



Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ.

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΕΜΒΟΛΩΝ ΜΕ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ**

ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΤΣΩΝΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: ΜΙΧΑΛΗΣ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νοέμβριος 2016

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Χριστίνα Τσώνη, του Ηλία, με αριθμό μητρώου 33382 φοιτήτρια του Τμήματος **Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε.** του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. 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.»

Επίσης δηλώνω υπεύθυνα ότι έχω παρακολουθήσει το σεμινάριο συγγραφής και εκπόνησης πτυχιακής εργασίας που διοργανώνεται από το Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε. κατά το Χειμερινό/Εαρινό Εξάμηνο του Ακ. Έτους 2016-2017

Η Δηλούσα

Ημερομηνία

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή

1.1 Πνευματικά Συστήματα	2
1.1.1 Ιστορική Αναδρομή	2
1.1.2 Περιγραφή	3
1.1.3 Στοιχεία Κίνησης	6
1.1.4 Στοιχεία Ελέγχου	11
1.2 Ελεγκτές Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Προσομοίωση Κλασικών Μεθόδων Ελέγχου

2.1 Μαθηματικό μοντέλο Πνευματικού Συστήματος	21
2.2 Προσομοίωση Συστήματος με Αναλογικό (P) Ελεγκτή	22
2.3 Προσομοίωση Συστήματος με Αναλογικό-Διαφορικό (PD) Ελεγκτή	27
2.4 Προσομοίωση Συστήματος με Αναλογικό-Ολοκληρωτικό-Διαφορικό (PID) Ελεγκτή	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Αποτελέσματα και Μελλοντικές Βελτιώσεις Συστήματος

3.1 Βέλτιστη λύση κλασικών μεθόδων ελέγχου	37
3.2 Μελλοντικές βελτιώσεις	38
3.2.1 Ελεγκτής ασαφούς λογικής	38
3.2.2 Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής (LVDT)	39

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	42
---------------------------	-----------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή

1.1 Πνευματικά Συστήματα

Ο όρος των πνευματικών συστημάτων χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα συστήματα αυτοματισμού κίνησης, τα οποία χρησιμοποιούν ως ενεργειακό μέσο τον πεπιεσμένο αέρα και έχουν ως τελικό αποτέλεσμα την παλινδρομική κίνηση εμβόλων ή σπανιότερα την περιστροφή κινητήρων [1].

1.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Ο όρος των πνευματικών συστημάτων παραπέμπει στην λέξη “πνεύμα”, που στα αρχαία ελληνικά σημαίνει άνεμος και αέρας. Τα πνευματικά συστήματα χρησιμοποιούν πεπιεσμένο αέρα σαν ένα μέσο μεταφοράς, το οποίο χρησιμοποιούσαν οι άνθρωποι από αρχαιοτάτων χρόνων. Οι ανεμόμυλοι και τα πανιά των πλοίων είναι κάποια από τα παραδείγματα χρήσης αέρα και εκμετάλλευσης της ενέργειάς του. Οι πρωτοπόροι μηχανικοί της αρχαιότητας πειραματίζονταν με τον πεπιεσμένο αέρα, γιατί θεωρούσαν ότι η ενέργεια που περιέχεται στον αέρα θα αυξανόταν αν συγκέντρωναν περισσότερο αέρα στον ίδιο χώρο. Για το λόγο αυτό ανακαλύφθηκαν πληθώρα συσκευών που χρησιμοποιούν αέρα για την λειτουργία τους, δημιουργώντας μια μεγάλη ποικιλία συστημάτων αυτοματισμού που χρησιμοποιούν πνευματικά συστήματα.

Ο πρώτος μηχανικός ήταν ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς, ο οποίος δημιούργησε πολλές μηχανικές κατασκευές στις οποίες χρησιμοποιούσε πεπιεσμένο αέρα. Πέραν όμως των κατασκευών του άφησε και ένα άφθονο συγγραφικό έργο, στο οποίο εξηγούσε απλουστευμένα την θεωρία της λειτουργίας των συγκεκριμένων κατασκευών.

Το 1650, ο Γερμανός μηχανικός και φυσικός Otto von Guericke έθεσε σε λειτουργία την πρώτη αντλία αέρα. Η συγκεκριμένη αντλία είχε την δυνατότητα να δημιουργεί κενό αέρος σε διάφορα δοχεία και για αυτό το λόγο έδωσε την ευκαιρία στον Otto von Guericke να μελετήσει τον ρόλο του πεπιεσμένου αέρα με την χρησιμοποίηση του σε διάφορες εφαρμογές.

Το 1829, κατοχυρώθηκε για πρώτη φορά μία ευρεσιτεχνία για συμπιεστή αέρος. Ο πρώτος αυτός συμπιεστής αέρος είχε την ικανότητα να συμπιέζει τον αέρα σε διαδοχικούς κυλίνδρους.

Το 1871, εφευρέθηκε το πρώτο πνευματικό εργαλείο, το οποίο ήταν ένα πνευματικό τρυπάνι και ακολούθως το 1872, εμφανίστηκαν για πρώτη φορά οι υδρόψυκτοι συμπιεστές αέρος.

Τον 19ο αιώνα, εφευρέθηκαν για πρώτη φορά οι πνευματικοί σωλήνες, οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στις τηλεπικοινωνίες για μεταφορά μηνυμάτων και τηλεγραφημάτων.

Τον 20ο αιώνα ανακαλύφθηκαν πάρα πολλές συσκευές που χρησιμοποιούν αέρα για την λειτουργία τους και έδωσαν την ευκαιρία σε μηχανικούς να δημιουργήσουν μια μεγάλη

ποικιλία συστημάτων αυτοματισμού που χρησιμοποιούν τα πνευματικά συστήματα. Τα πνευματικά συστήματα χρησιμοποιούνται με αυξανόμενους ρυθμούς στην σύγχρονη βιομηχανία παρέχοντας πολλά πλεονεκτήματα και αποτελούν πλέον μέρος της καθημερινότητας των ανθρώπων [2].

1.1.2 Περιγραφή

Τα πνευματικά συστήματα είναι οι αυτοματισμοί εκείνοι, οι οποίοι χρησιμοποιούν ως ενεργειακό μέσο τον πεπιεσμένο αέρα και έχουν ως τελικό αποτέλεσμα την παλινδρομική κίνηση ενός εμβόλου ή την περιστροφή ενός κινητήρα.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των πνευματικών συστημάτων αυτοματισμού είναι τα εξής:

- Παρέχουν εύκολη αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας, υψηλού όμως κόστους παραγωγής.
- Παράγουν μια απλή και χαμηλού κόστους γραμμική κίνηση, με σχετικά μεγάλες ταχύτητες ($1 \div 2$ m/sec), αλλά με περιορισμένη απόσταση (2 m) και με περιορισμένη δύναμη (3000 Kp).
- Χρησιμοποιούν στοιχεία του αυτοματισμού τα οποία είναι αντιακρηκτικά, δηλαδή δεν κινδυνεύουν από υπερφόρτιση και μπορούν και εργάζονται σε μη κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος.
- Διαθέτουν τη δυνατότητα εύκολης ρύθμισης ταχύτητας αλλά και δύναμης.
- Διαθέτουν την δυνατότητα εύκολης συντήρησης.
- Δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον.

Οι συμβατικοί πνευματικοί αυτοματισμοί (Pneumatics) χρησιμοποιούν συνήθως αέρα μέσης πίεσης $1.5 \div 12$ At. Ενώ οι πνευματικοί αυτοματισμοί χαμηλής πίεσης (Fluidics), χρησιμοποιούν αέρα πίεσης μικρότερης των 1.5 At και το αποτέλεσμα τους προέρχεται από μια δυναμική σχέση πιέσεων.

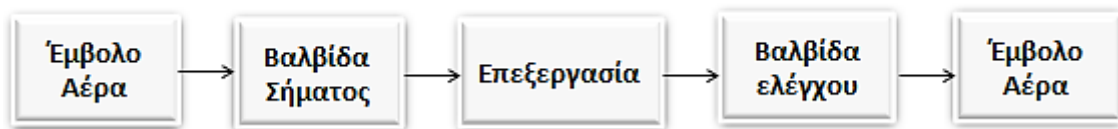
Ο πεπιεσμένος αέρας παράγεται στους αεροσυμπιεστές (Compressors) και δια μέσου απλών σωληνογραμμών ή και δικτύου παρέρχεται στο σύστημα αυτοματισμού.

Τα σημαντικότερα στοιχεία για την σύνθεση ενός συστήματος πνευματικού αυτοματισμού μπορούν καταταχθούν στις εξής ομάδες:

- Παροχής και επεξεργασίας πεπιεσμένου αέρα (Power Unit).
- Βαλβίδων σήματος παροχής αέρα (Signal).

- Βαλβίδων επεξεργασίας σήματος όπως είναι, η χρονοβαλβίδα, ο ρυθμιστής πίεσης και ο ρυθμιστής παροχής (Processing).
- Κεντρικών βαλβίδων ελέγχου κατεύθυνσης (Control Valve).
- Εμβόλων αέρος, τα οποία παρέχουν και την τελική μορφή κίνησης (Drive Control).

Τα στοιχεία του αυτοματισμού συνδέονται σε λειτουργικά σύνολα, καθώς και απεικονίζονται σε ειδικά διαγράμματα, που ονομάζονται Πνευματικά Διαγράμματα. Σε ένα σύστημα πνευματικού αυτοματισμού, η γενική ροή που ακολουθείται παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 1: Λογικό Διάγραμμα ενός Πνευματικού Συστήματος

Η επεξεργασία και η παροχή του πεπιεσμένου αέρα θεωρούνται στοιχεία του αυτοματισμού, για το λόγο ότι σε κάθε πνευματικό κύκλωμα προηγείται μια προπαρασκευή του παρεχόμενου από το συμπιεστή αέρα, ώστε αυτός να είναι κατάλληλος από πλευράς πίεσης, καθαρότητας, καθώς και λίπανσης για τη σωστή λειτουργία των υπόλοιπων στοιχείων του πνευματικού συστήματος.

Η επεξεργασία αυτή μπορεί να υπάρχει και μεταξύ της βαλβίδας ελέγχου κατεύθυνσης και του εμβόλου και να μην γίνεται μόνο στα σήματα αέρος. Οι σημαντικότερες αρχές συγκρότησης των πνευματικών συστημάτων είναι οι ακόλουθες:

- Το απαραίτητο στοιχείο ενός πνευματικού συστήματος, εκτός από την παροχή του πεπιεσμένου αέρα, είναι το έμβολο αέρος.
- Απαραίτητος συνοδός του εμβόλου αέρος, είναι η βαλβίδα ελέγχου κατεύθυνσης του εμβόλου, που η τοποθέτηση της πραγματοποιείται στη μικρότερη επιτρεπόμενη απόσταση από το έμβολο.
- Η βαλβίδα ελέγχου ενός εμβόλου χρειάζεται ένα σήμα ή και σήματα για να πραγματοποιηθεί η ενεργοποίησή της. Τα σήματα αυτά παρέχονται από τις βαλβίδες σήματος, τις βαλβίδες έναρξης, καθώς και τις βαλβίδες τερματισμού.

- Ανάμεσα στο έμβολο και στη βαλβίδα ελέγχου υπάρχουν οι ρυθμιστικές βαλβίδες, όπως π.χ. είναι, οι βαλβίδες ελέγχου ροής και οι ανεπίστροφες βαλβίδες, οι οποίες μπορούν και επεξεργάζονται τις παροχές του αέρα προς τα έμβολα.
- Όλα τα παραπάνω εξαρτήματα συνδέονται με σωλήνες μεταφοράς πεπιεσμένου αέρα, για την σωστή λειτουργία και σηματοδότηση.
- Ο σχεδιασμός των στοιχείων του αυτοματισμού γίνεται πάντα σε κατάσταση ηρεμίας, δηλαδή πριν γίνει η έναρξη του κύκλου κινήσεων.

Στην περίπτωση τώρα, πνευματικών συστημάτων αυτοματισμού που διαθέτουν περισσότερα από ένα έμβολα, κάθε έμβολο ακολουθείται από τη βαλβίδα ελέγχου που του αντιστοιχεί και τις βαλβίδες σήματος και επεξεργασίας, ώστε το σύνολο του αυτοματισμού να αποτελείται από υποσύνολα αυτοματισμού του ενός εμβόλου, που θα είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους.

Για να πραγματοποιηθεί ο εφοδιασμός των πνευματικών συστημάτων με πεπιεσμένο αέρα τα τρία στάδια που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη περιλαμβάνουν:

- Την παραγωγή του αέρα από τους συμπιεστές αέρα.
- Την επεξεργασία του αέρα, ώστε να καταστεί κατάλληλος για πνευματικά συστήματα αυτοματισμού.
- Την διοχέτευση του αέρα μέσω μιας σωληνογραμμής στο πνευματικό σύστημα.

Ο αέρας από το χώρο παραγωγής του, αφού υποστεί έναν πρώτο υποβιβασμό της υγρασίας, διοχετεύεται στο χώρο εγκατάστασης των πνευματικών συστημάτων με μια κύρια γραμμή μεταφοράς. Οι τρόποι που χρησιμοποιούνται για τη σχεδίαση των κύριων γραμμών μεταφοράς πεπιεσμένου αέρα, περιλαμβάνουν:

- Τοποθέτηση των διακλαδώσεων κατανάλωσης στην κύρια γραμμή μεταφοράς.
- Κεντρική γραμμή μεταφοράς, καθώς και δημιουργία οριζόντιων διακλαδώσεων σε μορφή “H”.
- Κεντρική γραμμή μεταφοράς “κυκλική”, καθώς και κάθοδος των διακλαδώσεων προς τις σωληνώσεις.

Όλες οι γραμμές οριζόντιας μεταφοράς κατασκευάζονται με κλίση, ώστε να πραγματοποιηθεί η επαγωγή της υγρασίας από το κατώτερο σημείο [1].

1.1.3 Στοιχεία Κίνησης

Τα στοιχεία κίνησης των πνευματικών συστημάτων είναι οι κύλινδροι, οι οποίοι μπορούν και μετατρέπουν την πνευματική ισχύ του πεπιεσμένου αέρα σε ευθύγραμμη κίνηση και αποτελούν το βασικό εργαλείο για:

- Ωθηση.
- Έλξη.
- Ανύψωση βαρών.
- Τροφοδότηση συσκευών.
- Ενεργοποίηση μοχλών.
- Μετατόπιση τεμαχίων.
- Αυτοματισμό άλλων συστημάτων.

Η παλινδρομική κίνηση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του πεπιεσμένου αέρα. Οι πνευματικοί κύλινδροι αποτελούνται από ένα θάλαμο στον οποίο υπάρχουν, ένα πιστόνι, στεγανωτικά για αποφυγή απωλειών αέρα, μια ράβδος επενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της ευθύγραμμης κίνησης και τέλος, υπάρχουν οι θύρες εισαγωγής και οι θύρες εξαγωγής του αέρα. Οι πνευματικοί κύλινδροι είναι πολύ απλοί όσο αφορά το κατασκευαστικό τους σκέλος και έχουν υψηλή αντοχή σε υπερφορτίσεις.

Ανάλογα με την κατασκευαστική τους διαμόρφωση διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

❖ Κύλινδροι Απλής Ενεργείας

Στους συγκεκριμένους κυλίνδρους, ο πεπιεσμένος αέρας εφαρμόζεται μόνο προς τη μία πλευρά του εμβόλου και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παράγεται έργο μόνο προς τη μία κατεύθυνση. Η έξοδος ή η είσοδος του άξονα γίνεται με την βοήθεια του πεπιεσμένου αέρα. Η αντίθετη διαδρομή πραγματοποιείται με ενσωματωμένο ελατήριο ή με εξωτερική δύναμη. Η δύναμη του ελατηρίου έχει συνήθως επιλεγεί ώστε το έμβολο να επανέρχεται στη θέση εκκινήσεως με κάποια αρκετά υψηλή ταχύτητα. Στους κυλίνδρους με ενσωματωμένο ελατήριο, η διαδρομή περιορίζεται στην πράξη από το φυσικό μήκος του ελατηρίου, οπότε κατασκευάζονται κύλινδροι με μήκος διαδρομής 100 mm.



Σχ. 2: Κύλινδρος απλής ενέργειας χωρίς ελατήριο επαναφοράς



Σχ. 3: Κύλινδρος απλής ενέργειας με ελατήριο επαναφοράς

Στους κυλίνδρους απλής ενέργειας με ελατήριο επαναφοράς η διαδρομή του εμβόλου προς τα έξω (+) πραγματοποιείται με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα, που εισέρχεται από τη μοναδική τους δίοδο.

Η συγκεκριμένη αυτή κίνηση του εμβόλου έχει σαν αποτέλεσμα τη συμπίεση του ελατηρίου. Όταν ο πεπιεσμένος αέρας εκτονωθεί και σταματήσει η άσκηση της πίεσης, τότε λόγω του ελατηρίου, το έμβολο γυρίζει στην αρχική του θέση.

Το βάκτρο, έχει κατά κανόνα σπείρωμα για να συνδέεται με κάποιο εξάρτημα, το οποίο είναι απαραίτητο για την χρησιμότητα του εμβόλου. Τα καλύμματα του σωλήνα (καπάκια) κρατούνται σταθερά προσαρμοσμένα. Επίσης, το μπροστινό κάλυμμα διαθέτει άνοιγμα με οδηγό και ελαστικό παρέμβυσμα για τη διέλευση του βάκτρου. Το πιστόνι είναι εφοδιασμένο με στεγανοποιητικό δακτύλιο για τη συγκράτηση του πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο πίεσης. Αντίθετα, ο ατμοσφαιρικός αέρας που υπάρχει στην άλλη πλευρά του εμβόλου μπορεί να εξέρχεται και να εισέρχεται ελεύθερα σε αυτήν.

Η δύναμη αυτή που ασκεί το έμβολο ισούται με την παραγόμενη δύναμη από τον πεπιεσμένο αέρα, αφαιρώντας τη δύναμη που ασκείται από το ελατήριο. Συνεπώς, η τελική σχέση θα είναι:

$$F = (P1 - P2) \cdot A - F_{ελ}$$

Όπου A είναι η επιφάνεια του εμβόλου (mm^2), P1 είναι η απόλυτη πίεση αέρα (Nt/mm^2), P2 είναι η ατμοσφαιρική πίεση αέρα (Nt/mm^2) και $F_{ελ}$ είναι η δύναμη ελατηρίου (Nt).

