

ΠΡΟΤΑΣΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΙΤΛΟΣ

**ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΔΥΟΥΣ
ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΣΤΑΣΙΝΑΚΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΥΠΟΨΗΦΙΟΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

ΚΟΤΖΑΠΕΤΡΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΜΥΤΙΛΗΝΗ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2012

ΠΡΟΤΑΣΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
<u>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.</u>	3
<u>1.1. Γιατί είναι απαραίτητη η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.</u>	3
<u>1.2. Εισαγωγή στα συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.</u>	5
<u>1.2.1. Ιστορική αναδρομή συστημάτων Ενεργού Ιλύος (E.I.).</u>	6
<u>1.2.2. Διεργασία Ενεργού Ιλύος (E.I.).</u>	6
<u>1.3. Ιστορική αναδρομή αυτομάτου ελέγχου διεργασιών.</u>	10
<u>1.4. Τεχνητή Νοημοσύνη (T.N.).</u>	14
<u>1.5. Εισαγωγή στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.</u>	16
<u>1.5.1. Συστήματα αυτομάτου ελέγχου ανοικτού βρόχου</u> <u>(πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα).</u>	16
<u>1.5.2. Συστήματα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου</u> <u>(πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα).</u>	19
<u>2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΚΛΑΣΣΙΚΟ ΑΥΤΟΜΑΤΟ ΕΛΕΓΧΟ.</u>	22
<u>2.1. Γραμμικές και μη – γραμμικές διαφορικές εξισώσεις.</u>	22
<u>2.2. Γραμμικοποίηση συστήματος διεργασίας.</u>	23
<u>2.3. Θεωρία κλασσικού αυτομάτου ελέγχου.</u>	26
<u>2.4. Παράσταση πόλων και μηδενιστών στο μιγαδικό επίπεδο.</u>	32
<u>2.5. Συνόψιση απόκρισης βαθμίδας.</u>	35
<u>2.6. Κλασσικός έλεγχος (κατευθυντές).</u>	51
<u>2.7. Σχεδιασμός αυτομάτων συστημάτων κλασσικού ελέγχου.</u>	54
<u>2.8. Μεθοδολογία του τόπου των ριζών.</u>	55
<u>2.9. Νεκρός χρόνος ή καθυστέρηση διακίνησης.</u>	57
<u>2.10. Διαγράμματα Bode και Nyquist.</u>	58
<u>3. ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ (E.I.).</u>	59
<u>3.1. Αισθητήρες και λάθη στην (E.I.).</u>	59
<u>3.2. Παραδείγματα στρατηγικών ελέγχου μίας παραμέτρου</u>	59

και πολλών Παραμέτρων στην (Ε.Ι.).	
3.3. Αλληλεπίδραση βρόχων στην (Ε.Ι.).	60
4. ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ.	61
4.1. Σχέση μεταξύ εξισώσεων κατάστασης και μήτρας μεταφοράς.	61
4.2. Γραμμικοποίηση των εξισώσεων του πολυμεταβλητού συστήματος.	64
4.3. Ελεγχιμότητα – Παρατηρησιμότητα.	67
4.4. Μοντέρνος έλεγχος.	68
4.5. Βέλτιστος έλεγχος.	70
4.6. Γραμμικός – Τετραγωνικός έλεγχος.	71
4.7. Έλεγχος με βέλτιστο ρυθμιστή.	72
5. ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	74
5.1. Γενικά σχόλια για τη βιβλιογραφία.	74
5.2. Κενά βιβλιογραφίας – Κριτική βιβλιογραφίας.	86
6. ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	89
7. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	92
8. ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ	95
9. ΠΡΟΟΔΟΣ ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΓΙΝΕΙ.	97
10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	99

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Γιατί είναι απαραίτητη η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

Τα υγρά απόβλητα αποτελούνται συνήθως από 99% νερό και χαρακτηρίζονται από το μέγεθος της παροχής τους, από τη φυσική τους κατάσταση, τις χημικές ενώσεις και τα βακτηρίδια και άλλους μικροοργανισμούς που περιέχουν.

Τα υγρά απόβλητα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες. Αυτά που προέρχονται από τις κατοικίες, αυτά που προέρχονται από εμπορικά καταστήματα, από τη βιομηχανία, από τη γεωργία και νερό απορροής στη διάρκεια βροχοπτώσεων. Τα υγρά απόβλητα από κατοικίες μεταφέρουν στη μάζα τους ανθρώπινα απόβλητα, νερό που προέρχεται από το πλύσιμο ρούχων, από τον καθαρισμό του σώματος (μπάνιο), την προετοιμασία του φαγητού και άλλου είδους απόβλητα. Όλα αυτά χαρακτηρίζονται ως οικιακά απόβλητα. Υγρά απόβλητα από εμπορικά καταστήματα και καταστήματα παροχής υπηρεσιών που εξυπηρετούν μια κοινότητα, ονομάζονται εμπορικά απόβλητα. Υγρά απόβλητα από εργοστάσια παραγωγής προϊόντων ή εργοστάσια διαφόρων διεργασιών ονομάζονται βιομηχανικά απόβλητα. Τα απόβλητα αυτού του τύπου έχουν μεγάλες διακυμάνσεις στην παροχή τους, στην σύστασή τους και έχουν υψηλές συγκεντρώσεις επικίνδυνων ουσιών από τα οικιακά απόβλητα. Τα υγρά απόβλητα απορροής που χαρακτηρίζονται και ως υγρά απόβλητα βροχοπτώσεων είναι αυτά τα οποία ρέουν πάνω στο έδαφος για να καταλήξουν σε κάποιο κανάλι απορροής.

Όλες οι κατηγορίες υγρών αποβλήτων είναι πιθανό να μεταφέρουν παθογόνους μ/σμούς που μπορούν να μεταδώσουν ασθένειες τόσο στον άνθρωπο όσο και στα ζώα. Περιέχουν οργανική ύλη που προκαλεί δυσάρεστη οσμή και δημιουργεί προβλήματα υγείας. Έχουν διαλυμένες θρεπτικές ουσίες που προκαλούν ευτροφισμό στους υδάτινους αποδέκτες (λίμνες, ποτάμια, θάλασσα) και προκαλούν κατάρρευση στα οικοσυστήματα που υπάρχουν εκεί. Η κατάλληλη συλλογή και επεξεργασία τους πριν την απόρριψή τους είναι πλέον αυτονόητη και επιβάλλεται νομικά σε μια σύγχρονη κοινωνία. Η πραγματικότητα πάντως είναι ότι το 90% των υγρών αποβλήτων που παράγονται παγκοσμίως δεν υφίστανται καμιά επεξεργασία και

προκαλούν τεράστια μόλυνση στους υδάτινους αποδέκτες. Αυτό συμβαίνει κατά κανόνα σε όλες τις φτωχές χώρες.

Τα απόβλητα χαρακτηρίζονται όσον αφορά τη ζημιά που κάνουν στο περιβάλλον από το BOD (biological oxygen demand) και το COD (chemical oxygen demand). Η οργανική ύλη που μεταφέρουν τα υγρά απόβλητα έχει δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον. Το BOD είναι ο δείκτης μέτρησης της στέρησης οξυγόνου στο νερό που προκαλείται από βιοδιασπώμενα απόβλητα ενώ το COD είναι ένας δείκτης που μετρά τη μείωση οξυγόνου στο νερό που προκαλείται από ρυπαντές που οξειδώνονται (χημικές ενώσεις). Αυτή η μείωση του οξυγόνου στον υδάτινο αποδέκτη σκοτώνει όλα τα αερόβια πλάσματα, από ψάρια μέχρι μικρούς οργανισμούς.

Μια άλλη επίπτωση των υγρών αποβλήτων είναι ότι ακόμα και αν μεταφέρουν επικίνδυνα χημικά σε μικρές συγκεντρώσεις αυτά συσσωρεύονται με την πάροδο του χρόνου στους ιστούς ζώων (π.χ. ψάρια) αλλά και στον άνθρωπο που καταναλώνει τα μολυσμένα ψάρια.

Ο ευτροφισμός όπως αναφέραμε και προηγουμένως είναι ακόμα ένα σημαντικό πρόβλημα που δημιουργεί η χωρίς επεξεργασία απόρριψη υγρών αποβλήτων σε λίμνες, ποτάμια και θάλασσα. Ο ευτροφισμός οφείλεται στα θρεπτικά συστατικά που πολλές φορές μεταφέρουν τα απόβλητα (νιτρικά και φωσφορικά άλατα). Όταν λοιπόν ένα οικοσύστημα υφίσταται μια αύξηση στα θρεπτικά συστατικά τα φυτά είναι αυτά που ωφελούνται. Στα υδρόβια οικοσυστήματα είδη όπως είναι τα άλγη πολλαπλασιάζονται πάνω από τα φυσιολογικά όρια. Τα άλγη αυτά εμποδίζουν το ηλιακό φως από το να φτάσει στους οργανισμούς που ζούν στο βυθό και προκαλούν μεγάλες διακυμάνσεις στο διαλυμένο στο νερό οξυγόνο. Το οξυγόνο το χρειάζονται όλοι οι αερόβιοι οργανισμοί. Στον ευτροφισμό κατά τη διάρκεια της μέρας υπάρχει πλεόνασμα διαλυμένου οξυγόνου λόγω της φωτοσύνθεσης του φυτοπλαγκτόν (άλγη), κατά τη διάρκεια της νύχτας όμως το οξυγόνο μειώνεται δραστικά τόσο από τα ίδια τα άλγη τα οποία αναπνέουν και το καταναλώνουν όσο και από τους μ/σμούς που τρέφονται από τα νεκρά άλγη και καταναλώνουν και αυτοί οξυγόνο. Όταν τα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου μειωθούν σημαντικά τα ψάρια καθώς και άλλα ζώα πεθαίνουν από ασφυξία. Σαν αποτέλεσμα λοιπόν ζωντανοί οργανισμοί όπως τα ψάρια οι γαρίδες και κυρίως ζώα που ζουν στο βυθό και μέσα στην άμμο πεθαίνουν. Σε περιπτώσεις που το φαινόμενο του ευτροφισμού είναι ιδιαίτερα έντονο οι αναερόβιες συνθήκες ευνοούν την ανάπτυξη βακτηρίων όπως τα *Clostridium botulinum* τα οποία παράγουν τοξίνες θανατηφόρες τόσο για τα πουλιά όσο και για τα θηλαστικά. Οι

περιοχές στις οποίες συμβαίνει αυτό ονομάζονται νεκρές ζώνες. Βιβλ. [1], [63], [64], [65], [66].

1.2. Εισαγωγή στα συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων είναι η διεργασία αφαίρεσης ρυπαντών από τα απόβλητα. Η διεργασία αυτή περιλαμβάνει φυσικές, χημικές και βιολογικές επιμέρους διεργασίες για να αφαιρέσουν τους ρυπαντές αυτούς. Ο σκοπός της επεξεργασίας είναι να παράγει ένα ασφαλές για το περιβάλλον υγρό προϊόν και ένα στερεό προϊόν (λάσπη) ασφαλές όταν απορρίπτεται αλλά και όταν χρησιμοποιείται ως λίπασμα. Χρησιμοποιώντας εξελιγμένη τεχνολογία έχουμε φτάσει στο σημείο να παράγουμε νερό τόσο υψηλής καθαρότητας που είναι πόσιμο για τον άνθρωπο. Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων χωρίζεται γενικά σε τρία στάδια, την πρωτοβάθμια, την δευτεροβάθμια και την τριτοβάθμια επεξεργασία.

- Η πρωτοβάθμια επεξεργασία αποτελείται από προσωρινή παραμονή των λυμάτων σε μια δεξαμενή καθίζησης όπου τα βαρύτερα από το νερό στερεά έχουν το χρόνο να καθιζάνουν ενώ τα ελαιώδη, λιπώδη και άλλα συστατικά ελαφρύτερα του νερού να επιπλεύσουν. Τα καθιζάνοντα και επιπλέοντα συστατικά αφαιρούνται και τα απόβλητα οδηγούνται στη δευτεροβάθμια επεξεργασία για περαιτέρω καθαρισμό.
- Η δευτεροβάθμια επεξεργασία αφαιρεί διαλυμένη και αιωρούμενη βιολογική ύλη. Η δευτεροβάθμια επεξεργασία συνήθως συντελείται με τη βοήθεια μ/σμών σε ένα σταθερό περιβάλλον. Η δευτεροβάθμια επεξεργασία απαιτεί μια δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης για το διαχωρισμό των μ/σμών από το υπόλοιπο υγρό το οποίο οδηγείται στην τριτοβάθμια επεξεργασία. Ως δευτεροβάθμια επεξεργασία χρησιμοποιείται συνήθως η διεργασία της ενεργού ιλύος η οποία περιλαμβάνει εκτός της απομάκρυνσης του άνθρακα και την απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών (νιτρικά και φωσφορικά άλατα).
- Η τριτοβάθμια επεξεργασία ορίζεται συνήθως ως το οτιδήποτε επιπλέον μπορεί να καθαρίσει ακόμα περισσότερο το υγρό των αποβλήτων

προκειμένου αυτά να μπορούν να αποβληθούν χωρίς επιπτώσεις ακόμα και σε εύθραυστα οικοσυστήματα (εκβολές ποταμών, μικρά ποτάμια, κοραλλιογενείς ύφαλοι κ.α.). Το επεξεργασμένο νερό απολυμαίνεται με χημικά ή φυσικά μέσα (π.χ. φιλτράρισμα). Πολλές φορές χρησιμοποιείται ως νερό για πότισμα καλλιεργειών.

Εκτός των τριών παραπάνω διεργασιών πρέπει να αναφερθεί και η προ – επεξεργασία η οποία αφαιρεί ογκώδη αντικείμενα που είναι εύκολο να αφαιρεθούν πρωτού προκαλέσουν βλάβες ή φράξουν αντλίες.

Σαν προ – επεξεργασία χρησιμοποιείται το κοσκίνισμα των αποβλήτων από μεταλλικά πλέγματα ή μεταλλικές μπάρες (εσχάρες). Βιβλ. [1], [63], [64], [65], [66].

1.2.1. Ιστορική αναδρομή συστημάτων Ενεργού Ιλύος Ε.Ι.

Η μέθοδος Ενεργού Ιλύος Ε.Ι. ανακαλύφθηκε το 1913 στην Αγγλία από δύο μηχανικούς, τον Edward Arden και W.T. Locket οι οποίοι διεξήγαγαν έρευνα για την εταιρία επεξεργασίας αποβλήτων που καταλήγουν σε ποτάμια Davyhulme στην πόλη Manchester. Ο δόκτωρ G. Fowler που βελτίωσε την διεργασία πρέπει επίσης να αναφερθεί αλλά ήταν οι Arden και Locket που την ανακάλυψαν. Και οι τρεις αυτοί άνδρες μπορούν να χαρακτηριστούν περισσότερο χημικοί παρά μηχανικοί. Αυτοί διεξήγαγαν πειράματα επεξεργασίας αποβλήτων σε έναν βιολογικό αντιδραστήρα που λειτουργούσε τμηματικά (γεμίζοντας και απορρίπτοντας) αυτός ο αντιδραστήρας ήταν πρόδρομος του αντιδραστήρα sequencing batch και παρήγαγε ένα υψηλής ποιότητας υγρό. Πιστεύοντας (εσφαλμένα) ότι η ιλύς ενεργοποιούνταν με παρόμοιο τρόπο με τον ενεργό άνθρακα ονόμασαν τη διεργασία ‘διεργασία ενεργού ιλύος’. Μετά από πολλά χρόνια συνειδητοποιήθηκε ότι αυτό που είχε επιτευχθεί δεν ήταν τίποτα περισσότερο από μια μέθοδος αύξησης της συγκέντρωσης μ/σμών που αποσύνδεε τον υδραυλικό χρόνο παραμονής (διατηρώντας τον σε χαμηλές τιμές για να έχει τη δυνατότητα μια μικρή σε διαστάσεις μονάδα να επεξεργάζεται μεγάλο όγκο αποβλήτων) από το χρόνο παραμονής αιωρούμενων στερεών (διατηρώντας τον σε υψηλές τιμές για να προκύψει ένα προϊόν με χαμηλές τιμές BOD και χαμηλή συγκέντρωση αμμωνίας). Βιβλ. [1], [63], [64], [65], [66]

1.2.2. Διεργασία Ενεργού Ιλύος (Ε.Ι.).

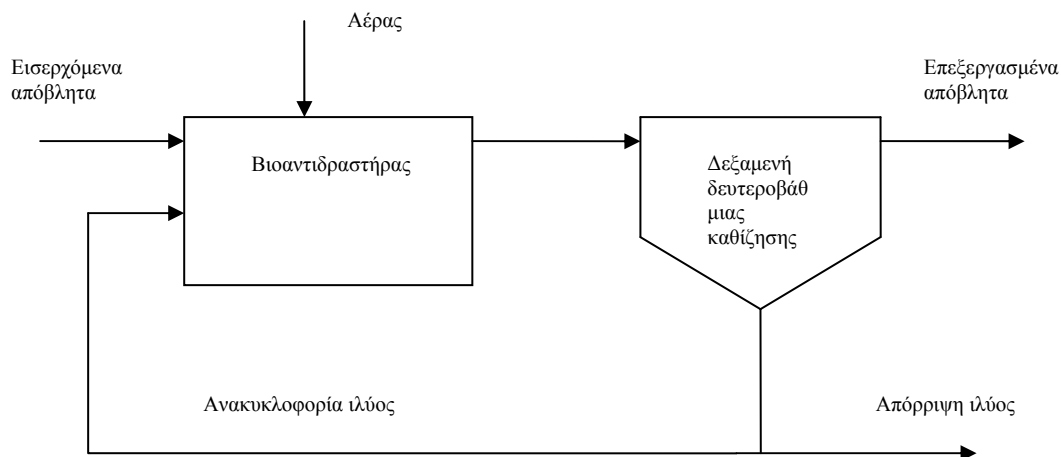
Η Ενεργός Ιλύς (E.I) είναι μια διεργασία επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων χρησιμοποιώντας αέρα και αερόβιους μ/σμούς όπως τα βακτήρια και τα πρωτόζωα. Αυτό που κάνει η διεργασία ενεργού ιλύος είναι να παίρνει τα υγρά απόβλητα που έχουν ήδη περάσει από την πρωτοβάθμια επεξεργασία και να τα επεξεργάζεται ακόμα περισσότερο με τους παρακάτω τρόπους.

- Οξειδώνοντας την ύλη που περιέχει άνθρακα (οργανική ύλη).
- Απομακρύνει τα θρεπτικά συστατικά που προκαλούν ευτροφισμό.
- Απομακρύνει παγιδευμένα στην υγρή μάζα αέρια όπως διοξείδιο του άνθρακα (που γίνεται ανθρακικό οξύ ρίχνοντας το PH) και το αέριο άζωτο.
- Δημιουργεί μια βιομάζα η οποία καθιζάνει εύκολα στη δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης.
- Έτσι επιτυγχάνει η διεργασία αυτή ένα επεξεργασμένο νερό που έχει πολύ μικρή συγκέντρωση τόσο σε διαλυμένη ύλη όσο και σε ύλη σωματιδίων.

Η διεργασία όπως ήδη αναφέραμε εισάγει αέρα και άρα οξυγόνο σε ένα υγρό που έχει ήδη περάσει από την πρωτοβάθμια επεξεργασία και με τη βοήθεια αερόβιων μ/σμών μειώνει τη συγκέντρωση οργανικής ύλης. Αυτή η βιομάζα των μ/σμών έχει καφέ χρώμα και αποτελείται από σαπροτροφικά βακτηρίδια αλλά και πρωτόζωα όπως αμοιβάδες, σπιροτρίχες κ.α..

Η διεργασία ενεργού ιλύος για την απομάκρυνση του βιολογικού άνθρακα περιλαμβάνει.

- Μια δεξαμενή αερισμού όπου ο αέρας (οξυγόνο) έρχεται σε επαφή με το υγρό των αποβλήτων μέσω συμπιεστών που παράγουν φυσαλίδες σε μια δεξαμενή.
- Μια δεξαμενή καθίζησης που είναι γνωστή και ως δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης η οποία επιτρέπει την καθίζηση της βιομάζας μ/σμών διαχωρίζοντας ουσιαστικά τη λάσπη από το καθαρό επεξεργασμένο νερό. Σχήμα 1. – 1.



Σχήμα 1. – 1 ‘Διεργασία (E.I.) για απλή απομάκρυνση οργανικού άνθρακα’.

Ο συνδυασμός αποβλήτων και βιομάζας είναι γνωστός ως μικτό υγρό. Σε όλα τα εργοστάσια ενεργού ιλύος όταν τα απόβλητα έχουν υποστεί αρκετή επεξεργασία το μικτό υγρό οδηγείται σε δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης και το επεξεργασμένο υγρό που υπερχειλίζει από τη δεξαμενή είναι σημαντικά καθαρότερο αλλά συνήθως οδηγείται σε επιπλέον επεξεργασία πριν αποβληθεί στο περιβάλλον. Μέρος του καθιζάνοντος υλικού (ιλύς) επιστρέφει στη δεξαμενή αερόβιας επεξεργασίας για να αφομοιώσει τα νέα απόβλητα που εισέρχονται στη δεξαμενή αυτή (βιολογικός αντιδραστήρας). Αυτό το τμήμα της ιλύος λέγεται ανακυκλοφορούσα ενεργός ιλύς. Η ποσότητα της ιλύος που δεν ανακυκλοφορεί αποβάλλεται από τη διεργασία για να διατηρηθεί η αναλογία βιομάζας προς βιοδιασπώμενο υπόστρωμα σταθερή. Η απορριπτόμενη ιλύς συσσωρεύεται σε μια δεξαμενή για να χωνευτεί είτε αερόβια είτε αναερόβια πριν απορριφθεί.

Πολλά εργοστάσια επεξεργασίας αποβλήτων χρησιμοποιούν αξονικές αντλίες για να μεταφέρουν το αναμεμιγμένο υγρό που περιέχει νιτρικά από την δεξαμενή αερόβιας επεξεργασίας στη δεξαμενή αναερόβιας επεξεργασίας για απονιτροποίηση. Αυτές οι αντλίες είναι γνωστές και ως αντλίες εσωτερικής ανακυκλοφορίας αναμεμιγμένου υγρού. Τα απόβλητα που εισέρχονται στη δευτεροβάθμια επεξεργασία αναμιγνύονται με το αναμεμιγμένο υγρό που περιέχει νιτρικά στην αναερόβια δεξαμενή για να συμβεί η απονιτροποίηση. Για να αναμιχθούν αυτές οι

δύο ροές χρησιμοποιούνται μεγάλοι αναμίκτες. Ενεργός ιλύς είναι το ενεργό βιολογικό υλικό (λάσπη) που παράγεται σε ένα εργοστάσιο ενεργού ιλύος.

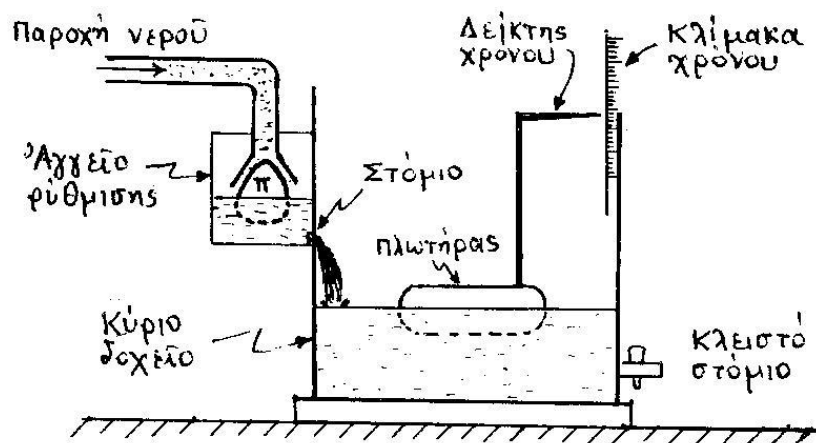
Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι η διεργασία αυτή καταφέρνει κάτι που είναι δύσκολο να γίνει με άλλα μέσα. Αναφερόμαστε στην απομάκρυνση του βιολογικού υλικού το οποίο είναι διαλυμένο στο υγρό. Το ότι είναι διαλυμένο σημαίνει ότι αποτελεί ομοιογενές μίγμα. Ένα ετερογενές μίγμα μπορεί να διαχωριστεί εύκολα με φυσικές μεθόδους όπως η καθίζηση ή το φιλτράρισμα. Ένα ομοιογενές μίγμα όμως είναι δύσκολο ή αντισυμβατικό να διαχωριστεί με φυσικές μεθόδους όπως η αντίστροφη όσμωση ή η απόσταξη. Αυτό που γίνεται είναι ότι αφήνουμε τους μ/σμούς να αφομοιώσουν τη διαλυμένη οργανική ύλη που αποτελεί τροφή για αυτούς. Έτσι η διαλυμένη οργανική ύλη μετατρέπεται σε βιομάζα μ/σμών η οποία βιομάζα όμως και εδώ είναι το αξιοσημείωτο αποτελείται από αιωρούμενα στερεά τους μ/σμούς οι οποίοι καθιζάνουν εύκολα σε μια δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης. Εκτός από τη διαλυμένη οργανική ύλη υπάρχει και οργανική ύλη σε μορφή σωματιδίων η οποία έχει ίδια πυκνότητα με το νερό και δεν καθιζάνει ούτε επιπλέει. Αυτή επίσης αφομοιώνεται από τους μ/σμούς, ενσωματώνεται στη βιομάζα και διαχωρίζεται από το υγρό στη δευτεροβάθμια δεξαμενή. Πρέπει να πούμε ότι ένα σημαντικό μέρος της οργανικής ύλης που απορροφάται από τους μ/σμούς ως τροφή υφίσταται υδρόλυση και μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό απελευθερώνοντας ενέργεια που χρειάζονται οι μ/σμοί για να ζήσουν. Βιβλ. [1], [1], [63], [64], [65], [66].

1.3. Ιστορική αναδρομή αυτομάτου ελέγχου διεργασιών

Τις πρώτες εφαρμογές του αυτομάτου ελέγχου βρίσκει κανείς στον ελληνικό πολιτισμό του τρίτου αιώνα (π.Χ.). Το αρχαιότερο παράδειγμα ελέγχου με ανάδραση είναι το υδάτινο ρολόι που κατασκεύασε ο Κτησίβιος στην Αλεξάνδρεια κατά τον 3^ο (π.Χ.) αιώνα.

Στη διάταξη αυτή ένα κύριο δοχείο χρησίμευε για τη συσσώρευση της ροής του νερού. Με τη διατήρηση σταθερής της εισροής, η στάθμη του νερού παρείχε μέτρηση του χρόνου (σχήμα 1. – 2). Για τη λύση δε αυτού του προβλήματος όπως αναφέρουν

αρχαία αραβικά κείμενα, ο Κτησίβιος χρησιμοποίησε ένα πλωτήρα κωνικού σχήματος.

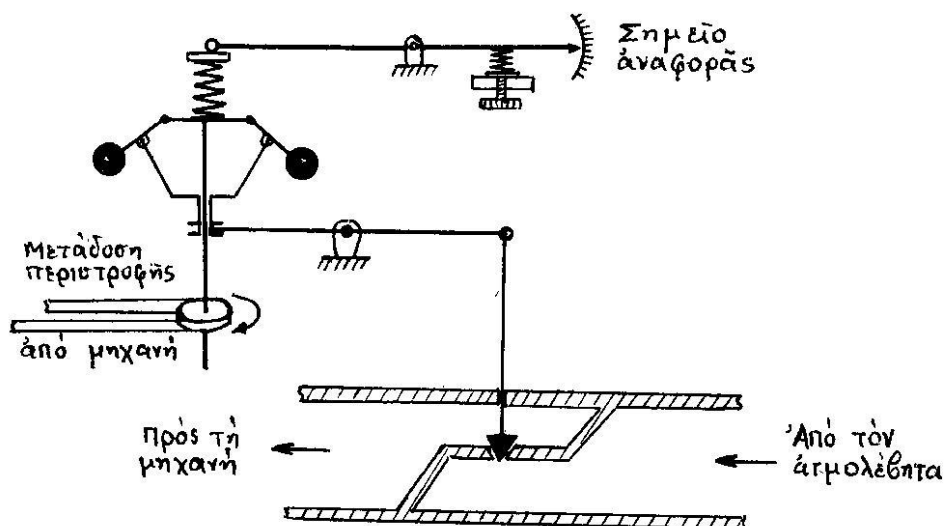


Σχήμα 1. – 2 ‘Υδάτινο ρολόι του Κτησιβίου.’ Βιβλ. [2]

Ο Ήρων από την Αλεξάνδρεια που έζησε τον πρώτο μ.Χ. αιώνα, δημοσίευσε ένα βιβλίο με τίτλο ‘Πνευματικά’, στο οποίο περιέγραφε διάφορα είδη μηχανισμών ελέγχου της στάθμης νερού με τη χρήση πλωτήρων – ρυθμιστών.

Κατά το 15^ο αιώνα οι Ολλανδοί κάνοντας εκτεταμένη χρήση της ενέργειας του ανέμου για άντληση και αποχέτευση του νερού από τη χώρα προς την υψηλότερη στάθμη της θάλασσας αύξησαν την αποδοτικότητα των ανεμόμυλων με την προσθήκη μιας δευτερεύουσας έλικας σε ορθή γωνία ως προς την κύρια έλικα.

Ο Dennis Papin εφεύρε το 1681 τον πρώτο ρυθμιστή πίεσης ατμολεβήτων, που είχε τη μορφή ρυθμιστή ασφαλείας παρόμοιου με τη σημερινή βαλβίδα ασφαλείας χύτρας υψηλής πίεσης. Οι πρώτοι αυτόματοι ρυθμιστές με ανάδραση (automatic feedback controllers) που χρησιμοποιήθηκαν στη βιομηχανία ήταν οι μηχανισμοί της περιόδου της ατμομηχανής που εμφανίστηκαν κατά τον 18^ο αιώνα. Ο φυγοκεντρικός ρυθμιστής του James Watt (1788) που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της ταχύτητας των ατμομηχανών ήταν πολύ διαδεδομένος (σχήμα 1. – 2). Με την αύξηση της ταχύτητας προκαλούνταν το κλείσιμο της βαλβίδας παροχής ατμού.



Σχήμα 1. – 3 ‘Ρυθμιστής του Watt.’ Βιβλ. [2]

Ο J. C. Maxwell το 1868 ήταν ο πρώτος που κατάστρωσε μαθηματική θεωρία ελέγχου χρησιμοποιώντας σαν μοντέλο τη διαφορική εξίσωση ενός κατευθυντή. Η μελέτη του Maxwell περιστράφηκε γύρω από τη συμπεριφορά του συστήματος. Βιβλ. [2], [67], [68].

Το 1920 σημειώθηκε σημαντική βελτίωση χάρη στους Hazen και Nyquist. Το 1932 ο Nyquist ανέπτυξε μια σχετικά απλή μέθοδο προσδιορισμού ευστάθειας συστημάτων κλειστού βρόχου.

Η ταχεία πρόοδος της ηλεκτρονικής στις Η.Π.Α. έδωσε ισχυρή ώθηση στην τεχνολογία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

Στις Η.Π.Α. μεγάλη ώθηση στην αξιοποίηση της ανάδρασης έδωσε η εισαγωγή των ηλεκτρονικών ενισχυτών στις τηλεπικοινωνίες από τους Bode, Nyquist και Black.

Ισχυρή ώθηση στη θεωρία και πρακτική του αυτομάτου ελέγχου δόθηκε κατά τη διάρκεια του 2^{ου} παγκοσμίου πολέμου οπότε χρειάστηκε να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν αυτόματα συστήματα κατεύθυνσης αεροσκαφών και υποβρυχίων, αυτόματα συστήματα σκόπευσης πυροβόλων, συστήματα ελέγχου κεραιών radar και άλλα στρατιωτικά συστήματα βασιζόμενα στις αρχές του αυτομάτου ελέγχου με ανάδραση.

Η πολυπλοκότητα και η επιδιωκόμενη απόδοση αυτών των συστημάτων απαίτησαν διεύρυνση των μέχρι τότε υπάρχουσών τεχνικών γνώσεων και την επινόηση νέων μεθόδων.

Πριν το 1940 η σχεδίαση των συστημάτων ελέγχου κατά το πλείστον ήταν τέχνη που ακολουθούσε τη μεθοδολογία ‘δοκιμής – σφάλματος’ (trial and error). Στη δεκαετία 1940 – 1950 αναπτύχθηκαν πολλές μαθηματικές μέθοδοι. Σ’ αυτή τη δεκαετία αναπτύχθηκαν μέθοδοι ανάλυσης στο πεδίο συχνοτήτων με αποτέλεσμα ο μηχανικός να μπορεί να σχεδιάζει γραμμικά συστήματα ελέγχου με ανάδραση (linear feedback control systems) τα οποία ανταποκρίνονταν σε προκαθορισμένες απαιτήσεις απόδοσης.

Οι τεχνικές του πεδίου συχνότητας εξακολούθησαν να κυριαρχούν στα συστήματα ελέγχου και μετά τον πόλεμο με αυξανόμενη τη χρήση του μετασχηματισμού Laplace και του επιπέδου της μιγαδικής συχνότητας. Κατά τη δεκαετία 1950 – 1960 η προσοχή συγκεντρώθηκε στην ανάπτυξη και χρήση μεθόδων στο μιγαδικό επίπεδο. Ιδιαίτερα αξίζει να αναφερθεί η μέθοδος του τόπου των ριζών (root locus method) για το σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου.

