι η απόσταση από τον ιμάντα μέχρι το κάτω μέρος του βρόγχου φύλλου. Τα σήματα εισόδου και εξόδου εκφράζονται ως ποσοστό του πλήρους εύρους κλίμακας. Και στις δύο ακέριες διαδικασίες, η αλλαγή στο σήμα εισόδου κατά το χρονικό διάστημα από t_0 σε t_1 είναι ίσο με το ολοκλήρωμα της διαφοράς μεταξύ του ρυθμού ροής εισόδου και του ρυθμού ροής εξόδου διαιρούμενο με την σταθερά χρόνου ενέργειας ολοκληρώματος (T_i).

Ακέρια ή διαδικασία ράμπας

Εξίσωση στο πεδίο του χρόνου

$$h^*(t_1) - h^*(t_0) = \frac{1}{T_i} \int_{t_0}^{t_1} (q_{in}^* - q_{out}^*) dt$$

Συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{H^*(s)}{Q_{in}^*(s)} = \frac{1}{T_i s}$$

όπου: $h^*(t_0)$ = ομαλοποιημένη έξοδος στο χρόνο t_0
 $h^*(t_1)$ = ομαλοποιημένη έξοδος στο χρόνο t_1
 FS_{in} = πλήρης σειρά κλίμακας εισόδου
 FS_{out} = πλήρης σειρά κλίμακας εξόδου
 q_{in}^* = ομαλοποιημένο ποσοστό ροής εισόδου
 q_{out}^* = ομαλοποιημένο ποσοστό ροής εξόδου
 t = χρόνος
 T_i = σταθερά χρόνου ενέργειας ολοκληρώματος

Εξίσωση διαδικασίας ολοκληρώματος στάθμης υγρού

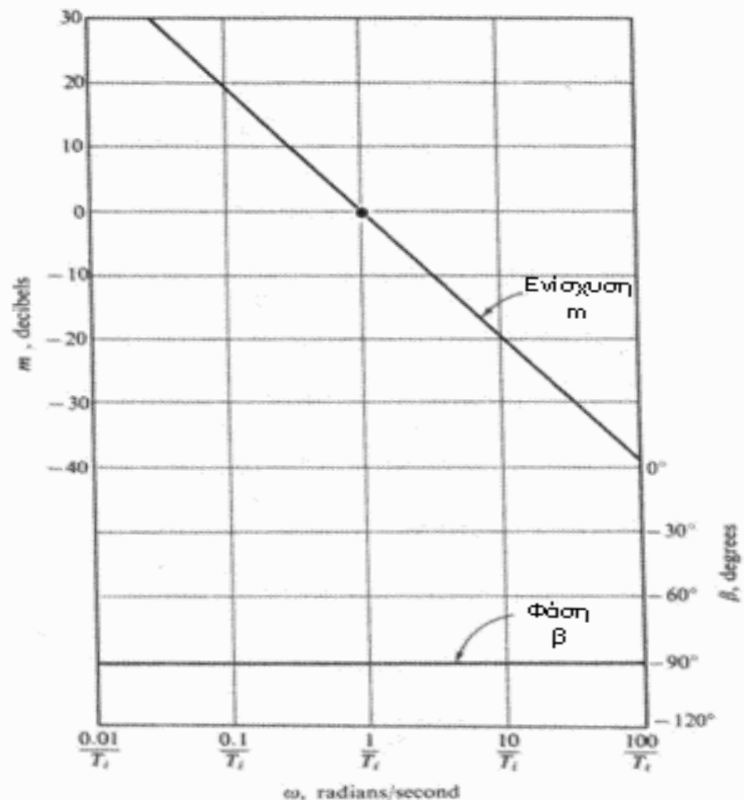
$$T_i = A \left(\frac{FS_{out}}{FS_{in}} \right)$$

όπου: A = η περιοχή της υγρής επιφάνειας της δεξαμενής

Εξίσωση διαδικασίας ολοκληρώματος βρόγχου φύλλου

$$T_i = 2 \left(\frac{FS_{out}}{FS_{in}} \right)$$

Το διάγραμμα Bode μιας διαδικασίας ολοκληρώματος (εικόνα 4.3) αποτελείται από μια ενίσχυση ευθείας γραμμής και γραφήματα φάσης. Η ευθεία ενίσχυσης έχει κλίση -20db ανά δεκάδα αύξησης στην συχνότητα. Η γραμμή φάσης είναι οριζόντια στις -90° . Παρατηρούμε ότι το διάγραμμα Bode της διαδικασίας ολοκληρώματος είναι το ίδιο με το διάγραμμα Bode της μεθόδου ελέγχου ολοκληρώματος. Μια διαδικασία ολοκληρώματος έχει μια ενδογενή ενέργεια ελέγχου μεθόδου ολοκληρώματος.

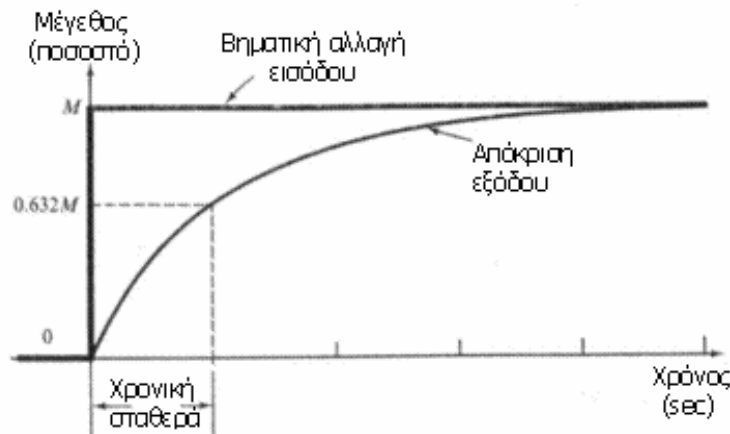


Εικόνα 4.3 Διάγραμμα Bode αέραςιας διαδικασίας.