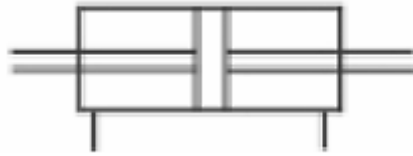
❖ Κύλινδροι Διπλής Ενέργειας

Στους κυλίνδρους διπλής ενέργειας, η δύναμη που εξασκεί ο πεπιεσμένος αέρας κινεί το έμβολο και προς τις δύο κατευθύνσεις κίνησης. Οι κύλινδροι αυτοί χρησιμοποιούνται ειδικά σε περιπτώσεις όπου το έμβολο πρέπει να εκτελεί έργο όχι μόνο κατά την έκταση αλλά και κατά τη σύμπτυξη του βάκτρου. Το μήκος της διαδρομής είναι θεωρητικά απεριόριστο, πρέπει όμως να υπάρχει πρόβλεψη για την καταπόνηση του βάκτρου σε λυγισμό και κάμψη.

Οι κύλινδροι διπλής ενέργειας χωρίζονται σε κυλίνδρους διπλής ενέργειας με απλό βάκτρο, με διπλό βάκτρο, τηλεσκοπικούς, καθώς και με διάταξη επιβράδυνσης.



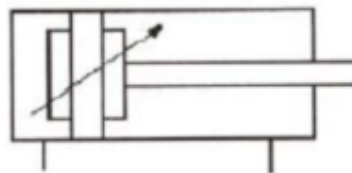
Σχ. 4: Συμβολισμός κυλίνδρου με απλό βάκτρο



Σχ. 5: Συμβολισμός κυλίνδρου με διπλό βάκτρο

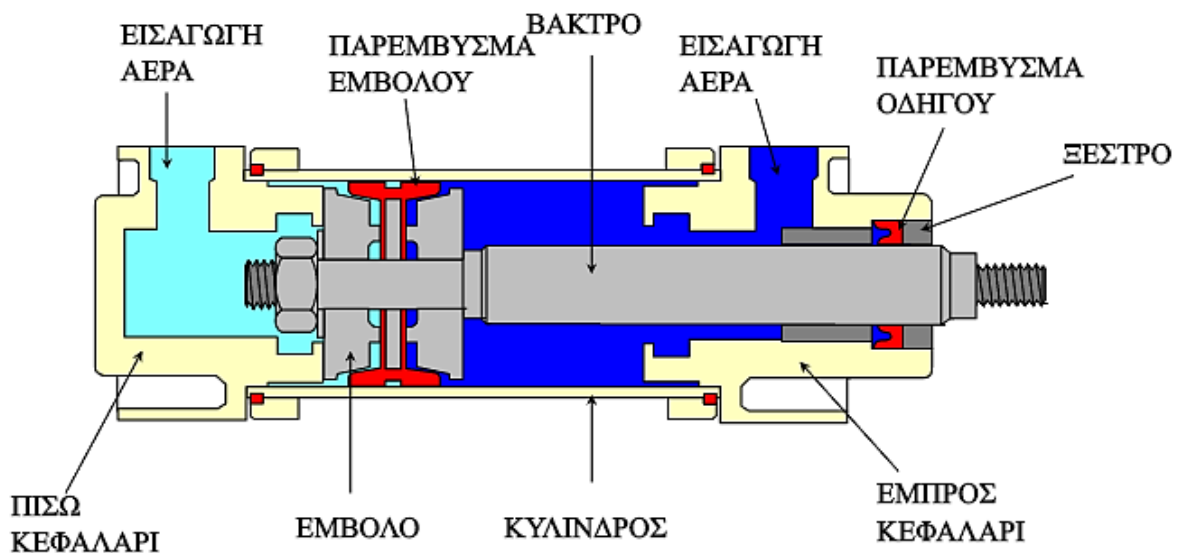


Σχ. 6: Συμβολισμός τηλεσκοπικού κυλίνδρου



Σχ. 7: Συμβολισμός κυλίνδρου με επιβράδυνση

Οι κύλινδροι διπλής ενέργειας έχουν πολύ μεγαλύτερη χρήση από τους αντίστοιχους της απλής ενέργειας, γιατί στους κυλίνδρους διπλής ενέργειας, τόσο η διαδρομή εξόδου (+) όσο και η διαδρομή επιστροφής του βάκτρου (-), πραγματοποιούνται με τη βοήθεια του πεπιεσμένου αέρα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εσωτερική τομή ενός κυλίνδρου διπλής ενέργειας με απλό βάκτρο.



Σχ. 8: Τομή κυλίνδρου διπλής ενέργειας με απλό βάκτρο

Στους κυλίνδρους διπλής ενέργειας με απλό βάκτρο, η παλινδρομική διαδρομή του εμβόλου μπορεί να πραγματοποιηθεί μόλις η πίεση του αέρα εξασκηθεί στη μια ή στην άλλη πλευρά. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει η άλλη πλευρά κάθε φορά να εκτονώνει την πίεση με την έξοδο του αέρα, επειδή για να κινηθεί το έμβολο απαιτείται και η διαφορά πίεσης. Η διαφορά πίεσης θα πρέπει να είναι επαρκής για να καλύψει την εξωτερική δύναμη.

Με δεδομένη την πίεση του αέρα στο κύκλωμα, η διαδρομή εισόδου του βάκτρου παράγει μικρότερη δύναμη από τη διαδρομή εξόδου του βάκτρου. Στη διαδρομή εξόδου, η επιφάνεια του εμβόλου στην οποία εξασκείται η πίεση του αέρα, είναι ίση με τη διατομή του σωλήνα, ενώ στη διαδρομή εισόδου, η ενεργή επιφάνεια είναι μειωμένη λόγω της διατομής.

Στους κυλίνδρους διπλής ενέργειας, οι κύριες διαστάσεις είναι η διάμετρος τους και η διαδρομή τους. Ο υπολογισμός της διαμέτρου γίνεται όπως και στους κυλίνδρους απλής ενέργειας που περιγράφηκαν προηγουμένως, χωρίς να υπάρχει η δύναμη του ελατήριου. Συνεπώς, η σχέση υπολογισμού θα είναι:

$$F = (P1 - P2) \cdot A$$

Στους κυλίνδρους διπλής ενέργειας υπάρχει περίπτωση η πίεση του εξερχόμενου αέρα να είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική. Αυτό συμβαίνει συχνά στην περίπτωση “στραγγαλισμού” της εξόδου του αέρα ώστε να επιτευχθεί η μείωση της ταχύτητας του κυλίνδρου.

Ένα βασικό πλεονέκτημα των κυλίνδρων διπλής ενέργειας έναντι των κυλίνδρων απλής ενέργειας είναι οι μεγαλύτερες διαδρομές, οι οποίες επιλέγονται ώστε να καλύπτουν την απόσταση της μεταφερόμενης δύναμης.

Οι περιορισμοί οφείλονται στους εξής λόγους:

- Στη δυνατότητα παραγωγής σωλήνων, βάκτρων και σφικτήρων, με μέγιστο μήκος 3 m.
- Στη σχέση μεταξύ μήκους και διαμέτρου του βάκτρου ενός κυλίνδρου, ώστε κατά τη λειτουργία να μην υπάρχουν προβλήματα αντοχής (π.χ. λόγω λυγισμού). Η μέγιστη αυτή σχέση διαδρομής προς τη διάμετρο του εμβόλου για την αποφυγή μηχανικών προβλημάτων είναι 15:1.

Η κατανάλωση πεπιεσμένου αέρα, που απαιτείται για την κίνηση ενός κυλίνδρου διπλής ενέργειας, εκφράζεται σε Nm³ (κανονικά κυβικά μέτρα) ή σε Nit (κανονικά λίτρα), δηλαδή σε ασυμπιεστο αέρα, σε κανονικές συνθήκες.

Στην κατασκευή των κυλίνδρων διπλής ενέργειας, σημαντικό ρόλο έχουν τα υλικά στεγανοποίησης, τα οποία κατασκευάζονται από ελαστικό ή ελαστομερές υλικό. Αν η χρήση του κυλίνδρου γίνει σε χώρους όπου η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 80°C, τότε χρησιμοποιούνται παρεμβύσματα από φθοριωμένο ελαστομερές (Viton) ή φθοριωμένο πλαστικό (Teflon).

Αυτή η απαιτούμενη στεγανοποίηση είναι στατική και δυναμική. Για τη στατική στεγανοποίηση χρησιμοποιούνται φλάντζες αλουμινίου ή και ελαστικοί δακτύλιοι, που φέρουν την ονομασία "O-Ring". Για τη δυναμική στεγανοποίηση του συστήματος εμβόλου-βάκτρου, χρησιμοποιούνται παρεμβύσματα διατομής "U" ή "V".

Τα ευρέως χρησιμοποιούμενα κατασκευαστικά υλικά για τα υπόλοιπα μέρη των κυλίνδρων διπλής ενέργειας περιλαμβάνουν:

- Κυλινδρικός Σωλήνας, ο οποίος κατασκευάζεται από χάλυβα και σπανιότερα από ορείχαλκο ή αλουμίνιο.
- Βάκτρο, το οποίο κατασκευάζεται από ανοξείδωτο ή επιχρωμιωμένο χάλυβα.
- Καπάκια και έμβολα, τα οποία κατασκευάζονται από αλουμίνιο ή χάλυβα για μεγάλης διαμέτρου κυλίνδρους.
- Σφικτήρες, οι οποίοι κατασκευάζονται από χάλυβα.
- Οδηγοί, οι οποίοι κατασκευάζονται από ορείχαλκο με αντιτριβικές ιδιότητες.

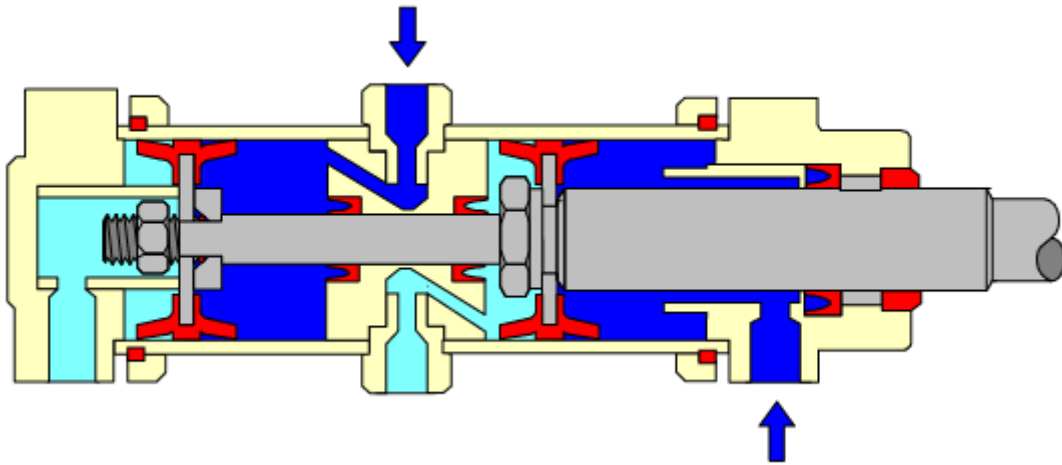
Όλα τα παραπάνω υλικά που έχουν κατασκευαστεί από χάλυβα, υφίστανται μια επιφανειακή προστατευτική κατεργασία.

Η ταχύτητα κίνησης του βάκτρου ενός κυλίνδρου διπλής ενέργειας εξαρτάται από τη δυνατότητα της γρήγορης εισόδου του πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο του εμβόλου. Αν οι δίοδοι του εμβόλου είναι μεγάλης διαμέτρου, τότε οι ταχύτητες βάκτρου-εμβόλου που προκύπτουν θα είναι της τάξης των 2 m/sec, οι οποίες είναι πρακτικά υψηλές και δημιουργούν υψηλή κινητική ενέργεια. Η συγκεκριμένη ενέργεια θα πρέπει να απορροφηθεί κατά τον τερματισμό της διαδρομής του εμβόλου, διαφορετικά θα προκληθεί θραύση των καλυμμάτων του κυλίνδρου. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται οι αποσβεστήρες κρούσεων, οι οποίοι είναι ειδικοί διαμορφωμένοι χώροι, οι οποίοι προβλέπονται κατά το σχεδιασμό του πιστονιού και των καλυμμάτων του εμβόλου και μπορούν να εγκλωβίσουν τον εξερχόμενο αέρα κατά τη διάρκεια του τερματισμού της διαδρομής και με αυτό τον τρόπο να αποφεύγεται η κρούση. Πολλές φορές, ο χώρος εγκλωβισμού του αέρα είναι ρυθμιζόμενης εκτόνωσης και παρέχει ρυθμιζόμενη απόσβεση κρούσεων.

❖ **Κύλινδροι Ειδικών Εφαρμογών**

Ειδικός κύλινδρος θεωρείται ο κύλινδρος Tandem, στον οποίο συνενώνονται δυο ξεχωριστοί κύλινδροι πεπιεσμένου αέρα διπλής ενεργείας σε ένα σωλήνα κυλίνδρου σε σειρά και με αυτό τον τρόπο οι δυο παραγόμενες δυνάμεις αθροίζονται και διπλασιάζεται η δύναμη του εμβόλου. Στους ειδικούς κυλίνδρους συγκαταλέγονται:

- Ο κύλινδρος κρούσης, λόγω της μεγάλης και απότομης ταχύτητας εκκίνησης του.
- Ο περιστροφικός κύλινδρος.
- Ο κύλινδρος πολλαπλών θέσεων.



Σχ. 9: Τομή κυλίνδρου διπλής ενέργειας Tandem

1.1.4 Στοιχεία Ελέγχου

Τα στοιχεία ελέγχου των πνευματικών συστημάτων είναι οι βαλβίδες, οποίες είναι συσκευές που βοηθούν στην ρύθμιση της εκκίνησης ή της στάσης του εμβόλου, καθώς και στον καθορισμό της διεύθυνσης ροής του πεπιεσμένου αέρα. Οι βαλβίδες συμβολίζονται με τετραγωνίδια (Δυνατές θέσεις της βαλβίδας):

1. Η βαλβίδα με δύο τετραγωνίδια ονομάζεται βαλβίδα δύο θέσεων.



Σχ. 10: Συμβολισμός βαλβίδας δύο θέσεων

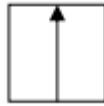
2. Η βαλβίδα με τρία τετραγωνίδια ονομάζεται βαλβίδα τριών θέσεων.



Σχ. 11: Συμβολισμός βαλβίδας τριών θέσεων

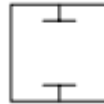
Μέσα στα τετραγωνίδια υπάρχουν γραμμές και βέλη που χαρακτηρίζουν την ροή του αέρα σε κάθε κατάσταση:

1. Ροή αέρα



Σχ. 12: Συμβολισμός ροής αέρα

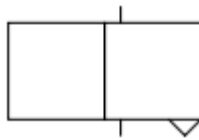
2. Διακοπή ροής αέρα



Σχ. 13: Συμβολισμός διακοπής

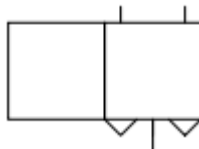
Έξω τώρα από τα τετραγωνίδια υπάρχουν γραμμές που ορίζουν τις πόρτες της βαλβίδας:

1. Βαλβίδα με τρεις πόρτες εργασίας, δύο ροής και μία εκτόνωσης



Σχ. 14: Συμβολισμός βαλβίδας με τρεις πόρτες

2. Βαλβίδα με πέντε πόρτες εργασίας, τρεις ροής και δύο εκτόνωσης



Σχ. 15: Συμβολισμός βαλβίδας με πέντε πόρτες

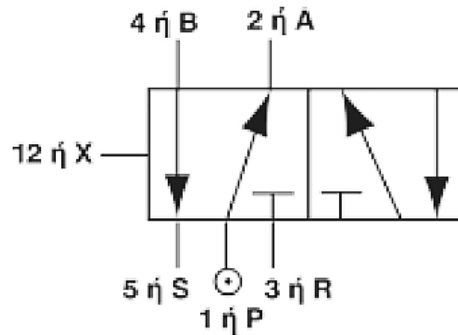
Στο τετραγωνίδιο που βρίσκονται οι γραμμές είναι συνήθως και η κατάσταση ηρεμίας της βαλβίδας. Ανάλογα με τον αριθμό των δυνατών θέσεων, καθώς και τον αριθμό από τις πόρτες, οι βαλβίδες χαρακτηρίζονται από ένα κλάσμα.

Οι βαλβίδες ανάλογα με την λειτουργία τους κατατάσσονται στις παρακάτω ομάδες:

❖ **Βαλβίδες Ελέγχου Κατεύθυνσης**

Οι συγκεκριμένες βαλβίδες είναι στην πραγματικότητα μηχανισμοί διοχέτευσης πεπιεσμένου αέρα και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της κατεύθυνσης της ροής του προς και από το έμβολο, καθώς και για την έξοδο και την επιστροφή του βάκτρου.

Η διαδρομή εξόδου του βάκτρου σε έναν κύλινδρο διπλής ενέργειας, καθώς και η διαδρομή εισόδου αυτού, πρέπει να πραγματοποιηθούν με τη βοήθεια του πεπιεσμένου αέρα. Όταν ο πεπιεσμένος αέρας εισέρχεται από την διόδο στον ένα θάλαμο του κυλίνδρου, πρέπει ταυτόχρονα να πραγματοποιείται η αφαίρεση του αέρα από τον άλλον θάλαμο. Η βαλβίδα ελέγχου κατεύθυνσης, που εκτελεί αυτή τη διαδικασία ονομάζεται βαλβίδα πέντε διόδων και δύο θέσεων και για συντομία χαρακτηρίζεται και σαν βαλβίδα 5/2.



Σχ. 16: Συμβολισμός 5/2 βαλβίδας

Οι διόδοι της βαλβίδας χαρακτηρίζονται με αριθμούς ή και με γράμματα. Στην διόδο 1 ή Ρ συνδέεται η παροχή πεπιεσμένου αέρα και στις διόδους 2 ή Α και 4 ή Β πραγματοποιούνται οι συνδέσεις με το έμβολο αέρα. Οι διόδοι 3 ή R και 5 ή S μένουν ελεύθερες για την έξοδο του πεπιεσμένου αέρα του θαλάμου της βαλβίδας. Οι αριθμοί στην βαλβίδα γράφονται πάντα στη θέση που θα υπάρχει η σύνδεση με τον κύλινδρο. Οι θέσεις της βαλβίδας χαρακτηρίζονται με τους αριθμούς 12 ή X και 14 ή Z, όπου το 12 χαρακτηρίζει τη θέση της βαλβίδας, όπου η παροχή 1 συνδέεται με το 2 και το 14 χαρακτηρίζει τη θέση σύνδεσης του 1 με το 4.

Οι 5/2 βαλβίδες γενικά διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Βαλβίδες με παραμένουσες θέσεις.
- Βαλβίδες με ελατήριο επαναφοράς.
- Βαλβίδες διαφορικής πίεσης.

