



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

" ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΗΣΗ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΕΜΒΟΛΑ"



ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ:

ΝΤΑΓΚΙΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Δρ.ΜΙΧΑΗΛ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Νταγκίνης Δημήτριος

Του Ιωάννη Νταγκίνη , με αριθμό μητρώου 38396 φοιτητής του Τμήματος **Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής**, του **Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής** πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε., ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασης της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού 6μήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

Ο Δηλών

Ημερομηνία

Νταγκίνης Δημήτριος

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται η μεθοδολογία εφαρμογής ελέγχου σε ένα υδραυλικό σύστημα αποτελούμενο από ένα ή περισσότερα έμβολα που ανυψώνουν μία επιτραπέζια επιφάνεια. Αρχικά αναλύονται τα μεγέθη μοντελοποίησης ενός υδραυλικού συστήματος και κατόπιν αναλύονται τα λειτουργικά μέρη ενός τέτοιου συστήματος, αντλίες, κινητήρες, τύποι υδραυλικών βαλβίδων κλπ. Κατόπιν διατυπώνονται οι εξισώσεις μοντελοποίησης των τμημάτων των υδραυλικών συστημάτων (αντλιών, κινητήρων, βαλβίδων) και αναλύεται η κατάστροση των εξισώσεων κατάστασης του συστήματος. Μετά αναλύεται η εφαρμογή ελέγχου τόσο της ταχύτητας ανύψωσης όσο και της θέσης της τράπεζας με ανάδραση των μεταβλητών κατάστασης όσο και με εφαρμογή PID έλεγχου με αναφορά στην αντίστοιχη θεωρία και εφαρμογή της για το σύστημα και βρίσκονται κλειστές μαθηματικές εκφράσεις για τον υπολογισμό των παραμέτρων των ελεγκτών. Τελικά μετά την περιγραφή του υδραυλικού συστήματος εφαρμόζονται τα ανωτέρω στην κατάστροση ενός τέτοιου συστήματος ελέγχου όπου ο έλεγχος γίνεται μέσω μονάδας PLC.

## SUMMARY

In this thesis the methodology of the application of control in a hydraulic system comprised by one or more hydraulic cylinders which elevate a horizontal surface is analyzed. First the variables which are used in the analysis of hydraulic systems are described and then a thorough analysis is made for the operational parts of such systems like the pumps, motors, valves etc. Then, the equations which are used for the models of the parts of the hydraulic systems are derived and the derivation of the system equations of state is analyzed. Then the application of control through the feedback of the state variables and through the use of a PID controller is analyzed and the relevant equations are derived for the control of the velocity or for the control of the position of the horizontal elevated surface and by the application of the relevant theory closed form equations are derived for the values of the controller variables. Finally, the hydraulic system is described and the above are applied in the construction of a control system where the control is made by a PLC unit

## Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ</b> .....	10
<b>1.1. ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ</b> .....	10
<b>1.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΕΥΣΤΟΥ</b> .....	10
<b>1.3. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ</b> .....	11
<b>1.4. ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ</b> .....	12
<b>1.5. ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ</b> .....	13
<b>1.6. ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ</b> .....	14
<b>1.7. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ</b> .....	14
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ-ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ</b> .....	16
<b>2.1 ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ-ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ</b> .....	16
<b>2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ</b> .....	16
<b>2.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΙΔΑΝΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ</b> .....	17
<b>2.4 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ</b> .....	17
<b>2.5 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΤΛΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ</b> .....	19
<b>2.6 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΤΕΡΥΓΩΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ</b> .....	20
<b>2.7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ</b> .....	21
<b>2.8 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΘΕΤΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ</b> .....	22
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΡΟΗΣ</b> .....	25
<b>3.1ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΡΟΗΣ</b> .....	25
<b>3.2 Η ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΒΑΛΒΙΔΩΝ</b> .....	26
<b>3.3 ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ</b> .....	27
<b>3.4 ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΙΕΣΗΣ</b> .....	28
<b>3.5 ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΗΣ (ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ)</b> .....	28
<b>3.6 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΒΑΛΒΙΔΕΣ</b> .....	29
<b>3.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΛΒΙΔΑΣ ΤΥΠΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ</b> .....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΩΝ</b> .....	35
<b>4.1ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ</b> .....	35
<b>4.2ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΛΒΙΔΑΣ-ΕΜΒΟΛΟΥ ΑΠΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b> .....	35
<b>4.3ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΛΒΙΔΑΣ-ΕΜΒΟΛΟΥ ΑΠΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ ΑΠΟ ΕΛΑΤΗΡΙΟ</b> .....	36
<b>4.4ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΛΒΙΔΑΣ-ΕΜΒΟΛΟΥ ΔΙΠΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b> .....	42
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ</b> .....	49

5.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	49
5.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ .....	49
5.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΥΘΑΙΡΕΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ .....	51
5.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΛΕΓΚΤΗ ΤΡΙΩΝ ΟΡΩΝ PID .....	55
5.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΗ.....	58
5.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΘΕΣΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΗ .....	60
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6-ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>63</b>
6.1 ΣΧΕΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ .....	63
6.2 ΧΡΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ.....	63
6.3 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	64
6.4 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ .....	68
6.5 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΙΕΣΗΣ .....	72
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7-ΒΑΣΙΚΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....</b>	<b>75</b>
7.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	75
7.2 Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΒΑΛΒΙΔΑΣ.....	76
7.3 ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	76
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	81

### **ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

Σχήμα 3.1.1 Βαλβίδα εμβόλου	25
Σχήμα 3.1.2 Βαλβίδα πτερυγίου ακροφυσίου	26
Σχήμα 3.1.3 Βαλβίδα τζετ ακροφυσίου	26
Σχήμα 3.6.1 Έλεγχος ροής ρευστού σε βαλβίδα	29
Σχήμα 3.7.1 Σχήμα βαλβίδας ρύθμισης κατεύθυνσης ροής	30
Σχήμα 4.2.1 Μελετούμενο υδραυλικό σύστημα απλής ενεργείας	35
Σχήμα 4.3.1 Υπό μελέτη υδραυλικό σύστημα	37
Σχήμα 4.4.1 Υπό μελέτη σύστημα	43
Σχήμα 5.2.1 Ελεγκτής ακολουθίας σταθερών σημάτων	51
Σχήμα 5.3.1 Ελεγκτής ασυμπτωτικής ακολουθίας αυθαίρετων σημάτων	54
Σχήμα 5.5.1 Υδραυλικός ενεργοποιητής με εξωτερική διαταραχή	58

Σχήμα 6.3.1 Γραμμικό ποτενσιόμετρο	64
Σχήμα 6.3.2 Γραμμικός διακόπτης με γλωσσίδα	65
Σχήμα 6.3.3 Γωνιόμετρο μεταβλητής αντίστασης	65
Σχήμα 6.3.4 Οπτικοί αισθητήρες	68
Σχήμα 6.4.1 Μετατροπέας κινητού πηνίου	69
Σχήμα 6.4.2 Μετατροπέας κινητού μαγνήτη	69
Σχήμα 7.1.1 Υδραυλικό σύστημα	75
Σχήμα 7.3.1 Έλεγχος ταχύτητας ανόδου εμβόλου με ανατροφοδότηση μεταβλητών κατάστασης	77
Σχήμα 7.3.2 Έλεγχος ταχύτητας ανόδου εμβόλου με PID έλεγχο	77

### **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ**

Re – αριθμός Reynolds

$\rho$  – πυκνότητα

u – ταχύτητα

A – διατομή

V – όγκος

P – πίεση

z – Στάθμη

L, l – μήκος αγωγού

d – διάμετρος σωλήνα

$\zeta$  – εντοπισμένη αντίσταση

g – επιτάχυνση βαρύτητας

m, M – μάζα

F – δύναμη

I – αδράνεια ρευστού

Q – παροχή ρευστού

$t$  – χρόνος

$\beta$  – bulk modulus

$c_f$  – χωρητικότητα ρευστού

$R$  – υδραυλική αντίσταση

$T$  – ροπή

$\omega$  – γωνιακή ταχύτητα

$D_p$  – ογκομετρική μετατόπιση αντλίας

$K_L$  – συντελεστής διαρροής αντλίας

$b, B$  – συντελεστής απόσβεσης

$e$  – εκκεντρότητα

$N$  – στροφές κινητήρα

$C_\delta$  – συντελεστής διαρροής

$C_d$  – συντελεστής εκφόρτισης

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.

Για την σύνταξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκφράζω τις ευχαριστίες μου στους γονείς μου για την υποστήριξη που μου παρείχαν και στον επιβλέποντα καθηγητή μου για την συμπαράσταση και τις χρήσιμες πρακτικές συμβουλές που μου παρείχε για την εκπόνηση της



## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα υδραυλικά συστήματα χρησιμοποιούνται σε ποικιλία εφαρμογών στην καθημερινή ζωή μας. Σε πολλές περιπτώσεις έχουμε την χρήση υδραυλικών συστημάτων για την ανύψωση κάποιας οριζόντιας επιφάνειας για την μεταφορά ανθρώπων ή υλικών όπως στα υδραυλικά αναβατόρια, στις υδραυλικές πλατφόρμες κλπ. Σε τέτοια συστήματα δεν θέλουμε να μην ελέγχεται η ταχύτητα ανύψωσης ή η μεταβολή της θέσης της επιφάνειας με τον χρόνο. Στην παρούσα εργασία αναλύεται ο τρόπος που μπορεί να καταστρωθεί ένας τέτοιος έλεγχος σε ένα υδραυλικό σύστημα αυτού του τύπου. Η εργασία είναι καταστρωμένη κατά τμήματα και αρχίζει από την ανάλυση των βασικών μεγεθών ενός τέτοιου συστήματος, προχωρά στην μοντελοποίηση των στοιχείων του υδραυλικού συστήματος, και μετά την ανάλυση της κατάστρωσης των εξισώσεων κατάστασης περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος προσδιορισμού των παραμέτρων των ελεγκτών για τον έλεγχο του συστήματος. Τέλος εφαρμόζονται τα ανωτέρω σε ένα υδραυλικό σύστημα όπου ο έλεγχος γίνεται με PLC.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

## 1.1. ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

**Ρευστό** λέγεται το υλικό σώμα που παρουσιάζει ροή. Ρευστά είναι τα υγρά και τα αέρια υλικά σώματα στα οποία οι δυνάμεις συνοχής είναι χαλαρές με αποτέλεσμα η μάζα τους να έχει ελεύθερη ολίσθηση. Τα ρευστά υπό διατμητικές τάσεις παραμορφώνονται. Στα υδραυλικά συστήματα η ενέργεια μεταδίδεται από ασυμπίεστα ρευστά. Με τα υδραυλικά συστήματα η με υψηλή πίεση ροή ενός ασυμπίεστου ρευστού μέσω κατάλληλων βαλβίδων και διατάξεων όπως υδραυλικών κυλίνδρων ή κινητήρων μετασχηματίζεται σε μηχανική ενέργεια (μεταφορική κίνηση ή περιστροφή) ενός τμήματος μηχανής. Τα υδραυλικά συστήματα αποτελούνται από τη δεξαμενή υδραυλικού ρευστού, την αντλία που προσδίδει την αναγκαία πίεση στο ρευστό, τις βαλβίδες κατεύθυνσης και ελέγχου της ροής τους υδραυλικούς κυλίνδρους ή κινητήρες που μετατρέπουν την ενέργεια του ρευστού σε μηχανική ενέργεια, τις σωληνώσεις προσαγωγής και επιστροφής ρευστού και τις διατάξεις ασφάλειας του κυκλώματος. Για την μελέτη της μεταβατικής κατάστασης λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος τα διάφορα στοιχεία του μοντελοποιούνται όπως θα αναφερθεί στο υπόλοιπο αυτής της εργασίας και μελετώνται οι προκύπτουσες διαφορικές εξισώσεις. Η ανάλυση της μεταβατικής κατάστασης ενός τέτοιου συστήματος είναι χρήσιμη για τον σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου τους ώστε οι πιέσεις ή ταχύτητες των διάφορων μερών τους στην μεταβατική λειτουργία να μην εμφανίζει ανεπιθύμητες υπερακοντίσεις. Έτσι επιτυγχάνεται η αντιστάθμιση / έλεγχος ενός τέτοιου συστήματος.

## 1.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΕΥΣΤΟΥ

Η **πυκνότητα** ( $Kg / m^3$ ) εκφράζει τη μάζα του ρευστού ανά μονάδα όγκου σε μια συγκεκριμένη θέση του ρευστού. Σε περίπτωση που το ρευστό είναι ασυμπίεστο η πυκνότητα είναι σταθερή παντού. Για τον πειραματικό υπολογισμό της πυκνότητας ενός ρευστού θα πρέπει να επιλεγεί όγκος αρκετά μεγάλος, ώστε να έχει ικανοποιητικό αριθμό μορίων του ρευστού. Η πυκνότητα του ρευστού μεταβάλλεται με την πίεση  $P$  και τη θερμοκρασία  $T$  του. Το **ειδικό βάρος** ( $N / m^3$ ) εκφράζει το βάρος του ρευστού ανά μονάδα όγκου, Διαιρώντας την πυκνότητα του ρευστού με μια πυκνότητα αναφοράς σε συγκεκριμένη θερμοκρασία προκύπτει η **ειδική βαρύτητα** ρευστού, που είναι αδιάστατη

Το **ιξώδες** ενός ρευστού αποτελεί ένα μέτρο της αντίστασης στην κίνηση του σε μια επιφάνεια. Επειδή πολλές επιφάνειες κινούνται στα υδραυλικά συστήματα το ιξώδες είναι μέτρο απωλειών ροής και της επιπλέον απαιτούμενης ασκούμενης πίεσης λόγω τριβής. Το ιξώδες ενός ρευστού δηλώνει τη δυσκολία του ρευστού να υπερνικήσει την διατμητική τάση που αναπτύσσεται όταν το ρευστό κινείται σε μια στέρα επιφάνεια.

Το ιξώδες μετριέται συνήθως σε centiPoise ( *cP* ). Η διατμητική τάση εμφανίζεται επίσης όταν η επιφάνεια κινείται ενώ το υγρό είναι ακίνητο καθώς ακόμη όταν το υγρό και η επιφάνεια κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις.

Το ιξώδες των ρευστών είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Το ιξώδες μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Ο λόγος του ιξώδους προς την πυκνότητα του ρευστού αποτελεί το **κινηματικό ιξώδες** ή **κινηματική συνεκτικότητα** και εκφράζει το μέτρο της αντίστασης στη ροή ενός ρευστού κάτω από την επίδραση της βαρύτητας.

Ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις λόγω του ιξώδους σε ένα ρευστό, ονομάζεται αριθμός Reynolds και η τιμή του καθορίζει τη ροή του ρευστού. Για παράδειγμα για μικρές τιμές αυτού του αριθμού (μικρότερες του 1400) η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή ροή. Για μεγάλες τιμές αυτού του αριθμού (τιμές μεγαλύτερες του 3000) η ροή χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης ροή και υπερσχύουν οι αδρανειακές δυνάμεις. Οι αδρανειακές δυνάμεις ροής είναι αντίστοιχες της ποσότητας  $\rho d^2 u^2$  όπου  $u$  η ταχύτητα του ρευστού,  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού και  $d$  η διάμετρος του φυσικού μέσου. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω του ιξώδους του ρευστού είναι αντίστοιχες της ποσότητας  $\mu du$ , όπου  $\mu$  το ιξώδες του ρευστού. Ο αριθμός Reynolds συμβολίζεται με  $Re$  και ορίζεται ως το πηλίκο των δύο δυνάμεων. Επομένως ισχύει ότι

$$Re = ud/\nu \quad (1.2.1)$$

όπου  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του ρευστού.

### 1.3. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ

Η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων ενός υδραυλικού συστήματος γίνεται θεωρώντας διάφορες φάσεις λειτουργίας του και λαμβάνοντας για κάθε τέτοια φάση τις εξισώσεις μόνιμης ροής που την χαρακτηρίζουν. Από την μελέτη αυτών των εξισώσεων προκύπτει η διαστασιολόγηση των στοιχείων του υδραυλικού συστήματος και τα μεγέθη λειτουργίας που

το χαρακτηρίζουν. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη ροής ρευστού σε σωληνώσεις είναι οι:

Εξίσωση της συνέχειας για κάθε όγκο ελέγχου V, [1],[2]

$$\sum_{in} \rho u A = \sum_{out} \rho u A + d(\rho V)/dt \quad (1.3.1)$$

Γενικευμένη εξίσωση Bernoulli μεταξύ δύο σημείων 1 και 2 κατά τη ροή ρευστού σε μία σωλήνωση, [2]

$$p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + \rho g z_1 - \sum \frac{\lambda_k l_k \rho u_k^2}{2 d_k} - \sum \frac{\zeta_k \rho u_k^2}{2} = p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + \rho g z_2 \quad (1.3.2)$$

Όπου στην ανωτέρω εξίσωση το 1<sup>ο</sup> άθροισμα αναφέρεται σε απώλειες τριβών και εξαρτάται από τον συντελεστή λ για κάθε τμήμα σωλήνωσης κ μεταξύ των σημείων 1 και 2. Το λ εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds και την σχετική τραχύτητα της σωλήνωσης και δίνεται σε βιβλιογραφία μηχανικής ρευστών. Το 2<sup>ο</sup> άθροισμα εξαρτάται από τον συντελεστή απωλειών ζ του κάθε μεμονωμένου εξαρτήματος που παρεμβάλλεται στη ροή μεταξύ των σημείων 1 και 2 και δίνεται στη βιβλιογραφία της μηχανικής ρευστών συναρτήσει των χαρακτηριστικών του κάθε εξαρτήματος.

#### 1.4. ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Η υδραυλική αδράνεια αποτελεί στοιχείο μοντελοποίησης της σωλήνωσης ενός συστήματος και εμφανίζεται λόγω της αδράνειας που παρουσιάζει ένα ρευστό στις μεταβολές της ταχύτητας του. Αποτελεί το λόγο της διαφοράς πίεσης προς την ταχύτητα μεταβολής της ροής, [3].

Έστω μια μονοδιάστατη ροή ενός μη συμπιεστού ρευστού σε αγωγό και ένας όγκος ελέγχου V με σταθερό μήκος l , μάζα m και πυκνότητα ρ που κινείται σε έναν αγωγό με σταθερή ταχύτητα u .

Η μεταβολή της ορμής αυτού του ρευστού στον όγκο ελέγχου είναι, [3]

$$\frac{d(mu)}{dt} = \frac{dm}{dt} u + \frac{mdu}{dt} \quad (1.4.1)$$

Οι δυνάμεις που εξασκούνται στον όγκο ελέγχου είναι αποτέλεσμα των πιέσεων P στις διατομές 1 και 2 του όγκου ελέγχου και είναι, [3]

$$\sum F = P_1 A_1 - P_2 A_2 \quad (1.4.2)$$

Έστω ότι ο αγωγός είναι σταθερής διατομής. Επειδή το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο η μάζα παραμένει σταθερή οπότε οι δύο ανωτέρω εξισώσεις θεωρώντας την εξίσωση του Νεύτωνα δίνουν, [3]

$$\delta P = IdQ/dt \quad (1.4.3)$$

Με Q την παροχή όγκου του ρευστού και I την αδράνεια του ρευστού μεταξύ των θέσεων 1 και 2 που δίνεται από την εξίσωση, [3]

$$I = \rho L/A \quad (1.4.4)$$

Με ρ την πυκνότητα του ρευστού, A την διατομή του σωλήνα μεταξύ των θέσεων 1 και 2 και L το μήκος του σωλήνα μεταξύ των θέσεων 1 και 2.

## 1.5. ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Η υδραυλική χωρητικότητα αποτελεί ένα μέγεθος σχετικό με την αποθήκευση ενέργειας και χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση δεξαμενών, θαλάμων υδραυλικών κυλίνδρων κλπ. Αποτελεί το λόγο της μεταβολής του όγκου του ρευστού σε μια υδραυλική διάταξη προς την μεταβολή της πίεσης. Για να υπολογιστεί η υδραυλική χωρητικότητα είναι αναγκαίο να παραχθεί η σχέση της πίεσης με τη ροή στη συγκεκριμένη διάταξη, [3].

Εφαρμόζοντας την εξίσωση της συνέχειας (1.25) στον όγκο ελέγχου του Σχήματος 1.10 προκύπτει η εξίσωση, [3]

$$\rho Q_{net} = \frac{d(\rho_{cv}V_{cv})}{dt} \quad (1.5.1)$$

όπου ο όρος εντός της παρένθεσης είναι η μάζα  $m$  του όγκου ελέγχου και  $Q_{net}$  είναι η παροχή όγκου εισόδου μείον την παροχή όγκου εξόδου του ρευστού στον όγκο ελέγχου,  $V_{cv}$  ο όγκος ελέγχου και  $\rho_{cv}$  η πυκνότητα του ρευστού στον όγκο ελέγχου και  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού εκτός του όγκου ελέγχου..

Εάν η πυκνότητα του εισερχόμενου, εξερχόμενου και του ρευστού μέσα στον όγκο ελέγχου είναι  $\rho$  (ασυμπίεστο ρευστό) και χρησιμοποιώντας τον ορισμό του bulk modulus  $\beta$ , η ανωτέρω εξίσωση γίνεται για  $V_{cv}$  σταθερό, [3]:

$$Q = \left(\frac{V}{\beta}\right) \frac{dP_{cv}}{dt} \quad (1.5.2)$$

Όπου ο λόγος  $V/\beta = C_f$  ονομάζεται χωρητικότητα του ρευστού

## 1.6. ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Η υδραυλική αντίσταση είναι η αντίσταση που συναντά το ρευστό κατά την κίνηση του σε αγωγούς. Αποτελεί το λόγο της διαφοράς πίεσης προς την παροχή όγκου. Η υδραυλική αντίσταση εξαρτάται από τον τύπο της ροής του ρευστού. Για στρωτή ροή η σχέση της διαφοράς πίεσης με την παροχή είναι γραμμική, δηλαδή ισχύει ότι, [3]

$$\delta P = R_L Q \quad (1.6.1)$$

όπου  $R_L$  είναι η υδραυλική αντίσταση. Για τυρβώδη ροή η σχέση είναι, [3]

$$\delta P = R_t Q_{abs}(Q)$$

## 1.7. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Ως κατάσταση ενός δυναμικού συστήματος ονομάζεται το μικρότερο δυνατό σύνολο μεταβλητών (μεταβλητές κατάστασης) των οποίων η γνώση της τιμής σε μία αρχική στιγμή σε συνδυασμό με τη γνώση της εισόδου για κάθε μετέπειτα χρονική στιγμή καθορίζει πλήρως τη συμπεριφορά του συστήματος μετά την αρχική χρονική στιγμή.