4.3 Διαδικασία υστέρησης πρώτης τάξης

Η διαδικασία υστέρησης πρώτης τάξης αποτελείται από ένα στοιχείο χωρητικότητας ρυθμισμένο έτσι ώστε η ροή εξόδου υλικού ή ενέργειας να είναι ανάλογη της ποσότητας υλικού ή ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο στοιχείο χωρητικότητας. Για κάθε ρυθμό ροής εισόδου, υπάρχει μια αντίστοιχη ποσότητα αποθηκευμένου υλικού ή ενέργειας που παράγει έναν ρυθμό ροής εξόδου ίσο με την είσοδο. Η διαδικασία υστέρησης πρώτης τάξης είναι μια αυτορυθμιζόμενη διαδικασία διότι παράγει αυτόματα έναν ρυθμό ροής εξόδου που ταυτίζεται με κάθε ρυθμό εισόδου. Αντίθετα, η διαδικασία ολοκληρώματος δεν είναι αυτορυθμιζόμενη.

Η βηματική απόκριση της διαδικασίας υστέρησης πρώτης τάξης παρουσιάζεται στην εικόνα 4.4.



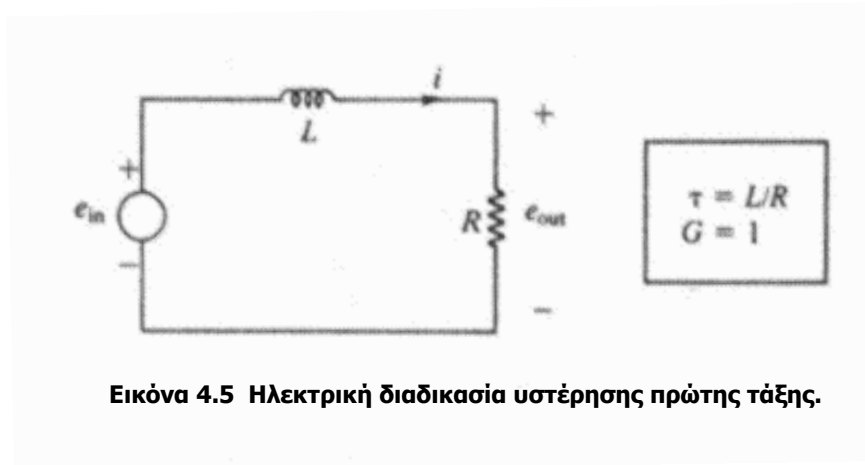
Εικόνα 4.4 Βηματική απόκριση της διαδικασίας υστέρησης πρώτης τάξης.

Πριν την βηματική αλλαγή, ο ρυθμός ροής εισόδου είναι ίσος με τον ρυθμό ροής εξόδου και η στάθμη διατηρείται σταθερή. Η βηματική αλλαγή αποτελείται από την αύξηση του ρυθμού ροής εισόδου. Ας συμβολίσουμε με M την ποσοστιαία αύξηση στον ρυθμό ροής εισόδου. Ο ρυθμός ροής εξόδου είναι ανάλογος της στάθμης, το οποίο δεν αλλάζει αμέσως. Η είσοδος είναι μεγαλύτερη της εξόδου οπότε η στάθμη θα αυξάνεται με ρυθμό ανάλογο της διαφοράς. Καθώς η στάθμη αυξάνεται, η διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου μειώνεται. Αυτό με την σειρά του μειώνει τον ρυθμό με τον οποίο αυξάνεται η στάθμη. Το αποτέλεσμα είναι η καμπύλη απόκρισης εξόδου της εικόνας 4.4.

Η βηματική απόκριση μιας καθυστέρησης πρώτης τάξης μετρείται από την σταθερά χρόνου, η οποία είναι ο αριθμός των δευτερολέπτων που χρειάζεται η έξοδος για να φτάσει το 63.2% της ολικής αλλαγής. Κατά την διάρκεια κάθε επιπρόσθετου διαστήματος ίσου με την σταθερά χρόνου η έξοδος θα φτάνει το 63.2% της εναπομένουσας αλλαγής. Στην εικόνα 4.4 για παράδειγμα, η βηματική διαφορά εισόδου είναι ίση με M . Κατά την διάρκεια του πρώτου διαστήματος σταθεράς χρόνου, η έξοδος αλλάζει κατά μια ποσότητα ίση με $0.632M$ και η εναπομένουσα αλλαγή είναι $M - 0.632M = 0.368M$. Κατά το

δεύτερο διάστημα σταθεράς χρόνου η έξοδος αυξήθηκε κατά $0.623 * 0.368M = 0.232M$. Έτσι μετά από δύο σταθερές χρόνου, η έξοδος θα φτάσει σε $0.632 + 0.232M = 0.864M$. Μετά από πέντε σταθερές η έξοδος θα φτάσει το $0.933M$.

Μια ηλεκτρική διαδικασία υστέρησης πρώτης τάξης απεικονίζεται στην εικόνα 4.5.