Μετά ήρθαν στο προσκήνιο οι αναλογικοί και ψηφιακοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν ως συνιστώσες ελέγχου (control components). Τα νέα αυτά μέσα ελέγχου είχαν την ικανότητα να εκτελούν ταχύτατους και ακριβείς υπολογισμούς πράγμα που δεν ήταν εφικτό προηγουμένως με τα μηχανικά μέσα ελέγχου.

Η χρήση των μεθόδων απόκρισης συχνότητας (frequency response) και τόπου των ριζών (root locus) που αποτελούν τον πυρήνα της κλασσικής θεωρίας ελέγχου οδηγεί σε συστήματα ευσταθή που ικανοποιούν ορισμένες επιθυμητές απαιτήσεις λειτουργίας. Αλλά τα συστήματα αυτά γενικά δεν είναι βέλτιστα. Μετά το 1958 – 1959 το επίκεντρο της προσοχής στα προβλήματα σχεδιασμού συστημάτων ελέγχου μετατοπίστηκε από το στοιχειώδη σχεδιασμό συστημάτων προορισμένων απλώς και μόνο για κάποια λειτουργία στο σχεδιασμό βέλτιστων συστημάτων ανταποκρινομένων σε προκαθορισμένα κριτήρια απόδοσης.

Με τη διαρκώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα των συγχρόνων συστημάτων και εγκαταστάσεων που διαθέτουν πολλαπλές εισόδους και εξόδους η περιγραφή ενός μοντέρνου συστήματος απαιτεί μεγάλο αριθμό εξισώσεων. Η κλασσική θεωρία ελέγχου που ασχολείται με συστήματα μιας εισόδου μιας εξόδου (single input – single output) όπως είναι ευνόητο είναι ανίσχυρη για συστήματα πολλών εισόδων

πολλών εξόδων. Για την αντιμετώπιση της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των σύγχρονων συστημάτων αναπτύχθηκε μετά το 1960 η μοντέρνα θεωρία ελέγχου η οποία αποτέλεσε το υπόβαθρο για την σχεδίαση συστημάτων αυτομάτου ελέγχου ύψιστης ακρίβειας όπως π.χ. για διαστημικά οχήματα και πυραύλους.

Επιπλέον η ανάγκη ελαχιστοποίησης του βάρους των δορυφόρων και του ελέγχου τους με εξαιρετική ακρίβεια συντέινει στη δημιουργία του σημαντικού κλάδου του βέλτιστου ελέγχου (optimal control). Για την ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων κατά την τελευταία 20ετία αποδείχθηκαν χρήσιμες οι μέθοδοι του πεδίου χρόνου (time – domain) των Liapunov, Minorsky και άλλων.

Νέες θεωρίες πάνω στον βέλτιστο έλεγχο διατύπωσαν επίσης οι L. S. Pontryagin (Σοβιετική Ένωση) και R. Bellman (Η.Π.Α.). Σήμερα είναι πια γενικά παραδεκτό ότι ο μηχανικός που ασχολείται με τον αυτόματο έλεγχο δηλαδή την ανάλυση και το σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου οφείλει να αξιοποιεί ταυτόχρονα τις δύο μεθοδολογίες του πεδίου – χρόνου και του πεδίου – συχνότητας.

Το αντικείμενο του αυτομάτου ελέγχου είναι η ανάλυση και ο σχεδιασμός συστημάτων σχεδιασμένων να εκπληρώνουν συγκεκριμένους σκοπούς. Αλλά η επίτευξη αυτών των σκοπών προϋποθέτει την παράλληλη πορεία από πολλαπλές κατευθύνσεις που απαρτίζουν ολόκληρη ιεραρχία συστημάτων ελέγχου με διαφορετικούς στόχους. Στην απαίτηση αυτή ανταποκρίνεται η μοντέρνα θεωρία ελέγχου η οποία βρίσκει εφαρμογή σε προβλήματα βέλτιστου ελέγχου (optimal control).

Ο έλεγχος μιας βιομηχανικής διεργασίας (industrial process) με αυτόματα μέσα σε αντίθεση με τον έλεγχο με χειροκίνητα μέσα ονομάζεται αυτοματοποίηση και είναι θεμελιώδης σε μια βιομηχανική κοινωνία. Οι αυτόματες μηχανές χρησιμοποιούνται στα εργοστάσια για την αύξηση της παραγωγής σε σχέση προς το απασχολούμενο προσωπικό.

Η θεωρία η υλοποίηση και οι εφαρμογές του αυτομάτου ελέγχου συγκροτούν μια ευρεία, ενδιαφέρουσα και ιδιαίτερα χρήσιμη θετική επιστήμη. Επομένως εύκολα κατανοεί κανείς το πόσο σημαντικά είναι τα κίνητρα για το ενδιαφέρον στη μελέτη των σύγχρονων συστημάτων ελέγχου. Βιβλ. [2], [67], [68].

1.4. Τεχνητή Νοημοσύνη (T.N.).

Τεχνητή Νοημοσύνη (Τ.Ν.) είναι η νοημοσύνη των μηχανών και ο κλάδος της επιστήμης των Η/Υ που στοχεύει στη δημιουργία της. Πολλά βιβλία που έχουν ως θέμα την τεχνητή νοημοσύνη την ορίζουν ως ‘η μελέτη και ο σχεδιασμός νοημόνων πρακτόρων’ όπου ο νοήμον πράκτορας είναι ένα σύστημα που αντιλαμβάνεται το περιβάλλον και κάνει πράξεις που μεγιστοποιούν την πιθανότητα επιτυχίας. Ο John McCarthy που καθιέρωσε τον όρο τεχνητή νοημοσύνη το 1956 την ορίζει ως ‘την επιστήμη και μηχανική του να φτιάξουμε ευφυείς μηχανές.

Ο τομέας ιδρύθηκε με τον ισχυρισμό ότι μια ιδιότητα των ανθρώπων ‘η νοημοσύνη μπορεί να περιγραφεί με τόση ακρίβεια που μπορεί να προσομοιωθεί από μια μηχανή’. Αυτός ο ισχυρισμός δημιούργησε φιλοσοφικά ερωτήματα για τη φύση του μυαλού και την ηθική του να φτιάχνουμε τεχνητά όντα. Η (Τ.Ν.) ξεκίνησε με αισιοδοξία αλλά στην πορεία των ερευνών αντιμετώπισε πολλά προβλήματα και εμπόδια τα οποία φαινόταν (και φαίνονται) αδύνατον να ξεπεραστούν. Παρ’ όλα αυτά σήμερα έχει γίνει ένα μέρος της τεχνολογίας και μπορεί να λύσει δύσκολα προβλήματα της επιστήμης των υπολογιστών.

Η έρευνα πάνω στην (Τ.Ν.) είναι εξαιρετικά τεχνική και εξειδικευμένη και σήμερα έχει χωριστεί σε τομείς που είναι δύσκολο να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Οι τομείς αυτοί αναπτύχθηκαν γύρω από θεσμούς που είναι η δουλειά διαφόρων ερευνητών για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων και μεγάλων διαφωνιών για το πώς μπορεί να φτιαχτεί η (Τ.Ν.). Τα κυριότερα προβλήματα της (Τ.Ν.) είναι η εκλογίκευση, η γνώση, ο σχεδιασμός, η μάθηση, η επικοινωνία, η αντίληψη και η ικανότητα της κίνησης και του χειρισμού αντικειμένων. Γενική νοημοσύνη ή ‘δυνατή νοημοσύνη’ είναι ακόμα πολύ δύσκολο να επιτευχτεί.

Ο τομέας έρευνας της (Τ.Ν.) ξεκίνησε το 1956 από τους επιστήμονες John McCarthy, Marvin Minsky, Allen Newell, και Herbert Simon. Απέτυχαν στο να αναγνωρίσουν τη δυσκολία των προβλημάτων που αντιμετώπιζαν. Το 1974 σταμάτησε η χρηματοδότηση στην έρευνα για (Τ.Ν.) πρώτος χειμώνας της (Τ.Ν.).

Στις αρχές του 1980 η (Τ.Ν.) αναζωογονήθηκε από την εμπορική επιτυχία των έμπειρων συστημάτων. Το 1985 η αγορά τέτοιων συστημάτων έφτασε σε τζίρο το ένα δισεκατομμύριο δολάρια. Παρ’ όλα αυτά η αδυναμία για περαιτέρω βελτίωση οδήγησε το 1987 σε ένα δεύτερο και μακρύτερο σε διάρκεια χειμώνα για την (Τ.Ν.) .

Το 1990 και στις αρχές του 21^{ου} αιώνα η Τεχνητή Νοημοσύνη (Τ.Ν.) πέτυχε τη μεγαλύτερή της επιτυχία. Χρησιμοποιήθηκε στα λογιστικά, την εύρεση δεδομένων,

την ιατρική διάγνωση και σε πολλούς άλλους τομείς. Η επιτυχία οφειλόταν σε παράγοντες όπως η αυξανόμενη υπολογιστική ισχύς, η προσήλωση των ερευνητών στην επίλυση υποπροβλημάτων και η χρησιμοποίηση από τους ερευνητές συγκεκριμένων μαθηματικών μεθόδων.

Τον Μαΐο του 1997 ο Deep Blue έγινε ο πρώτος υπολογιστής που νίκησε τον πρωταθλητή στο σκάκι Gary Kasparov. Το 2005 ένα ρομπότ του Stanford νίκησε στον αγώνα DARPA Grand Challenge με το να οδηγήσει πλήρως αυτόνομα ένα αυτοκίνητο για 131 μίλια πάνω σε ένα μονοπάτι στην έρημο. Η (T.N.) μπήκε στη ζωή μας με προγράμματα αναγνώρισης κειμένου όπως το (OCR). Η (T.N.) χωρίζεται σήμερα στους παρακάτω τομείς.

Συμβολική χειρίζεται σύμβολα. Κατηγοριοποιεί νέες καταστάσεις ανάλογα με το πόσο μοιάζουν με κάποια σύμβολα που υπάρχουν στη μνήμη. Αυτή χωρίζεται σε:

- Αναγνωριστική προσομοίωση
- Στηριγμένη στη λογική
- Μη στηριγμένη στη λογική
- Στηριγμένη στη γνώση

Υποσυμβολική

- Από τη βάση προς τα πάνω νοημοσύνη. Φτιάχνουμε ρομποτ με βασικούς αισθητήρες και βλέπουμε πως συμπεριφέρονται. Εδώ εισάγεται ο αυτόματος έλεγχος στην (T.N.).
- Υπολογιστική νοημοσύνη που περιλαμβάνει τα νευρωνικά δίκτυα, την ασαφή λογική και τους γενετικούς αλγορίθμους. Βιβλ. [3], [69].

1.5. Εισαγωγή στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.

Ο αυτόματος έλεγχος, έχει συμβάλει αποφασιστικά στην ανάπτυξη του σύγχρονου πολιτισμού.

Η σπουδαιότητα του αυτομάτου ελέγχου δεν περιορίζεται μόνο στα αλματώδη επιτεύγματα της αεροδιαστημικής (διαστημόπλοια, κατευθυνόμενοι πύραυλοι, αυτόματη πλοήγηση αεροσκαφών κ.λ.π.). Εκτείνεται και έχει καταστεί μεγάλος συντελεστής στην εξέλιξη της σύγχρονης βιομηχανίας παραγωγής.

Γίνεται αντιληπτό ότι ο αυτόματος έλεγχος έχει αποβεί ουσιώδης στις σύγχρονες βιομηχανικές λειτουργίες, όπως π.χ. στη ρύθμιση της πίεσης, της θερμοκρασίας, της υγρασίας του ιξώδους και της ροής στις βιομηχανίες διεργασιών, καθώς επίσης στην εξέλαση, κατεργασία, διακίνηση και συναρμολόγηση μηχανικών στοιχείων στις βιομηχανίες κατασκευών.

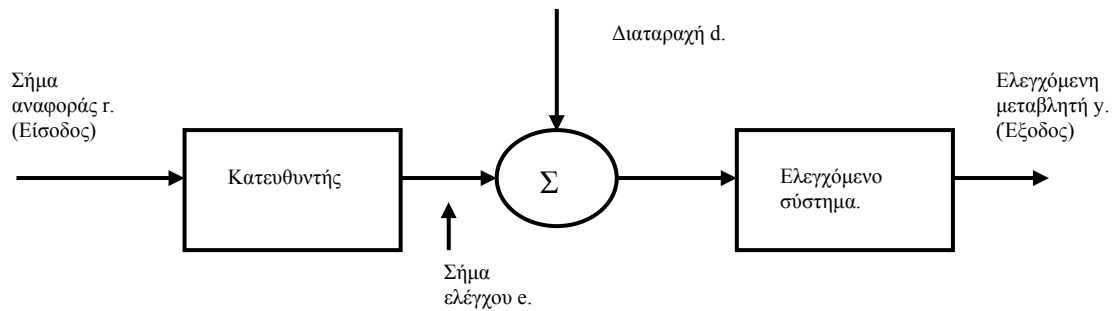
Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου έχουν επίσης εφαρμογή σε οικιακές συσκευές θέρμανσης και κλιματισμού και σε συστήματα Η/Υ, οχημάτων (ABS), συγκοινωνιών, τηλεπικοινωνιών, καθώς και σε συστήματα που εξυπηρετούν στρατιωτικούς σκοπούς.

Επίσης με τη θεωρία του αυτομάτου ελέγχου, μπορούν να διερευνηθούν και να αντιμετωπισθούν προβλήματα καταναλωτικής διανομής εμπορευμάτων, ελέγχου οικονομικών συστημάτων, μελέτης κοινωνικών προβλημάτων, συστημάτων και μεθόδων ελέγχου του περιβάλλοντος, καθώς και βιολογικών και βιοϊατρικών συστημάτων.

Το πεδίο των συστημάτων του αυτομάτου ελέγχου στηρίζεται πάνω στη θεμελιώδη ιδέα του βρόχου ανάδρασης ή ανατροφοδότησης. Σύμφωνα δε με τον ορισμό που έδωσε ο Norbert Wiener, 'Ανάδραση είναι η μέθοδος κατά την οποία ο έλεγχος ενός συστήματος συντελείται με την εισαγωγή σ' αυτό της αναδρομικής επίδρασης των αποτελεσμάτων της λειτουργίας του'. Βιβλ. [2].

1.5.1. Συστήματα αυτομάτου ελέγχου ανοικτού βρόχου (πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα)

Αυτά λέγονται και συστήματα ελέγχου χωρίς ανάδραση. Στο σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου χρησιμοποιείται ένας κατευθυντής που αποσκοπεί στο να επιτύχει την επιθυμητή απόκριση όπως δείχνει το δομικό διάγραμμα του σχ. 1.5.1 – 1.



Σχήμα 1. – 4 ‘Σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου’.

Η είσοδος του κατευθυντή είναι ένα σήμα αναφοράς r (ή εντολή) η δε έξοδός του είναι το σήμα ελέγχου e , το οποίο δρα στο ελεγχόμενο σύστημα (εγκατάσταση) και επιβάλλει στην ελεγχόμενη μεταβλητή y την επιθυμητή συμπεριφορά. Η διαταραχή d είναι η εξωγενής είσοδος που γενικά τείνει να επηρεάζει δυσμενώς τη συμπεριφορά της ελεγχόμενης μεταβλητής. Σ’ ένα τέτοιο σύστημα, η στατική αντιστοιχία μεταξύ της ελεγχόμενης μεταβλητής (εξόδου συστήματος) και του μεγέθους αναφοράς (εισόδου συστήματος) είναι συνάρτηση της γραμμικότητας και του βαθμού ακρίβειας του μηχανισμού ελέγχου. Έτσι τα συστήματα ελέγχου ανοικτού βρόχου στερούνται ακρίβειας και ευκαμψίας και η χρήση τους περιορίζεται στους απλούστερους τύπους εφαρμογών.

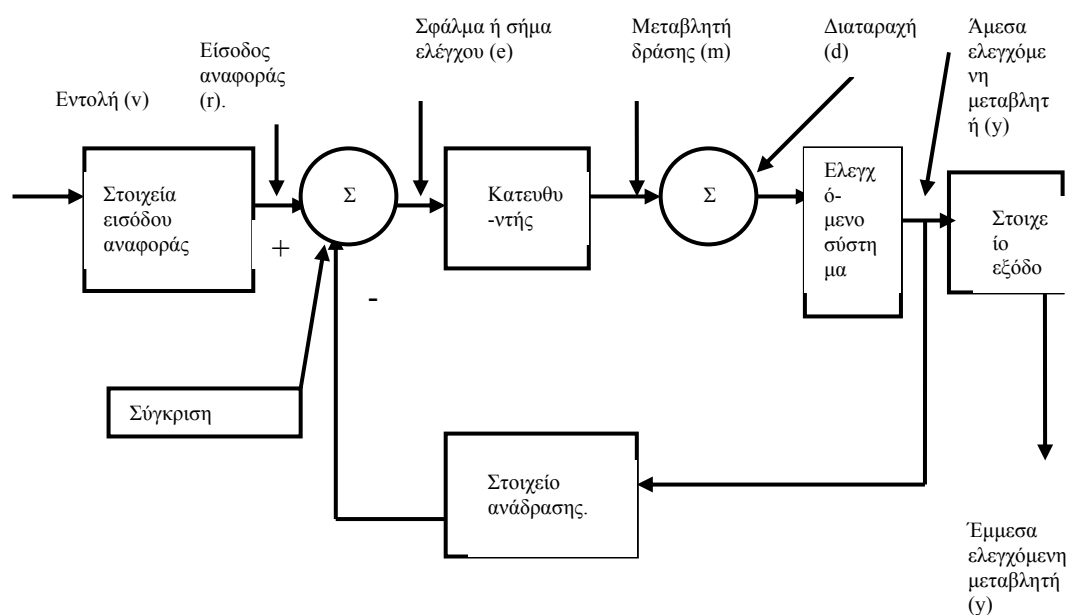
Τα πλεονεκτήματα συστημάτων ελέγχου ανοικτού βρόχου είναι η απλή κατασκευή και ευκολία συντήρησης, είναι λιγότερο δαπανηρά από τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου, δεν παρουσιάζουν προβλήματα αστάθειας, είναι κατάλληλα όταν η μέτρηση της εξόδου είναι δύσκολη ή οικονομικά ασύμφορη.

Τα μειονεκτήματα είναι ότι τυχών διαταραχές καθώς και μεταβολές του βαθμού ακρίβειας των στοιχείων τους προκαλούν σφάλματα που συνεπάγονται την εκτροπή της εξόδου από την επιθυμητή απόκριση. Άλλο μειονέκτημα είναι ότι για τη διατήρηση των επιδιωκόμενων χαρακτηριστικών της εξόδου απαιτείται περιοδική επαναρρύθμιση των συνιστωσών.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε σύστημα ελέγχου που λειτουργεί επί τη βάση χρονικού προγράμματος είναι σύστημα ανοικτού βρόχου. Βιβλ. [2].

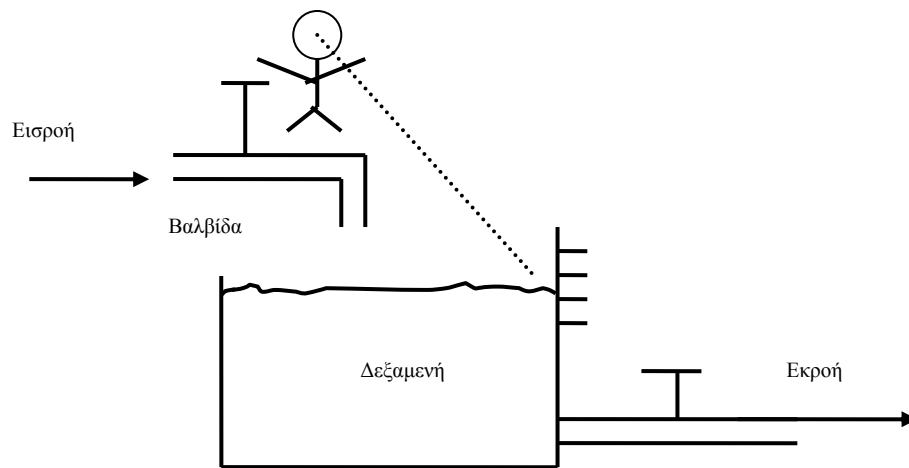
1.5.2. Συστήματα αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου (πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα).

Συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου. Για να επιτευχθεί έλεγχος ακριβέστερος από εκείνον που αποδίδουν τα συστήματα ανοιχτού βρόχου απαιτούνται η ανατροφοδότηση της ελεγχόμενης μεταβλητής, η σύγκρισή της με την είσοδο αναφοράς, ο καθορισμός της διαφοράς (σφάλμα) των δύο αντίστοιχων σημάτων και η διοχέτευση του σήματος σφάλματος στον κατευθυντή για τη διόρθωση του σφάλματος. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται το λεγόμενο σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου που μπορεί να περιλαμβάνει μία ή περισσότερες οδούς ανάδρασης ή ανατροφοδότησης (σχ. 1. – 5). Βιβλ. [2].

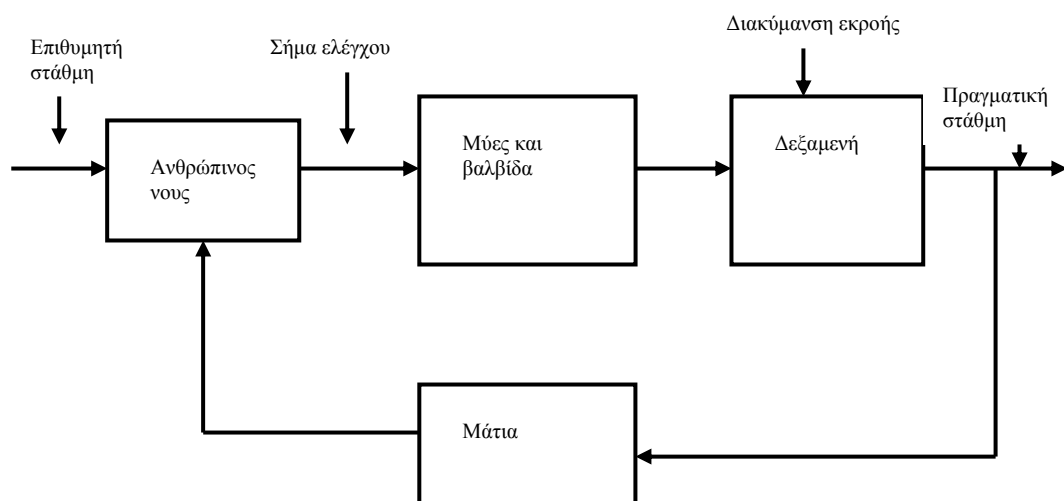


Σχήμα 1. – 5 ‘Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου’.

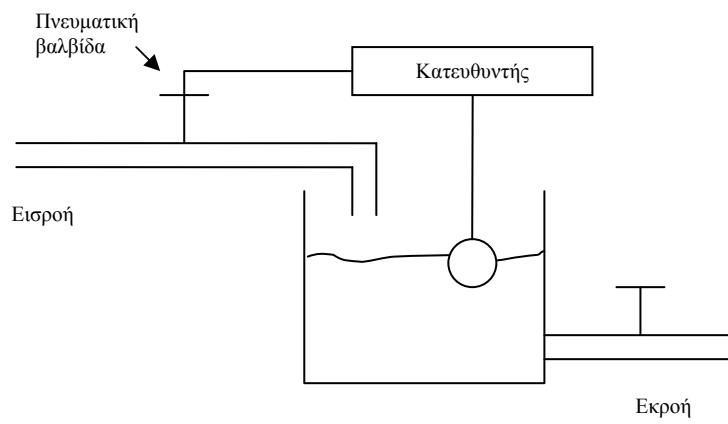
Σύστημα ελέγχου στάθμης υγρού (σχ. 1. – 5).



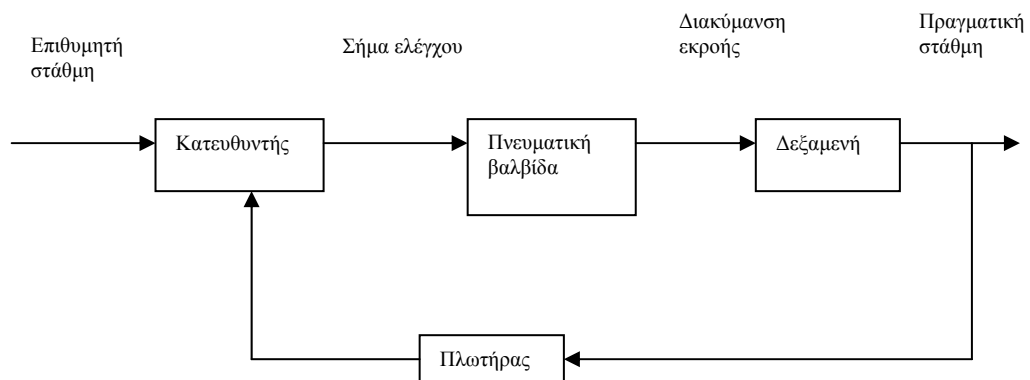
Σχήμα 1. – 6 ‘Χειροκίνητος έλεγχος ανάδρασης στάθμης νερού.’



Σχήμα 1. – 7 ‘Διάγραμμα κλειστού βρόχου’.



Σχήμα 1. – 8 ‘Αυτόματο σύστημα ρύθμισης στάθμης υγρού’.



Σχήμα 1. – 9 ‘Δομικό διάγραμμα ελέγχου στάθμης υγρού’.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΚΛΑΣΣΙΚΟ ΑΥΤΟΜΑΤΟ ΕΛΕΓΧΟ.

2.1. Γραμμικές και μη – γραμμικές διαφορικές εξισώσεις

Κάθε διεργασία χημική, βιοχημική ή βιολογική μοντελοποιείται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που την χαρακτηρίζουν.

Μια γραμμική διαφορική εξίσωση μπορεί να μετασχηματιστεί σε αλγεβρική εξίσωση μιας μιγαδικής μεταβλητής s με το μετασχηματισμό Laplace.

Λέμε ότι κάθε σύστημα που χαρακτηρίζεται από γραμμικές διαφορικές εξισώσεις είναι γραμμικό. Μια διαφορική εξίσωση είναι γραμμική όταν οι εξαρτημένες μεταβλητές και οι παράγωγοί τους είναι πρώτου βαθμού δηλαδή δεν βρίσκονται σε συνδυασμούς γινομένων, δεν είναι υψωμένες σε δυνάμεις πλην της πρώτης και δεν υπεισέρχονται σε μη – γραμμικές συναρτήσεις. Όσον αφορά τις ανεξάρτητες μεταβλητές δεν υπάρχουν περιορισμοί. Η εξίσωση:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 4 \cdot t \cdot \frac{dy}{dt} + 4 \cdot y = \sin(t) \quad \text{Σχέση 2. – 1}$$

είναι γραμμική. Οι όροι $y(t)$, dy/dt , $\sin(t)$ περιέχουν μόνο την ανεξάρτητη μεταβλητή t . Έστω μια συσκευή τετραγωνικού νόμου που διέπεται από τη σχέση εισόδου – εξόδου:

$$y(t) = H(u(t)) = u^2(t) \quad \text{Σχέση 2. – 2}$$

Η συσκευή είναι μη – γραμμική διότι:

$$H(u_1 + u_2) = (u_1 + u_2)^2 \neq H(u_1) + H(u_2) = u_1^2 + u_2^2 \quad \text{Σχέση 2. – 3}$$

Μια συσκευή της οποίας η έξοδος y είναι στατική συνάρτηση της εισόδου u :

$$y(u) = m \cdot u + b \quad \text{Σχέση 2. – 4}$$

Όπου m και b είναι σταθερές είναι μη γραμμική διότι:

$$y(u_1 + u_2) = m \cdot u_1 + m \cdot u_2 + b \neq y(u_1) + y(u_2) = m \cdot u_1 + b + m \cdot u_2 + b = m \cdot u_1 + m \cdot u_2 + 2 \cdot b$$

Σχέση 2. – 5

Η διαφορική εξίσωση που δεν ικανοποιεί έστω και μία από τις ιδιότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι μη – γραμμική. Τα ακόλουθα είναι παραδείγματα μη – γραμμικών διαφορικών εξισώσεων:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + x = A \cdot \sin(w \cdot t)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + (x^2 - 1) \cdot \frac{dx}{dt} + x = 0 \quad \text{Σχέσεις 2. – 6}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} + x + x^3 = 0$$

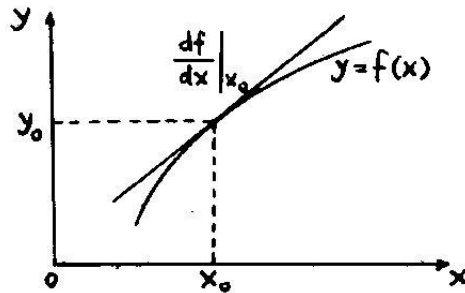
2.2. Γραμμικοποίηση συστήματος διεργασίας

Πολλά συστήματα είναι μη – γραμμικά για ευρείες διαδρομές των τιμών των μεταβλητών τους. Σε καλοσχεδιασμένα συστήματα ελέγχου όμως το εύρος μεταβολής της ελεγχόμενης μεταβλητής αναμένεται να είναι μικρό σχετικά με την τιμή ισορροπίας της μεταβλητής. Έτσι ο σχεδιασμός του κατευθυντή (controller) ενός συστήματος ελέγχου γίνεται γύρω από κάποιο σημείο λειτουργίας. Αυτός είναι και ο λόγος που δικαιολογεί τη μετάβαση από μη – γραμμικά σε γραμμικά μοντέλα συστημάτων και εν συνεχεία την ανάπτυξη μεθόδων ανάλυσης και σχεδιασμού γραμμικών συστημάτων ελέγχου.

Γραμμικοποίηση ενός συστήματος λέγεται ο προσδιορισμός εξισώσεων γραμμικών που ισχύουν για μικρές αποκλίσεις μιας ή περισσοτέρων μεταβλητών από το σημείο λειτουργίας. Έστω η μη – γραμμική εξίσωση που συνδέει την είσοδο $x(t)$ και την έξοδο $y(t)$ ενός συστήματος.

$$y = f(x) \quad \text{Σχέση 2. - 7}$$

Όπου $f(x) = f(x(t))$ παριστάνει ότι η $y(t)$ είναι συνάρτηση της $x(t)$. Η σχέση μπορεί να δοθεί και γραφικά όπως στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2. - 1 'Γραμμικοποίηση μη γραμμικού συστήματος', Βιβλ. 2

Το κανονικό σημείο λειτουργίας δίνεται ως (x_0, y_0) . Επειδή η καμπύλη (συνάρτηση) είναι συνεχής στην ενδιαφέρουσα περιοχή της μεταβλητής είναι δυνατόν η παραπάνω εξίσωση να αναπτυχθεί σε σειρά Taylor γύρω από το σημείο λειτουργίας x_0 δηλαδή:

$$y = f(x) = f(x_0) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} \cdot (x - x_0) + \frac{1}{2!} \cdot \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x=x_0} \cdot (x - x_0)^2 + \dots$$

$$\text{Σχέση 2. - 8}$$

Με την προϋπόθεση ότι η απόκλιση $(x - x_0)$ είναι μικρή μπορούν να θεωρηθούν αμελητέοι οι όροι υψηλής τάξης του $(x - x_0)$. Με την προσέγγιση αυτή προκύπτει.

$$y = f(x_0) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} \cdot (x - x_0) = y_0 + K \cdot (x - x_0) \quad \text{Σχέση 2. - 9}$$

Όπου K είναι η κλίση στο σημείο λειτουργίας. Η εξίσωση μπορεί πλέον να γραφεί ως γραμμική εξίσωση.

$$y - y_0 = K \cdot (x - x_0)$$

Σχέση 2. – 10

$$\Delta y = K \cdot \Delta x$$

Η τελευταία εξίσωση παρέχει ένα γραμμικό μαθηματικό μοντέλο του μη – γραμμικού συστήματος της αρχικής εξίσωσης. Βιβλ. [2], [7].

2.3. Θεωρία κλασσικού αυτομάτου ελέγχου.

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

$$L[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-st} \cdot dt \quad \text{Σχέση 2. – 11}$$

Όπου $f(t)$ είναι συνάρτηση του χρόνου t έτσι ώστε $f(t)=0$ για $t<0$. Το s είναι μιγαδική μεταβλητή.

Στους δύο πίνακες που ακολουθούν παραθέτονται οι ιδιότητες του μετασχηματισμού Laplace (προσεταιρισμός, άθροιση κ.α.) καθώς και οι μετασχηματισμοί Laplace ορισμένων χρήσιμων συναρτήσεων.

Πίνακας 2. – 1 ‘Πίνακας ιδιοτήτων μετασχηματισμού Laplace’, Βιβλ. [2]

1	$\mathcal{L}[Af(t)] = AF(s)$
2	$\mathcal{L}[f_1(t) \pm f_2(t)] = F_1(s) \pm F_2(s)$
3	$\mathcal{L}_\pm \left[\frac{d}{dt} f(t) \right] = sF(s) - f(0_\pm)$
4	$\mathcal{L}_\pm \left[\frac{d^2}{dt^2} f(t) \right] = s^2 F(s) - sf(0_\pm) - f'(0_\pm)$
5	$\mathcal{L}_\pm \left[\frac{d^n}{dt^n} f(t) \right] = s^n F(s) - \sum_{k=1}^n s^{n-k} f^{(k-1)}(0_\pm)$ where $f^{(k-1)}(t) = \frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}} f(t)$
6	$\mathcal{L}_\pm \left[\int f(t) dt \right] = \frac{F(s)}{s} + \frac{\left[\int f(t) dt \right]_{t=0_\pm}}{s}$
7	$\mathcal{L}_\pm \left[\int \int f(t) dt dt \right] = \frac{F(s)}{s^2} + \frac{\left[\int f(t) dt \right]_{t=0_\pm}}{s^2} + \frac{\left[\int \int f(t) dt dt \right]_{t=0_\pm}}{s}$
8	$\mathcal{L}_\pm \left[\int \cdots \int f(t) (dt)^n \right] = \frac{F(s)}{s^n} + \sum_{k=1}^n \frac{1}{s^{n-k+1}} \left[\int \cdots \int f(t) (dt)^k \right]_{t=0_\pm}$
9	$\mathcal{L}\{e^{-at} f(t)\} = F(s+a)$
10	$\mathcal{L}\{f(t-a) 1(t-a)\} = e^{-as} F(s)$
11	$\mathcal{L}\{t f(t)\} = -\frac{dF(s)}{ds}$
12	$\mathcal{L}\left[\frac{1}{t} f(t)\right] = \int_s^\infty F(s) ds$
13	$\mathcal{L}\left[f\left(\frac{t}{a}\right)\right] = a F(as)$

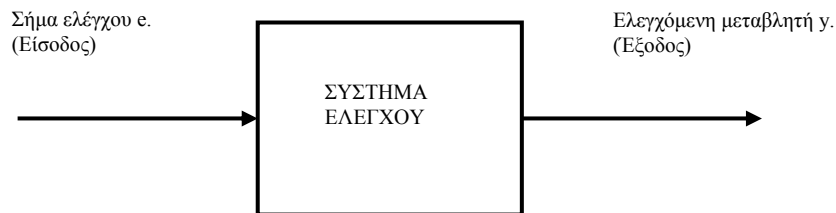
Πίνακας 2. – 2 ‘Πίνακας μετασχηματισμών Laplace ορισμένων συναρτήσεων’ Βιβλ. [2]

	$f(t)$	$F(s)$
1	μοναδιαία κρούση $\delta(t)$	1
2	μοναδιαία βαθμίδα $u(t)$	$\frac{1}{s}$
3	t	$\frac{1}{s^2}$
4	e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
5	te^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$
6	$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
7	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
8	$t^n \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
9	$t^n e^{-at} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
10	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$
11	$\frac{1}{b-a}(be^{-bt} - ae^{-at})$	$\frac{s}{(s+a)(s+b)}$
12	$\frac{1}{ab}\left[1 + \frac{1}{a-b}(be^{-at} - ae^{-bt})\right]$	$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$
13	$e^{-at} \sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
14	$e^{-at} \cos \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$
15	$\frac{1}{a^2}(at - 1 + e^{-at})$	$\frac{1}{s^2(s+a)}$
16	$\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t$	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
17	$\frac{-1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \phi)$ $\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$	$\frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
18	$1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \phi)$ $\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$	$\frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}$
19	$\cos(\omega t + \phi)$	$\frac{s \cos \phi - \omega \sin \phi}{s^2 + \omega^2}$

Συνάρτηση μεταφοράς ενός γραμμικού, χρονικά αμετάβλητου συστήματος είναι ο λόγος του μετασχηματισμού Laplace της εξόδου (συνάρτηση απόκρισης) προς το

μετασχηματισμό Laplace της εισόδου (συνάρτηση διέγερσης), με την προϋπόθεση ότι όλες οι αρχικές συνθήκες είναι μηδέν. (σχήμα 2.3. – 1)

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} \quad \text{Σχέση 2. – 12}$$

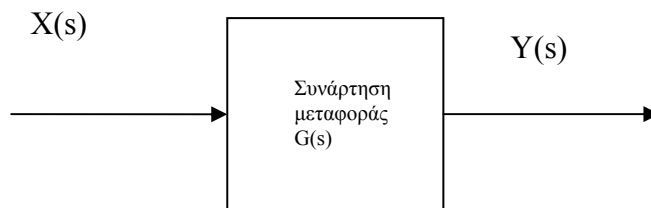


Σχήμα 2. – 2 ‘Σύστημα ελέγχου’.

Τα συστήματα ελέγχου συνήθως αποτελούνται από περισσότερες της μίας επί μέρους συνιστώσες. Για την παράσταση της λειτουργίας των επί μέρους συνιστωσών χρησιμοποιείται το καλούμενο συναρτησιακό δομικό διάγραμμα (functional block diagram) ή απλούστερα δομικό διάγραμμα.

Δομικό διάγραμμα ενός συστήματος είναι η σχηματική παράσταση των λειτουργιών των συνιστωσών που αποδίδει την ορθή φορά της ροής των σημάτων και απεικονίζει τις αλληλεπιδράσεις των διαφόρων συνιστωσών.

Συναρτησιακό τετράγωνο (functional block) ονομάζεται η συμβολική παράσταση της μαθηματικής επεξεργασίας μετατροπής του σήματος εισόδου $X(s)$ στο σήμα εξόδου $Y(s)$. Το παρακάτω σχήμα δείχνει το δομικό διάγραμμα ενός στοιχείου.



Σχήμα 2. – 3 ‘Δομικό διάγραμμα στοιχείου’.

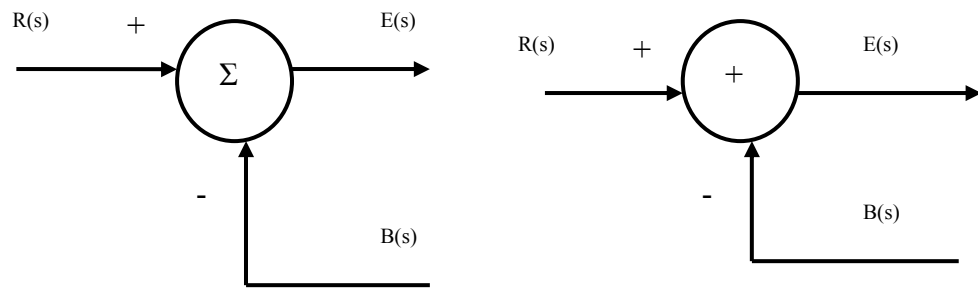
Η μαθηματική έκφραση $G(s)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς του στοιχείου (συνιστώσας).

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad \text{Σχέση 2. – 13}$$

Τα συναρτησιακά τετράγωνα των περισσοτέρων της μίας συνιστωσών συνδέονται με βέλη που δείχνουν τη φορά των σημάτων. Το προσιόν βέλος συμβολίζει την είσοδο το δε απιόν παριστάνει την έξοδο. Τα βέλη αυτά αντιστοιχούν στα σήματα. Οι φυσικές διαστάσεις του σήματος εξόδου ισούνται με τις διαστάσεις του σήματος εισόδου πολλαπλασιασμένες με τις διαστάσεις της συνάρτησης μεταφοράς του στοιχείου.

Τα πλεονεκτήματα του παραπάνω συμβολισμού είναι πρώτον η ευκολία με την οποία καταρτίζεται το πλήρες δομικό διάγραμμα ενός συστήματος με την σύνδεση των συναρτησιακών τετραγώνων των επί μέρους συνιστωσών σύμφωνα με τη φορά ροής των σημάτων και δεύτερο η δυνατότητα διερεύνησης της συμβολής κάθε μιας συνιστώσας στην καθολική λειτουργία του συστήματος.

Ο ανιχνευτής σφάλματος (error detector) ή συγκριτής (comperator) ή σημείο άθροισης (summing point) παράγει το σήμα που συνίσταται στη διαφορά μεταξύ της εισόδου αναφοράς $R(s)$ και του σήματος ανάδρασης του συστήματος ελέγχου $B(s)$ (σχήμα 2.3. – 3).



Σχήμα 2. – 4 ‘Δομικό διάγραμμα ανιχνευτή σφάλματος. Δύο εκδοχές.’

Η ορθή επιλογή του ανιχνευτή σφάλματος έχει ουσιώδη σημασία στο σχεδιασμό γιατί επηρεάζει την απόδοση του όλου συστήματος.

Πίνακας 2. – 3 ‘Μετασχηματισμοί δομικών διαγραμμάτων’. Βιβλ. [2].

α.α.	Αρχικό διάγραμμα	Ισοδύναμο διάγραμμα
1.		ή
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		

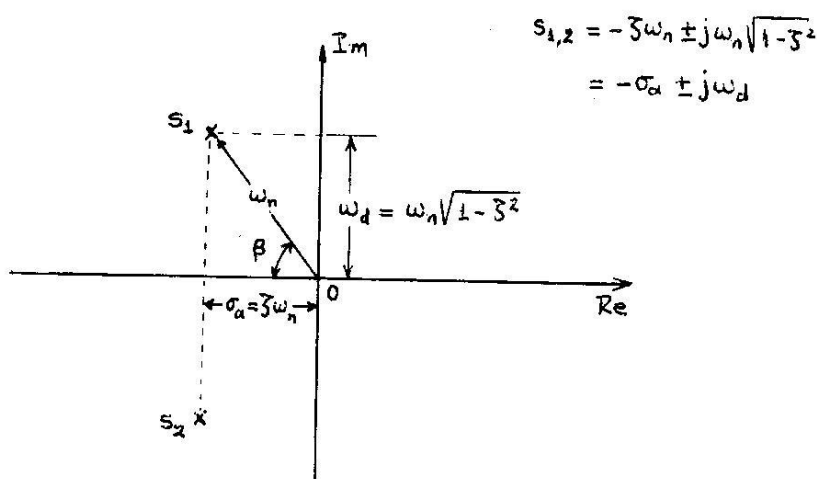
Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος είναι το κλάσμα της εξόδου προς την είσοδο στο σύστημα δηλαδή:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad \text{Σχέση 2. - 14 Βιβλ. [2]}$$

Αν πάρουμε τον παρονομαστή του κλάσματος και τον εξισώσουμε με μηδέν τότε έχουμε τη χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος. Οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης ονομάζονται πόλοι του συστήματος και είναι μιγαδικοί αριθμοί (η μεταβλητή μας είναι το s που είναι μιγαδικό όπως προείπαμε). Άρα μπορούν να παρασταθούν οι ρίζες αυτές στο μιγαδικό επίπεδο. Αντίστοιχα αν πάρουμε τον αριθμητή του κλάσματος και τον εξισώσουμε με μηδέν έχουμε μια άλλη εξίσωση. Οι ρίζες της εξίσωσης αυτής ονομάζονται μηδενιστές είναι μιγαδικοί αριθμοί και μπορούν να παρασταθούν στο μιγαδικό επίπεδο μαζί με τους πόλους. Βιβλ. [2]

2.4. Παράσταση πόλων και μηδενιστών στο μιγαδικό επίπεδο

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει δύο μιγαδικούς πόλους στο μιγαδικό επίπεδο s .



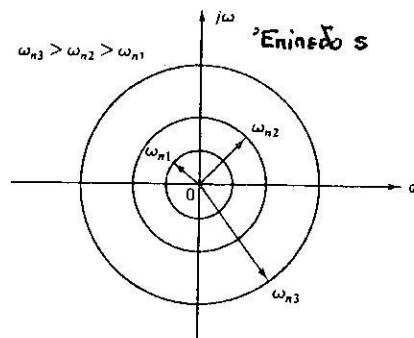
Σχήμα 2. – 5 ‘Εξαγωγή παραμέτρων συστήματος από το μιγαδικό επίπεδο’. Βιβλ. [2].

Εδώ εμφανίζονται κάποιοι παράμετροι του συστήματος:

- σ_a : σταθερά εξασθένησης. Ισχύει ότι $\sigma_a = \zeta \cdot \omega_n$
- ω_n : φυσική συχνότητα χωρίς απόσβεση
- ζ : λόγος απόσβεσης

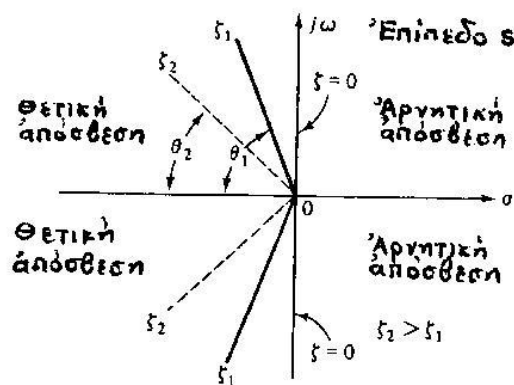
Παρατηρείται ότι η πολική απόσταση της κάθε ρίζας από την αρχή του επιπέδου s είναι ω_n . Η σταθερά εξασθένησης σ_α είναι το πραγματικό μέρος των ριζών (πόλων), η αποσβυσμένη φυσική συχνότητα ω_d είναι το φανταστικό μέρος και ο λόγος απόσβεσης είναι $\zeta = \cos(\beta)$ όπου β είναι η γωνία μεταξύ της πολικής ακτίνας της ρίζας και του αρνητικού πραγματικού ημιάξονα. Βιβλ. [2].

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει γεωμετρικούς τόπους με $\omega_n = \text{σταθερά}$.



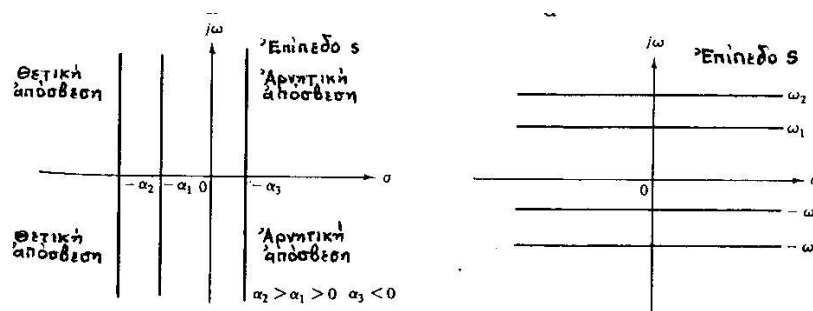
Σχήμα 2. – 6 Γεωμετρικοί τόποι με $\omega_n = \text{σταθερά}$. Βιβλ. [2]

Το παρακάτω σχήμα εικονίζει γεωμετρικούς τόπους με $\zeta = \text{σταθερά}$.



Σχήμα 2. – 7 Γεωμετρικοί τόποι με $\zeta = \text{σταθερά}$. Βιβλ. [2]

Παρατηρείται ότι το αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο αντιστοιχεί σε θετική απόσβεση δηλαδή $\sigma_\alpha > 0$ ή $\zeta > 0$ το δε δεξιό ημιεπίπεδο αντιστοιχεί σε αρνητική απόσβεση και ο φανταστικός άξονας αντιστοιχεί σε μηδενική απόσβεση ($\sigma_\alpha = 0$, $\zeta = 0$). Σαν παράδειγμα όταν το πραγματικό μέρος των ριζών είναι ίσο προς το φανταστικό τότε $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$ και ο γεωμετρικός τόπος είναι ευθείες με κλίση $\beta = 45^\circ$. Η αρνητική απόσβεση οδηγεί σε απόκριση που αυξάνει απεριόριστα και η μηδενική απόσβεση οδηγεί σε ημιτονοειδή ταλάντωση. Οι δύο τελευταίες περιπτώσεις είναι ασταθείς καταστάσεις. Το παρακάτω σχήμα εικονίζει τους γεωμετρικούς τόπους των ριζών με σταθερή εξασθένηση σ_α και σταθερή συχνότητα ω_d . Βιβλ. [2].

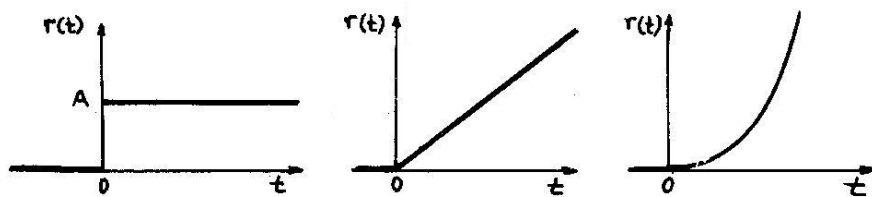


Σχήμα 2. – 8 (α) Γεωμ. τόποι με $\sigma_\alpha = \text{σταθερά}$. (β) Γεωμ. τόποι με $\omega_d = \text{σταθερά}$. Βιβλ. [2]

Στην πορεία της ανάλυσης των συστημάτων ελέγχου προσδιορίζεται ένα μαθηματικό μοντέλο του συστήματος και εν συνεχεία ακολουθεί διερεύνηση της λειτουργίας και της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος.

Κατά την ανάλυση και σχεδίαση είναι ανάγκη να υπάρχει μια βάση προς σύγκριση της απόδοσης των διαφόρων συστημάτων ελέγχου. Η βάση αυτή μπορεί να τεθεί με την προδιαγραφή ορισμένων σημάτων εισόδου δοκιμής και σύγκριση των αποκρίσεων των διαφόρων συστημάτων ελέγχου στα σήματα αυτά.

Τα συνηθέστερα σήματα εισόδου δοκιμής είναι η συνάρτηση βαθμίδας, η συνάρτηση αναρρίχησης και η συνάρτηση παραβολής. Σχήμα 2. – 9.



Σχήμα 2. – 9 ‘Συναρτήσεις βαθμίδας, αναρρίχησης, παραβολής’. Βιβλ. [2]

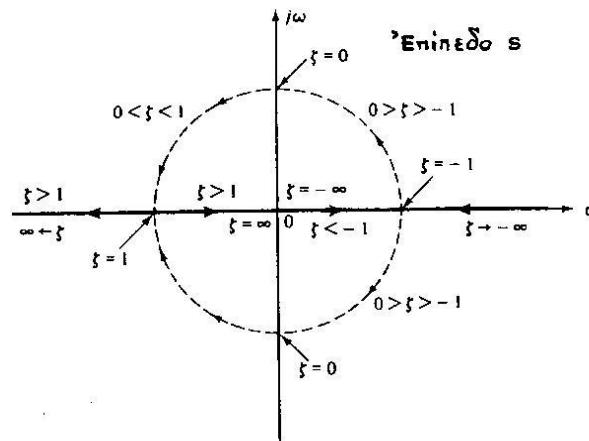
2.5. Συνόψιση απόκρισης βαθμίδας.

Κατωτέρω παρατίθεται η ταξινόμηση της δυναμικής των συστημάτων σε συσχετισμό με την τιμή του ζ .

<u>Λόγος απόσβεσης</u>	<u>Ρίζες χαρ. εξίσωσης</u>	<u>Τύπος συστήματος</u>
$0 < \zeta < 1$	$s_1, s_2 = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$	υπο-απόσβεση
$\zeta = 1$	$s_1, s_2 = -\omega_n$	κρίσιμη απόσβεση
$\zeta > 1$	$s_1, s_2 = -\zeta\omega_n \pm \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}$	υπερ-απόσβεση
$\zeta = 0$	$s_1, s_2 = \pm j\omega_n$	μηδενική απόσβεση
$\zeta < 0$	$s_1, s_2 = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$	αρνητική απόσβεση

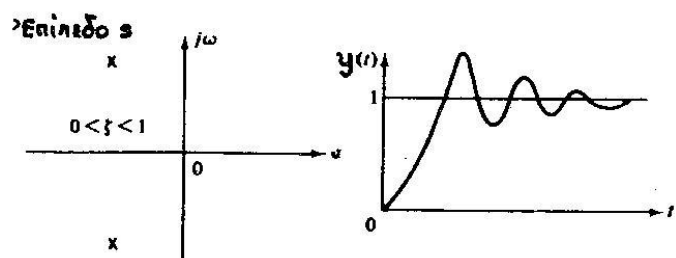
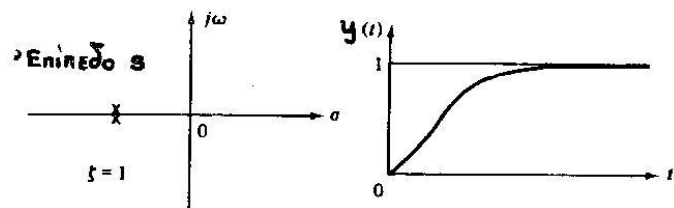
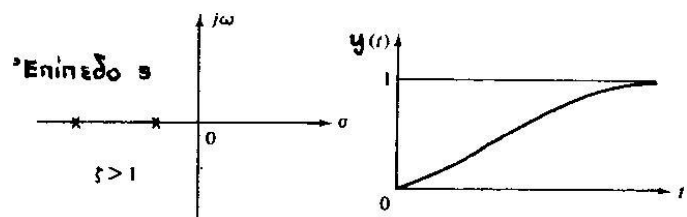
Σχήμα 2. – 10 ‘Τιμές του ζ και απόκριση του συστήματος’. Βιβλ. [2]

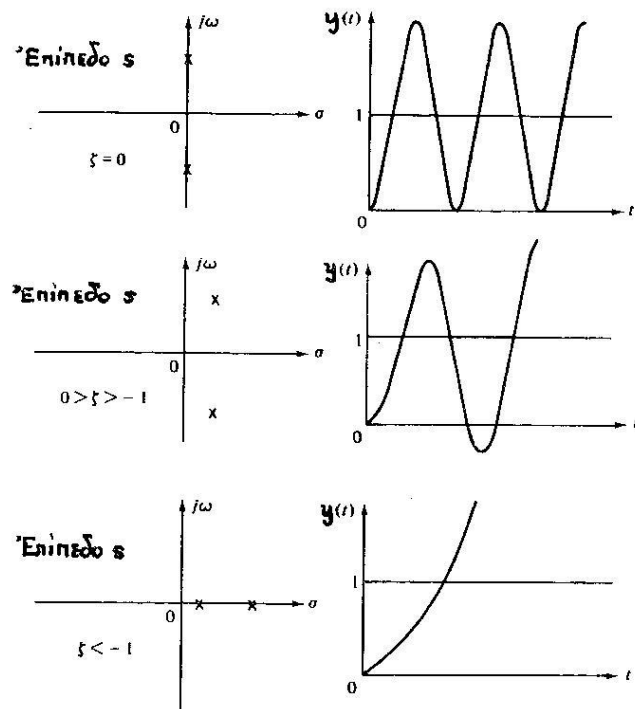
Η σημασία των ριζών της χαρακτηριστικής εξίσωσης στην απόσβεση των συστημάτων γίνεται επίσης αντιληπτή με τα ακόλουθα δύο σχήματα. Στο πρώτο σχήμα διατηρείται σταθερή η ω_n ενώ ο λόγος απόσβεσης μεταβάλλεται από $-\infty$ σε $+\infty$. Βιβλ. [2].



Σχήμα 2. – 11 Γεωμετρικός τόπος των ριζών της Εξ. (6 – 26) όταν η ω_n είναι σταθερή, ενώ ο λόγος απόσβεσης ζ μεταβάλλεται από το $-\infty$ έως το $+\infty$. Βιβλ. [2]

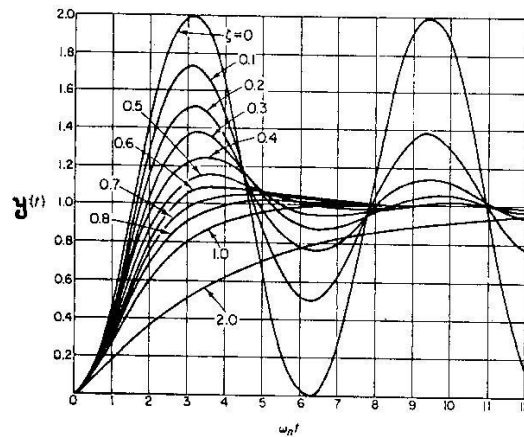
Το παρακάτω σχήμα εικονίζει τυπικές αποκρίσεις βαθμίδας συστημάτων που αντιστοιχούν σε διάφορες θέσεις των ριζών (πόλων).





Σχήμα 2. – 12 ‘Σύγκριση αποκρίσεων για διάφορες θέσεις των ριζών στο επίπεδο s ’. Βιβλ. [2]

Στις πρακτικές εφαρμογές ελέγχου συστημάτων μόνον η περίπτωση όπου $\zeta > 0$ έχει ενδιαφέρον διότι αντιστοιχεί σε ευσταθή συστήματα. Το παρακάτω σχήμα εικονίζει μια ομάδα καμπύλων $y(t)$ για διάφορες τιμές του ζ ($\zeta > 0$). Βιβλ. [2].



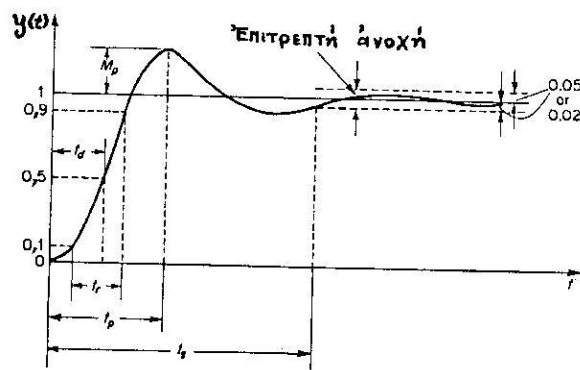
Σχήμα 2. – 13 ‘Καμπύλες απόκρισης μοναδιαίας βαθμίδας. Βιβλ. [2]

Από το παραπάνω σχήμα είναι φανερό ότι ένα σύστημα με υπο – απόσβεση στο οποίο το ζ είναι μεταξύ 0.5 και 0.8 πλησιάζει την τελική τιμή πιο σύντομα από τα συστήματα με κρίσιμη ή υπερ – απόσβεση. Μια ενδιαφέρουσα τιμή είναι η $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$ και αντιστοιχεί στην περίπτωση που το φανταστικό και το πραγματικό μέρος των δύο μιγαδικών πόλων είναι ίσα.

Από τα συστήματα που εμφανίζουν απόκριση χωρίς ταλάντωση $\zeta \geq 1$ το σύστημα με κρίσιμη απόσβεση $\zeta = 1$ έχει την ταχύτερη απόκριση. Τα συστήματα με υπερ – απόσβεση είναι ‘νωθρά’ κατά την απόκρισή τους σε κάθε είσοδο.

Σε πολλές περιπτώσεις τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των συστημάτων ελέγχου καθορίζονται στο πεδίο του χρόνου. Συχνά δε η συμπεριφορά των συστημάτων ελέγχου προσδιορίζεται από τη μεταβατική απόκριση σε μια είσοδο μοναδιαίας βαθμίδας η οποία αφ’ ενός είναι εύκολο να παραχθεί και αφ’ ετέρου αντιπροσωπεύει μια δραστική μεταβολή της εισόδου. Με τη γνώση της απόκρισης σε μια είσοδο βαθμίδας μπορεί να υπολογιστεί μαθηματικά η απόκριση σε οποιαδήποτε είσοδο. Βιβλ. [2].

Γενικά η μεταβατική απόκριση των πρακτικών συστημάτων ελέγχου εμφανίζει αποσβυνόμενες ταλαντώσεις προτού καταλήξει στη μόνιμη κατάσταση.

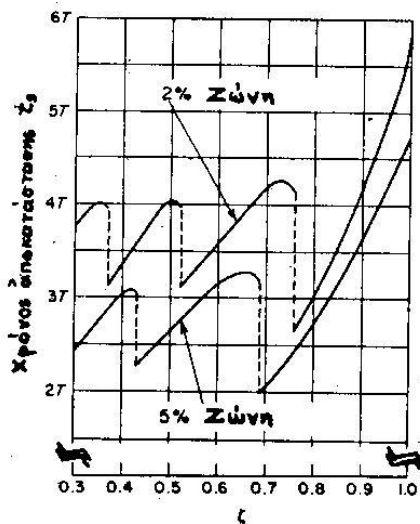


Σχήμα 2. – 14 ‘Καμπύλη απόκρισης μοναδιαίας βαθμίδας και παράσταση των ποσοτήτων t_d, t_r, t_p, M_p και t_s ’. Βιβλ. [2]

Για την προδιαγραφή δε των χαρακτηριστικών του συστήματος σε μια είσοδο μοναδιαίας βαθμίδας έχει επικρατήσει η χρήση των ακόλουθων ποσοτήτων.

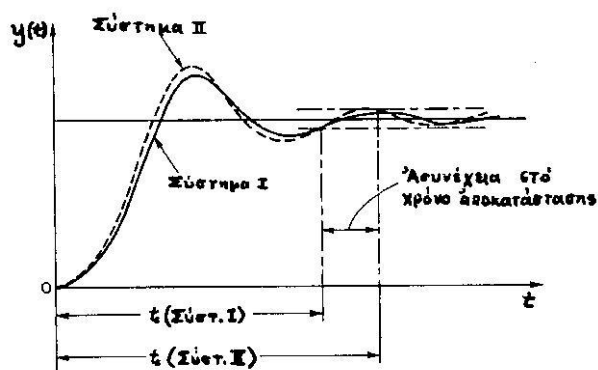
- Χρόνος καθυστέρησης t_d (delay time): Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει η απόκριση για πρώτη φορά το μισό της τελικής της τιμής.
- Χρόνος ανύψωσης t_r (rise time): Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να ανέλθει η απόκριση από το 10% στο 90% της τελικής της τιμής
- Χρόνος κορυφής t_p (peak time): Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει η απόκριση στην πρώτη κορυφή της καμπύλης.
- Μέγιστη ποσοστιαία υπερακόντιση M_p (maximum percent overshoot): Είναι η τιμή της μέγιστης κορυφής της καμπύλης απόκρισης μετρούμενη από τη μονάδα. Όταν η τελική τιμή της μόνιμης κατάστασης διαφέρει από τη μονάδα ο συνήθης ορισμός είναι:
$$M_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100\%$$
- Χρόνος αποκατάστασης t_s (settling time): Είναι ο χρόνος που απαιτείται μέχρι να φθάσει και να παραμείνει η καμπύλη απόκρισης μέσα σε ορισμένα όρια γύρω από την τελική τιμή. Το μέγεθος των ορίων εκφράζεται ως απόλυτο ποσοστό της τελικής τιμής (συνήθως $\pm 5\%$ ή $\pm 2\%$).

Ο χρόνος αποκατάστασης t_s που αντιστοιχεί σε ζώνη ανοχής ($\pm 5\%$ ή $\pm 2\%$) μπορεί να μετρηθεί σε μονάδες της χρονικής σταθεράς $T = \frac{1}{\zeta \cdot \omega_n}$ για διάφορες τιμές του ζ .



Σχήμα 2. – 15 'Χρόνος αποκατάστασης t_s συναρτήσει του ζ . Βιβλ. [2]

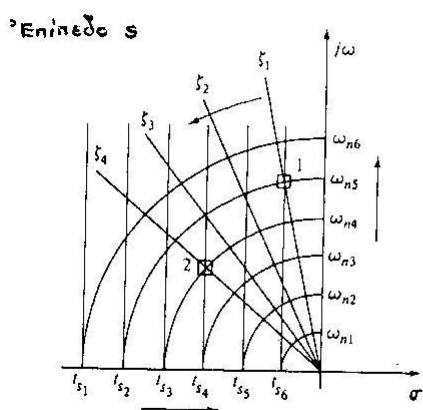
Τα σημεία ασυνέχειας των καμπύλων του σχήματος παρουσιάζονται διότι μια απειροελάχιστη μεταβολή του ζ μπορεί να προκαλέσει μια πεπερασμένη μεταβολή στο χρόνο t_s όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2. – 16 'Καμπύλες απόκρισης μοναδιαίας βαθμίδας που εξηγούν την ασυνέχεια στο χρόνο αποκατάστασης'. Βιβλ. [2]

Προκειμένου να περιοριστούν η μέγιστη υπερακόντιση, ο αριθμός των ταλαντώσεων και ο χρόνος αποκατάστασης, ο λόγος απόσβεσης δεν πρέπει να είναι πολύ μικρός. Για να εξασφαλιστεί ταχεία απόκριση δηλαδή βραχείς χρόνοι καθυστέρησης, ανύψωσης και αποκατάστασης πρέπει η ω_n να είναι μεγάλη. Το παρακάτω σχήμα εικονίζει καμπύλες σταθερού ζ , ω_n και t_s στο επίπεδο s και παρέχει τη συσχέτιση των παραμέτρων αυτών με τις ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης (πόλους). Οι καμπύλες που αντιστοιχούν σε σταθερές τιμές του t_s είναι οι ευθείες γραμμές που είναι κάθετες στον οριζόντιο άξονα του μιγαδικού επιπέδου (κάθετες στον πραγματικό άξονα του μιγαδικού επιπέδου). Για παράδειγμα ένα σύστημα με πόλους στο σημείο 1 (και στο συζυγές του) έχει μεγαλύτερη ποσοστιαία υπερακόντιση, μεγαλύτερο t_s και βραχύτερα t_d , t_r και t_p συγκριτικά με το σύστημα που έχει πόλους στο σημείο 2 (και στο συζυγές του). Βιβλ. [2].

Από τις τρεις παραμέτρους του παρακάτω σχήματος οι δύο μπορούν να επιλεγούν ανεξάρτητα. Μια παρατήρηση εδώ είναι ότι ενώ το ω_n αυξάνει απομακρυνόμενο από την αρχή του μιγαδικού επιπέδου ο χρόνος αποκατάστασης t_s αυξάνει καθώς πλησιάζει την αρχή των αξόνων του μιγαδικού επιπέδου. Όταν δε φτάσει στην αρχή απειρίζεται. Μια άλλη παρατήρηση που πρέπει να γίνει είναι ότι το ω_n δεν μπορεί να αυξηθεί πάρα πολύ για δύο λόγους πρώτον γιατί επιδεινώνει τα προβλήματα που οφείλονται σε εισόδους διαταραχών και δεύτερον απαιτεί (η αύξησή του) μεγάλη κατανάλωση ενέργειας (αντιοικονομική λειτουργία).