Η παράσταση ενός συστήματος στο χώρο των μεταβλητών κατάστασης αποτελείται από ένα σύνολο γενικά μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων 1<sup>ης</sup> τάξης της μορφής, [8]

$$\dot{x} = f(x, u)$$

$$y = h(x, u)$$

Στην 1<sup>η</sup> εξίσωση  $x$  είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης,  $u$  είναι το διάνυσμα ελέγχου και  $f$  είναι γενικά μια μη γραμμική χρονικά μεταβλητή διανυσματική συνάρτηση. Το

$y$  είναι το διάνυσμα των μεταβλητών εξόδου και  $h$  είναι μια γενικά διανυσματική συνάρτηση των  $x$  και  $u$ .

Για ένα γραμμικό χρονικά αμετάβλητο σύστημα η μοντελοποίηση είναι, [8]:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

Με  $x(t_0)=x_0$  δεδομένο, και τις μήτρες  $A, B, C, D$  να αποτελούνται από σταθερούς όρους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2-ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ-ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

### 2.1 ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ-ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Οι υδραυλικές αντλίες είναι οι διατάξεις μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε υδραυλική ενέργεια με την αύξηση της πίεσης ορισμένης παροχής ρευστού. Οι υδραυλικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια.

Στις υδραυλικές αντλίες έχουμε μεγάλο λόγο πιέσεων και έτσι δεν χρησιμοποιούνται οι φυγόκεντρες αντλίες. Σε αυτές τις αντλίες που χρησιμοποιούνται στα υδραυλικά συστήματα [1], [2], το ρευστό που εισάγεται στην αντλία απομονώνεται με μηχανικό τρόπο από το ρευστό της εισόδου, και η μεταβολή του όγκου του γίνεται με αύξηση της πίεσης μέσω ενός περιστροφικού ή γραμμικού μηχανισμού και οδηγείται στην έξοδο παράγοντας μια σχετικά ομαλή και συνεχή ροή εξόδου. Στους υδραυλικούς κινητήρες [1], [2], το ρευστό αφού εισαχθεί στον κινητήρα προκαλεί την περιστροφή ενός μηχανικού τμήματος με αποτέλεσμα την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Τα υδραυλικά συστήματα μετατροπής ενέργειας εφαρμόζονται στον σχεδιασμό συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

### 2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ

Στις υδραυλικές αντλίες η περιστροφή του άξονα τους από έναν ηλεκτρικό κινητήρα δημιουργεί υποπίεση στην αναρρόφηση τους και έτσι γίνεται η διαρκής μεταφορά ρευστού στο εσωτερικό της αντλίας κατά τη λειτουργία της. Κατόπιν με τη συνέχεια αυτής της περιστροφής μέσω των στοιχείων της αντλίας ωθείται το ρευστό στην έξοδο της με αύξηση της πίεσης του. Οι αντλίες είτε είναι υδροδυναμικές αντλίες ή υδροστατικές αντλίες, [1], [2], [3]. Επίσης ανάλογα με την παροχή ρευστού στην έξοδο τους μπαίνουν σε δυο κατηγορίες. Στην 1<sup>η</sup> κατηγορία έχουμε τις αντλίες σταθερής παροχής ενώ στη δεύτερη κατηγορία έχουμε τις αντλίες μεταβλητής παροχής. Τέλος οι αντλίες μπορούν να μπουν σε κατηγορίες, ανάλογα με την κίνηση στο εσωτερικό τους σε περιστροφικές και σε παλινδρομικές εμβολοφόρες αντλίες.



## 2.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΙΔΑΝΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Σε μια ιδανική αντλία ή σε ιδανικό κινητήρα δεν έχουμε απώλειες ισχύος λόγω τριβών και διαρροών στα μηχανικά μέρη τους. Στις υδραυλικές αντλίες γίνεται κατανάλωση μηχανικής ενέργειας και στους υδραυλικούς κινητήρες γίνεται παραγωγή μηχανικής ενέργειας.

Η μηχανική ισχύς που παράγεται από τον ηλεκτρικό κινητήρα ή καταναλώνεται σε αυτόν ισούται με την υδραυλική ισχύ που εξέρχεται από την αντλία ή εισέρχεται στον υδραυλικό κινητήρα. Η παραγόμενη μηχανική ισχύς δίνεται από τη σχέση, [3].

$$P_i = T_i \dot{\theta}_i \quad (2.3.1)$$

όπου  $i = p$  για μια αντλία και  $i = m$  για έναν υδραυλικό κινητήρα. Η μεταβλητή  $\dot{\theta}_i$  είναι η ταχύτητα περιστροφής του άξονα του συστήματος (rad / sec) και  $T_i$  είναι η ροπή του (Nm) . Η καταναλισκόμενη υδραυλική ισχύς στον υδραυλικό κινητήρα ή η παραγόμενη στην αντλία είναι, [3]

$$P_h = P_L Q_i \quad (2.3.2)$$

όπου  $P_L$  αποτελεί τη διαφορά πίεσης στα άκρα της αντλίας ή του υδραυλικού κινητήρα (Pa) και  $Q_i$  (m<sup>3</sup> / sec) είναι η παροχή του ρευστού στην αντλία ή στον υδραυλικό κινητήρα.

Για ιδανικό υδραυλικό σύστημα (100% απόδοση), οι σχέσεις (2.3.1) και (2.3.2) δίνουν τη σχέση

$$T_i \dot{\theta}_i = P_L Q_i \quad (2.3.3)$$

Στην εξίσωση (2.3.3) η ποσότητα  $D_i = Q_i / \dot{\theta}_i$  λέγεται συντελεστής ιδανικής ογκομετρικής μετατόπισης, [3].

## 2.4 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ

Στις αντλίες η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε υδραυλική ενέργεια. Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιαστεί η μοντελοποίηση αντλιών θετικής μετατόπισης σύμφωνα με την βιβλιογραφία, [3].

Οι αντλίες θετικής μετατόπισης θεωρούνται ως πηγές ροής γιατί μετατοπίζουν το ρευστό με έμβολα, πτερύγια ή γρανάζια. Στη θεωρία συστημάτων η αντλία μοντελοποιείται ως σύστημα με είσοδο τη γωνιακή ταχύτητα  $\omega_p$  ή και τη ροπή  $T_p$  του ηλεκτρικού κινητήρα και έξοδο τη ροή του ρευστού  $Q_p$  ή και τη διαφορά πίεσης  $P_L$ .

Η παραγόμενη ροή στην έξοδο εξαρτάται από την μετατόπιση. Η διαφορά πίεσης στα άκρα της εξόδου εξαρτάται από την αντίσταση του ρευστού να κινηθεί στο υπόλοιπο υδραυλικό σύστημα.

Για ιδανικές συνθήκες, δηλαδή χωρίς να έχουμε απώλεια ρευστού, η ροή στην έξοδο μιας αντλίας σταθερής μετατόπισης, δίνεται από την εξίσωση, [3]

$$Q_{p,theor} = D_p \omega_p \quad (2.4.1)$$

όπου,  $D_p$  είναι η ογκομετρική μετατόπιση της αντλίας που μετράται σε ( $m^3 / rad$ ) και  $\omega_p$  είναι η γωνιακή ταχύτητα του άξονα του κινητήρα που μετράται σε ( $rad / sec$ ). Η ροή που εκφράζεται από την εξίσωση (2.4.1) καλείται θεωρητική ροή. Λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες, στο εσωτερικό της αντλίας η πραγματική ροή εξόδου δίνεται από τον τύπο, [3]

$$Q_{p,real} = D_p \omega_p - Q_L \quad (2.4.2)$$

όπου  $Q_L$  εκφράζει τις απώλειες ρευστού (λόγω διαρροής) στην αντλία και μετράται σε ( $m^3 / sec$ ). Αν η ροή απωλειών  $Q_L$  θεωρηθεί ως στρωτή ροή ρευστού τότε είναι ανάλογη της διαφοράς πίεσης που αναπτύσσεται στην έξοδο της αντλίας, δηλαδή, ισχύει ότι, [3]

$$Q_L = K_L P_L \quad (2.4.3)$$

όπου  $P_L$  είναι η διαφορά πίεσης στην έξοδο της αντλίας και μετράται σε Pa όπου  $K_L$  είναι ο συντελεστής διαρροής και μετράται σε ( $m^2 / sec / N$ ). Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2.4.2) και (2.4.3) η πραγματική παροχή εξόδου της αντλίας δίνεται από τη σχέση, [3]

$$Q_{p,real} = D_p \omega_p - K_L P_L \quad (2.4.4)$$

Ο λόγος της πραγματικής παροχής προς τη θεωρητική παροχή καλείται συντελεστής απόδοσης της ροής της αντλίας και ορίζεται σαν, [3]

$$n_{vol} = \frac{Q_{p,real}}{Q_{p,theor}} \quad (2.4.5)$$

Η εξίσωση που σχετίζει τη ροπή του ηλεκτρικού κινητήρα με την παραγόμενη θεωρητική παροχή είναι η ακόλουθη, [3]

$$T_{p,theor} = D_p P_L \quad (2.4.6)$$

Αν έχουμε μηχανικές απώλειες εσωτερικά στον κινητήρα η ροπή που προσφέρεται στη αντλία είναι μεγαλύτερη από την ιδανική θεωρητική ροπή και δίνεται από την εξίσωση, [3]

$$T_{p,real} = D_p P_L + T_{LOSS} \quad (2.4.7)$$

όπου  $T_{LOSS}$  η ροπή που αντιστοιχεί σε τριβές στα μηχανικά μέρη του κινητήρα. Στην περίπτωση που οι τριβές είναι τριβές απόσβεσης σε σχέση με τις στροφές του ηλεκτρικού κινητήρα η ροπή  $T_{LOSS}$  δίνεται από την εξίσωση, [3]

$$T_{LOSS} = b\omega_p \quad (2.4.8)$$

όπου  $b$  (Nmsec/ rad) αποτελεί το συντελεστή απόσβεσης. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.4.7) και (2.4.8) η πραγματική απαιτούμενη ροπή του άξονα του κινητήρα είναι, [3]

$$T_{p,real} = D_p P_L + b\omega_p \quad (2.4.9)$$

Οι διαφορές μεταξύ της πραγματικής και της θεωρητικής ροπής δίνονται με τον συντελεστή απόδοσης της ροπής που ορίζεται από την εξίσωση, [3]

$$n_{torque} = \frac{T_{p,theor}}{T_{p,real}} \quad (2.4.10)$$

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της αντλίας ορίζεται ως λόγος της ισχύος εξόδου προς την ισχύ της εισόδου σύμφωνα με την εξίσωση, [3]

$$n_{tot} = n_{vol} n_{torque} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.4.11)$$

## 2.5 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΤΛΙΑΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Οι αντλίες οδοντωτών τροχών ή γραναζωτές αντλίες αποτελούνται από δυο γρανάκια τα οποία κινούνται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Το ρευστό οδηγείται από την είσοδο της αντλίας στη διάταξη των δυο γραναζιών μεταξύ των κοιλοτήτων τους. Με την κίνηση των γραναζιών το ρευστό κινείται στην κοιλότητα της αντλίας και οδηγείται στην έξοδο της. Αν

στην έξοδο της αντλίας υπάρχει φορτίο τότε έχουμε μια επιπλέον πίεση που αυξάνει τη μηχανική τριβή ελαττώνοντας την απόδοση της αντλίας.

Η μετατόπιση του όγκου του ρευστού ανά περιστροφή των γραναζιών, συμβολίζεται ως  $V_D$ , μετράται σε ( $m^3 / rev$ ) και δίνεται από την εξίσωση, [3]

$$V_D = \frac{\pi}{4} (D_o^2 - D_i^2) L \quad (2.5.1)$$

με  $D_o$  την εξωτερική διάμετρο του δοντιού των γραναζιών,  $D_i$  την εσωτερική διάμετρο του δοντιού των γραναζιών και  $L$  το μήκος των δοντιών των γραναζιών. Η ροή εξόδου της αντλίας δίνεται από την εξίσωση, [3]

$$Q_p = V_D N \quad (2.5.2)$$

όπου  $N$  ο αριθμός στροφών του κινητήρα ανά λεπτό

## 2.6 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΤΕΡΥΓΩΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ

Η αντλία αποτελείται από μια έκκεντρη επιφάνεια και έναν ρότορα. Ο ρότορας έχει σχισμές στις οποίες μπορεί να ολισθαίνουν τα πτερύγια τα οποία λόγω της φυγόκεντρης δύναμης που αναπτύσσεται με την περιστροφή του κινούνται προς την εξωτερική επιφάνεια του έκκεντρου. Κατά τη διάρκεια της περιστροφής, στο χώρο που περικλείεται από τα πτερύγια, δημιουργείται κενό στο οποίο υπάρχει ρευστό. Καθώς ο χώρος που περικλείεται μειώνεται, το υγρό ωθείται με αύξηση της πίεσης του στην έξοδο της αντλίας διαμέσου των θυρίδων εκκενώσεως.

Ο μετατοπισμένος όγκος του ρευστού ανά στροφή του ρότορα δίνεται από την εξίσωση, [3]

$$V_D = \frac{\pi}{2} (D_c + D_r) e L \quad (2.6.1)$$

Με  $D_c$  τη διάμετρο του έκκεντρου δακτυλίου,  $D_r$  τη διάμετρος του ρότορα,  $L$  το μήκος των πτερυγίων και  $e$  την εκκεντρότητα της διάταξης.

Η ροή του ρευστού στην έξοδό της αντλίας δίνεται από τον τύπο

$$Q_p = V_D N \quad (2.6.2)$$

όπου  $N$  ο αριθμός στροφών του κινητήρα ανά λεπτό.

## 2.7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Οι υδραυλικοί κινητήρες μετατρέπουν την υδραυλική ισχύ σε περιστροφική ισχύ ή μετατρέπουν υδραυλική πίεση σε μηχανική ροπή. Από την θεωρία συστημάτων ο υδραυλικός κινητήρας θεωρείται ως σύστημα με είσοδο τη ροή ρευστού ή και τη διαφορά πίεσης και έξοδο τη γωνιακή ταχύτητα ή και τη ροπή του κινητήρα., [3]

Η θεωρητική ροπή στην έξοδο του κινητήρα δίνεται από την εξίσωση, [3]

$$T_{m,theor} = D_m P_m \quad (2.7.1)$$

όπου  $P_m$  είναι η διαφορά πίεσης στην είσοδο του υδραυλικού κινητήρα ( $N / m^2$ ), και  $D_m$  είναι η ογκομετρική μετατόπιση του κινητήρα ( $m^3 / rad$ ). Θεωρώντας τις απώλειες λόγω τριβής στα μηχανικά μέρη του κινητήρα η πραγματική ροπή στην έξοδο του κινητήρα είναι, [3]:

$$T_{m,theor} = D_m P_m - T_{LOSS} = n_m D_m P_m \quad (2.7.2)$$

όπου  $T_{LOSS}$  είναι η ροπή απωλειών και  $n_m$  είναι ο συντελεστής μηχανικής απόδοσης του κινητήρα. Η γωνιακή ταχύτητα του άξονα του κινητήρα δίνεται από την εξίσωση, [3]:

$$\omega_{m,real} = \frac{Q_m - Q_L}{D_m} \quad (2.7.3)$$

όπου  $Q_m$  είναι η ροή εισόδου και  $Q_L$  είναι η ροή απωλειών.

Ο συνολικός συντελεστής απόδοσης του υδραυλικού κινητήρα δίνεται από τη σχέση, [3]

$$n_{m,real} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T_{m,real} \omega_{m,real}}{P_m (Q_m - Q_L)} \quad (2.7.4)$$

όπου  $P_{in}$  είναι η υδραυλική ισχύς που μεταφέρεται στον κινητήρα και  $P_{out}$  είναι η μηχανική ισχύς που παράγεται από τον κινητήρα.

## 2.8 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΘΕΤΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ

Οι υδραυλικοί κινητήρες θετικής μετατόπισης αποτελούνται από ένα μηχανικό τμήμα (γρανάζι, έμβολο, περύγιο) στο οποίο δρα το ρευστό και μέσω ενός δεύτερου μηχανικού τμήματος (μηχανισμός μετάδοσης) η ροή μετατρέπεται σε ροπή ή δύναμη. Ο μηχανισμός μετάδοσης είναι περιστροφικός. Η ακτίνα στροφέα καλείται ακτίνα μετάδοσης.

Για υδραυλικό κινητήρα σταθερής μετατόπισης δύο εμβόλων εάν η ροή βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση, οι εξισώσεις συνέχειας στα κανάλια ροής δίνουν, [3]

$$Q_1 - Q_{\varepsilon\delta} - Q_{\delta 1} - Q_m = 0 \quad (2.8.1)$$

$$Q_L + Q_{\varepsilon\delta} - Q_{\delta 2} - Q_2 = 0 \quad (2.8.2)$$

όπου  $Q_1$  είναι η ροή εισόδου,  $Q_2$  είναι η ροή εξόδου,  $Q_m$  είναι η ροή που καταναλώνεται ή παράγεται στον κινητήρα,  $Q_{\varepsilon\delta}$  είναι η εσωτερική διαρροή του ρευστού,  $Q_{\delta 1}$  είναι η εξωτερική διαρροή του εμβόλου 1 και  $Q_{\delta 2}$  είναι η εξωτερική διαρροή του εμβόλου 2.

Η εσωτερική διαρροή  $Q_{\varepsilon\delta}$  είναι ανάλογη της διαφοράς πίεσης μεταξύ των δυο καναλιών ροής και δίνεται από την εξίσωση, [3]

$$Q_{\varepsilon\delta} = C_{\varepsilon\delta} P_L \quad (2.8.3)$$

όπου  $P_L = P_1 - P_2$ . Ο συντελεστής  $C_{\varepsilon\delta}$  συμβολίζει τον συντελεστή εσωτερικής διαρροής στο κανάλι εισόδου του κινητήρα ( $m^3/Pa/sec$ ).

Οι εξωτερικές διαρροές των εμβόλων 1 και 2 είναι ανάλογες της πίεσης που ασκείται στα δυο έμβολα, και δίνονται από τους ακόλουθους τύπους, [3]

$$Q_{\delta 1} = C_{\delta} P_1 \quad (2.8.4)$$

$$Q_{\delta 2} = C_{\delta} P_2 \quad (2.8.5)$$

όπου  $C_{\delta}$  τον συντελεστή εξωτερικής διαρροής στους εσωτερικούς υδραυλικούς κυλίνδρους του κινητήρα που μετράται σε  $m^3/Pa/sec$ .

Η παροχή που καταναλώνεται ή παράγεται στον κινητήρα δίνεται από τον τύπο, [3]

$$Q_m = D_m \dot{\theta}_m \quad (2.8.6)$$

όπου  $D_m$  είναι ο συντελεστής της ιδανικής ογκομετρικής μετατόπισης του κινητήρα και μετράται σε m/rad όπου  $\dot{\theta}_m$  είναι η ταχύτητα περιστροφής του άξονα του κινητήρα και μετράται σε rad/sec.