Το ηλεκτρικό αυτό κύκλωμα είναι ένα σειριακό κύκλωμα RL. Σε αυτό το κύκλωμα, η είσοδος είναι η πηγή τάσης (e_{in}) και η έξοδος είναι η τάση στα άκρα της αντίστασης (e_{out}). Η ανάλυση ξεκινά με τον νόμο τάσης του Kirchhoff.

$$e_{in} = e_L + e_R$$

Αλλά

$$e_L = L \frac{di}{dt}$$

και

$$i = \frac{e_{out}}{R}$$

Άρα

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{R} \frac{de_{out}}{dt}$$

Αντικαθιστώντας παίρνουμε την ακόλουθη εξίσωση:

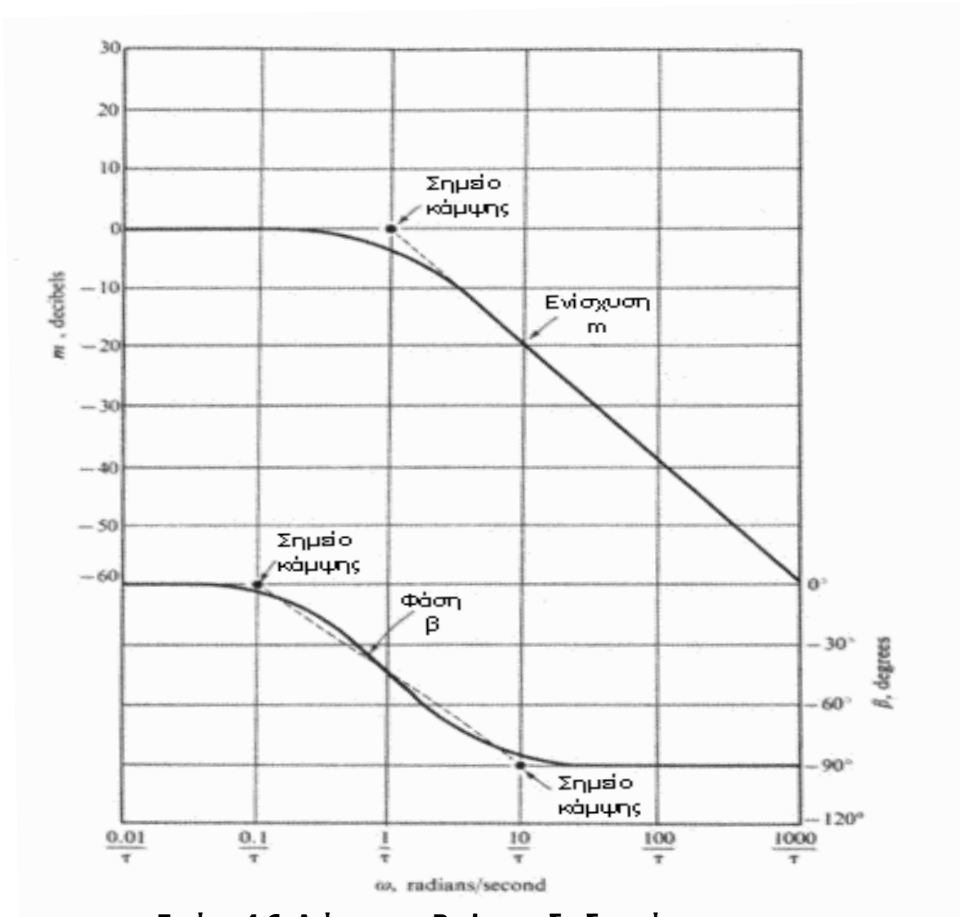
$$\frac{L}{R} = \frac{de_{out}}{dt} + e_{out} = e_{in}$$

Η εξίσωση αυτή είναι η εξίσωση μιας διαδικασίας υστέρησης πρώτης τάξης με σταθερά χρόνου ίση με L/R και ενίσχυση σταθερής κατάστασης ίση με 1.

Το διάγραμμα Bode μιας διαδικασίας υστέρησης πρώτης τάξης με ενίσχυση σταθερής κατάστασης ίση με 1 παρουσιάζεται στην εικόνα 4.6. Η γραμμή ενίσχυσης έχει μια κάμψη στην γωνιακή συχνότητα ίση με τον αντίστροφο της σταθεράς χρόνου. Η συχνότητα αυτή ονομάζεται **συχνότητα σημείου κάμψης**:

$$\omega_b = 1/\tau$$

Η γραμμή φάσης έχει δύο κάμψεις, μία σε κάθε πλευρά της συχνότητας του σημείου κάμψης ω_b . Μια ενίσχυση διαφορετική του ενός χαμηλώνει ή ανεβάζει την γραμμή ενίσχυσης, αλλά δεν αλλάζει το σχήμα αυτής. Η γραμμή φάσης είναι ανεπηρέαστη από την ενίσχυση της διαδικασίας.



Εικόνα 4.6 Διάγραμμα Bode της διαδικασίας υστέρησης πρώτης τάξης.

Διαδικασία υστέρησης πρώτης τάξης

Εξίσωση στο πεδίο του χρόνου

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = Gx$$

Συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{Y}{X} = \frac{G}{1 + \tau s}$$

όπου: G = κατάσταση του κέρδους της διαδικασίας

t = χρόνος, sec

x = είσοδος της διαδικασίας

y = έξοδος της διαδικασίας

τ = χρονική σταθερά, sec

4.4 Διαδικασία νεκρού χρόνου

Μια διαδικασία νεκρού χρόνου είναι μια διαδικασία όπου η μάζα ή η ενέργεια μεταφέρεται από ένα σημείο σε ένα άλλο. Το σήμα εξόδου είναι ίδιο με το σήμα εισόδου εκτός από μια χρονική υστέρηση. Η χρονική αυτή υστέρηση ονομάζεται **υστέρηση νεκρού χρόνου** και συμβολίζεται με t_d . Η υστέρηση νεκρού χρόνου είναι ο χρόνος που χρειάζεται προκειμένου το σήμα να μεταβεί από το σημείο εισόδου στο σημείο εξόδου.

Η βηματική απόκριση μιας διαδικασίας νεκρού χρόνου παρουσιάζεται στην εικόνα 4.7.