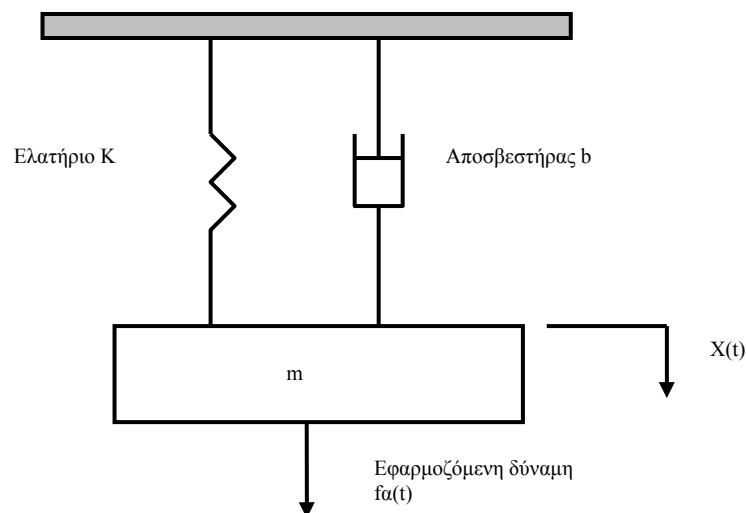


Σχήμα 2. – 17 Γεωμετρικοί τόποι των σχέσεων:

$\zeta = \text{σταθερά}$ $\omega_n = \text{σταθερά}$ και $t_s = \text{σταθερά}$ στο επίπεδο s' . Βιβλ. [2]

Μια άλλη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι επιλέγοντας την τιμή του ζ που αντιστοιχεί σε γωνία $\beta \ 45^\circ$ και ενώ την διατηρούμε σταθερή αυξάνουμε το ω_n οδεύουμε σε μικρότερα t_s δηλαδή βραχύτερους χρόνους αποκατάστασης που είναι και το ζητούμενο από ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου. Αυτό όμως όπως προείπαμε απαιτεί την υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Βιβλ. [2].

Παράδειγμα μηχανικού συστήματος (σχήμα 2. – 18).



Σχήμα 2. – 18 ‘Μηχανικό σύστημα’.

Πριν προχωρήσουμε πρέπει να παρατηρήσουμε ότι το ελατήριο και ο αποσβεστήρας περιγράφονται από σχέσεις της μορφής:

$$f_s = K \cdot \Delta x \quad \text{και} \quad f_d = b \cdot \dot{x} \quad \text{Σχέσεις 2. - 15}$$

Η μετατόπιση της μάζας m μπορεί να μετρηθεί είτε από τη θέση $X(t)$ στην οποία το ελατήριο δεν έχει εκταθεί είτε από τη θέση ισορροπίας $x(t)$. Αν χρησιμοποιηθεί η μεταβλητή $X(t)$, η εξίσωση ισορροπίας δυνάμεων του Newton δίνει:

$$F_{ολ.} = m \cdot \gamma \Leftrightarrow \Leftrightarrow f_{\alpha}(t) - b \cdot \dot{X}(t) - k \cdot X(t) + m \cdot g = m \cdot \ddot{X}(t) \quad \text{Σχέση 2. - 16}$$

Εκφράζουμε τη μετατόπιση $X(t)$ ως το άθροισμα $X(t) = X_0 + x(t)$ όπου X_0 είναι η στατική θέση ισορροπίας και $x(t)$ είναι η χρονικά μεταβλητή μετατόπιση ως προς τη θέση X_0 . Αν τώρα υποθεθεί ότι $f_{\alpha}(0) = 0$, η δυναμική εξίσωση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$f_{\alpha}(t) - b \cdot \dot{x}(t) - k \cdot X_0 - k \cdot x(t) + m \cdot g = m \cdot \ddot{x}(t) \quad \text{Σχέση 2. - 17α}$$

Η εξίσωση ισορροπίας βρίσκεται για $t \rightarrow 0$ και είναι:

$$-k \cdot X_0 + m \cdot g = 0 \quad \text{Σχέση 2. - 17β}$$

Με αφαίρεση των δύο τελευταίων εξισώσεων κατά μέλη προκύπτει η δυναμική εξίσωση ως προς τη μεταβλητή $x(t)$:

$$f_{\alpha}(t) - b \cdot \dot{x}(t) - k \cdot x(t) = m \cdot \ddot{x}(t) \quad \text{Σχέση 2. - 18}$$

Τελικά η δυναμική εξίσωση του μηχανικού συστήματος είναι:

$$m \cdot \ddot{x} + b \cdot \dot{x} + k \cdot x = f_{\alpha}(t) \quad \text{Σχέση 2. - 19}$$

Αν τώρα το x αντικατασταθεί από μια νέα μεταβλητή x_1 και το $\dot{x}$ από μια νέα μεταβλητή x_2 , η διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης μπορεί να εκφρασθεί ισοδύναμα από μια ομάδα εξισώσεων πρώτης τάξης:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{k}{m} \cdot x_1 - \frac{b}{m} \cdot x_2 + \frac{f_{\alpha}}{m} = \frac{1}{m} \cdot (-k \cdot x_1 - b \cdot x_2 + f_{\alpha}) \end{aligned} \quad \text{Σχέση 2. - 20}$$

Οι μεταβλητές x_1 και x_2 είναι μεταβλητές κατάστασης διότι είναι το μικρότερο δυνατό σύνολο που πρέπει να γνωρίζουμε σε κάποια χρονική στιγμή $t = t_0$ προκειμένου να προβλέψουμε μονοσήμαντα τη μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος σε κάθε είσοδο που καθορίζεται για $t \geq t_0$. Βιβλ. [2].

Η επιλογή των μεταβλητών κατάστασης δεν είναι μοναδική. Μία κατάλληλη όμως επιλογή μπορεί να διευκολύνει πολύ τη λύση ενός προβλήματος. Για κάθε καθορισμένη επιλογή βέβαια μεταβλητών κατάστασης η κατάσταση του συστήματος προσδιορίζεται μοναδικά.

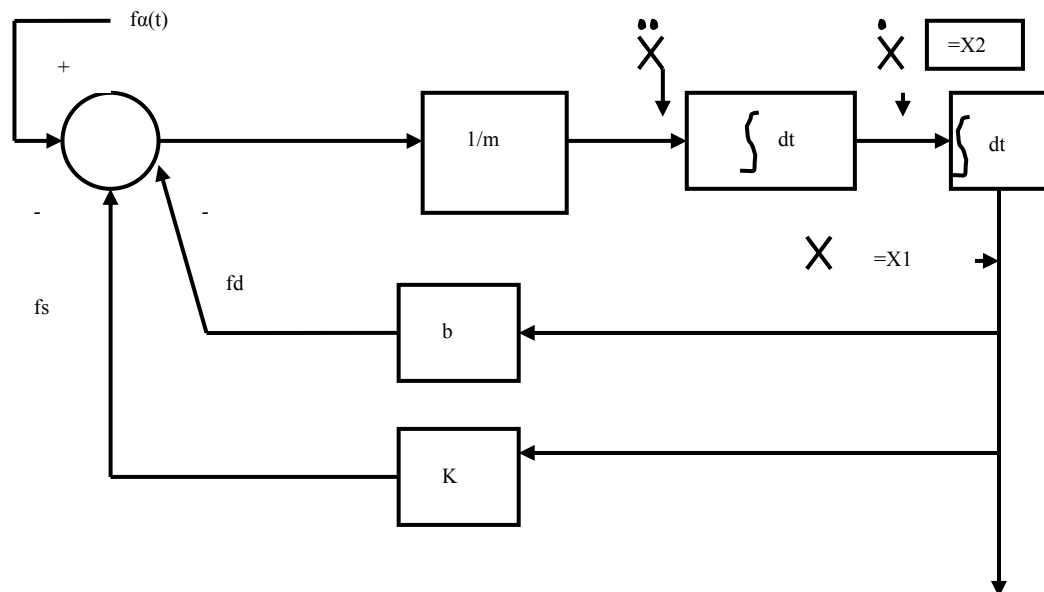
Οι μεταβλητές κατάστασης πρέπει να είναι γραμμικά ανεξάρτητες. Δηλαδή η σχέση:

$$\alpha_1 \cdot x_1 + \alpha_2 \cdot x_2 + \dots + \alpha_n \cdot x_n = 0 \quad \text{Σχέση 2. - 21}$$

πρέπει να ικανοποιείται όταν και μόνον όταν:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = 0 \quad \text{Σχέση 2. - 22}$$

Τα σημεία της μη μοναδικότητας και ανεξαρτησίας γίνονται εύκολα κατανοητά με τη βοήθεια του δομικού διαγράμματος (block diagram) του ανωτέρω παραδείγματος: (σχήμα 2. - 19).



Σχήμα 2. - 19 'Δομικό διάγραμμα γραμμικού μηχανικού συστήματος'.

Στο παραπάνω σχήμα συμβολίζεται με f_d η δύναμη του αποσβεστήρα και με f_s η δύναμη του ελατηρίου στη μάζα.

Στο ανωτέρω σύστημα 2^{ης} τάξης οι μεταβλητές $x_1 = x$ και $x_2 = \dot{x}$ είναι γραμμικά ανεξάρτητες και αποτελούν σύνολο μεταβλητών κατάστασης.

Γενικά οι n μεταβλητές κατάστασης που απαιτούνται για να ορίσουν την κατάσταση ενός συστήματος μπορούν να γραφούν ως συνιστώσες του διανύσματος κατάστασης $\vec{x}$. Στο παρόν παράδειγμα οι εξισώσεις γράφονται:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b}{m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} \cdot [f_a] \quad \text{Σχέση 2. - 23}$$

Η

$$\dot{\vec{x}} = A \cdot \vec{x} + B \cdot \vec{u} \quad \text{Σχέση 2. - 24}$$

Όπου η A είναι 2*2 μήτρα, η B 2*1 μήτρα, το x είναι 2*1 διάνυσμα και το u είναι 1*1 διάνυσμα. Το $\vec{u}$ είναι το διάνυσμα ελέγχου του συστήματος.

Μια μεταβλητή κατάστασης δεν είναι υποχρεωτικά και μεταβλητή εξόδου και αντιστρόφως. Ως μεταβλητές εξόδου εκλέγονται εκείνες που παρουσιάζουν ενδιαφέρον στη μελέτη του προβλήματος. Βιβλ. [2]. Αν π.χ. στο παράδειγμα η μεταβλητή εξόδου είναι: $y = x_1$ (θέση) μπορεί επίσης να γραφεί ως:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \vec{y} = C \cdot \vec{x} \quad \text{Σχέση 2. - 25}$$

Όπου η C είναι 1*2 μήτρα και η D στο παρόν παράδειγμα είναι η μηδενική μήτρα.

Επειδή οι δύο διαφορικές εξισώσεις που χαρακτηρίζουν το σύστημα είναι γραμμικές μπορούμε να εφαρμόσουμε μετασχηματισμό Laplace στη μητρική διαφορική εξίσωση:

$$\vec{\dot{x}} = A \cdot \vec{x} + B \cdot \vec{u} \quad \text{Σχέση 2. - 26}$$

Η οποία με Laplace δίνει:

$$s \cdot \vec{x} = A \cdot \vec{x} + B \cdot \vec{u} \Rightarrow (s \cdot I - A) \cdot \vec{x} = B \cdot \vec{u} \quad \text{Σχέση 2. - 27}$$

Πολλαπλασιάζοντας από τα αριστερά προς τα δεξιά με την αντίστροφη μήτρα $(s \cdot I - A)^{-1}$ έχουμε:

$$\vec{x} = (s \cdot I - A)^{-1} \cdot B \cdot \vec{u} \quad \text{Σχέση 2. - 28}$$

Αντικαθιστώντας το $\vec{x}$ από την πάνω σχέση στην σχέση $\vec{y} = C \cdot \vec{x}$ έχουμε:

$$\vec{y} = C \cdot \vec{x} \Rightarrow \vec{y} = C \cdot (s \cdot I - A)^{-1} \cdot B \cdot \vec{u} \quad \text{Σχέση 2. - 29}$$

Επειδή η συνάρτηση μεταφοράς είναι ο λόγος εξόδου προς είσοδο $G(s) = \frac{\vec{y}}{\vec{u}}$

$$\text{έχουμε: } G(s) = \frac{\vec{y}}{\vec{u}} = C \cdot (s \cdot I - A)^{-1} \cdot B \quad \text{Σχέση 2. - 30}$$

$$\text{Έχουμε βρει ότι: } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K/m & -b/m \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix} \text{ και } C = [1 \quad 0]$$

Η αντίστροφη μήτρα είναι:

$$(s \cdot I - A)^{-1} = \begin{bmatrix} s & -1 \\ K/m & s + b/m \end{bmatrix}^{-1} \quad \text{Σχέση 2. - 31}$$

$$\text{Βρίσκουμε τον } Adj(s \cdot I - A) = \begin{bmatrix} s + b/m & -K/m \\ 1 & s \end{bmatrix}$$

Βρίσκουμε την ορίζουσα του $(s \cdot I - A)$

$$|s \cdot I - A| = s \cdot (s + \frac{b}{m}) + \frac{K}{m} \quad \text{Σχέση 2. - 32}$$

Άρα η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$G(s) = \frac{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s + \frac{b}{m} & -\frac{K}{m} \\ 1 & s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix}}{s \cdot (s + \frac{b}{m}) + \frac{K}{m}} = \frac{\begin{bmatrix} s + \frac{b}{m} & -\frac{K}{m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix}}{s \cdot (s + \frac{b}{m}) + \frac{K}{m}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow G(s) = \frac{-\frac{K}{m} \cdot \frac{1}{m}}{s \cdot (s + \frac{b}{m}) + \frac{K}{m}} = \frac{-\frac{K}{m^2}}{s^2 + \frac{s \cdot b}{m} + \frac{K}{m}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow G(s) = \frac{\frac{K}{m^2}}{\frac{m \cdot s^2 + s \cdot b + K}{m}} = \frac{K \cdot m}{m^2 \cdot (m \cdot s^2 + b \cdot s + K)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow G(s) = \frac{K}{m^2 \cdot (s^2 + \frac{b}{m} \cdot s + \frac{K}{m})}$$

Σχέσεις 2. – 33

Η χαρακτηριστική εξίσωση είναι ο παρονομαστής του ανωτέρω κλάσματος:

$$s^2 + \frac{b}{m} \cdot s + \frac{K}{m} = 0 \quad \text{Σχέση 2. – 34}$$

Οι ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης είναι οι πόλοι του συστήματος. Λύνω την εξίσωση δευτέρου βαθμού και:

$$s_{1,2} = \frac{-\frac{b}{m} \pm \sqrt{\left(\frac{b}{m}\right)^2 - 4 \cdot \frac{K}{m}}}{2} \quad \text{Σχέση 2. – 35}$$

Υποθέτουμε ότι: $b = 10 \frac{\text{Newton} \cdot \text{sec}}{\text{meter}}$, $K = 20 \frac{\text{Newton}}{\text{meter}}$ και $m = 10 \text{ Kg}$

Κατ' αρχήν πρέπει το πραγματικό μέρος των πόλων να είναι αρνητικό. Αντικαθιστώντας έχουμε:

$$s_1 = \frac{-\frac{10}{10} + \sqrt{\frac{10}{10} - 4 \cdot \frac{20}{10}}}{2} \Rightarrow s_1 = \frac{-1 + \sqrt{-7}}{2} \Rightarrow s_1 = \frac{-1 + 2.645 \cdot i}{2} \Rightarrow s_1 = -0.5 + 1.322 \cdot i$$

Ανάλογα με τις τιμές των K , b και m προκύπτουν οι πόλοι οι οποίοι πρέπει να βρίσκονται στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο. Όπως προκύπτει από τις παραπάνω πράξεις βρίσκουμε στο αριστερό ημιεπίπεδο (το πραγματικό μέρος είναι αρνητικό). Για να υπολογίσουμε τη γωνία β και το ω_n έχουμε:

$$\tan(\beta) = \frac{1.322}{0.5} = 2.644 \Rightarrow \beta = 69.28^\circ$$

$$\zeta = \cos(69.28^\circ) = 0.3538$$

$$\omega_n = \sqrt{(0.5)^2 + (1.322)^2} = 1.4133 \quad \frac{rad}{sec}$$

Παρατηρούμε ότι το ζ είναι μακριά από την επιθυμητή τιμή του 0.75. Πρέπει να μειώσουμε τη γωνία β για να μπορέσει να αυξηθεί ο λόγος απόσβεσης. Γι' αυτό

$$\text{θέτουμε: } b = 20 \quad \frac{Newton \cdot sec}{meter}, K = 10 \quad \frac{Newton}{meter} \text{ και } m = 10 \quad Kg$$

$$s_1 = \frac{-\frac{20}{10} + \sqrt{\frac{20}{10} - 4 \cdot \frac{10}{10}}}{2} \Rightarrow s_1 = \frac{-2 + \sqrt{-2}}{2} \Rightarrow s_1 = \frac{-2 + 1.4142 \cdot i}{2} \Rightarrow s_1 = -1 + 0.7071 \cdot i$$

$$\tan(\beta) = \frac{0.7071}{1} = 0.7071 \Rightarrow \beta = 35.26^\circ$$

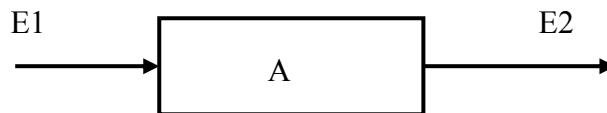
$$\zeta = \cos(35.26^\circ) = 0.8165$$

$$\omega_n = \sqrt{(1)^2 + (0.7071)^2} = 1.2247 \quad \frac{rad}{sec}$$

Με δοκιμές μπορούμε να τοποθετήσουμε τους πόλους σε κάποια επιθυμητή περιοχή και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις τιμές των K και b (το m θεωρείται σταθερό) που οδήγησαν τους πόλους στην επιθυμητή περιοχή, κάνοντας αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace στη συνάρτηση μεταφοράς και λύνοντάς την ως προς $y(t)$ μπορούμε να βρούμε το χρόνο αποκατάστασης t_s , την υπερακόντιση, το χρόνο ανύψωσης και το χρόνο κορυφής. Αν κάποιο από αυτά τα μεγέθη δεν είναι ικανοποιητικό μπορούμε να συνεχίσουμε τις δοκιμές. Μπορεί όμως να προκύψει ότι

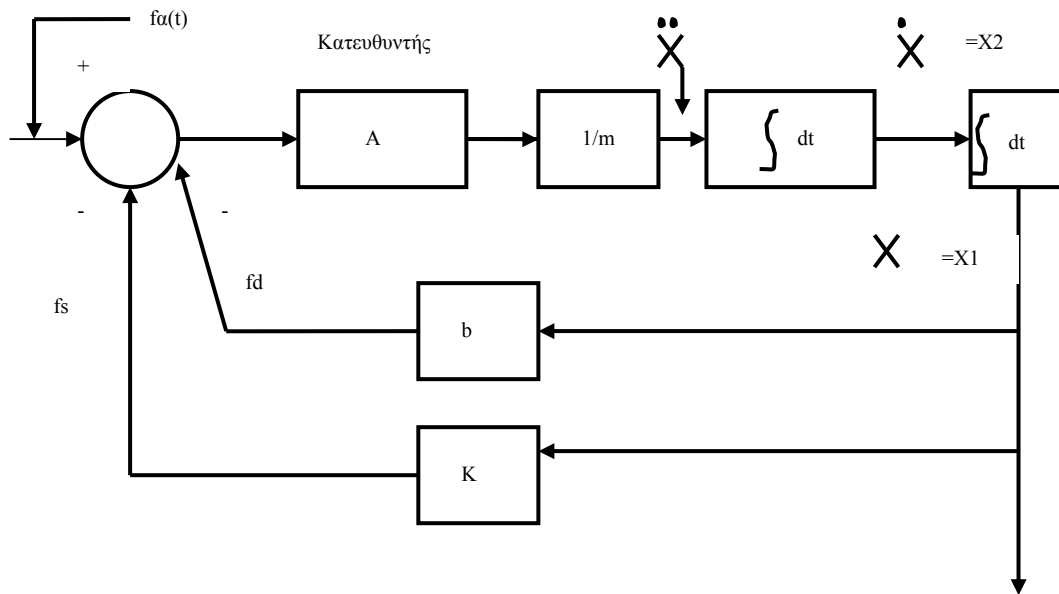
δεν υπάρχει συνδυασμός παραμέτρων K και b που να δίνει μια χαμηλή τιμή του χρόνου αποκατάστασης.

Αυτό συμβαίνει γιατί το σύστημά μας που αποτελείται μόνο από παθητικά στοιχεία δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις μας. Εδώ λοιπόν μπορούμε να εισάγουμε ένα ενεργητικό στοιχείο που ονομάζεται ενισχυτής. Η ικανότητα μεταβολής του κέρδους του ενισχυτή (παράγοντας ενίσχυσης – gain factor) επιτρέπει την τροποποίηση της ταχύτητας απόκρισης και της ακρίβειας των δυναμικών συστημάτων. Το παρακάτω σχήμα εικονίζει το συναρτησιακό τετράγωνο του ενισχυτή. Βιβλ. [2].



Σχήμα 2. – 20 ‘Δομικό διάγραμμα Ενισχυτή’.

Όπου το A είναι ο συντελεστής με τον οποίο πολλαπλασιάζεται το σήμα σφάλματος ($E1$) του προηγούμενου παραδείγματος για να ενισχυθεί σε ($E2$) και να αποκτήσει ταχύτερη απόκριση το σύστημα (παρακάτω φαίνεται το δομικό διάγραμμα του παραδείγματός μας με ενισχυτή). Ο ενισχυτής λέγεται και κατευθυντής τύπου ‘P’.



Σχήμα 2. – 21 ‘Δομικό διάγραμμα γραμμικού μηχανικού συστήματος με κατευθυντή’.

Ο ενισχυτής όπως είπαμε ονομάζεται και κατευθυντής. Ανήκει μάλιστα σε μια ξεχωριστή κατηγορία κατευθυντών που ονομάζονται αναλογικοί κατευθυντές όπως θα περιγράψουμε παρακάτω. Βιβλ. [2].

2.6. Κλασσικός έλεγχος (κατευθυντές).

Αναλογικός κατευθυντής (“P” controler). Στον αναλογικό κατευθυντή (ενισχυτή) η σχέση μεταξύ της εξόδου του $m(t)$ και του σήματος σφάλματος $e(t)$ στην είσοδό του είναι.

$$m(t) = K_C \cdot e(t) \quad \text{Σχέση 2. – 36}$$

Δηλαδή η συνάρτηση μεταφοράς του είναι.

$$G_C(s) = K_C = \text{σταθερά} \quad \text{Σχέση 2. – 37}$$

Όπου K_C είναι το κέρδος.

Ολοκληρωτικός κατευθυντής (“I” controler)

Στον κατευθυντή με ολοκληρωτική δράση ελέγχου, η τιμή της εξόδου $m(t)$ μεταβάλλεται ανάλογα προς το ολοκλήρωμα του σήματος σφάλματος, δηλαδή

$$m(t) = K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \quad \text{Σχέση 2. – 38}$$

Όπου K_i είναι μια προσαρμοζόμενη σταθερά. Η συνάρτηση μεταφοράς του κατευθυντή είναι

$$G_c(s) = \frac{K_i}{s} \quad \text{Σχέση 2. – 39}$$

Η ολοκλήρωση που πραγματοποιεί ο κατευθυντής και η επακόλουθη δράση του σήματος m στην έξοδο y συνεχίζεται μέχρις ότου η τιμή της εξόδου φτάσει πολύ κοντά στην τιμή αναφοράς r . Έτσι το σφάλμα μόνιμης κατάστασης οδηγείται στο μηδέν. Παράλληλα όμως ο I κατευθυντής μειώνει το βαθμό ευστάθειας του συστήματος δεδομένου ότι αυξάνει η τάξη του όλου συστήματος ελέγχου.

Αναλογικός – Ολοκληρωτικός κατευθυντής (PI controller). Η δράση ελέγχου ορίζεται από την εξίσωση

$$m(t) = K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt \quad \text{Σχέση 2. – 40}$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του κατευθυντή είναι

$$G_c(s) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) \quad \text{Σχέση 2. – 41}$$

Όπου K_c είναι το αναλογικό κέρδος και T_i ο χρόνος ολοκλήρωσης. Τα K_c και T_i μπορούν να προσαρμόζονται.

Αναλογικός – Διαφορικός κατευθυντής (P-D controller)

Η δράση ελέγχου ορίζεται από την εξίσωση

$$m(t) = K_c \cdot e(t) + K_c \cdot T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Σχέση 2. – 42}$$

Και η συνάρτηση μεταφοράς είναι

$$G_C(s) = K_C \cdot (1 + T_D \cdot s) \quad \text{Σχέση 2. - 43}$$

Τα K_C και T_D μπορούν να προσαρμόζονται. Η διαφορική δράση ελέγχου λέγεται και έλεγχος ρυθμού διότι το μέγεθος της εξόδου του κατευθυντή είναι ανάλογο προς το ρυθμό μεταβολής του σήματος σφάλματος. Ο χρόνος διαφόρισης T_D είναι το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η δράση ρυθμού προηγείται της δράσης του αναλογικού ελέγχου.

Αναλογικός – Ολοκληρωτικός κατευθυντής – Διαφορικός κατευθυντής (PID controller). Ο PID κατευθυντής συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των τριών δράσεων ελέγχου. Βιβλ. [2], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [35], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [61], [30], [37], [32], [33]. Η εξίσωσή του είναι:

$$m(t) = K_C \cdot e(t) + K_C \cdot T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_C}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt \quad \text{Σχέση 2. - 44}$$

Με συνάρτηση μεταφοράς

$$G_C(s) = K_C \cdot (1 + T_D \cdot s + \frac{1}{T_i \cdot s}) \quad \text{Σχέση 2. - 45}$$

Περίληψη χαρακτηριστικών των κλασσικών κατευθυντών στο πεδίο του χρόνου.

‘P’ έλεγχος: Είναι συνυφασμένος με την αρχή της αρνητικής ανάδρασης και κάνει ταχύτερη την απόκριση ενός συστήματος.

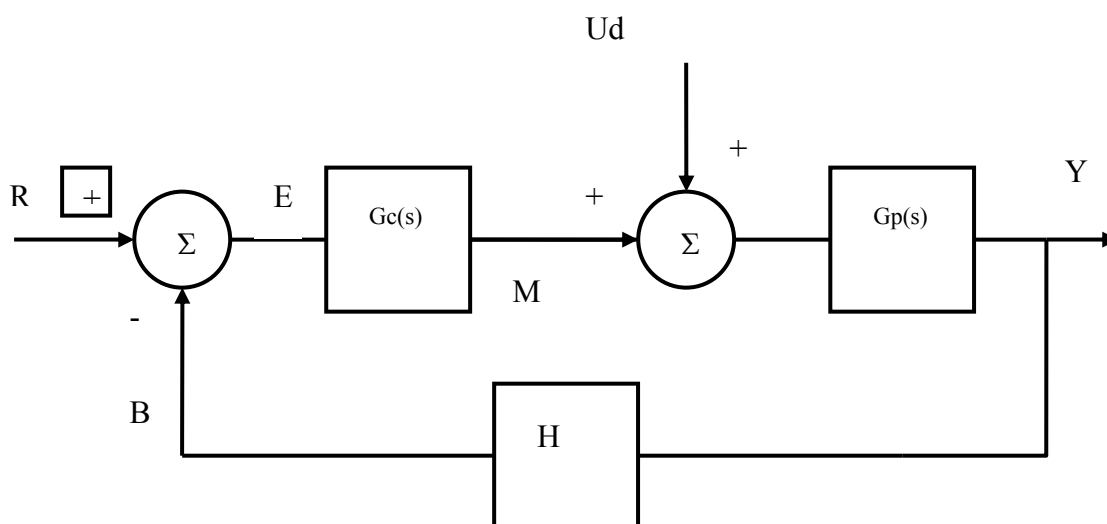
‘D’ έλεγχος: Επισημαίνει το ρυθμό μεταβολής του σήματος σφάλματος και η δράση του μειώνει την ταλαντωτική συμπεριφορά της εξόδου (βελτίωση ευστάθειας) και παράλληλα κάνει την απόκριση του συστήματος βραχύτερη.

‘I’ έλεγχος: Το σήμα δράσης στην έξοδο του $m(t)$ είναι το ολοκλήρωμα του σήματος σφάλματος $e(t)$ και μπορεί να είναι $m(t) \neq 0$ όταν το $e(t)=0$. Η δράση αυτή μειώνει το

σφάλμα μόνιμης κατάστασης αλλά ενδέχεται να οδηγήσει σε ταλαντωτική απόκριση με αποσβενόμενο ή αυξανόμενο εύρος (μείωση ευστάθειας). Βιβλ. [4], [8].

2.7. Σχεδιασμός αυτομάτων συστημάτων κλασσικού ελέγχου.

Εδώ παρουσιάζεται ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου. Η συνάρτηση μεταφοράς του όλου συστήματος είναι:



Σχήμα 2. – 22 ‘Δομικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου.’

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_C \cdot G_P}{1 + G_C \cdot G_P \cdot H} \quad \text{Σχέση 2. – 46}$$

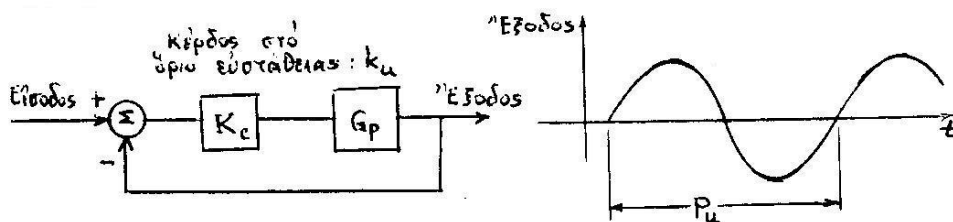
Η παραπάνω συνάρτηση μεταφοράς προκύπτει από τον Πίνακα (2. – 3).

Οι ρίζες του αριθμητή λέγονται μηδενιστές ενώ οι ρίζες του παρονομαστή λέγονται πόλοι. Ανάλογα με τη θέση των πόλων και των μηδενιστών στο μιγαδικό επίπεδο τροποποιούμε τις παραμέτρους του κατευθυντή έτσι ώστε το συνολικό σύστημα να γίνει ευσταθές με γρήγορη απόκριση. Το G_C είναι η συνάρτηση μεταφοράς του κατευθυντή (controller) ενώ το G_P είναι η συνάρτηση μεταφοράς της διεργασίας (process). Βιβλ. [2].

2.8. Μεθοδολογία του τόπου των ριζών.

Στην μεθοδολογία του τόπου των ριζών τοποθετούμε τους πόλους στο μιγαδικό επίπεδο. Η απόσταση των πόλων από την αρχή των αξόνων είναι η ταχύτητα απόκρισης του συστήματος ω_n και το συνημίτονο της γωνίας β είναι ο λόγος απόσβεσης ζ (αν $\zeta > 1$ έχουμε υπεραπόσβεση, αν $\zeta < 1$ έχουμε υποαπόσβεση και αν $\zeta = 1$ έχουμε κρίσιμη απόσβεση). Η επιθυμητή περιοχή που θέλουμε να βρίσκονται οι πόλοι μας είναι σε γωνία 45 μοιρών με σχετικά μεγάλο ω_n για να έχουμε και γρήγορη απόκριση σε μια διαταραχή αλλά και μικρό χρόνο αποκατάστασης t_s . Όλα αυτά επιτυγχάνονται με τη ρύθμιση των παραμέτρων του κατευθυντή που ελέγχει το σύστημα. Πως γίνεται όμως η ρύθμιση αυτή στην περίπτωση που η προς έλεγχο διεργασία δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί (περιέχει παραμέτρους που αφ' ενός δεν μπορούν να μετρηθούν και αφ' ετέρου μεταβάλλονται συνεχώς) ή το μοντέλο της διεργασίας είναι άγνωστο;

Μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για τη ρύθμιση των κατευθυντών PID είναι κυρίως δύο ειδών. Η μέθοδος των Ziegler – Nichols και η μέθοδος με γεννήτρια ημιτονοειδών σημάτων. Η μέθοδος των Ziegler – Nichols για συστήματα που εμφανίζουν φαινόμενα συντονισμού περιγράφεται ως εξής. Στη μέθοδο αυτή τοποθετούμε ένα στοιχείο 'P' ελέγχου μπροστά από την υπό μελέτη εγκατάσταση κλείνουμε το βρόχο ανάδρασης και αυξάνουμε σταδιακά το κέρδος K_C μέχρις ότου η καμπύλη εξόδου αποκτήσει μορφή ημιτονοειδούς καμπύλης (σχήμα). Βιβλ. [2], [8], [9], [14].



Σχήμα 2. – 23 ‘Παράμετροι εγκατάστασης στη 2^η μέθοδο των Ziegler – Nickols’.
Βιβλ. [2]

Καταγράφουμε την τιμή του κέρδους $K_c = K_u$ στο όριο ευστάθειας και την περίοδο ταλάντωσης P_u . Η περίοδος P_u εκφράζει τη φυσική ταχύτητα, το δε κέρδος κλειστού βρόχου K_u είναι εκείνο που οδηγεί το σύστημα σε ταλάντωση. Οι προτεινόμενες τιμές των παραμέτρων K_c , T_i και T_D είναι:

Για ‘P’ έλεγχο: $K_c = 0.5 \cdot K_u$

Για ‘P – I’ έλεγχο: $K_c = 0.45 \cdot K_u$, $T_i = 0.83 \cdot P_u$

Για ‘P – I – D’ έλεγχο: $K_c = 0.6 \cdot K_u$, $T_i = 0.5 \cdot P_u$, $T_D = 0.125 \cdot P_u$

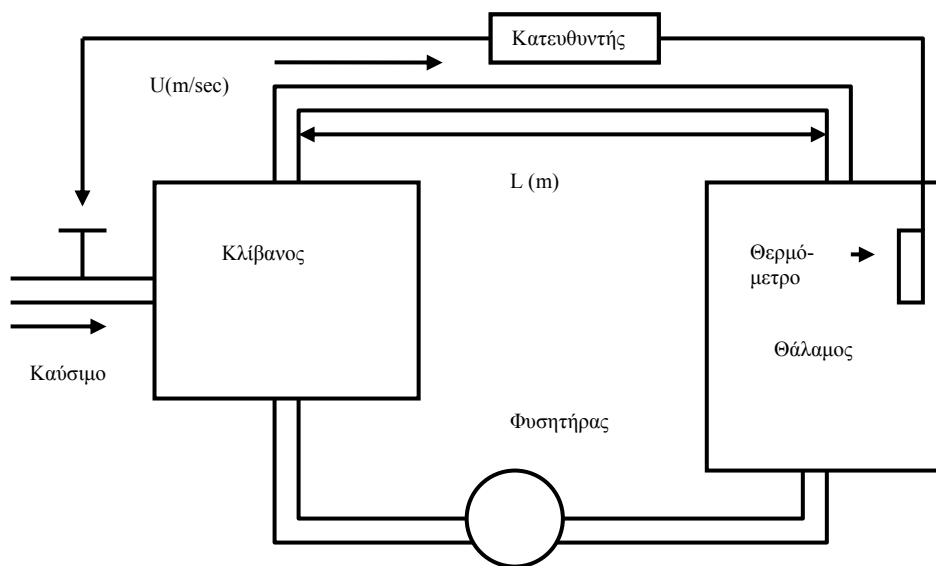
Η δεύτερη μέθοδος στηρίζεται σε μια γεννήτρια ημιτονοειδών σημάτων που επηρεάζει την έξοδο η οποία διακύμανση της εξόδου καταγράφεται. Η μέτρηση του λόγου του εύρους του σήματος εξόδου προς αυτό της εισόδου δίνει το κέρδος (gain) του συστήματος που ονομάζεται και λόγος εύρους (amplitude ratio) ή εξασθένηση (attenuation). Το δεύτερο μέγεθος που καταγράφεται είναι η μεταβολή της φάσης που υφίσταται το σήμα. Το κέρδος και η φάση συναρτήσει της συχνότητας χαράζονται σε διαγράμματα BODE (γίνεται αναφορά γι’ αυτά παρακάτω) και από εκεί προσδιορίζουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος Ενεργού Ιλύος Ε.Ι. Βιβλ. [8].

Το πλεονέκτημα της δεύτερης μεθόδου είναι ότι δεν χρειάζεται να βγάλουμε τη μονάδα (Ε.Ι.) εκτός λειτουργίας για να πραγματοποιήσουμε τον προσδιορισμό της συνάρτησης μεταφοράς και κατά συνέπεια να ρυθμίσουμε τον PID κατευθυντή μας. Αντίθετα η πρώτη μέθοδος απαιτεί να τεθεί η μονάδα εκτός λειτουργίας. Οπότε χρειαζόμαστε δύο μονάδες. Να κλείνουμε τη μία για μετρήσεις και να δουλεύει η άλλη και το αντίστροφο. Βιβλ. [8].

Η νοοτροπία πάντως που επικρατεί σήμερα είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αποφυγή τέτοιων μετρήσεων για τη ρύθμιση των κατευθυντών οι οποίοι πολλές φορές ρυθμίζονται εμπειρικά ή με τη βοήθεια τράπεζας πληροφοριών από προηγούμενη λειτουργία και συμπεριφορά της μονάδας

2.9. Νεκρός χρόνος ή καθυστέρηση διακίνησης

Μια καθυστέρηση στη μέτρηση, είτε στη δράση ενός κατευθυντή είτε στη λειτουργία ενός τελικού στοιχείου ελέγχου κ.λ.π. λέγεται νεκρός χρόνος ή καθυστέρηση διακίνησης. Νεκρός χρόνος παρουσιάζεται στα περισσότερα συστήματα ελέγχου βιομηχανικών διεργασιών (process control systems).



Σχήμα 2. – 24 ‘Σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας’.

Το παραπάνω σχήμα δείχνει ένα θερμικό σύστημα στο οποίο κυκλοφορεί ζεστός αέρας για να διατηρεί σταθερή τη θερμοκρασία ενός θαλάμου. Στο σύστημα αυτό το στοιχείο μέτρησης της θερμοκρασίας βρίσκεται σε απόσταση L μέτρων από τον κλίβανο η ταχύτητα του αέρα είναι U m/sec και παρέρχεται χρόνος $T=L/U$ sec προτού μια μεταβολή στη θερμοκρασία του κλιβάνου προκαλέσει αντίστοιχη δράση για το μηδενισμό του σφάλματος. Η είσοδος $r(t)$ και η έξοδος $y(t)$ ενός στοιχείου με καθυστέρηση διακίνησης συνδέεται με τη σχέση $y(t)=r(t-T)$ όπου T ο νεκρός χρόνος. Η συνάρτηση μεταφοράς του νεκρού χρόνου δίνεται από τη σχέση (εξ. 2. – 47).

$$D(s) = \frac{L[r(t-T) \quad u(t-T)]}{L[r(t) \quad u(t)]} = \frac{R(s) \cdot e^{-T \cdot s}}{R(s)} = e^{-T \cdot s} \quad \text{Εξίσωση 2. - 47}$$

Όσο πιο μεγάλος ο νεκρός χρόνος τόσο πιο πολύ αποσταθεροποιείται το σύστημά μας. Στην περίπτωση της διεργασίας Ε.Ι. έχουμε νεκρό χρόνο στον αερισμό. Ο νεκρός χρόνος στον αερισμό του βιολογικού αντιδραστήρα δεν οφείλεται τόσο σε κάποια καθυστέρηση του μετρητικού οργάνου που μετρά τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου ούτε στην καθυστέρηση της δράσης δηλαδή την ενεργοποίηση των συμπιεστών του αέρα, αλλά στο χρόνο που χρειάζεται για να διαχυθεί ο αέρας (οξυγόνο) από τις φυσαλίδες (αέρια φάση) στο υγρό του βιολογικού αντιδραστήρα. Αυτός ο χρόνος προσδιορίζεται από το ρυθμό μεταφοράς μάζας κατά τον αερισμό και συμβολίζεται με K_{La} . Έτσι υπάρχει σημαντική καθυστέρηση από τη στιγμή που ενεργοποιούνται οι συμπιεστές μέχρι τη στιγμή που θα φτάσει η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο υγρό μέσο την επιθυμητή τιμή. Βιβλ. [2], [24], [34], [20] [31], [38].

2.10. Διαγράμματα Bode και Nyquist.

Εκτός από τη μεθοδολογία του τύπου των ριζών έχουμε τα διαγράμματα Bode και Νίquist τα οποία μας βοηθούν επίσης στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου αλλά με διαφορετικό τρόπο το καθένα. Επίσης οι μέθοδοι αυτές έχουν και τις δικές τους παραμέτρους μέσω των οποίων γίνεται η αξιολόγηση του συστήματος (όπως είχαμε στον τύπο των ριζών την υπερακόντιση, το χρόνο αποκατάστασης κ.α.). Βιβλ. [2], [24], [39], [38].

3. ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΛΥΟΣ (Ε.Ι.).

3.1. Αισθητήρες και λάθη στην (E.I.).

Ένα άλλο μεγάλο πρόβλημα της διεργασίας Ενεργού Ιλύος (E.I.) είναι οι μετρήσεις των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος όπως το COD, η αμμωνία, τα φωσφορικά και νιτρικά άλατα. Στην περίπτωση μας οι δύο μεταβλητές κατάστασης είναι οι X_H και S_s . Αυτές είναι οι συγκεντρώσεις των μ/ων και του υποστρώματος αντίστοιχα. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση αυτών των μεταβλητών απαιτούν πολύπλοκη ρύθμιση και πολλές φορές δίνουν αποτελέσματα με μεγάλα σφάλματα. Σαν συνέπεια αυτού είναι αναξιόπιστοι. Άλλα προβλήματα τέτοιων αισθητήρων είναι το μεγάλο τους κόστος, η πολύπλοκη συντήρησή τους και ο νεκρός χρόνος που κάποιοι αισθητήρες εισάγουν στο σύστημά μας. Ένα πρόβλημα πολύ σημαντικό αν αναλογιστούμε ότι για να υπάρχει πραγματικός έλεγχος της διεργασίας οι μετρήσεις πρέπει να διεξάγονται σε πραγματικό χρόνο. Για τους παραπάνω λόγους πολλοί ερευνητές και μηχανικοί άρχισαν να χρησιμοποιούν αισθητήρες εμμέσων παραμέτρων που είναι σχετικά φθινοί και αξιόπιστοι στις μετρήσεις τους. Στη συνέχεια προσπαθούμε μέσω κάποιων σχέσεων να υπολογίσουμε από τις μετρήσεις των εμμέσων παραμέτρων τις παραμέτρους που πραγματικά χρειαζόμαστε για να ελέγξουμε το σύστημα όπως για παράδειγμα τις μεταβλητές κατάστασης X_H και S_s . Βιβλ. [34], [39]. Υπάρχουν δύο στρατηγικές ελέγχου. Στρατηγική ελέγχου που βασίζεται σε μία παράμετρο και στρατηγική ελέγχου που βασίζεται σε τουλάχιστον δύο παραμέτρους. Βιβλ. [39].

3.2. Παραδείγματα στρατηγικών ελέγχου μίας παραμέτρου και πολλών παραμέτρων στην (E.I.).

Στρατηγική τύπου DO ή συγκέντρωσης οξυγόνου. Οι αισθητήρες οξυγόνου είναι πολύ διαδεδομένοι και αξιόπιστοι και εφαρμόζονται εδώ και καιρό στον έλεγχο της διεργασίας (E.I.). Η στρατηγική ελέγχου σε πραγματικό χρόνο που μπορεί να εφαρμοστεί με τη μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου και μόνο στηρίζεται στο σημείο απότομης μεταβολής της κλίσης της καμπύλης του διαλυμένου οξυγόνου DO καθώς και στο σημείο απότομης μεταβολής της τιμής του DO που σχετίζεται με το μεταβολικό ρυθμό των μ/ων του συστήματος και σηματοδοτεί το τέλος της διεργασίας απομάκρυνσης του οργανικού υποστρώματος. Στρατηγικές ελέγχου που

στηρίζονται μόνο σε μία παράμετρο όπως το DO συναντώνται σπάνια και συνήθως χρησιμοποιούνται σε στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους.

Στρατηγική τύπου OUR. Το OUR είναι το διαλυμένο οξυγόνο που καταναλώνεται ανά χρόνο και όγκο από τους μ/σμούς. Η τιμή του OUR δείχνει τη δραστηριότητα των μ/ων στη διεργασία μας. Η τιμή του OUR υπολογίζεται χρησιμοποιώντας κάποιον H/Y ή PLC (programmable logic controller) μέσω κάποιου προγράμματος που στηρίζεται στις μετρηθείσες τιμές του DO και σε ένα αλγόριθμο υπολογισμού του OUR που είναι συνάρτηση του DO και του χρόνου. Αυτού του τύπου η στρατηγική ελέγχου στηρίζεται πάλι σε κάποια σημεία της καμπύλης του OUR που μπορούν εύκολα να εντοπιστούν και να εξάγουμε από αυτά πληροφορίες για τις μεταβλητές που μας ενδιαφέρουν. Και αυτή η στρατηγική έχει ίδια μειονεκτήματα με την προηγούμενη μέθοδο και γι' αυτό χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη μέτρηση και άλλων παραμέτρων.

Στρατηγική τύπου PH. Το PH χρησιμοποιείται για να ελέγξουμε την ανοξική ή αναερόβια φάση και ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματά του είναι ότι δεν επηρεάζεται εύκολα από εξωτερικούς παράγοντες. Σαν συνέπεια αυτού η στρατηγική τύπου PH έχει μεγάλη αξιοπιστία παρά τις εξωτερικές διαταραχές από ότι άλλες στρατηγικές που στηρίζονται στη μέτρηση μιας έμμεσης παραμέτρου. Η στρατηγική τύπου PH χωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Η μία βασίζεται σε εντοπισμένα σημεία αλλαγής της καμπύλης του PH και η άλλη βασίζεται στις τιμές της πρώτης και δεύτερης παραγώγου της συνάρτησης του PH. Στρατηγικές που συναντώνται συχνά είναι ένα μίγμα των παραπάνω στρατηγικών ελέγχου. Βιβλ. [39], [40], [41].

3.3. Αλληλεπίδραση βρόχων στην (E.I.).

Ένα άλλο μεγάλο πρόβλημα της διεργασίας E.I. είναι η αλληλεπίδραση των βρόχων ελέγχου. Έστω ότι έχουμε ένα κατευθυντή για κάθε ελεγχόμενη μεταβλητή (π.χ. S_O, X_H, S_S). Ο κάθε βρόχος ελέγχου προσπαθεί να φέρει τη μεταβλητή που ελέγχει στην τιμή αναφοράς στην οποία έχει ρυθμιστεί (π.χ. θερμοστάτης ρυθμισμένος στην τιμή των 20 βαθμών Κελσίου). Ο κάθε βρόχος προσπαθεί να ελέγξει τη δική του μεταβλητή μη λαμβάνοντας υπ' όψη τη συνολική διεργασία και

επηρεάζει έτσι τους άλλους βρόχους ελέγχου. Ένα τέτοιο σύστημα ονομάζεται αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου (decentralized control system). Βιβλ. [8], [9], [38].

Αυτή η αλληλεπίδραση είναι που δημιουργήσε την ανάγκη για τη δημιουργία ενός άλλου τύπου ελέγχου διεργασιών που περιλαμβάνουν πολλές μεταβλητές που πρέπει να ρυθμιστούν. Αυτός ο τύπος ελέγχου ονομάζεται μοντέρνος έλεγχος. Ο μοντέρνος έλεγχος δεν χειρίζεται κάθε μεταβλητή ξεχωριστά αλλά μαζεύει τις μεταβλητές σε διανύσματα ανάλογα με το είδος τους και την ομάδα στην οποία ανήκουν (π.χ. διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης $\vec{x}$ ή διάνυσμα μεταβλητών ελέγχου $\vec{u}$). Ο μοντέρνος έλεγχος χρησιμοποιεί τα διανύσματα αυτά όπως ο κλασσικός έλεγχος χρησιμοποιεί την κάθε μεταβλητή ξεχωριστά. Εξέλιξη του μοντέρνου ελέγχου είναι ο βέλτιστος έλεγχος συστημάτων πολλών μεταβλητών. Βιβλ. [46], [47], [29], [36], [62].

4. ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ.

4.1. Σχέση μεταξύ εξισώσεων κατάστασης και μήτρας μεταφοράς.

Θεωρούμε ένα γραμμικό σύστημα πολλών μεταβλητών το οποίο περιγράφεται από τις εξισώσεις κατάστασης στην τυπική μορφή.

$$\dot{\vec{x}} = A \cdot \vec{x} + B \cdot \vec{u} \quad \text{Σχέση 4. - 1}$$

$$\vec{y} = C \cdot \vec{x} \quad \text{Σχέση 4. - 2}$$

Το $\vec{x}$ είναι το διάνυσμα κατάστασης γιατί τα στοιχεία του είναι οι μεταβλητές κατάστασης. Το $\vec{y}$ είναι το διάνυσμα των μεταβλητών εξόδου και το $\vec{u}$ είναι το διάνυσμα των μεταβλητών ελέγχου.

Εκτελούμε το μετασχηματισμό Laplace στα δύο μέλη της εξίσωσης 4. - 1:

$$(4. - 1) \Rightarrow s \cdot \vec{x} = A \cdot \vec{x} + B \cdot \vec{u} \Rightarrow (s \cdot I - A) \cdot \vec{x} = B \cdot \vec{u} \Rightarrow \vec{x} = (s \cdot I - A)^{-1} \cdot B \cdot \vec{u}$$

Σχέση 4. - 3

Αντικαθιστούμε στην εξίσωση (4. – 2) και παίρνουμε τη μήτρα μεταφοράς:

$$(4.1.-2) \Rightarrow \bar{y} = C \cdot \bar{x} \Rightarrow \bar{y} = C \cdot (s \cdot I - A)^{-1} \cdot B \cdot \bar{u} \quad \text{Σχέση 4. – 4}$$

Και:

$$G(s) = \frac{\bar{y}}{\bar{u}} \Rightarrow G(s) = C \cdot (s \cdot I - A)^{-1} \cdot B \quad \text{Σχέση 4. – 5}$$

$$C \rightarrow m \times n$$

Επειδή: $(s \cdot I - A)^{-1} \rightarrow n \times n$ οι διαστάσεις της μήτρας μεταφοράς είναι $m \times r$.

$$B \rightarrow n \times r$$

$$\text{Έχω: } G(s) = \begin{bmatrix} Q_{11}/D & Q_{12}/D & \dots & Q_{1r}/D \\ Q_{21}/D & Q_{22}/D & \dots & Q_{2r}/D \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{m1}/D & Q_{m2}/D & \dots & Q_{mr}/D \end{bmatrix} \quad \text{Σχέση 4. – 6}$$

Στα γραμμικά συστήματα που περιλαμβάνουν πολλές μεταβλητές αντί για μια συνάρτηση μεταφοράς που είχαμε στα συστήματα μιας εισόδου μιας εξόδου στον κλασικό έλεγχο, έχουμε μια μήτρα μεταφοράς. Τα επιμέρους στοιχεία της μήτρας αυτής είναι συναρτήσεις μεταφοράς. Βιβλ. [62].

Πόλοι είναι οι ρίζες του παρονομαστή της $G(s)_{ij}$ (D) και οι μηδενιστές είναι οι ρίζες του αριθμητή του $G(s)_{ij}$, (Q_{ij}). Αυτά παριστάνονται στο μιγαδικό επίπεδο και για να είναι το σύστημα ευσταθές πρέπει οι πόλοι να βρίσκονται στο αριστερό ημιεπίπεδο. Αν οι μηδενιστές είναι και αυτοί στο αριστερό ημιεπίπεδο τότε το σύστημά μας είναι ευσταθές παντού. Αν έχουμε πόλους στο αριστερό και μηδενιστές στο δεξιό ημιεπίπεδο τότε το σύστημά μας είναι κατά συνθήκη ευσταθές. Αν $D=0$ τότε οι ρίζες $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ είναι και πόλοι και ιδιοτιμές της μήτρας A. Αν $Q_{ij} = 0$ οι ρίζες των αριθμητών z_i λέγονται μηδενιστές.

Ένας όρος της μήτρας G(s) και μπορεί να γραφεί:

$$G_{ij} = \frac{Q_{ij}(s)}{D(s)} = \frac{q_{ijk} \cdot s^k + q_{ij(k-1)} \cdot s^{(k-1)} + \dots + q_{ij0}}{s^n + p_{(n-1)} \cdot s^{(n-1)} + \dots + p_1 \cdot s + p_0} \quad \text{Σχέση 4. - 7}$$

Ο αριθμητής, $Q_{ij}(s)$, είναι ένα πολυώνυμο του s , γενικά διαφορετικό για κάθε συνάρτηση μεταφοράς G_{ij} . Οι συντελεστές του πολυωνύμου εξαρτώνται από τις μήτρες A , B , C . Ο παρονομαστής $D(s) = \text{Det}(s \cdot I - A)$ είναι το χαρακτηριστικό πολυώνυμο, βαθμού n , και είναι ο ίδιος για κάθε συνάρτηση μεταφοράς (αν το πολυώνυμο εξισωθεί με το μηδέν αποτελεί την χαρακτηριστική εξίσωση όλου του συστήματος μια και όλα τα στοιχεία έχουν τον ίδιο παρονομαστή). Η G_{ij} μπορεί να γραφεί και σε μορφή παραγόντων:

$$G_{ij} = \frac{K \cdot (s - z_1) \cdot (s - z_2) \dots (s - z_k)}{(s - \lambda_1) \cdot (s - \lambda_2) \dots (s - \lambda_n)} \quad \text{Σχέση 4. - 8}$$

Η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος είναι:

$$\text{Det}(s \cdot I - A) = (s - \lambda_1) \cdot (s - \lambda_2) \cdot \dots \cdot (s - \lambda_n) = 0 \quad \text{Σχέση 4. - 9}$$

Οι δε ρίζες της $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ λέγονται πόλοι του συστήματος ή ιδιοτιμές της μήτρας A . Οι ρίζες z_i της πολυωνυμικής εξίσωσης του αριθμητή λέγονται μηδενιστές. Κάθε συνάρτηση μεταφοράς $G_{ij}(s)$ μιας μήτρας μεταφοράς $G(s)$ έχει τους ίδιους πόλους αλλά διαφορετικούς μηδενιστές. Μια εναλλακτική άποψη της έννοιας της συνάρτησης μεταφοράς λαμβάνεται ως εξής. Βιβλ. [62]. Θεωρούμε τη σχέση:

$$G_{ij} = \frac{y_i}{u_j} = \frac{i - \sigma \eta _ \acute{\epsilon} \xi \sigma \delta \omicron \varsigma}{j - \sigma \eta _ \acute{\epsilon} \iota \sigma \omicron \delta \omicron \varsigma} \quad \text{Σχέση 4. - 10}$$

4.2. Γραμμικοποίηση των εξισώσεων του πολυμεταβλητού συστήματος.

Οι μη – γραμμικές εξισώσεις κατάστασης ενός δυναμικού συστήματος μπορούν να εκφραστούν ως n εξισώσεις πρώτης τάξης στη μορφή:

$$\dot{\vec{x}} = \vec{f}(\vec{x}, \vec{u}) \quad \text{Σχέση 4. – 11}$$

Η διανυσματική συνάρτηση $\vec{f}(\vec{x}, \vec{u})$ υποτίθεται ότι έχει συνεχείς παραγώγους ως προς όλες τις μεταβλητές. Δυστυχώς η γενική λύση της εξίσωσης (3) δεν είναι γνωστή ούτε υπάρχει προοπτική ότι μια τέτοια λύση μπορεί να προσδιοριστεί.

Έτσι προχωράμε στη γραμμικοποίηση της εξίσωσης (3) γύρω από κάποιο σημείο λειτουργίας. Οι λύσεις που θα προκύψουν επομένως θα ισχύουν μόνο σε μια γειτονιά του σημείου αυτού. [62].

Επιδιώκουμε να βρούμε μια γραμμική προσέγγιση του μη - γραμμικού συστήματος (3) στη μορφή:

$$\dot{\vec{x}} = A \cdot \vec{x} + B \cdot \vec{u} \quad \text{Σχέση 4. – 12}$$

γύρω από κάποιο σημείο λειτουργίας: $\vec{x}^0$ και $\vec{u}^0$. Υποθέτουμε ότι για τις συνθήκες $\vec{x}^0$ και $\vec{u}^0$ το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία ήτοι:

$$\dot{\vec{x}} = \vec{f}(\vec{x}^0, \vec{u}^0) = 0 \quad \text{Σχέση 4. – 13}$$

Στο σημείο ισορροπίας όλες οι παράγωγοι των n μεταβλητών κατάστασης είναι μηδέν. Άλλωστε αυτός είναι και ο ορισμός του σημείου ισορροπίας. Θεωρούμε καταρχήν την περίπτωση ενός συστήματος δεύτερης τάξης στην οποία η εξίσωση (4. – 13) ισοδυναμεί με:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, u_1, u_2) \quad \text{Σχέση 4. – 14}$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, u_1, u_2) \quad \text{Σχέση 4. – 15}$$

Προκειμένου να γραμμικοποιήσουμε το παραπάνω σύστημα γύρω από κάποιο σημείο λειτουργίας είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε κατάλληλες τιμές για τα:

$x_1 = x_1^0$, $x_2 = x_2^0$, $u_1 = u_1^0$ και $u_2 = u_2^0$ για τις οποίες υφίσταται ένα τέτοιο σημείο λειτουργίας. Αυτό επιτυγχάνεται αν τεθούν τα $\dot{x}_1$ και $\dot{x}_2$ ίσα με το μηδέν, δηλαδή οι συναρτήσεις f_1 και f_2 τίθενται ίσες προς το μηδέν.

$$f_1(x_1^0, x_2^0, u_1^0, u_2^0) = 0$$

Σχέσεις 4. – 16

$$f_2(x_1^0, x_2^0, u_1^0, u_2^0) = 0$$

Η επίλυση των εξισώσεων (4) προσδιορίζει μία ή περισσότερες τιμές για τα: x_1^0 , x_2^0 , u_1^0 και u_2^0 . Οι εξισώσεις (4) γραμμικοποιούνται γύρω από αυτό το σημείο λειτουργίας με ανάπτυξη σε σειρά Taylor των συναρτήσεων f_1 και f_2 στη γειτονιά του σημείου x_1^0 , x_2^0 , u_1^0 και u_2^0 . Επειδή οι f_1 και f_2 είναι συναρτήσεις τεσσάρων μεταβλητών στις γραμμικοποιημένες εξισώσεις θα εμφανιστούν μερικές παράγωγοι ως προς κάθε μία από τις μεταβλητές, δηλαδή οι f_1 και f_2 θα αναπτυχθούν σε σειρές Taylor τεσσάρων μεταβλητών.

Συμβολίζουμε τις αποκλίσεις των x_1 , x_2 , u_1 και u_2 από τη συνθήκη ισορροπίας x_1^0 , x_2^0 , u_1^0 και u_2^0 ως εξής:

$$x_1^* = x_1 - x_1^0$$

$$x_2^* = x_2 - x_2^0 \quad \text{Σχέσεις 4. – 17}$$

$$u_1^* = u_1 - u_1^0$$

$$u_2^* = u_2 - u_2^0$$

Οι προκύπτουσες γραμμικοποιημένες εξισώσεις είναι:

$$\dot{x}_1^* = \left. \frac{\partial f_1(\vec{x}, \vec{u})}{\partial x_1} \right|_{\substack{\vec{x}=\vec{x}^0 \\ \vec{u}=\vec{u}^0}} \cdot x_1^* + \left. \frac{\partial f_1(\vec{x}, \vec{u})}{\partial x_2} \right|_{\substack{\vec{x}=\vec{x}^0 \\ \vec{u}=\vec{u}^0}} \cdot x_2^* + \left. \frac{\partial f_1(\vec{x}, \vec{u})}{\partial u_1} \right|_{\substack{\vec{x}=\vec{x}^0 \\ \vec{u}=\vec{u}^0}} \cdot u_1^* + \left. \frac{\partial f_1(\vec{x}, \vec{u})}{\partial u_2} \right|_{\substack{\vec{x}=\vec{x}^0 \\ \vec{u}=\vec{u}^0}} \cdot u_2^*$$

$$\dot{x}_2^* = \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u})}{\partial x_1} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} \cdot x_1^* + \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u})}{\partial x_2} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} \cdot x_2^* + \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u})}{\partial u_1} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} \cdot u_1^* + \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u})}{\partial u_2} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} \cdot u_2^*$$

Σχέσεις 4. – 18

Οι παραπάνω εξισώσεις οδηγούν στη μορφή όπου οι A και B είναι:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u})}{\partial x_1} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u})}{\partial x_2} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} \\ \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u})}{\partial x_1} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u})}{\partial x_2} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} \end{bmatrix} \quad \text{Σχέση 4. – 19}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u})}{\partial u_1} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} & \frac{\partial f_1(\bar{x}, \bar{u})}{\partial u_2} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} \\ \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u})}{\partial u_1} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} & \frac{\partial f_2(\bar{x}, \bar{u})}{\partial u_2} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} \end{bmatrix} \quad \text{Σχέση 4. – 20}$$

Σε κάθε περίπτωση οι μερικές παράγωγοι αντιστοιχούν στο σημείο ισορροπίας επομένως οι μήτρες A και B έχουν ως στοιχεία αριθμούς.

Με ανάλογη μεθοδολογία το αποτέλεσμα του συστήματος δεύτερης τάξης επεκτείνεται στην περίπτωση συστήματος η-στης τάξης. Στη γενική αυτή περίπτωση τα στοιχεία των μητρών A και B προσδιορίζονται από τις σχέσεις:

$$a_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} \quad \text{Σχέση 4. – 21}$$

Και

$$b_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial u_j} \bigg|_{\substack{\bar{x}=\bar{x}^0 \\ \bar{u}=\bar{u}^0}} \quad \text{Σχέση 4. – 22}$$

Βιβλιογραφική αναφορά [15], [38].

4.3. Ελεγχσιμότητα – Παρατηρησιμότητα

Ο μοντέρνος έλεγχος και τα πολυμεταβλητά συστήματα εισήγαγαν την ανάγκη για τη διατύπωση δύο νέων εννοιών της ελεγχσιμότητας και της παρατηρησιμότητας ενός συστήματος.

Η ελεγχσιμότητα δείχνει αν ένα σύστημα μπορεί να ελεγχθεί από ένα σύνολο μεταβλητών ελέγχου $\vec{u}$. Δηλαδή αν το διάνυσμα $\vec{u}$ μπορεί να ελέγξει το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος $\vec{x}$.

Η παρατηρησιμότητα δείχνει αν η παρατήρηση της εξόδου $\vec{y}$ μπορεί να μας δώσει όλες τις πληροφορίες των στοιχείων του διανύσματος κατάστασης του συστήματος $\vec{x}$. Ποιο συγκεκριμένα τώρα:

- Ορισμός ελεγχσιμότητας: Ένα σύστημα είναι ελέγξιμο σε χρόνο t_0 , όταν κάθε αρχική κατάσταση $\vec{x}(t_0)$ μπορεί να αχθεί σε οποιαδήποτε τελική κατάσταση $\vec{x}(t_f)$, σε πεπερασμένο χρόνο με τον έλεγχο $\vec{u}(t)$.
- Ορισμός παρατηρησιμότητας: Ένα σύστημα είναι παρατηρήσιμο σε χρόνο t_0 , όταν κάθε κατάσταση $\vec{x}(t_0)$ μπορεί να προσδιοριστεί από παρατήρηση της εξόδου $\vec{y}(t)$, σε πεπερασμένο χρονικό διάστημα.

Πώς προσδιορίζεται αν ένα σύστημα είναι ελέγξιμο και παρατηρήσιμο;

- Θεώρημα: Το σύστημα που περιγράφεται ως : $\dot{\vec{x}} = A \cdot \vec{x} + B \cdot \vec{u}$ είναι πλήρως ελέγξιμο όταν και μόνον όταν η επαυξημένη $n \times n \cdot r$ μήτρα ικανοποιεί τη συνθήκη: $\text{Βαθμός}\{Q\} = \text{Βαθμός}\{B \quad A \cdot B \dots A^{n-1} \cdot B\} = n$ Σχέση 4.3 – 1
- Θεώρημα: Το σύστημα που περιγράφεται ως:

$$\begin{aligned}\dot{\vec{x}} &= A \cdot \vec{x} \\ \vec{y} &= C \cdot \vec{x}\end{aligned} \quad \text{Σχέσεις 4. – 23}$$

είναι πλήρως παρατηρήσιμο όταν και μόνον όταν η επαυξημένη $n \times n \cdot m$ μήτρα ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\text{Βαθμός}\{R^T\} = \text{Βαθμός}\{C^T \quad A^T \cdot C^T \dots (A^T)^{n-1} \cdot C^T\} = n \quad \text{Σχέση 4.3 – 2}$$

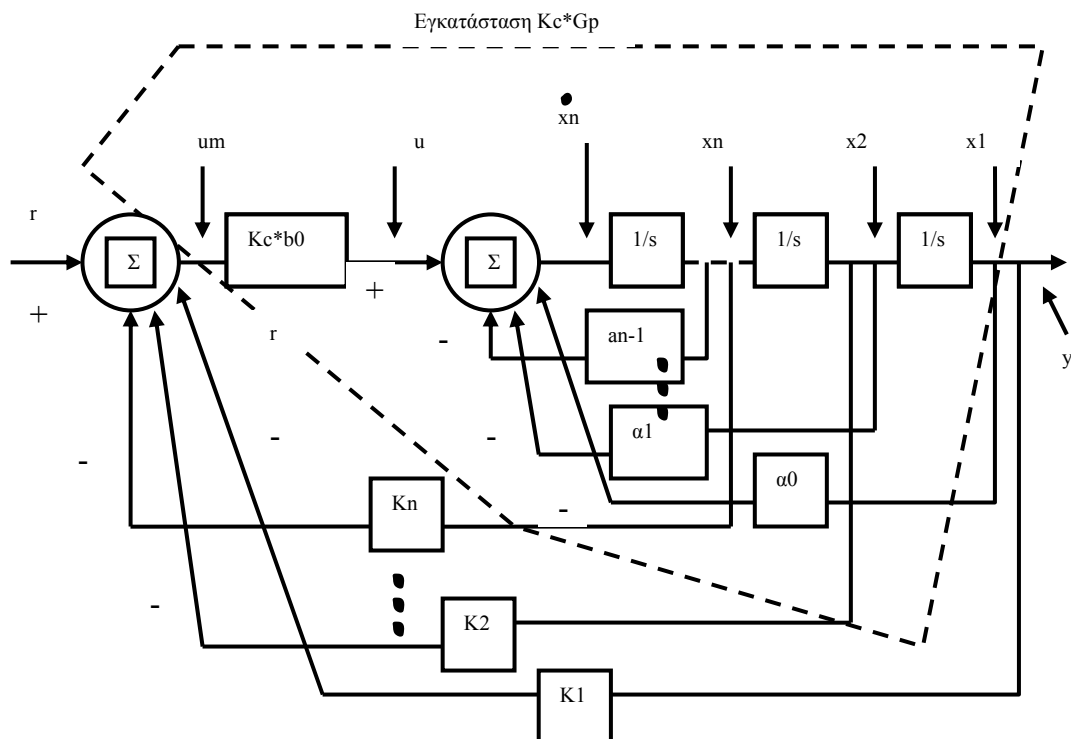
Ο βαθμός της επαυξημένης μήτρας Q ισούται με τον αριθμό των ελέγξιμων μεταβλητών κατάστασης.

4.4. Μοντέρνος έλεγχος.

The diagram illustrates a control system with a disturbance. The reference signal r enters a summing junction Σ with a positive sign. A feedback signal from the output y enters the same junction with a negative sign. The output of this junction passes through a controller block K_c and enters a second summing junction Σ with a positive sign. A disturbance signal ud also enters this second junction with a positive sign. The output of the second junction passes through a block b and enters a third summing junction Σ with a positive sign. A feedback signal from the state X enters this third junction with a negative sign. The output of the third junction passes through an integrator block I/s to produce the state X . The state X is fed back to the third junction and also passes through a block A to produce the control signal u , which is fed back to the second junction. The state X also enters a block CT to produce the output y . A dashed box encloses the blocks b , I/s , A , and CT . The initial state X' is an input to the third junction. A block KT is connected to the output y and provides feedback to the first junction.

Σχήμα 4. – 1 ‘Σύστημα ελέγχου με ανάδραση μεταβλητών κατάστασης’.

Το ενδιαφέρον μας συγκεντρώνεται στην ανάδραση των μεταβλητών κατάστασης και όχι στον G_C τον οποίο θεωρούμε ως έναν απλό ενισχυτή κέρδους. Το παραπάνω σχήμα εικονίζει την ιδέα της ανατροφοδότησης των μεταβλητών κατάστασης της εγκατάστασης στην είσοδο του συστήματος.



Σχήμα 4. – 2 ‘Λεπτομερές δομικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου με ανάδραση των μεταβλητών κατάστασης’.

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου όπως φαίνεται από το ποιο πάνω σχήμα είναι:

$$\frac{y}{r} = \frac{K_C \cdot b_0}{s^n + (\alpha_{n-1} + K_C \cdot b_0 \cdot K_n) \cdot s^{n-1} + \dots + (\alpha_1 + K_C \cdot b_0 \cdot K_2) \cdot s + \alpha_0 + K_C \cdot b_0 \cdot K_1}$$

Σχέση 4. – 24

Κάθε συντελεστής της χαρακτηριστικής εξίσωσης διαθέτει μια αυθαίρετη σταθερά $K_i, i=1, \dots, n$ η τιμή της οποίας μπορεί να καθοριστεί από το σχεδιαστή. Δηλαδή με τους n συντελεστές $K_1, \dots, K_n$ μπορούμε να καθορίσουμε κατά

βούληση όλους τους συντελεστές της χαρακτηριστικής εξίσωσης κατά συνέπεια καθορίζουμε όλους τους πόλους του συστήματος κλειστού βρόχου. Βιβλ. [62].

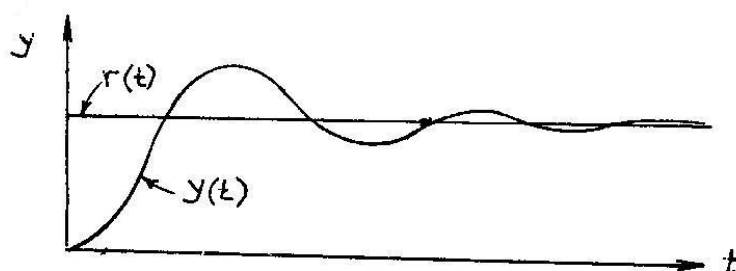
Υπογραμμίζεται ότι η πραγματοποίηση του μοντέρνου ελέγχου γίνεται με κατάλληλες μετρήσεις των μεταβλητών κατάστασης χωρίς να παραγωγίζεται κανένα σήμα. Αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί με την κλασσική μεθοδολογία. Παραδείγματος χάριν σε ένα μηχανικό σύστημα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ως μεταβλητές κατάστασης τη θέση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση. Η ανάδραση μεταβλητών κατάστασης απαιτεί μέτρηση των τριών αυτών ποσοτήτων και ανατροφοδότησή τους δια μέσου κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας. Μερικές φορές τέτοιες μετρήσεις μπορεί να είναι είτε δύσκολες είτε πολύ δαπανηρές. Στις περιπτώσεις αυτές είναι δυνατόν να καταφύγουμε σε έμμεσες μετρήσεις των μεταβλητών κατάστασης με τη βοήθεια Παρατηρητή (observer). Βιβλ. [62].

Είναι επίσης δυνατόν να μην χρειάζεται η τοποθέτηση όλων των πόλων στο μιγαδικό επίπεδο αλλά μόνον ορισμένων. Στις περιπτώσεις αυτές υπάρχει η δυνατότητα συμβιβασμών μεταξύ κόστους και απόδοσης.

4.5. Βέλτιστος έλεγχος

Στην κλασσική μεθοδολογία σχεδιασμού συστημάτων ελέγχου χρησιμοποιούνται οι τεχνικές του πεδίου συχνότητας (frequency domain) όπως ο τύπος των ριζών και τα διαγράμματα BODE για τον προσδιορισμό συστημάτων με ικανοποιητική λειτουργική απόδοση. Αντίθετα η μοντέρνα μεθοδολογία διατυπώνεται στο χρονικό πεδίο (time domain). Επιπλέον η μοντέρνα μεθοδολογία αναζητά όχι μόνο αποδεκτή απόδοση αλλά βέλτιστη απόδοση.

Στο πρόβλημα του κλασσικού ελέγχου προκειμένου να μελετήσουμε ένα σύστημα θέτουμε μια είσοδο βαθμίδας και εξετάζουμε την έξοδο.



Σχήμα 4. – 3 ‘Είσοδος βαθμίδας $r(t)$ και απόκριση $y(t)$ ’. Βιβλ. [62].

Το σφάλμα σε κάθε χρονική στιγμή είναι: $e(t) = r(t) - y(t)$

Στον κλασσικό έλεγχο προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε το σφάλμα σε καθορισμένα χρονικά σημεία όπως π.χ. τη μέγιστη υπερακόντιση. Αντί όμως να ελαχιστοποιήσουμε το σφάλμα μόνο σε διακριτά χρονικά σημεία μπορούμε να επιχειρήσουμε να ελαχιστοποιήσουμε το σφάλμα παντού. Παραδείγματος χάριν θα μπορούσαμε να ελαχιστοποιήσουμε ένα δείκτη λειτουργικής απόδοσης (Δ.Λ.Α.) που είναι το ολοκλήρωμα του τετραγωνικού σφάλματος.

$$J_1 = \int_{t_i}^{t_f} e^2(t) \cdot dt \quad \text{Σχέση 4.5 – 1}$$

Επίσης όταν επιχειρείται ελαχιστοποίησης της συνολικής ισχύος ελέγχου ο Δ.Λ.Α. γίνεται:

$$V = \int_{t_i}^{t_f} u^2 \cdot dt \quad \text{Σχέση 4. – 25}$$

Και το πρόβλημα συνήθως αφορά ελαχιστοποίηση του καυσίμου (minimum fuel problem).

Γενικά το πρόβλημα του βέλτιστου ελέγχου ασχολείται με τον προσδιορισμό της συνάρτησης ελέγχου $\bar{u}(t)$ που ελαχιστοποιεί το Δ.Λ.Α.. Βιβλ. [62], [45], [46], [47].

4.6. Γραμμικός – Τετραγωνικός έλεγχος.

Μια τέτοια μορφή του βέλτιστου ελέγχου που έχει δράση του τύπου $\bar{u}^0(\bar{x}, t)$ υπερέχει έναντι του βέλτιστου ελέγχου $\bar{u}^0(t)$ που είναι απλώς συνάρτηση του χρόνου επειδή τυχών μεταβολές των αρχικών ή τελικών συνθηκών ή τυχόν επίδραση διαταραχών στο σύστημα θα απαιτούσαν προσδιορισμό του $\bar{u}^0(t)$ για κάθε δυνατή περίπτωση πράγμα αδύνατο. Αντίθετα όταν είναι γνωστός ο νόμος ελέγχου $\bar{u}^0(\bar{x}, t)$ ο βέλτιστος έλεγχος προσδιορίζεται συνεχώς από τη γνώση της τρέχουσας τιμής του $\bar{x}$. Βιβλ. [62], [45], [46], [47].

4.7. Έλεγχος με βέλτιστο ρυθμιστή.

Το γραμμικό – τετραγωνικό πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου στο οποίο ο τελικός χρόνος $t_f \rightarrow \infty$ είναι γνωστό ως πρόβλημα του βέλτιστου ρυθμιστή (optimum regulator problem).

Το σύστημα ανοιχτού βρόχου περιγράφεται από τη γραμμική διανυσματική εξίσωση:

$$\dot{\vec{x}} = A \cdot \vec{x} + B \cdot \vec{u} \quad \text{Σχέση 4. – 26}$$

Θέλουμε να προσδιορίσουμε το βέλτιστο νόμο ελέγχου:

$$\vec{u}^0(\vec{x}) = -K^T \cdot \vec{x} \quad \text{Σχέση 4. – 27}$$

Που να ελαχιστοποιεί τον Δ.Λ.Α. ,

$$V = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{\infty} (\vec{x}^T \cdot Q \cdot \vec{x} + \vec{u}^T \cdot P \cdot \vec{u}) \cdot dt \quad 4. – 28$$

Η μήτρα των κερδών ανάδρασης K^T είναι στην περίπτωση αυτή σταθερή:

$$K^T = P^{-1} \cdot B^T \cdot R_0 \quad \text{Σχέση 4. – 29}$$

Όπου η μήτρα R_0 προκύπτει από τη λύση της αλγεβρικής εξίσωσης Riccati.

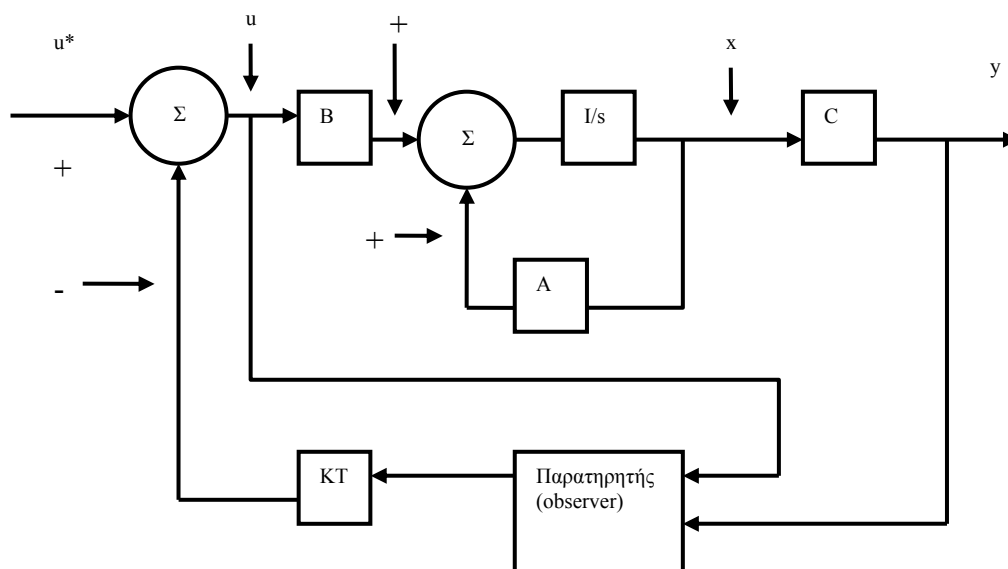
$$R_0 \cdot A + A^T \cdot R_0 + Q - R_0 \cdot B \cdot P^{-1} \cdot B^T \cdot R_0 = 0 \quad \text{Σχέση 4. – 30}$$

Η μήτρα των κερδών ανάδρασης K^T εξαρτάται μόνο από τις μήτρες A,B,Q και P.

Θεώρημα: Όταν το σύστημα $\dot{\vec{x}} = A \cdot \vec{x} + B \cdot \vec{u}$ είναι ελέγξιμο και η έξοδος $\vec{y}$ είναι παρατηρήσιμη, ο νόμος ελέγχου $\vec{u}^0(\vec{x}) = -K^T \cdot \vec{x}$ ελαχιστοποιεί τον προηγούμενο Δ.Λ.Α.. Βιβλ. [62], [49].

Γίνεται πρόσθεση ελεύθερων ολοκληρωτών για την εξάλειψη του σφάλματος μόνιμης κατάστασης. Το σφάλμα μόνιμης κατάστασης είναι αυτό που προκαλείται στο σύστημα από την επίδραση σε αυτό μόνιμων διαταραχών (μεταβολή θερμοκρασίας χειμώνας – καλοκαίρι, μεταβολή συμπεριφοράς αντλιών λόγω φθοράς κ.α.). Βιβλ. [62], [50].

Σε πολλές διεργασίες (ανάμεσα σε αυτές και η διεργασία Ε.Ι.) οι μεταβλητές κατάστασης οι οποίες είναι απαραίτητες για την υλοποίηση ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου τύπου βέλτιστου ρυθμιστή δεν μπορούν να μετρηθούν σε πραγματικό χρόνο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένας Παρατηρητής ο οποίος είναι ένας αλγόριθμος (πρόγραμμα Η/Υ). Ο Παρατηρητής παρακολουθεί τις τιμές κάποιων άλλων εύκολα και γρήγορα μετρήσιμων μεταβλητών και εκτιμά τις τιμές των μεταβλητών κατάστασης. Βιβλ. [62].



Σχήμα 4. – 4 ‘Δομικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου με Παρατηρητή’.

5. ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.

5.1 Γενικά σχόλια για τη βιβλιογραφία.

[1] → Το βιβλίο αυτό αναφέρεται στις διάφορες μεθόδους επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Ξεκινά με την προέλευση των αποβλήτων. Συνεχίζει με τα αποχετευτικά

συστήματα. Κάνει εκτεταμένη αναφορά στη διεργασία (E.I.), την απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών από τα απόβλητα (κ.α.).

[2] → Το βιβλίο αυτό έχει ως θέμα τον κλασσικό αυτόματο έλεγχο. Μεθοδολογίες του τόπου των ριζών, απόκριση συχνότητας (διαγράμματα Bode) και Nyquist.

[3] → Το βιβλίο αυτό έχει ως θέμα της διάφορες μεθόδους υπολογιστικής νοημοσύνης. Ξεκινά με ασαφή λογική, συνεχίζει με νευρωνικά δίκτυα και καταλήγει σε γενετικούς αλγορίθμους.

[4] → Η βιβλιογραφική αυτή αναφορά παρέχει πληροφορίες για τη χρησιμοποίηση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης για να δημιουργηθεί ένα κατά προσέγγιση μοντέλο της διεργασίας (E.I.). Το μοντέλο αυτό αντικαθιστά το ASM1 ή τις τρεις διαφορικές εξισώσεις (ισοζύγια μάζας) και σε συνδυασμό με έναν ή περισσότερους κατευθυντές PI μπορεί να ελέγξει τη διεργασία.

Η χρησιμοποίηση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης για τη δημιουργία εμπειρικών μοντέλων της διεργασίας ενεργού ιλύος οφείλεται στους εξής παράγοντες:

- 1) Τη μη γραμμικότητα της διεργασίας που θέλουμε να ελέγξουμε.
- 2) Την ύπαρξη άγνωστων παραμέτρων της διεργασίας π.χ. K_{OH} , $\hat{\mu}_H$, K_S , Y_H , b_H , f_p , a , b . Αυτές οι παράμετροι είναι δύσκολο να μετρηθούν και μπορεί να αλλάζουν συνεχώς.
- 3) Τη συνεχή μεταβολή της σύστασης και της ποσότητας των εισερχόμενων αποβλήτων.
- 4) Την αδυναμία μας να περιγράψουμε σωστά την πολύπλοκη βιολογική διεργασία.
- 5) Τις πολλές διαταραχές που δέχεται το σύστημα. Μεταξύ αυτών είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας από το χειμώνα στο καλοκαίρι ή την διαταραχή που προέρχεται από τη φθορά κάποιου μηχανολογικού εξαρτήματος (αντλία, ηλεκτροβάννα κ.λ.π.). Για τεχνητή νοημοσύνη εδώ χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός ασαφούς λογικής και νευρωνικών δικτύων.

[5] → Εδώ έχουμε έναν αλγόριθμο H/Y που λαμβάνοντας πληροφορίες από προηγούμενες καταστάσεις της εγκατάστασης εκτιμά αν θα θέσει σε λειτουργία ή όχι τους συμπιεστές αέρα. Ελέγχει δηλαδή μόνο το διαλυμένο στο νερό οξυγόνο προσπαθώντας αφ' ενός να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας (αφού η διεργασία αερισμού απορροφά πολλή ενέργεια) αλλά και να διατηρήσει τους αερόβιους μ/σμούς ζωντανούς (η συγκέντρωση του DO πρέπει να διατηρείται πάνω από τα 2mg/l).

[6] → Εδώ χρησιμοποιούνται μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης με νευρωνικά δίκτυα για να προβλέψουμε μετρώντας κάποιες μεταβλητές τώρα ποιες θα είναι στο μέλλον οι τιμές (συγκεντρώσεων) ορισμένων μεγεθών όπως το COD (chemical oxygen demand), SS (suspended solids) και το MLSS (mixed liquor suspended solids) σε έναν αεριζόμενο βιολογικό αντιδραστήρα μιας μονάδας ενεργού ιλύος. Το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με κατευθυντές PID για να ελέγξει τη μονάδα. Το NN κάνει feedforward έλεγχο ενώ ο ή οι PID κατευθυντές feedback έλεγχο.

[7] → Μια μη γραμμική προσέγγιση ελέγχου της ενεργού ιλύος. Παρ' όλα αυτά ο συγγραφέας παραδέχεται στο τέλος την ανωτερότητα των γραμμικών μεθόδων ελέγχου. Με λίγα λόγια έχουν γίνει πολλές παραδοχές για να λειτουργήσει το μη γραμμικό σύστημα ελέγχου και μάλιστα για αυστηρά ορισμένο χρονικό διάστημα.

[8] → Εδώ χρησιμοποιούνται δύο προαναφερθείσες στο παρόν κείμενο μέθοδοι ρύθμισης των κατευθυντών PID δηλαδή:

- Η μέθοδος Ziegler – Nichols που απαιτεί να τεθεί η μονάδα εκτός λειτουργίας για να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις.
- Η μέθοδος με τη γεννήτρια ημιτονοειδών σημάτων που δεν απαιτεί το κλείσιμο της μονάδας για να γίνουν οι μετρήσεις.

Αυτές οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται στα πλαίσια ενός λογισμικού SCADA το οποίο χρησιμοποιεί και τις δύο παραπάνω μεθόδους για να εκτιμήσει τη ρύθμιση των παραμέτρων. Στη συνέχεια ο χειριστής του SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) εκτιμά τις μετρήσεις τις συγκρίνει με μια βιβλιοθήκη προηγούμενων μετρήσεων και αποφασίζει με το κριτήριο αν οι νέες τιμές απέχουν πολύ από τις παλιές για το αν θα δώσει την εντολή να επαναρρυθμιστούν οι κατευθυντές με τις νέες τιμές ή όχι. Αυτή η βιβλιογραφική αναφορά περιορίζεται στον έλεγχο του διαλυμένου οξυγόνου DO.

[9] → Εδώ χρησιμοποιείται πάλι αποκεντρωμένος έλεγχος με PID κατευθυντές. Αυτό που γίνεται στην πράξη είναι να ρυθμίζονται οι κατευθυντές μία φορά κατά την έναρξη λειτουργίας του εργοστασίου και να μένουν με αυτές τις ρυθμίσεις για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έτσι όμως η απόδοση του εργοστασίου φθίνει. Εδώ όπως και στο προηγούμενη βιβλιογραφική αναφορά προτείνεται η χρησιμοποίηση των δύο μεθόδων ρυθμίσεων.

- Απόκριση βαθμίδας (Ziegler - Nichols)
- Απόκριση συχνότητας για να ρυθμίσουμε τους PID κατευθυντές.

[10] → Εδώ παρουσιάζεται μια απλή μέθοδος ελέγχου με κατευθυντές PID οι οποίοι ελέγχουν με απλές ρυθμίσεις μια μονάδα ενεργού ιλύος με απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών (στο παράδειγμα αυτό απομακρύνεται η αμμωνία).

[11] → Αναφέρεται στην ισχυρή αλληλεπίδραση των ελεγχόμενων μεταβλητών της διεργασίας E.I. καθώς και στη μη γραμμική συμπεριφορά της διεργασίας και των ρευμάτων ανακυκλοφορίας που την κάνουν ακόμα πιο πολύπλοκη. Παρ' όλα αυτά η βιβλιογραφική αναφορά καταλήγει ότι μόνο στην περίπτωση της μεταβολής της παροχής των εισερχόμενων αποβλήτων παρουσιάζεται ισχυρή αλληλεπίδραση και άρα η διεργασία μπορεί να ελεγχθεί απλά με PID κατευθυντές στις υπόλοιπες λειτουργίες της.

[12] → Χρησιμοποιεί ένα νευρωνικό δίκτυο αυτόνομης μάθησης για να ρυθμίσει τις παραμέτρους ενός PID κατευθυντή για τον έλεγχο της συγκέντρωσης οξυγόνου DO στο βιολογικό αντιδραστήρα.

[13] → Χρησιμοποιεί ένα γενετικό αλγόριθμο για τη ρύθμιση των παραμέτρων ενός PID κατευθυντή. Συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με μεθόδους όπως η Ziegler – Nichols, Internal Model Control και Kappa-tau.

[14] → Η βιβλιογραφική αυτή αναφορά παρέχει πληροφορίες για το συνολικό έλεγχο μιας μονάδας (E.I.). Χρησιμοποιείται ένας αυτορυθμιζόμενος PID κατευθυντής (με τη μέθοδο Ziegler – Nichols ή με τη μέθοδο απόκρισης συχνότητας) για να ελέγχει το DO. Ταυτόχρονα χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο για να αναγνωρίσει τη συνεχώς μεταβαλλόμενη συμπεριφορά του συστήματος και να προτείνει αλλαγή στην τιμή αναφοράς στην οποία έχει ρυθμιστεί ο κατευθυντής PID. Δηλαδή αν θα τεθεί η τιμή αναφοράς στα 2 mg/l, στα 2.5 mg/l, στα 3 mg/l ή σε κάποια άλλη τιμή συγκέντρωσης οξυγόνου.

[15] → Η βιβλιογραφική αυτή αναφορά παρέχει πληροφορίες για τη σύγκριση τριών στρατηγικών ελέγχου. Την αποκεντρωμένη στρατηγική που αποτελείται από δύο κατευθυντές τύπου PI όπου ο ένας ελέγχει το διαλυμένο οξυγόνο DO και ο δεύτερος την εσωτερική ανακυκλοφορία που συμβάλλει στην απομάκρυνση του αζώτου από το επεξεργασμένο νερό στην έξοδο της μονάδας. Εδώ έχουμε όπως είπαμε δύο κατευθυντές που λειτουργούν σε δύο ξεχωριστούς βρόχους. Ο κάθε βρόχος είναι μιάς εισόδου – μιας εξόδου (κλασσικός αυτόματος έλεγχος).

Η δεύτερη στρατηγική είναι ο γραμμικός τετραγωνικός κατευθυντής (Linear Quadratic Controller ή L.Q.C.) που είναι κατευθυντής πολλών εισόδων και πολλών εξόδων. Στην περίπτωσή μας οι ελεγχόμενες μεταβλητές είναι δύο η συγκέντρωση

του DO και η συγκέντρωση του αζώτου. Ο κατευθυντής αυτός έχει το πλεονέκτημα να 'βλέπει' τη διεργασία ως σύνολο σε αντίθεση με την αποκεντρωμένη στρατηγική όπου ο ένας βρόχος επηρεάζει τον άλλο. Στην αποκεντρωμένη στρατηγική ο κάθε βρόχος προσπαθεί να ελέγξει τη μεταβλητή του χωρίς να λαμβάνει υπ' όψη του αν σε αυτή του την προσπάθεια προκαλεί αποσταθεροποίηση στον άλλο βρόχο ελέγχου. Τέλος χρησιμοποιείται και μια τρίτη στρατηγική αυτή του κατευθυντή προσαρμογής των διαταραχών. Οι δύο τελευταίες στρατηγικές βασίζονται στη μεθοδολογία του χώρου κατάστασης σε αντίθεση με τον κλασσικό έλεγχο που βασίζεται στη μεθοδολογία απόκρισης συχνότητας.

Παρ' όλα αυτά ο αποκεντρωμένος έλεγχος έχει καλύτερη απόδοση και αυτό οφείλεται στην πολύ διαφορετική δυναμική συμπεριφορά που έχει η διεργασία διάλυσης οξυγόνου στο νερό με την εσωτερική ανακυκλοφορία των νιτρικών. Το κέρδος του (D.O.) βρόχου είναι 32 ενώ του βρόχου των νιτρικών 21000. Σ' αυτό το γεγονός οφείλεται η καλύτερη απόδοση της αποκεντρωμένης στρατηγικής.

[16] → Χρησιμοποιούνται τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές για τη ρύθμιση ενός PID κατευθυντή που ελέγχει το DO της διεργασίας.

1) Cohen and Coon που χρησιμοποιεί διάφορα κριτήρια συμπεριφοράς του συστήματος.

2) ITAE Η στρατηγική που στηρίζεται στη μείωση της τιμής ενός δείκτη λειτουργικής απόδοσης. Ο δείκτης λειτουργικής απόδοσης είναι το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής του σφάλματος σε ένα χρονικό διάστημα.

3) Η στρατηγική του εσωτερικού μοντέλου της διεργασίας. Η ρύθμιση των παραμέτρων του PID κατευθυντή γίνεται απ' ευθείας από το 'σωστό' εσωτερικό μοντέλο.

4) Η ρύθμιση των παραμέτρων του PID κατευθυντή με τη βοήθεια ασαφούς λογικής (fuzzy logic system).

[17] → Σύστημα απομάκρυνσης εξασθενούς χρωμίου με κατάλληλο έλεγχο ενός ηλεκτροχημικού αντιδραστήρα. Η ανάλυση της σταθερότητας του συστήματος γίνεται με τη μέθοδο Lyapunov. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κατά κόρον στο μοντέρνο έλεγχο. Στη συνέχεια αποδεικνύεται ο καλός έλεγχος με αποκεντρωμένους PID κατευθυντές.

[18] → Χρησιμοποιείται νευρωνικό δίκτυο για τη ρύθμιση των τιμών αναφοράς σε δύο κατευθυντές PID. Ο ένας ελέγχει το DO ενώ ο άλλος τη συγκέντρωση των ετερότροφων μ/σμών.

[19] → Σύγκριση κατευθυντή με προσαρμοζόμενη ευριστική κριτική (AHCC) με PID κατευθυντή. Ο AHCC υπερισχύει.

[20] → Λόγω της σοβαρής μη – γραμμικότητας της διεργασίας αερισμού της E.I. και του νεκρού χρόνου που εμφανίζει ο αερισμός χρησιμοποιούμε ένα έμπειρο σύστημα για feedforward έλεγχο σε συνεργασία με PID κατευθυντή (feedback έλεγχο). Υπάρχει μεγάλος νεκρός χρόνος από τη στιγμή που τίθενται σε λειτουργία οι συμπιεστές μέχρι τη στιγμή που μετράται αύξηση στον αισθητήρα διαλυμένου οξυγόνου.

[21] → Εδώ συγκρίνεται ο κλασσικός PI έλεγχος του DO με τον feedforward βρόχο μέσα σε βρόχο κατευθυντή ο οποίος είναι σε θέση να παράγει καθαρότερο νερό στην έξοδο μαζί με μειωμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας αερισμού. Ο αερισμός απορροφά το 50% της ηλεκτρικής ενέργειας ενός εργοστασίου επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Εδώ συγκρίνονται:

α) Μόνο feedback έλεγχος με PI κατευθυντή με μέτρηση DO ή αμμωνίας στον τελευταίο αερόβιο αντιδραστήρα.

β) Βασισμένος σε μοντέλο κατευθυντής feedforward.

γ) Συνδυασμός των δύο παραπάνω. Ο συνδυασμός επιτυγχάνει το εξής. Όταν εφαρμοστεί διαταραχή αυτή απορρίπτεται ταχύτατα από τον feedforward κατευθυντή πριν υπάρξει μεταβολή στο σύστημα που έχει πολύ βραδεία απόκριση. Αυτό αυξάνει τόσο το κόστος αερισμού όσο και την πιθανότητα καταστροφής της αναερόβιας διεργασίας στις ανοξικές δεξαμενές λόγω υψηλής συγκέντρωσης DO στην εσωτερική ανακυκλοφορία.

[22] → Χρησιμοποιείται μια εξαιρετικά σταθερή ανεξάρτητα από διαταραχές μέθοδος ελέγχου. Στο πρώτο στάδιο εκτιμάται το υπόστρωμα Ss με παρακολούθηση των διακυμάνσεων του DO και στο δεύτερο στάδιο χρησιμοποιείται PID κατευθυντής. Έτσι ελέγχουμε το Ss στην έξοδο χωρίς να χρειαστεί να το μετρήσουμε.

[23] → Γίνεται μια παρουσίαση μεθόδων αερισμού με PID κατευθυντές από τη μία και κατευθυντές ασαφούς λογικής από την άλλη.

[24] → Εδώ χρησιμοποιείται η μέθοδος Nyquist τόσο στο σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου όσο και στη ρύθμιση των παραμέτρων του PID κατευθυντή. Για την ρύθμιση ενός PID κατευθυντή μέχρι και τη δεκαετία του 1980 χρησιμοποιούνταν η μέθοδος των Ziegler – Nichols. Αυτή η ρύθμιση γινόταν με το άνοιγμα του βρόχου του συστήματος και την εισαγωγή μιας διαταραχής τύπου βαθμίδας μέσω ενός Relay. Από εκείνη τη χρονική περίοδο γίνονταν προσπάθειες για την ανακάλυψη μεθόδων

ρύθμισης των παραμέτρων του κατευθυντή που θα στηρίζονταν σε κάποιο μοντέλο της διεργασίας. Στη συνέχεια ο Astrom μαζί με τον Hagglund το 1984 χρησιμοποιώντας πάλι την πειραματική μέθοδο με το Relay μπορούσαν να εντοπίσουν ένα σημείο στην χαρακτηριστική καμπύλη του διαγράμματος Nyquist για το σύστημα ανοιχτού βρόχου και από αυτό το σημείο να εξάγουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό των παραμέτρων του PID κατευθυντή. Στη συνέχεια η χρησιμοποίηση του Relay εξελίχθηκε (με την αλλαγή της υστέρησης του Relay, την εισαγωγή μιας σταθεράς νεκρού χρόνου ή την εισαγωγή ενός ελεύθερου ολοκληρωτή) και έκανε δυνατό τον εντοπισμό περισσότερων σημείων στην χαρακτηριστική καμπύλη του Nyquist της διεργασίας ανοιχτού βρόχου. Αυτό ήταν που επέτρεψε τον καθορισμό πιο πολύπλοκων μοντέλων και επέτρεψε τη χρήση μεθόδων που βασίζονται σε μοντέλα για τη ρύθμιση των παραμέτρων του κατευθυντή.

[25] → Εδώ στην αναερόβια διεργασία των μεθανογενών μ/σμων πρέπει το PH να κυμαίνεται σε μια πολύ μικρή περιοχή γύρω από την τιμή $PH=7$ αλλιώς οι μ/σμοι πεθαίνουν. Επειδή το PH είναι λογάριθμος (μη - γραμμικότητα) και έχουμε μεγάλο νεκρό χρόνο στη διεργασία η ρύθμιση του PH με PID κατευθυντή είναι ιδιαίτερα δύσκολη.

[26] → Έλεγχος αναερόβιας διεργασίας το PH κυμαίνεται από 6,8 έως 7,2 χρησιμοποιείται PID έλεγχος με ασαφή λογική.

[27] → Εδώ χρησιμοποιείται ένα μαθηματικό μοντέλο της αναερόβιας διεργασίας για να ρυθμίσει τον εσωτερικό PID κατευθυντή που ελέγχει τη ροή ισχυρού οξέος ή ισχυρής βάσης ώστε να διατηρηθεί το PH σε αποδεκτά για τους μεθανογενείς μ/σμούς επίπεδα 6,8 έως 7,2.

[28] → Έλεγχος εναλλασσόμενου αεροβικού – ανοξικού αντιδραστήρα.

[29] → Γίνεται μια σύγκριση στρατηγικών ελέγχου από αποκεντρωμένη με PID κατευθυντές μέχρι γραμμική – τετραγωνική τεχνική του βέλτιστου ρυθμιστή.

[30]→ Η βιβλιογραφική αυτή αναφορά κάνει μια ανασκόπηση για τις στρατηγικές ελέγχου της διεργασίας E.I.. Η ανάπτυξη μιας στρατηγικής ελέγχου είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη δυναμική συμπεριφορά της διεργασίας. Μερικά καίρια ερωτήματα τα οποία πρέπει να απαντηθούν για να αναπτυχθεί μια στρατηγική ελέγχου είναι τα παρακάτω. (1) Τι είδους πληροφορίες χρειάζεται το σύστημα ελέγχου; (2) Πώς θα μεταδωθούν αυτές οι πληροφορίες; (3) Πως θα γίνει η επεξεργασία αυτών των πληροφοριών; Τέλος ποιές θα είναι οι πράξεις ελέγχου; Υπάρχουν σημαντικά

πλεονεκτήματα στην εφαρμογή δυναμικών μοντέλων και τη χρησιμοποίηση συστημάτων αυτομάτου ελέγχου στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Αυτά τα πλεονεκτήματα είναι: (1) η βελτιωμένη απόδοση της διεργασίας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων δηλαδή μείωση της συγκέντρωσης των ρυπαντών στο επεξεργασμένο νερό. (2) Αύξηση της παραγωγικότητας της μονάδας δηλαδή αύξηση στην ποσότητα των αποβλήτων που μπορεί να επεξεργαστεί μια συγκεκριμένων διαστάσεων μονάδα. (3) Αύξηση της αξιοπιστίας της μονάδας δηλαδή σημαντική μείωση του χρόνου που η μονάδα μπορεί να τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω εξωτερικών διαταραχών. (4) Η σταθερότητα στην λειτουργία της μονάδας εξαρτάται άμεσα από την σταθερότητα των επιμέρους διαδικασιών της διεργασίας. Η αναγνώριση των λιγότερο σταθερών διαδικασιών και η εφαρμογή αυτομάτου ελέγχου σε αυτές για να γίνουν πιο σταθερές έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση στη σταθερότητα όλης της διεργασίας. (5) Η εφαρμογή του αυτομάτου ελέγχου μπορεί επίσης να μειώσει το απαραίτητο για τη λειτουργία του εργοστασίου προσωπικό μειώνοντας τα έξοδα λειτουργίας. Επίσης μέσω διαδικασιών απλοποίησης του ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανειδίκευτο προσωπικό με μειωμένους μισθούς σε σχέση με το εξειδικευμένο προσωπικό. (6) Περαιτέρω μείωση των λειτουργικών εξόδων της μονάδας όσον αφορά τα έξοδα για ηλεκτρική ενέργεια ή για τη χρησιμοποίηση χημικών αντιδραστηρίων που είναι απαραίτητα για τη διεργασία. (7) Μείωση του χρόνου που χρειάζεται για να ξανατεθεί σε λειτουργία μια μονάδα E.I. που έχει αστοχήσει. (8) Μέσω του αυτομάτου ελέγχου μπορεί να γίνει καλύτερη κατανόηση της διεργασίας και να δημιουργηθούν αποτελεσματικότεροι οδηγοί χειροκίνητης διαχείρισης. (9) Μεταβαλλόμενη λειτουργία της μονάδας. Μέχρι τώρα επικρατεί η άποψη ότι η σταθερή διαχείριση χωρίς διακυμάνσεις είναι και η πιο αποδοτική. Παρ' όλα αυτά έχουν υπάρξει ενδείξεις ότι η μεταβαλλόμενη λειτουργία είναι πιο αποδοτική σε ορισμένες περιπτώσεις. (10) Διεργασία μεταβαλλόμενης αποδοτικότητας. Ένα εργοστάσιο δέχεται απόβλητα που μεταβάλλονται τόσο στην ποιότητα όσο και στην παροχή τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διακύμανση της αποδοτικότητας του καθαρισμού τους. Ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου μπορεί να μειώσει αυτή τη διακύμανση στην αποδοτικότητα έτσι ώστε και τα απόβλητα να προλαβαίνουν να καθαρίσουν αλλά και το περιβάλλον στο οποίο απορρίπτονται να μην επιβαρύνεται.

Στη συνέχεια βλέπουμε διάφορα ισοζύγια μάζας που μπορούν να αποτελέσουν το μοντέλο της διεργασίας και γίνεται προσομοίωση αυτής σε διάφορες διαταραχές για να κριθεί η σταθερότητά της. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην ανάλυση της

μεταβαλλόμενης συμπεριφοράς της μονάδας σε μια διαταραχή που εμείς πειραματικά την προκαλούμε για να πάρουμε τις κατάλληλες μετρήσεις (Ziegler – Nichols και απόκριση συχνότητας). Μια από τις πειραματικές διαταραχές που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι αυτή της προσθήκης μιας αδρανούς ουσίας που μετρώντας την συγκέντρωσή της μπορούμε να εντοπίσουμε διάφορα χαρακτηριστικά στη συμπεριφορά του συστήματος. Ο έλεγχος του συστήματος χωρίζεται σε κλασσικό και νέας στρατηγικής έλεγχο.

Ο ποιο απλός τύπος ελέγχου είναι ο on – off έλεγχος που υλοποιείται με το πλήρες άνοιγμα και κλείσιμο του στοιχείου ελέγχου (π.χ. βάννα). Το αν θα ανοίξει ή θα κλείσει το στοιχείο ελέγχου εξαρτάται από την τιμή του σφάλματος. Το μετρήσιμο σήμα που ανατροφοδοτείται είναι η συγκέντρωση του υποστρώματος στην έξοδο και η ελεγχόμενη μεταβλητή η παροχή αποβλήτων στην είσοδο. Αναφέρεται επίσης και ο έλεγχος με κατευθυντή τύπου PID στον κλασσικό έλεγχο.

Ο νέας στρατηγικής έλεγχος είναι πολλών μορφών. Μπορεί να ξεκινά με την προσθήκη επιπλέον κυκλωμάτων που λαμβάνουν υπ' όψη το νεκρό χρόνο των αισθητήρων και τη χρησιμοποίηση φίλτρων για την απόρριψη του υψηλής συχνότητας θορύβου που έχουν τα μετρούμενα μεγέθη. Άλλες περιπτώσεις τέτοιου ελέγχου είναι ο έλεγχος πολλών μεταβλητών, ο feedforward έλεγχος και διάφορες άλλες στρατηγικές βελτίστου ελέγχου. Ο πολυμεταβλητός έλεγχος μπορεί να είναι ο έλεγχος αναλογίας και ο βρόχος μέσα σε βρόχο έλεγχος (ratio control και cascade control). Ο έλεγχος αναλογίας λειτουργεί ελέγχοντας μια μεταβλητή που εμφανίζεται ως κλάσμα με μια δεύτερη μεταβλητή στον παρονομαστή (είναι έλεγχος τύπου ανοικτού βρόχου). Αυτή η δεύτερη μεταβλητή είναι συνήθως μια μεταβλητή διαταραχής ή μια μεταβλητή που δεν μπορεί να ελεγχθεί. Ένα παράδειγμα είναι ο ρυθμός ανακυκλοφορίας ως προς την παροχή εισόδου αποβλήτων στον βιολογικό αντιδραστήρα που συνήθως δεν μπορεί να ελεγχθεί. Ο έλεγχος τύπου βρόχος μέσα σε βρόχο είναι ήδη γνωστός. Ο εσωτερικός βρόχος δρα με μεγάλη ταχύτητα ενώ ο εξωτερικός βρόχος είναι βραδείας λειτουργίας και ελέγχει την τιμή αναφοράς του εσωτερικού βρόχου. Ο έλεγχος feedforward είναι μια μορφή ελέγχου ανοικτού βρόχου που στηρίζεται σε ένα μοντέλο της ελεγχόμενης διεργασίας και μπορεί θεωρητικά να έχει απόδοση μηδενικού σφάλματος αν το μοντέλο που χρησιμοποιεί είναι τόσο ακριβές. Πάντως στην πραγματικότητα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με feedback έλεγχο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς η διεργασία μας έχει μεγάλες

χρονικές σταθερές και μας βοηθά να απορρίψουμε μια διαταραχή πριν αυτή φτάσει στην αργά μεταβαλλόμενη διεργασία.

Τέλος αναφέρεται εδώ μια διεργασία με πολλαπλές εισόδους αποβλήτων σε διαφορετικά σημεία του βιοαντιδραστήρα που έχει τη μορφή του παρακάτω σχήματος. Στη συνηθισμένη διεργασία E.I. ο χειριστής έχει περιορισμένες μεταβλητές ελέγχου που είναι η παροχή οξυγόνου, ο ρυθμός ανακυκλοφορίας υλούς και ο ρυθμός απόρριψης υλούς. Από αυτές τις μεταβλητές ελέγχου η παροχή οξυγόνου έχει μεγάλη σημασία στο κόστος της διεργασίας και δεν φαίνεται να επηρεάζει πολύ τη διεργασία αν η τιμή της βρίσκεται πάνω από ένα συγκεκριμένο ελάχιστο όριο.

[31]→ Εδώ χρησιμοποιούνται δύο κατευθυντές PID με δύο βαθμούς ελευθερίας σε μια διάταξη cascade. Το αντικείμενο αυτής της βιβλιογραφικής αναφοράς είναι ότι αντί να ρυθμίσει τις παραμέτρους των δύο κατευθυντών μέσω πειραματικών μετρήσεων πάνω στη διεργασία (που απαιτούν χρόνο) χρησιμοποιεί συγκεκριμένες σχέσεις που δίνουν τις κατάλληλες τιμές για τη ρύθμιση των κατευθυντών σε πραγματικό χρόνο χωρίς να διακόψουμε ή να διαταράξουμε τη διεργασία. Χρησιμοποιούνται απλώς κάποιες μετρήσεις από κατάλληλους αισθητήρες. Εδώ όταν γίνεται αναφορά σε ομαλό έλεγχο (smooth control) εννοείται συνθήκη λειτουργίας κατευθυντών με υπεραπόσβεση ή στην καλύτερη περίπτωση με κρίσιμη απόσβεση.

[32]→ Εδώ γίνεται παρουσίαση ενός δείκτη ευαισθησίας κατευθυντών PID. Οι κατευθυντές χωρίζονται σε ευαίσθητους αν ο δείκτης ευαισθησίας έχει τιμή πάνω από 0,5 , σε μη ευαίσθητους αν ο δείκτης παίρνει τιμές μικρότερες ή ίσες του 0,5 και σε ανθεκτικούς αν οι τιμές τους είναι μικρότερες ή ίσες του 0,1 .

[33]→ Εδώ παρουσιάζονται δύο είδη λειτουργίας κατευθυντών PID η λειτουργία τύπου σερβομηχανισμού και η λειτουργία τύπου ρυθμιστή. Στην πρώτη περίπτωση ο σκοπός του ελέγχου είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη παρακολούθηση του μεταβαλλόμενου σήματος αναφοράς. Στη δεύτερη περίπτωση ο σκοπός είναι να διατηρήσουμε τη μεταβλητή στην έξοδο στην επιθυμητή τιμή παρά τις διαταραχές που εισέρχονται στο σύστημα. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά για το πώς θα ρυθμιστεί το κάθε είδος κατευθυντή και τέλος προτείνεται μια μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων για τη ρύθμιση PID κατευθυντή που συμπεριφέρεται και ως σερβομηχανισμός και ως ρυθμιστής ανάλογα με το πόσο κοντά είναι στον ένα ή στον άλλο τύπο λειτουργίας. Γίνεται επίσης μια ανταλλαγή μεταξύ απόδοσης και πολλαπλής λειτουργίας.

[34] → Γίνεται σύγκριση δύο μεθόδων ελέγχου του DO. Η κλασσική με μέτρηση της αμμωνίας (ακριβός και δύσκολα ρυθμιζόμενος μετρητής). Η κλασσική μεθοδολογία εισάγει 15 λεπτά νεκρού χρόνου από τον μετρητή προκαλώντας αστάθεια στο σύστημα. Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί μετρητή του DO που κάνει ταχύτερες μετρήσεις και εκτίμηση της αμμωνίας. Στη συνέχεια αποδεικνύεται ποια μέθοδος είναι καλύτερη τόσο στον έλεγχο όσο και στην εξοικονόμηση ενέργειας καθώς οι συμπιεστές αέρα της αερόβιας δεξαμενής καταναλώνουν το 34% της συνολικής ενέργειας που απαιτεί όλο το εργοστάσιο για τη λειτουργία του.

[35] → Λόγω της μη γραμμικότητας και του νεκρού χρόνου που υπάρχουν στη διεργασία E.I. εφαρμόζεται μια στρατηγική ασαφούς λογικής για feedforward σε συνεργασία με feedback έλεγχο μέσω PID κατευθυντή για τη ρύθμιση της συγκέντρωσης οξυγόνου κατά την αερόβια επεξεργασία. Περιέχει μοντέλο διαφορικών εξισώσεων από τους Yuzhao Feng και Teng Long (2003).

[36] → Νεκρός χρόνος που οφείλεται στην προσθήκη αντιδραστηρίου μέχρι το υγρό να φτάσει στον μετρητή (πλήρης ανάμιξη).

[37] → Εδώ αναλύεται ένα σταθερό στις διαταραχές σύστημα ελέγχου το οποίο λαμβάνει υπ' όψη του το νεκρό χρόνο της διεργασίας.

[38] → Εδώ χρησιμοποιείται αποκεντρωμένος έλεγχος. Πρώτα όμως γίνεται ειδική μελέτη με διαγράμματα BODE (εύρους και φάσης) ώστε να βρεθεί περιοχή συχνοτήτων όπου η αλληλεπίδραση των βρόχων είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

[39] → Έχει γίνει ήδη εκτεταμένη χρήση αυτής της βιβλιογραφικής αναφοράς στο κυρίως κείμενο (υποκεφάλαια 3.1 και 3.2).

[40] → Εδώ αναφέρεται μια πληθώρα μεθόδων για τη μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου στο υδάτινο διάλυμα. Χρησιμοποιούνται μέθοδοι χημικές (όπως η οξείδωση του θειϊκού νατρίου, η απορρόφηση του CO_2), φυσικές μέθοδοι που είναι οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες και δυναμικές μέθοδοι. Οι παραπάνω τρόποι χρησιμεύουν τόσο για τη μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου όσο και για τη μέτρηση του ρυθμού απορρόφησης του στο διάλυμα (OTR oxygen transfer rate). Στη συνέχεια αναφέρονται μέθοδοι απ' ευθείας μέτρησης του OTR δηλαδή του K_{La} . Τέλος παρουσιάζεται πληθώρα εμπειρικών τύπων για τη μέτρηση του K_{La} μερικές από τις οποίες στηρίζονται στη μηχανική των ρευστών.

[41] → Αυτή η πολύ σημαντική βιβλιογραφική αναφορά κάνει ένα διαχωρισμό στις επιμέρους λειτουργίες της διεργασίας E.I. ανάλογα με την ταχύτητά τους. Τις

διαχωρίζει σε αργές, μέτριας ταχύτητας και γρήγορες. Για τις γρήγορες γίνεται η γραμμικοποίηση μη γραμμικών λειτουργιών που αναλύσαμε νωρίτερα με τις μερικές παραγώγους στη 'γειτονιά' ενός σημείου ισορροπίας ή λειτουργίας.

[42]→ Σ' αυτή τη βιβλιογραφική αναφορά γίνεται έλεγχος της αμμωνίας. Χρησιμοποιούνται δύο στρατηγικές ελέγχου. Μία feedforward στρατηγική που χρησιμοποιεί ένα γραμμικό μοντέλο (τύπου μαύρου κουτιού) το οποίο σχεδιάζεται με τη χρήση μόνο κάποιων πειραματικών μετρήσεων στην κάθε μονάδα E.I.. Η δεύτερη στρατηγική χρησιμοποιεί ένα μη – γραμμικό μοντέλο της διεργασίας το οποίο στηρίζεται στις διαφορικές εξισώσεις που προκύπτουν από την διεργασία αν αυτή χωριστεί σε επιμέρους στάδια. Το ASM1 μοντέλο (μαθηματικά αποδεδειγμένο μοντέλο E.I. που χρησιμοποιεί μαθηματικές σχέσεις των επιμέρους διαδικασιών της διεργασίας). Τονίζεται όμως ότι επειδή το ASM1 είναι εξαιρετικά πολύπλοκο (χρησιμοποιεί 13 μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις και 19 παραμέτρους που είναι πολύ δύσκολο να μετρηθούν ή να εκτιμηθούν) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο. Αντί αυτού λοιπόν χρησιμοποιούμε κάποιο απλοποιημένο μοντέλο που λαμβάνει υπ' όψη του μόνο τα σημαντικά επιμέρους στάδια της διεργασίας και έχει μικρό υπολογιστικό χρόνο άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον feedforward έλεγχο της διεργασίας σε πραγματικό χρόνο. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην περίπτωση που έχουμε πολλές διαδοχικές δεξαμενές που δημιουργούν μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις υδραυλικού τύπου. Στην περίπτωση αυτή οι δράσεις ελέγχου καθυστερούν πολύ να γίνουν από τη στιγμή της μέτρησης μιας διαταραχής στα θρεπτικά συστατικά. Με τον feedforward έλεγχο οι διαταραχές αυτές αντιμετωπίζονται πολύ πριν διαταράξουν τη διεργασία.

[43]→ Εδώ γίνεται χρήση του Benchmark Simulation Model 1 (BSM1). Αρχικά γίνεται προσπάθεια ελέγχου μόνο του οξυγόνου στην αεριζόμενη δεξαμενή. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μια μέθοδος που στηρίζεται στις μεταβλητές της ανακυκλοφορίας ιλύος, του δείκτη διάλυσης οξυγόνου στην υγρή φάση και μιας επιπλέον πηγής άνθρακα που προστίθεται στο σύστημά μας. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα τελείως εμπειρικό μοντέλο της διεργασίας που στηρίζεται σε προηγούμενες μετρήσεις και όχι σε ισοζύγια μάζας μια και όπως αναφέρεται στο κείμενο το μοντέλο ASM1 είναι εξαιρετικά πολύπλοκο για να χρησιμοποιηθεί στον έλεγχο της διεργασίας σε πραγματικό χρόνο.

[44] → Μια σειρά μεθόδων για τον έλεγχο μη – γραμμικών διεργασιών με αβεβαιότητες όσον αφορά το μοντέλο τους (δηλαδή το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων που τις χαρακτηρίζει). Εφαρμογή σε επεξεργασία υγρών αποβλήτων.

[45] → Χρησιμοποιείται βέλτιστος έλεγχος (γραμμικός - τετραγωνικός) τύπου βέλτιστου ρυθμιστή σε διεργασία E.I. Γίνεται πρόταση εισαγωγής παρατηρητή - εκτιμητή μη μετρήσιμων μεταβλητών κατάστασης.

[46] → Εδώ χρησιμοποιείται βέλτιστος έλεγχος με ανατροφοδότηση των μεταβλητών κατάστασης της διεργασίας. Εφαρμόζεται επίσης ένας νέος μετρητής βιομάζας που στηρίζεται στη μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς του υγρού. Λειτουργεί ως εξής. Εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο υγρό. Τα ζωντανά κύτταρα συμπεριφέρονται ως πυκνωτές λόγω της κυτταρικής τους μεμβράνης. Τα νεκρά κύτταρα είναι αυτά με τις τρύπιες κυτταρικές μεμβράνες και δεν συμπεριφέρονται ως πυκνωτές. Μετρώντας τη χωρητικότητα (πυκνωτή) έχουμε μια ιδέα για τη συγκέντρωση των ζωντανών μ/σμών.

[47]→ Εδώ αναπτύσσεται μια μέθοδος εκτίμησης των παραμέτρων πολύπλοκων μοντέλων της διεργασίας ενεργού ιλύος όπως είναι το ASM2. Αρχικά αναφέρεται ότι κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει πειραματικά αλλά είναι μη πρακτικό. Στη συνέχεια προτείνεται ο υπολογισμός των παραμέτρων μέσω μαθηματικών τύπων (εμπειρικών). Τέλος χρησιμοποιείται μια μέθοδος μοντέρνου ελέγχου αυτή του γραμμικού τετραγωνικού ελέγχου για να εκτιμήσει αυτές τις παραμέτρους και σχολιάζεται το πόσο αποδοτική είναι, δηλαδή το πόσο καλά πλησιάζει τις πειραματικές μετρήσεις και το πόσο γρήγορα το κάνει αυτό από την άποψη του υπολογιστικού χρόνου.

[48 ÷ 59] → Οι βιβλιογραφικές αυτές αναφορές αναφέρονται στο δύσκολο πρόβλημα της επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης Riccati καθώς και της αλγεβρικής της μορφής (πρόβλημα βέλτιστου ρυθμιστή).

[60] → Όπως είδαμε στην περίπτωση του βέλτιστου ρυθμιστή η προσθήκη ελεύθερων ολοκληρωτών βοηθά στην καλή και αποδοτική λειτουργία της μονάδας ακόμα και στην παρουσία μόνιμων διαταραχών οι οποίες θα επηρέαζαν μόνιμα την έξοδο του συστήματος. Τέτοιες είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας από το χειμώνα στο καλοκαίρι και η μεταβολή της συμπεριφοράς πολλών παραμέτρων του συστήματος (συμπιεστές, αντλίες) λόγω φθοράς τους.

[61] → Χρησιμοποιούνται μέθοδοι μοντέρνου πολυμεταβλητού ελέγχου για τον έλεγχο μιας μονάδας E.I. που απομακρύνει ταυτόχρονα τα θρεπτικά συστατικά όπως τα νιτρικά και τα φωσφορικά. Εδώ αποδεικνύεται η ανωτερότητα του μοντέρνου

ελέγχου σε σχέση με τον έλεγχο μιας εισόδου μιας εξόδου με αποκεντρωμένους PID κατευθυντές που δεν λειτουργεί καλά λόγω της αλληλεπίδρασης των διαφορετικών βρόχων.

[62] → Αυτό το βιβλίο έχει ως θέμα το μοντέρνο αυτόματο έλεγχο. Ξεκινά με διαγράμματα δεσμών, συνεχίζει με γραμμικοποίηση συστημάτων (ελεγκσιμότητα - παρατηρησιμότητα), και τελειώνει με την ανάλυση του τι είναι μοντέρνος έλεγχος, βέλτιστος έλεγχος, Γραμμικός – Τετραγωνικός έλεγχος και έλεγχος βέλτιστου ρυθμιστή.

[63÷66] →Βιολογική Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων. Δηλαδή πρωτοβάθμια επεξεργασία, δευτεροβάθμια επεξεργασία (E.I.), απομάκρυνση θρεπτικών και τρόποι διάθεσης των αποβλήτων.

[67÷68] →Αυτόματος Έλεγχος. Κλασσικός αυτόματος έλεγχος με τόπο ριζών και ανάλυση σερβομηχανισμών.

[69] →Συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης. Εδώ αναφέρονται νευρωνικά δίκτυα, γενετικοί αλγόριθμοι, εμπειρικά συστήματα, συστήματα πρακτόρων και αλγορίθμους αναζήτησης.

5.2. Κενά βιβλιογραφίας – Κριτική βιβλιογραφίας.

Μπορεί να λεχθεί με συντομία ότι η παραπάνω βιβλιογραφία αναφέρεται στον έλεγχο μονάδων E.I. με χρησιμοποίηση διαφόρων μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτοί είναι συστήματα (T.N.), κλασσικός αυτόματος έλεγχος που υλοποιείται με κατευθυντές P.I.D., μοντέρνος έλεγχος, βέλτιστος έλεγχος, Γραμμικός – Τετραγωνικός έλεγχος και έλεγχος βέλτιστου ρυθμιστή. Ο αυτόματος έλεγχος χρησιμοποιείται για να ελέγξει από μία μέχρι περισσότερες μεταβλητές. Στην περίπτωση που ελέγχεται μόνο μία μεταβλητή αυτή είναι το διαλυμένο οξυγόνο. Τέλος υπάρχουν αναφορές που θίγουν το θέμα της απορρόφησης του οξυγόνου από την υγρή φάση αλλά και αναφορές για το πώς επιλύεται με αριθμητικές μεθόδους η εξίσωση Riccati η οποία χρησιμοποιείται στον έλεγχο με βέλτιστο ρυθμιστή.

1. Ένα κενό που παρατηρήθηκε στη βιβλιογραφία είναι η σχετική έλλειψη ανθεκτικότητας του συνολικού συστήματος στις εξωτερικές διαταραχές (τόσο τις παροδικές, όσο και τις μόνιμες). Παραδείγματα παροδικών διαταραχών είναι η ισχυρή βροχόπτωση (αύξηση παροχής), κάποια τοξική για τους μ/σμούς ουσία στα εισερχόμενα απόβλητα, αλλά και γενικά η

μεταβολή στη σύνθεση των εισερχόμενων αποβλήτων που είναι συνεχής. Παραδείγματα μονίμων διαταραχών είναι μια αντλία που υπολειτουργεί λόγω φθοράς ή η μεταβολή της θερμοκρασίας (χειμώνας, καλοκαίρι).

2. Δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία σύστημα ελέγχου με ανθεκτικότητα στη μεταβολή παραμέτρων που δεν μπορούμε να μετρήσουμε. Τέτοιες είναι η ταχύτητα μεταφοράς μάζας αέρα προς το υγρό μέσο K_{La} , ο μέγιστος ρυθμός αύξησης μ/σμών μ_H , ο συντελεστής κορεσμού υποστρώματος στο υγρό μέσο K_S , ο συντελεστής κορεσμού οξυγόνου στο υγρό μέσο K_{OH} , ο συντελεστής αύξησης μ/σμών ως προς το καταναλισκόμενο υπόστρωμα Y_H , ο ρυθμός αποσύνθεσης μ/σμών b_H (decay rate) και το κλάσμα των αδρανών που δεν υφίστανται αποσύνθεση f_P .
3. Στη βιβλιογραφία παρατηρείται μια δυσκολία των συστημάτων ελέγχου (κυρίως του κλασσικού ελέγχου) να ικανοποιήσουν τα ολοένα και αυστηρότερα κριτήρια για την επιτρεπόμενη ποιότητα των επεξεργασμένων αποβλήτων σε ομαλές συνθήκες λειτουργίας αλλά και πολύ περισσότερο σε μεταβατικές καταστάσεις που προκαλούνται στο συνολικό σύστημα από εξωτερικές διαταραχές. Στο βέλτιστο έλεγχο τύπου βέλτιστου ρυθμιστή υπάρχει ένας δείκτης λειτουργικής απόδοσης ο οποίος ελαχιστοποιεί το σφάλμα (απόκλιση από την επιθυμητή ποιότητα των αποβλήτων) σε όλο το χρονικό διάστημα λειτουργίας της μονάδας E.I. και όχι μόνο σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία όπως γίνεται στον κλασσικό έλεγχο (π.χ. η μέγιστη υπερακόντιση).
4. Δεν γίνεται **σημαντική** οικονομία στην ενέργεια για τον αερισμό του βιοαντιδραστήρα (ο οποίος αποτελεί το 40% με 50% της συνολικά απορροφούμενης ενέργειας). Επίσης δεν γίνεται καθόλου οικονομία στην ενέργεια που καταναλώνει το ίδιο το σύστημα ελέγχου (ενισχυτές – κατευθυντές τύπου P ή βάρη ανατροφοδότησης).
5. Δεν υπάρχει **σημαντική** ανθεκτικότητα (robustness) στη μη – γραμμικότητα της διεργασίας E.I. (καθώς τα συστήματα ελέγχου που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι γραμμικά). Το αποτέλεσμα είναι να αστοχεί η διεργασία (process failure).

6. Δεν γίνεται ακριβής έμμεση εκτίμηση των μεταβλητών κατάστασης μέσω των Παρατηρητών που χρησιμοποιούνται συνήθως στο βέλτιστο έλεγχο.
7. Δεν γίνεται χρήση πολλών μεταβλητών κατάστασης, που θα έκανε το βέλτιστο έλεγχο καλύτερο από τον κλασσικό αποκεντρωμένο έλεγχο με PID κατευθυντές (που χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές). Δεν υπάρχει ταυτόχρονος έλεγχος **πολλών** μεταβλητών ενώ η διεργασία της (E.I.) είναι πολυμεταβλητή. Αυτό πρέπει να γίνει χωρίς την αλληλεπίδραση του ελέγχου της μιας μεταβλητής στην άλλη, όπως συμβαίνει στον αποκεντρωμένο έλεγχο με πολλούς ξεχωριστούς βρόχους (κλασσικός έλεγχος). Στη βιβλιογραφία υπάρχει μοντέρνος πολυμεταβλητός έλεγχος αλλά περιορίζεται σε όλες τις περιπτώσεις στον έλεγχο δύο μεταβλητών κατάστασης.
8. Δεν αντιμετωπίζονται επαρκώς τα προβλήματα που προκαλούν οι διαταραχές τύπου θορύβου στη μέτρηση διαφόρων μεταβλητών που εμφανίζονται στον κλασσικό έλεγχο λόγω της χρησιμοποίησης της διαφορίσης (κατευθυντές PID όπου D ο διαφορικός τελεστής).
9. Ένα τελευταίο κενό που εντοπίστηκε είναι ο νεκρός χρόνος (ή καθυστέρηση διακίνησης) που εισάγεται στο σύστημα όταν χρησιμοποιείται ένας Παρατηρητής. Ο Παρατηρητής χρειάζεται κάποιο χρόνο για να ολοκληρώσει τους υπολογισμούς. Αυτός ο χρόνος χαρακτηρίζεται ως νεκρός και συμβάλλει (ιδίως αν είναι πολύ μεγάλος) στην αποσταθεροποίηση του συστήματος. Στη βιβλιογραφία δεν εντοπίστηκε κάποια μελέτη πάνω σ' αυτό το πρόβλημα.

6. ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.

Γενικός στόχος μας είναι να δημιουργήσουμε ένα σύστημα βελτίστου ελέγχου (γραμμικό τετραγωνικό σύστημα και πιο συγκεκριμένα σύστημα του βελτίστου ρυθμιστή) το οποίο να ελέγχει μια μονάδα Ενεργού Ιλύος (E.I.). Ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου είναι πολυμεταβλητό δηλαδή μπορεί να χειριστεί ταυτόχρονα μεγάλο αριθμό μεταβλητών χωρίς να υπάρξει αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Επίσης είναι ικανό να ελέγχει διεργασίες που είναι εξαιρετικά ασταθείς, δίνοντας το καλύτερο δυνατό

προϊόν της διεργασίας (εδώ εκροή με χαμηλότερους δείκτες ρύπανσης, όπως είναι οι συγκεντρώσεις του υποστρώματος και των θρεπτικών συστατικών). Το παραπάνω σύστημα μπορεί να το κάνει αυτό αλλά ταυτόχρονα να κάνει και οικονομία στην χρησιμοποιούμενη ηλεκτρική ενέργεια για τον αερισμό του βιολογικού αντιδραστήρα. Επίσης ένα τέτοιο σύστημα είναι κατά πολύ σταθερότερο σε διαταραχές που θα έθεταν τα κλασσικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου εκτός λειτουργίας άρα έχουμε και ανθεκτική συμπεριφορά λειτουργίας. Η δύναμη ενός τέτοιου συστήματος αυτομάτου ελέγχου πηγάζει από την πληθώρα των μεταβλητών ελέγχου που έχει στη διάθεσή του για έλεγχο. Όσο πιο πολλές είναι αυτές, τόσο καλύτερα συμπεριφέρεται το σύστημα. Τέτοια συστήματα έχουν ήδη δοκιμαστεί στην επεξεργασία αποβλήτων (αν και σπανίζουν). Ο λόγος για τον οποίο σπανίζουν είναι ότι ειδικά στην (Ε.Ι.) έχουμε πολλές άγνωστες παραμέτρους της διεργασίας οι οποίες δεν μπορούν να μετρηθούν. Επίσης, επειδή ένα τέτοιο σύστημα στηρίζεται στην ανατροφοδότηση των μεταβλητών κατάστασης $\bar{x}$, αυτές πρέπει να μετρώνται με ακρίβεια. Το διαλυμένο οξυγόνο μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια, όμως η συκέντρωση του υποστρώματος, των μ/σμών και των θρεπτικών συστατικών όχι. Αυτό είναι ένα γενικότερο πρόβλημα που αφορά πολλές χημικές, βιοχημικές και βιολογικές διεργασίες. Για να παρακαμφθεί αυτό το πρόβλημα σκοπεύεται να εισαχθεί ένα σύστημα που λέγεται Παρατηρητής. Αυτό που επιδιώκεται στη συγκεκριμένη διατριβή είναι η δημιουργία ενός τέτοιου συστήματος με τεχνητή νοημοσύνη το οποίο να μπορεί να εκπαιδεύεται πώς να αντιδρά τόσο σε γνωστές καταστάσεις ομαλής λειτουργίας όσο και σε έκτακτα περιστατικά (βροχοπτώσεις, βλάβες στον εξοπλισμό της μονάδας, εισαγωγή τοξικών για τους μ/σμούς ουσιών κ.α.). Σε τέτοιες έκτακτες περιπτώσεις η εκτίμηση των σωστών τιμών των μεταβλητών κατάστασης γίνεται δυσκολότερη. Ένα τέτοιο σύστημα όμως πρέπει να κάνει τις εκτιμήσεις του γρήγορα και με ακρίβεια και εκεί θα επικεντρωθεί η προσπάθεια.

Θα γίνει προσπάθεια για να προσαρμόζεται το σύστημα (Παρατηρητής) αυτόματα και να προσθέτει γνώση στην ήδη υπάρχουσα από την εκπαίδευση που του έχει γίνει. Η ιδέα είναι να χρησιμοποιηθεί νευρωνικό δίκτυο μη επιβλεπόμενης μάθησης και πιο συγκεκριμένα τα αυτο – οργανούμενα δίκτυα Kohonen. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο είδος τεχνητής νοημοσύνης γιατί μπορεί να χρησιμοποιεί περισσότερους νευρώνες χωρίς προβλήματα στην εκπαίδευσή του.

Θα καταβληθεί προσπάθεια να διατηρηθεί η ποιότητα των αποβλήτων σε υψηλά επίπεδα ακόμα και κάτω από σοβαρές διαταραχές που θα έθεταν πολλές μονάδες που ελέγχονται από τα συστήματα ελέγχου της βιβλιογραφίας όχι απλώς εκτός στόχου αλλά και εκτός λειτουργίας με επακόλουθη περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Θα εφαρμοστεί οικονομία στον αερισμό με τη χρησιμοποίηση μοντέρνου – βέλτιστου ελέγχου και όχι κλασσικού αποκεντρωμένου ελέγχου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο βέλτιστος έλεγχος στηρίζεται στην ελαχιστοποίηση κάποιου δείκτη λειτουργικής απόδοσης Δ.Λ.Α που μπορεί να περιλαμβάνει πολλές ποσότητες όπως η ελαχιστοποίηση του σφάλματος αλλά και η μείωση στην κατανάλωση ενέργειας. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν συστήματα βέλτιστου ελέγχου που κάνουν οικονομία στην κατανάλωση ενέργειας στην Ε.Ι. η αποτελεσματικότητά τους όμως εξαρτάται από την εκτίμηση των μεταβλητών κατάστασης από τον Παρατηρητή. Βελτιώνοντας τον Παρατηρητή κάνουμε ακόμα μεγαλύτερη οικονομία ενέργειας. Επίσης η αύξηση του αριθμού των μεταβλητών κατάστασης λαμβάνοντας υπ' όψη την κατανάλωση ενέργειας και άλλες μεταβλητές πιστεύουμε ότι θα επιτρέψουν την οικονομικότερη λειτουργία. Θα βελτιωθεί ο Παρατηρητής και θα αυξηθεί η οικονομία ενέργειας που καταναλώνεται από το σύστημα ελέγχου στους ενισχυτές – βάρη ανάδρασης.

Θα χρησιμοποιηθεί ο γραμμικός – τετραγωνικός βέλτιστος έλεγχος του οποίου ο νόμος ελέγχου που είναι συνάρτηση του χρόνου αλλά και του διανύσματος κατάστασης μειώνει τα προβλήματα που οφείλονται στη μη – γραμμικότητα. Υπάρχουν και στη βιβλιογραφία τέτοιες εφαρμογές αλλά και εδώ υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης με τη γραμμικοποίηση της διεργασίας σε πολλές περιοχές λειτουργίας αντί για μία περιοχή λειτουργίας που χρησιμοποιείται συνήθως.

Συνοπτικά οι επιμέρους στόχοι της διατριβής είναι οι εξής:

1. Θα χρησιμοποιηθεί ο βέλτιστος έλεγχος (τύπου βέλτιστου ρυθμιστή) και θα επιλυθεί εύκολα το πρόβλημα της ανθεκτικότητας σε εξωτερικές διαταραχές. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη ευελιξία που έχουμε στο μοντέρνο έλεγχο μέσω της ρύθμισης των βαρών ανατροφοδότησης (που είναι πολλά και έχουν πολλούς συνδυασμούς τιμών). Θα αντιμετωπιστούν ακόμα και οι μόνιμες διαταραχές που προκαλούν σφάλμα μόνιμης κατάστασης με την προσθήκη ελεύθερων ολοκληρωτών (πράγμα που γίνεται στον έλεγχο με βέλτιστο ρυθμιστή). Θα αντιμετωπιστούν με τον ίδιο τρόπο οι αβεβαιότητες του μοντέλου της διεργασίας Ε.Ι..

2. Θα γίνει προσπάθεια διατήρησης των αυστηρών προδιαγραφών ποιότητας της εκροής τόσο σε μεταβατικές καταστάσεις που προκαλούνται από σημαντικές διαταραχές αλλά και κατά την ομαλή λειτουργία της μονάδας.
3. Θα γίνει οικονομία στην ενέργεια που καταναλώνεται για τον αερισμό του βιοαντιδραστήρα μέσω του δείκτη λειτουργικής απόδοσης (του συστήματος ελέγχου με βέλτιστο ρυθμιστή) που είναι πολύ πιο αποτελεσματικός από κάποιους δείκτες που χρησιμοποιούνται στον κλασσικό έλεγχο αλλά έχουν μόνο στόχο τον περιορισμό του σήματος σφάλματος. Στον βέλτιστο έλεγχο ένας δείκτης λειτουργικής απόδοσης Δ.Λ.Α. μπορεί να περιλαμβάνει την ταυτόχρονη βελτίωση πολλών παραμέτρων. Στον κλασσικό έλεγχο δεν μπορεί να γίνει κάτι τέτοιο. Με τον ίδιο τρόπο θα γίνει οικονομία στην ενέργεια που καταναλώνει το σύστημα αυτομάτου ελέγχου.
4. Θα αντιμετωπιστεί η μη – γραμμικότητα μέσω του τύπου του βέλτιστου ελέγχου που χρησιμοποιούμε (Γραμμικός – Τετραγωνικός έλεγχος) ο οποίος είναι ειδικά σχεδιασμένος για αυτό το πρόβλημα.
5. Θα σχεδιαστεί ένας αποτελεσματικότερος Παρατηρητής με τεχνητή νοημοσύνη και μπορεί να κάνει τη χρήση περισσότερων μεταβλητών κατάστασης δυνατή.
6. Θα επιλυθεί το πρόβλημα της ταυτόχρονης αντιμετώπισης πολλών μεταβλητών και διαταραχών καθώς ο βέλτιστος έλεγχος είναι ειδικά σχεδιασμένος για πολυμεταβλητά συστήματα διεργασιών.
7. Θα εξαλειφθεί το πρόβλημα του θορύβου στις μετρήσεις των μεταβλητών κατάστασης.
8. Θα αντιμετωπιστεί το πρόβλημα του νεκρού χρόνου που χρειάζεται ο Παρατηρητής για την εκτίμηση των μεταβλητών κατάστασης.

7. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.

1. Μοντελοποίηση διεργασίας, Γραμμικοποίηση μοντέλου, Ελεγχιμότητα και Παρατηρησιμότητα.

Θα χρησιμοποιηθεί ένα μαθηματικό μοντέλο της διεργασίας (E.I.). Δηλαδή ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων που χαρακτηρίζει τη διεργασία της E.I.. Θα γραμμικοποιηθεί το μοντέλο της διεργασίας το οποίο όσον αφορά τη διεργασία της ενεργού ιλύος είναι εξαιρετικά μη – γραμμικό για να μπορέσει στη συνέχεια να εφαρμοστεί μετασχηματισμός Laplace πάνω σε αυτό. Μετά τη γραμμικοποίηση θα γίνει έλεγχος αν η διεργασία είναι Ελέγξιμη και Παρατηρήσιμη. Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί είναι το απλούστερο δυνατό και αποτελείται από τρία ισοζύγια μάζας. Ένα για το υπόστρωμα, ακόμα ένα για το διαλυμένο οξυγόνο και το τελευταίο για τους μ/σμούς. Η γραμμικοποίηση θα γίνει με ανάπτυξη σε σειρά Taylor γύρω από ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Η Ελεγχσιμότητα και η Παρατηρησιμότητα αναλύονται στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο.

2. Εφαρμογή Μοντέρνου ελέγχου, Βέλτιστου ελέγχου, Γραμμικού – Τετραγωνικού ελέγχου και ελέγχου με βέλτιστο ρυθμιστή.

Αφού διαπιστωθεί ότι η διεργασία είναι Ελέγξιμη και Παρατηρήσιμη η μεθοδολογία θα προχωρήσει στο Μοντέρνο Έλεγχο ή αλλιώς στον έλεγχο με ανάδραση των μεταβλητών κατάστασης. Στη συνέχεια προσθέτοντας ένα Δείκτη Λειτουργικής Απόδοσης Δ.Λ.Α., θα γίνει προσπάθεια να ελαττωθεί η απόκλιση από τις επιθυμητές τιμές των μεταβλητών ποιότητας της εκροής (ελάττωση σφάλματος) αλλά και να αυξηθεί η εξοικονόμηση ενέργειας στον αερισμό του βιολογικού αντιδραστήρα. Μ' αυτό τον τρόπο θα γίνει μετάβαση από το μοντέρνο έλεγχο στο βέλτιστο έλεγχο. Μετά θα εφαρμοστεί ο γραμμικός – τετραγωνικός έλεγχος όπου το διάνυσμα των μεταβλητών ελέγχου $\bar{u}^O(\bar{x}, t)$ είναι συνάρτηση του διανύσματος των μεταβλητών κατάστασης. Το είδος αυτό ελέγχου είναι πιο αποτελεσματικό στην αντιμετώπιση της μη – γραμμικής συμπεριφοράς της διεργασίας. Από τα επιμέρους είδη γραμμικού – τετραγωνικού ελέγχου θα γίνει επιλογή του ελέγχου με βέλτιστο ρυθμιστή.

Για τη συγκεκριμένη περίπτωση της (E.I.) η εφαρμογή του μοντέρνου ελέγχου περιγράφεται συνοπτικά . Εφαρμόζεται το γραμμικό μοντέλο με τις τρεις διαφορικές εξισώσεις. Εφαρμόζεται μετασχηματισμός Laplace γίνεται λήψη τριών αλγεβρικών εξισώσεων. Οι εξισώσεις λύνονται ως προς τις μεταβλητές κατάστασης (τρεις μεταβλητές κατάστασης). Στις αλγεβρικές εξισώσεις υπάρχουν και τρεις μεταβλητές ελέγχου. Από τις τρεις αυτές μεταβλητές ελέγχου αγνοούνται οι δύο. Λαμβάνονται οι δύο πρώτες αλγεβρικές εξισώσεις και απαλείφεται η τρίτη μεταβλητή ελέγχου.

Λαμβάνεται η πρώτη και η τρίτη εξίσωση και γίνεται το ίδιο. Με αντικατάσταση στο σήμα ανάδρασης βρίσκεται η συνάρτηση μεταφοράς και από τη χαρακτηριστική της εξίσωση βρίσκονται οι πόλοι της διεργασίας. Στη συνέχεια με τη βοήθεια της μεθοδολογίας του τόπου των ριζών μεταβάλλονται τα $K1$, $K2$, $K3$ (βάρη ανάδρασης) και μετατοπίζονται οι πόλοι του κλειστού πλέον βρόχου στις επιθυμητές θέσεις. Η εφαρμογή του βέλτιστου ελέγχου γίνεται αν στην προηγούμενη διαδικασία προστεθεί ένας δείκτης λειτουργικής απόδοσης Δ.Λ.Α.. Η εφαρμογή του Γραμμικού – Τετραγωνικού ελέγχου γίνεται με επίλυση της διαφορικής μητρικής εξίσωσης Riccati ενώ η εφαρμογή του βέλτιστου ρυθμιστή γίνεται με την επίλυση της αλγεβρικής μητρικής εξίσωσης Riccati.

3. Ολοκλήρωση συστήματος ελέγχου με βέλτιστο ρυθμιστή.

Θα γίνει εκτίμηση του πόσες μόνιμες διαταραχές έχει η διεργασία (από τη μεταβολή της θερμοκρασίας από το χειμώνα στο καλοκαίρι μέχρι αλλοίωση στη λειτουργία κάποιας αντλίας ή ηλεκτροβάννας λόγω φθοράς κ.λ.π.). Για κάθε τέτοια μόνιμη διαταραχή θα εισαχθεί στο σύστημα ένας ελεύθερος ολοκληρωτής που μηδενίζει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης που θα προέκυπτε και θα δημιουργούσε μια μόνιμη απόκλιση από τις επιθυμητές τιμές των μεταβλητών ποιότητας της εκροής. Θα προστεθεί στο σύστημα ένας Παρατηρητής που θα κάνει εκτίμηση των μεταβλητών κατάστασης που δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα και σε πραγματικό χρόνο με ακρίβεια και αξιοπιστία στη μέτρησή τους. Θα επιλυθεί η αλγεβρική μητρική εξίσωση Riccati για να βρεθούν οι τιμές των βαρών ανάδρασης που ικανοποιούν τον Δ.Λ.Α. ελαχιστοποιώντας τον.

4. Αξιολόγηση Ολοκληρωμένου Συστήματος στο Μιγαδικό Επίπεδο.

Θα εφαρμοστεί μετασχηματισμός Laplace στο μοντέλο του συστήματος στο οποίο κατέληξε η μεθοδολογία. Θα υπολογιστεί η μήτρα μεταφοράς του όλου συστήματος. Από τη μήτρα αυτή θα χρησιμοποιηθεί η χαρακτηριστική εξίσωση για να βρεθούν οι πόλοι του συστήματος. Τοποθετούνται οι πόλοι στο μιγαδικό επίπεδο και παρατηρείται αν βρίσκονται όλοι στο αριστερό του τμήμα (αρνητικός πραγματικός ημιάξονας), από αυτό κρίνεται η κατάσταση ευστάθειας του συστήματος. Στη συνέχεια θα βρεθούν οι μηδενιστές και θα παρατηρηθεί αν και αυτοί βρίσκονται στο αριστερό ημιεπίπεδο. Έτσι θα κριθεί αν το σύστημα είναι πλήρως ευσταθές ή αν είναι κατά συνθήκη ευσταθές.

5. Προσομοίωση.

Στη συνέχεια και αφού κριθεί αν οι πόλοι και οι μηδενιστές βρίσκονται σε «καλές» περιοχές του μιγαδικού επιπέδου, θα γίνει αντίστροφος μετασχηματισμός Laplace στη μήτρα μεταφοράς και θα ελεγχθεί η απόκριση του συστήματος σε δοκιμαστικές διαταραχές που θα του επιβληθούν (μοναδιαίας βαθμίδας, αναρρίχησης κ.α.).

6. Πειραματική επαλήθευση και Σύγκριση με άλλες μεθόδους ελέγχου.

Θα πραγματοποιηθεί Πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων του προηγούμενου βήματος με τη βοήθεια πιλοτικής μονάδας (E.I.). Θα συγκριθούν τα αποτελέσματα στην περίπτωση που αυτά επαληθεύτηκαν και πειραματικά με άλλες μεθόδους ελέγχου όπως ο αποκεντρωμένος κλασσικός έλεγχος με ανεξάρτητους βρόχους και PID κατευθυντές, αλλά θα γίνει και σύγκριση με παρόμοια συστήματα βέλτιστου ελέγχου που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Η τελευταία σύγκριση θα δείξει την αποτελεσματικότητα του Παρατηρητή τεχνητής νοημοσύνης.

8. ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ

Χρονοδιάγραμμα διδακτορικής διατριβής (έναρξη 20/10/2010). 1 από 2.																					
Μήνες		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
A/ A	Εργασίες																				
1.	Βιβλιογραφική ανασκόπηση																				
2.	Μοντελοποίηση Διεργασίας, Γραμμικοποίηση Μοντέλου, Ελεγχιμότητα και Παρατηρησιμότητα.																				
3.	Εφαρμογή Μοντέρνου Ελέγχου, Βέλτιστου Ελέγχου, Γραμμικού – Τετραγωνικού Ελέγχου και Ελέγχου Βέλτιστου Ρυθμιστή																				
4.	Συγγραφή πρότασης διατριβής.																				
5.	Ολοκλήρωση συστήματος ελέγχου βέλτιστου ρυθμιστή με προσθήκη ελεύθερων ολοκληρωτών και Παρατηρητή.																				
6.	Αξιολόγηση του συνολικού συστήματος στο μαγαδικό επίπεδο.																				

[illegible]

9. ΠΡΟΟΔΟΣ ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΓΙΝΕΙ.

Έχει χρησιμοποιηθεί ένα απλό μοντέλο της διεργασίας απομάκρυνσης του βιολογικού άνθρακα (υποστρώματος) από το μικτό υγρό που είναι η πιο απλή εργασία που μπορεί να κάνει ένα σύστημα (E.I.). Το πιο απλό μοντέλο που μπορεί να περιγράψει αυτή τη διεργασία είναι τρεις μη – γραμμικές διαφορικές εξισώσεις (ισοζύγια μάζας). Ένα ισοζύγιο μάζας για τη συγκέντρωση υποστρώματος, ένα για τη συγκέντρωση οξυγόνου και ένα για τη συγκέντρωση των μ/σμών. Βιβλ. [1].

$$\frac{dS_S}{dt} = \frac{q_F}{V} \cdot (S_{SF} - S_S) - \frac{\mu_H}{Y_H} \cdot \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) \cdot X_H + (1 - f_P) \cdot b_H \cdot X_H$$

$$\frac{dS_O}{dt} = \frac{q_F}{V} \cdot S_{OF} - \frac{q_F + q_R}{V} \cdot S_O + \frac{Y_H - 1}{Y_H} \cdot \mu_H \cdot \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) \cdot X_H + \alpha \cdot \left(1 - e^{-\frac{q_A}{b}} \right) \cdot (S_{O,sat} - S_O)$$

$$\frac{dX_H}{dt} = \frac{q_F}{V} \cdot X_{HF} - \frac{q_W}{V} \cdot \left(\frac{q_F + q_R}{q_W + q_R} \right) \cdot X_H - \frac{\mu_H}{Y_H} \cdot \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \cdot \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) \cdot X_H + (1 - f_P) \cdot b_H \cdot X_H$$

Σχέσεις 9. – 1

Το παραπάνω είναι ένα σύστημα (μοντέλο) μη – γραμμικών διαφορικών εξισώσεων. Η μη – γραμμικότητα του συστήματος οφείλεται στους όρους:

$$\frac{S_S}{K_S + S_S} \quad \text{και} \quad \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \quad . \text{ Τα } S_S \text{ και } S_O \text{ αφ' ενός βρίσκονται στους παρονομαστές}$$

των κλασμάτων όπου και προστίθενται με κάποια παράμετρο αφ' ετέρου εμπλέκονται σε γινόμενο μεταξύ τους τόσο στους αριθμητές των κλασμάτων όσο και στους παρονομαστές. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι παράμετροι των ανωτέρω εξισώσεων.

Πίνακας 9. – 1. ‘Επεξήγηση παραμέτρων των ανωτέρω εξισώσεων’.

q_F	Παροχή εισερχόμενων αποβλήτων	X_H	Συγκέντρωση ετερότροφων μ/σμών στην αερ. δεξ.
S_{SF}	Συγκέντρωση εισερχόμενου υποστρώματος	μ_H	Μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης των μ/σμών
S_{OF}	Συγκέντρωση εισερχόμενου οξυγόνου	K_S	Συντελεστής κορεσμού υποστρώματος
X_{HF}	Συγκέντρωση εισερχόμενων ετερότροφων μ/σμών	K_{OH}	Συντελεστής κορεσμού οξυγόνου
q_A	Παροχή αέρα	Y_H	Συντελεστής μετατροπής του υποστρώματος σε βιομάζα
q_R	Παροχή ανακυκλοφορίας υλός	b_H	Ρυθμός θανάτου μ/σμών

q_w	Παροχή απορριπτόμενης ύλης	f_p	Κλάσμα αδρανών κατά την αποσύνθεση
V	Όγκος αερόβιας δεξαμενής	a	Τιμή παραμέτρου που υπολογίζει την παροχή μάζας κατά τον αερισμό αντιστοιχεί σε άπειρη παροχή αέρα
S_s	Συγκέντρωση υποστρώματος στην αερ. δεξ.	b	Τιμή παραμέτρου υψωμένη σε δύναμη που υπολογίζει την παροχή μάζας κατά τον αερισμό
S_o	Συγκέντρωση οξυγόνου στην αερ. δεξ.	$S_{O,sat}$	Συγκέντρωση κορεσμένου στο μικτό υγρό οξυγόνου

Χρησιμοποιώντας ένα ειδικό πρόγραμμα υπολογισμών που λέγεται Mathcad έγιναν υπολογισμοί με πίνακες, λύθηκαν μεγάλου βαθμού αλγεβρικές εξισώσεις και αλγεβρικά συστήματα πολλών μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων όπως αυτά που προκύπτουν από την αλγεβρική μητρική εξίσωση Riccati. Οι διαφορικές εξισώσεις του μοντέλου απομάκρυνσης άνθρακα γραμμικοποιήθηκαν γύρω από ένα σημείο ισορροπίας. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μετασχηματισμός Laplace και υπολογίζεται η μήτρα μεταφοράς του συστήματος της διεργασίας. Η χαρακτηριστική εξίσωση δίνει τους πόλους πάνω στο μιγαδικό επίπεδο. Μετά αποδείχθηκε ότι το σύστημα είναι και ελέγξιμο και παρατηρήσιμο. Μετά εφαρμόστηκε μοντέρνος έλεγχος και βρέθηκαν τα βάρη ανατροφοδότησης των μεταβλητών κατάστασης. Τέλος εφαρμόστηκε βέλτιστος έλεγχος με δείκτη λειτουργικής απόδοσης που περιλαμβάνει τόσο τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος αλλά και έναν όρο για την κατανάλωση ενέργειας στον αερισμό. Επιλέγοντας το Γραμμικό – Τετραγωνικό έλεγχο και πιο συγκεκριμένα τον έλεγχο του βέλτιστου ρυθμιστή και λύνοντας την αλγεβρική μορφή της μητρικής εξίσωσης Riccati βρίσκονται τα νέα βάρη ανάδρασης των μεταβλητών κατάστασης που ελαχιστοποιούν τον Δ.Λ.Α.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.

- [1]→ Λέκκας Θεμιστοκλής, 'Περιβαλλοντική Μηχανική 2. Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων.', Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, 2001.
- [2] → Ν.Ι. Κρικέλη, 'Εισαγωγή στον αυτόματο έλεγχο (Θεωρία και Εφαρμογές)', Αθήνα, 2000.
- [3] →Σπύρου Γ. Τζαφέστα, 'Υπολογιστική νοημοσύνη. Τόμος Α Μεθοδολογίες', Αθήνα, 2002.
- [4] →Ieroham S. Baruch and Rosalba Galvan-Guerra, "Decentralized Adaptive Soft Computing Control of Distributed Parameter Bioprocess Plant", V. Sgurev et al. (Eds.): Intelligent Systems: From Theory to Practise, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [5] →S. Cristea, C. de Prada, D. Sarabia, G. Gutierrez, "Aeration control of a wastewater treatment plant using hybrid NMPC", Computers and chemical engineering, 2010.
- [6] →Dunyamin Guclu, Sukru Dursun, "Artificial neural network modelling of a large-scale wastewater treatment plant operation", Bioprocess Biosyst Eng, 2010.
- [7] →E. V. Grigorieva and E. N. Khailov, "Minimization of Pollution Concentration on a Given Time Interval for the Waste Water Cleaning Plant", Hindawi Publishing Corporation, Journal of Control Science and Engineering, 2010.
- [8] →Raynitchka Tzoneva, Member, IEEE, "Optimal PID Control of the Dissolved Oxygen Concentration in the Wastewater Treatment Plant", IEEE, 2007.
- [9] →Norhaliza A. Wahab, Reza Katebi, Jonas Balderud, "Multivariable PID control design for activated sludge process with nitrification and denitrification", Biochemical Engineering Journal, 2009.
- [10] →Antonio C. B. de Araujo, Simone Gallani, Michela Mulas and Gustaf Olsson, "Systematic Approach to the Design of Operation and Control Policies in Activated Sludge Systems", Industrial and Engineering Chemistry Research, 2011.
- [11] →Antonio Flores-Tlacuahuac, Margarita Hernandez Esparza and Rodrigo Lopez-Negrete de la Fuente, "Bifurcation Behavior of a Large Scale Waste Water Treatment Plant", Industrial and Engineering Chemistry Research, 2009.
- [12] →LI Ming-he, WANG KE, WANG JIAN, "The Research and Application of Energy-saving Control System for Wastewater", WASE International Conference on Information Engineering, 2010.
- [13] →Ping Zhang, Mingzhe Yuan and Hong Wang, "Self-Tuning PID Based on Adaptive Genetic Algorithms with the Application of Activated Sludge Aeration Process", Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, China, Dalian, 2006.
- [14] →Changkyoo Yoo, Min Han Kim, "Industrial experience of process identification and set-point decision algorithm in a full scale treatment plant", Journal of Environmental Management, 2009.
- [15] →W. Zarrad, J. Harmand, M. Devisscher, J. P. Steyer, "Comparison of advanced control strategies for improving the monitoring of activated sludge processes", Control Engineering Practice, 2004.

- [16] →M. A. Rodrigo, A. Seco, J. Ferrer, J. M. Peña-roja, J. L. Valverde, "Nonlinear control of an activated sludge aeration process: use of fuzzy techniques for tuning PID controllers", ISA Transactions, 1999.
- [17] →Wei Wu, Jiyang Peng, "Linear control of electrochemical tubular reactor system-Removal of Cr(VI) from wastewaters", Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2010.
- [18] →Xiongwei Shi, Junfei Qiao, "Neural Network Predictive Optimal Control for Wastewater Treatment", International Conference on Intelligent Control and Information Processing, China, Dalian, 2010.
- [19] →Z. Zeybek, T. Karapinar, M. Albaz, H. Hapoglu, "Application of adaptive heuristic criticism control (AHCC) to dye wastewater", Journal of Environmental Management, 2007.
- [20] →Wei Tang, Qian Feng, Mengxiao Wang, Qian Hou, Leilei Wang, "Expert System Based Dissolved Oxygen Control in APMP Wastewater Aerobic Treatment Process", Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, China, Qingdao, 2008.
- [21] →Ping Zhang, Mingzhe Yuan, Hong Wang, "Improvement of nitrogen removal and reduction of operating costs in an activated sludge process with feedforward-cascade control strategy", Biochemical Engineering Journal, 2008.
- [22] →F. N. Koumboulis, N. D. Kouvakas, R. E. King, A. Stathaki, "Two-stage robust control of substrate concentration for an activated sludge process", ISA Transactions, 2008.
- [23] →Włodzimierz Solnik, Zbigniew Zajda, "Aeration System Control in Biological Wastewater Treatment Plants", Proceedings of the Seventh International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Kunming, 2008.
- [24] →Ioan Nascu, Grigore Vlad, Silviu Folea, Tudor Buzdugan, "Development and Application of a PID Auto-Tuning Method to a Wastewater Treatment Process", IEEE, 2008.
- [25] →Wang Wenfeng, Long Wei, HU Lin, "Nonlinear Model Predictive Control of PH in Rolling Mill Wastewater Treatment", IEEE, 2009.
- [26] →Kang Jiayu, Wang Mengxiao, Xiao Zhongjun, Zhao Yan, "Fuzzy PID Control of the PH in an Anaerobic wastewater Treatment process", IEEE, 2009.
- [27] →Kang Jiayu, Wang Mengxiao, Mi Linan, Xiao Zhongjun, "Cascade Control of the PH in an Anaerobic Wastewater Treatment System", IEEE, 2009.
- [28] →Saziy Balku, Mehmet Yuceer, Ridvan Berber, "Control vector parameterization approach in optimization of alternating aerobic-anoxic systems", Optimal Control Applications and Methods, 2009.
- [29] →T. T. Lee, F. Y. Wang, R. B. Newell, "Advances in distributed parameter approach to the dynamics and control of activated sludge processes for wastewater treatment", Water Research, 2006.
- [30] →John F. Andrews, "Dynamic models and control strategies for wastewater treatment processes", Water Research, 1974.
- [31] →V. M. Alfaro, R. Vilanova, O. Arrieta, "Two – degree – of – freedom PI/PID tuning approach for smooth control on cascade control systems", 47th IEEE Conference on decision and control Cancun Mexico, 2008.
- [32] →V. M. Alfaro, R. Vilanova, O. Arrieta, "Fragility analysis of PID controllers", 18th IEEE Conference on Control applications Saint Petersburg Russia, 2009.

- [33] →V. M. Alfaro, R. Vilanova, O. Arrieta, R. Moreno, “Considerations on PID controller operation: Application to a continuous stirred tank reactor”, IEEE, 2008.
- [34] →Fukiko Kawai, Chikashi Nakazawa, Yoshikazu Fukuyama and Takashi Ueno, “An Aeration Control for Advanced Wastewater Treatment Processes (SICE-ICCAS 2006)”, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, Korea, Busan, Bexco.
- [35] →Wei Tang, Zhongfeng Wang, Qian Feng, Mengxiao Wang, “Application of Fuzzy Expert Control to APMP Pulping Wastewater Treatment Process of Aerobic”, Proceedings of the 2010 IEEE International Conference of Mechatronics and Automation, China, Xian, 2010.
- [36] →Arash Mehrafrooz, Alireza Yazdizadeh, “PID Dead-Time Predictor Design for Industrial DCS Systems Using Smith Rule”, International Conference on Intelligent and Advanced Systems 2007, 2007.
- [37] →V. M. Alfaro, R. Vilanova, O. Arrieta, “Analytical Robust Tuning of PI Controllers for First-Order-Plus-Dead-Time Processes”, IEEE, 2008.
- [38] →N. A. Wahab, M. R. Katebi, J. Balderud, “Multivariable PID Control Design For Wastewater Systems”, 2007 Mediterranean Conference on Control and Automation, Greece, Athens, 2007.
- [39] →Qing Yang, Shengbo Gu, Yongzhen Peng, Shuying Wang, Xiuhong Liu, “Progress in the Development of Control Strategies for the SBR Process”, Clean-Soil, Air, Water, 2010.
- [40] →Felix Garcia-Ochoa, Emilio Gomez, “Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview”, Biotechnology Advances, 2009.
- [41] →M. A. Steffens, P. A. Lant, R. B. Newell, “A systematic approach for reducing complex biological wastewater treatment models”, Water Research, 1997.
- [42] →Aljaz Stare, Nadja Hvala, Darko Vrecko, “Modeling identification and validation of models for predictive ammonia control in a wastewater treatment plant – A case study”, ISA Transactions, 2006.
- [43] →V. M. Alfaro, R. Vilanova, J. D. Rojas, “Application of the virtual reference feedback tuning on wastewater treatment plants: a simulation study”, IEEE, 2010.
- [44] →Andreas Rauh, Johanna Minisini, Eberhard P. Hofer, “Verification Techniques for Sensitivity Analysis and Design of Controllers for Nonlinear Dynamic Systems with Uncertainties”, Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2009.
- [45] →Mats Ekman, “Suboptimal Control for the Bilinear Quadratic Regulator Problem: Application to the Activated Sludge Process”, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005.
- [46] →Ilse Y. Smets, Johan E. Claes, Eva J. November, Georges P. Bastin, Jan F. Van Impe, “Optimal adaptive control of (bio)chemical reactors: past, present and future”, Journal of Process Control, 2004.
- [47] →Ken Amano, Kohji Kageyama, Shoji Watanabe, Takeshi Takemoto, “Calibration of model constants in a biological reaction model for sewage treatment plants”, Water Research, 2002.
- [48] →Vasile Sima, “Computational Experience in Solving Algebraic Riccati Equations”, Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference, 2005.

- [49] →Vasile Sima, Peter Benner, “Experimental evaluation of new SLICOT solvers for linear matrix equations based on the matrix sign function”, 2008 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design Part of 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control San Antonio, Texas, USA, 2008.
- [50] →Vasile Sima, Peter Benner, “A SLICOT Implementation of a Modified Newton’s Method for Algebraic Riccati Equations”.
- [51] →Federico Poloni, “Quadratic vector equations”, Linear Algebra and its Applications, 2011.
- [52] →Hiroaki Mukaidani, Hua Xu, “A Numerical Computation of Linear Quadratic Dynamic Games for Stochastic Systems with State- and Control-Dependent Noise”, 49th IEEE Conference on Decision and Control 2010 Hilton Atlanta Hotel, Atlanta, GA, USA, 2010.
- [53] →N. Kumaresan, P. Balasubramaniam, “Singular optimal control for stochastic linear quadratic singular system using ant colony programming”, International Journal of Computer Mathematics, 2010.
- [54] →Lorenzo Ntogramatzidis, Augusto Ferrante, “On the solution of the Riccati differential equation arising from the LQ optimal control problem”, Systems and Control Letters, 2010.
- [55] →Takuya Kitamoto, “Algebraic Approach to the Computation of the Defining Polynomial of the Algebraic Riccati Equation”, V. P. Gerdt, B. W. Mayr and E. V. Vorozhtsov (Eds.) CASC, 2009.
- [56] →Peter Benner, Heike Favbender, “On the numerical solution of large-scale sparse discrete-time Riccati equations”, Advanced Computer Mathematics, 2011.
- [57] →Nobuya Takahashi, Michio Kono, Tatsuo Suzuki, Osamu Sato, “A numerical solution of the stochastic discrete algebraic Riccati equation”, Artificial Life Robotics, 2009.
- [58] →F. S. Barbosa, R. C. Battista, “A numerical tool for solving Riccati equation applied to modal optimal control of structures”, Structural Control and Health Monitoring, 2007.
- [59] →Malay Gupta, Scott C. Douglas, “A Spatio-Temporal Speech Enhancement Technique Based on Generalized Eigenvalue Decomposition”, IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2009.
- [60] →Chang-zhong Chen, Fei Tan, Ning Fang, “The Design method and Application of One Intelligent Integrator”, International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010.
- [61] →T. T. Lee, F. Y. Wang, R. B. Newell, “Robust multivariable control of complex biological processes”, Journal of Process Control, 2004.
- [62] →Νικ. Ι. Κρικέλη, ‘Μοντελοποίηση και Βέλτιστος Έλεγχος Συστημάτων’, 1996.
- [63] →Eckenfelger W.W., ‘Theory of Biological treatment of trade waste’, J.W.P.C. Fed, 1967.
- [64] →Goodman B.L. and Englande A.J.A., ‘Unified Model of the activated sludge process’, J.W.P.C. Fed, 1974.
- [65] →Metcalf and Eddy Inc., Wastewater Engineering, ‘Treatment and Disposal’, Mc Graw Hill, 1972.
- [66] →Michael Winkler, ‘Biological Treatment of Waste-Water’, Ellis Horwood Limited, Halsted Press, 1981.
- [67] →Blackman, P.F., ‘The Pole-Zero Approach to System Analysis’, Control, 1961.

- [68] → Ahrendt, W.R., 'Servomechanism Practise', McGraw-Hill, N.Y., 1954.
- [69] → Βλαχαβάς Ιωάννης, Κεφάλας Πέτρος, Βασιλειάδης Νικόλαος, Κόκκορας Φώτης, Σακελλαρίου Ηλίας, 'Τεχνητή Νοημοσύνη', 2005.