Με κατάλληλη άλγεβρα οι ανωτέρω εξισώσεις δίνουν τα ακόλουθα, [3]

$$Q_1 - C_{\varepsilon\delta}(P_1 - P_2) - C_\delta P_1 - D_m \dot{\theta}_m = 0 \quad (2.8.7)$$

$$D_m \dot{\theta}_m + C_{\varepsilon\delta}(P_1 - P_2) - C_\delta P_2 - Q_2 = 0 \quad (2.8.8)$$

Αφαιρώντας τις ανωτέρω δύο εξισώσεις προκύπτει η συνολική εξίσωση που εκφράζει τη σχέση της ροής και της διαφοράς πίεσης με την ταχύτητα περιστροφής του άξονα του κινητήρα, [3]:

$$\frac{Q_1 + Q_2}{2} + \left(\frac{C_\delta}{2} + C_{\varepsilon\delta}\right) P_L = D_m \dot{\theta}_m \quad (2.8.9)$$

Η ποσότητα  $(Q_1 + Q_2)/2$  συμβολίζεται με  $Q_L$  και ονομάζεται ροή φορτίου. Άρα η σχέση (2.8.9) γράφεται ως εξής, [3]:

$$Q_L + \left(\frac{C_\delta}{2} + C_{\varepsilon\delta}\right) P_L = D_m \dot{\theta}_m \quad (2.8.10)$$

Λαμβάνοντας το ισοζύγιο ροπών στον άξονα του κινητήρα παίρνουμε, [3]

$$T_L = T_m - T_d - T_f \quad (2.8.11)$$

όπου  $T_m = D_m P_L$  είναι η ιδανική ροπή που παράγεται από την κίνηση του ρευστού,  $T_d = B_m \dot{\theta}_m$  είναι η ροπή απόσβεσης στον κινητήρα λόγω των μηχανικών τμημάτων του κινητήρα (με  $B_m$  συμβολίζεται ο συντελεστής απόσβεσης),  $T_f$  είναι η ροπή τριβής που παράγεται από την κίνηση των εμβόλων στους κυλίνδρους και την κίνηση άλλων μηχανικών μερών του κινητήρα. Η ροπή αυτή είναι ανάλογη της πίεσης που εφαρμόζεται στα έμβολα και της γωνιακής ταχύτητας της αντλίας-κινητήρα και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση, [3]

$$T_f = \frac{\dot{\theta}_m}{|\dot{\theta}_m|} C_f D_m (P_1 + P_2) \quad (2.8.12)$$

όπου  $C_f$  είναι ο συντελεστής εσωτερικής τριβής που είναι αδιάστατο μέγεθος. Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις των ροπών υπολογίζεται η συνολική ροπή που εξασκείται στον κινητήρα, [3]

$$T_L = D_m P_L - B_m \dot{\theta}_m - \frac{\dot{\theta}_m}{|\dot{\theta}_m|} C_f D_m (P_1 + P_2) \quad (2.8.13)$$

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του κινητήρα είναι ο λόγος της εξερχόμενης ισχύος προς την εισερχόμενη ισχύ. Άρα για έναν υδραυλικό κινητήρα ο συνολικός βαθμός απόδοσης δίνεται από την εξίσωση, [3]

$$n_m = \frac{T_L \dot{\theta}_m}{Q_1 P_L} \quad (2.8.14)$$

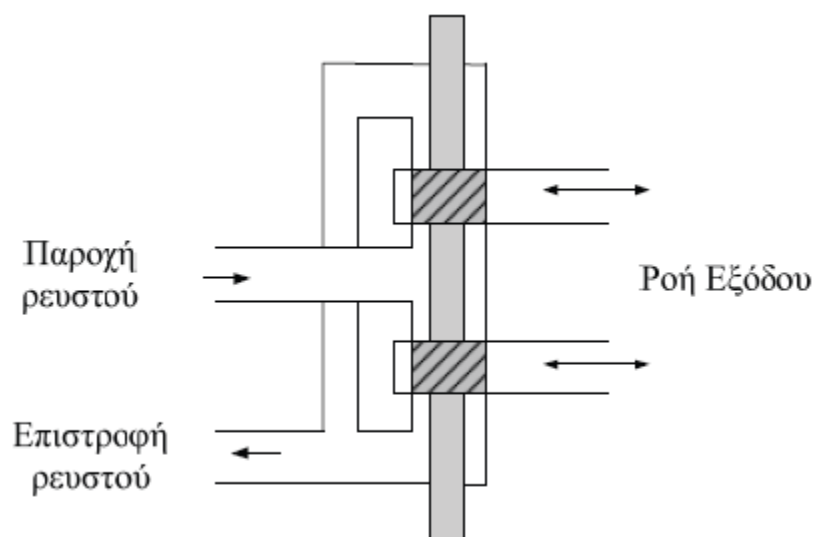


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3-ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΡΟΗΣ

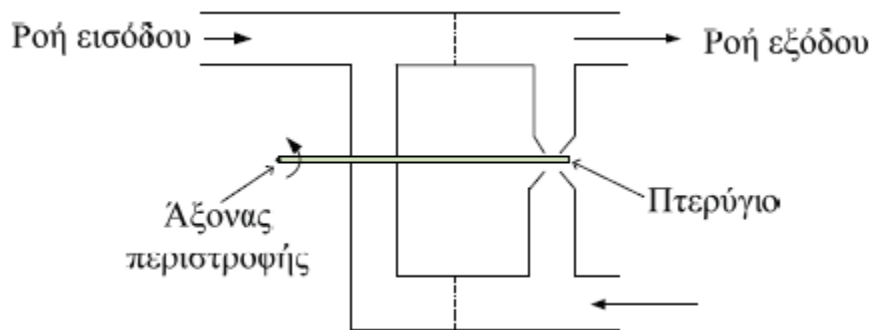
### 3.1 ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΡΟΗΣ

Οι υδραυλικές βαλβίδες ρυθμίζουν και ελέγχουν την ροή του ρευστού σε υδραυλικά κυκλώματα που συνδέονται με την έξοδο της βαλβίδας. Οι υδραυλικές βαλβίδες αποτελούνται από ένα σταθερό μέρος και ένα κινητό μηχανικό μέρος που κατευθύνει την ροή στα κανάλια εξόδου της βαλβίδας. Η κίνηση του μηχανικού μέρους μπορεί να γίνει με χειροκίνητο, μηχανικό, υδραυλικό και ηλεκτρικό τρόπο [1]-[2]-[3].

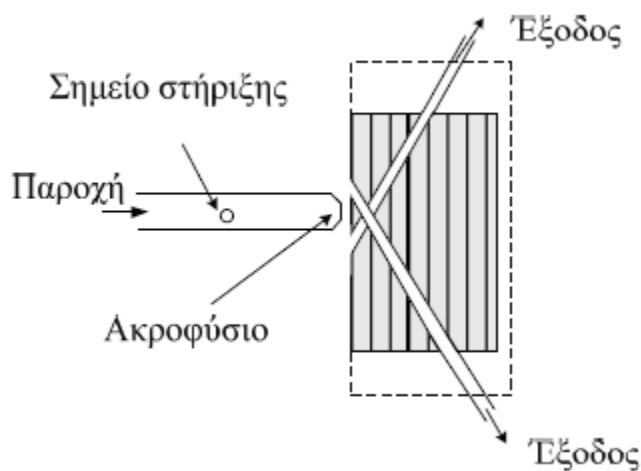
Οι βαλβίδες διακρίνονται σύμφωνα με τον τρόπο ρύθμισης της ροής: σε βαλβίδες τύπου εμβόλου, βαλβίδες τύπου περυγίου ακροφυσίου και βαλβίδες τύπου τζετ-ακροφυσίου. Στις βαλβίδες τύπου εμβόλου η ρύθμιση της ροής επιτυγχάνεται με την κίνηση ενός εμβόλου που επιτρέπει τη διόδο ή τη διακοπή του ρευστού από τα στόμια της βαλβίδας. Οι βαλβίδες τύπου περυγίου ακροφυσίου στηρίζονται στην αρχή της μεταβαλλόμενης διαρροής που επιτυγχάνεται με την κίνηση ενός περυγίου. Οι βαλβίδες τύπου τζετ-ακροφυσίου αποτελούνται από ένα ακροφύσιο που μπορεί να περιστραφεί γύρω από ένα σταθερό σημείο και διοχετεύει τα δύο κανάλια ροής με ρευστό σε μεγάλη πίεση. Η περιστροφή του ακροφυσίου κατευθύνει το ρευστό στα δύο κανάλια ροής.



### ΣΧΗΜΑ 3.1.1: ΒΑΛΒΙΔΑ ΕΜΒΟΛΟΥ



### ΣΧΗΜΑ 3.1.2: ΒΑΛΒΙΔΑ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ-ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ



### ΣΧΗΜΑ 3.1.3: ΒΑΛΒΙΔΑ ΤΖΕΤ-ΑΚΡΟΦΥΣΙΟΥ

## **3.2Η ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΒΑΛΒΙΔΩΝ**

Οι υδραυλικές βαλβίδες διακρίνονται και με βάση τη λειτουργία τους σε ένα υδραυλικό σύστημα. Οι βασικές βαλβίδες για τον έλεγχο της ροής σε ένα υδραυλικό κύλινδρο είναι οι βαλβίδες κατεύθυνσης - οδήγησης οι οποίες με κατάλληλη υδραυλική ή μηχανική ή ηλεκτρική ενεργοποίηση καθορίζουν τον δρόμο της ροής προς ένα υδραυλικό κύλινδρο. Οι βαλβίδες ελέγχου πίεσης προστατεύουν τα υδραυλικά συστήματα που συνδέονται με τη βαλβίδα από υπερπίεσεις που μπορεί να δημιουργηθούν κατά το άνοιγμα ή κλείσιμο των διόδων των βαλβίδων καθώς επίσης και κατά την αύξηση των απαιτήσεων σε ρευστό. Οι βαλβίδες ελέγχου ροής χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση της ροής σε ένα υδραυλικό σύστημα ή την αλλαγή της ταχύτητας του ρευστού στα διάφορα υποσυστήματα ενός υδραυλικού συστήματος.

### 3.3 ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ

Οι βαλβίδες κατεύθυνσης διακρίνονται με βάση την λειτουργία τους σε βαλβίδες αντεπιστροφής μονής ή διπλής κατεύθυνσης και βαλβίδες δυο ή τριών ή τεσσάρων συνδέσεων.

Οι βαλβίδες αντεπιστροφής επιτρέπουν τη ροή του ρευστού προς μια κατεύθυνση. Στις οδηγούμενες βαλβίδες αντεπιστροφής η ροή επιτρέπεται και προς την άλλη κατεύθυνση με κατάλληλη ηλεκτρική ή μηχανική ή υδραυλική ενεργοποίηση. Η λειτουργία τους βασίζεται στην ύπαρξη ενός ελατηρίου με μικρή σταθερά σκληρότητας που συγκρατεί μια σφαίρα και επιτρέπει την είσοδο του ρευστού. Μια μικρή πίεση στην είσοδο της βαλβίδας κρατάει το ελατήριο συμπιεσμένο με αποτέλεσμα η ροή να εισέρχεται από την είσοδο και να οδηγείται στην έξοδο της βαλβίδας. Σε περίπτωση που το ρευστό έρχεται από την αντίθετη κατεύθυνση η σφαίρα πιέζεται και κλείνει την είσοδο στο κανάλι ροής με αποτέλεσμα το ρευστό να μην μπορεί να διέλθει.

Σε μία βαλβίδα αντεπιστροφής δυο κατευθύνσεων όταν η πίεση  $P_1$  είναι μεγαλύτερη από την πίεση  $P_2$  η σφαίρα φράζει την είσοδο του ρευστού στην είσοδο 2 και επιτρέπει την ροή από την είσοδο 1 προς την έξοδο A. Στην περίπτωση που η πίεση  $P_2$  είναι μεγαλύτερη από την πίεση  $P_1$  η σφαίρα φράζει την ροή του ρευστού στην είσοδο 1 και επιτρέπει την ροή από την είσοδο 2 προς την έξοδο A.

Οι βαλβίδες οδήγησης δυο συνδέσεων-δυο καταστάσεων (2/2) διακρίνονται σε βαλβίδες κανονικά κλειστές και βαλβίδες κανονικά ανοικτές. Οι δυο καταστάσεις λειτουργίας μιας βαλβίδας κανονικά κλειστής είναι ως εξής. Στην αρχική κατάσταση λειτουργίας το έμβολο κλείνει την επαφή A και το ρευστό δεν προχωρά προς την έξοδο. Αν πατηθεί ο διακόπτης ενεργοποίησης το έμβολο της βαλβίδας κινείται προς τα αριστερά και ελευθερώνει την επαφή A. Έτσι, η ροή του ρευστού ρέει ελεύθερα από το σημείο P προς την έξοδο A.

Οι δυο καταστάσεις μιας βαλβίδας κανονικά ανοικτής είναι ως εξής. Στην αρχική κατάσταση λειτουργίας η παροχή του ρευστού από το σημείο P οδηγείται στην έξοδο A. Αν πατηθεί ο διακόπτης ενεργοποίησης το έμβολο της βαλβίδας κινείται προς τα αριστερά και φράζει την είσοδο A με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ροή στην έξοδο της βαλβίδας.

Για την κατανόηση της λειτουργίας των βαλβίδων οδήγησης 3/2 θα χρησιμοποιηθεί η υδραυλική βαλβίδα που έχει τρεις συνδέσεις με υδραυλικά σήματα και δυο θέσεις λειτουργίας. Για το λόγο αυτό χαρακτηρίζεται ως βαλβίδα οδήγησης 3/2. Η ενεργοποίηση της βαλβίδας δηλαδή η αλλαγή της λειτουργίας της από την αρχική θέση μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι η ενεργοποίηση από τον χρήστη με μηχανικούς διακόπτες μόνιμης ή στιγμιαίας ενεργοποίησης. Ο δεύτερος τρόπος είναι η ενεργοποίηση με υδραυλικό σήμα, δηλαδή εξασκώντας πίεση στα άκρα της βαλβίδας. Ο τρίτος τρόπος είναι η μηχανική ενεργοποίηση με μοχλό.

Η παροχή του ρευστού σε αυτή τη βαλβίδα γίνεται από μία θέση P και η εκτόνωση του ρευστού (σύνδεση με τη δεξαμενή ρευστού) γίνεται από την θέση R . Το ρευστό ρέει μέσω των καναλιών ροής. Η έξοδος της βαλβίδας είναι η θέση A. Η θέση λειτουργίας A είναι η αρχική θέση ενώ η θέση λειτουργίας B είναι η θέση λειτουργίας της βαλβίδας αφού ενεργοποιηθεί με μηχανικό ή υδραυλικό τρόπο το σήμα .

### **3.4 ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΙΕΣΗΣ**

Οι βαλβίδες ελέγχου πίεσης περιορίζουν την πίεση στα υδραυλικά συστήματα παρέχοντας μια δίοδο διαφυγής του ρευστού προς τη δεξαμενή. Οι βαλβίδες αυτές προστατεύουν τα υδραυλικά συστήματα από την υπερπίεση που μπορεί να ασκηθεί σε αυτά από την παροχή της αντλίας. Οι κυρίως χρησιμοποιούμενες βαλβίδες ελέγχου πίεσης στη βιομηχανία είναι η βαλβίδες αποφόρτισης. Όταν η πίεση στα άκρα της βαλβίδας φτάσει σε μια τιμή που καθορίζεται από την συσπείρωση ενός ελατηρίου, η ροή από την αντλία επιστρέφει μέσω της εκτόνωσης της βαλβίδας στη δεξαμενή με αποτέλεσμα το κύκλωμα να αποφορτίζεται.

### **3.5 ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΟΗΣ (ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ)**

Οι βαλβίδες ρύθμισης παροχής χρησιμοποιούνται για την ρύθμιση της παροχής στα υδραυλικά συστήματα ενέργειας, δηλαδή σε υδραυλικούς κινητήρες, υδραυλικά έμβολα και σε συστήματα αποθήκευσης υδραυλικής ισχύος. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε υδραυλικά συστήματα με σταθερή πίεση και ομαλή ροή. Η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή ότι η

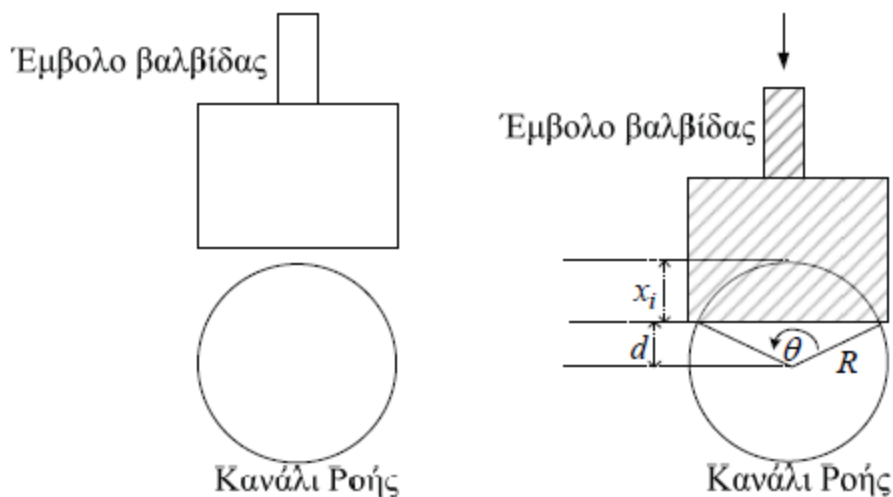
ροή του ρευστού από ένα στόμιο παραμένει σταθερή όσο η διαφορά πίεσης στα άκρα του παραμένει σταθερή. Καθώς μεταβάλλεται η ανοικτή επιφάνεια του στομίου που διέρχεται το ρευστό μεταβάλλεται αντίστοιχα και η πίεση στα άκρα του στομίου. Έτσι σε συνδυασμό με μια βαλβίδα ανακούφισης μπορεί να ρυθμιστεί η παροχή στα συστήματα ενέργειας.

Όταν είναι αναγκαίο η παροχή να ρυθμίζεται μόνο προς μια κατεύθυνση η βαλβίδα ρύθμισης παροχής χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μια βαλβίδα μονής κατεύθυνσης

Όταν το ρευστό εισέρχεται από αριστερά οδηγείται στην έξοδο μέσω του ρυθμιζόμενου καναλιού. Όταν εισέρχεται από τα δεξιά ακολουθεί τον κανάλι χωρίς αντίσταση και οδηγείται στην έξοδο χωρίς ρύθμιση.

### 3.6 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΥΔΡΑΥΛΙΚΕΣ ΒΑΛΒΙΔΕΣ

Ένα υδραυλικό σύστημα ελέγχου αποτελείται αρχικά από μια βαλβίδα ρύθμισης ροής του ρευστού η οποία επιτρέπει την ροή του ρευστού σε ένα κανάλι ροής. Η διαδικασία με την οποία ελέγχεται η ροή του ρευστού από την βαλβίδα σε ένα κανάλι ροής παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



ΣΧΗΜΑ 3.6.1: ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΗΣ ΡΕΥΣΤΟΥ ΣΕ ΒΑΛΒΙΔΑ

Το εμβαδό της επιφάνειας  $C_s(x_i(t))$  που καλύπτεται, όταν το έμβολο της βαλβίδας μετακινηθεί κατά απόσταση  $x_i(t)$  μέσα στο κανάλι ροής, δίνεται από τη σχέση

$$C_s(x_i(t)) = \frac{R^2}{2} (\theta(t) - \sin(\theta(t))) \quad (3.6.1)$$

όπου η γωνία  $\theta(t)$  μετράται σε rad και όπου R συμβολίζεται η ακτίνα του καναλιού ροής. Από τη γεωμετρία του σχήματος ισχύει ότι

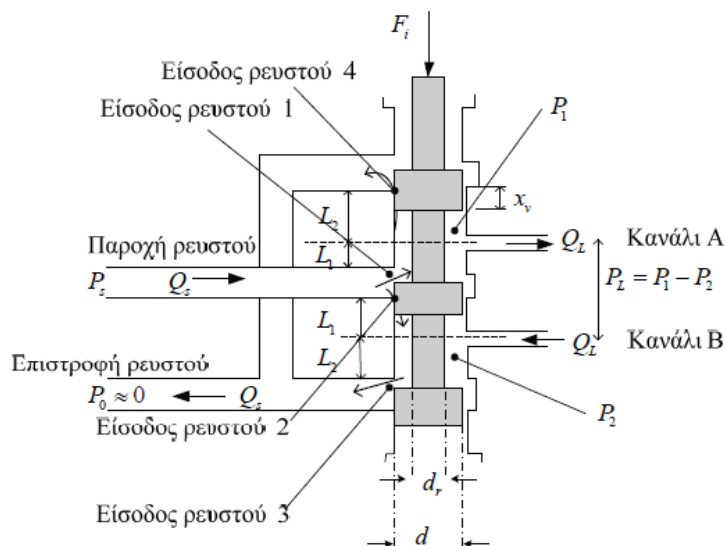
$$\theta(t) = 2 \arccos \frac{d(t)}{R} \text{ και } d(t) = R - x_i(t) \quad (3.6.2)$$

Σύμφωνα με τη σχέση που εκφράζει το εμβαδό του τόξου που είναι καλυμμένο, συμπεραίνεται ότι το υπόλοιπο εμβαδό που μένει ελεύθερο δίνεται από τη σχέση

$$A_s(x_i(t)) = \pi R^2 - \frac{R^2}{2} \left( 2 \arccos \left( \frac{R-x_i(t)}{R} \right) - \sin \left( 2 \arccos \left( \frac{R-x_i(t)}{R} \right) \right) \right) \quad (3.6.3)$$

### 3.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΛΒΙΔΑΣ ΤΥΠΟΥ ΕΜΒΟΛΟΥ

Θεωρούμε τη βαλβίδα τεσσάρων δρόμων που παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Τα βέλη στις εισόδους του ρευστού 1-4 συμβολίζουν την κίνηση του ρευστού από την παροχή και προς την εκτόνωση. Η δύναμη  $F_i$  μετακινεί το έμβολο της βαλβίδας. Η μετατόπιση του εμβόλου συμβολίζεται με  $x_v$ . Η θέση του εμβόλου καθορίζει την ποσότητα του ρευστού που θα οδηγηθεί από την παροχή στο κανάλι A ή στο κανάλι B. Εάν η θέση του εμβόλου είναι όπως στο επόμενο σχήμα τότε η ροή εισόδου Q θα περάσει από την είσοδο 1 προς το κανάλι A. Η επιστροφή του ρευστού γίνεται από το κανάλι B μέσω της εισόδου 3.



ΣΧΗΜΑ 3.7.1: ΣΧΗΜΑ ΒΑΛΒΙΔΑΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΡΟΗΣ

Για τη μαθηματική περιγραφή της παραπάνω συμμετρικής βαλβίδας θεωρείται ότι το ρευστό είναι ασυμπίεστο και ότι η βαλβίδα λειτουργεί σε κατάσταση ισορροπίας (μόνιμη κατάσταση). Η εξίσωση της συνέχειας για το κανάλι A είναι η ακόλουθη

$$Q_L = Q_1 - Q_4 \quad (3.7.1)$$

όπου  $Q_L$  είναι η ροή (παροχή όγκου ρευστού) που οδηγείται στο κανάλι A,  $Q_1$  είναι η ροή που εισέρχεται από την είσοδο 1 και  $Q_4$  είναι η ροή που εξέρχεται στην είσοδο 4. Ομοίως για το κανάλι B ισχύει η εξίσωση

$$Q_L = Q_3 - Q_2 \quad (3.7.2)$$

όπου  $Q_L$  είναι η ροή που εισέρχεται από το κανάλι B στην βαλβίδα,  $Q_3$  είναι η ροή που εξέρχεται στην είσοδο 3 και  $Q_2$  είναι η ροή που εισέρχεται στην είσοδο 2.

Η διαφορά πίεσης  $P_L$  στα άκρα των δυο καναλιών εξόδου της βαλβίδας είναι η ακόλουθη

$$P_L = P_1 - P_2 \quad (3.7.3)$$

όπου  $P_1$  είναι η πίεση στην είσοδο του καναλιού A και  $P_2$  είναι η πίεση στην είσοδο του καναλιού B.