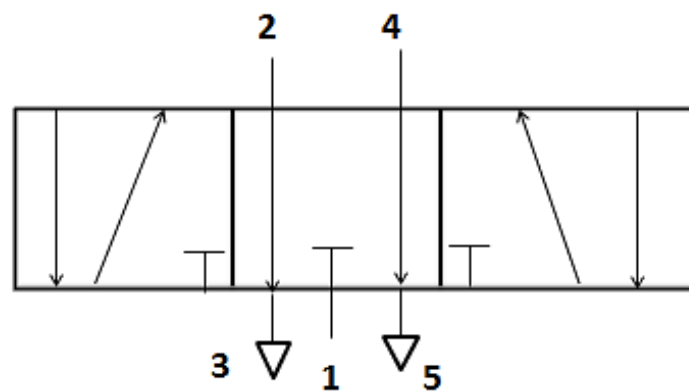
Οι τρεις βασικοί τύποι μηχανισμών ενεργοποίησης των βαλβίδων διακρίνονται σε:

- Πνευματικού σήματος.
- Μηχανικού σήματος.
- Ηλεκτρικού σήματος.

Κατασκευαστικά, οι βαλβίδες 5/2 διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

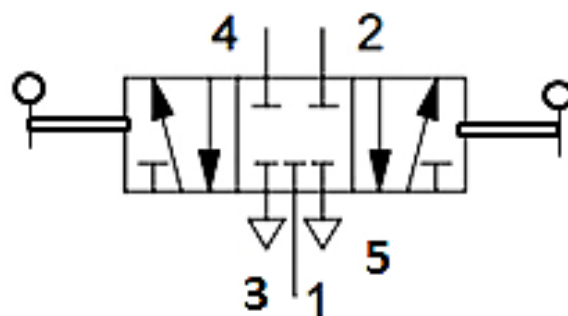
- Βαλβίδες εμβόλου.
- Βαλβίδες με έδρες.
- Βαλβίδες με δίσκο.

Οι βαλβίδες ελέγχου κατεύθυνσης 5/3 έχουν τον ίδιο μηχανισμό λειτουργίας όπως οι βαλβίδες ελέγχου κατεύθυνσης 5/2. Ο τρόπος ενεργοποίησης της βαλβίδας επιτρέπει στο εντός αυτής κινούμενο έμβολο, να παίρνει εκτός από τις δυο ακραίες θέσεις και μια ενδιάμεση θέση. Στην περίπτωση που η ενδιάμεση θέση της βαλβίδας είναι ανοιχτή, η παροχή του αέρα που είναι συνδεδεμένη στην διόδο 1 διακόπτεται. Επιπλέον, οι διελεύσεις 2-3 και 4-5 είναι ανοιχτές και έτσι ένας κύλινδρος διπλής ενέργειας συνδεδεμένος με τις διόδους 2 και 4 εκτονώνει τον αέρα και των δυο θαλάμων του. Με αυτή την διαδικασία το βάκτρο του εμβόλου που ελέγχεται από αυτή την βαλβίδα σταματά και απελευθερώνεται από εξασκούμενες πιέσεις. Ο συμβολισμός της βαλβίδας 5/3 με ενδιάμεση ανοιχτή θέση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 17: Συμβολισμός 5/3 βαλβίδας με ενδιάμεση ανοιχτή θέση

Στην περίπτωση που η ενδιάμεση αυτή θέση είναι κλειστή, τότε οι διελεύσεις 2-3 και 4-5 παραμένουν κλειστές και έτσι ο πεπιεσμένος αέρας εγκλωβίζεται στους δυο θαλάμους του πνευματικού εμβόλου. Το έμβολο έτσι ισορροπεί υπό την επίδραση των δύο πιέσεων και σταματά σε ενδιάμεση θέση με μια σχετική ακρίβεια. Η μετακίνηση του εμβόλου είναι αδύνατη και το βάκτρο παραμένει σταθερό.

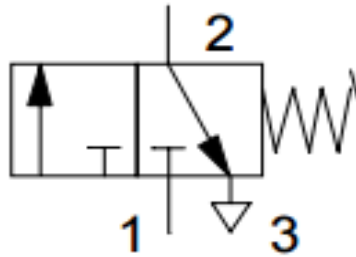


Σχ. 18: Συμβολισμός 5/3 βαλβίδας με ενδιάμεση κλειστή θέση

❖ Βαλβίδες Σημάτων

Οι συγκεκριμένες βαλβίδες παρέχουν μικρή ποσότητα πεπιεσμένου αέρα και στην πραγματικότητα είναι αυτές που ενεργοποιούν τις βαλβίδες ελέγχου κατεύθυνσης. Πρόκειται για βαλβίδες τριών διόδων και δύο θέσεων, που για συντομία χαρακτηρίζονται ως βαλβίδες 3/2. Ο συμβολισμός των συγκεκριμένων βαλβίδων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Η διάδος 1 συνδέεται με τον πεπιεσμένο αέρα, η διάδος 2 συνδέεται με τον αποδέκτη του σήματος και τέλος η διάδος 3 παραμένει ελεύθερη ως ανακούφιση.



Σχ. 19: Συμβολισμός 3/2 βαλβίδας

Οι βαλβίδες 3/2 κατατάσσονται σε:

- Κανονικά κλειστές.
- Κανονικά ανοιχτές.

Οι κανονικά κλειστές είναι οι βαλβίδες που σε κατάσταση ηρεμίας, δηλαδή χωρίς ενεργοποίηση, δεν παρέχουν σήμα αέρος και οι κανονικά ανοιχτές είναι οι βαλβίδες που χωρίς ενεργοποίηση παρέχουν σήμα αέρος.

Οι κύριοι μηχανισμοί λειτουργίας-ενεργοποίησης των βαλβίδων 3/2 διακρίνονται στα ακόλουθα είδη:

- Κομβίο (μπουτόν) με ελατήριο επαναφοράς.
- Κομβίο με παραμένουσες θέσεις.
- Μηχανισμός ρόλλερ διπλής κατεύθυνσης.
- Μηχανισμός ρόλλερ μονής κατεύθυνσης.
- Ποδομοχλός
- Περιστρεφόμενο κομβίο.
- Μembrάνη χαμηλής πίεσης.

Από κατασκευαστική άποψη οι βαλβίδες 3/2 διακρίνονται σε:

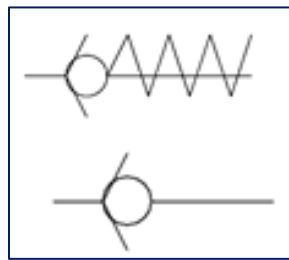
- Εμβόλου (Spool).
- Εδρών (Poppet).
- Μεικτές (Mixed)

❖ Βαλβίδες Αντεπιστροφής

Οι βαλβίδες αντεπιστροφής είναι στοιχεία που επιτρέπουν τη ροή του αέρα πλήρως και με ελάχιστο εμπόδιο, προς τη μία μόνο κατεύθυνση, ενώ τη σταματούν σχεδόν τελείως προς την αντίθετη της κατεύθυνση. Η πίεση στην πλευρά εξόδου των βαλβίδων αυτών ενεργεί κόντρα στο στοιχείο στεγανότητας και επομένως αποτελεί παράγοντα που βοηθάει την επίτευξη στεγανότητας της βαλβίδας. Οι βαλβίδες αντεπιστροφής μπορεί να είναι απλού ελέγχου (μιας εισόδου) ή διπλού ελέγχου (δύο εισόδων).

Η βαλβίδα αντεπιστροφής απλού ελέγχου σταματάει τη ροή του αέρα προς τη μία διεύθυνση, ενώ ο αέρας ρέει προς την αντίθετη διεύθυνση με ελάχιστη απώλεια πίεσης. Το μπλοκάρισμα της ροής του αέρα προς τη μία κατεύθυνση επιτυγχάνεται διαμέσου των στοιχείων στεγανότητας που μπορεί να έχουν μορφή:

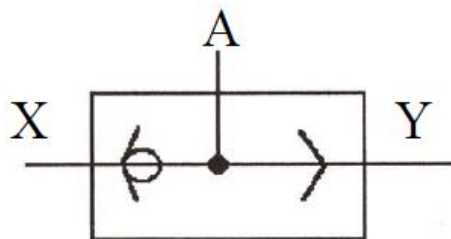
- Κώνου.
- Σφαίρας.
- Πλάκας.
- Διαφράγματος.



Σχ. 20: Συμβολισμός βαλβίδας απλού ελέγχου με ελατήριο και χωρίς ελατήριο

Η βαλβίδα αντεπιστροφής απλού ελέγχου χωρίς ελατήριο απενεργοποιείται με τη δύναμη που επενεργεί στο στοιχείο στεγανότητας από τον πεπιεσμένο αέρα, ενώ στη βαλβίδα αντεπιστροφής με ελατήριο, η απενεργοποίηση της επιτυγχάνεται όταν η πίεση στην έξοδο είναι μεγαλύτερη ή ίση από την πίεση της εισόδου.

Η βαλβίδα αντεπιστροφής διπλού ελέγχου διαθέτει δύο εισόδους X και Y, καθώς και μία έξοδο A. Όταν εφαρμοστεί ο πεπιεσμένος αέρας στην είσοδο X, τότε κλείνει η είσοδος Y και ο αέρας ρέει από την είσοδο X προς την έξοδο A. Διαφορετικά, ο αέρας μπορεί να ρέει από την είσοδο Y προς την έξοδο A και να είναι κλειστή η είσοδος X.



Σχ. 21: Συμβολισμός βαλβίδας αντεπιστροφής

Στις βαλβίδες αντεπιστροφής περιλαμβάνονται ακόμα και οι εξής βαλβίδες:

- Η στραγγαλιστική ανακουφιστική βαλβίδα.
- Η βαλβίδα δύο πιέσεων.

Η στραγγαλιστική ανακουφιστική βαλβίδα χαρακτηρίζεται και σαν βαλβίδα ρύθμισης της ταχύτητας. Η ροή του αέρα στραγγαλίζεται μόνο προς τη μία διεύθυνση. Μια βαλβίδα αντεπιστροφής μπορεί και μπλοκάρει τη ροή προς τη μία διεύθυνση ενώ ο αέρας μπορεί να ρέει διαμέσου της διάταξης στραγγαλισμού. Οι βαλβίδες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της ταχύτητας στους πνευματικούς κυλίνδρους.

Τέλος, οι βαλβίδες δύο πιέσεων έχουν δύο εισόδους X και Y και μία έξοδο A. Ο πεπιεσμένος αέρας ρέει μέσω της βαλβίδας μόνο όταν εφαρμόζονται σήματα και στις δύο εισόδους. Αν τα δύο σήματα δεν εφαρμοστούν ταυτόχρονα και στις δύο εισόδους, τότε το σήμα που εφαρμόστηκε τελευταίο περνάει προς την έξοδο A. Εάν τα σήματα έχουν διαφορετική πίεση, εκείνο με τη μεγαλύτερη τιμή κλείνει τη βαλβίδα και διέρχεται το άλλο με τη μικρότερη πίεση προς την έξοδο A.

❖ Βαλβίδες Ελέγχου Πίεσεως

Οι συγκεκριμένες βαλβίδες είναι στην πραγματικότητα στοιχεία τα οποία μπορούν και ρυθμίζουν την πίεση του αέρα ή ελέγχουν το μέγεθος της πίεσης του αέρα και διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Βαλβίδες ρύθμισης της πίεσης

Οι συγκεκριμένες βαλβίδες χρησιμοποιούνται για τη σταθερή διατήρηση της πίεσης, δηλαδή η επιλογή της πίεσης στο όργανο ένδειξης θα μεταφέρεται προς όλα τα σημεία του κυκλώματος χωρίς μεταβολή, ακόμα και στην περίπτωση που υπάρχουν διακυμάνσεις της πίεσης. Επίσης, η ελάχιστη πίεση της εισόδου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την πίεση της εξόδου.

2. Βαλβίδες περιορισμού της πίεσης

Οι συγκεκριμένες βαλβίδες χρησιμοποιούνται σαν βαλβίδες ασφαλείας και μπορούν να εμποδίσουν την πίεση σε ένα πνευματικό σύστημα να υπερβεί ένα μέγιστο επιτρεπόμενο όριο. Στην περίπτωση που η μέγιστη αυτή πίεση αναπτυχθεί στην είσοδο της βαλβίδας, τότε η έξοδος της θα ανοίξει και ο αέρας θα διαφύγει στην ατμόσφαιρα. Η βαλβίδα περιορισμού της πίεσης θα παραμείνει ανοιχτή και όταν η πίεση μειωθεί σε μια ορισμένη τιμή τότε το ενσωματωμένο ελατήριο θα την κλείσει.

3. Βαλβίδες διαδοχικής δράσης.

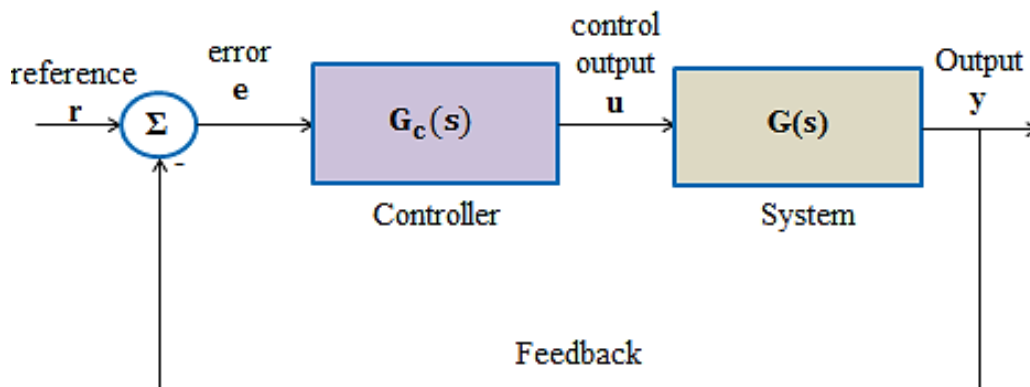
Οι συγκεκριμένες βαλβίδες μπορούν να τοποθετηθούν σε πνευματικά συστήματα ελέγχου, όταν απαιτείται μια ορισμένη πίεση, ώστε να πραγματοποιηθεί η αλλαγή καταστάσεων, δηλαδή όλοι αυτοί οι έλεγχοι που εξαρτώνται από την πίεση. Στους ελέγχους αυτής της κατηγορίας το σήμα μεταδίδεται μόνο στην περίπτωση που έχει επιτευχθεί η απαιτούμενη πίεση λειτουργίας. Οι βαλβίδες διαδοχικής δράσης λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο, όπως οι βαλβίδες περιορισμού της πίεσης.

❖ Βάνες

Οι βάνες επιτρέπουν ή διακόπτουν πλήρως τη ροή του αέρα σε μια γραμμή. Οι βάνες θεωρούνται και αυτές βαλβίδες στραγγαλισμού και γενικά η λειτουργική τους αξιοπιστία αυξάνεται όταν είναι τοποθετημένες απ' ευθείας πάνω στους κυλίνδρους που πρέπει να ελεγχθούν [1],[3],[4],[5],[6],[7],[8],[9].

1.2 Ελεγκτές Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου

Σύστημα είναι ένα σύνολο στοιχείων φυσικών ή τεχνητών, που σχηματίζουν μια ενότητα και δρουν σαν μια ενότητα. Ο έλεγχος ενός δεδομένου συστήματος είναι η διαδικασία καθορισμού, παραγωγής, καθώς και πρόκλησης του κατάλληλου σήματος εισόδου του συστήματος, έτσι ώστε η έξοδος του να ακολουθεί μια επιθυμητή πορεία ή αλλιώς να διατηρεί μια επιθυμητή τιμή. Ο μηχανισμός εκείνος, που εκτελεί τον έλεγχο ενός ελεγχόμενου συστήματος ονομάζεται ελεγκτής (controller).



Σχ. 22: Σύστημα Αυτόματου Ελέγχου κλειστού βρόχου

Οι πιο διαδεδομένοι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται στην σύγχρονη βιομηχανία είναι:

1. Ο Αναλογικός Ελεγκτής (Proportional-Controller)

Σύμφωνα με το Σχ. 22, η σχέση μεταξύ της εισόδου u και του σήματος σφάλματος e είναι:

$$u(t) = K_c \cdot e(t)$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι:

$$G_c(s) = K_c$$

Όπου K_c είναι το αναλογικό κέρδος του ελεγκτή.

Ο αναλογικός ελεγκτής είναι κατευθυντής προσαρμοζόμενου κέρδους. Όταν το κέρδος K_c αυξάνει, η ευαισθησία στις διαταραχές μειώνεται, αλλά συγχρόνως ελαττώνεται και ο βαθμός ευστάθειας. Για το λόγο αυτό, πρέπει να γίνεται χρήση περιορισμένων τιμών του κέρδους K_c . Ο αναλογικός έλεγχος εγκατάστασης που δεν διαθέτει ελεύθερο ολοκληρωτή στη συνάρτηση μεταφοράς δεν είναι ικανός να μηδενίσει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης.

2. Αναλογικός-Διαφορικός Ελεγκτής (Proportional-Derivative Controller)

Σύμφωνα με το Σχ. 22, η σχέση μεταξύ της εισόδου u και του σήματος σφάλματος e είναι:

$$u(t) = K_c \cdot e(t) + K_c \cdot T_D \frac{de(t)}{dt}$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι:

$$G_c(s) = K_c(1 + T_D s)$$

Όπου K_c είναι το αναλογικό κέρδος, και T_D είναι ο χρόνος διαφόρισης.

Ο διαφορικός όρος-D που διαθέτει ο Αναλογικός-Διαφορικός ελεγκτής αυξάνει την ευστάθεια του συστήματος και βελτιώνει τη συμπεριφορά του κατά τη μεταβατική κατάσταση. Γενικά, ο ελεγκτής PD, μπορεί να μειώσει την υπερύψωση και το χρόνο αποκατάστασης, αλλά έχει μικρή επίδραση στο χρόνο ανύψωσης και στο μόνιμο σφάλμα.

3. Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Διαφορικός Ελεγκτής (Proportional-Integral-Derivative Controller)

Σύμφωνα με το Σχ. 22, η σχέση μεταξύ της εισόδου u και του σήματος σφάλματος e είναι:

$$u(t) = K_c \cdot e(t) + K_c \cdot T_D \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι:

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_D s \right)$$

Όπου K_c είναι το αναλογικό κέρδος, T_i είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης και T_D είναι ο χρόνος διαφόρισης.