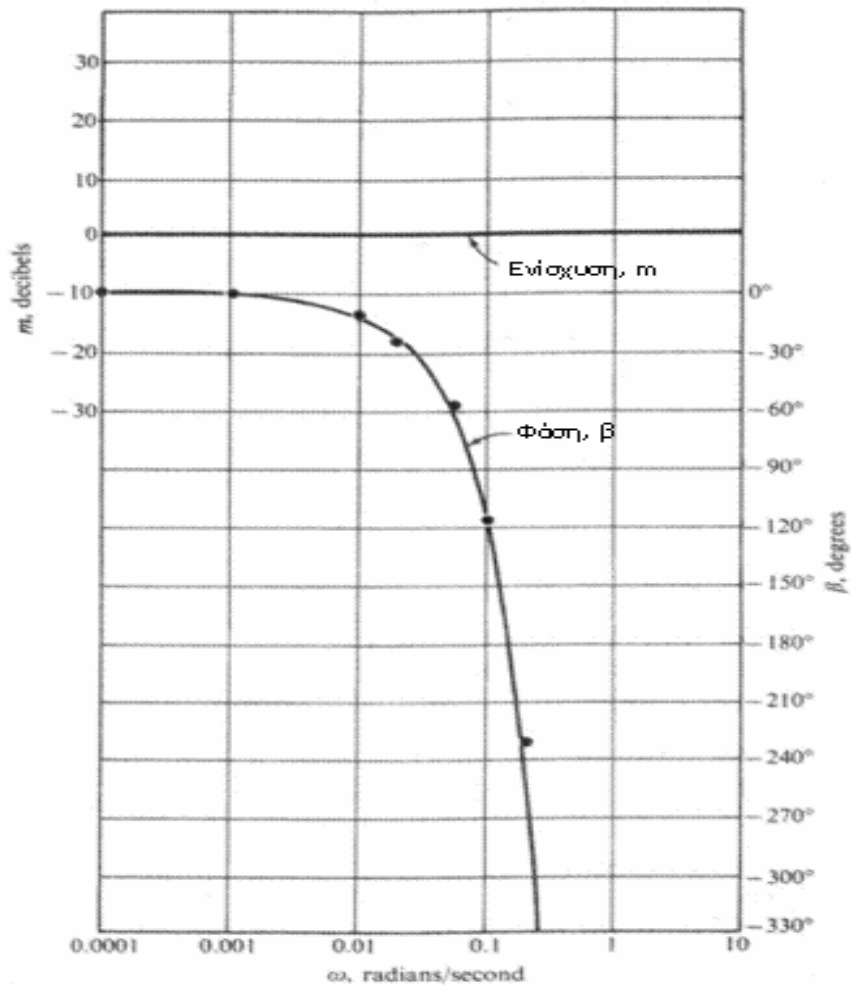
Εικόνα 4.7 Βηματική απόκριση της διαδικασίας νεκρού χρόνου.

Πριν την βηματική αλλαγή, το σήμα εξόδου και το σήμα εισόδου είναι ίσα. Η βηματική αλλαγή αυξάνει το σήμα εισόδου σε μια νέα τιμή στο χρόνο $t = 0$ s. Το σήμα εξόδου παραμένει στην αρχική του τιμή μέχρι τον χρόνο $t = t_d$, οπότε και αλλάζει στην νέα τιμή. Το γράφημα του σήματος εξόδου είναι ίδιο με αυτό του σήματος εισόδου μετακινημένο δεξιά κατά t_d δευτερόλεπτα.

Η απόκριση μιας διαδικασίας νεκρού χρόνου χαρακτηρίζεται από την καθυστέρηση νεκρού χρόνου και τον αριθμό των δευτερολέπτων που παρέρχονται μεταξύ μιας αλλαγής στην είσοδο και της αντίστοιχης αλλαγής στην έξοδο.

Το διάγραμμα Bode μιας διαδικασίας νεκρού χρόνου παρουσιάζεται στην εικόνα 4.8. Η διαδικασία νεκρού χρόνου καθυστερεί το σήμα αλλά δεν αλλάζει το μέγεθος αυτού. Η ενίσχυση είναι ίση με 1 σε όλες τις συχνότητες και η γραμμή ενίσχυσης του διαγράμματος Bode είναι στα 0 dB. Η γωνία φάσης (β) δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\beta = -57.3\omega t_d$$



Εικόνα 4.8 Διάγραμμα Bode της διαδικασίας νεκρού χρόνου.

Διαδικασία νεκρού χρόνου

Εξίσωση στο πεδίο του χρόνου

$$f_o(t) = f_i(t - t_d)$$

$$t_d = \frac{D}{v}$$

Συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{F_o(s)}{F_i(s)} = e^{-t_d s}$$