Η ροή στις εισόδους 1-4 (στόμια) της βαλβίδας δίνεται από τους ακόλουθους τύπους, [3]

$$Q_1 = C_d A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_S - P_1)}$$

$$Q_2 = C_d A_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_S - P_2)}$$

$$Q_3 = C_d A_3 \sqrt{\frac{2}{\rho} P_2}$$

$$Q_4 = C_d A_4 \sqrt{\frac{2}{\rho} P_1}$$

$$(3.7.4)$$

Όπου  $A_1 - A_4$  είναι η ανοικτή επιφάνεια των εισόδων 1-4,  $C_d$  είναι ο συντελεστής εκφόρτισης και  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού. Οι επιφάνειες  $A_1 - A_4$  είναι μη γραμμικές συναρτήσεις της μετατόπισης  $x_v$  του εμβόλου της βαλβίδας, δηλαδή ισχύει ότι, [3]

$$A_1 = A_1(x_v), A_2 = A_2(-x_v), A_3 = A_3(x_v), A_4 = A_4(-x_v) \quad (3.7.5)$$

Θεωρώντας ότι η βαλβίδα είναι συμμετρική, δηλαδή ότι ισχύει

$$A_1(x_v) = A_2(-x_v), A_3(x_v) = A_4(-x_v) \quad (3.7.6)$$

και ότι η βαλβίδα είναι σε αντιστοιχία, δηλαδή ότι ισχύει

$$A_1(x_v) = A_3(x_v), A_2(-x_v) = A_4(-x_v) \quad (3.7.7)$$

τότε ισχύει ότι

$$Q_1 = Q_3 \quad (3.7.8)$$

$$Q_2 = Q_4 \quad (3.7.9)$$

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι

$$P_S = P_1 + P_2 \quad (3.7.10)$$

Επειδή, ισχύει ότι

$$P_L = P_1 - P_2 \quad (3.7.11)$$

προκύπτουν οι ακόλουθες δυο σχέσεις των πιέσεων στο εσωτερικό της βαλβίδας σε σχέση με τις πιέσεις στην είσοδο και στην έξοδο της βαλβίδας

$$P_1 = \frac{P_S + P_L}{2}$$

$$P_2 = \frac{P_S - P_L}{2}$$

(3.7.12)

Σύμφωνα με το Σχήμα ισχύει ότι

$$Q_S = Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$$

$$Q_L = Q_1 - Q_4 = Q_3 - Q_2$$

(3.7.13)

Συνδυάζοντας τις ανωτέρω σχέσεις με τις σχέσεις προκύπτουν οι ακόλουθες μη γραμμικές σχέσεις της ροής εισόδου και εξόδου στην βαλβίδα, [3]

$$Q_L = C_d A_1 \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_S - P_L)} - C_d A_2 \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_S + P_L)}$$



$$Q_S = C_d A_1 \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_S - P_L)} + C_d A_2 \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_S + P_L)}$$

(3.7.14)

Για ιδανικές συμμετρικές βαλβίδες σε αντιστοιχία, ισχύει ότι: α) για θετική μετατόπιση  $x_v$  του εμβόλου της βαλβίδας οι ροές στις εισόδους 2 και 4 μηδενίζονται, δηλαδή  $Q_2 = Q_4 = 0$  και β) για αρνητική μετατόπιση  $x_v$  ότι οι ροές στις εισόδους 1 και 3 είναι μηδέν, δηλαδή  $Q_1 = Q_3 = 0$ . Με βάση αυτές τις σχέσεις λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση, [3]

$$Q_L = C_d |A_1| \frac{x_v}{|x_v|} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left( P_S - \frac{x_v}{|x_v|} P_L \right)}$$

(3.7.15)

Αν θεωρηθεί ότι τα στόμια της βαλβίδας είναι ορθογώνιου σχήματος ώστε να ισχύει ότι  $A_1 = \lambda x_v$  τότε η ροή  $Q_L$  λαμβάνει τη μορφή, [3]

$$Q_L = C_d \lambda x_v \sqrt{\frac{1}{\rho} \left( P_S - \frac{x_v}{|x_v|} P_L \right)}$$

(3.7.16)

Έστω το σημείο λειτουργίας  $(Q_{L,0}, P_{L,0}, x_{v,0})$  της ροής, της πίεσης και της μετατόπισης της βαλβίδας. Οι μεταβολές της ροής, της πίεσης και της μετατόπισης της βαλβίδας ως προς το σημείο λειτουργίας ορίζονται ως ακολούθως, [3]

$$\begin{aligned} \Delta Q_L &= Q_L - Q_{L,0} \\ \Delta P_L &= P_L - P_{L,0} \\ \Delta x_v &= x_v - x_{v,0} \end{aligned}$$

(3.7.17)

Η ανάπτυξη σε σειρά Taylor της ροής γύρω από το σημείο λειτουργίας  $Q_{L,0}$  είναι η ακόλουθη, [3]

$$Q_L = Q_{L,0} + \left. \frac{\partial Q_L}{\partial x_v} \right|_0 \Delta x_v + \left. \frac{\partial Q_L}{\partial P_L} \right|_0 \Delta P_L$$

(3.7.18)

Προσεγγίζοντας τη σειρά με τους πρώτους όρους της ανάπτυξης προκύπτει ο τύπος, [3]

$$\Delta Q_L = K_q \Delta x_v - K_c \Delta P_L \quad (3.7.19)$$

όπου

$$K_q = \left. \frac{\partial Q_L}{\partial x_v} \right|_0 \quad (3.7.20)$$

είναι το κέρδος της ροής και

$$K_c = - \left. \frac{\partial Q_L}{\partial P_L} \right|_0 \quad (3.7.21)$$

ο συντελεστής της σχέσης ροής – πίεσης.

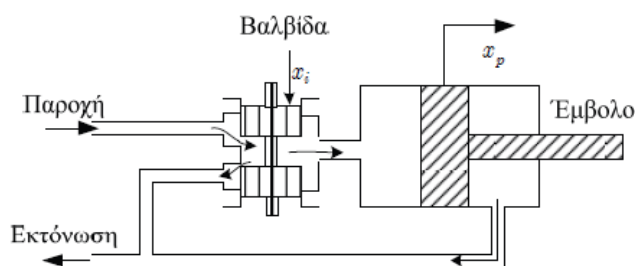
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΩΝ

## 4.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η παρουσίαση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν κάποια βασικά υδραυλικά κυκλώματα συνιστώμενα από βαλβίδα ρύθμισης της ροής και από έναν υδραυλικό κύλινδρο. Αρχικά θα εξεταστεί η περίπτωση ενός υδραυλικού κυλίνδρου απλής ενεργείας που οδηγείται από μια βαλβίδα ρύθμισης ροής. Το γραμμικό μοντέλο αυτού του συστήματος θα παρουσιαστεί στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Αυτό θα επαναληφθεί και για ένα υδραυλικό κύλινδρο διπλής ενεργείας που οδηγείται από μια γραμμική βαλβίδα ρύθμισης ροής

## 4.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΛΒΙΔΑΣ-ΕΜΒΟΛΟΥ ΑΠΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Το απλό υδραυλικό σύστημα αποτελείται από μια βαλβίδα ρύθμισης ροής ρευστού η οποία επιτρέπει τη ροή του ρευστού σε έναν υδραυλικό κύλινδρο. Ο κύλινδρος συνδέεται με τη βαλβίδα με τμήμα σωλήνωσης μικρού μήκους (μικρό στοιχείο αδράνειας). Το ρευστό που ρέει από την βαλβίδα στον κύλινδρο προκαλεί την κίνηση του εμβόλου του κυλίνδρου προς τα δεξιά όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Στο σύστημα η είσοδος είναι η μετατόπιση της θέσης της βαλβίδας  $x_i(t)$  ενώ έξοδος του συστήματος είναι η θέση του εμβόλου  $x_p(t)$ .



Εικόνα 4.2.1: Μελετώμενο υδραυλικό σύστημα απλής ενεργείας

Από τα εκτεθέντα στο κεφάλαιο 3 η μεταβολή της ροής που μεταφέρεται από τη βαλβίδα στον υδραυλικό κύλινδρο σε σχέση με μία αρχική θέση ισορροπίας δίνεται από τη σχέση, [3]:

$$\Delta q(t) = K_q \cdot \Delta x_i \quad (4.2.1)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση  $\Delta x_i$  είναι η μεταβολή της θέσης της βαλβίδας ως προς μία αρχική θέση ισορροπίας  $x_{i,0}$  και  $K_q$  είναι ο συντελεστής ροής μετατόπισης της βαλβίδας. Ο ρυθμός μεταβολής της διαφοράς του όγκου του ρευστού στο διαμέρισμα του υδραυλικού κυλίνδρου ως προς την αρχική θέση ισορροπίας είναι ίσος με, [3]:

$$\Delta q_c(t) = S_c \cdot \Delta \dot{x}_p(t) \quad (4.2.2)$$

Όπου  $\Delta x_p$  είναι η μετατόπιση του εμβόλου του υδραυλικού κυλίνδρου ως προς τη θέση ισορροπίας του.

Εξισώνοντας τις (4.2.1) και (4.2.2) προκύπτει μια διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης η οποία δίνει για την μετατόπιση του εμβόλου από τη θέση ισορροπίας του, [3]:

$$\Delta x_p(t) = \Delta x_p(0^-) + \frac{K_q}{S_c} \int_0^t \Delta x_i(\tau) d\tau \quad (4.2.3)$$

Όπου  $\Delta x_p(0^-) = x_p(0^-) - x_{p,0}$  με  $x_{p,0}$  τη θέση ισορροπίας του εμβόλου.

Από την ανωτέρω εξίσωση προκύπτει ότι η θέση του εμβόλου είναι συνάρτηση του νόμου κίνησης του στελέχους της βαλβίδας ρύθμισης της ροής.

Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Laplace στην ανωτέρω εξίσωση και μετά από σχετική άλγεβρα καταλήγουμε στην εξίσωση, [3]:

$$\Delta X_p(s) = \frac{K_q}{s \cdot S_c} \cdot \Delta X_i(s) + \frac{\Delta x_p(0^-)}{s} \quad (4.2.4)$$

Από την ανωτέρω εξίσωση αν  $\Delta x_p(0^-) = 0$ , προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος

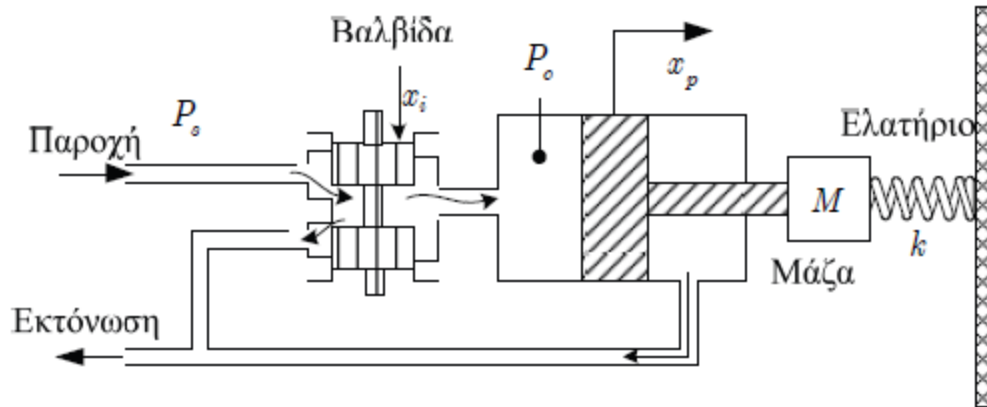
$$H(s) = \frac{\Delta x_p(s)}{\Delta x_i(s)} = \frac{K_q}{s \cdot S_c} \quad (4.2.5)$$

Το σύστημα έχει πόλο στο 0 και είναι ασταθές.

### **4.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΛΒΙΔΑΣ-ΕΜΒΟΛΟΥ ΑΠΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ ΑΠΟ ΕΛΑΤΗΡΙΟ**

Το υδραυλικό σύστημα ελέγχου που παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα αποτελείται αρχικά από μια βαλβίδα ρύθμισης ροής ρευστού η οποία επιτρέπει τη ροή του ρευστού στον

υδραυλικό κύλινδρο. Ο υδραυλικός κύλινδρος συνδέεται με την βαλβίδα με μία σωλήνωση μικρού μήκους. Το ρευστό που ρέει από την βαλβίδα στον κύλινδρο προκαλεί την κίνηση ενός εμβόλου προς τα δεξιά. Η επιστροφή του εμβόλου προς τα αριστερά πραγματοποιείται με τη δύναμη που ασκεί το ελατήριο. Η είσοδος του συστήματος είναι η μετατόπιση της θέσης της βαλβίδας  $x_i(t)$  και η έξοδος του συστήματος είναι η θέση του εμβόλου  $x_p(t)$ .



Εικόνα 4.3.1: Υπό μελέτη υδραυλικό σύστημα

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3 η ροή του ρευστού που μεταφέρεται από τη βαλβίδα στον κύλινδρο δίνεται από την σχέση, [3]:

$$\Delta q(t) = K_q \Delta x_i - K_c \Delta P_c \quad (4.3.1)$$

όπου  $\Delta x_i$  είναι μικρές μεταβολές της θέσης της βαλβίδας γύρω από μια θέση ισορροπίας,  $\Delta q$  είναι μικρές μεταβολές της ροής που μεταφέρεται από την βαλβίδα στον κύλινδρο γύρω από μια θέση ισορροπίας,  $K_q$  είναι ο συντελεστής ροής μετατόπισης της βαλβίδας,  $\Delta P_c$  είναι μικρές μεταβολές της πίεσης στο εσωτερικό του εμβόλου (αναρρόφηση του υδραυλικού κυλίνδρου) γύρω από μια αρχική θέση ισορροπίας και  $K_c$  είναι ο συντελεστής ροής πίεσης. Εφαρμόζοντας την εξίσωση συνέχειας στον όγκο του ρευστού μέσα στον κύλινδρο ισχύει η ακόλουθη εξίσωση, [3]:

$$\Delta q(t) + C_L(\Delta P_s - \Delta P_c) = \frac{d(V_0 + S_c \Delta x_p)}{dt} + \frac{(V_0 + S_c \Delta x_p) d\Delta P_c}{\beta_e dt} \quad (4.3.2)$$

όπου  $C_L$  είναι ο συντελεστής διαρροής,  $V_0$  είναι ο όγκος του ρευστού στο κύλινδρο στη θέση ισορροπίας,  $S_c$  είναι η επιφάνεια του εμβόλου και  $\beta_e$  είναι ο συντελεστής Bulk modulus του ρευστού και  $\Delta P_s$  είναι η μεταβολή της πίεσης αναρρόφησης της βαλβίδας ως προς την αρχική θέση ισορροπίας της.

Έστω ότι το γινόμενο μικρών μεταβολών είναι αρκετά μικρό ώστε να είναι περίπου ίσο με μηδέν και έστω ότι η πίεση παροχής είναι σταθερή  $\Delta P_s=0$ . Με άλγεβρα μεταξύ των ανωτέρω εξισώσεων λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση ροής πίεσης και μετατόπισης στο υδραυλικό σύστημα, [3]:

$$K_q \Delta x_i - K_c \Delta P_c - C_L \Delta P_c - S_c \frac{d(\Delta x_p)}{dt} - \frac{V_0}{\beta_e} \frac{d(\Delta P_c)}{dt} = 0 \quad (4.3.3)$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Νεύτωνα στη μάζα  $M$  λαμβάνεται η εξίσωση, [3]:

$$M \frac{d^2(\Delta x_p)}{dt^2} = \Delta P_c S_c - k \Delta x_p \quad (4.3.4)$$

Με  $k$  τη σταθερά του ελατηρίου.

Ορίζονται οι ακόλουθες μεταβλητές κατάστασης:

$$x_1(t) = \Delta x_p(t)$$

$$x_2(t) = \Delta \dot{x}_p(t)$$

$$x_3(t) = \Delta P_c(t)$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω μεταβλητές στις ανωτέρω σχέσεις προκύπτει η ακόλουθη ισοδύναμη περιγραφή του συστήματος, [3]

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t)$$

$$M \dot{x}_2(t) = -k x_1(t) + S_p x_3(t)$$

$$\left(\frac{V_0}{\beta_e}\right) \dot{x}_3(t) = -(C_L + K_c)x_3(t) - S_c x_2(t) + K_q \Delta x_i(t)$$

(4.3.5)

Οι τρεις διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης που παρουσιάζονται στις ανωτέρω εξισώσεις μπορούν να γραφτούν ισοδύναμα στον χώρο κατάστασης με τις ακόλουθες διανυσματικές εξισώσεις, [3]:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

$$x(0^-): \text{αρχικές συνθήκες}$$

όπου το διάνυσμα κατάστασης του μοντέλου είναι:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_p(t) \\ \Delta \dot{x}_p(t) \\ \Delta P_c(t) \end{bmatrix}$$

Η είσοδος του συστήματος είναι:

$$u(t) = \Delta x_i(t)$$

Η έξοδος του συστήματος είναι:

$$y(t) = \Delta x_p(t)$$

Το διάνυσμα αρχικών συνθηκών του συστήματος είναι:

$$x(0^-) = \begin{bmatrix} x_1(0^-) \\ x_2(0^-) \\ x_3(0^-) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p(0^-) \\ \dot{x}_p(0^-) \\ P_c(0^-) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{p,0} \\ \dot{x}_{p,0} \\ P_{c,0} \end{bmatrix}$$

(4.3.6)

όπου στον πρώτο πίνακα έχουμε τις αρχικές τιμές της μετατόπισης, της ταχύτητας και της πίεσης του εμβόλου αντίστοιχα και στον δεύτερο πίνακα είναι οι θέσεις ισορροπίας της μετατόπισης, της ταχύτητας και της διαφοράς πίεσης του εμβόλου αντίστοιχα.

Οι πίνακες που παρουσιάζονται στις εξισώσεις κατάστασης είναι, [3]:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{M} & 0 & \frac{S_c}{M} \\ 0 & -\frac{S_c\beta_e}{V_0} & -\frac{(C_L + K_c)\beta_e}{V_0} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_q\beta_e}{V_0} \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

(4.3.7)

Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Laplace και στα δυο μέλη των εξισώσεων κατάστασης του συστήματος προκύπτει η ακόλουθη αλγεβρική εξίσωση στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας, [3]:

$$X(s) = (sI_n - A)^{-1}BU(s) + (sI_n - A)^{-1}x(0-)$$

(4.3.8)

όπου  $X(s)$  είναι ο μετασχηματισμός Laplace του διανύσματος κατάστασης και  $U(s)$  είναι ο μετασχηματισμός Laplace της εισόδου. Έτσι προκύπτει ότι, [3]:

$$Y(s) = C(sI_n - A)^{-1}BU(s) + C(sI_n - A)^{-1}x(0-)$$

(4.3.9)

όπου  $Y(s)$  είναι ο μετασχηματισμός Laplace της εξόδου. Εκτελώντας τις πράξεις και χρησιμοποιώντας τους πίνακες των εξισώσεων κατάστασης λαμβάνονται τα ακόλουθα αποτελέσματα, [3]:

$$C(sI_n - A)^{-1}B = \frac{K_q S_c \beta_e}{MV_0 p(s)}$$

$$p(s) = s^3 + s^2 \frac{(MC_L \beta_e + MK_c \beta_e)}{MV_0} + s \frac{(kV_0 + S_c^2 \beta_e)}{MV_0} + \frac{kC_L \beta_e + kK_c \beta_e}{MV_0}$$

$$C(sI_n - A)^{-1} = \frac{1}{p(s)} \left\langle s^2 + \frac{S_c^2 \beta_e}{MV_0} + \frac{s(MC_L \beta_e + MK_c \beta_e)}{MV_0} \right\rangle s + \frac{(C_L + K_c)\beta_e}{V_0} \left\langle \frac{S_c}{M} \right\rangle$$

(4.3.10)

Το πολυώνυμο  $p(s)$  είναι το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του συστήματος ανοικτού βρόχου. Η απόκριση της εξόδου του συστήματος στο πεδίο της συχνότητας είναι, [3]:



$$\begin{aligned}
Y(s) = & \frac{K_q S_c \beta_e / MV_0}{p(s)} U(s) + \left[ \frac{s^2 + \frac{S_c^2 \beta_e}{MV_0} + \frac{s(MC_L \beta_e + MK_c \beta_e)}{MV_0}}{p(s)} \right] (x_p(0-) - x_{p,0}) \\
& + \left[ \frac{s + \frac{(C_L + K_c) \beta_e}{V_0}}{p(s)} \right] (\dot{x}_p(0-) - \dot{x}_{p,0}) + \frac{\frac{S_c}{M}}{p(s)} (P_c(0-) - P_{c,0})
\end{aligned}
\tag{4.3.11}$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος ανοικτού βρόχου είναι, [3]

$$H(s) = C(sI_n - A)^{-1}B = \frac{K_q S_c \beta_e}{MV_0 p(s)}
\tag{4.3.12}$$

Η χρονική απόκριση του διανύσματος κατάστασης μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας στη σχέση (4.3.8) τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace, δηλαδή

$$\begin{bmatrix} \Delta x_p(t) \\ \Delta \dot{x}_p(t) \\ \Delta P_c(t) \end{bmatrix} = \mathcal{L}^{-1}\{(sI_n - A)^{-1}BU(s) + (sI_n - A)^{-1}x(0-)\}
\tag{4.3.13}$$

Ομοίως εφαρμόζοντας στην (4.3.11) τον αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace παίρνουμε,[3]

$$\begin{aligned}
\Delta x_p(t) = & \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{K_q S_c \beta_e}{MV_0} \frac{U(s)}{p(s)} + \left[ \frac{s^2 + \frac{S_c^2 \beta_e}{MV_0} + \frac{s(MC_L \beta_e + MK_c \beta_e)}{MV_0}}{p(s)} \right] [x_p(0-) - x_{p,0}] \right. \\
& \left. + \left[ \frac{s + \frac{(C_L + K_c) \beta_e}{V_0}}{p(s)} \right] [\dot{x}_p(0-) - \dot{x}_{p,0}] + \frac{\frac{S_c}{M}}{p(s)} [P_c(0-) - P_{c,0}] \right\}
\end{aligned}
\tag{4.3.14}$$

Για τον έλεγχο της ευστάθειας του συστήματος ανοικτού βρόχου κατασκευάζεται ο πίνακας Routh του χαρακτηριστικού πολυώνυμου

$$\begin{array}{c|cc} s^3 & a_0 & a_2 \\ s^2 & a_1 & a_3 \\ s & b_1 & 0 \\ 1 & c_1 & 0 \end{array}$$

Όπου,[3]

$$a_0 = 1, a_1 = \frac{(MC_L\beta_e + MK_c\beta_e)}{MV_0}, a_2 = \frac{(kV_0 + S_c^2\beta_e)}{MV_0}, a_3 = \frac{kC_L\beta_e + kK_c\beta_e}{MV_0} = c_1$$

$$b_1 = \frac{S_c^2\beta_e}{MV_0}$$

Για να είναι το σύστημα ευσταθές θα πρέπει τα στοιχεία της πρώτης στήλης του πίνακα Routh να είναι ομόσημα, δηλαδή, [3]

$$\frac{(MC_L\beta_e + MK_c\beta_e)}{MV_0} > 0$$

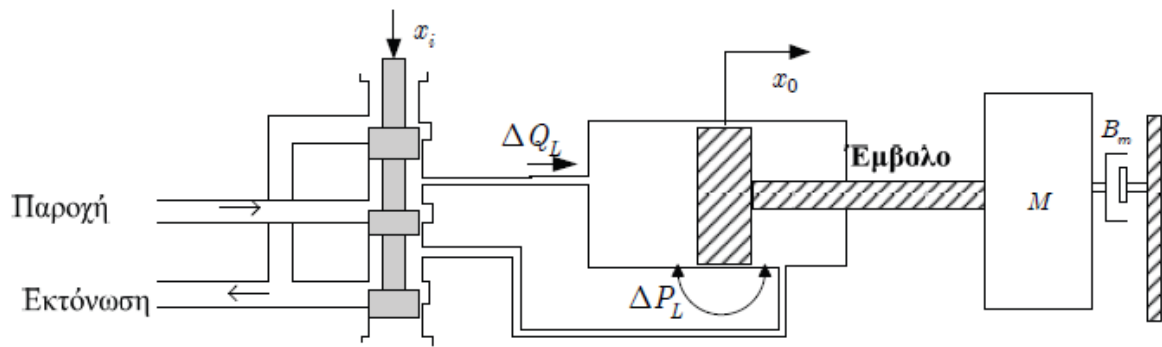
$$\frac{S_c^2\beta_e}{MV_0} > 0$$

$$\frac{kC_L\beta_e + kK_c\beta_e}{MV_0} > 0$$

Οι παραπάνω συνθήκες ισχύουν πάντα και επομένως το σύστημα του ενεργοποιητή είναι ευσταθές για κάθε τιμή των παραμέτρων του.