Η δράση ελέγχου ενός PID ελεγκτή είναι το άθροισμα τριών όρων που περιλαμβάνουν:

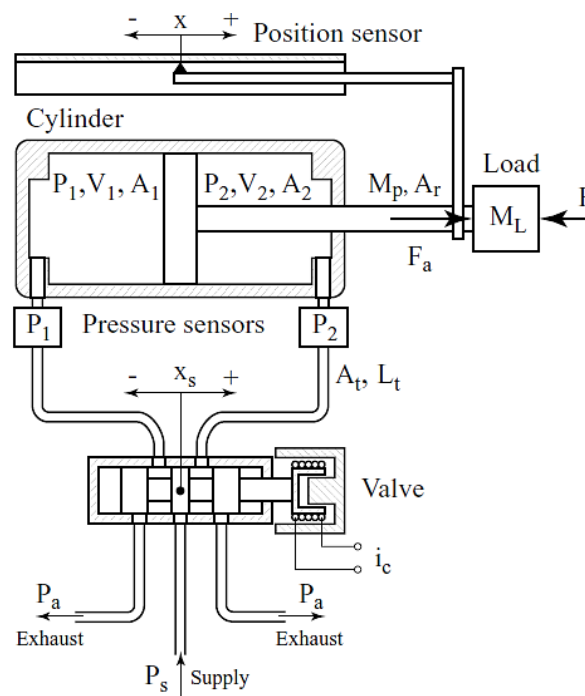
- Το παρελθόν με την ολοκλήρωση του σφάλματος (παράγοντας-I).
- Το παρόν (παράγοντας-P).
- Το μέλλον με την προβολή του σφάλματος (παράγοντας-D).

Ο PID ελεγκτής μπορεί να προσφέρει στο σύστημα ταχεία απόκριση, λόγω του ελεγκτή P, να μηδενίσει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, λόγω του ελεγκτή I, καθώς και να αποκριθεί αποτελεσματικά στις απότομες μεταβολές που μπορεί να προκύψουν στο σύστημα, λόγω του ελεγκτή D. Ο ελεγκτής PID σε γραμμικά συστήματα μπορεί εύκολα να δώσει την επιθυμητή απόκριση με την κατάλληλη ρύθμιση της τιμής των κερδών του ελεγκτή [10],[11],[12].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Προσομοίωση Κλασικών Μεθόδων Ελέγχου

2.1 Μαθηματικό μοντέλο Πνευματικού Συστήματος

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μαθηματική προσέγγιση ενός τυπικού πνευματικού συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει έναν κύλινδρο διπλής ενέργειας με απλό βάκτρο, μια βαλβίδα ελέγχου κατεύθυνσης 5/3, τις σωληνώσεις, τους αισθητήρες θέσης και πίεσης, καθώς και ένα εξωτερικό φορτίο. Το συγκεκριμένο πνευματικό σύστημα είναι ένα μη γραμμικό σύστημα 3^{ης} τάξης.



Σχ. 23: Αναπαράσταση Πνευματικού Συστήματος

Η εξίσωση της κίνησης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$(M_L + M_p) \cdot \ddot{x} + B \cdot \dot{x} + F_f + F_L = P_1 \cdot A_1 - P_2 \cdot A_2 - P_a \cdot A_r$$

Όπου M_L είναι η εξωτερική μάζα του φορτίου, x είναι η θέση του εμβόλου, M_p είναι η μάζα του εμβόλου και του βάκτρου, B είναι ο συντελεστής τριβής, F_f είναι η δύναμη τριβής, F_L είναι η εξωτερική δύναμη, P_1 και P_2 είναι οι απόλυτες πιέσεις αέρα στους θαλάμους του κυλίνδρου, P_a είναι η πίεση του περιβάλλοντος, A_1 και A_2 είναι οι ενεργές επιφάνειες του εμβόλου και η A_r είναι η εγκάρσια διατομή του βάκτρου.

Η εξίσωση που περιγράφει την αλλαγή της πίεσης στους δύο θαλάμους του κυλίνδρου μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\dot{P}_i = \frac{RT}{V_{0i} + A_i \left(\frac{1}{2} L \pm x \right)} (a_{in} \dot{m}_{in} - a_{out} \dot{m}_{out}) - a \frac{PA_i}{V_{0i} + A_i \left(\frac{1}{2} L \pm x \right)} \dot{x}, \quad i = 1,2$$

Όπου P είναι η πίεση του κυλίνδρου, L είναι η διαδρομή του εμβόλου, R είναι η ιδανική σταθερά των αερίων, V_{0i} είναι ο αδρανής όγκος στην είσοδο των διόδων του ενεργοποιητή, T είναι η θερμοκρασία, A_i είναι η ενεργή επιφάνεια του εμβόλου, m_{in} και m_{out} είναι οι ροές της μάζας του αέρα που εισέρχονται και εξέρχονται από τον θάλαμο και x είναι η θέση του εμβόλου. Οι σταθερές a_{in} και a_{out} της εξίσωσης μπορούν να πάρουν τιμές από 1 έως k, ανάλογα με την πραγματική μεταφορά θερμότητας κατά την διάρκεια της διαδικασίας.

Όσον αφορά το μοντέλο της ροής της μάζας μέσα από την οπή της βαλβίδας, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η πτώση πίεσης κατά μήκος της οπής της βαλβίδας είναι αρκετά μεγάλη και η ροή πρέπει να αντιμετωπίζεται. Σε περίπτωση που η ανοδική προς την καθοδική τιμή της πίεσης είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή P_{cr} , τότε η ροή της μάζας εξαρτάται γραμμικά από την ανοδική πίεση. Στην αντίθετη περίπτωση η ροή της μάζας εξαρτάται μη γραμμικά και από τις δύο πιέσεις.

Η εξίσωση για την ροή της μάζας μέσα από την οπή της βαλβίδας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\dot{m}_u = \begin{cases} C_f A_u C1 \frac{P_u}{\sqrt{T}} & \text{αν } \frac{P_d}{P_u} \leq P_{cr} \\ C_f A_u C2 \frac{P_u}{\sqrt{T}} \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_d}{P_u} \right)^{\frac{(k-1)}{k}}} & \text{αν } \frac{P_d}{P_u} > P_{cr} \end{cases}$$

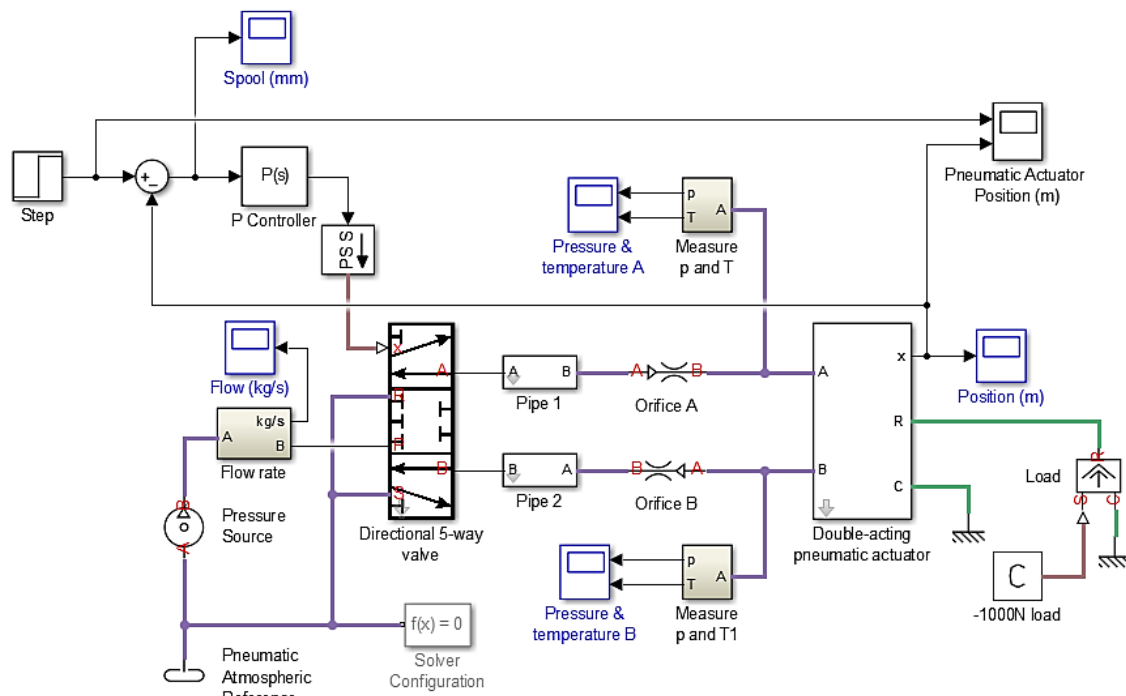
Όπου \dot{m}_u είναι η ροή της μάζας μέσα από την οπή της βαλβίδας, A_u είναι η επιφάνεια της οπής, C_f είναι ο συντελεστής παροχής, P_u και P_d είναι η τιμή της ανοδικής και της καθοδικής πίεσης αντίστοιχα και τέλος C1 και C2 είναι οι σταθερές ενός δεδομένου ρευστού, που στην προκειμένη περίπτωση είναι ο αέρας, με εξισώσεις:

$$C1 = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, C2 = \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}}, P_{cr} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Όπου $k=1.4$ και είναι η σταθερά της τιμής του αέρα [13],[14],[15].

2.2 Προσομοίωση Συστήματος με Αναλογικό (P) Ελεγκτή

Το μοντέλο προσομοίωσης πνευματικού συστήματος της MathWorks [16], χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και τροποποιήθηκε ώστε να πραγματοποιηθεί αναλογικός έλεγχος στο πνευματικό σύστημα. Το νέο μοντέλο προσομοίωσης με αναλογικό έλεγχο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 24: Πνευματικό Σύστημα με ελεγκτή Αναλογίας P

Όπως φαίνεται από το παραπάνω μοντέλο προσομοίωσης πνευματικού συστήματος, τα δομικά στοιχεία που τα αποτελούν είναι μια βαλβίδα ελέγχου κατεύθυνσης 5/3, η οποία διαθέτει και μια ενδιάμεση θέση που είναι κλειστή και χρησιμοποιείται για τον επιτυχημένο έλεγχο της κατεύθυνσης ροής του πεπιεσμένου αέρα προς και από το έμβολο, καθώς και για την έξοδο και την επιστροφή του βάρου. Η πίεση παροχής εισόδου συνδέεται με την διόδο P και ο πνευματικός ενεργοποιητής/έμβολο συνδέεται με τις διόδους A και B. Οι διαδρομές επιστροφής των διόδων A και B είναι οι διόδους R και S αντίστοιχα.

Επίσης, το σύστημα περιλαμβάνει και ένα κύλινδρο διπλής ενέργειας με απλό βάκτρο, ώστε η δύναμη που εξασκεί ο πεπιεσμένος αέρας να κινεί το έμβολο και προς τις δύο κατευθύνσεις κίνησης. Στην παράμετρο του μήκους της διαδρομής του εμβόλου έχει τεθεί η τιμή 0.1 m.

Επιπλέον, το πνευματικό σύστημα περιλαμβάνει και τον ρυθμό ροής (flow rate) που το block του όπως φαίνεται και από το Σχ. 24, συνδέεται με την βαλβίδα. Στο εσωτερικό του block του ρυθμού ροής περιέχεται ένα υποσύστημα που περιλαμβάνει έναν αισθητήρα ροής μάζας και ροής θερμότητας (mass and heat flow sensor), καθώς και την τιμή του μετατροπέα των φυσικών παραμέτρων (PS-Simulink Converter), με μονάδα μέτρησης του σήματος εξόδου kg/sec.

Η πίεση αέρα (Pressure Source) είναι στην πραγματικότητα ένας ιδανικός συμπιεστής αέρα που μπορεί και διατηρεί μια καθορισμένη διαφορά πίεσης ανεξάρτητα από τον ρυθμό ροής. Η διαφορά πίεσης που έχει τεθεί στον συμπιεστή είναι 6 bar.

Επιπροσθέτως, το μοντέλο προσομοίωσης περιλαμβάνει και μια βηματική είσοδο (step), ώστε να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της απόκρισης του πνευματικού συστήματος.

Parameters

Step time:

Initial value:

Final value:

Sample time:

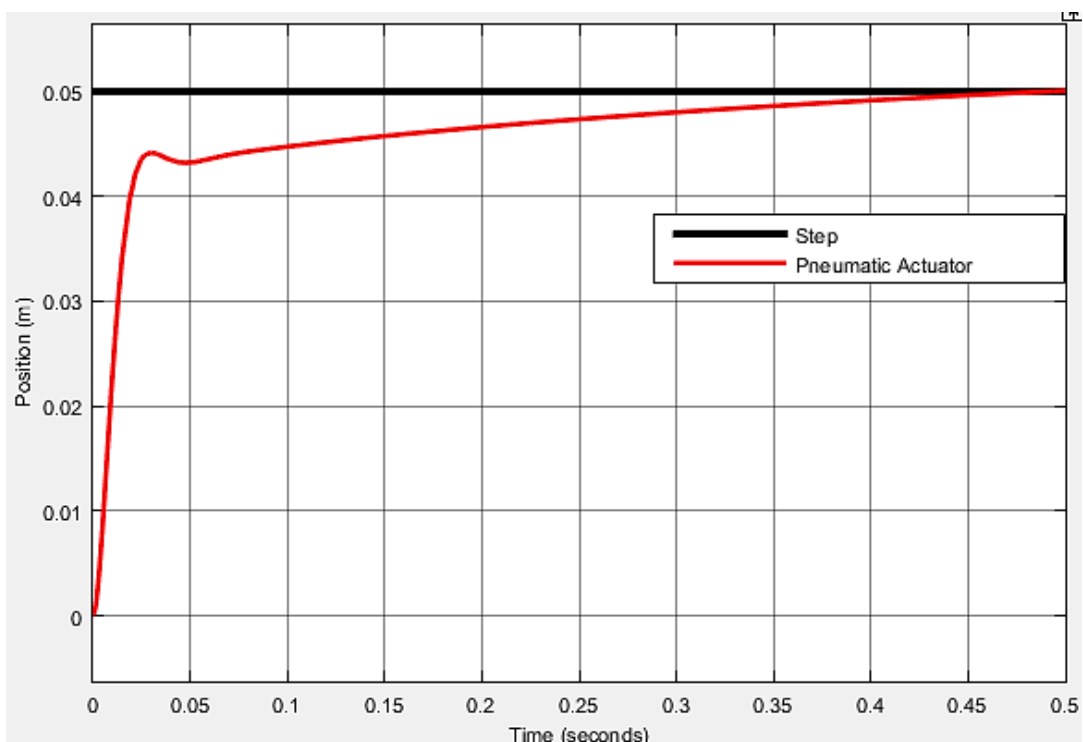
Interpret vector parameters as 1-D

Enable zero-crossing detection

Σχ. 25: Παράμετροι Step

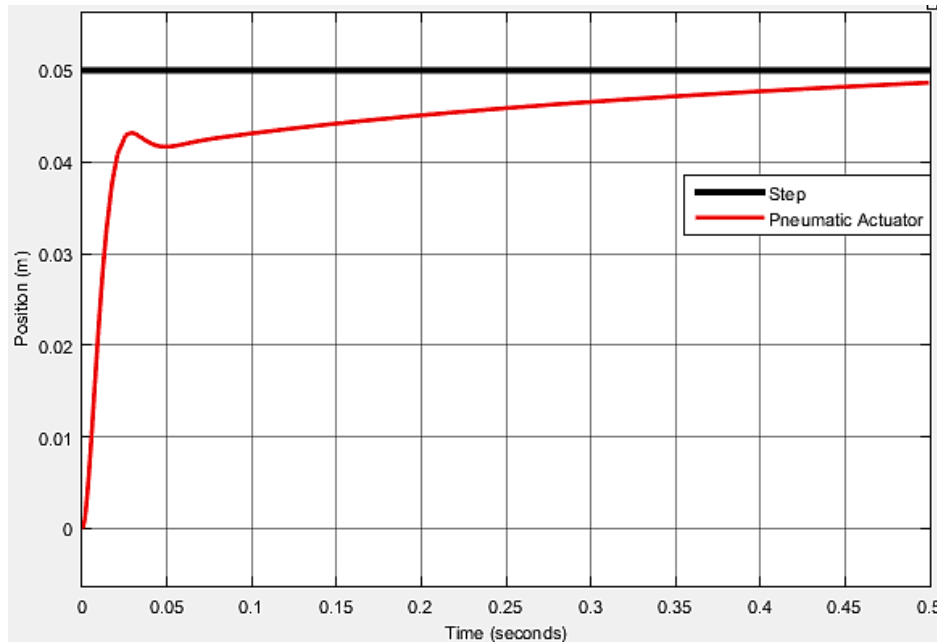
Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, οι τιμές που δόθηκαν στις παραμέτρους της βηματικής εισόδου είναι Step Time=0 και Final Value=0.05 m, για το λόγο ότι στο block του πνευματικού ενεργοποιητή έχει τεθεί η τιμή 0.1 m στην παράμετρο του μήκους διαδρομής του εμβόλου.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το block του ελεγκτή PID (Proportional–Integral–Derivative), δίνοντας τιμή μόνο στην παράμετρο του ελεγκτή P, ώστε να πραγματοποιηθεί αναλογικός έλεγχος στο σύστημα. Η τιμή που δόθηκε στο κέρδος του αναλογικού ελεγκτή είναι $K_P = 35$ και με αυτή την τιμή το σύστημα έχει και την επιθυμητή απόκριση, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Ο χρόνος προσομοίωσης είναι 0.5 sec.



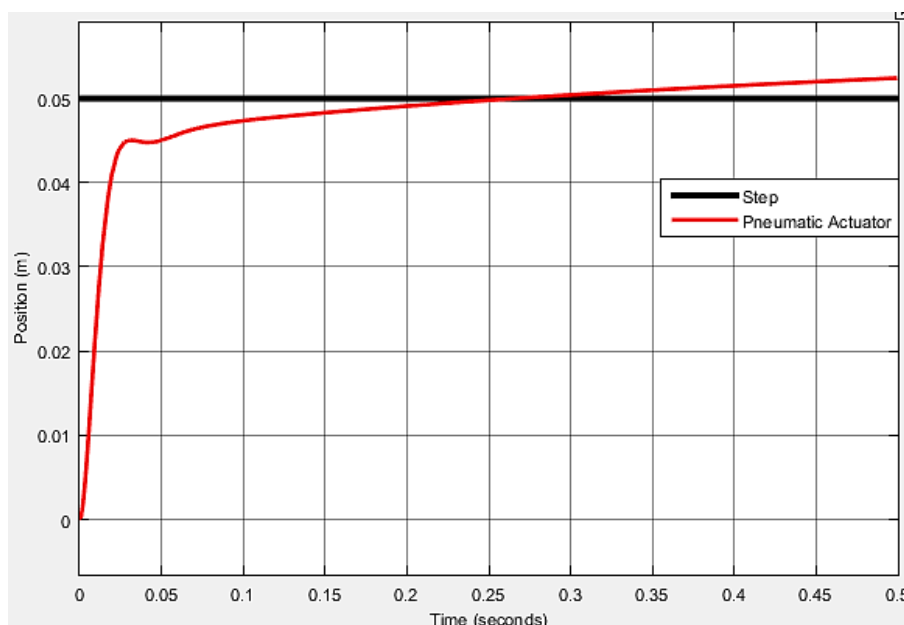
Σχ. 26: Απόκριση συστήματος με Αναλογικό ελεγκτή

Με την τιμή του αναλογικού κέρδους $K_P = 35$ το πνευματικό έμβολο ισορροπεί στην επιθυμητή θέση της εισόδου αναφοράς, δηλαδή στα 0.05 m. Στην περίπτωση μείωσης της τιμής του κέρδους όπως π.χ., $K_P = 5$, παρατηρείται ότι το σύστημα παρουσιάζει σφάλμα μόνιμης κατάστασης, με τιμή της θέσης του εμβόλου μικρότερη από την επιθυμητή τιμή.