όπου: D = η απόσταση μεταξύ της εισόδου και της εξόδου, σε m

$f_i(s)$ = σήμα εισόδου

$f_o(s)$ = σήμα εξόδου

t = χρόνος, σε sec ή min

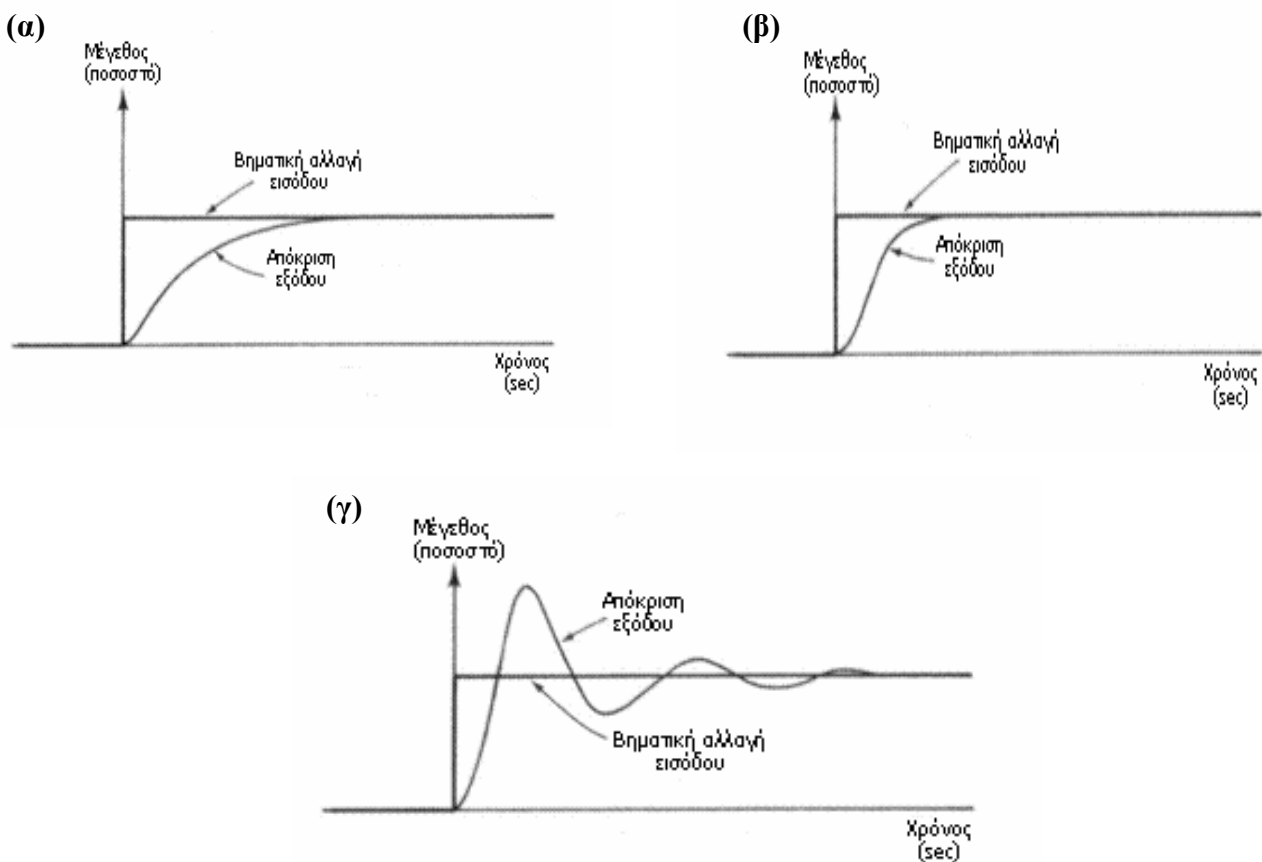
t_d = υστέρηση νεκρού χρόνου, σε sec ή min

v = ταχύτητα του σήματος, σε m/sec

4.5 Διαδικασία υστέρησης δεύτερης τάξης

Μια διαδικασία υστέρησης δεύτερης τάξης έχει δύο στοιχεία χωρητικότητας ή ένα χωρητικότητας και ένα αδρανειακό ή δύο αδρανειακά (τα αδρανειακά στοιχεία είναι η μάζα και η επαγωγή). Τρεις παράμετροι χαρακτηρίζουν την απόκριση ενός συστήματος δεύτερης τάξης. Η πρώτη παράμετρος είναι η συχνότητα αντήχησης, η οποία συμβολίζεται με ω_0 . Η δεύτερη παράμετρος είναι η ποσότητα απόσβεσης στην διαδικασία, η οποία εκφράζεται είτε με τον συντελεστή απόσβεσης (α) είτε με τον λόγο απόσβεσης (ζ). Ο λόγος απόσβεσης είναι απλώς ο συντελεστής απόσβεσης δια την συχνότητα αντήχησης ($\zeta = \alpha / \omega_0$). Η τρίτη παράμετρος είναι η ενίσχυση σταθερής κατάστασης (G).

Η βηματική απόκριση ενός συστήματος δεύτερης τάξης χωρίζεται σε τρεις περιοχές ανάλογα με την τιμή του λόγου απόσβεσης ζ . Αν ο λόγος αυτός είναι μεγαλύτερος του 1, η απόκριση είναι υπεραποσβεσμένη όπως φαίνεται στην εικόνα 4.9α. Αν ο λόγος απόσβεσης είναι μικρότερος του 1, η απόκριση είναι υποαποσβεσμένη όπως φαίνεται στην εικόνα 4.9γ. Αν ο λόγος απόσβεσης είναι ίσος με 1, η απόκριση είναι κρίσιμα αποσβεσμένη όπως φαίνεται στην εικόνα 4.9β. Παρατηρούμε την γρήγορη άνοδο και την ταλάντωση της υποαποσβεσμένης απόκρισης συγκρινόμενη με την αργή άνοδο και την απουσία ταλάντωσης της υπεραποσβεσμένης απόκρισης. Η κρίσιμη απόσβεση έχει την γρηγορότερη άνοδο και καμία ταλάντωση.



Εικόνα 4.9 Βηματική απόκριση της διαδικασίας υστέρησης δεύτερης τάξης.

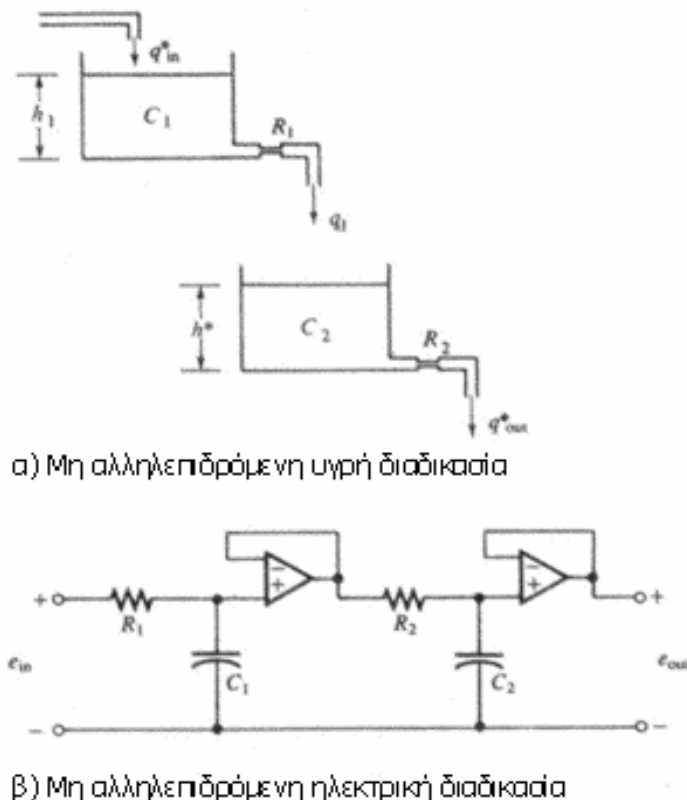
Μια μη αλληλεπιδρόμενη διαδικασία υστέρησης δεύτερης τάξης έχει δύο χωρητικά στοιχεία που διαμορφώνονται έτσι ώστε το δεύτερο χωρητικό στοιχείο να μην έχει καμία επίδραση στο πρώτο. Η παρακάτω εξίσωση είναι η εξίσωση στο πεδίο του χρόνου μιας μη αλληλεπιδρόμενης διαδικασίας με είσοδο ένα σήμα x και έξοδο ένα σήμα y .

$$\tau_1\tau_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + (\tau_1 + \tau_2) \frac{dy}{dt} + y = Gx$$

όπου:

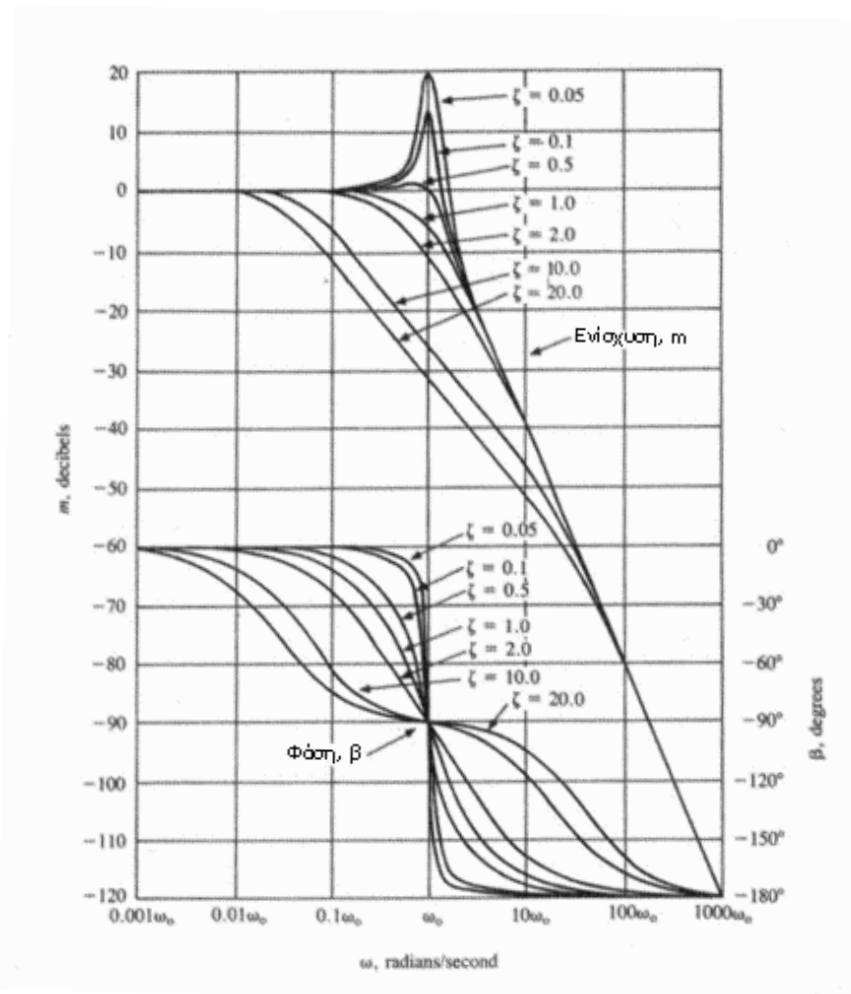
$$\tau_1 = R_1 C_1 \text{ και } \tau_2 = R_2 C_2$$

Στην εικόνα 4.10 παρουσιάζονται παραδείγματα από υγρές και ηλεκτρικές μη αλληλεπιδρόμενες διαδικασίες υστέρησης δεύτερης τάξης. Το σήμα εισόδου της υγρής διαδικασίας είναι το ποσοστό ροής εισόδου στην πρώτη δεξαμενή(q_{in}) και το σήμα εξόδου είναι το επίπεδο του υγρού στη δεύτερη δεξαμενή(h). Το σήμα εισόδου του ηλεκτρικού κυκλώματος είναι η τάση εισόδου(e_{in}) και το σήμα εξόδου είναι η τάση εξόδου(e_{out}).



Εικόνα 4.10 Παραδείγματα μη αλληλεπιδρόμενων διαδικασιών υστέρησης δεύτερης τάξης.

Το διάγραμμα Bode μιας διαδικασίας υστέρησης δεύτερης τάξης παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 4.11 Διάγραμμα Bode της διαδικασίας υστέρησης δεύτερης τάξης.

Η κλίμακα της συχνότητας είναι κανονικοποιημένη σε όρους της συχνότητας αντήρησης και η ενίσχυση της διαδικασίας είναι 1. Ένα εύρος τιμών λόγου απόσβεσης από 0.05 μέχρι 20 απεικονίζει την επίδραση που έχει η απόσβεση στην γωνία φάσης και την ενίσχυση, ειδικότερα όμως στην συχνότητα αντήρησης. Παρατηρούμε την ενίσχυση στην συχνότητα αντήρησης όταν ο λόγος απόσβεσης είναι 0.1 και 0.05. Η διαδικασία με $\zeta = 0.05$ έχει μια έξοδο στην συχνότητα αντήρησης που είναι 10 φορές μεγαλύτερη από ότι η είσοδος. Η επίδραση της ενίσχυσης σταθερής κατάστασης (G) είναι να αυξήσει ή να μειώσει την γραμμή ενίσχυσης χωρίς να αλλάξει το σχήμα αυτής. Η ενίσχυση σταθερής κατάστασης δεν έχει επίδραση στην γραμμή της γωνίας φάσης.

Διαδικασία υστέρησης δεύτερης τάξης

Εξίσωση στο πεδίο του χρόνου

$$A_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + A_1 \frac{dy}{dt} + y = Gx$$

Συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G}{1 + A_1s + A_2s^2}$$

Παράμετροι

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{A_2}}$$

$$a = \frac{A_1}{2A_2}$$

$$\zeta = \frac{a}{\omega_0} = \frac{A_1}{2\sqrt{A_2}} = \frac{A_1\omega_0}{2}$$

$$A_2 = \frac{1}{\omega_0^2}$$

$$A_1 = \frac{2\zeta}{\omega_0} = \frac{2a}{\omega_0^2}$$

όπου: G = η ενίσχυση σταθερής κατάστασης

x = το σήμα εισόδου

y = το σήμα εξόδου

a = ο συντελεστής απόσβεσης, σε second^{-1}

ω_0 = η συχνότητα αντήχησης, σε radian/second

ζ = ο λόγος απόσβεσης

Μη αλληλεπιδρόμενη διαδικασία υστέρησης δεύτερης τάξης

1. Στάθμη υγρού μη αλληλεπιδρόμενης διαδικασίας

Διαδικασία εισόδου: q_{in}^* = ποσοστό ροής εισόδου, επί τοις εκατό του FS_{in}

Διαδικασία εξόδου: h^* = στάθμη στην δεύτερη δεξαμενή, επί τοις εκατό του FS_{out}

$$G = \left(\frac{R_2}{\rho g} \right) \left(\frac{FS_{in}}{FS_{out}} \right)$$

2. Ηλεκτρική μη αλληλεπιδρόμενη διαδικασία

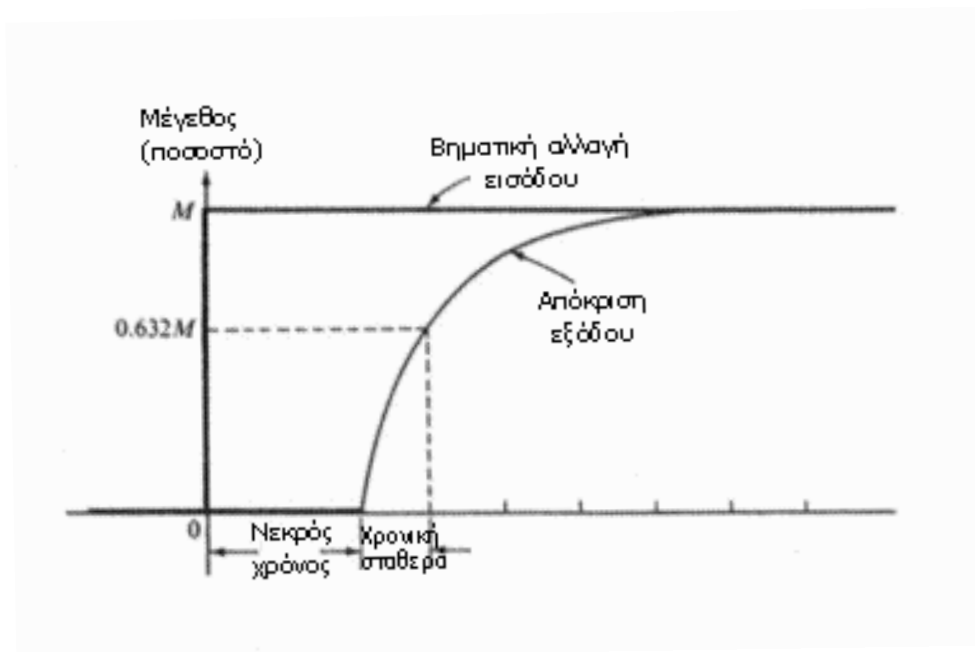
Διαδικασία εισόδου: e_{in} = τάση εισόδου, volt

Διαδικασία εξόδου: e_{out} = τάση πέρα από το C_2 , volt

$$G = 1$$

4.6 Διαδικασία υστέρησης πρώτης τάξης συν νεκρού χρόνου

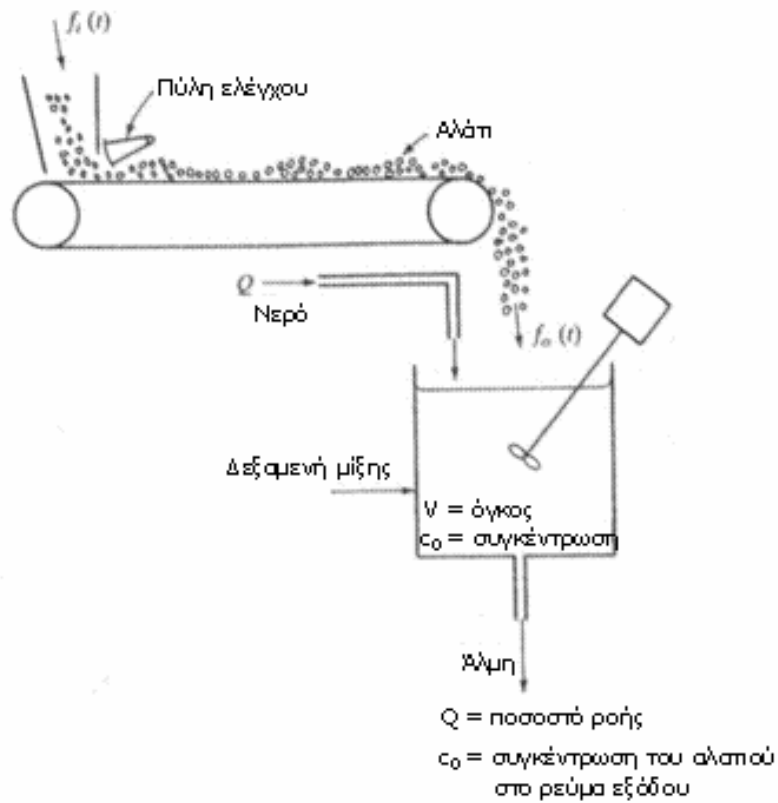
Η διαδικασία υστέρησης πρώτης τάξης συν νεκρού χρόνου είναι ένας σειριακός συνδυασμός των στοιχείων νεκρού χρόνου και υστέρησης πρώτης τάξης. Η βηματική απόκριση, απεικονίζεται στην εικόνα 4.12 χαρακτηρίζεται από την χρονική σταθερά υστέρησης πρώτης τάξης (τ) και την καθυστέρηση νεκρού χρόνου (t_d).



Εικόνα 4.12 Βηματική απόκριση της διαδικασίας υστέρησης πρώτης τάξης συν νεκρού χρόνου.

Η διαδικασία υστέρησης πρώτης τάξης συν νεκρού χρόνου χρησιμοποιείται συχνά σαν μια πρώτη προσέγγιση του μοντέλου πιο σύνθετων διαδικασιών στην ανάλυση και το σχεδιασμό αυτών. Οι τιμές των t_d και τ μπορούν να καθοριστούν από ένα τεστ βηματικής απόκρισης της διαδικασίας όπως αναδεικνύεται στην εικόνα 4.13.

Μια δεξαμενή μίξης χρησιμοποιείται για την μίξη αλατιού και νερού για να δημιουργήσει ένα διάλυμα αλατόνευρο. Ο ρυθμός ροής εισόδου του νερού ρυθμίζεται έτσι ώστε να ταυτίζεται με τον ρυθμό ροής εξόδου του αλατόνευρο. Ο ρυθμός ροής εισόδου του αλατιού ρυθμίζεται ώστε να διατηρηθεί η επιθυμητή συγκέντρωση αυτού στην δεξαμενή μίξης. Ο ρυθμός ροής του αλατιού, $f_i(t)$, είναι το σήμα εισόδου της διαδικασίας. Η συγκέντρωση αλατιού στην δεξαμενή, $c_o(t)$, είναι το σήμα εξόδου της διαδικασίας.



Εικόνα 4.13 Διαδικασία υστέρησης πρώτης τάξης συν νεκρού χρόνου.

Ο ιμάντας μεταφοράς είναι το στοιχείο νεκρού χρόνου και η δεξαμενή μίξης παρέχει το χαρακτηριστικό της υστέρησης πρώτης τάξης. Σε αυτό το παράδειγμα το στοιχείο νεκρού χρόνου προηγείται αυτού της υστέρησης πρώτης τάξης. Παρόλα αυτά αν συμβαίνει το αντίθετο η απόκριση είναι ίση.

- **Introduction To Control System Technology :**
Robert N. Bateson
- **Control Systems Engineering :**
William J. Palm
- **Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου :**
Dorf R.C. – Bishop R.H.
9^η έκδοση
- **Γραμμικά Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου :**
CHARLES E. ROHRS
JAMES L. MELSA
DONALD G. SCHULTZ
- **Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου :**
Μ.Γ. ΣΜΥΡΛΗΣ – Καθηγητής ΑΣΠΑΙΤΕ
Λ.Θ. ΖΑΡΟΓΙΑΝΝΗΣ
- **Μαθήματα Εφαρμοσμένου Αυτόματου Ελέγχου :**
ΜΑΡΓΑΡΗΣ Ν.Ι.
- **Σ.Α.Ε. - Βασικές Έννοιες Με Εφαρμογές :**
ΠΑΡΑΣΚΕΥΟΠΟΥΛΟΥ
1^η ΕΚΔΟΣΗ
- **Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου :**
ΠΑΡΑΣΚΕΥΟΠΟΥΛΟΥ
ΤΟΜΟΣ Α: Ανάλυση ΣΑΕ
1^η ΕΚΔΟΣΗ
- **Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου :**
ΠΑΡΑΣΚΕΥΟΠΟΥΛΟΥ
ΤΟΜΟΣ Β: Σύνθεση ΣΑΕ
1^η ΕΚΔΟΣΗ
- **Σ.Α.Ε. (Αναλογικών & Ψηφιακών Συστημάτων) :**
Σειρά SCHAUM
2^η ΕΚΔΟΣΗ
- **Διαδίκτυο**