#### 4.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΑΛΒΙΔΑΣ-ΕΜΒΟΛΟΥ ΔΙΠΛΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση ενός εμβόλου διπλής ενέργειας που είναι συνδεδεμένο με μία μάζα. Η ροή στα δυο μέρη του κυλίνδρου καθορίζεται από μια βαλβίδα ρύθμισης συνεχούς ροής (βλ. Σχήμα). Η ροή που μεταφέρεται από τη βαλβίδα στο έμβολο δίνεται από την ακόλουθη προσεγγιστική γραμμική σχέση που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3



Εικόνα 4.4.1: Υπό μελέτη σύστημα

όπου  $\Delta Q_L$  είναι μικρές μεταβολές της ροής που μεταφέρεται από την βαλβίδα στο έμβολο γύρω από μια θέση ισορροπίας,  $\Delta P_L$  είναι μικρές μεταβολές της διαφοράς πίεσης στα άκρα του εμβόλου γύρω από τη θέση ισορροπίας,  $K_q$  είναι το κέρδος της ροής και  $K_c$  είναι ο συντελεστής ροής – πίεσης, [3].

$$\Delta Q_L(t) = K_q \Delta x_i(t) - K_c \Delta P_L(t)$$

(4.4.1)

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Newton στη μάζα  $M$  προκύπτει η διαφορική εξίσωση

$$M \frac{d^2 \Delta x_0(t)}{dt^2} = \sum_{i=1}^2 F_i(t)$$

(4.4.2)

όπου  $M$  η μάζα του εξωτερικού φορτίου και το άθροισμα των δυνάμεων λαμβάνει τις δυνάμεις λόγω πίεσης και λόγω του αποσβεστήρα στη μάζα. Οι δυνάμεις αυτές είναι,[3]

$$F_1(t) = \Delta P_L(t) S_p$$

$$F_2(t) = -B_m \frac{d \Delta x_0(t)}{dt}$$

(4.4.3)

όπου  $B_m$  η σταθερά απόσβεσης του αποσβεστήρα με τον οποίο είναι συνδεδεμένη η μάζα.

Η ροή του ρευστού που εισέρχεται στον κύλινδρο από την βαλβίδα αναλύεται σε τρεις διαφορετικές συνιστώσες. Η πρώτη είναι η ροή  $q_F$  που καταναλώνεται στην κίνηση του εμβόλου, η δεύτερη συνιστώσα είναι η ροή  $q_C$  που χάνεται λόγω φαινομένων συμπίεστικότητας και η τρίτη συνιστώσα είναι η ροή  $q_L$  που χάνεται λόγω φαινομένων διαρροής. Επομένως προκύπτει η σχέση, [3]

$$\Delta Q_L(t) = q_F(t) + q_C(t) + q_L(t) \quad (4.4.4)$$

Οι τρεις αυτές ροές σχετίζονται με τη διαφορά πίεσης στα άκρα του εμβόλου και με την ταχύτητα του με τις ακόλουθες σχέσεις,[3] :

$$\begin{aligned} q_F(t) &= S_p \frac{d\Delta x_0(t)}{dt} \\ q_C(t) &= \left(\frac{V_0}{\beta_e}\right) \frac{d\Delta P_L}{dt} \\ q_L(t) &= K_L \Delta P_L(t) \end{aligned} \quad (4.4.5)$$

όπου  $V_0$  συμβολίζει τον αρχικό όγκο του ρευστού που είναι παγιδευμένος στον θάλαμο του κυλίνδρου και  $\beta_e$  συμβολίζει την σταθερά bulk modulus του ρευστού.

Συνδυάζοντας τις ανωτέρω σχέσεις προκύπτουν οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση του εμβόλου του Σχήματος,[3]

$$\begin{aligned} M \frac{d^2 \Delta x_0(t)}{dt^2} + B_m \frac{d\Delta x_0(t)}{dt} - S_p \Delta P_L(t) &= 0 \\ \left(\frac{V_0}{\beta_e}\right) \frac{d\Delta P_L}{dt} + K_L \Delta P_L(t) + K_c \Delta P_L(t) + S_p \Delta \dot{x}_0(t) &= K_q \Delta x_i(t) \end{aligned} \quad (4.4.6)$$

Οι μεταβλητές κατάστασης του συστήματος ορίζονται ως εξής

$$x_1(t) = \Delta x_0(t)$$

$$x_2(t) = \Delta \dot{x}_0(t)$$

$$x_3(t) = \Delta P_L(t)$$

(4.4.7)

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις των μεταβλητών κατάστασης στις διαφορικές εξισώσεις προκύπτει η ακόλουθη ισοδύναμη περιγραφή των διαφορικών εξισώσεων του συστήματος

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t)$$

$$M\dot{x}_2(t) + B_m x_2(t) - S_p x_3(t) = 0$$

$$\left(\frac{V_0}{\beta_e}\right) \dot{x}_3(t) + (K_L + K_C)x_3(t) + S_p x_2(t) = K_q \Delta x_i(t)$$

(4.4.8)

Οι τρεις διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης που παρουσιάζονται στις ανωτέρω εξισώσεις μπορούν να γραφτούν στον χώρο κατάστασης ως ακολούθως,[3]

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

$$x(0^-): \text{αρχικές συνθήκες}$$

(4.4.9)

Το διάνυσμα κατάστασης του μοντέλου είναι

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_0(t) \\ \Delta \dot{x}_0(t) \\ \Delta P_L(t) \end{bmatrix}$$

(4.4.10)

Η είσοδος του συστήματος είναι

$$u(t) = \Delta x_i(t)$$

Η έξοδος του συστήματος είναι

$$y(t) = x_1(t) = \Delta x_0(t)$$

Το διάνυσμα αρχικών συνθηκών του συστήματος είναι

$$x(0^-) = \begin{bmatrix} x_1(0^-) \\ x_2(0^-) \\ x_3(0^-) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_0(0^-) \\ \Delta \dot{x}_0(0^-) \\ \Delta P_L(0^-) \end{bmatrix}$$

Οι πίνακες που παρουσιάζονται στις ανωτέρω εξισώσεις είναι,[3]

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{M} & \frac{S_p}{M} \\ 0 & -\frac{S_p \beta_e}{V_0} & -\frac{(K_L + K_c) \beta_e}{V_0} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_q \beta_e}{V_0} \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

(4.4.11)

Εφαρμόζοντας τον μετασχηματίζοντας Laplace και στα δυο μέλη των εξισώσεων του χώρου κατάστασης προκύπτει το ακόλουθο σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων,[3]

$$sX(s) - x(0^-) = AX(s) + BU(s)$$

$$Y(s) = CX(s)$$

(4.4.12)

Λύνοντας τις παραπάνω εξισώσεις ως προς  $Y(s)$  προκύπτει η απόκριση του συστήματος στο πεδίο της Συχνότητας

$$Y(s) = C(sI_3 - A)^{-1}BU(s) + C(sI_3 - A)^{-1}x(0^-)$$

(4.4.13)

Η ανωτέρω σχέση διατυπώνεται ως εξής

$$Y(s) = H_1(s)U(s) + H_2(s)x(0^-)$$

(4.4.14)

όπου προκύπτει ότι, [3]

$$H_1(s) = \frac{\beta_e K_q S_p}{s\{\beta_e[(K_c + K_L)(B_m + Ms) + S_p^2] + s(B_m + Ms)V_0\}}$$

$$H_2(s) = \langle h_{2,1}(s) | h_{2,2}(s) | h_{2,3}(s) \rangle$$

(4.4.15)

και

$$h_{2,1}(s) = \frac{1}{s}$$

$$h_{2,2}(s) = \frac{\beta_e(K_c + K_L)M + MsV_0}{s\{\beta_e[(K_c + K_L)(B_m + Ms) + S_p^2] + s(B_m + Ms)V_0\}}$$

$$h_{2,3}(s) = \frac{S_p V_0}{s\{\beta_e[(K_c + K_L)(B_m + Ms) + S_p^2] + s(B_m + Ms)V_0\}}$$

(4.4.16)

Για μηδενικές αρχικές συνθήκες η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος είναι η  $H_1(s)$  και το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του συστήματος ανοικτού βρόχου είναι,[3]

$$p(s) = MV_0 s^3 + [\beta_e(K_c + K_L)M + B_m V_0]s^2 + [\beta_e\{B_m(K_c + K_L) + S_p^2\}]s$$

(4.4.17)

Λύνοντας την εξίσωση  $p(s) = 0$  ως προς  $s$ , οι πόλοι του συστήματος είναι,[3]:

$$\rho_1 = 0$$

$$\rho_{2,3} = -\frac{\beta_e(K_c + K_L)M + B_m V_0 \pm \sqrt{-4\beta_e M [B_m(K_c + K_L) + S_p^2]V_0 + [\beta_e(K_c + K_L)M + B_m V_0]^2}}{2MV_0}$$

(4.4.18)

Όπως είναι φανερό από τις παραπάνω λύσεις το σύστημα ανοικτού βρόχου έχει έναν ασταθή πόλο στο μηδέν και δυο ευσταθείς πόλους που χαρακτηρίζονται από τα εξής χαρακτηριστικά

$$\text{φυσική ιδιοσυχνότητα: } \omega_0 = \sqrt{\beta_e [B_m (K_c + K_L) + S_p^2]}$$

$$\text{απόσβεση : } \zeta = \frac{\beta_e (K_c + K_L) M + B_m V_0}{2\beta_e [B_m (K_c + K_L) + S_p^2]}$$

(4.4.19)

Από την παραπάνω ανάλυση είναι φανερό ότι αν θεωρηθεί ως έξοδος του συστήματος η ταχύτητα του εμβόλου τότε η συνάρτηση μεταφοράς είναι,[3]

$$\frac{V(s)}{U(s)} = \frac{\beta_e K_q S_p}{\beta_e [(K_c + K_L)(B_m + Ms) + S_p^2] + s(B_m + Ms)V_0}$$

(4.4.20)

Όπου  $V(s)$  είναι ο μετασχηματισμός Laplace της ταχύτητας του εμβόλου.

Από τις ανωτέρω σχέσεις συμπεραίνεται ότι το σύστημα είναι ευσταθές ως προς την ταχύτητα και ασταθές ως προς την θέση του εμβόλου. Επιπλέον το σύστημα είναι δεύτερης τάξης ως προς την ταχύτητα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

### 5.1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί ο σχεδιασμός ενός ελεγκτή με τον οποίο επιτυγχάνεται η προσεγγιστική παρακολούθηση ενός σήματος αναφοράς εισόδου παρουσιάζοντας μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Θα μελετηθεί το πρόβλημα για σταθερά σήματα αναφοράς όπως βηματικά σήματα, καθώς και για άλλα είδη σημάτων.

### 5.2 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΡΑΧΩΝ

Η περιγραφή ενός γραμμικού χρονικά αμετάβλητου συστήματος στο χώρο κατάστασης γίνεται με την ακόλουθη μητρωϊκή διαφορική εξίσωση 1<sup>ης</sup> τάξης, [3]:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + D\xi(t), y(t) = Cx(t) \quad (5.2.1)$$

όπου το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης  $x \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ , η είσοδος του συστήματος  $u \in \mathbb{R}$ , η έξοδος του συστήματος  $y \in \mathbb{R}$  και η εξωτερική διαταραχή  $\xi \in \mathbb{R}$ . Οι πίνακες της εξίσωσης (5.2.1) έχουν τις κατάλληλες διαστάσεις και οι όροι τους είναι σταθερές.

Για την περίπτωση που το σήμα αναφοράς  $r(t)$  και η διαταραχή  $\xi(t)$  είναι σταθερές η παραγωγή ως προς το χρόνο του σφάλματος της εξόδου με το σήμα αναφοράς δίνει την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{e} = -y(t) = -Cx(t). \quad (5.2.2)$$

Αν παραγωγίσουμε ως προς το χρόνο την εξίσωση (5.2.1) και λάβουμε υπόψη την εξίσωση (5.2.2) μετά από άλγεβρα καταλήγουμε στην ακόλουθη μητρωϊκή διαφορική εξίσωση, [3]:

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0_{n \times 1} \\ -C & 0_{1 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} w(t) \quad (5.2.3)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση  $z(t) = \dot{x}$  και  $w(t) = \dot{u}$

Στο σύστημα που περιγράφεται από την εξίσωση (5.2.3) εφαρμόζουμε νόμο ελέγχου με ανατροφοδότηση των μεταβλητών του κατάστασης δηλαδή εφαρμόζουμε:

$$w(t) = -K_1 z(t) - K_2 e(t) \quad (5.2.4)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση το  $K_1$  είναι πίνακας σταθερών  $1 \times n$  και το  $K_2$  είναι σταθερά οπότε ο πίνακας ανατροφοδότησης είναι:

$$K = [K_1 \quad K_2] \quad (5.2.5)$$

Το αντίστοιχο σύστημα κλειστού βρόχου της εξίσωσης (5.2.3) λαμβάνοντας υπόψη την ανατροφοδότηση μέσω του πίνακα  $K$  περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK_1 & -BK_2 \\ -C & 0_{1 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ e(t) \end{bmatrix} \quad (5.2.6)$$

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

A. Το σύστημα που περιγράφεται από την εξίσωση (5.2.3) είναι ελέγξιμο.

Αυτό συμβαίνει όταν ο πίνακας ελεγχιμότητας του συστήματος είναι βαθμού  $n+1$ . Ο πίνακας ελεγχιμότητας του συστήματος από την θεωρία αυτόματου ελέγχου για το σύστημα της (5.2.3) δίνεται από την εξίσωση, [2]:

$$U_e = [B_e \quad \dots \quad A_e^n B_e] \quad (5.2.7)$$

Όπου

$$A_e = \begin{bmatrix} A & 0_{n \times 1} \\ -C & 0_{1 \times 1} \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.2.8)$$

Θεωρούμε το επιθυμητό πολώνυμο κλειστού βρόχου:

$$p_d(s) = s^{n+1} + d_1 s^n + \dots + d_{n+1} \quad (5.2.9)$$

Τότε ο επιλεγείς πίνακας ανατροφοδότησης  $K$  (βλέπε (5.2.5)) δίνεται από την εξίσωση του Ackerman, [2]:

$$K = [0_{1 \times n} \quad 1] U_e^{-1} p_d(A_e) \quad (5.2.10)$$

Όπου

$$p_d(A_e) = A_e^{n+1} + d_1 A_e^n + \dots + d_{n+1} I_{n+1} \quad (5.2.11)$$

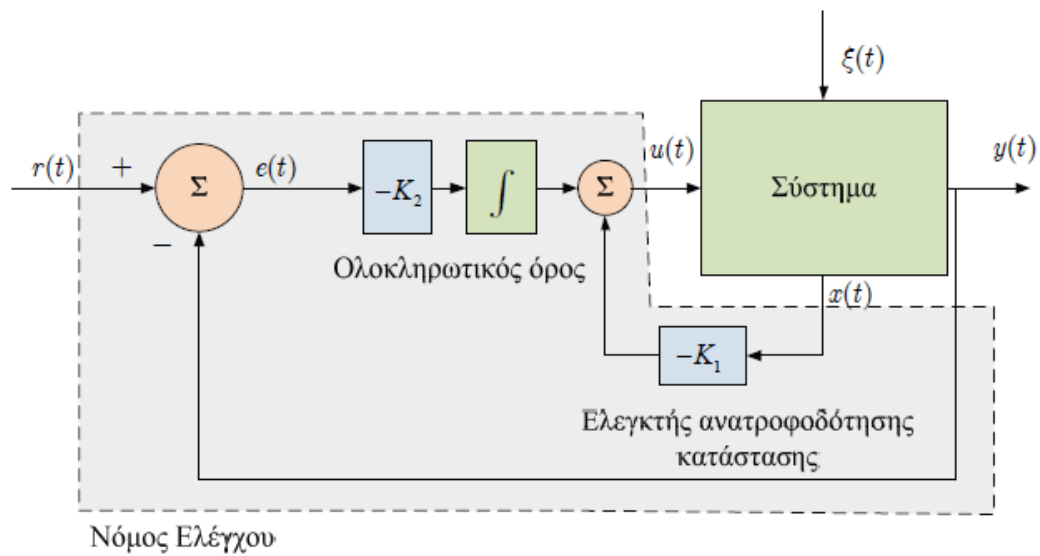
B. Το σύστημα που περιγράφεται από την εξίσωση (5.2.3) δεν είναι ελέγξιμο. Τότε για την επιλογή του πίνακα ανατροφοδότησης  $K$  αρκεί να βρεθούν  $K_1$  και  $K_2$  ώστε η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος από την εξίσωση (5.2.6) να δίνει πόλους με αρνητικό πραγματικό

μέρος δηλαδή ο πίνακας  $K$  θα πρέπει να επιλεγθεί ώστε η ακόλουθη εξίσωση να δίνει ευσταθές σύστημα

$$\det \left[ sI_n - \begin{bmatrix} A - BK_1 & -BK_2 \\ -C & 0_{1 \times 1} \end{bmatrix} \right] = 0 \quad (5.2.12)$$

Σε κάθε περίπτωση το σήμα εισόδου του συστήματος που περιγράφει η (5.2.1) δίνεται από την εξίσωση:

$$u(t) = -K_2 \int_0^t e(\tau) d\tau - K_1 x(t) \quad (5.2.13)$$



Σχήμα 5.2.1: Ελεγκτής ακολουθίσης σταθερών σημάτων

### 5.3 ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΥΘΑΙΡΕΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

Έστω ότι για το σύστημα που περιγράφεται από την εξίσωση (5.2.1) έχουμε το ακόλουθο σύστημα αυθαίρετων φραγμένων σημάτων με φραγμένες  $r$  παραγώγους:

$$\frac{dx_r(t)}{dt} = Ax_r(t) \text{ και } y_r(t) = c_r x_r(t) \quad (5.3.1)$$

Με  $x_r(t) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  και  $y_r(t) \in \mathbb{R}$  και

$$A_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -d_r & -d_{r-1} & -d_{r-2} & \dots & -d_1 \end{bmatrix}$$

$$c_r = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \quad (5.3.2)$$

Για το ανωτέρω σύστημα έχουμε:

$$y_r^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i y_r^{(r-i)}(t) = 0 \quad (5.3.3)$$

Έστω ότι το σήμα διαταραχών έχει τη μορφή:

$$\xi_r^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i \xi_r^{(r-i)}(t) = 0 \quad (5.3.4)$$

Το σφάλμα ακολούθησης ορίζεται σαν:

$$\varepsilon(t) = y(t) - y_r(t) \quad (5.3.5)$$

Αν παραγωγίσουμε το σφάλμα ακολούθησης  $r$  φορές προκύπτει:

$$\varepsilon^{(r)}(t) = Cx^{(r)}(t) - y_r^{(r)}(t) = Cx^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i y_r^{(r-i)}(t) \quad (5.3.6)$$

Η (5.3.6) είναι ισοδύναμη με την:

$$\varepsilon^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i \varepsilon^{(r-i)}(t) = Cx^{(r)}(t) + C \sum_{i=1}^r d_i x^{(r-i)}(t) \quad (5.3.7)$$

Ορίζονται οι μεταβλητές:

$$z(t) = x^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i x^{(r-i)}(t) \quad (5.3.8)$$

$$\tilde{u}(t) = u^{(r)}(t) + \sum_{i=1}^r d_i u^{(r-i)}(t) \quad (5.3.9)$$

Τότε με κατάλληλη άλγεβρα προκύπτει το ακόλουθο σύστημα:

$$\frac{d}{dt} \tilde{x}(t) = \tilde{A} \tilde{x} + \tilde{b} \tilde{u}(t) \quad (5.3.10)$$

Με

$$\tilde{x}(t) = [\varepsilon(t) \quad \varepsilon^{(1)}(t) \quad \dots \quad \varepsilon^{(r-1)}(t) \quad z(t)] \quad (5.3.11)$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A_r & e_r C \\ 0_{n_x r} & A \end{bmatrix}, \tilde{b} = \begin{bmatrix} 0_{r \times 1} \\ B \end{bmatrix}, e_r = \begin{bmatrix} 0_{(r-1) \times 1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.3.12)$$

Στο σύστημα που περιγράφεται από την (5.3.10) εφαρμόζουμε νόμο ελέγχου με την ανατροφοδότηση:

$$\tilde{u}(t) = f\tilde{x}(t) = f_1\tilde{\varepsilon}(t) + f_2z(t) \quad (5.3.13)$$

Με

$$\tilde{\varepsilon}(t) = [\varepsilon(t) \quad \varepsilon^{(1)}(t) \quad \dots \quad \varepsilon^{(r-1)}(t)] \quad (5.3.14)$$

Το πρόβλημα της ακολούθησης των σημάτων που δίνονται από την εξίσωση (5.3.1) με διαταραχές που δίνονται από την εξίσωση (5.3.4) με ταυτόχρονο μηδενισμό του σφάλματος μόνιμης κατάστασης λύνεται αν με κατάλληλη επιλογή του ελεγκτή  $f$  προκύπτει η ακόλουθη χαρακτηριστική εξίσωση με πόλους ευσταθείς, [3]:

$$\tilde{p}_{cl}(s, f) = \det[sI_{r+n} - \tilde{A} - \tilde{b}f] = 0 \quad (5.3.15)$$