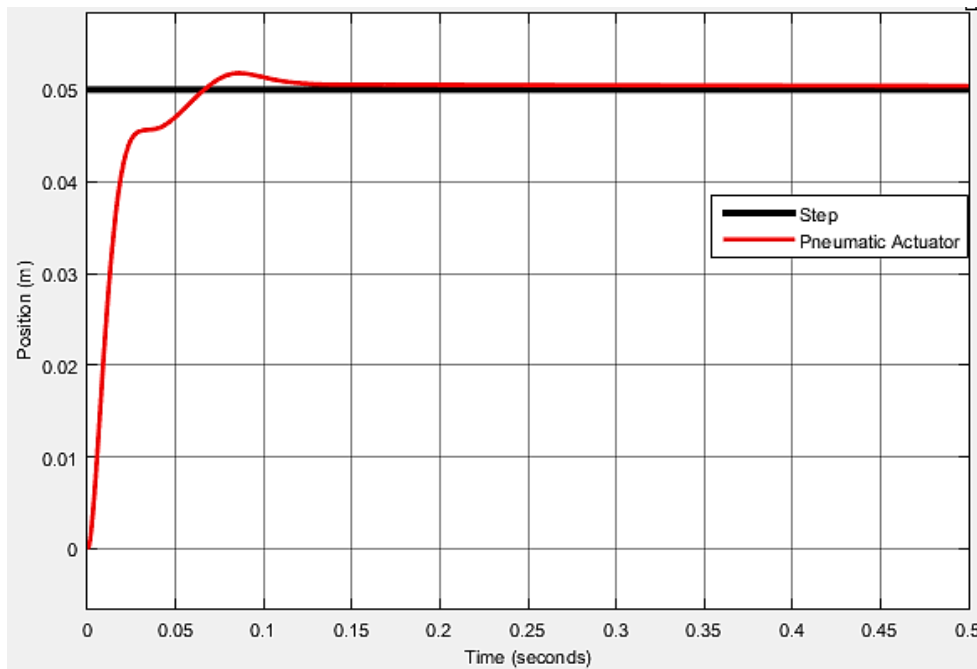


Σχ. 27: Απόκριση συστήματος με τιμή του κέρδους $K_P=5$

Στην περίπτωση αύξησης της τιμής του αναλογικού κέρδους, το σύστημα πάλι παρουσιάζει σφάλμα μόνιμης κατάστασης με τιμές της θέσης μεγαλύτερες από τα 0.05 m. Αλλά στην περίπτωση μεγάλης αύξησης της τιμής του κέρδους K_P , το μόνιμο σφάλμα μειώνεται και βελτιώνεται η αποτελεσματικότητα του συστήματος, αλλά δεν μπορεί να μηδενιστεί τελείως και δημιουργείται και υπερύψωση στο σύστημα.

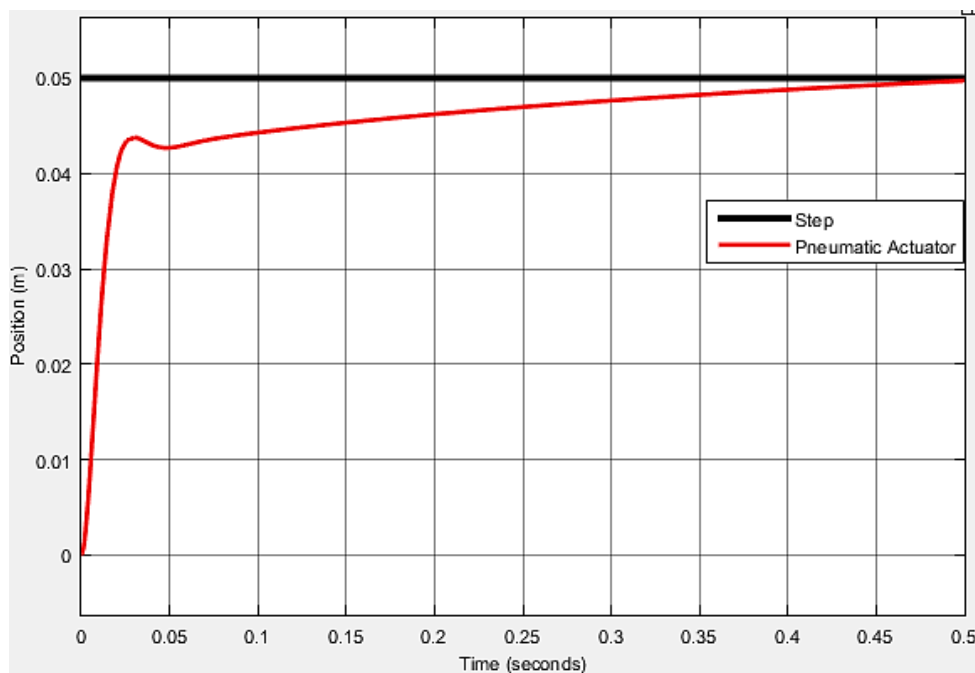


Σχ. 28: Απόκριση συστήματος με τιμή του κέρδους $K_P=80$

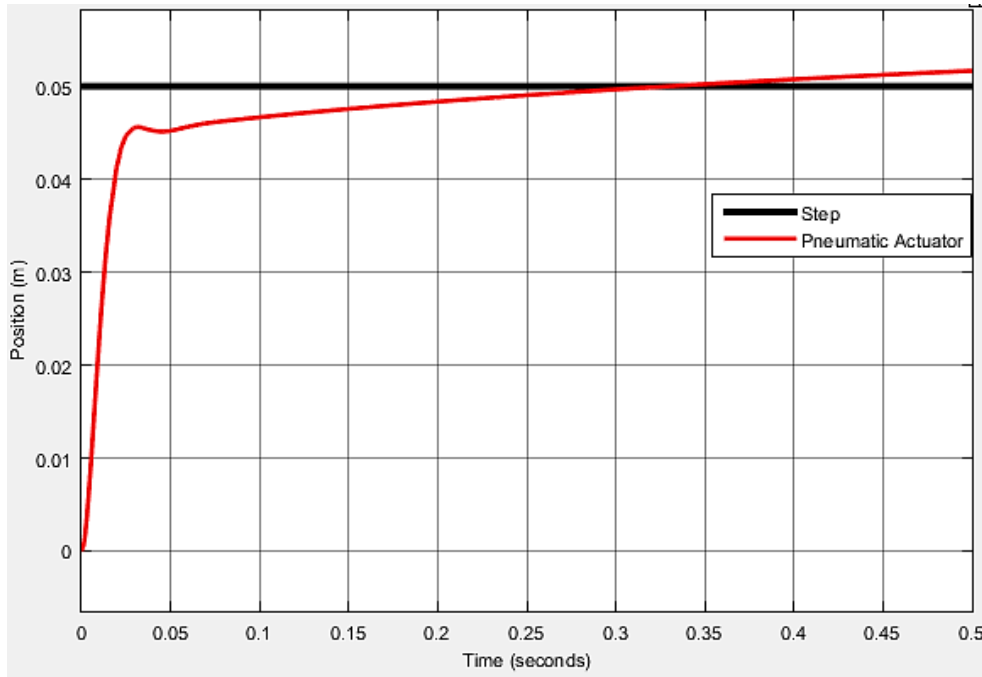


Σχ. 29: Απόκριση συστήματος με τιμή του κέρδους $K_p=750$

Στην περίπτωση που το σύστημα δοκιμαστεί σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης παροχής αέρα, παρατηρείται ότι για μειωμένη τιμή της πίεσης εμφανίζεται μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, με τιμές της θέσης του εμβόλου μικρότερες από τα 0.05 m, ενώ στην περίπτωση αύξησης της τιμής του συμπιεστή εμφανίζεται μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, με τιμές της θέσης του εμβόλου μεγαλύτερες από τα 0.05 m.



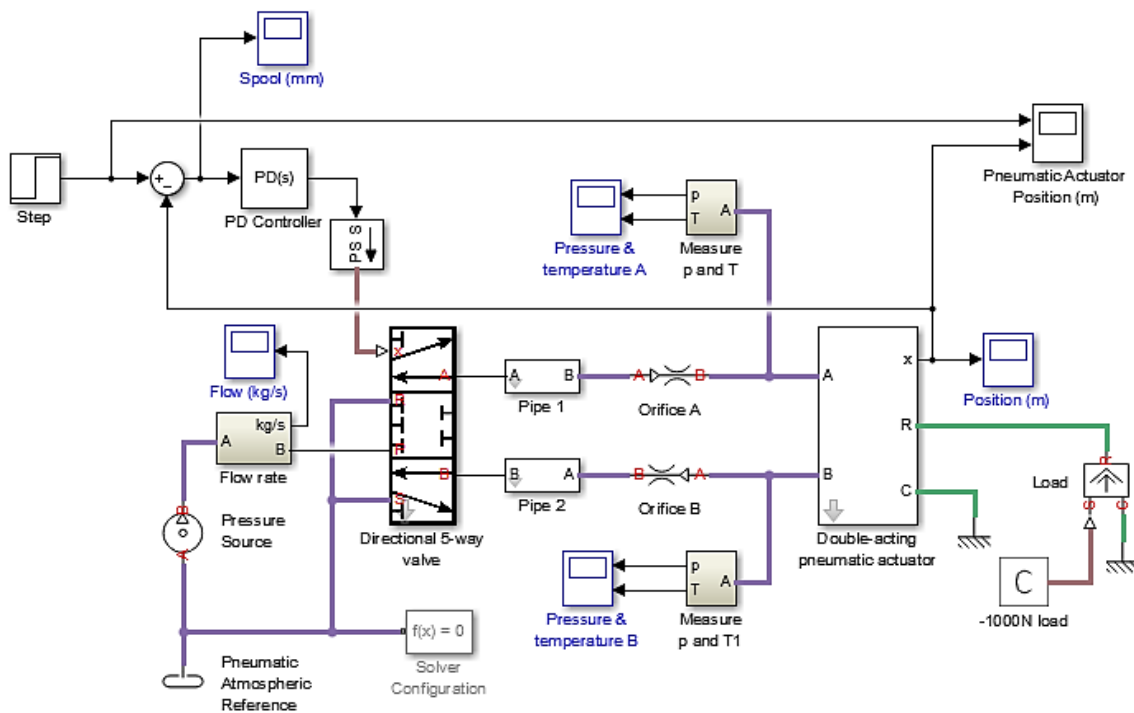
Σχ. 30: Απόκριση συστήματος με $K_p=35$ και διαφορά πίεσης συμπιεστή: 2 bar



Σχ. 31: Απόκριση συστήματος με $K_p=35$ και διαφορά πίεσης συμπιεστή: 13 bar

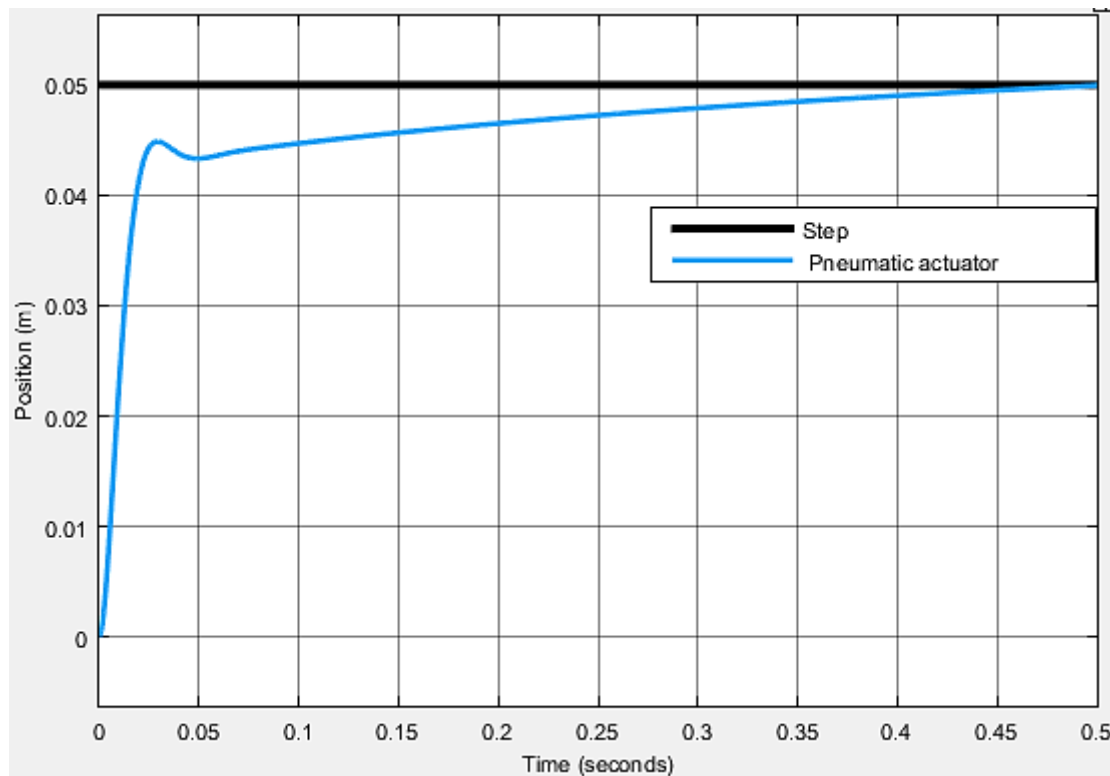
2.3 Προσομοίωση Συστήματος με Αναλογικό-Διαφορικό (PD) Ελεγκτή

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το μοντέλο προσομοίωσης πνευματικού συστήματος με ελεγκτή Αναλογίας-Διαφόρισης (Proportional-Derivative controller).



Σχ. 32: Πνευματικό Σύστημα με ελεγκτή Αναλογίας-Διαφόρισης PD

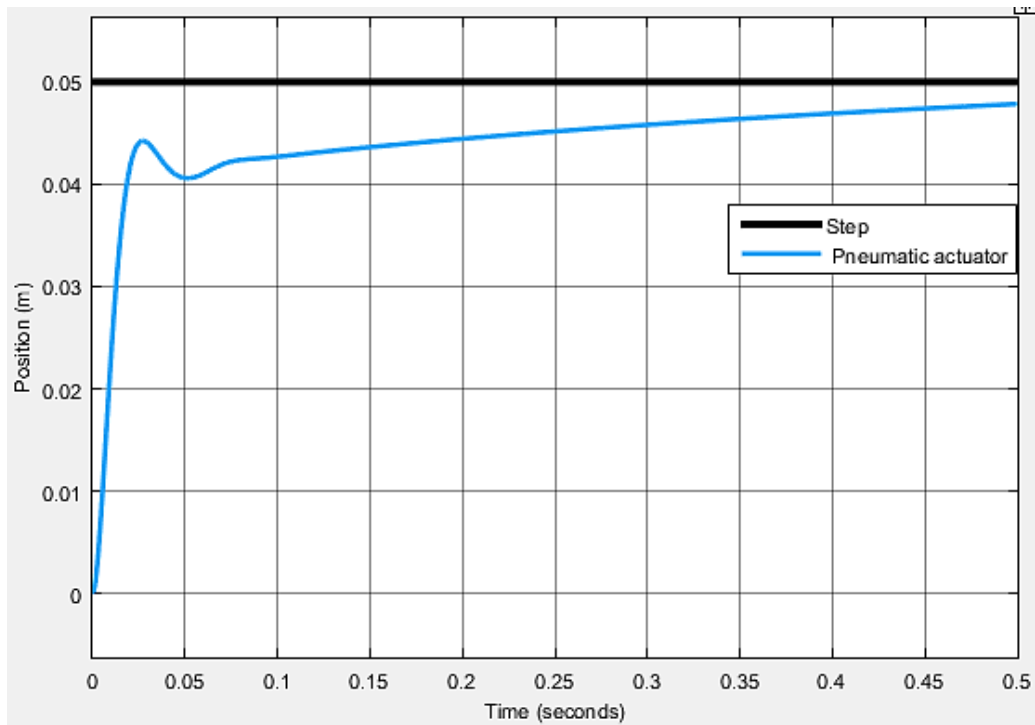
Οι τιμές που δόθηκαν στις παραμέτρους της βηματικής εισόδου είναι Step Time=0 και Final Value=0.05 m. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το block του ελεγκτή PID (Proportional–Integral–Derivative), δίνοντας τιμή μόνο στις παραμέτρους του ελεγκτή PD, ώστε να πραγματοποιηθεί αναλογικός και διαφορικός έλεγχος στο σύστημα. Οι τιμές που δόθηκαν στα κέρδη του αναλογικού-διαφορικού ελεγκτή είναι $K_P = 35$, $K_D = 1.2$ και $N=100$ (συντελεστής φίλτρου) και με αυτές τις τιμές το σύστημα έχει και την επιθυμητή απόκριση, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο χρόνος προσομοίωσης είναι 0.5 sec.



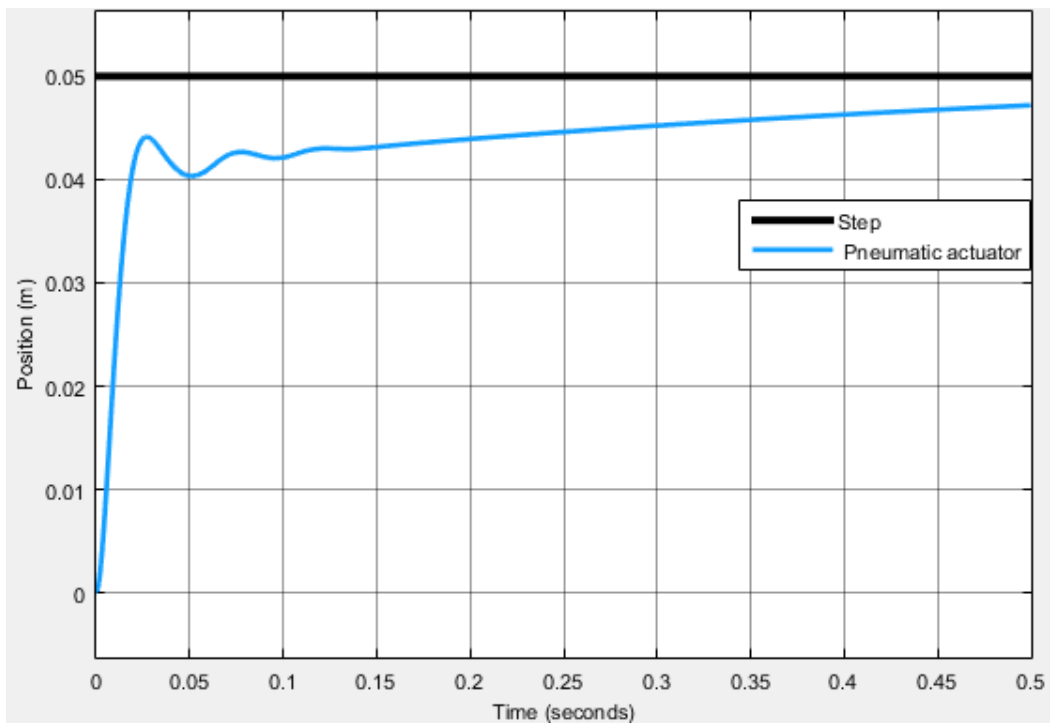
Σχ. 33: Απόκριση συστήματος με Αναλογικό-Διαφορικό ελεγκτή

Με τις τιμές των κερδών $K_P = 35$ και $K_D = 1.2$, το έμβολο ισορροπεί στην επιθυμητή θέση της εισόδου αναφοράς, δηλαδή στα 0.05 m. Στην περίπτωση σταδιακής αύξησης της τιμής του διαφορικού κέρδους, αφήνοντας σταθερή την τιμή του αναλογικού κέρδους, παρατηρείται ότι το σύστημα παρουσιάζει σφάλμα μόνιμης κατάστασης, με τιμές της θέσης του εμβόλου μικρότερες από την επιθυμητή τιμή.

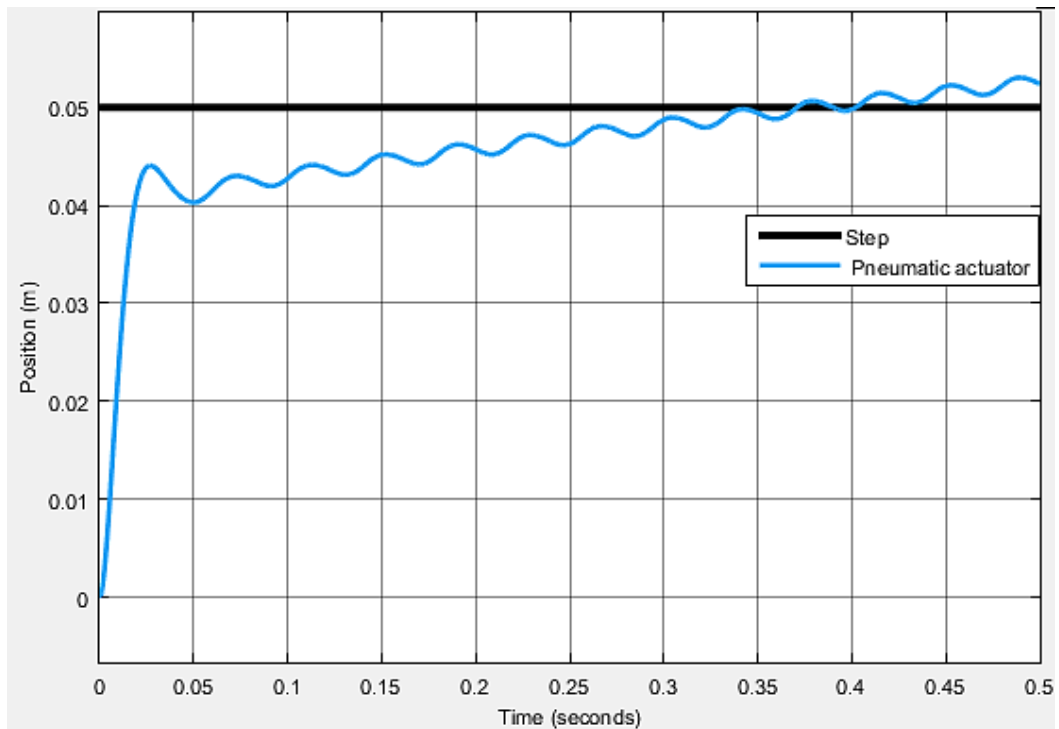
Στην περίπτωση μεγάλης αύξησης του διαφορικού κέρδους εμφανίζεται πάλι μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, καθώς και θόρυβος, με τιμές της θέσης του εμβόλου μεγαλύτερες από τα 0.05 m.



Σχ. 34: Απόκριση συστήματος με τιμές $K_p=35$ και $K_D = 10$

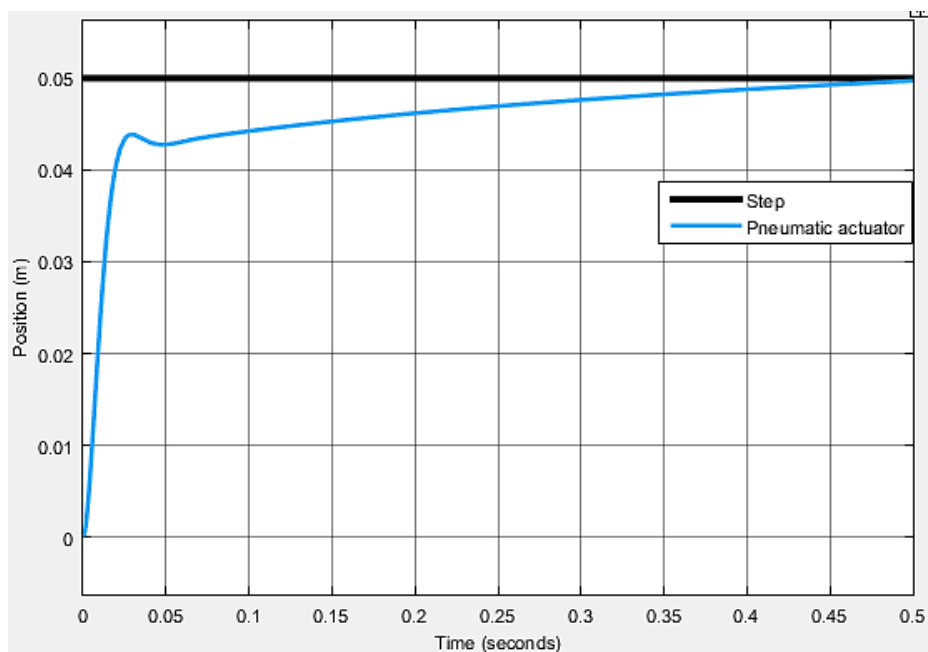


Σχ. 35: Απόκριση συστήματος με τιμές $K_p=35$ και $K_D = 25$

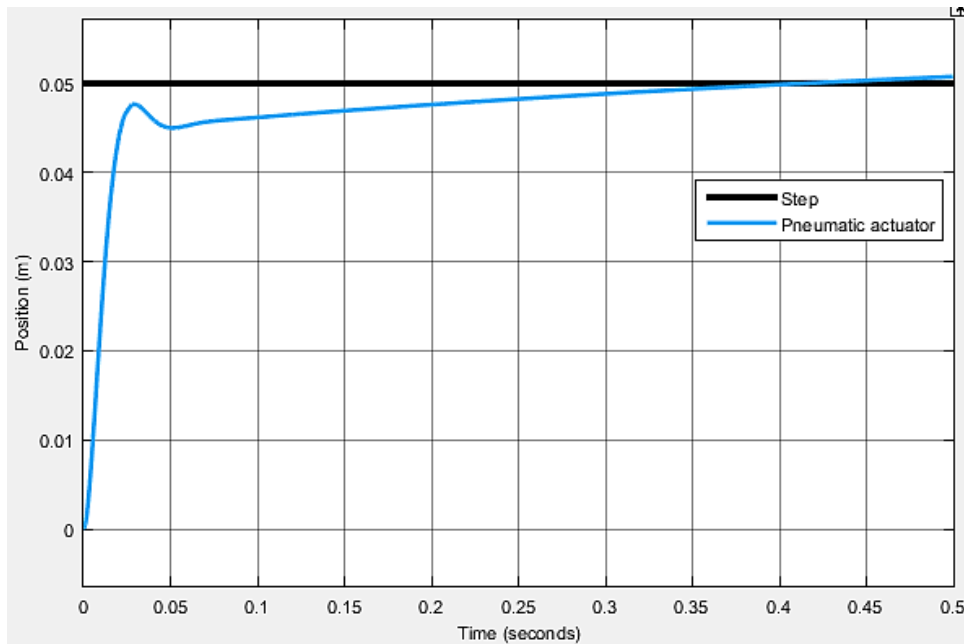


Σχ. 36: Απόκριση συστήματος με τιμές $K_P=35$ και $K_D = 200$

Στην περίπτωση που το σύστημα δοκιμαστεί σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης παροχής αέρα, παρατηρείται ότι για μειωμένη τιμή της πίεσης εμφανίζεται μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, με τιμές της θέσης του εμβόλου μικρότερες από τα 0.05 m, ενώ στην περίπτωση αύξησης της τιμής του συμπιεστή εμφανίζεται μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, με τιμές της θέσης του εμβόλου μεγαλύτερες από τα 0.05 m.



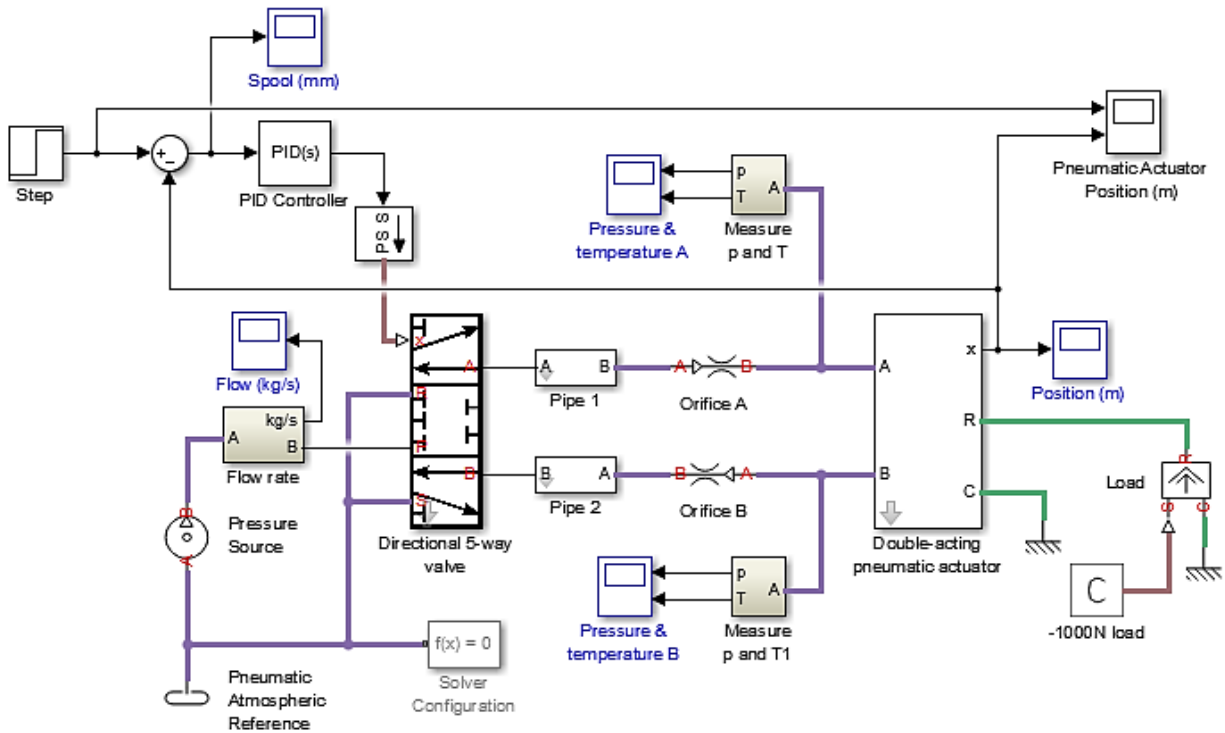
Σχ. 37: Απόκριση συστήματος με $K_P=35$, $K_D = 1.2$ και διαφορά πίεσης συμπιεστή: 2 bar



Σχ. 38: Απόκριση συστήματος με $K_P=35$, $K_D = 1.2$ και διαφορά πίεσης συμπίεστή: 13 bar

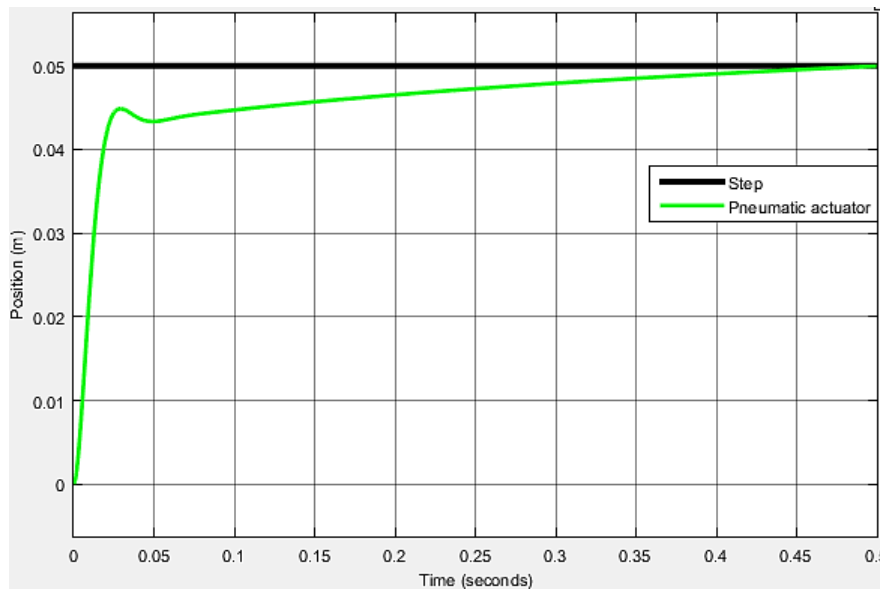
2.4 Προσομοίωση Συστήματος με Αναλογικό-Ολοκληρωτικό-Διαφορικό (PID) Ελεγκτή

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το μοντέλο προσομοίωσης πνευματικού συστήματος με ελεγκτή Αναλογίας-Ολοκλήρωσης-Διαφόρισης (Proportional-Integral-Derivative controller).



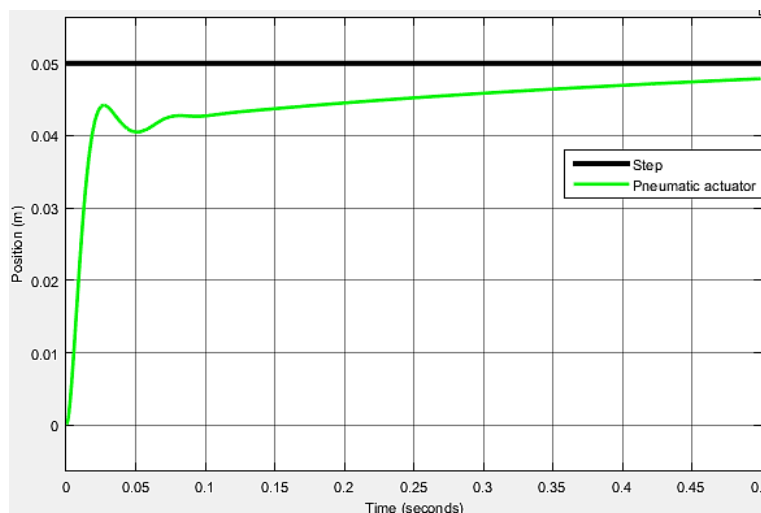
Σχ. 39: Πνευματικό Σύστημα με ελεγκτή Αναλογίας-Ολοκλήρωσης-Διαφόρισης PID

Οι τιμές που δόθηκαν στις παραμέτρους της βηματικής εισόδου είναι Step Time=0 και Final Value=0.05 m. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το block του ελεγκτή PID (Proportional-Integral-Derivative), δίνοντας τιμές σε όλα τα κέρδη του ελεγκτή PID, ώστε να πραγματοποιηθεί αναλογικός, ολοκληρωτικός και διαφορικός έλεγχος στο σύστημα. Η τιμές που δόθηκαν στα κέρδη είναι $K_P = 35$, $K_I = 5$, $K_D = 1.2$, και $N=100$ (συντελεστής φίλτρου). Με αυτές τις τιμές το σύστημα έχει και την επιθυμητή απόκριση, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο χρόνος προσομοίωσης είναι 0.5 sec.

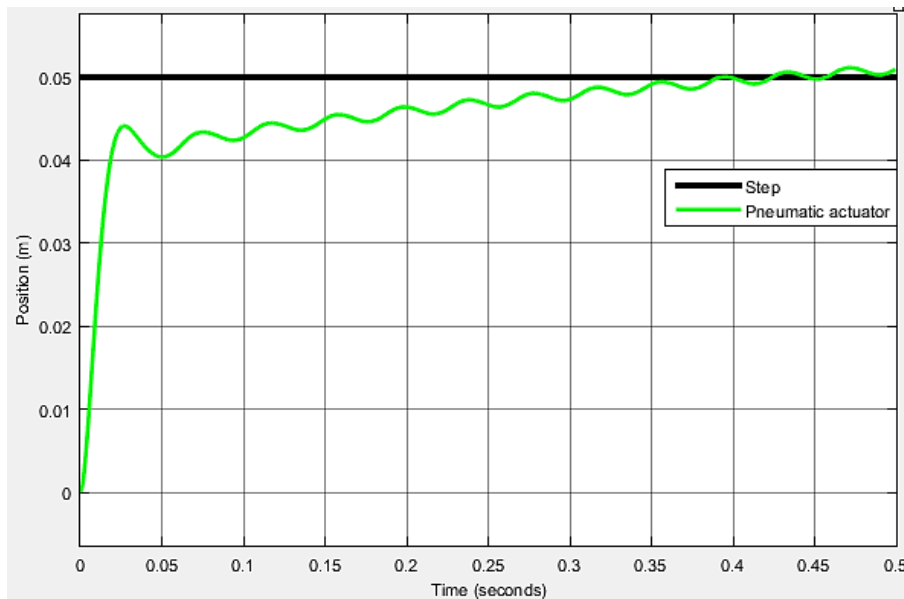


Σχ. 40: Απόκριση συστήματος με Αναλογικό-Ολοκληρωτικό-Διαφορικό ελεγκτή

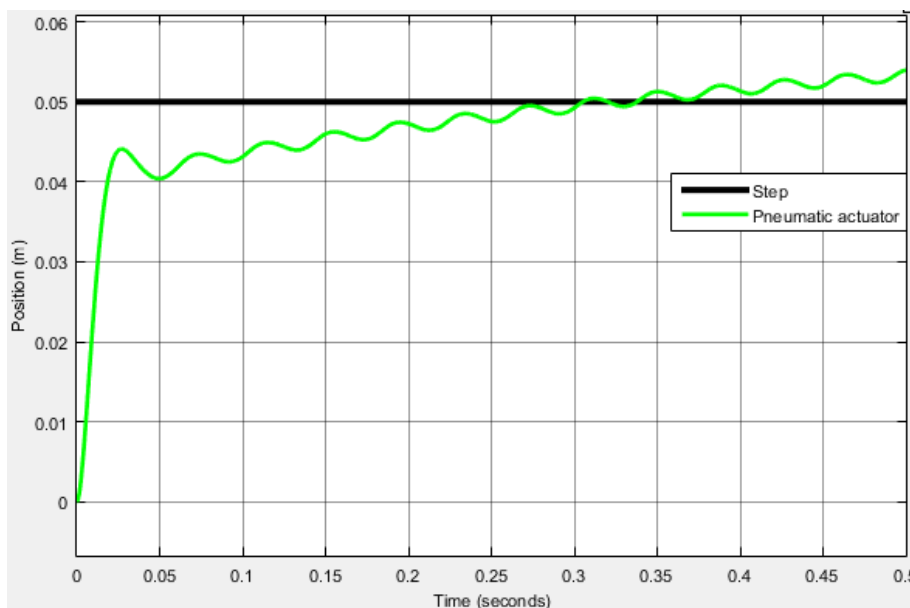
Με τις τιμές των κερδών $K_P = 35$, $K_I = 5$ και $K_D = 1.2$, το έμβολο ισορροπεί στην επιθυμητή θέση της εισόδου αναφοράς, δηλαδή στα 0.05 m. Στην περίπτωση σταδιακής αύξησης των τιμών των κερδών του ελεγκτή PID, παρατηρείται ότι το σύστημα παρουσιάζει σφάλμα μόνιμης κατάστασης, με τιμές της θέσης του πνευματικού εμβόλου μικρότερες από την επιθυμητή τιμή. Στην περίπτωση μεγάλης αύξησης των τιμών εμφανίζεται πάλι μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, καθώς και θόρυβος, με τιμές της θέσης του εμβόλου μεγαλύτερες από τα 0.05 m.