Αν το σύστημα που περιγράφεται από την εξίσωση (5.3.10) είναι ελέγξιμο δηλαδή αν

$$\text{rank}[\tilde{U}] = n + r \quad (5.3.16)$$

Με

$$\tilde{U} = [\tilde{b} \quad \tilde{A}\tilde{b} \quad \dots \quad \tilde{A}^{n+r-1}\tilde{b}] \quad (5.3.17)$$

Τότε ο πίνακας ανατροφοδότησης

$$f = [f_1 \quad f_2] \quad (5.3.18)$$

Τοποθετεί τους πόλους του επαυξημένου συστήματος κλειστού βρόχου στις θέσεις των πόλων του επιθυμητού πολυώνυμου

$$p_d(s) = s^{n+r} + d_1s^{n+r-1} + \dots + d_{n+r} \quad (5.3.19)$$

Αν το  $f$  υπολογιστεί από τον τύπο του Ackerman, [2]:

$$f = -[0_{1 \times (n+r-1)} \quad 1]\tilde{U}^{-1}p_d(\tilde{A}) \quad (5.3.20)$$

Με

$$p_d(\tilde{A}) = \tilde{A}^{n+r} + d_1\tilde{A}^{n+r-1} + \dots + d_{n+r}I_{n+r} \quad (5.3.21)$$

Για την περίπτωση που το σύστημα που περιγράφεται από την εξίσωση (5.3.10) δεν είναι ελέγξιμο αρκεί να βρεθεί το  $f$  ώστε το σύστημα με την ακόλουθη χαρακτηριστική εξίσωση να είναι ευσταθές

$$\det \begin{bmatrix} sI_r - A_r & -e_r C \\ -B f_1 & sI_n - A - B f_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (5.3.22)$$

Σε κάθε περίπτωση ο έλεγχος στο χώρο κατάστασης περιγράφεται από το ακόλουθο σύστημα

$$\dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + b_c \varepsilon(t)$$

$$v(t) = c_c x_c(t)$$

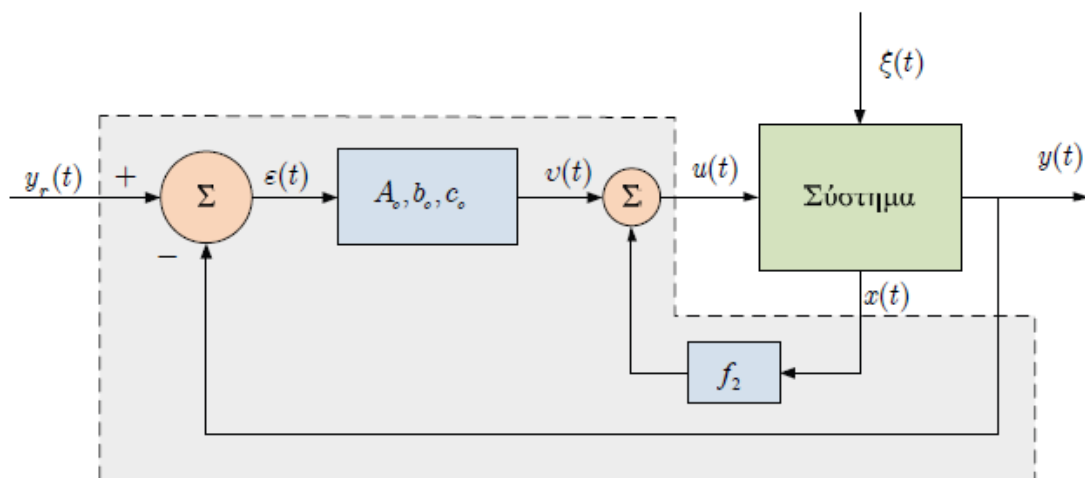
$$u(t) = v(t) + f_2 x(t)$$

(5.3.23)

Με

$$A_c = \begin{bmatrix} -d_1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ -d_2 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -d_{r-1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -d_r & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$b_c = \begin{bmatrix} f_{1,r} \\ f_{1,r-1} \\ \vdots \\ f_{1,1} \end{bmatrix}, c_c = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \quad (5.3.24)$$



Νόμος Ελέγχου

Σχήμα 5.3.1: Ελεγκτής ασυμπτωτικής ακολούθησης αυθαίρετων σημάτων

## 5.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΛΕΓΚΤΗ ΤΡΙΩΝ ΟΡΩΝ PID

Θεωρούμε το σύστημα που περιγράφεται από την εξίσωση (5.2.1). Στο σύστημα αυτό εφαρμόζουμε νόμο ελέγχου με ελεγκτή PID που δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση, [8]:

$$u(t) = \left( K_P + K_D \frac{d}{dt} + K_I \int dt \right) (r_{ref}(t) - y(t)) \quad (5.4.1)$$

Με εφαρμογή αυτού του νόμου ελέγχου η απόκριση του συστήματος κλειστού βρόχου στο πεδίο της συχνότητας δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση, [3]:

$$Y(s) = C[sI_n - A + BCG_{pid}(s)]^{-1} B G_{pid}(s) R_{ref}(s) + C[sI_n - A + BCG_{pid}(s)]^{-1} D \Xi(s) \quad (5.4.2)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση  $Y(s)$ ,  $U(s)$ ,  $\Xi(s)$  είναι τα σήματα εξόδου, εισόδου και διαταραχής στο πεδίο συχνότητας και  $R_{ref}(s)$  είναι ο μετασχηματισμός Laplace του σήματος αναφοράς. Η συνάρτηση του ελεγκτή στο πεδίο συχνότητας είναι:

$$G_{pid}(s) = \frac{s^2 K_D + s K_P + K_I}{s} \quad (5.4.3)$$

Για να έχουμε ευστάθεια του συστήματος κλειστού βρόχου απαιτείται κατάλληλη επιλογή των σταθερών του ελεγκτή ώστε το ακόλουθο χαρακτηριστικό πολυώνυμο να έχει πόλους στο αριστερό ημιπέπεδο του μιγαδικού επιπέδου, [8]:

$$p_{cl}(s, f) = s \det(sI_n - A + BCG_{pid}(s)) = s^\mu + a_1(f)s^{\mu-1} + a_2(f)s^{\mu-2} + \dots + a_\mu(f)s^0 \quad (5.4.4)$$

Με

$$f = [f_1 \quad f_2 \quad f_3] = [K_D \quad K_P \quad K_I] \quad (5.4.5)$$

Η εξίσωση (5.4.4) μπορεί να γραφτεί με την ακόλουθη μορφή, [3]:

$$p_{cl}(s, f) = [s^\mu \quad \dots \quad s^0] W^{**} \begin{bmatrix} 1 \\ f^T \end{bmatrix} \quad (5.4.6)$$

Με

$$W^{**} = [\tilde{a}^T \quad \Omega] \quad (5.4.7)$$

$$\tilde{a} = [1 \quad a_1(0) \quad \dots \quad a_\mu(0)] \quad (5.4.8)$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ a_1^1 & a_1^2 & a_1^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_\mu^1 & a_\mu^2 & a_\mu^3 \end{bmatrix} \quad (5.4.9)$$

$$a_i^j = a_i(f)|_{f_k=1(j=k), f_k=0(\forall j \neq k)} - a_i(0) (\forall i = 1, \dots, \mu, \forall j = 1, 2, 3) \quad (5.4.10)$$

Θεωρώντας τους επιθυμητούς πόλους του συστήματος κλειστού βρόχου να αντιστοιχούν στο επιθυμητό χαρακτηριστικό πολυώνυμο

$$a_d(s) = s^\mu + a_{d,1}s^{\mu-1} + \dots + a_{d,\mu}s^0 \quad (5.4.11)$$

Οι τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή ικανοποιούν την εξίσωση, [3]:

$$W^{**} \begin{bmatrix} 1 \\ f^T \end{bmatrix} = a_d \quad (5.4.12)$$

Με

$$a_d = [1 \quad a_{d,1} \quad \dots \quad a_{d,\mu}]^T \quad (5.4.13)$$

Η εξίσωση (5.4.12) επιλύεται αν ικανοποιείται η συνθήκη:

$$\text{rank}[W^{**} | a_d] = \text{rank}[W^{**}] \quad (5.4.14)$$

Αν ισχύει η συνθήκη (5.4.14) οι παράμετροι του ελεγκτή PID υπολογίζονται από την εξίσωση, [3]:

$$f^T = [0_{3 \times 1} | I_3](W^{**})^T [W^{**} (W^{**})^T]^{-1} a_d \quad (5.4.15)$$

Στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται η (5.4.14) οι παράμετροι του PID ελεγκτή υπολογίζονται από τον ακόλουθο αλγόριθμο που επιτυγχάνει την ευσταθειοποίηση του χαρακτηριστικού πολυωνύμου

Πριν την περιγραφή του αλγόριθμου δίνονται οι ακόλουθοι ορισμοί, [3]:

Ορισμός 1:

Έστω ένας πραγματικός πίνακας  $W$  διαστάσεων  $n \times \varphi$ , τότε ο πίνακας  $W^+$  με διάσταση  $(n+1) \times (\varphi+1)$  λέγεται άνω επαύξηση του  $W$  αν έχει τη μορφή:

$$W^+ = \begin{bmatrix} * & 0 \\ * & W \end{bmatrix} \quad (5.4.16)$$

Όπου με  $*$  συμβολίζεται οποιαδήποτε δυνατή τιμή.

Ορισμός 2:

Έστω ένας πραγματικός πίνακας  $W$  διαστάσεων  $n \times \varphi$ , τότε ο πίνακας  $W^-$  με διάσταση  $(n+1) \times (\varphi+1)$  λέγεται κάτω επαύξηση του  $W$  αν έχει τη μορφή:



$$W^- = \begin{bmatrix} W & * \\ 0 & * \end{bmatrix} \quad (5.4.17)$$

Όπου με \* συμβολίζεται οποιαδήποτε δυνατή τιμή.

Ορισμός 3:

Ο πίνακας  $W^+$  λέγεται θετική άνω επαύξηση του πίνακα  $W$  αν το στοιχείο του (1,1) είναι θετικό.

Ορισμός 4:

Ο πίνακας  $W^-$  λέγεται θετική κάτω επαύξηση του πίνακα  $W$  αν το στοιχείο του (ν+1,φ+1) είναι θετικό.

Ορισμός 5:

Ο πίνακας  $W$  με διάσταση  $n \times \varphi$  είναι θετικά αντισυμμετρικός πίνακας αν μπορεί να γίνει από έναν θετικό πυρήνα  $\bar{c} \in \mathbb{R}^{k \times 1}$  ( $[s^k \ s^{k-1} \ \dots \ s^0] \bar{c}$  : είναι ευσταθές πολυώνυμο) με θετικές άνω ή κάτω επαυξήσεις.

Θεώρημα:

Το πολυώνυμο της χαρακτηριστικής εξίσωσης κλειστού βρόχου μπορεί να αντιστοιχεί σε ευσταθές σύστημα αν επιλεγθούν κατάλληλα οι τιμές του PID ελεγκτή ώστε να υπάρχει (μ+1) – υποπίνακας του πίνακα  $W^{**}$ , έστω  $W^*$  ο οποίος να είναι θετικά αντισυμμετρικός.

Λήμμα:

Αντί του πίνακα  $W^{**}$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο πίνακας  $W^* = W^{**}T$  όπου  $T$  είναι κατάλληλος αντιστρέψιμος πίνακας

Αν ικανοποιείται το ανωτέρω θεώρημα μπορεί να εφαρμοστεί ο ακόλουθος αλγόριθμος προσδιορισμού των παραμέτρων του PID ελεγκτή, [3]:

Έστω οι άνω επαυξήσεις

$$\Phi_1 \rightarrow \Phi_2 \rightarrow \dots \rightarrow \Phi_{\mu-k} \rightarrow \Phi_{\mu+1-k} = W^*$$

Βήμα 1 (Κατασκευή των επαυξήσεων)

Ο πυρήνας του  $W^*$  είναι  $\Phi_1 = \bar{c}$ . Από τον πίνακα  $\Phi_1$  με  $\mu+1-k$  άνω θετικές επαυξήσεις κατασκευάζονται οι πίνακες  $\Phi_2(q), \dots, \Phi_{\mu+1-k} = W^*$

Βήμα 2 (Αρχικοποίηση)

Έστω  $\tau_1=1, i=1$

Βήμα 3 (Υπολογισμός παραμέτρων ευστάθειας)

Να βρεθεί  $\varepsilon_i$  τέτοιο ώστε το πολυώνυμο που αντιστοιχεί στον πίνακα  $\Phi_{i+1}(q)[\varepsilon_i \ \tau_i]^T$  να είναι ευσταθές.

Έστω  $\tau_{i+1}=[\varepsilon_i \ 1]$ ,  $i = i + 1$

Βήμα 4 (Επανάληψη)

Να επαναληφθεί το βήμα 3 μέχρι να ισχύει  $i \leq \mu+1-\kappa$

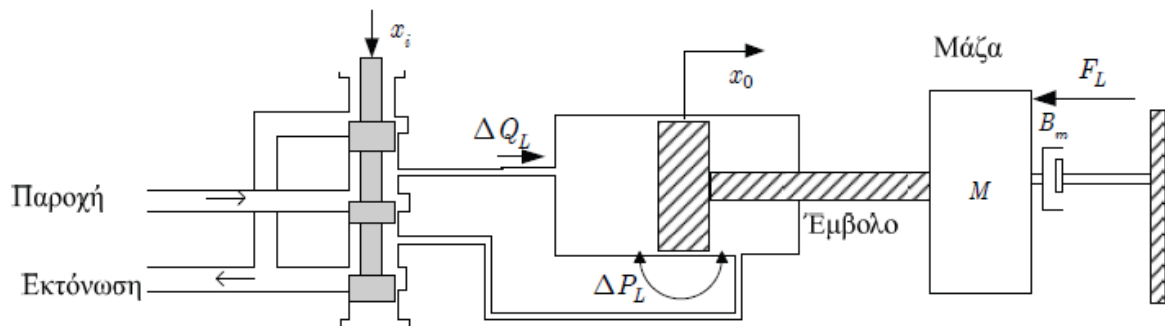
Βήμα 6 (Υπολογισμός του ελεγκτή τριών όρων)

Υπολογίζουμε τις παραμέτρους του ελεγκτή από τον τύπο:

$$f = \left[ \frac{T}{\varepsilon_{\mu+1-\kappa}} \left( [\varepsilon_{\mu+1-\kappa} \ \dots \ \varepsilon_1 \ 1] \begin{bmatrix} 0 \\ I_{\mu+1-\kappa} \end{bmatrix} \right)^T \right]^T \quad (5.4.18)$$

## 5.5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΗ

Έστω ο υδραυλικός ενεργοποιητής του ακόλουθου σχήματος:



Σχήμα 5.5.1: Υδραυλικός ενεργοποιητής με εξωτερική διαταραχή

Από τα εκτεθέντα στο κεφάλαιο 4 το σύστημα περιγράφεται από την εξίσωση (5.2.1) όπου, [3]:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_0(t) \\ \Delta P_L(t) \end{bmatrix} \quad (5.5.1)$$

Η είσοδος του συστήματος είναι η μετατόπιση της βαλβίδας ελέγχου

$$u(t) = \Delta x_i(t) \quad (5.5.2)$$

Η έξοδος του συστήματος είναι η ταχύτητα του εμβόλου του ενεργοποιητή

$$y(t) = x_1(t) = \Delta \dot{x}_0(t) \quad (5.5.3)$$

Η εξωτερική διαταραχή είναι η εξωτερική δύναμη

$$\xi(t) = F_L(t) \quad (5.5.4)$$

Οι πίνακες του συστήματος δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{M} & \frac{S_p}{M} \\ -\frac{S_p \beta_o}{V_o} & -\frac{(K_L + K_C) \beta_o}{V_o} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_q \beta_o}{V_o} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M} \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0] \quad (5.5.5)$$

Στις ανωτέρω εξισώσεις, [3], (ο ορισμός των μεγεθών έχει δοθεί στα κεφάλαια 3, 4):

$V_o$ : ο όγκος του ρευστού

$S_p$ : η επιφάνεια του εμβόλου

$\beta_o$ : το bulk modulus

$K_L + K_C$ : ο συνολικός συντελεστής πίεσης

$B_m$ : ο συντελεστής απόσβεσης

$M$ : Η μάζα

$K_q$ : ο συντελεστής ροής μετατόπισης

1<sup>η</sup> Περίπτωση: Σχεδιασμός ελεγκτή ασυμπτωτικής ακολούθησης βηματικής εντολής

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στην παράγραφο 5.2 ο ελεγκτής ανατροφοδότησης είναι:

$$f_1 = \frac{-S_p^2 + \frac{(d_2 M^2 - d_1 M B_m + B_m^2) V_o}{M \beta_o}}{K_q S_p}$$

$$f_2 = \frac{(d_1 M - B_m) V_o - M (K_C + K_L) \beta_o}{M K_q \beta_o}$$

$$f_3 = -\frac{d_3 M V_o}{K_q S_p V_o}$$

(5.5.6)

Όπου το επιθυμητό χαρακτηριστικό πολυώνυμο είναι το:

$$p_d(s) = s^3 + d_1s^2 + d_2s + d_3 \quad (5.5.7)$$

2<sup>η</sup> Περίπτωση: Σχεδιασμός PID ελεγκτή

Κατά τα εκτεθέντα στην παράγραφο 5.4 το σύστημα είναι ελέγξιμο και οι σταθερές του ελεγκτή προκύπτουν, [3]:

$$K_D = \frac{(-B_m + Md_1)V_o - M(K_C + K_L)\beta_o}{K_q S_P \beta_o}$$

$$K_P = \frac{Md_2V_o - [B_m(K_C + K_L) + S_P^2]\beta_o}{K_q S_P \beta_o}$$

$$K_I = \frac{Md_3V_o}{K_q S_P \beta_o}$$

(5.5.8)

Όπου το επιθυμητό χαρακτηριστικό πολυώνυμο είναι το:

$$p_d(s) = s^3 + d_1s^2 + d_2s + d_3$$

## 5.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΘΕΣΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΗ

Για το σύστημα της παραγράφου 5.5 εφαρμόζεται και έλεγχος θέσης. Ισχύει η εξίσωση (5.2.1) όπου τώρα:

$$x(t) = \begin{bmatrix} \Delta x_o(t) \\ \Delta \dot{x}_o(t) \\ \Delta P_L(t) \end{bmatrix} \quad (5.6.1)$$

$$y(t) = \Delta x_o(t) \quad (5.6.2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{M} & \frac{S_p}{M} \\ 0 & -\frac{S_p \beta_o}{V_o} & -\frac{(K_L + K_C) \beta_o}{V_o} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_q \beta_o}{V_o} \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0 \quad 0], D = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M} \\ 0 \end{bmatrix}$$

(5.6.3)

Κατά τα εκτεθέντα στην παράγραφο 5.2 αν το επιθυμητό χαρακτηριστικό πολυώνυμο είναι το

$$p_d(s) = s^4 + d_1 s^3 + d_2 s^2 + d_3 s + d_4 \quad (5.6.4)$$

Οι παράμετροι του ελεγκτή είναι, [3]:

$$f_1 = \frac{M d_3 V_o}{K_q S_p \beta_o}$$

$$f_2 = \frac{-S_p^2 + \frac{(B_m^2 - M B_m d_1 + M^2 d_2) V_o}{M \beta_o}}{K_q S_p}$$

$$f_3 = \frac{(-B_m + M d_1) V_o - M (K_C + K_L) \beta_o}{M K_q \beta_o}$$

$$f_4 = -\frac{M d_4 V_o}{K_q S_p \beta_o}$$



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6-ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ**

### **6.1 ΣΧΕΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ**

Για την δημιουργία ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου ενός υδραυλικού συστήματος εμβόλου – μάζας απαιτείται να γίνει σύγκριση της εξόδου με την είσοδο αναφοράς ή η ανατροφοδότηση των μεταβλητών κατάστασης και σύγκριση με την είσοδο αναφοράς. Αυτό γίνεται με την χρήση αισθητήρων. Στους αισθητήρες μια μη ηλεκτρικής μορφής ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα μετρώντας, με την ανίχνευση ή καταγραφή ενός σήματος ή μίας διέγερση.

### **6.2 ΧΡΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ**

Οι αισθητήρες εφαρμόζονται συνήθως σε δύο ξεχωριστές περιοχές, στις μετρήσεις και στον έλεγχο συστημάτων. Στην πρώτη περίπτωση δίνουν δεδομένα ώστε να γίνεται αντιληπτή η κατάσταση των παραμέτρων ενός συστήματος. Στην περίπτωση του ελέγχου συστημάτων το σήμα του αισθητήρα τροφοδοτείται ως σήμα εισόδου σε ένα ελεγκτή, ο οποίος δημιουργεί μια έξοδο που ρυθμίζει την τιμή της μετρούμενης παραμέτρου.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι αισθητήρες εφαρμόζονται σε δύο κατηγορίες συστημάτων, στα συστήματα μέτρησης και στα συστήματα ελέγχου.

Στα συστήματα μέτρησης εμφανίζουν ή καταγράφουν την έξοδο, χωρίς έλεγχο της τιμής της μετρούμενης ποσότητας εισόδου.

Στα συστήματα ελέγχου ανοικτού βρόγχου υπάρχει κάποια διάταξη ή ελεγκτής για τον άμεσο έλεγχο μιας διεργασίας χωρίς να υπάρχει ανάδραση. Σαν σήμα εισόδου έχουμε τη προκαθορισμένη τιμή της μεταβλητής που μας ενδιαφέρει, ενώ η ενέργεια που παρέχεται εισάγει την παράμετρο που πρέπει να ελέγχεται. Έτσι γίνεται ο έλεγχος της παραμέτρου που μας ενδιαφέρει σε σχέση με το σήμα εισόδου, χωρίς την επίδραση του σήματος εξόδου του συστήματος.

Στα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόγχου το σήμα εξόδου με χρήση ανάδρασης επιστρέφει στην είσοδο του συστήματος και γίνεται η σύγκριση του με το σήμα αναφοράς. Η διαφορά μεταξύ του σήματος αναφοράς και της ανάδρασης λέγεται σήμα σφάλματος και τροποποιείται για τη ρύθμιση της απόδοσης του συστήματος.

Από τα ανωτέρω φαίνεται η αναγκαιότητα των αισθητήρων στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου των υδραυλικών συστημάτων είτε για έλεγχο θέσης του υδραυλικού εμβόλου ή για έλεγχο της ταχύτητας του όπως διακρίνεται από την ανάλυση του κεφαλαίου 5.

### 6.3 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

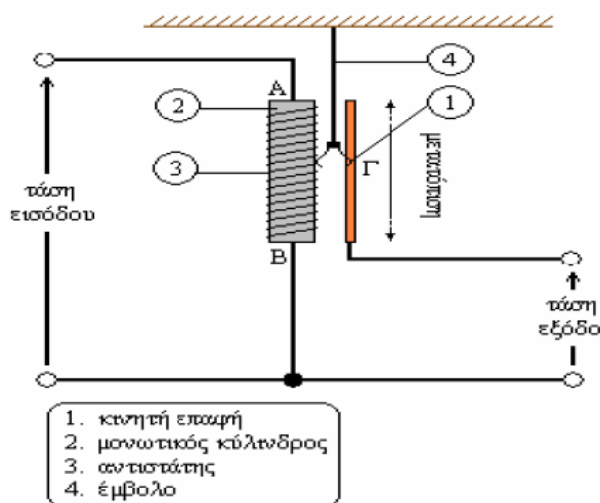
Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για να ανιχνεύουν τη θέση και τη κίνηση του εμβόλου, παράμετροι έχουν σημασία για ένα υδραυλικό σύστημα, καθώς προσδιορίζουν τη γενική κατάσταση του συστήματος. Στα επόμενα αναφέρονται οι κυριότεροι αισθητήρες μετατόπισης, [4].

Οι αισθητήρες μετατόπισης είναι οι εξής:

- Γραμμικό ποτενσιόμετρο
- Γωνιόμετρο μεταβλητής αντίστασης
- Γραμμικός διακόπτης με γλωσσίδα

Γραμμικό ποτενσιόμετρο

Το γραμμικό ποτενσιόμετρο αποτελείται από μια αντίσταση, μια κινητή επαφή, ένα μονωτικό κύλινδρο κι ένα έμβολο. Η μορφή του φαίνεται παρακάτω, [4].



Σχήμα 6.3.1: Γραμμικό ποτενσιόμετρο

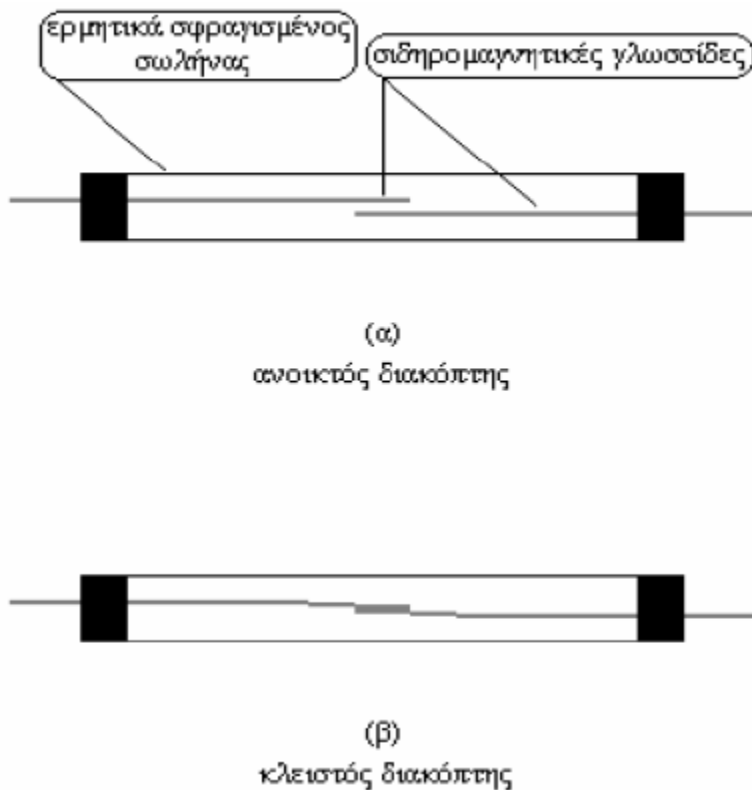


Τρόπος λειτουργίας, [4]:

Για την μέτρηση της μετατόπισης του εμβόλου εφαρμόζεται μια τάση εισόδου στο κύκλωμα. Όταν το έμβολο αλλάξει θέση, τότε παρασύρει και την κινητή επαφή η οποία ρυθμίζει την αντίσταση του ποτενσιόμετρου. Με αυτό το τρόπο, ανάλογα με την θέση του εμβόλου μεταβάλλεται και η αντίσταση του ποτενσιόμετρου και κατά συνέπεια η τάση εξόδου του κυκλώματος. Άρα η τάση εξόδου, η οποία μετράται με ένα βολτόμετρο, αντιπροσωπεύει την μετατόπιση του εμβόλου.

Γραμμικός διακόπτης με γλωσσίδα

Αυτός ο αισθητήρας αποτελείται από έναν λεπτό γυάλινο σωλήνα ο οποίος έχει μέσα μια ή δύο σιδηρομαγνητικές γλωσσίδες, [4].



Σχήμα 6.3.2: Γραμμικός διακόπτης με γλωσσίδα

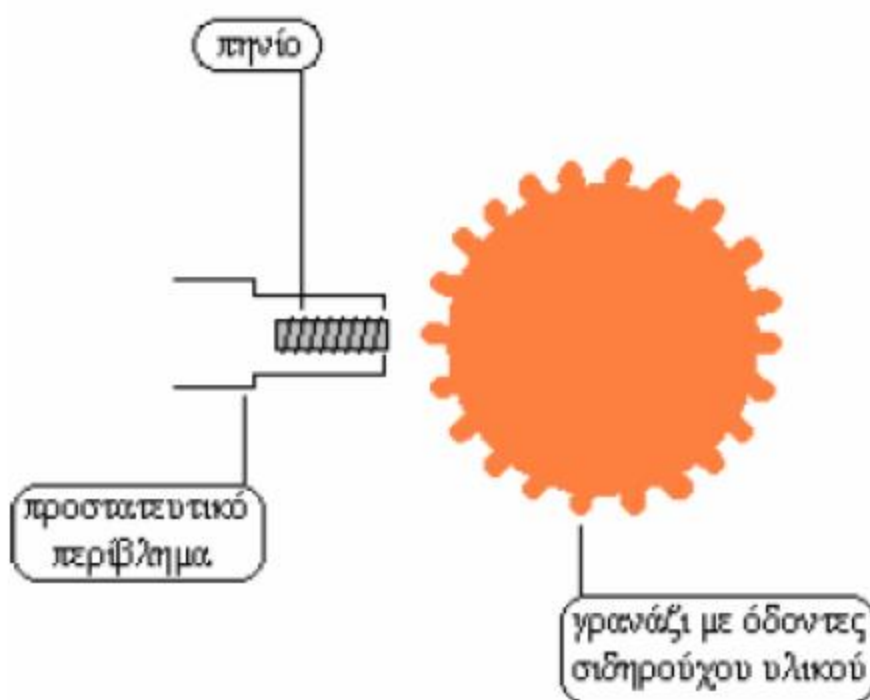
Τρόπος λειτουργίας, [4]:

Οι σιδηρομαγνητικές γλωσσίδες είναι λεπτές και ευλύγιστες έτσι ώστε με την εμφάνιση μαγνητικού πεδίου, αυτές να μαγνητίζονται μεταξύ τους. Έτσι μόλις πλησιάσει ένας μαγνήτης, τα άκρα των γλωσσίδων έλκονται μεταξύ τους και μόλις έρθουν σε επαφή, κλείνουν το κύκλωμα μέχρι να απομακρυνθεί ο μαγνήτης. Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο

μια γλωσσίδα αυτή εφάπτεται μόνο στην μία εκ των δύο επαφών που έχει. Μόλις πλησιάσει κάποιος μαγνήτης, η γλωσσίδα έλκεται με την δεύτερη επαφή και μόλις ακουμπήσουν μεταξύ τους κλείνει το κύκλωμα.

#### Γωνιόμετρο μεταβλητής αντίστασης

Το γωνιόμετρο μεταβλητής αντίστασης αποτελείται από ένα πηνίο το οποίο βρίσκεται μέσα σε ένα προστατευτικό περίβλημα και έναν γραναζωτό τροχό, του οποίου τα δόντια είναι κατασκευασμένα από σιδηρούχο υλικό, [4].



Σχήμα 6.3.3: Γωνιόμετρο μεταβλητής αντίστασης

Τρόπος λειτουργίας, [4]:

Καθώς ο τροχός περιστρέφεται, το πηνίο μπορεί να ανιχνεύσει την παρουσία των δοντιών του. Οπότε κάθε φορά που ένα δόντι πλησιάζει το πηνίο, το μαγνητικό πεδίο γύρω από αυτό μεταβάλλεται, με αποτέλεσμα να παράγεται μια τάση εξόδου. Η τάση εξόδου ανιχνεύεται με ένα βολτόμετρο, ένα αμπερόμετρο, ή σε μορφή παλμού.

Οι αισθητήρες ανίχνευσης έχουν την ιδιότητα να ανιχνεύουν την κίνηση ενός εμβόλου από απόσταση, χωρίς δηλαδή να είναι αναγκαία η επαφή τους με το έμβολο. Ο κάθε αισθητήρας

έχει συγκεκριμένη εμβέλεια κι αφού η ανίχνευση γίνεται από απόσταση, δεν αποτελείται από κινητά μέρη. Οι αισθητήρες ανίχνευσης διακρίνονται στις εξής κατηγορίες, [4]:

- Επαγωγικοί αισθητήρες
- Χωρητικοί αισθητήρες
- Μαγνητικοί αισθητήρες

#### Επαγωγικοί αισθητήρες

Οι επαγωγικοί αισθητήρες ανιχνεύουν αγωγή υλικά χωρίς επαφή με αυτά. Αυτό επιτυγχάνεται εξαιτίας του φαινομένου της επαγωγής. Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στην σύγχρονη βιομηχανία και στα υδραυλικά συστήματα, καθώς προσφέρουν ακρίβεια ενεργοποίησης, υψηλή συχνότητα, ενώ είναι ανθεκτικοί σε συνθήκες βιομηχανίας, δηλαδή σε δονήσεις, σκόνη, λάδια και υγρασία.

#### Χωρητικοί αισθητήρες, [4]:

Αυτοί οι αισθητήρες υπολογίζουν την μεταβολή της χωρητικότητας, η οποία προκαλείται από την εισαγωγή ενός αντικείμενου στο ηλεκτρικό πεδίο ενός πυκνωτή. Εξαιτίας της αρχής λειτουργίας του, οι χωρητικοί αισθητήρες δεν ανιχνεύουν αποκλειστικά αγωγή υλικά καθώς έχουν την δυνατότητα να ανιχνεύσουν επίσης μη αγωγή υλικά όπως ξύλο, γυαλί, πλαστικό, αλλά και διάφορα υγρά.

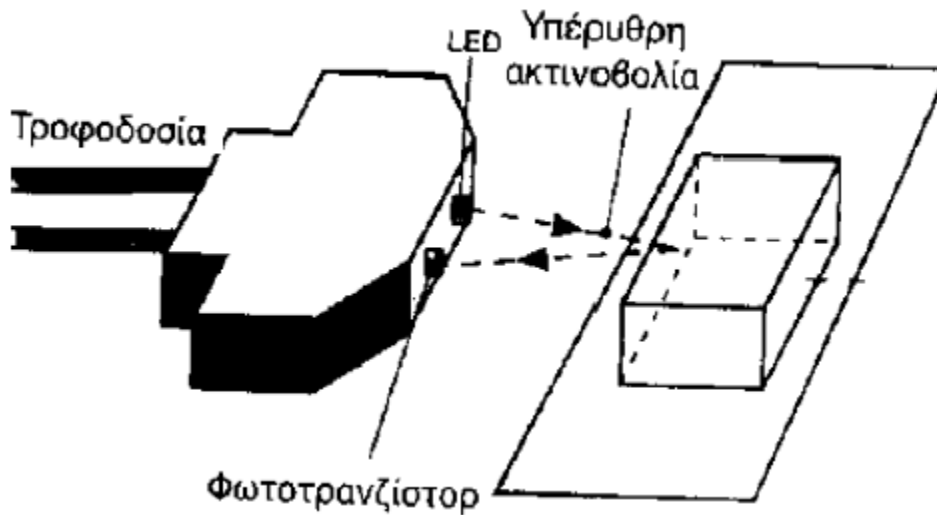
#### Μαγνητικοί αισθητήρες, [4]:

Οι μαγνητικοί αισθητήρες βασίζονται στην σχέση μεταξύ μαγνητικών και ηλεκτρικών φαινομένων. Ανιχνεύουν μεταλλικά αντικείμενα από απόσταση όπως οι επαγωγικοί, ωστόσο η εμβέλειά τους είναι πολύ μεγαλύτερη. Αποτελούνται από ένα πηνίο το οποίο είναι τυλιγμένο γύρω από ένα μαγνήτη και το σύστημα ανίχνευσης. Εξαιτίας της αξιοπιστίας τους, της σταθερότητάς τους και του χαμηλού κόστους τους, οι μαγνητικοί αισθητήρες έχουν βοηθήσει ιδιαίτερα στην υψηλή παραγωγικότητα των βιομηχανιών.

#### Οπτικοί αισθητήρες, [4]:

Οι οπτικοί αισθητήρες αποτελούνται από μία πηγή φωτός η οποία συνήθως είναι μια φωτοδίοδος LED και έναν ανιχνευτή φωτός όπως είναι και τα φωτοτρανζίστορ. Τα πιο συνηθισμένα είδη οπτικών αισθητήρων είναι ο αισθητήρας ανακυκλούμενης δέσμης όπου το φως που εκπέμπεται από την πηγή, αντανακλάται στο αντικείμενο που πλησιάζει τον αισθητήρα και έπειτα ανιχνεύεται από το φωτοτρανζίστορ και ο αισθητήρας διαπερατότητας

όπου το αντικείμενο ανιχνεύεται καθώς εισβάλλει ανάμεσα στη πηγή και τον ανιχνευτή και διακόπτει τη δέσμη μεταξύ τους. Αυτοί οι αισθητήρες είναι περιζήτητοι σε συστήματα συναγερμού κι ελέγχου ποιότητας, [4].

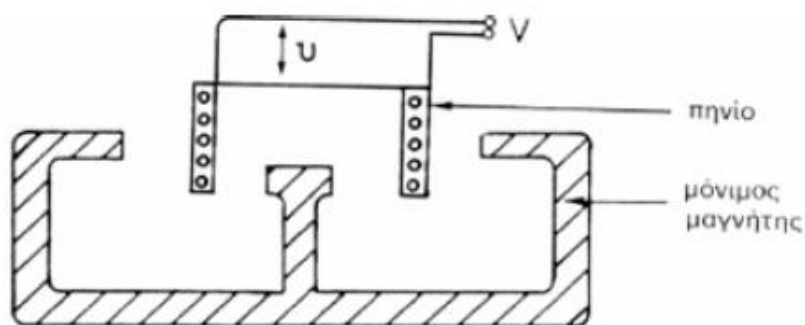


Σχήμα 6.3.4: Οπτικοί αισθητήρες

## 6.4 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Ακολουθούν στα επόμενα οι κύριες μέθοδοι μέτρησης ταχύτητας, [5].

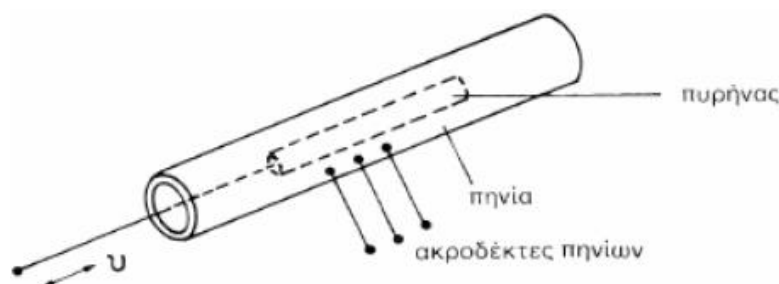
Στη μέθοδο μέτρησης με χρήση μετατροπέων χρησιμοποιούνται ηλεκτρομηχανικού τύπου μετατροπείς, δηλαδή κινητού πηνίου ή κινητού μαγνήτη. Η λειτουργία τους βασίζεται στο νόμο επαγωγής του Faraday. Βασίζονται στην επαγωγική τάση που αναπτύσσεται στο πηνίο όταν υπάρχει σχετική κίνηση αυτού ως προς τον πυρήνα που είναι ένας μόνιμος μαγνήτης. Η τάση αυτή έχει μέτρο :  $V = B \times l \times U$  , όπου B είναι η μαγνητική επαγωγή και l το μήκος του πηνίου, ενώ U είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ πηνίου και μαγνήτη. Δεδομένου του ότι το μήκος του πηνίου και η μαγνητική επαγωγή του είναι σταθερά, η επαγωγική τάση είναι ανάλογη της ταχύτητας. Ο μετατροπέας κινητού πηνίου έχει την παρακάτω μορφή, [5].



Σχήμα 6.4.1: Μετατροπέας κινητού πηνίου

Χρησιμοποιείται πηνίο από λεπτό σύρμα ώστε να αυξηθεί η ευαισθησία του μετατροπέα, ενώ χάρη στην ύπαρξη μόνιμου μαγνήτη δημιουργείται η μέγιστη δυνατή μαγνητική επαγωγή. Στην περίπτωση αυτή, διατηρώντας ακίνητο το μόνιμο μαγνήτη η μετακίνηση του πηνίου οδηγεί στην εμφάνιση της επαγωγικής τάσης  $V$  στα άκρα του.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση του μετατροπέα ταχύτητας κινητού μαγνήτη η κατασκευή είναι διαφορετική, έτσι ώστε το κινητό μέρος πλέον να είναι ο μαγνήτης και όχι το πηνίο. Η μορφή του μετατροπέα αυτού φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, [5]:



Σχήμα 6.4.2: Μετατροπέας κινητού μαγνήτη

Η στροβοσκοπική μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας στηρίζει τη λειτουργία της στο στροβοσκοπικό φαινόμενο, το οποίο παρατηρείται εξαιτίας του τρόπου που συλλαμβάνουμε και αντιλαμβανόμαστε οπτικά την κίνηση ενός σώματος, [5]. Το οπτικό νεύρο μεταφέρει στον εγκέφαλο μια σειρά από διαδοχικές εικόνες που ενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας μέσω της διαφορετικής θέσης του παρατηρούμενου αντικείμενου την εικόνα της κίνησής του. Στην περίπτωση μιας περιοδικής κίνησης αν η συχνότητα της κίνησης είναι ίδια με εκείνη της λήψης των εικόνων από το οπτικό νεύρο, τότε το αντικείμενο που κινείται θα φαίνεται ακίνητο, καθώς δε θα παρατηρείται καμία διαφορά στην κατάστασή του.

Το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιείται σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, όπου χρησιμοποιούνται ειδικά όργανα που λέγονται στροβοσκόπια (stroboscopes ή strobes). Υπάρχουν δύο τύποι στροβοσκοπίων, τα μηχανικά και τα ηλεκτρονικά. Τα μηχανικά αποτελούνται συνήθως από

ένα δίσκο στην περιφέρεια του οποίου υπάρχουν σχισμές ίδιου μεγέθους και σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις. Ο δίσκος παρεμβάλλεται στο οπτικό πεδίο του παρατηρητή και περιστρέφεται με τη βοήθεια ενός άξονα. Η παρατήρηση του αντικειμένου γίνεται μέσω των οπών στο δίσκο, ενώ αν δεν υπάρχει ευθυγράμμιση μεταξύ σχισμής, ματιού και κινούμενου αντικειμένου αυτό δεν είναι ορατό. Στα ηλεκτρονικά στροβοσκόπια αντί του δίσκου χρησιμοποιείται μια πηγή φωτός που μπορεί να αναβοσβήνει με μεγάλη συχνότητα. Συνήθως προτιμούνται λάμπες αερίου (gas-discharge lamps) ή LEDs (light emitting diodes), γιατί ανάβουν και σβήνουν σχεδόν στιγμιαία (χωρίς να υπάρχει καθυστέρηση) όταν εφαρμόζεται σε αυτές τάση και όταν σταματάει να εφαρμόζεται αντίστοιχα. Έστω ένα σώμα το οποίο περιστρέφεται ή δονείται με συχνότητα περιστροφής  $f_p$  και φωτίζεται από ένα ηλεκτρονικό στροβοσκόπιο με λάμπα που αναβοσβήνει με συχνότητα  $f$ . Όταν η πηγή φωτός αποκτήσει συχνότητα εκπομπής ίση ή ακέραιο πολλαπλάσιο της  $f_p$  ( $f = k \times f_p$ , όπου  $k$  ακέραιος αριθμός) τότε το σώμα αυτό θα φαίνεται ακίνητο. Η μέτρηση της ταχύτητας πραγματοποιείται με τη μεταβολή της συχνότητας  $f$  έως ότου κάποιο σημάδι (που ορίζεται για το λόγο αυτό) στο κινούμενο σώμα φανεί ακίνητο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν είναι  $f > f_p$  δημιουργείται οπτικά η ψευδαίσθηση ότι το σώμα κινείται αντίστροφα, ενώ αν είναι  $f \ll f_p$  το σώμα φαίνεται να κινείται σε αργή κίνηση (slow motion).

Στον υπολογισμό ταχύτητας με χρήση κωδικοποιητών, [5], χρησιμοποιούνται κυρίως οπτικοί γραμμικοί κωδικοποιητές θέσης. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι τέτοιων κωδικοποιητών, οι κωδικοποιητές αυξητικού τύπου και απόλυτου τύπου. Οι πρώτοι αποτελούνται από μία πηγή φωτός, μια μακρόστενη μεταλλική πλάκα και ένα αισθητήριο που χρησιμοποιείται σαν δέκτης και είναι συνήθως μια φωτοδίοδος ή ένα φωτοτρανζίστορ. Η μεταλλική πλάκα έχει κατά μήκος οπές ίσες σε μέγεθος και σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις. Κατά μήκος της πλάκας ολισθαίνει ο παλμοδότης, ενώ αυτή παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής φωτός και του αισθητηρίου. Το φωτοευαίσθητο υλικό συνδέεται κατάλληλα με κύκλωμα στην έξοδο του οποίου ελέγχεται η τάση. Έτσι όταν η πηγή φωτός εκπέμπει μια λεπτή δέσμη φωτός, αν ο παλμοδότης βρίσκεται μπροστά από οπή το αισθητήριο θα άγει δίνοντας υψηλή τάση εξόδου, ενώ αν βρίσκεται σε συμπαγές σημείο της πλάκας η τάση εξόδου θα είναι χαμηλή. Επομένως με την κίνηση του παλμοδότη κατά μήκος της πλάκας, στην έξοδο θα δίνεται μια τάση με τη μορφή παλμών. Αφού κάθε παλμός αντιστοιχεί σε πέρασμα του παλμοδότη από μία οπή, τότε το σύνολο των παλμών στην έξοδο αντιστοιχεί στον αριθμό των οπών που κινήθηκε αυτός. Δεδομένου του ότι η μεταξύ των οπών απόσταση είναι γνωστή, η συνολική απόσταση που διανύθηκε ισούται με το γινόμενο του αριθμού των παλμών με το μέτρο της απόστασης

μεταξύ των οπών. Η διακριτική ικανότητα της διάταξης ισούται με την μεταξύ δύο οπών απόσταση και έχει καλύτερη τιμή όσο μικρότερη είναι αυτή. Για να είναι εφικτός ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης της κίνησης χρησιμοποιείται και ένα δεύτερο σύστημα πηγής φωτός-αισθητήριου το οποίο είναι μετατοπισμένο σε σχέση με το πρώτο κατά  $\frac{1}{4}$  της απόστασης των οπών. Έτσι έχουμε και μια δεύτερη παλμοσειρά στην έξοδο με διαφορά φάσης  $90^\circ$  από την πρώτη, η οποία είτε προηγείται είτε ακολουθεί την πρώτη, ανάλογα με την κατεύθυνση της κίνησης του παλμοδότη. Η πληροφορία της κατεύθυνσης τροφοδοτείται στον απεριθμητή παλμών και αξιοποιείται για τη μέτρηση της μετατόπισης με αφαίρεση παλμών από τη μέτρηση στην περίπτωση που αλλάζει η φορά της κίνησης. Η μέτρηση της ταχύτητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους. Είτε μετρώντας τη μετατόπιση σε ορισμένο χρονικό διάστημα, είτε μετρώντας την περίοδο μιας εκ των δύο παλμοσειρών, αφού είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας.

Η διάταξη για τον γραμμικό κωδικοποιητή απόλυτου τύπου ενώ έχει παρόμοια λειτουργία παρουσιάζει κάποιες μεγάλες διαφορές. Η πρώτη έχει να κάνει με το σχεδιασμό της πλάκας, η οποία χαράζεται με πιο πολύπλοκο τρόπο.

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές οριζόντιες γραμμές εγκοπών κάθετα στις οποίες κινείται ένα κινητό στέλεχος με τρεις οπές (οφθαλμούς). Σε κάθε θέση η δέσμη φωτός που εκπέμπεται δημιουργεί ένα παλμό που εκφράζεται σαν τριψήφιος δυαδικός αριθμός δίνοντας για κάθε γραμμή ένδειξη 1 ή 0 ανάλογα με το αν το κινητό στέλεχος βρίσκεται σε οπή ή όχι της γραμμής αυτής. Έτσι, η κάθε θέση αντιστοιχίζεται με ένα διαφορετικό δυαδικό αριθμό, ο οποίος εκφράζει και τη μετατόπιση του κινητού στελέχους από την αρχή της πλάκας. Ο αριθμός αυτός διαβάζεται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η μέτρηση της ταχύτητας πραγματοποιείται μέσω της τιμής της μετατόπισης σε ορισμένο χρονικό διάστημα.

Γενικά ισχύει ότι διακριτική του ικανότητα είναι ίση με το λόγο του μήκους μέτρησης προς  $2n$ , όπου  $n$  ο αριθμός των οφθαλμών που χρησιμοποιούνται. Επομένως ο αισθητήρας αυτός χρησιμοποιείται μόνο για μικρές αποστάσεις, αφού για την επίτευξη μέτρησης με μεγάλη διακριτική ικανότητα σε μεγάλη απόσταση απαιτείται η χρήση πολλών οφθαλμών, κάνοντας το όργανο πολύπλοκο και μεγαλώνοντας το κόστος και τις διαστάσεις του. Αυτός είναι και ο λόγος που προτιμούνται οι κωδικοποιητές αυξητικού τύπου.

## 6.5 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΠΙΕΣΗΣ

Η πίεση ορίζεται σαν η εξασκούμενη δύναμη σε μια επιφάνεια δια της επιφάνειας αυτής, επομένως για να μετρηθεί η πίεση αρκεί να μετρηθεί η δύναμη που εξασκεί αυτή πάνω σε μια γνωστή επιφάνεια .

Έτσι τα περισσότερα αισθητήρια πίεσης χρησιμοποιούνται κατά βάση κάποιο αισθητήριο δύναμης.

Συσκευές μέτρηση πίεσης, [6].

Οι διάφορες συσκευές για μέτρηση και έλεγχο πίεσης χωρίζονται σε δύο βασικούς τύπους:

Στον τύπο σύγκρισης δύναμης. Χρησιμοποιούνται μανόμετρα και διατάξεις ζύγισης, όπου η πίεση μετριέται μέσω της δύναμης που εξασκείται σε μια επιφάνεια γνωστού εμβαδού.

Στον τύπο ελαστικής παραμόρφωσης. Χρησιμοποιούνται ελαστικά μηχανικά στοιχεία τα οποία παραμορφώνονται κάτω από την επίδραση της πίεσης, Με την βοήθεια της παραμόρφωσης ενεργοποιείται ηλεκτρικός διακόπτης που αυτός με τη σειρά του δίνει ηλεκτρική πληροφορία στο σύστημα ελέγχου.

Στην κατηγορία των μετρητών πίεσης τύπου ελαστικής παραμόρφωσης ανήκουν οι πιεσοστάτες.

Ο πιεσοστάτης είναι αυτόματος ηλεκτρικός διακόπτης που ενεργοποιείται με τη μεταβολή της πίεσης.

Τα κύρια μέρη του πιεσοστάτη είναι :

- Το αισθητήριο πίεσης: Το αισθητήριο είναι το μέρος εκείνο του πιεσοστάτη, που αντιλαμβάνεται τη μεταβολή της πίεσης και προκαλεί το άνοιγμα ή κλείσιμο μιας επαφής. Συνήθως το αισθητήριο αποτελείται από μια μεμβράνη η οποία ανάλογα με τη μεταβολή της πίεσης εκτείνεται ή συστέλλεται .

- Ο διακόπτης: Ο διακόπτης του πιεσοστάτη είναι συνήθως μεταγωγική ηλεκτρική επαφή ή μια ανοικτή και μια κλειστή επαφή (N.O. – N.C.).



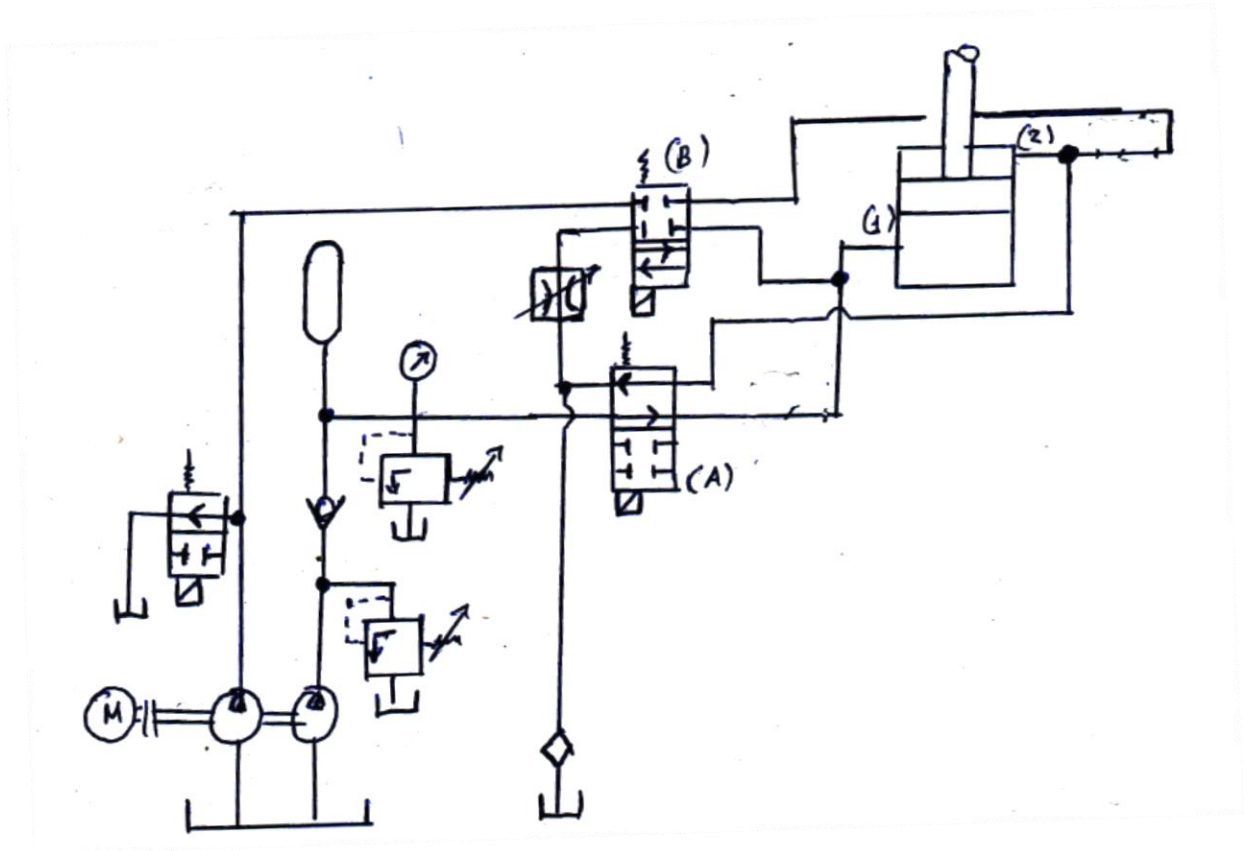
- Μηχανισμός ρύθμισης πίεσης: Έχει τη δυνατότητα με ρυθμιστικούς κοχλίες να ρυθμίζει την ανώτερη και την κατώτερη στάθμη πίεσης στην οποία ανοίγει ή κλείνει τις επαφές του διακόπτη του.
- Βάση ή πλαίσιο: Η βάση του είναι κατάλληλα διαμορφωμένη, ώστε τόσο να συγκρατεί τα εξαρτήματά του, όσο και να προσαρμόζεται – συνδέεται στο ελεγχόμενο δίκτυο πίεσης.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7-ΒΑΣΙΚΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

## 7.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΒΑΣΙΚΟΥ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το σημείο θα γίνει η περιγραφή του βασικού υδραυλικού συστήματος επιτραπέζιας επιφάνειας που οδηγείται από υδραυλικό έμβολο (παράδειγμα μία υδραυλική πλατφόρμα αναβατόριου). Αυτό το σύστημα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (για τη φάση ανόδου του εμβόλου):



Σχήμα 7.1.1: Το υδραυλικό σύστημα

Έχουμε δύο αντλίες, μία για την ανοδική και μία για την καθοδική κίνηση της τράπεζας. Διακρίνονται οι βαλβίδες ελέγχου υπερπίεσης, η βαλβίδα ρύθμισης ροής για την καθοδική κίνηση του εμβόλου, οι ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες δύο θέσεων (μία στο κύκλωμα προσαγωγής και μία στο κύκλωμα επιστροφής), η βαλβίδα by-pass και ο ταμιευτήρας. Κατά την ανοδική κίνηση του εμβόλου το ρευστό μέσω της αντλίας προσαγωγής ρέει μέσω της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας (A) στην είσοδο του κυλίνδρου (1) και από την έξοδο του κυλίνδρου (2) κατευθύνεται μέσω της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας (A) στη δεξαμενή

Κατά την κάθοδο του εμβόλου το ρευστό ρέει μέσω της αντλίας επιστροφής και της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας (B) στην έξοδο του κυλίνδρου (2) και από την είσοδο του κυλίνδρου (1) κατευθύνεται μέσω της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας (B) στην δεξαμενή.

Και οι δύο ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες έχουν θέση διακοπής της ροής στην οποία διακόπτεται η κίνηση του εμβόλου και σταθεροποιείται η τράπεζα.

## **7.2Η ΕΞΙΣΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΒΑΛΒΙΔΑΣ**

Για την ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα ισχύει η ακόλουθη εξίσωση δυναμικής που συνδέει την εφαρμοζόμενη τάση στην είσοδο της με την μετατόπιση του στελέχους της όπου  $m$ ,  $c$ ,  $k_v$  είναι κατάλληλοι συντελεστές:

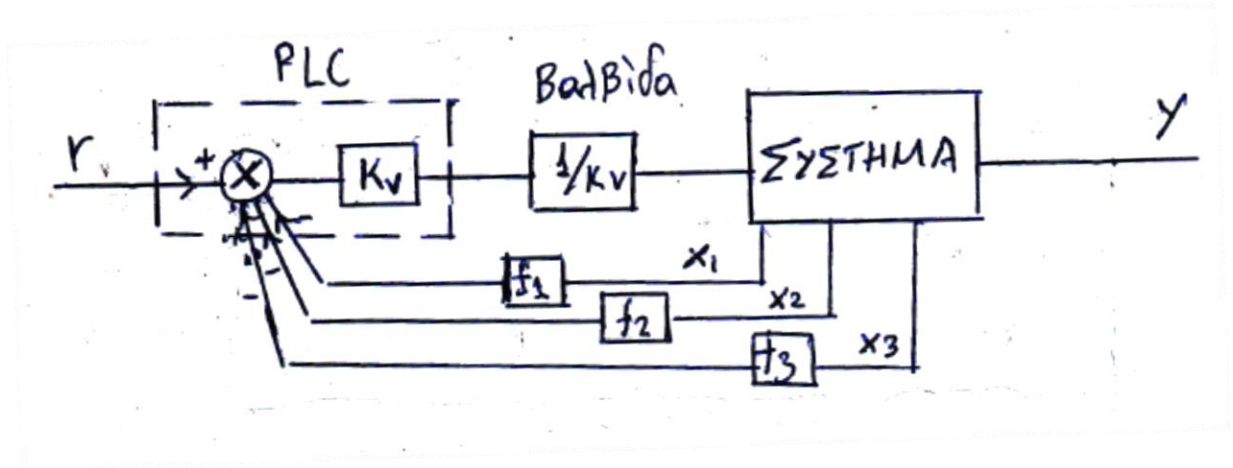
$$u(t) = m\ddot{\Delta x} + c\dot{\Delta x} + k_v\Delta x \quad (7.2.1)$$

Αυτή η εξίσωση είναι δευτέρου βαθμού και αν θεωρηθεί σαν είσοδος του συστήματος ελέγχου η τάση εισόδου στη βαλβίδα η τάξη του συστήματος αυξάνει κατά δύο σε σχέση με τα αναφερόμενα στα κεφάλαια 4 και 5. Βέβαια στην πράξη η απόκριση του στελέχους της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας είναι ταχύτατη οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε μηδενικούς τους όρους 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης χωρίς σημαντικό σφάλμα.

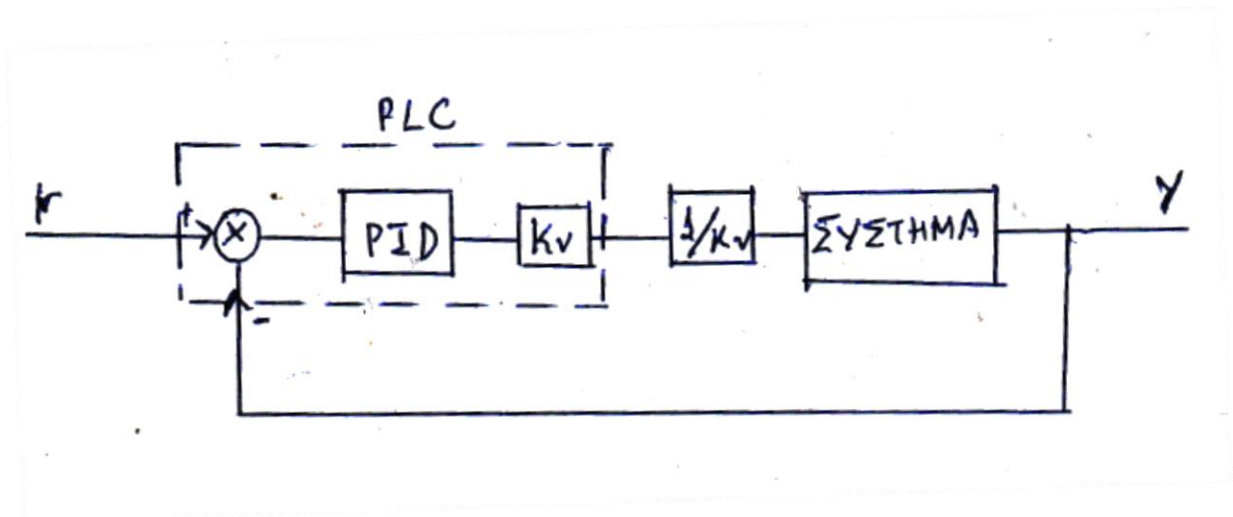
## **7.3 ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ**

Στην περίπτωση που οι όροι 2<sup>ης</sup> και 1<sup>ης</sup> τάξης στην εξίσωση 7.2.1 είναι μικροί, όπως ισχύει συνήθως στην πράξη καθώς η απόκριση της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας είναι ταχύτατη, η εξίσωση 7.2.1 μετασχηματίζεται σε μία απλή αναλογική σχέση μεταξύ τάσης εισόδου και μετατόπισης στελέχους της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας με σταθερά αναλογίας  $k_v$ . Σε αυτή την περίπτωση για είσοδο ένα σήμα αναφοράς και έξοδο από το PLC την τάση εισόδου στην ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, μπορεί να εφαρμοστούν για τα συνήθη μήκη σωληνώσεων τα εκτεθέντα στο κεφάλαιο 5 στις παραγράφους 5.5 και 5.6. Η υλοποίηση του συστήματος φαίνεται στα επόμενα σχήματα όπου οι εισοδοί είναι όλες PLC αναλογικές, και η έξοδος από το PLC είναι το αναλογικό σήμα τάσης εισόδου στην ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, όλες δε οι αλγεβρικές πράξεις ελέγχου πραγματοποιούνται με κώδικα εντός του PLC το οποίο στην περίπτωση του PID ελέγχου έχει ενσωματωμένο τον PID ελεγκτή, [7]. Ο έλεγχος μέσω του

PLC γίνεται μόνο για την φάση ανόδου του εμβόλου καθώς για την κάθοδο ο έλεγχος της ταχύτητας του εμβόλου γίνεται μέσω της βαλβίδας ρύθμισης της ροής



Σχήμα 7.3.1: Έλεγχος ταχύτητας ανόδου εμβόλου με ανατροφοδότηση μεταβλητών κατάστασης



Σχήμα 7.3.2: Έλεγχος ταχύτητας ανόδου του εμβόλου με PID έλεγχο

Στην περίπτωση που οι όροι  $2^{ης}$  και  $1^{ης}$  τάξης στην εξίσωση 7.2.1 δεν μπορούν να αμεληθούν στο σύστημα ελέγχου εισάγονται δύο νέες επιπλέον μεταβλητές κατάστασης οι  $\Delta x_v$  και  $\Delta \dot{x}_v$

και για τον έλεγχο του συστήματος με έξοδο από το PLC την τάση εισόδου στην ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα μπορούν να εφαρμοστούν τα αναφερόμενα στις παραγράφους 5.2, 5.3 και 5.4 όπου οι πίνακες A, B, C, D του συστήματος λαμβάνουν υπόψη και τις νέες μεταβλητές κατάστασης και την είσοδο τάσης στην ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στην παρούσα εργασία έγινε εκτεταμένη ανάλυση του τρόπου ελέγχου ενός υδραυλικού συστήματος εμβόλου που οδηγεί ανοδικά μία επιφάνεια. Καταλήξαμε σε συμπεράσματα σαφή όσον αφορά τις παραμέτρους του ελεγκτή για τον απαιτούμενο έλεγχο. Απομένει να εξετασθεί η περίπτωση που οι όροι 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης της μοντελοποίησης της σχέσης τάσης μετατόπισης στελέχους της βαλβίδας δεν είναι αρκετά μικροί και η εξαγωγή αντίστοιχων συμπερασμάτων





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Παναγιωτόπουλος Νικόλαος. «Υδροστατικές Μεταδόσεις Κίνησης». Εκδόσεις ΖΗΤΗ
2. Κωστόπουλος Θ.Ν. «Υδραυλικά και Πνευματικά Συστήματα». Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ
3. Σκαρπέτης Μιχάλης, Κουμπουλής Φώτης. «Αυτόματος Έλεγχος Υδραυλικών και Πνευματικών Συστημάτων». Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα
4. Αλειφτήρας Ανδρέας. «Βιομηχανική Χρήση και Αυτόματος Έλεγχος Υδραυλικών Συστημάτων». Πτυχιακή Εργασία. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής. Σχολή Μηχανικών. Τμήμα Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, 2018
5. Φραγκιαδάκης Νικόλαος. «Αισθητήρες Ταχύτητας». Πτυχιακή Εργασία. ΤΕΙ Κρήτης. Τμήμα Ηλεκτρονικής
6. Λιούσας Βασίλης. «Αισθητήρες Πίεσης». Σημειώσεις Εργαστηρίου Βιομηχανικών Μετρήσεων και Αυτομάτου Ελέγχου. ΤΕΙ Σερρών
7. Αλαφοδήμος Κωνσταντίνος. «Βιομηχανικοί Ελεγκτές». Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά. Τ.Τ. Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών. Τμήμα Αυτοματισμού Τ.Ε.
8. Κρικέλης Νικόλαος. «Μοντελοποίηση και Βέλτιστος Έλεγχος Συστημάτων». Εκδόσεις Φούντας