Σχ. 41: Απόκριση συστήματος με τιμές $K_P=50$, $K_I = 20$ και $K_D = 15$

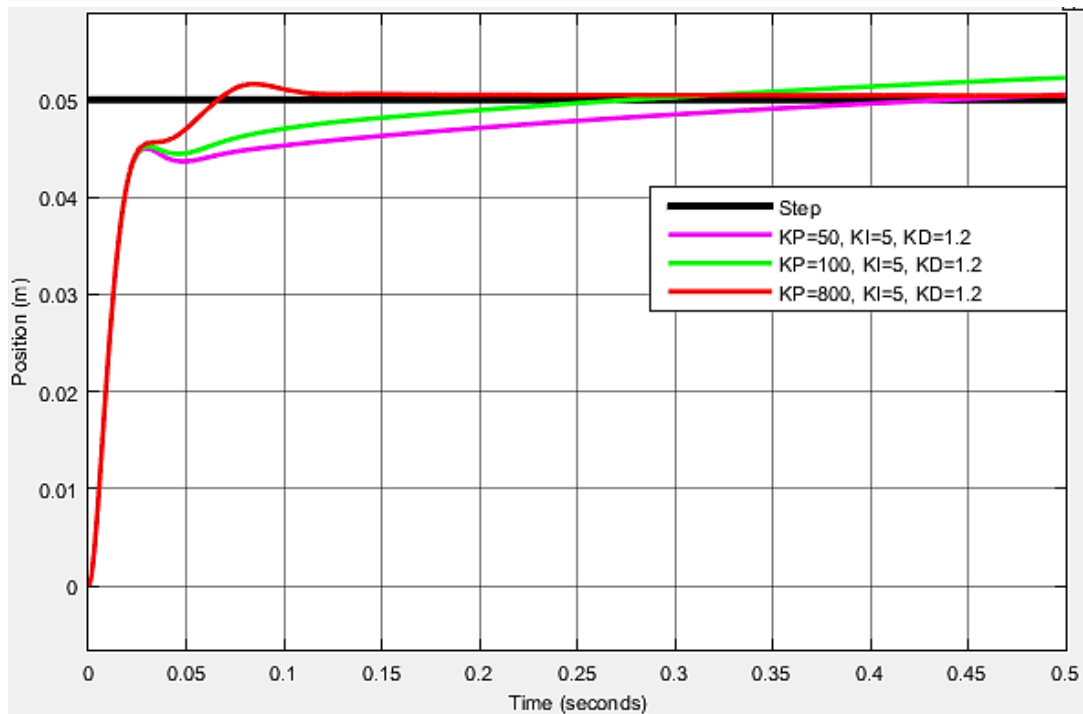


Σχ. 42: Απόκριση συστήματος με τιμές $K_p=90$, $K_I = 60$ και $K_D = 55$



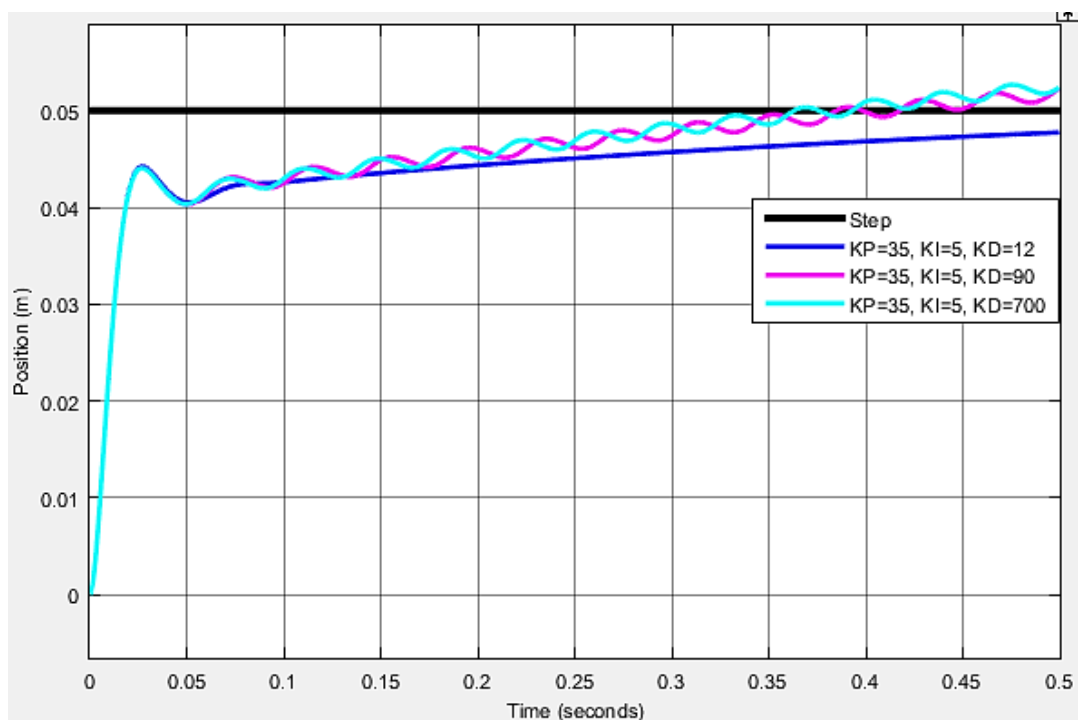
Σχ. 43: Απόκριση συστήματος με τιμές $K_p=200$, $K_I = 100$ και $K_D = 95$

Αυξάνοντας σταδιακά μόνο την τιμή του αναλογικού κέρδους, αφήνοντας σταθερά το ολοκληρωτικό και το διαφορικό κέρδος, παρατηρείται ότι εμφανίζεται μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, με τιμές της θέσης του εμβόλου μεγαλύτερες από τα 0.05 m. Αλλά στην περίπτωση μεγάλης αύξησης της τιμής του κέρδους K_p , το μόνιμο σφάλμα μειώνεται, χωρίς όμως να μπορεί να μηδενιστεί τελείως, δημιουργώντας και υπερύψωση στο πνευματικό σύστημα.



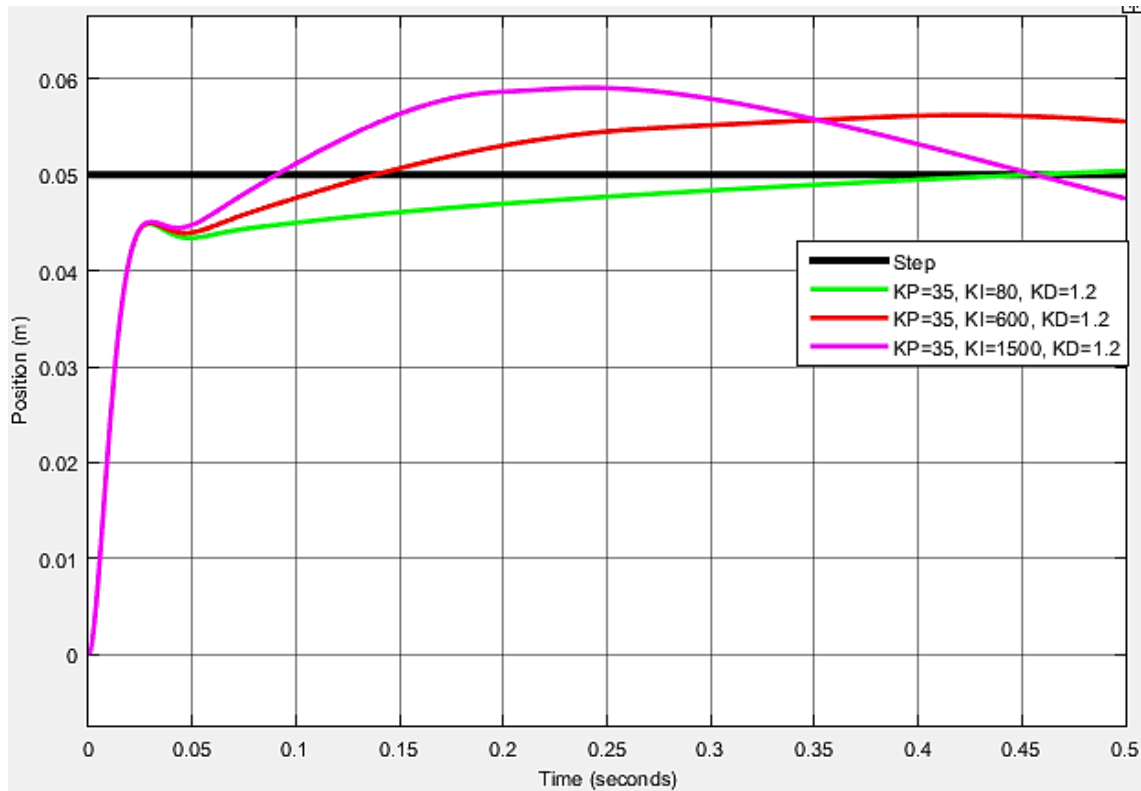
Σχ. 44: Απόκριση συστήματος για αυξημένη τιμή του αναλογικού κέρδους

Αυξάνοντας σταδιακά μόνο την τιμή του διαφορικού κέρδους, αφήνοντας σταθερά το αναλογικό και το ολοκληρωτικό κέρδος, παρατηρείται ότι εμφανίζεται μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, με τιμές της θέσης μικρότερες από τα 0.05 m. Αλλά στην περίπτωση μεγάλης αύξησης της τιμής του κέρδους K_D , εμφανίζεται πάλι μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, με τιμές της θέσης μεγαλύτερες από την επιθυμητή τιμή, καθώς και δημιουργείται και θόρυβος στο πνευματικό σύστημα.



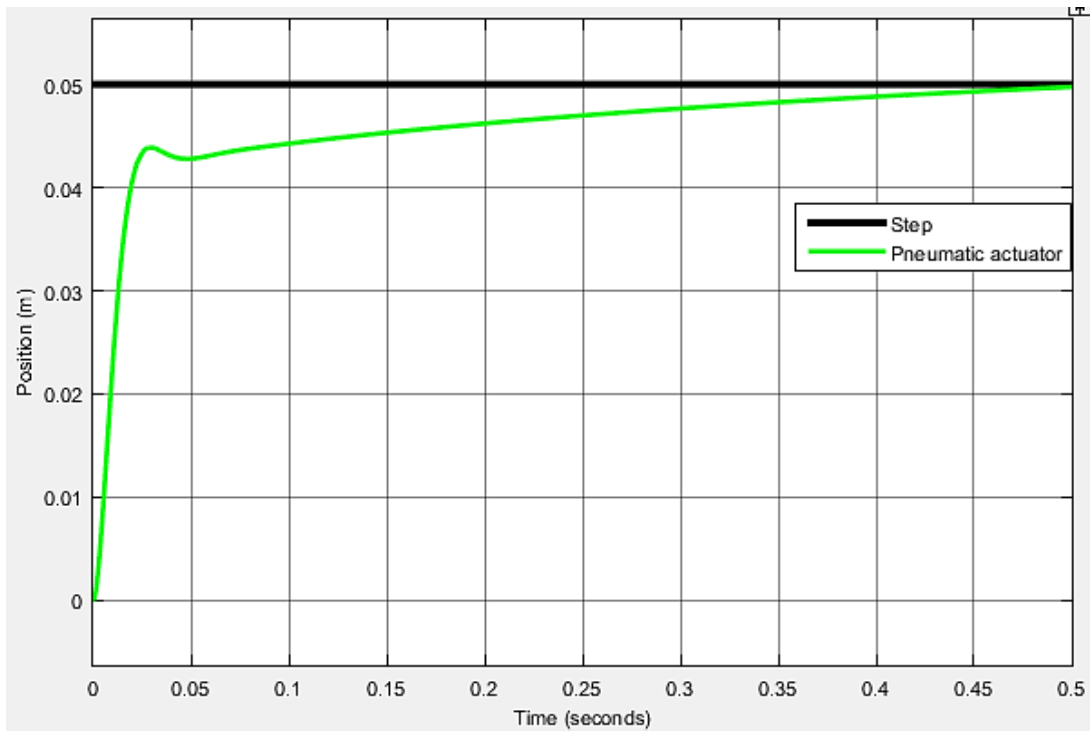
Σχ. 45: Απόκριση συστήματος για αυξημένη τιμή του διαφορικού κέρδους

Αυξάνοντας σταδιακά μόνο την τιμή του ολοκληρωτικού κέρδους, αφήνοντας σταθερά το αναλογικό και το διαφορικό κέρδος, παρατηρείται ότι εμφανίζεται μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, με τιμές της θέσης μεγαλύτερες από τα 0.05 m. Αλλά στην περίπτωση μεγάλης αύξησης της τιμής του κέρδους K_I , εμφανίζεται πάλι μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, με τιμές της θέσης μικρότερες από την επιθυμητή τιμή, καθώς και δημιουργείται και υπερύψωση στο πνευματικό σύστημα.

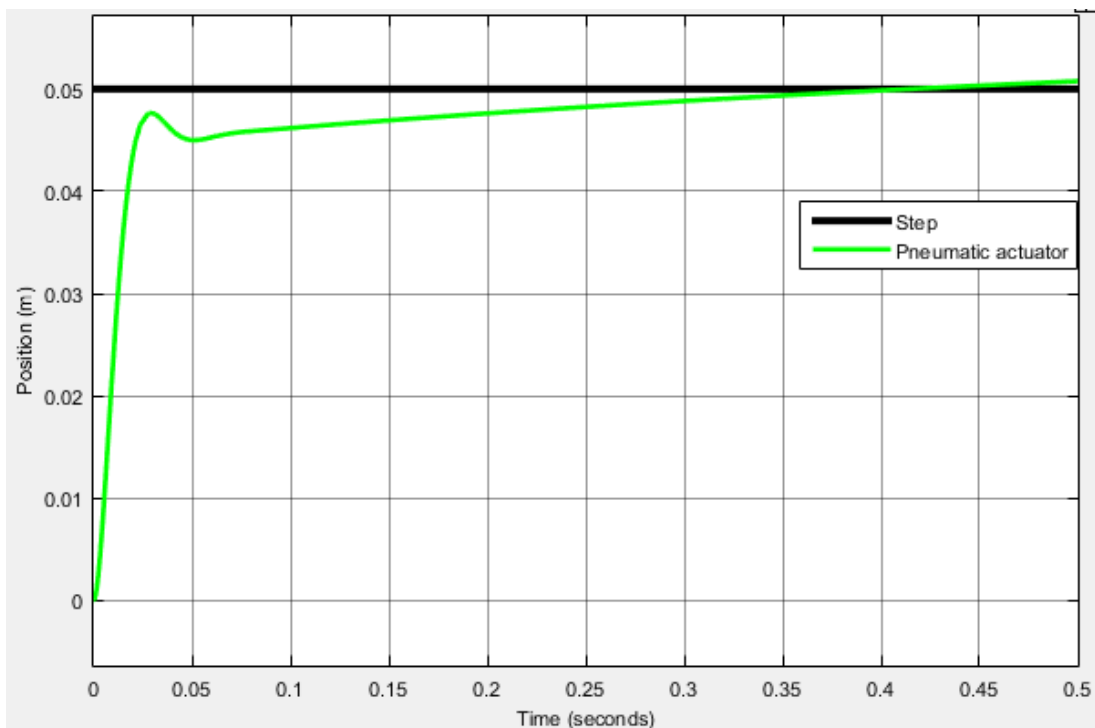


Σχ. 46: Απόκριση συστήματος για αυξημένη τιμή του ολοκληρωτικού κέρδους

Στην περίπτωση που το σύστημα δοκιμαστεί σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης παροχής αέρα, παρατηρείται ότι για μειωμένη τιμή της πίεσης εμφανίζεται μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, με τιμές της θέσης του εμβόλου μικρότερες από τα 0.05 m, ενώ στην περίπτωση αύξησης της τιμής του συμπιεστή εμφανίζεται μόνιμο σφάλμα στο σύστημα, με τιμές της θέσης του εμβόλου μεγαλύτερες από τα 0.05 m.



Σχ. 47: Απόκριση συστήματος με $K_P=35, K_I = 5, K_D = 1.2$ και διαφορά πίεσης συμπιεστή: 2 bar



Σχ. 48: Απόκριση συστήματος με $K_P=35, K_I = 5, K_D = 1.2$ και διαφορά πίεσης συμπιεστή: 13 bar

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Αποτελέσματα και Μελλοντικές Βελτιώσεις Συστήματος

3.1 Βέλτιστη λύση κλασικών μεθόδων ελέγχου

Παίρνοντας τις βέλτιστες αποκρίσεις του συστήματος, με το πνευματικό έμβολο να ισορροπεί στην επιθυμητή θέση της εισόδου αναφοράς, δηλαδή στα 0.05 m, χρησιμοποιώντας τις κλασικές μεθόδους έλεγχου Proportional (P), Proportional Derivative (PD), καθώς και Proportional-Integral-Derivative (PID), προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Με τον Αναλογικό (Proportional) ελεγκτή όπως φαίνεται και στο Σχ. 26, το σύστημα ενεργεί γρήγορα και δίνει την επιθυμητή απόκριση με τον κατάλληλο συντονισμό του αναλογικού κέρδους. Πρακτικά όμως, ο συγκεκριμένος ελεγκτής θεωρείται ακατάλληλος σε υψηλές απαιτήσεις εφαρμογής, γιατί η απόδοση του κάτω από την επιρροή του φορτίου δεν μπορεί να προβλεφθεί, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να αντιμετωπίσει μόνος του τις πιθανές διαταραχές που μπορούν να προκύψουν σε ένα σύστημα [12].
2. Με τον Αναλογικό-Διαφορικό (Proportional-Derivative) ελεγκτή όπως φαίνεται και στο Σχ. 33, το σύστημα ενεργεί γρήγορα, έχει πολύ καλή ακρίβεια θέσης και δίνει την επιθυμητή απόκριση χωρίς να δημιουργείται υπερύψωση, με τον κατάλληλο συντονισμό του αναλογικού και του διαφορικού κέρδους. Στην πράξη, οι ερευνητές [12], [17],[18],[19] έχουν αποδείξει ότι ο ελεγκτής PD μπορεί να δώσει την καλύτερη απόδοση σε ένα μη γραμμικό σύστημα, όπως είναι και το συγκεκριμένο πνευματικό σύστημα της παρούσας εργασίας.
3. Με τον Αναλογικό-Ολοκληρωτικό-Διαφορικό (Proportional-Integral-Derivative) ελεγκτή όπως φαίνεται και στο Σχ. 40, το σύστημα ενεργεί γρήγορα και δίνει την επιθυμητή απόκριση, χωρίς να δημιουργείται υπερύψωση, με τον κατάλληλο συντονισμό του αναλογικού, του ολοκληρωτικού και του διαφορικού κέρδους. Πρακτικά, με την παρουσία του όρου-I ενισχύεται η συνεχή δύναμη που ενεργείται στο πνευματικό έμβολο και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην σταθεροποιείται το σύστημα και να δημιουργούνται ταλαντώσεις. Συνεπώς, ο ελεγκτής PID θεωρείται ακατάλληλος σε μη γραμμικά συστήματα και αποθαρρύνει τους ερευνητές [12],[17],[18],[19] να τον χρησιμοποιήσουν σε μαθηματικά μοντέλα και σε πραγματικές πειραματικές διατάξεις.

Συμπερασματικά, ο ελεγκτής PD μπορεί να δώσει την καλύτερη απόδοση στο μη γραμμικό σύστημα της παρούσας εργασίας και θεωρείται η βέλτιστη λύση μαθηματικά και πρακτικά που μπορεί να εφαρμοστεί για τον επιτυχημένο έλεγχο της θέσης του πνευματικού εμβόλου.

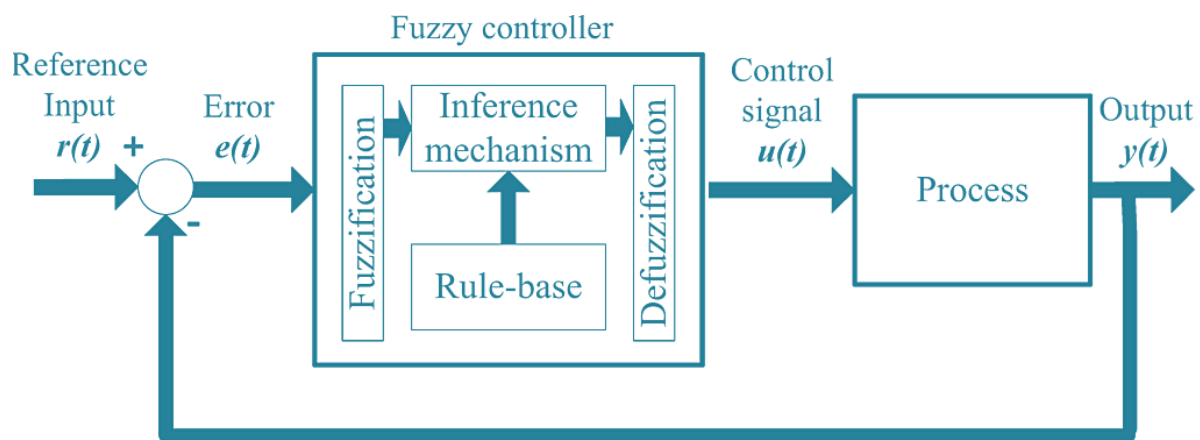
3.2 Μελλοντικές βελτιώσεις

3.2.1 Ελεγκτής ασαφούς λογικής

Ως μελλοντική επέκταση του πνευματικού συστήματος της παρούσας εργασίας, θα μπορούσε να ήταν η εφαρμογή ενός άλλου τύπου ελεγκτή, όπως είναι ο ελεγκτής ασαφούς λογικής (fuzzy logic controller), ο οποίος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον επιτυχημένο έλεγχο της θέσης του εμβόλου του συστήματος και να παρέχει νέα δεδομένα και νέα αποτελέσματα, βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Η ασαφής λογική (fuzzy logic) είναι μια επέκταση της κλασσικής αριστοτέλειας λογικής, με βάση της οποίας μια πρόταση μπορεί να είναι αληθής "με κάποιο βαθμό αληθείας" και όχι να είναι απλά αληθής ή ψευδής. Επιτρέπει τον ορισμό βαθμών αληθείας οι οποίοι ορίζονται από συναρτήσεις συμμετοχής και παίρνουν τιμές μεταξύ 0 και 1 για να περιγράψουν κατά πόσο ένα αντικείμενο συμμετέχει σε ένα ασαφές σύνολο.

Οι ευφείς ελεγκτές ασαφούς λογικής βασίζονται στην ασαφή λογική και μπορούν εύκολα να χειριστούν ασαφή στοιχεία, καθώς και στοιχεία με θόρυβο. Ο ασαφής έλεγχος (fuzzy control) είναι μια στρατηγική έλεγχου που δεν βασίζεται σε ένα μαθηματικό μοντέλο ενός συστήματος, που τις περισσότερες φορές είναι διαφορετικό από το πραγματικό.



Σχ. 49: Σ.Α.Ε κλειστού βρόχου με Ασαφή Ελεγκτή

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, τα βασικά δομικά στοιχεία των ελεγκτών ασαφούς λογικής είναι:

- Η βάση γνώσης (knowledge base.)
- Ο ασαφοποιητής (fuzzifier).
- Ο μηχανισμός συμπερασμού (inference engine).
- Τα ασαφή σύνολα (fuzzy sets).
- Ο από-ασαφοποιητής (defuzzifier).

Τα κύρια βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ο σχεδιαστής ενός ασαφούς ελεγκτή περιλαμβάνουν:

- Την λεκτική κατανομή των εισόδων, δηλαδή την αναπαράσταση των μεταβλητών εισόδου και εξόδου με λεκτικούς όρους.
- Την διατύπωση των κανόνων, δηλαδή μετά την κατανομή των εισόδων και των εξόδων τα ασαφή σύνολα πρέπει να αποθηκεύονται υπό τη μορφή συναρτήσεων συμμετοχής στον υπολογιστή για να πραγματοποιηθεί η διατύπωση των κανόνων.
- Τον καθορισμό του τύπου της ασαφούς συνεπαγωγής, δηλαδή μετά από τη διατύπωση των κανόνων πρέπει να πραγματοποιηθεί ο καθορισμός του ασαφούς τύπου συνεπαγωγής, από τους οποίους οι πιο γνωστοί είναι του Mamdani και του Larsen.
- Την από-ασαφοποίηση, η οποία είναι μια αντίθετη διαδικασία από την ασαφοποίηση και μπορεί και παράγει μία αυστηρή τιμή από ένα ασαφές σύνολο. Οι βασικές μέθοδοι από-ασαφοποίησης είναι, η από-ασαφοποίηση κεντρικής τιμής (Center Of Area-COA), η από-ασαφοποίηση μέσου όρου των μεγίστων (Mean Of Maxima-MOM), η από-ασαφοποίηση μικρότερου από τους μεγίστους (Smallest Of maxima-SOM) και η από-ασαφοποίηση μεγαλύτερου από τους μεγίστους (Largest Of maxima-LOM) [20],[21],[22],[23],[24].

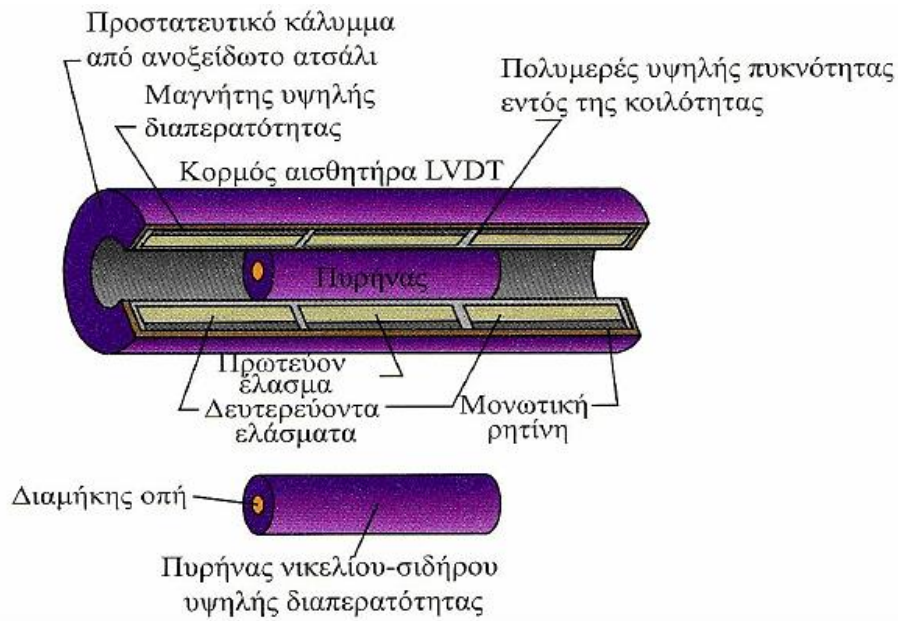
3.2.2 Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής (LVDT)

Επιπλέον, για τον έλεγχο της θέσης του πνευματικού εμβόλου θα μπορούσε να τοποθετηθεί στο πνευματικό σύστημα ένας Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής (Linear Variable Differential Transformer–LVDT).

Πρόκειται για τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο αισθητήρα μέτρησης μετατόπισης και ταχύτητας. Τα LVDT, είναι όργανα που έχουν μεγάλη ακρίβεια και δεν παρουσιάζουν σφάλμα, επειδή ο πυρήνας που διαθέτουν δεν βρίσκεται σε επαφή με τα πηνία και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχει μικρή φθορά, καθώς και μικρή μηχανική τριβή.



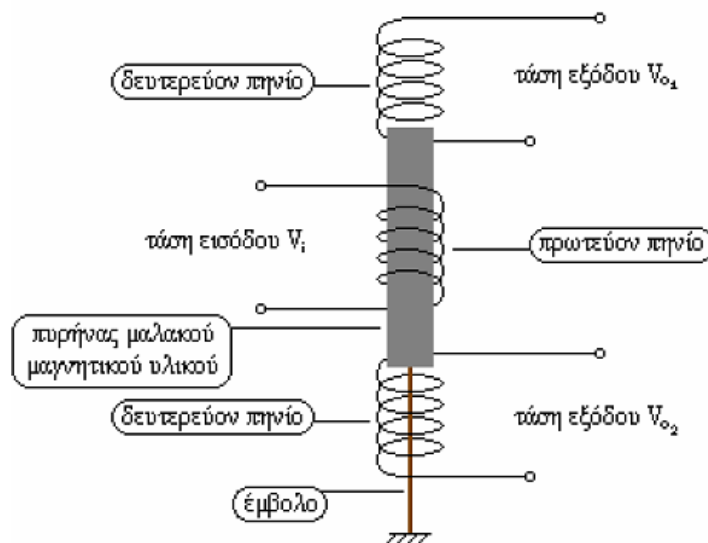
Σχ. 50: Μορφή ενός LVDT



Σχ. 51: Εσωτερική δομή LVDT

Η διάταξη του LVDT αποτελείται από δυο δευτερεύοντα πηνία και ένα πρωτεύον, το οποίο έχει στο κέντρο του έναν πυρήνα από μαλακό μαγνητικό υλικό. Όταν ρέει εναλλασσόμενο ρεύμα στο πρωτεύον πηνίο του μετασχηματιστή, παράγεται μια εναλλασσόμενη μαγνητική ροή και λόγω του νόμου της επαγωγής (Faraday) επάγεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη στα δευτερεύοντα πηνία.

Όταν ο πυρήνας είναι στο κέντρο του συστήματος και εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση εισόδου στο πρωτεύον πηνίο, τότε το ρεύμα που διέρχεται από το πρωτεύον δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του πυρήνα, το οποίο και προκαλεί ηλεκτρεγερτική δύναμη στα δευτερεύοντα πηνία με την ίδια φάση και το ίδιο πλάτος.



Σχ. 52: Διάταξη LVDT αισθητήρα

Ο Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η χρήση του μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές όπως:

- Για τον έλεγχο της στάθμης νερού σε ένα δοχείο.
- Στη ρομποτική.
- Σε μηχανουργεία.
- Σε συστήματα μέτρησης δύναμης, πίεσης, καθώς και επιτάχυνσης.
- Για τον έλεγχο της θέσης υδραυλικών εμβόλων
- Για τον έλεγχο της θέσης πνευματικών εμβόλων.

Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των LVDT αισθητήρων αναφέρονται ως εξής:

- Είναι όργανα που μπορούν να μετρήσουν μόνο μικρές μετατοπίσεις.
- Επηρεάζονται από τους κραδασμούς.
- Επηρεάζονται από την θερμοκρασία [25],[26].

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Υδραυλικά-Πνευματικά Συστήματα και Εφαρμογές, Αθανάσιος Τ. Ρούτουλας, Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα 2008.
- [2] Πτυχιακή εργασία: Σύστημα Ελιγμών Κύριας Μηχανής Πλοίου, Παναγιωτόπουλος Παναγιώτης, Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Μακεδονίας, Σχολή Μηχανικών, 2012.
- [3] Αυτοματισμοί και Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου, Α' τεύχος του τομέα Ηλεκτρολογίας, Λιγνός Ι, Μπουσλής Π, Πολίτης Γ., Χαμηλοθώρης Γ., Αθήνα 2001.
- [4] A. Chitty, T. H. Lambert, "Modelling a Loaded Two-Way Pneumatic actuator", Measurement and Control, Vol 9, January, 1976.
- [5] Al-Ibrahim, A.M., Otis, D.R., "Transient Air Temperature and Pressure Measurements During the Charging and Discharging Processes of an Actuating Pneumatic Cylinder", Proceedings of the 45th National Conference on Fluid Power, 1992.
- [6] Mads Grahl-Madsen, "Computerised Analysis of a Pneumatic Actuator", c11, SIMS'S 96, Trondheim Norway.
- [7] Kagawa T., Cai M.L., Fujita T., Takeuchi M. "Energy consideration of pneumatic cylinder actuating system", Proceedings of the Sixth Triennial International symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, Sherbrooke, Canada, 2000.
- [8] http://islab.teipir.gr/web/Donwloads/Simeiwseis/pneu_theory2.pdf
- [9] https://dSPACE.lib.ntua.gr/dSPACE2/bitstream/handle/123456789/562/themelism_plc.pdf?sequence=1
- [10] Ιστορία της Τεχνολογίας & των Αυτομάτων, Σ. Βασιλειάδου και Δ. Καλλιγερόπουλος, Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα, 2005.
- [11] http://www.lme.ntua.gr:8080/academic-info-1/prospheromena-mathemata/eisagoge-ston-automato-elegkho/files/cs11_book_gr_xe_p3.pdf
- [12] Astrom K., Häglund T., "PID Controllers Theory, Design and Tuning", Library of Congress Cataloguing-in-Publication Data, 1999.
- [13] Gang B., Yujun L., Zuwen W., "The calculation of two-dimension viscous flow field in tube of pneumatic system", The Fifth International Conference on Fluid Power Transmission and Control (ICFP 2001), held in the Hangzhou, China, April 3-5, 2001.
- [14] Esteve Codina, Josep Xercavins, "Flow Rate Characteristics of Pneumatic Fittings", Proceedings of the 45th National Conference on Fluid Power, 1992.
- [15] Richer E., Hurmuzlu Y., "A High Performance Force Actuator System Part 1 Nonlinear Mathematical Model", ASME Journals of Dynamics Systems Measurement and Control, Vol. 122, No3, pp. 416-425, 2000.
- [16] <https://www.mathworks.com/products/simscape/model-examples.html>
- [17] K.K. Ahn, D.C Thanh, "Nonlinear PID Control to Improve the Control Performance of the Pneumatic Artificial Muscle Manipulator Using Neural Network", Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 19, No1, pp. 106-115, 2005.
- [18] Yaolong Tan, "Nonlinear Observer/Controller Design and Its Application to Friction Compensation", PhD thesis, University Of California, Los Angeles, 2000.
- [19] Shen Dongkai Wang Zhanlin, "An adaptive controller based on neural networks for motor-drive load simulator", IEEE Proceedings of the 35th Conference on Decision Control, Kobe, Japan December 1996.

- [20] Ευφύης Έλεγχος, Ρ.Ε. Κίνγκ, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004.
- [21] [http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/6399/3/Nimertis_Kokkotas\(ele\).pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/6399/3/Nimertis_Kokkotas(ele).pdf)
- [22] White D A & Sofge D A, Eds., “Handbook of Intelligent Control: Neural, Fuzzy, and Adaptive Approaches”, Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [23] Ming-Chang Shih, Niarn-Liarnng Luor, “Self-Tuning Neural Fuzzy Control the Position of a Pneumatic Cylinder Under Vertical Load”, IEEE Trans. on IE, Vol. 39, No. 6, pp. 472-489, 1992.
- [24] Moreno Llagostera, “Control of a Pneumatic Servosystem using Fuzzy Logic”, Proceedings of 1st FPNI-PhD Symp., pp 189-201, Hamburg 2000.
- [25] Πτυχιακή εργασία: Μέτρηση ταχύτητας με χρήση αισθητήρων, Ζαχαριουδάκης Στέφανος, Τμήμα Ηλεκτρονικής, Τ.Ε.Ι Κρήτης, 2010.
- [26] Ενότητα 6: Μέτρηση Κίνησης (μετατόπισης, προσέγγισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης), Μηχανικής Τάσης και Βάρους, Λάμπρος Μπισδούνης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας.