

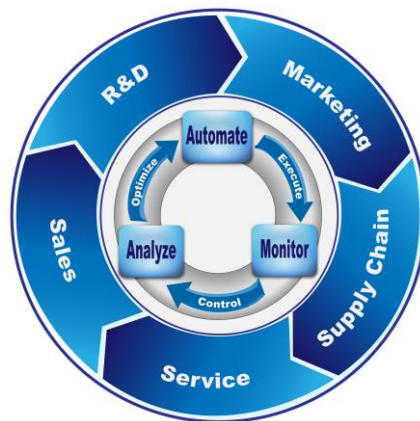


**Συγκριτική Μελέτη Εφαρμογής Μεθόδων Ελέγχου
Πνευματικού Συστήματος σε Περιβάλλον Προσομοίωσης**

ΝΤΙΜΕΡΗ ΕΛΕΝΗ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών:

Αυτοματισμός Παραγωγής και Υπηρεσιών



ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Πειραιάς, Οκτώβριος 2017



Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Αυτοματισμός Παραγωγής και Υπηρεσιών» του Τμήματος Μηχανικών Αυτοματισμού του Ανωτάτου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιώς Τεχνολογικού Τομέα.



ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη.....**Ντίμερη Ελένη**....., του**Γρηγορίου**....., με αριθμό μητρώου**38**..... φοιτητήτρια 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 απονεμίσει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφαση 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 δμήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

Ο Δηλών

Ημερομηνία

Οκτώβριος 2017



Ευχαριστήριο σημείωμα

Θα ήθελα αρχικά, να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Χρήστο Δρόσο για την πολύτιμη βοήθεια του, καθώς και τη διάθεση συνεργασίας που επέδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις πολύτιμες συμβουλές και τις γνώσεις, τις οποίες απέκτησα, μέσω των μαθημάτων του στα οποία ήταν διδάσκων.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος «Αυτοματισμός Παραγωγής και Υπηρεσιών» , διότι μέσω της διδασκαλίας τους μου πρόσφεραν τα θεμέλια για την επαγγελματική μου σταδιοδρομία. Τέλος, θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, γιατί χάρη στη δική τους αγάπη πραγματοποιώ τους στόχους μου. Όπως επίσης θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους καλούς μου φίλους, για όλη την στήριξη και βοήθεια που μου προσέφεραν και συνεχίζουν να μου προσφέρουν.

Ντίμερη Ελένη
Αθήνα, Οκτώβριος 2017



Περίληψη

Με γνώμονα τους ταχύτετους ρυθμούς ανάπτυξης της τεχνολογίας στην σημερινή εποχή, έχει σημειωθεί μια αδιάκοπη προσπάθεια να εισαχθούν στην καθημερινότητα τεχνολογικά επιτεύγματα ούτως ώστε να καλυφθούν καλύτερα, ευκολότερα και πιο οικονομικά οι ανθρώπινες ανάγκες. Ειδικότερα στον τομέα της βιομηχανίας, της έρευνας και των εφαρμογών παρατηρήθηκε η ανάγκη ύπαρξης προγραμμάτων προσομοίωσης, καθώς προσφέρουν ασφάλεια σε τυχόν σφάλματα, μειώνουν το κόστος και είναι προσιτά ως προς τη χρήση σε επαγγελματίες και σπουδαστές ανώτερης εκπαίδευσης. Στην παρούσα διατριβή θα παρουσιαστεί η μελέτη εφαρμογής μεθόδων ελέγχου πνευματικού συστήματος σε περιβάλλον προσομοίωσης. Επιπροσθέτως, θα αναλυθεί και θα περιγραφεί η λειτουργία του συγκεκριμένου πνευματικού συστήματος καθώς και όλοι οι μέθοδοι ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό. Το αντικείμενο της μελέτης, το οποίο εμπίπτει με το Π.Μ.Σ, δεδομένου ότι πραγματεύεται σύγχρονες εφαρμογές τεχνολογιών αυτοματισμού, θα προσπαθήσει να καλύψει ερωτήματα όπως εάν οι συγκεκριμένοι μέθοδοι ελέγχου είναι κατάλληλοι και αποτελεσματικοί για το πνευματικό σύστημα όπου μελετάται, και κυρίως πόσο αποτελεσματική είναι η χρήση ενός πίνακα αντιστοίχισης Ασαφούς ελεγκτή (Fuzzy) με Αναλογικό-Ολοκληρωτικό-Διαφορικό ελεγκτή (PID). Για τη χρήση του συγκεκριμένου πίνακα στο πνευματικό σύστημα της παρούσας μελέτης δεν έχουν εξαχθεί αποτελέσματα μέχρι σήμερα. Τα δύο αυτά γεγονότα αποτελούν τον κύριο σκοπό αυτής της διατριβής, σε μια προσπάθεια οι παραπάνω εφαρμογές να πραγματοποιούν τον έλεγχο του συστήματος. Το κυρίως μέρος της μελέτης θα επεξηγεί τον σχεδιασμό του συστήματος καθώς επίσης το είδος των ελεγκτών και του πίνακα αντιστοίχισης. Ο τρόπος σύνδεσης και λειτουργίας μεταξύ του πνευματικού συστήματος, των μεθόδων ελέγχου και του πίνακα, στο περιβάλλον προσομοίωσης θα παρουσιαστούν αναλυτικά, ενώ από όλα τα ανωτέρω θα προκύψουν τα συμπεράσματα χρήσης των συγκεκριμένων μεθόδων ελέγχου, θα συζητηθούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους και ταυτόχρονα θα προταθούν βελτιστοποιήσεις έτσι ώστε να επεκταθούν περαιτέρω τα οφέλη από την λειτουργία τους. Ως πιθανό αποτέλεσμα της χρήσης των παραπάνω μεθόδων αναμένεται να προκύψει η επίτευξη του βέλτιστου και αποδοτικότερου ελέγχου του συστήματος. Υπολογίζεται ότι η μελέτη θα ολοκληρωθεί εντός 4 μηνών, δεδομένου ότι η συλλογή βιβλιογραφίας από το διαδίκτυο θα συνοδευτεί από την υλοποίηση του συστήματος και των μεθόδων ελέγχου του στο περιβάλλον προσομοίωσης. Κατά τον τελευταίο (τέταρτο) μήνα θα πραγματοποιηθεί η συγγραφή της διατριβής και οι διορθώσεις αυτής σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή.

Λέξεις-Κλειδιά:

Πνευματικό Σύστημα, Μέθοδοι Ελέγχου, Simulink, PID Controller, Lookup Table Fuzzy PID Controller



Abstract

In light of the rapid rates of technology development in our times, there has been a continuous effort to introduce everyday technological advances in order to cover better, easier and more economically human needs. Especially in the sector of industry, research and applications, the need for simulation programs was seen as offering security to errors, reduce costs and they are accessible to use by professionals and higher education students. This thesis will present the study of control methods' application for pneumatic system in simulation environment. In addition, it will analyze and describe the operation of the pneumatic system and all the testing methods used in it. The object of the study, which comes with MSc, since it deals with modern automation technology applications, will try to cover questions such as whether these control methods are appropriate and effective for the pneumatic system which is studied, and especially how effective it is the use of a Lookup table to Implement Fuzzy controller(Fuzzy) with Proportional-Integral-Differential controller (PID).For the use of this Lookup table in the pneumatic system of the present study, results have not been extracted to date. These two events are the main purpose of this thesis, in an attempt to perform control of the system on the applications above. The main part of the study will explain the design of the system as well as the type of controllers and the Lookup table. The way of connecting and operating among the pneumatic system, the control methods and the Lookup table, in the simulation environment will be presented in detail, while all this will emerge the conclusions of use specific control methods, the advantages and disadvantages will be discussed and both will be proposed optimizations to further expanding benefits of their operation. As a possible result of using these methods, will occur to achieve the optimal and efficient control of the system. It is estimated that the study will be completed within four months, since the collection of literature from the internet will be accompanied by the implementation of the system and the methods of control in the simulation environment. During the last (fourth) month the writing of the thesis will take place and also corrections in cooperation with the supervisor.

Keywords:

Pneumatic System, Control Methods, Simulink, PID Controller, Lookup Table Fuzzy PID Controller



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	5
Abstract	6
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Σχημάτων	9
Εισαγωγή	12
Κεφάλαιο 1: Πνευματικά Συστήματα	13
1.1 Πνευματικά Συστήματα.....	13
1.1.2 Εφαρμογές Πνευματικών Συστημάτων	13
1.1.3 Πλεονεκτήματα Πνευματικών Συστημάτων	13
1.1.4 Μειονεκτήματα Πνευματικών Συστημάτων	14
1.2 Εφαρμογές προσομοίωσης	14
1.2.1 Τύποι προσομοιώσεων	15
1.2.2 Πλεονεκτήματα προσομοίωσης.....	16
1.2.3 Μειονεκτήματα προσομοίωσης.....	16
1.2.4 Παράδειγμα λογισμικού προσομοίωσης	16
1.3 Εισαγωγή στο Simulink.....	17
1.3.1 Ενεργοποίηση του Simulink.....	17
1.3.2 Άνοιγμα αρχείων και προσθήκη στοιχείων (blocks) σε αυτά	18
1.3.3 Γνωριμία με την βιβλιοθήκη Simulink.....	19
1.3.4 Βιβλιοθήκη Continuous.....	19
1.3.5 Βιβλιοθήκη Math Operators	20
1.3.6 Βιβλιοθήκη Sinks	21
1.3.7 Βιβλιοθήκη Sources.....	23
1.3.8 Χρήση των στοιχείων των βιβλιοθηκών του simulink.....	24
Κεφάλαιο 2: Έλεγχος Πνευματικού Συστήματος Με Χρήση PID Ελεγκτή	25
2.1 Το μαθητικό μοντέλο του Πνευματικού Συστήματος	25
2.1.1 Περιγραφή	26
2.1.2 Είδη Ελεγκτών.....	39
2.2.1 Περιγραφή Συστήματος.....	45



Κεφάλαιο 3: Έλεγχος Πνευματικού Συστήματος Με Χρήση Lookup table για εφαρμογή Ελεγκτή Fuzzy	50
3.1 Ασαφής Λογική.....	50
3.1.1 Ασαφείς Ελεγκτές.....	52
3.1.2 Βασικοί Όροι	56
3.1.3 Βασικές Ιδιότητες Ασαφών Συνόλων.....	57
3.1.4 Συναρτήσεις Συμμετοχής	58
3.1.5 Πράξεις Ασαφών Συνόλων.....	60
3.1.6 Λεκτικοί Τροποποιητές ή Φράκτες	62
3.1.7 Ασαφείς Κανόνες	63
3.1.8 Συστήματα Ασαφούς Λογικής.....	64
3.1.9 Το Ασαφές Μοντέλο Mamdani	64
3.1.10 Συστήματα τύπου Sugeno	67
3.1.11 Συνοψίζοντας για τις μεθόδους Mamdani και Takagi-Sugeno	68
3.1.12 Lookup Table Fuzzy PID Controller	68
3.2 Εφαρμογή Lookup table για Ελεγκτή Fuzzy και συσχέτιση με τον ελεγκτή PID.....	73
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Μελλοντική Έρευνα.....	75
4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων ελέγχου	75
4.2 Μελλοντικές Βελτιστοποιήσεις	76
Βιβλιογραφία	78
Παραρτήματα	80
Παράρτημα 1 [PAPER].....	80
Παράρτημα 2 [PROPOSAL]	90



Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Πνευματικό Σύστημα	13
Σχήμα 1.2: Περιβάλλον λογισμικού ΓΑΙΑ II.....	17
Σχήμα 1.3: Simulink Library Browser	18
Σχήμα 1.4: Παλμογράφος.....	22
Σχήμα 1.5: Σύνδεση μεταξύ δύο Block	24
Σχήμα 2.1: Μορφή Πνευματικού Συστήματος.....	25
Σχήμα 2.2: Λογικό Διάγραμμα ενός Πνευματικού Συστήματος.....	27
Σχήμα 2.3: Κύλινδρος απλής ενέργειας χωρίς ελατήριο επαναφοράς.....	29
Σχήμα 2.4: Κύλινδρος απλής ενέργειας με ελατήριο επαναφοράς	29
Σχήμα 2.5: Κύλινδρος με απλό βάκτρο	30
Σχήμα 2.6: Κύλινδρος με διπλό βάκτρο	30
Σχήμα 2.7: Τηλεσκοπικός κύλινδρος	30
Σχήμα 2.8: Κύλινδρος με επιβράδυνση	31
Σχήμα 2.9: Εσωτερικό κυλίνδρου διπλής ενέργειας με απλό βάκτρο	31
Σχήμα 2.10: Εσωτερικό κυλίνδρου διπλής ενέργειας Tandem.....	32
Σχήμα 2.11: Βαλβίδα δύο θέσεων	33
Σχήμα 2.12: Βαλβίδα τριών θέσεων	33
Σχήμα 2.13: Ροή αέρα.....	33
Σχήμα 2.14: Διακοπή	33
Σχήμα 2.15: Βαλβίδα με τρεις πόρτες	33
Σχήμα 2.16: Βαλβίδα με πέντε πόρτες.....	33
Σχήμα 2.17: Βαλβίδα 5/2	34
Σχήμα 2.18: Βαλβίδα 5/3 με ενδιάμεση ανοιχτή θέση	35
Σχήμα 2.19: Βαλβίδα 5/3 με ενδιάμεση κλειστή θέση	35
Σχήμα 2.20: Βαλβίδα 3/2	36
Σχήμα 2.21: Βαλβίδα απλού ελέγχου με ελατήριο και χωρίς ελατήριο.....	37
Σχήμα 2.22: Βαλβίδα αντεπιστροφής.....	37
Σχήμα 2.23: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού ελεγκτή P	39
Σχήμα 2.24: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού ελεγκτή I.....	40
Σχήμα 2.25: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού ελεγκτή D	42



Σχήμα 2.26: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή PI ...	42
Σχήμα 2.27: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού-διαφορικού ελεγκτή PD	43
Σχήμα 2.28: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού-ολοκληρωτικού-διαφορικού ελεγκτή PID	45
Σχήμα 2.29: Πνευματικό Σύστημα με ελεγκτή Αναλογίας P	46
Σχήμα 2.30: Γραφική Απεικόνιση συστήματος με Αναλογικό ελεγκτή	47
Σχήμα 2.31: Πνευματικό Σύστημα με Αναλογικό- Ολοκληρωτικό ελεγκτή PI ...	47
Σχήμα 2.32: Γραφική Απεικόνιση συστήματος με Αναλογικό - Ολοκληρωτικό ελεγκτή	48
Σχήμα 2.33: Πνευματικό Σύστημα με Αναλογικό- Ολοκληρωτικό-Διαφορικό ελεγκτή PID	48
Σχήμα 2.34: Γραφική Απεικόνιση συστήματος με Αναλογικό – Ολοκληρωτικό- Διαφορικό ελεγκτή	49
Σχήμα 2.35: Πνευματικό Σύστημα με Αναλογικό-Διαφορικό ελεγκτή PD	49
Σχήμα 2.36: Γραφική Απεικόνιση συστήματος με Αναλογικό – Διαφορικό ελεγκτή	50
Σχήμα 3.1: Σύγκριση κλασικού και ασαφούς συνόλου	51
Σχήμα 3.2: Σύγκριση ασαφών συνόλων, Α-τριγωνικού, Β-τραπεζοειδούς, Γ-καμπανοειδούς, που εκφράζουν την ίδια ασαφή έννοια, «χ περίπου 55»	52
Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστικό διάγραμμα ροής του ασαφούς συμπερασμού	54
Σχήμα 3.4: Χαρακτηριστική συνάρτηση συμμετοχής ενός κλασικού ή crisp συνόλου (αριστερά) και ενός ασαφούς συνόλου (δεξιά)	56
Σχήμα 3.5: Ύψος, υποστήριξη και κόρος ενός ασαφούς συνόλου	58
Σχήμα 3.6: Παράδειγμα τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής (x; 20, 50, 80)	58
Σχήμα 3.7: Παράδειγμα τραπεζοειδούς συνάρτησης συμμετοχής (x; 20, 40, 60, 80)	59
Σχήμα 3.8: Παράδειγμα καμπανοειδούς συνάρτησης συμμετοχής (x; 20, 4, 50) ...	59
Σχήμα 3.9: Παράδειγμα γκαουσιανής συνάρτησης συμμετοχής (x; 10, 50)	60
Σχήμα 3.10: Παράδειγμα σιγμοειδούς συνάρτησης συμμετοχής (x; 0.4, 50)	60
Σχήμα 3.11: Minimum (αριστερά) και Product (δεξιά) δύο ασαφή συνόλων	61
Σχήμα 3.12: Maximum (αριστερά) δύο ασαφή συνόλων και Probabilistic sum (δεξιά) δύο ασαφή συνόλων	62
Σχήμα 3.13: Complement ενός ασαφούς συνόλου	62
Σχήμα 3.14: Βασική δομή του Mamdani ασαφή συμπερασμού	66



Σχήμα 3.15: Ο τελεστής AND product στον ασαφή συμπερασμό	66
Σχήμα 3.16: Ο τελεστής OR probor στον ασαφή συμπερασμό	67
Σχήμα 3.17: Ένα σύστημα sugeno	67
Σχήμα 3.18: Γράφημα Επιφάνειας Ελέγχου	69
Σχήμα 3.19: Δομή Ασαφούς Ελεγκτή PID	70
Σχήμα 3.20: Εσωτερική Δομή Ασαφούς Ελεγκτή PID	70
Σχήμα 3.21: Συμβατικός Ελεγκτής PID	71
Σχήμα 3.22: Ο ασαφής ελεγκτής PID που χρησιμοποιεί 2-D Lookup Table.....	73
Σχήμα 3.23: Πνευματικό Σύστημα με ελεγκτή PID χρησιμοποιώντας Lookup Table.....	74
Σχήμα 3.24: Αποτελέσματα Workspace.....	74
Σχήμα 3.25: Γραφική Απεικόνιση συστήματος με ελεγκτή PID χρησιμοποιώντας Lookup Table	75
Σχήμα 4.1: Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής.....	76
Σχήμα 4.2: Διάταξη LVDT	77
Σχήμα 4.3: Εσωτερική δομή Αισθητηρίου LVDT	77



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

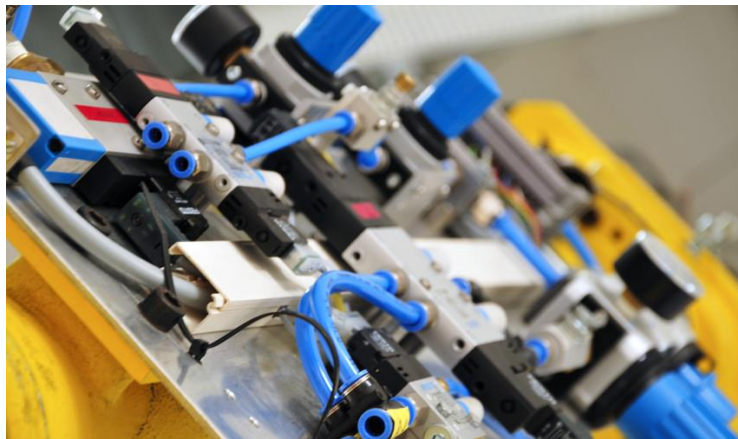
Με κριτήριο την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας, έχει πραγματοποιηθεί μια αέναη προσπάθεια να εισαχθούν στην καθημερινότητα τεχνολογικά επιτεύγματα έτσι ώστε να ικανοποιηθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο οι ανθρώπινες ανάγκες. Πιο συγκεκριμένα, στον τομέα της βιομηχανίας, της έρευνας και των εφαρμογών παρατηρήθηκε η ανάγκη ύπαρξης προγραμμάτων προσομοίωσης, διότι διαθέτουν ασφάλεια σε πιθανά σφάλματα, ελαχιστοποιούν το κόστος και είναι αρκετά προσιτά ως προς τη χρήση, τόσο σε επαγγελματίες όσο και σε σπουδαστές ανώτερης εκπαίδευσης. Στην παρούσα διατριβή θα παρουσιαστεί η μελέτη εφαρμογής μεθόδων ελέγχου πνευματικού συστήματος σε περιβάλλον προσομοίωσης. Επιπροσθέτως, θα αναλυθεί και θα περιγραφεί η λειτουργία του πνευματικού συστήματος που μελετάται, καθώς επίσης και όλοι οι μέθοδοι ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό. Το αντικείμενο της μελέτης, θα προσπαθήσει να απαντήσει ερωτήματα όπως εάν οι συγκεκριμένοι μέθοδοι ελέγχου είναι κατάλληλοι και αποτελεσματικοί για το συγκεκριμένο πνευματικό σύστημα, και κυρίως πόσο αποτελεσματική είναι η χρήση ενός πίνακα αντιστοίχισης Ασαφούς ελεγκτή (Fuzzy) με Αναλογικό-Ολοκληρωτικό-Διαφορικό ελεγκτή (PID).



Κεφάλαιο 1: Πνευματικά Συστήματα

1.1 Πνευματικά Συστήματα

Ο όρος πνευματικό παραπέμπει στην λέξη πνεύμα όπου στα αρχαία ελληνικά σημαίνει άνεμος και αέρας. Οποιοδήποτε σύστημα χρησιμοποιεί την ενέργεια που έχει αποθηκευθεί στον πεπιεσμένο αέρα, για να παράγει έργο ονομάζεται Πνευματικό Σύστημα. [1]



Σχήμα 1.1: Πνευματικό Σύστημα

1.1.2 Εφαρμογές Πνευματικών Συστημάτων

Τα πνευματικά συστήματα αυτομάτου ελέγχου χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικά περιβάλλοντα όπου ο ακριβής και γρήγορος έλεγχος, είναι απαραίτητος. Σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως νοούνται σήμερα, στον αυτοματισμό εργοστασίων, ο πεπιεσμένος αέρας άρχισε να χρησιμοποιείται τη δεκαετία του 1950, και από τότε η χρήση του αυξάνεται συνεχώς. Με χρήση πνευματικών συστημάτων ελέγχου είναι σε θέση να υλοποιηθούν όλες οι συναρτήσεις δυαδικού ελέγχου, όπως επίσης είναι εφικτό να σχεδιαστούν και να υλοποιηθούν τα περισσότερα κυκλώματα αυτομάτου ελέγχου όπου έχουν σαν βάση τους την ψηφιακή δυαδική λογική. [1]

1.1.3 Πλεονεκτήματα Πνευματικών Συστημάτων

Τα βασικά πλεονεκτήματα των πνευματικών συστημάτων είναι:

- Η ικανότητά τους να αναπτύσουν μεγάλες δυνάμεις
- Οι υψηλές ταχύτητες απόκρισης
- Η ικανοποιητική δυνατότητα συμπίεσης του αέρα
- Ο υψηλός λόγος δυνάμεως προς βάρος
- Το μικρό κόστος αποθήκευσης του αέρα σε δεξαμενές
- Το μικρό κόστος κατασκευής των συστημάτων ελέγχου και ρύθμισης
- Εύκολη εύρεση εξαρτημάτων
- Δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον

[1]



1.1.4 Μειονεκτήματα Πνευματικών Συστημάτων

Τα κύρια μειονεκτήματα των πνευματικών συστημάτων είναι:

- Υψηλό κόστος παραγωγής πεπιεσμένου αέρα
 - Το σήμα μεταδίδεται βραδύτερα απ' ό,τι το ηλεκτρικό
 - Η δημιουργία μεγάλων δυνάμεων απαιτεί ογκώδεις και υψηλού κόστους πνευματικούς ενεργοποιητές
- [2]

1.2 Εφαρμογές προσομοίωσης

Η προσομοίωση (simulation) ως τεχνική αναπαράστασης της συμπεριφοράς ενός συστήματος από ένα άλλο σύστημα, έχει υψηλή θέση στα πλαίσια των εκπαιδευτικών εφαρμογών. Ως προσομοίωση ορίζεται μια μέθοδος μελέτης ενός συστήματος με τη βοήθεια ενός άλλου συστήματος. Η προσομοίωση δηλαδή, είναι μία αναπαράσταση που έχει κατασκευαστεί με σκοπό να μιμηθεί και να επιτρέψει την κατανόηση της λειτουργίας ενός συστήματος. Το σύστημα προσομοίωσης έχει ως αποτέλεσμα την εξοικείωση με τα χαρακτηριστικά και κατανόηση των λειτουργιών του συστήματος που αναπαριστά. Το σύστημα προσομοίωσης τις περισσότερες φορές είναι ένα μοντέλο που «εκτελείται» σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, και με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης δεν χρειάζεται να εκτελέσει τα πειράματά του στο πραγματικό σύστημα που μελετά αλλά στο αντίστοιχο πρόγραμμα μέσω του υπολογιστή του. Στόχος ενός συστήματος προσομοίωσης είναι η μελέτη, και ο πειραματισμός με διάφορων ειδών συστήματα (στα οποία κυρίως δεν είναι εφικτή η πρόσβαση). Οι χρήστες χειρίζονται τα συστατικά του συστήματος με εντελώς αλληλεπιδραστικό τρόπο, όπως είναι για παράδειγμα η προσομοίωση χειρισμού ενός πολεμικού αεροσκάφους. [3]

Η ανάγκη της προσομοίωσης πρωτοεμφανίστηκε στο χώρο των επιστημονικών ερευνών ως τεχνική μελέτης των αποτελεσμάτων μιας ενέργειας σε ένα φαινόμενο χωρίς να απαιτείται παρέμβαση στο ίδιο το φαινόμενο. Οι προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται για την έρευνα και την κατανόηση αρχών λειτουργίας πολλών τεχνολογικών, φυσικών και κοινωνικών διαδικασιών. Η εκπαιδευτική προσομοίωση αποτελεί ένα μοντέλο κάποιου φαινομένου, το οποίο οι χρήστες χρησιμοποιούν και μαθαίνουν μέσω της αλληλεπίδρασης με την προσομοίωση. Σε μια παιδαγωγική κατάσταση προσομοίωσης, ο μαθητής, διαφοροποιώντας κατά βούληση ορισμένες μεταβλητές του φαινομένου που μελετά, έχει την δύναμη της πρωτοβουλίας και δεν οφείλει να απαντά απλώς σε ερωτήσεις που έχουν προβλεφθεί από τους δημιουργούς του λογισμικού. Αντίθετα, με βάση τα συμπεράσματα που δημιουργεί στα αποτελέσματα των χειρισμών του, έχει τη δυνατότητα να ανακαλύψει το μοντέλο το οποίο προσομοιώνει το λογισμικό ή τις βασικές παραμέτρους που το δημιουργούν και να θέσει σε εφαρμογή αυτά που ήδη γνωρίζει. Στο εξής πλαίσιο, τα συστήματα προσομοιώσεων διαφέρουν κατά πολύ από τα συστήματα καθοδήγησης και τα συστήματα εξάσκησης. [3]



1.2.1 Τύποι προσομοιώσεων

Εκείνες που προσομοιώνουν κάτι:

- α) φυσική προσομοίωση, κατά την οποία ένα φυσικό φαινόμενο αναπαρίσταται από το υπολογιστικό σύστημα επιτρέποντας στον χρήστη να κατανοήσει πληροφορίες για αυτό όταν χειρίζεται κάποιες μεταβλητές
- β) επαναληπτική προσομοίωση, στην οποία ο χρήστης εκτελεί το πρόγραμμα διαδοχικές φορές και επιλέγει διάφορες τιμές για κάθε παράμετρο

Εκείνες που δείχνουν πώς να γίνει κάτι:

- γ) διαδικαστική προσομοίωση, η οποία έχει ως σκοπό να διδάξει μια αλληλουχία διαδικασιών για την επίτευξη ενός στόχου
 - δ) προσομοίωση κατάστασης, στην οποία ο χρήστης εξερευνά εναλλακτικές διαδρομές σε ένα σύστημα με στόχο να κατανοήσει τις επιπτώσεις τους. [3]
- Γνωρίζοντας ότι τα συστήματα προσομοίωσης κατά κύριο λόγο διαθέτουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και λειτουργίες, στη συνέχεια αναλύονται οι προδιαγραφές των εκπαιδευτικών σεναρίων που είναι απαραίτητο να συνοδεύουν τα συστήματα αυτά. Τα εκπαιδευτικά λογισμικά προσομοίωσης αναπτύσσονται κατά κανόνα πάνω σε ένα αποσαφηνιστικό μοντέλο του προς μελέτη φαινομένου. Κατά τη διαδικασία αυτή, το σύστημα προσομοίωσης είναι δυνατό να ακολουθεί δύο διακριτές σχεδιαστικές προδιαγραφές:

- A) Το μοντέλο δεν είναι γνωστό στο μαθητή. Τότε η προσομοίωση αποκαλείται μοντελοποιητική (modeling) και ο σκοπός της χρήσης του συστήματος είναι να ανακαλύψουν οι μαθητές το υποκείμενο μοντέλο μέσα από τη διερευνητική μάθηση.
- B) Διαφορετικά, όταν το μοντέλο είναι γνωστό, η προσομοίωση αποκαλείται συμπεριφοριστική (behaviorist) και διακρίνονται οι επόμενες τρεις κατηγορίες:

- Η δυναμική προσομοίωση επικεντρωμένη στη μελέτη της επιρροής των παραμέτρων
- Η μεθοδολογική προσομοίωση η οποία δεν έχει σκοπό τη μελέτη των συνεπειών ενός μοντέλου κάνοντας τις παραμέτρους του να μεταβληθούν, αλλά η αντιπαράθεσή του με την κοινή λογική
- Η επιχειρησιακή προσομοίωση που σκοπεύει να θέσει σε εφαρμογή ένα πείραμα κατανοώντας με αυτόν τον τρόπο τα συστήματα. [3]

Με θεμέλιο την προηγούμενη προβληματική, οι εφαρμογές προσομοίωσης πρέπει να καθορίζονται, σύμφωνα με το είδος τους από τις κύριες προδιαγραφές, που αναφέρονται στη συνέχεια:

- μια εκπαιδευτική προσομοίωση διδάσκει σχετικά με μία έννοια και πώς μπορεί να υλοποιηθεί
- μια εκπαιδευτική προσομοίωση οφείλει να χρησιμοποιεί χαμηλή πιστότητα του αντικειμένου που αναπαριστά για μαθητές που βρίσκονται στα πρώτα στάδια και υψηλή πιστότητα του αντικειμένου της προσομοίωσης για προχωρημένους μαθητές



- μια εκπαιδευτική προσομοίωση, εκτός των οπτικών αναπαραστάσεων του φαινομένου, πρέπει να περιέχει και εναλλακτικού τύπου αναπαραστάσεις, όπως γραφικές απεικονίσεις, σχήματα, κ.ο.κ.
- μια εκπαιδευτική προσομοίωση είναι απαραίτητο να προσφέρει μορφολογική ποικιλία ανάδρασης ανάλογα με το είδος της και αμεσότητα ανάδρασης
- μια εκπαιδευτική φυσική προσομοίωση πρέπει να εμπεριέχει ικανοποιητικό πλήθος αντικειμένων με λεπτομέρεια
- μια εκπαιδευτική φυσική προσομοίωση οφείλει να παρέχει τον έλεγχο στον χρήστη έτσι ώστε ο ίδιος να ρυθμίζει τη φυσική εξέλιξη του φαινομένου που μελετά
- μια εκπαιδευτική επαναληπτική προσομοίωση πρέπει να διαθέτει ακρίβεια μεταβλητών και να ξεκαθαρίζει ποιες μεταβλητές είναι άγνωστες, ποιες γνωστές αλλά όχι διαχειρίσιμες και ποιες γνωστές και διαχειρίσιμες
- μια εκπαιδευτική επαναληπτική προσομοίωση πρέπει ο καθορισμός αρχικών μεταβλητών να είναι εφικτός και να υπάρχει μεγάλο επίπεδο ελέγχου από τον χρήστη ανάμεσα στις επαναλήψεις
- μια εκπαιδευτική διαδικαστική προσομοίωση πρέπει να διαθέτει μία μεγάλη γκάμα δυνατών διαδρομών λύσης και πλήθος ενεργειών. [3]

1.2.2 Πλεονεκτήματα προσομοίωσης

- Αποτελεί την μοναδική προσέγγιση για την λύση προβλημάτων που αφορούν τη μελέτη λειτουργίας ενός απροσπέλαστου συστήματος
- Σε σύγκριση με το χειρισμό του πραγματικού συστήματος έχει χαμηλότερο κόστος
- Παρέχει μεγαλύτερη «ευαισθησία» στην αντίληψη των σχέσεων μεταξύ των προβλημάτων
- Είναι ασφαλής μέθοδος σε αντίθεση με πολλά από τα πραγματικά πειράματα
- Προσφέρει δυνατότητα επανάληψης του ιδίου φαινομένου όποτε επιθυμεί ο χρήστης
- Έχει τη δυνατότητα ολοκληρωμένης ενόρασης του υπό μελέτη συστήματος από όλες τις πλευρές [3]

1.2.3 Μειονεκτήματα προσομοίωσης

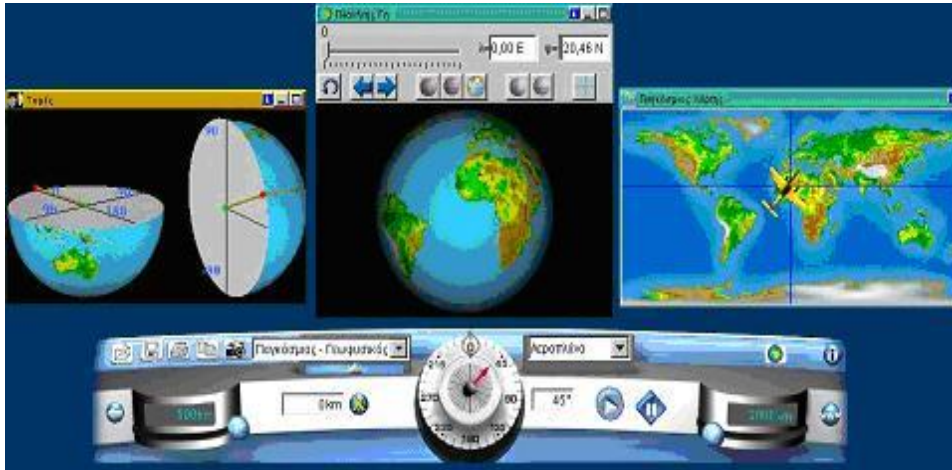
- Μερικές φορές χρειάζεται σημαντικό χρόνο ανάπτυξης και μεγάλο κόστος
- Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να μην είναι η καταλληλότερη μέθοδος επίλυσης του μελετούμενου προβλήματος
- Δεν είναι σε θέση να εγγηθεί ότι θα οδηγήσει στην καλύτερη δυνατή λύση του προβλήματος
- Δεν είναι βέβαιο ότι αντανακλά με απόλυτη ακρίβεια την υπό μελέτη κατάσταση [3]

1.2.4 Παράδειγμα λογισμικού προσομοίωσης

Ένα παράδειγμα λογισμικού προσομοίωσης είναι η ΓΑΙΑ II. Σημείο αναφοράς αυτού του λογισμικού είναι η ιδέα της μελέτης του πλανήτη Γή. Η Γη αξιοποιείται ως θέμα μελέτης σε περιπτώσεις που είναι εντελώς απαραίτητο. Για τον εξής λόγο, οι γνώσεις που σχετίζονται με τη Γή που αποκτούν τα παιδιά είναι στατικές, και δεν συνδέονται μεταξύ τους. Εξαιτίας όμως της αδυναμίας του πειραματισμού με τον πλανήτη Γή οι



προσομοιώσεις καταστάσεων ή φαινομένων θεωρούνται ως οι πιο κατάλληλες μέθοδοι της «Γης ως γνωστικού αντικειμένου». Επιπρόσθετα, στόχος της ΓΑΙΑΣ είναι η απόδειξη ότι η διδασκαλία με τα συνήθη μέσα έχει όρια και συχνά συναντά δυσκολίες. Ωστόσο με σωστή αξιοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι νέες υπολογιστικές τεχνολογίες, είναι δυνατή η επίλυση αυτών των εμποδίων. [3]



Σχήμα 1.2: Περιβάλλον λογισμικού ΓΑΙΑ II

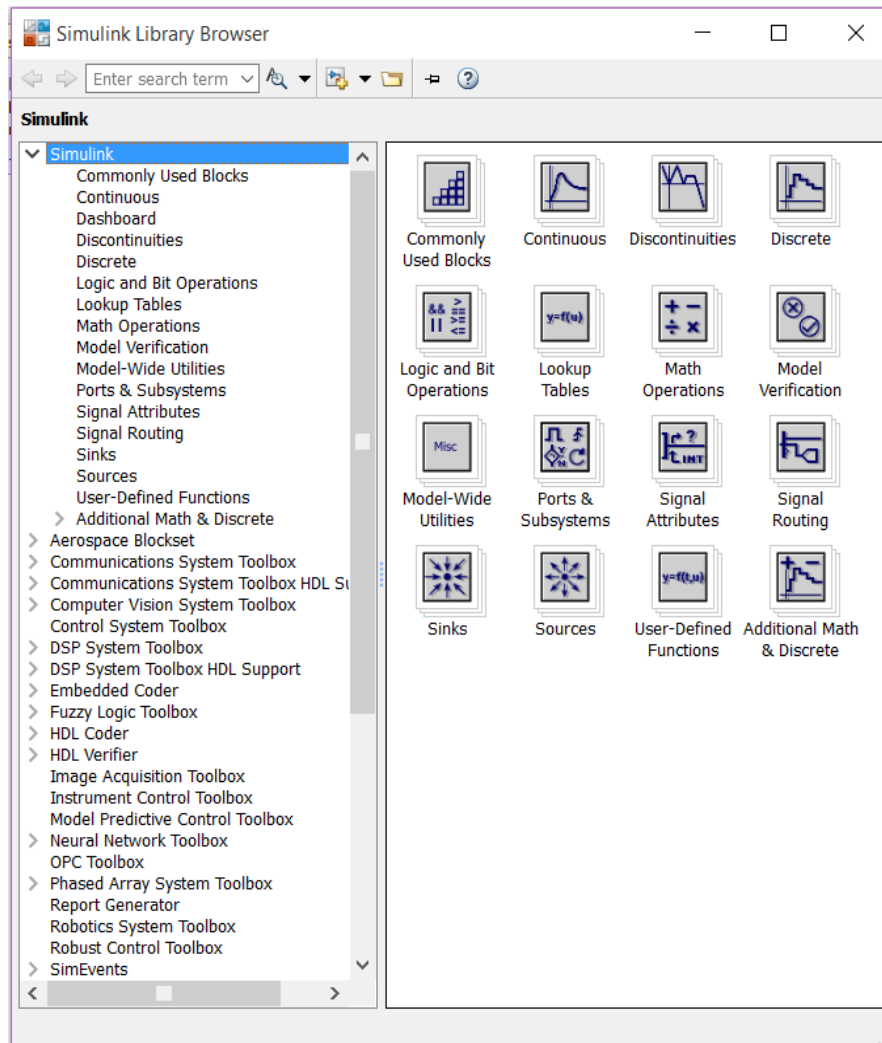
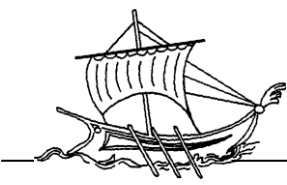
1.3 Εισαγωγή στο Simulink

Το simulink αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο του Matlab με το οποίο είναι δυνατή η προσομοίωση συστημάτων τα οποία προέρχονται από ένα μεγάλο εύρος επιστημονικών περιοχών. Η χρήση του δεν καθιστά απαραίτητη τη γνώση του Matlab, η γνώση αυτή είναι σημαντικό προτέρημα διότι προσφέρει την δυνατότητα αποδοτικότερης χρήσης του. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του simulink είναι η απλότητά του καθώς παρέχει στον χρήστη πολυάριθμες διευκολύνσεις. [4]

1.3.1 Ενεργοποίηση του Simulink

Το simulink είναι δυνατόν να ενεργοποιηθεί πληκτρολογώντας την εντολή simulink στο Command Window του Matlab ή κάνοντας αριστερό click στην συντόμευσή του στην γραμμή menu πάνω αριστερά.

Αφού γίνει αυτό, θα ανοίξει ένα παράθυρο με τίτλο Simulink Library Browser. Στο αριστερό τμήμα του παραθύρου απεικονίζονται οι βιβλιοθήκες για διάφορες εφαρμογές. Κάθε βιβλιοθήκη αποτελείται από μικρότερες και καθεμία απ' αυτές διαθέτει έναν αριθμό στοιχείων (blocks), τα οποία εμφανίζονται στο δεξί τμήμα του παραθύρου. Οι βιβλιοθήκες αυτές καλύπτουν ένα μεγάλο πεδίο εφαρμογών, όμως η ακόλουθη ανάλυση θα εντοπιστεί μόνο στην βιβλιοθήκη Simulink. [4]



Σχήμα 1.3: Simulink Library Browser

1.3.2 Άνοιγμα αρχείων και προσθήκη στοιχείων (blocks) σε αυτά

Για να ανοιχθεί ένα νέο αρχείο simulink ή ένα ήδη υπάρχον χρησιμοποιούνται οι συντομεύσεις των windows στην γραμμή menu πάνω αριστερά στο παράθυρο Simulink Library Browser.

Για να προστεθεί στο νέο αρχείο ένα block από το παράθυρο Simulink Library Browser, απλώς σύρεται από το παράθυρο στο αρχείο, κατά τον ίδιο τρόπο όπως στα windows που μεταφέρονται αρχεία από ένα παράθυρο σε ένα άλλο. Για να γίνει η μεταφορά ένας άλλος τρόπος είναι δεξί click στο block και στο menu που θα εμφανιστεί, να επιλεγεί το 'add to untitled'. Από την στιγμή που στο καινούργιο αρχείο έχει τοποθετηθεί ένα block, κάνοντας διπλό click σε αυτό ανοίγει ένα παράθυρο με τις ρυθμίσεις του. Κάθε block έχει διαφορετικές ιδιότητες οι οποίες αναλύονται στην συνέχεια. Επίσης, κάνοντας δεξί click πάνω στο block, εμφανίζεται ένα menu. Επιλέγοντας το Help παρουσιάζεται λεπτομερής βοήθεια για αυτό. [4]



1.3.3 Γνωριμία με την βιβλιοθήκη Simulink

Η βιβλιοθήκη Simulink αποτελείται από 13 μικρότερες οι οποίες είναι οι εξής:

- Continuous
- Discontinuities
- Discrete
- Look-Up Tables
- Math Operators
- Model Verification
- Model Wide Utilities
- Ports & Subsystems
- Signal Attributes
- Signal Routing
- Sinks
- Sources
- User – Defined Functions.

Ακολουθεί ανάλυση που αναφέρεται σε ορισμένα στοιχεία (blocks) των βιβλιοθηκών Continuous, Math Operators, Sinks και Sources. [4]

1.3.4 Βιβλιοθήκη Continuous

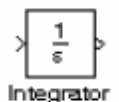
Τα blocks στην συγκεκριμένη βιβλιοθήκη παρουσιάζονται παρακάτω:

Derivative: Το block αυτό στην έξοδό του δίνει την παράγωγο του σήματος εισόδου. Στο παράθυρο ρυθμίσεων δεν επιτρέπει καμία αλλαγή.



Integrator: Στην έξοδό του δίνει το ολοκλήρωμα της εισόδου. Κάνοντας διπλό click εμφανίζεται το παράθυρο ρυθμίσεων. Στο παράθυρο αυτό μπορούν να γίνουν πολυάριθμες ρυθμίσεις. Οι πιο σημαντικές είναι οι εξής:

- Αρχική συνθήκη: Η αρχική συνθήκη της ολοκλήρωσης έχει τη δυνατότητα να αλλάξει. Επίσης είναι δυνατόν αν επιλεγεί το external στην ρύθμιση Initial Condition Source δίνει την αρχική συνθήκη εξωτερικά από μία άλλη πηγή.
- Τοποθέτηση άνω και κάτω ορίου στην έξοδο: Επιλέγοντας Limit output μπορούν να τεθούν τα άνω και κάτω όρια στην έξοδο του block, τα οποία ορίζονται στους χώρους με τίτλο upper saturation limit και lower saturation limit. Αν η τιμή του ολοκληρώματος γίνει μεγαλύτερη από την τιμή του άνω ορίου τότε η έξοδος του block παίρνει την τιμή του άνω ορίου και αντίστοιχα για το κάτω όριο.





- Ορισμός επιτρεπτού σφάλματος: Με την αλλαγή της τιμής του tolerance είναι εφικτό να αλλάξει το επιτρεπτό σφάλμα. Αφήνοντάς το στο auto, επιλέγονται οι default ρυθμίσεις. (βλέπε [4])

Transfer Function: Η συνάρτηση μεταφοράς δηλώνεται με το στοιχείο αυτό. Ανοίγοντας το menu ρυθμίσεων μπορεί να αλλάξει ο αριθμητής (numerator) και ο παρονομαστής (denominator). Όπως δηλαδή ορίζονται τα πολυώνυμα στο Command Window του Matlab. Δηλαδή αν για παράδειγμα ο χρήστης θέλει στον παρονομαστή να ορίσει το πολυώνυμο με τίτλο denominator γράφει τους συντελεστές ως εξής: [1 0 1]. Όπως και παραπάνω, μπορεί να ρυθμιστεί και η ανοχή σφάλματος από το tolerance. $12+s$



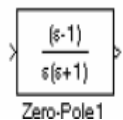
Transport Delay: Όταν χρησιμοποιείται δημιουργεί καθυστέρηση στο σήμα εισόδου. Το σήμα εξόδου συνεπώς είναι ίδιο με το σήμα εισόδου, αλλά με μία καθυστέρηση η οποία ορίζεται από το menu ρυθμίσεων. Πέρα από το κομμάτι της καθυστέρησης είναι δυνατόν να αλλάξει και η αρχική τιμή της εξόδου.



Variable Transport Delay: Το συγκεκριμένο block εκτελεί ακριβώς την ίδια λειτουργία με το παραπάνω με την διαφορά ότι εδώ η καθυστέρηση του σήματος δίνεται από εξωτερική πηγή. Είναι δυνατόν η καθυστέρηση αυτή να περιοριστεί ορίζοντας ένα άνω όριο (Maximum delay).



Zero – Pole: Με χρήση αυτού του block ορίζεται η συνάρτηση μεταφοράς, όπως και στο Transfer Function, όμως διαφέρει στο ότι δεν ορίζονται τα πολυώνυμα, αλλά οι ρίζες τους. Στην ένδειξη Zeros εισάγονται οι ρίζες του αριθμητή ενώ στην ένδειξη Poles εισάγονται οι ρίζες του παρονομαστή. Αν για παράδειγμα οι ρίζες είναι οι 1 και 5 αυτές εισάγονται ως το διάνυσμα [1 5]. Επίσης είναι εφικτό να οριστεί και η ενίσχυση με την ένδειξη Gain. [4]



1.3.5 Βιβλιοθήκη Math Operators

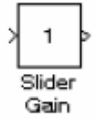
Εμπεριέχει μεγάλο αριθμό από blocks με διάφορες μαθηματικές συναρτήσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από αυτές: [4]

Gain: Το block αυτό πολλαπλασιάζει το σήμα εισόδου με μία σταθερά η οποία είναι δυνατόν να μεταβληθεί από το menu ρυθμίσεων.





Slider Gain: Με παρόμοια λογική όπως παραπάνω αλλά με την διαφορά ότι κάνοντας διπλό click στο menu με τις ρυθμίσεις εμφανίζεται γραμμή κύλισης με την οποία μπορεί να αλλάξει η τιμή της ενίσχυσης κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.



Sum: Το εξής block αθροίζει τα σήματα εισόδου. Από το menu ρυθμίσεων μπορεί να καθοριστεί το πρόσημο εισόδου του κάθε σήματος. Επίπρόσθετα, είναι δυνατή η αλλαγή στο σχήμα του συγκεκριμένου block. Αν επιλεγεί το rectangular στην περιοχή με τίτλο icon shape, ο αθροιστής μετατρέπεται σε ορθογώνιο. Όταν τα σήματα εισόδου είναι πολλά χρησιμοποιείται συνήθως αυτή η μορφή.



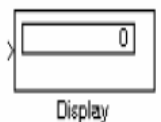
Trigonometric Function: Η έξοδος του είναι η τριγωνομετρική συνάρτηση της εισόδου του. Στο menu ρυθμίσεων μπορεί να καθοριστεί το είδος της τριγωνομετρικής συνάρτησης (sin, cos, tan κ.λ.π.). Ακόμη είναι δυνατό να καθοριστεί αν η έξοδος θα είναι πραγματική, μιγαδική, ή αν θα επιλέγεται αυτόματα ανάλογα με την περίπτωση.



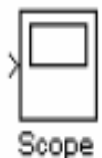
1.3.6 Βιβλιοθήκη Sinks

Αποτελείται από στοιχεία ένδειξης και μετρήσεων, δηλαδή παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στον χρήστη. Τα πιο σημαντικά είναι τα εξής: [4]

Display: Εμφανίζει την τιμή του σήματος στην είσοδό του. Στο menu ιδιοτήτων οι πιο σημαντικές ρυθμίσεις που επιτρέπονται είναι οι εξής: Στον χώρο Format επιλέγεται ο τρόπος παρουσίασης του σήματος. Στον χώρο Decimation επιλέγεται η συχνότητα της δειγματοληψίας. Αν παραμείνει στην τιμή 1, τότε το block θα παρουσιάζει την τιμή του σήματος εισόδου σε κάθε 1 βήμα της επίλυσης, αν τεθεί η τιμή 5 κάθε 5 βήματα κ.ο.κ



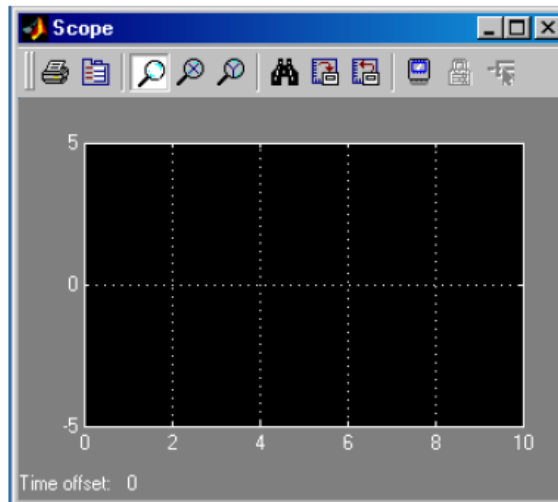
Scope: Εμφανίζει το σήμα της εισόδου σε συνάρτηση με το χρόνο. Δεν «ανοίγει» αυτόματα με την έναρξη της προσομοίωσης. Πρέπει να γίνει διπλό click πάνω του. Στη περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να παρακολουθήσει το σήμα εισόδου όταν αυτό δημιουργείται στην διάρκεια της προσομοίωσης, τότε ανοίγει το scope πριν την έναρξή της και με αυτόν τον τρόπο μπορεί να παρακολουθήσει την συμπεριφορά του συστήματος που εξετάζεται σε πραγματικό χρόνο. Εάν ο χρήστης επιθυμεί να δει απλώς το γράφημα τότε ανοίγει το scope μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.









Το scope είναι το σημαντικότερο μέσο απεικόνισης ενός σήματος, για το λόγο αυτό θα αναλυθεί διεξοδικότερα παρακάτω:

Από την στιγμή που θα γίνει πάνω του διπλό click, ανοίγει το εξής παράθυρο:



Σχήμα 1.4: Παλμογράφος

Κάνοντας αριστερό click στο πλήκτρο γίνεται zoom σε περιοχή του γραφήματος που επιλέγεται. Με αριστερό click στα πλήκτρα  και  γίνεται zoom στους άξονες x και y αντίστοιχα. Με το πλήκτρο  γίνεται autoscale στους άξονες ούτως ώστε να προσαρμοστούν στο γράφημα.

Παρατηρείται στο κάτω μέρος αριστερά ο όρος Time offset. Πρόκειται για την χρονική στιγμή της  προσομοίωσης η οποία αντιστοιχεί στο μηδέν του άξονα των x. Εάν εκτελεστεί για παράδειγμα μία προσομοίωση για 50 sec, και το διάγραμμα εμφανίζει μόνο τα τελευταία 5 sec, ο άξονας του χρόνου θα ξεκινά από το μηδέν και ο όρος Time offset θα είναι 45 sec. Συνεπώς, στην αντιστοίχιση μίας χρονικής στιγμής στο διάγραμμα με μία χρονική στιγμή της προσομοίωσης το μόνο που πρέπει να γίνει είναι να προστεθεί ο όρος Time offset.

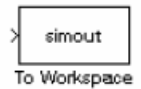
Με click στο πλήκτρο ανοίγει το menu των ρυθμίσεων του scope. Οι κύριες ρυθμίσεις που είναι δυνατόν να γίνουν αφορούν τον αριθμό των αξόνων y (Number of axes), και το εύρος χρόνου (time range). Εάν στο τελευταίο αφηθεί η επιλογή auto, το εύρος χρόνου καθορίζεται αυτόματα από το simulink. [4]

To file: Με το block αυτό, μεταφέρεται ένα σήμα από το αρχείο simulink σε ένα αρχείο του Matlab για παραπάνω επεξεργασία και χρήση. Στις ιδιότητες είναι μπορεί να ορίσθει το όνομα του αρχείου, και της μεταβλητής στην οποία αποθηκεύεται το σήμα εισόδου του block αυτού.





To workspace: Με το συγκεκριμένο block το σήμα στέλνεται από το Simulink στον χώρο εργασίας του Matlab. Στο παράθυρο ρυθμίσεων ορίζεται η ονομασία της μεταβλητής όπως επίσης και ο μέγιστος αριθμός αριθμητικών δεδομένων σε αυτήν.



1.3.7 Βιβλιοθήκη Sources

Αποτελείται από blocks τα οποία παράγουν διάφορα σήματα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά:

Clock: Ως έξοδο παράγει τον χρόνο της προσομοίωσης. Στο παράθυρο ρυθμίσεων είναι δυνατό να επιλεγεί αν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης ο χρόνος θα παρουσιάζεται πάνω στο block όπως επίσης και να ρυθμιστεί η συχνότητα που θα αναβαθμίζεται ο χρόνος.



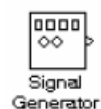
Constant: Δημιουργεί ένα σταθερό σήμα, η τιμή του οποίου ορίζεται από το menu ρυθμίσεων.



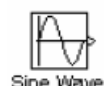
Ramp: Το εξής block παράγει σήμα που έχει την μορφή ράμπας. Είναι σταθερό και μετά από ένα σημείο γίνεται γραμμικό. Στο menu των ρυθμίσεων μπορεί να γίνει επιλογή της χρονικής στιγμής της μετάβασης από το σταθερό στο γραμμικό σήμα, της τιμής του σταθερού σήματος, και η κλίση του γραμμικού σήματος.



Signal Generator: Με το block αυτό μπορούν να δημιουργηθούν σήματα διαφόρων ειδών. Στο παράθυρο ρυθμίσεων υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ ημιτονοειδούς, πριονωτού και τυχαίου σήματος. Είναι επίσης δυνατόν να προσαρμοστεί το πλάτος και η συχνότητα του σήματος.



Sine wave: Παράγει ημιτονοειδές σήμα. Στο παράθυρο ρυθμίσεων μπορεί να προσαρμοστεί το πλάτος, η συχνότητα, η φάση και ο σταθερός όρος στον οποίο προστίθεται το ημιτονοειδές σήμα.



Step: Δημιουργεί ένα βήμα. Στο παράθυρο ρυθμίσεων προσαρμόζεται η χρονική στιγμή στην οποία θα γίνει το βήμα, καθώς επίσης η αρχική και η τελική τιμή.

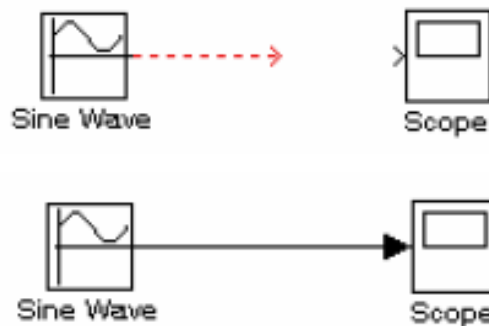


[4]






1.3.8 Χρήση των στοιχείων των βιβλιοθηκών του simulink

Όπως αναφέρθηκε, για να τοποθετηθεί ένα στοιχείο block σε ένα αρχείο του simulink αρκεί να συρθεί από το παράθυρο Simulink Library Browser στο αρχείο. Για να ανοίξει το παράθυρο των ρυθμίσεων ενός block εφόσον έχει τοποθετηθεί στο αρχείο, πρέπει να γίνει διπλό click πάνω του. Για τη σύνδεση δύο block μεταξύ τους υπάρχουν δύο τρόποι. Στον πρώτο, ο χρήστης σύρει έχοντας πατημένο το αριστερό πλήκτρο του mouse το βέλος που ξεκινά από το ένα block μέχρι την υποδοχή του άλλου. Ο δεύτερος τρόπος είναι να κάνει αριστερό click στο ένα και κρατώντας πατημένο το ctrl να κάνει click στο δεύτερο. [4]



Σχήμα 1.5: Σύνδεση μεταξύ δύο Block

Την στιγμή που τα στοιχεία έχουν συνδεθεί, για να λειτουργήσει η προσομοίωση πρέπει να γίνει αριστερό click στο πλήκτρο . Για να διακοπεί προσωρινά (pause) ή οριστικά (stop) η προσομοίωση υπάρχουν τα πλήκτρα  και  αντίστοιχα.

Πρίν τεθεί σε λειτουργία μία προσομοίωση είναι απαραίτητη η ρύθμιση των παραμέτρων της. Για να επιτευχθεί αυτό, στο αρχείο που δημιουργήθηκε ο χρήστης κάνει αριστερό click στην επιλογή simulation στην γραμμή menu πάνω αριστερά. Στο menu που εμφανίζεται επιλέγει Simulation Parameters. Στο παράθυρο που θα ανοίξει μπορεί να γίνει ένας μεγάλος αριθμός ρυθμίσεων, οι σημαντικότερες εκ των οποίων είναι οι ακόλουθες:

Start time / Stop time: Γίνεται επιλογή της χρονικής στιγμής έναρξης και λήξης της προσομοίωσης.

Solver options: Επιλέγεται αν οι διαφορικές εξισώσεις θα επιλυθούν με μέθοδο σταθερού ή μεταβλητού βήματος (Variable-step, Fixed-step)



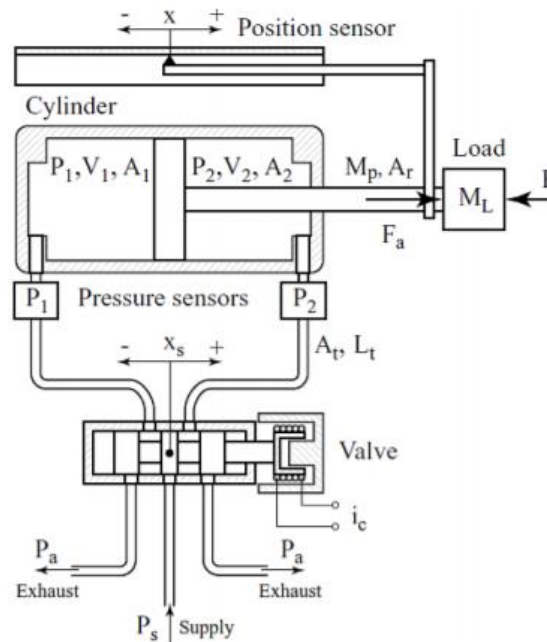
Max / Min / Initial Step size: Όταν γίνεται χρήση μεταβλητού βήματος μπορεί να προσαρμοστεί το μέγιστο, το ελάχιστο και το αρχικό βήμα. Στην περίπτωση που επιλεγεί το auto, η τιμή του βήματος καθορίζεται από το Matlab.

Relative / Absolute Tolerance: Επιτρέπει να ρυθμιστεί η σχετική και η απόλυτη ανοχή στο σφάλμα. [4]

Κεφάλαιο 2: Έλεγχος Πνευματικού Συστήματος Με Χρήση PID Ελεγκτή

2.1 Το μαθητικό μοντέλο του Πνευματικού Συστήματος

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μαθηματική προσέγγιση ενός τυπικού πνευματικού συστήματος. Αποτελείται από έναν κύλινδρο διπλής ενέργειας με απλό βάκτρο, μια βαλβίδα ελέγχου κατεύθυνσης 5/3, αισθητήρες θέσης και πίεσης, σωληνώσεις, καθώς και ένα εξωτερικό φορτίο. Το συγκεκριμένο παράδειγμα πνευματικού συστήματος, είναι ένα μη γραμμικό σ3ης τάξης. [5]



Σχήμα 2.1: Μορφή Πνευματικού Συστήματος

Η εξίσωση κίνησης εκφράζεται ως εξής:

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

Όπου M_L είναι η εξωτερική μάζα του φορτίου, M_p είναι η μάζα του εμβόλου και του βάκτρου, x είναι η θέση του εμβόλου, 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 είναι η εξής:



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

Η πίεση του κυλίνδρου συμβολίζεται με P, R είναι η ιδανική σταθερά των αερίων, L είναι η διαδρομή του εμβόλου, V_{0i} είναι ο αδρανής όγκος στην είσοδο των διόδων του ενεργοποιητή, T είναι η θερμοκρασία, m_{in} και m_{out} είναι οι ροές της μάζας του αέρα που εισέρχονται και εξέρχονται από τον θάλαμο, A_i είναι η ενεργή επιφάνεια του εμβόλου, 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 στην διάρκεια της διαδικασίας. Το μοντέλο της ροής της μάζας μέσα από την οπή της βαλβίδας, πρέπει να σημειωθεί ότι η πτώση πίεσης κατά μήκος της οπής της βαλβίδας είναι μεγάλη, για αυτό και η ροή πρέπει να αντιμετωπίζεται. Στην 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. Σε αντίθετη περίπτωση, η ροή της μάζας εξαρτάται μη γραμμικά και από τις δύο πιέσεις. [6],[7],[8]

Η εξίσωση για την ροή της μάζας μέσα από την οπή της βαλβίδας είναι η εξής:

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

Η ροή της μάζας μέσα από την οπή της βαλβίδας συμβολίζεται με m_u , η επιφάνεια της οπής με A_u , C_f είναι ο συντελεστής παροχής, P_u και P_d είναι η τιμή της ανοδικής και της καθοδικής πίεσης αντίστοιχα. Τέλος $C1$ και $C2$ είναι οι σταθερές ενός δεδομένου ρευστού, που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο αέρας, με τις εξής 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

2.1.1 Περιγραφή

Οι συμβατικοί πνευματικοί αυτοματισμοί (Pneumatics) χρησιμοποιούν συνήθως αέρα μέσης πίεσης, ενώ οι πνευματικοί αυτοματισμοί χαμηλής πίεσης (Fluidics), χρησιμοποιούν αέρα πίεσης μικρότερης των 1.5 At. Το αποτέλεσμα τους δημιουργείται από μια δυναμική σχέση πιέσεων. Ο πεπιεσμένος αέρας παράγεται στους αεροσυμπιεστές (Compressors), και μέσω σωληνογραμμών ή και δικτύου παρέχεται στο σύστημα αυτοματισμού.



Τα πιο σημαντικά στοιχεία για την σύνθεση ενός πνευματικού αυτοματισμού κατατάσσονται στις παρακάτω ομάδες:

- Βαλβίδων σήματος παροχής αέρα (Signal).
- Παροχής και επεξεργασίας πεπιεσμένου αέρα (Power Unit).
- Κεντρικών βαλβίδων ελέγχου κατεύθυνσης (Control Valve).
- Βαλβίδων επεξεργασίας σήματος (Processing).
- 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.



Σχήμα 2.2: Λογικό Διάγραμμα ενός Πνευματικού Συστήματος

Η παροχή και η επεξεργασία του πεπιεσμένου αέρα θεωρούνται στοιχεία του αυτοματισμού, καθώς για κάθε πνευματικό κύκλωμα προηγείται μια προπαρασκευή του παρεχομένου από το συμπιεστή αέρα, ούτως ώστε αυτός να είναι κατάλληλος από πλευράς πίεσης, λίπανσης καθώς και καθαρότητας, για τη σωστή λειτουργία των υπόλοιπων στοιχείων του συστήματος. Αυτή η επεξεργασία μπορεί να υπάρχει και μεταξύ της βαλβίδας ελέγχου κατεύθυνσης και του εμβόλου.

Οι πιο σημαντικές αρχές συγκρότησης των πνευματικών συστημάτων είναι οι εξής:

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



- Μεταξύ του εμβόλου και της βαλβίδας ελέγχου υπάρχουν οι ρυθμιστικές βαλβίδες.
- Όλα τα παραπάνω εξαρτήματα συνδέονται με σωλήνες μεταφοράς πεπιεσμένου αέρα.
- Ο σχεδιασμός των στοιχείων του αυτοματισμού γίνεται πάντα σε κατάσταση ηρεμίας, πριν την έναρξη του κύκλου κινήσεων.

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

Για τον εφοδιασμό των πνευματικών συστημάτων με πεπιεσμένο αέρα τα τρία στάδια που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη εμπεριέχουν:

- Την παραγωγή του αέρα από τους συμπιεστές αέρα.
- Την επεξεργασία του αέρα, ώστε να καταστεί κατάλληλος.
- 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.

Η σχεδίαση των κύριων γραμμών μεταφοράς πεπιεσμένου αέρα, αποτελούνται από:

- 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.

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

Στοιχεία Κίνησης

Τα στοιχεία κίνησης είναι οι κύλινδροι, οι οποίοι την πνευματική ισχύ του πεπιεσμένου αέρα, σε ευθύγραμμη κίνηση και αποτελούν το κύριο στοιχείο για:



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

Η παλινδρομική κίνηση πραγματοποιείται χάρη στον πεπιεσμένο αέρα. Οι πνευματικοί κύλινδροι αποτελούνται από ένα θάλαμο ο οποίος εμπεριέχει, ένα πιστόνι, στεγανωτικά για αποφυγή απωλειών αέρα, μια ράβδο 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 στο κατασκευαστικό τους σκέλος και έχουν υψηλή αντοχή σε υπερφορτίσεις.

Ανάλογα με την κατασκευαστική τους διαμόρφωση διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

Κύλινδροι Απλής Ενέργειας

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.



Σχήμα 2.3: Κύλινδρος απλής ενέργειας χωρίς ελατήριο επαναφοράς



Σχήμα 2.4: 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 κίνηση του εμβόλου έχει σαν αποτέλεσμα τη συμπίεση του ελατηρίου. Όταν ο πεπιεσμένος αέρας εκτονωθεί και η άσκηση της



πίεσης σταματήσει, τότε λόγω του ελατηρίου, το έμβολο γυρίζει στην αρχική του θέση. Το βάκτρο, έχει σπείρωμα για να συνδέεται με κάποιο εξάρτημα, το οποίο είναι απαραίτητο για την χρησιμότητα του εμβόλου. Τα καλύμματα του σωλήνα παραμένουν σταθερά προσαρμοσμένα. Επιπρόσθετα, το μπροστινό κάλυμμα διαθέτει άνοιγμα με οδηγό και ελαστικό παρέμβυσμα για τη διέλευση του βάρου. Το πιστόνι είναι εφοδιασμένο με στεγανοποιητικό δακτύλιο για τη συγκράτηση του πεπιεσμένου αέρα στο θάλαμο πίεσης. Ωστόσο, ο ατμοσφαιρικός αέρας που υπάρχει στην άλλη πλευρά του εμβόλου μπορεί να εξέρχεται και να εισέρχεται ελεύθερα. Η δύναμη 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:

$$F = (P1 - P2) \cdot A - F_{ελ}$$

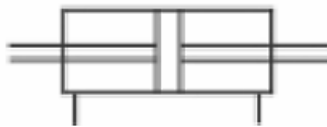
Όπου A είναι η επιφάνεια του εμβόλου, P1 είναι η απόλυτη πίεση αέρα, P2 είναι η ατμοσφαιρική πίεση αέρα, και $F_{ελ}$ είναι η δύναμη ελατηρίου.

Κύλινδροι Διπλής Ενέργειας

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



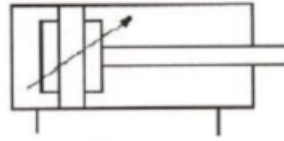
Σχήμα 2.5: Κύλινδρος με απλό βάκτρο



Σχήμα 2.6: Κύλινδρος με διπλό βάκτρο

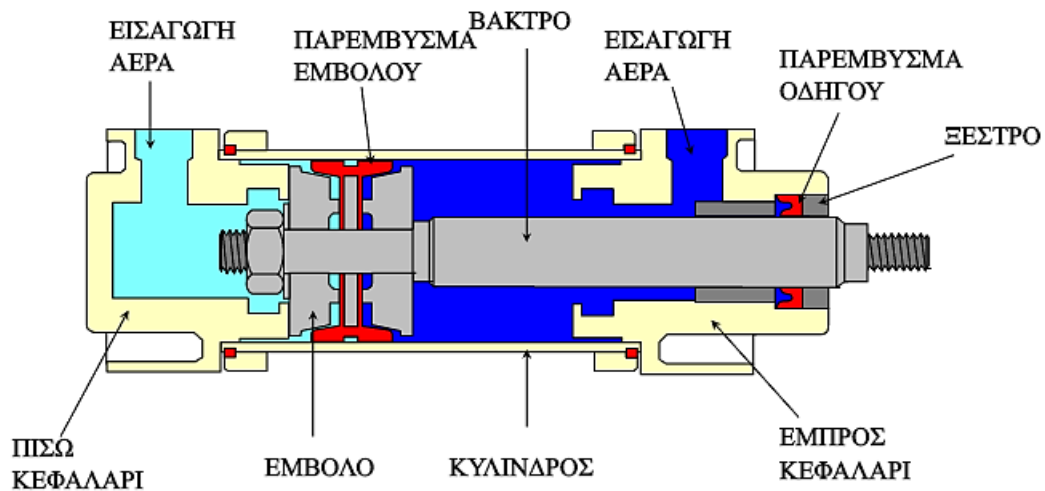


Σχήμα 2.7: Τηλεσκοπικός κύλινδρος



Σχήμα 2.8: Κύλινδρος με επιβράδυνση

Οι κύλινδροι διπλής ενέργειας έχουν πολύ μεγαλύτερη χρήση σε σύγκριση με της απλής ενέργειας, γιατί στους κυλίνδρους διπλής ενέργειας, τόσο η διαδρομή εξόδου (+) όσο και η διαδρομή επιστροφής του βάρου (-), πραγματοποιούνται με τη βοήθεια του πεπιεσμένου αέρα. Στην Σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η εσωτερική τομή ενός κυλίνδρου διπλής ενέργειας με απλό βάρου.



Σχήμα 2.9: Εσωτερικό κυλίνδρου διπλής ενέργειας με απλό βάρου

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. Η σχέση υπολογισμού είναι η εξής:

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

Κύριο 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).

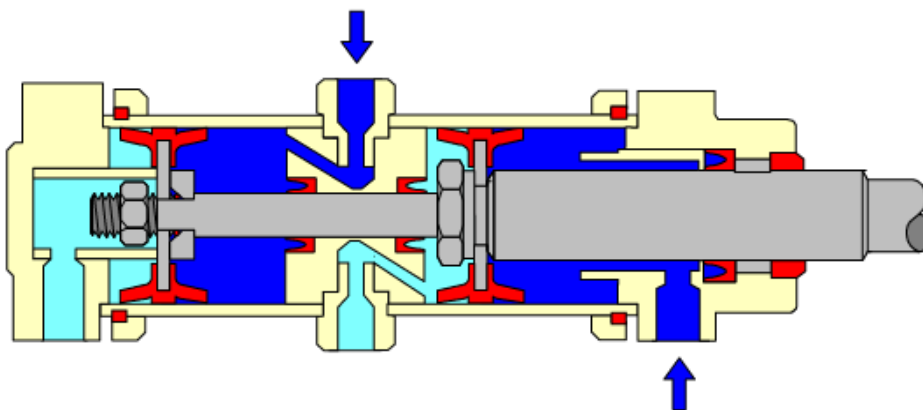
Τα κοινώς χρησιμοποιούμενα κατασκευαστικά υλικά για τα μέρη των κυλίνδρων διπλής ενέργειας περιλαμβάνουν:

- Κυλινδρικό Σωλήνα, ο οποίος κατασκευάζεται από χάλυβα.
- Βάκτρο, το οποίο κατασκευάζεται από ανοξείδωτο ή επιχρωμιωμένο χάλυβα.
- Καπάκια και έμβολα, τα οποία κατασκευάζονται από αλουμίνιο ή χάλυβα.
- Σφικτήρες, οι οποίοι κατασκευάζονται από χάλυβα.
- Οδηγοί, οι οποίοι κατασκευάζονται από ορείχαλκο με αντιτριβικές ιδιότητες.

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 περιλαμβάνονται και οι εξής κύλινδροι:

- Ο περιστροφικός κύλινδρος.
- Ο κύλινδρος πολλαπλών θέσεων.
- Ο κύλινδρος κρούσης.



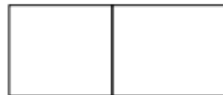
Σχήμα 2.10: Εσωτερικό κυλίνδρου διπλής ενέργειας Tandem



Στοιχεία Ελέγχου

Τα στοιχεία ελέγχου είναι οι βαλβίδες, οποίες είναι συσκευές οι οποίες βοηθούν στην ρύθμιση της εκκίνησης ή της στάσης του εμβόλου, καθώς και στον καθορισμό της διεύθυνσης ροής του πεπιεσμένου αέρα. Ο συμβολισμός των βαλβίδων γίνεται με τετραγωνίδια:

1. Βαλβίδα δύο θέσεων



Σχήμα 2.11: Βαλβίδα δύο θέσεων.

2. Βαλβίδα τριών θέσεων.



Σχήμα 2.12: Βαλβίδα τριών θέσεων

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

1. Ροή αέρα



Σχήμα 2.13: Ροή αέρα

2. Διακοπή ροής αέρα



Σχήμα 2.14: Διακοπή

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

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



Σχήμα 2.15: Βαλβίδα με τρεις πόρτες

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



Σχήμα 2.16: Βαλβίδα με πέντε πόρτες



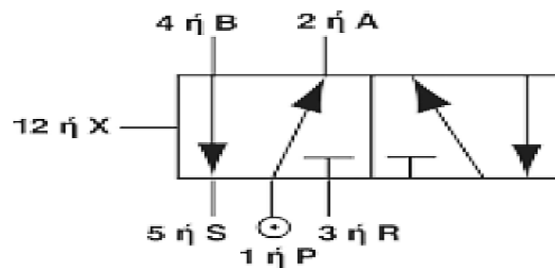
Στο τετραγωνίδιο που βρίσκονται οι γραμμές είναι συνήθως και η κατάσταση ηρεμίας της βαλβίδας. Ανάλογα με τον αριθμό των δυνατών θέσεων, καθώς και τον αριθμό από τις πόρτες, οι βαλβίδες χαρακτηρίζονται από ένα κλάσμα.

Οι βαλβίδες ανάλογα με την λειτουργία τους κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

Βαλβίδες Ελέγχου Κατεύθυνσης

Οι συγκεκριμένες βαλβίδες αποτελούν μηχανισμούς 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 είσοδο 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.



Σχήμα 2.17: Βαλβίδα 5/2

Οι δίοδοι της βαλβίδας χαρακτηρίζονται με αριθμούς ή και με γράμματα. Στην είσοδο 1 ή P συνδέεται η παροχή πεπιεσμένου αέρα και στις δίοδους 2 ή A και 4 ή B πραγματοποιούνται οι συνδέσεις με το έμβολο αέρα. Οι δίοδοι 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 διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

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



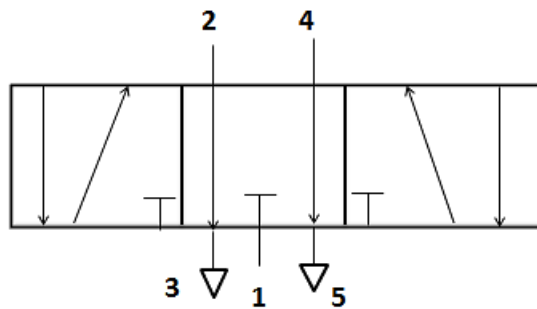
Οι τρεις κύριοι τύποι μηχανισμών ενεργοποίησης των βαλβίδων διακρίνονται σε:

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

Σε κατασκευαστικό επίπεδο, οι βαλβίδες 5/2 διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

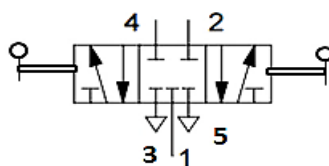
- ο Βαλβίδες εμβόλου.
- ο Βαλβίδες με δίσκο.
- ο Βαλβίδες με έδρες.

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. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο συμβολισμός της βαλβίδας 5/3 με ενδιάμεση ανοιχτή θέση.



Σχήμα 2.18: Βαλβίδα 5/3 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.

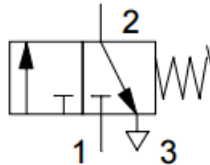


Σχήμα 2.19: Βαλβίδα 5/3 με ενδιάμεση κλειστή θέση



Βαλβίδες Σημάτων

Οι βαλβίδες σημάτων παρέχουν μικρή ποσότητα πεπιεσμένου αέρα και είναι αυτές που ενεργοποιούν τις βαλβίδες ελέγχου κατεύθυνσης. Πρόκειται για βαλβίδες τριών διόδων και δύο θέσεων, που για συντομία χαρακτηρίζονται ως βαλβίδες 3/2. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο συμβολισμός τους.



Σχήμα 2.20: Βαλβίδα 3/2

Οι βαλβίδες 3/2 χωρίζονται σε:

- Κανονικά ανοιχτές.
- Κανονικά κλειστές.

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 βασικοί μηχανισμοί λειτουργίας-ενεργοποίησης των συγκεκριμένων βαλβίδων διακρίνονται στα εξής είδη:

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

Από κατασκευαστική άποψη οι βαλβίδες 3/2 χωρίζονται σε :

- Εμβόλου.
- Εδρών.
- Μεικτές.

Βαλβίδες Αντεπιστροφής

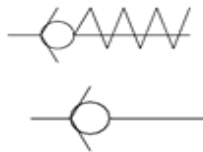
Οι βαλβίδες αντεπιστροφής είναι στοιχεία που επιτρέπουν τη ροή του αέρα πλήρως και με ελάχιστο εμπόδιο, προς τη μία μόνο κατεύθυνση, ενώ τη σταματούν σχεδόν τελείως προς την αντίθετη της κατεύθυνση. Η πίεση στην πλευρά εξόδου των βαλβίδων αυτών ενεργεί κόντρα στο στοιχείο στεγανότητας και επομένως αποτελεί



παράγοντα που βοηθάει την επίτευξη στεγανότητας της βαλβίδας. Οι βαλβίδες αντεπιστροφής είναι είτε απλού ελέγχου είτε διπλού ελέγχου.

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:

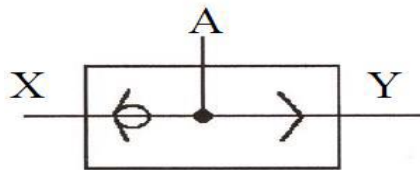
- Κώνου.
- Διαφράγματος
- Σφαίρας.
- Πλάκας.



Σχήμα 2.21: Βαλβίδα 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.



Σχήμα 2.22: Βαλβίδα αντεπιστροφής

Στις βαλβίδες αντεπιστροφής περιλαμβάνονται ακόμα και οι εξής βαλβίδες:

Η στραγγαλιστική ανακουφιστική βαλβίδα ονομάζεται και 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.

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 Α.

Βαλβίδες Ελέγχου Πίεσεως

Οι βαλβίδες αυτές, είναι στοιχεία που μπορούν να ρυθμίζουν την πίεση του αέρα ή να ελέγχουν το μέγεθος της πίεσης του αέρα και διαθέτουν τις εξής κατηγορίες:

1. Βαλβίδες ρύθμισης της πίεσης

Οι συγκεκριμένες βαλβίδες χρησιμοποιούνται για τη σταθερή διατήρηση της πίεσης. 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. 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. 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 [5],[6],[7],[8],[9],[10],[11],[12].

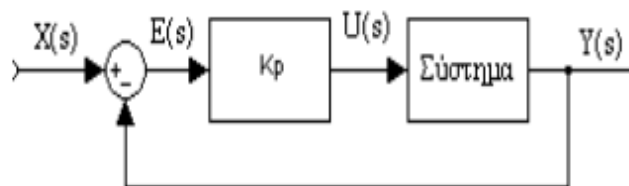
Στα συστήματα αυτόματου ελέγχου χρησιμοποιούνται συνδεσμολογίες ελεγκτών οι οποίοι έχουν στόχο τη βελτίωση των χαρακτηριστικών του συστήματος. Με τη χρήση ελεγκτών επιτυγχάνονται καλύτερες επιδόσεις των συστημάτων, δηλαδή γίνονται πιο γρήγορα, πιο ακριβή, πιο ευσταθή, δεν επηρεάζεται από τυχόν διαταραχές κ.λπ. Η μέθοδος με την οποία οι ελεγκτές καταφέρνουν το σκοπό τους είναι η εισαγωγή πόλων ή μηδενιστών ή και των δύο στη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος ανοιχτού βρόγχου, του οποίου η συμπεριφορά χρειάζεται βελτίωση. Υπάρχουν διάφορα είδη ελεγκτών τα οποία στην πραγματικότητα αποτελούν συνδυασμό των τριών βασικών ελεγκτών. Η πιο χρησιμοποιημένη μονάδα ελεγκτή είναι ο ελεγκτής τριών όρων (PID) γιατί στη ουσία αποτελεί συνδυασμό τριών βασικών ελεγκτών. Ο



ελεγκτής PID περιλαμβάνει έναν αναλογικό, ένα διαφορικό και ένα ολοκληρωτικό όρο. Υπάρχουν όμως και ελεγκτές που περιέχουν τους δύο από τους τρεις όρους. [15]

2.1.2 Είδη Ελεγκτών Αναλογικός (P) ελεγκτής

Ο αναλογικός ελεγκτής P (Proportional Control) δίνει στην έξοδο του σήμα ανάλογο του σφάλματος που δέχεται στην είσοδο. Ουσιαστικά είναι μια διάταξη ενίσχυσης του σήματος σφάλματος με κέρδος K_p . Η μορφή του αναλογικού ελεγκτή P παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. [15]



Σχήμα 2.23: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού ελεγκτή P

Από το σχήμα γίνεται αντιληπτή η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι:

$$P(s) = K_p$$

Ο αναλογικός ελεγκτής P αυξάνει την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος, ωστόσο είναι πιθανόν να δημιουργεί σφάλμα μόνιμης κατάστασης ανάλογο με τον τύπο του συστήματος, ενώ για μηδενικό σφάλμα θα έχει και μηδενική έξοδο.

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

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

Συνεπώς αν το σύστημα διεγερθεί με σήμα εισόδου μοναδιαία βηματική, το σφάλμα μόνιμης κατάστασης θα βρεθεί από τη σχέση:

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

Επομένως το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μειώνεται όσο αυξάνεται το κέρδος του αναλογικού ελεγκτή, όμως στη πραγματικότητα δεν γίνεται να αυξηθεί απεριόριστα το κέρδος.

Αν όμως το σύστημα είναι σε συνάρτηση μεταφοράς $G(s) = \frac{1}{s^2 + s * A + B}$,



τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόγχου με P ελεγκτή είναι:

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

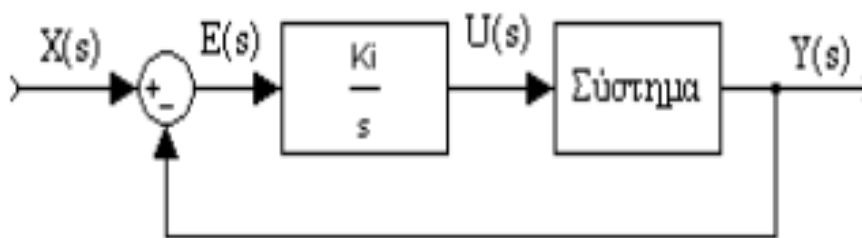
Ομοίως αν διεγερθεί το σύστημα με σήμα εισόδου μοναδιαία βηματική το σφάλμα μόνιμης κατάστασης θα βρεθεί από τη σχέση:

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

Άρα και η χρήση του αναλογικού ελεγκτή μειώνει το σφάλμα όσο αυξάνεται το κέρδος του και αυξάνεται και η φυσική συχνότητα ($\omega_n = \sqrt{B + K_p}$ ενώ χωρίς τον ελεγκτή $\omega_n = \sqrt{B}$) του συστήματος κάτι που προσφέρει στο σύστημα ταχύτερη απόκριση. Στο σύστημα με αναλογικό ελεγκτή το A ισούται $A = 2 * \zeta * \omega_n$ ίδιο δηλαδή με το σύστημα χωρίς ελεγκτή και παραμένει σταθερό, ωστόσο αυξάνεται η φυσική συχνότητα του συστήματος ενώ μειώνεται ο συντελεστής απόσβεσης ζ του συστήματος κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της υπερύψωσης στη βηματική απόκριση του συστήματος. Ένας αναλογικός ελεγκτής P αντιδρά άμεσα στην ύπαρξη σφάλματος επιτυγχάνει μείωση του σφάλματος μόνιμης κατάστασης όμως δεν είναι ικανός να το εξαλείψει εντελώς, καθώς για μέγιστη μείωση του σφάλματος χρειάζονται μη ρεαλιστικές υψηλές τιμές κέρδους, αυξάνει την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος όμως δημιουργεί σημαντική υπερύψωση και ταλαντώσεις με την αύξηση του κέρδους K_p . [15]

Ολοκληρωτικός (I) ελεγκτής

Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής I (Integral Control) οφείλει την ονομασία του στο γεγονός ότι δίνει στην έξοδο του σήμα ανάλογο του ολοκληρώματος του σφάλματος που δέχεται στην είσοδο. Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής I εμπεριέχει και μια παράμετρο K_i , η οποία έχει μονάδα μέτρησης το 1 sec^{-1} και ονομάζεται συντελεστής ολοκλήρωσης. Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής I έχει την παρακάτω μορφή: [15]



Σχήμα 2.24: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού ελεγκτή I



Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής I εισάγει στο σύστημα ένα πόλο και είναι προφανές από το παραπάνω σχήμα ότι η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι $I(s) = \frac{K_i}{s}$

Η έξοδος του ολοκληρωτικού ελεγκτή I έχει μορφή αναρρίχησης και όταν το σφάλμα μηδενίζεται η έξοδος του ελεγκτή παραμένει σταθερή.

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

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

Συνεπώς, αν διεγερθεί το σύστημα με σήμα εισόδου μοναδιαία βηματική, από τη παρακάτω σχέση θα βρεθεί το σφάλμα μόνιμης κατάστασης:

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

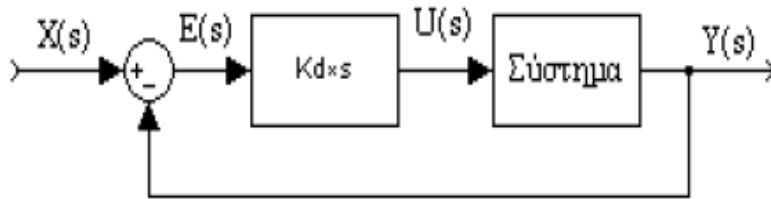
Επομένως το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μηδενίζεται με τη χρήση ολοκληρωτικού ελεγκτή I.

Είναι προφανές ότι το σύστημα με τη χρήση του ολοκληρωτικού ελεγκτή I από το ένα σύστημα μετατράπηκε σε άλλο σύστημα, όπου η τιμή του συντελεστή ολοκλήρωσης είναι όμοια με ένας φυσικής συχνότητας του συστήματος. Όσο αυξάνεται ο συντελεστής ολοκλήρωσης τόσο αυξάνεται και η φυσική συχνότητα του συστήματος, και έτσι έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτερη απόκριση του συστήματος και μείωση του συντελεστή απόσβεσης, καθώς το γινόμενο $2 * \zeta * \omega$, παραμένει σταθερό και ίσο με A, με συνέπεια την αύξηση ένας υπερύψωσης στη βηματική απόκριση του συστήματος.

Ένας ολοκληρωτικός ελεγκτής εξαλείφει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης για σταθερή είσοδο αναφοράς. Επιπρόσθετα, αντιμετωπίζει με επιτυχία αποκλίσεις από τυχόν διαταραχές του συστήματος. [15]

Διαφορικός (D) ελεγκτής

Ο διαφορικός ελεγκτής D (Differential Control) όταν στην είσοδο του το σήμα του σφάλματος έχει τη μορφή βηματικής διέγερσης τότε η έξοδος του ελεγκτή είναι η κρουστική συνάρτηση με θεωρητικά άπειρο πλάτος για $t=0$. Στη περίπτωση που το σφάλμα είναι σταθερό τότε η έξοδος του διαφορικού ελεγκτή είναι μηδέν. [15]



Σχήμα 2.25: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού ελεγκτή D

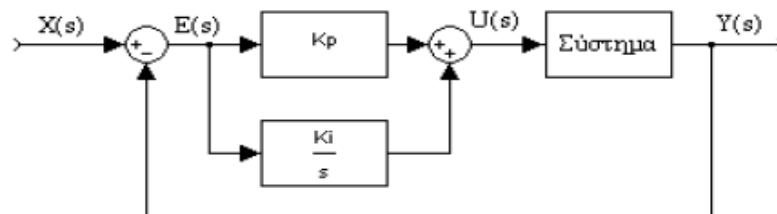
Ο διαφορικός ελεγκτής εισάγει στο σύστημα ένα μηδενικό και η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι η εξής:

$$D(s) = K_d * s$$

Ο διαφορικός ελεγκτής περιορίζει το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση στο στάδιο της μεταβατικής απόκρισης των συστημάτων, ωστόσο στη πράξη δεν χρησιμοποιείται ποτέ μόνος του. [15]

Αναλογικός-Ολοκληρωτικός (PI) ελεγκτής

Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής PI αθροίζει τον αναλογικό και τον ολοκληρωτικό έλεγχο. Η συνδεσμολογία του φαίνεται στο εξής σχήμα. [15]



Σχήμα 2.26: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή PI

Από τη συνάρτηση μεταφοράς του αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή PI είναι φανερό ότι εισάγει ένα πόλο στο μηδέν και ένα μηδενικό στο $-\frac{K_i}{K_p}$.

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

Η χρήση του όρου ολοκλήρωσης έχει σκοπό την εξάλειψη του σφάλματος στη μόνιμη κατάσταση και μεταβάλλει το DC-κέρδος του συστήματος. Ο αναλογικός όρος βελτιώνει την ευστάθεια του συστήματος και αυξάνει τη ταχύτητα απόκρισης. Στη περίπτωση που το σύστημα που ελέγχουμε είναι πρώτης τάξης με συνάρτηση μεταφοράς



$G(s) = \frac{1}{s+A}$, τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου με PI ελεγκτή είναι:

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

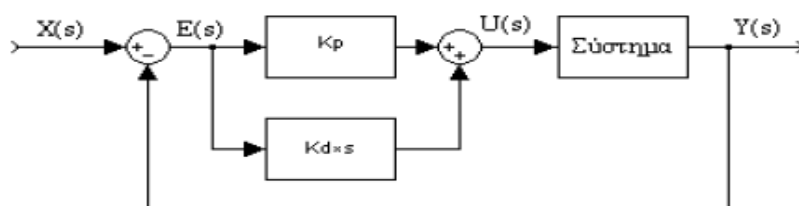
$$\rightarrow G_{c(s)} = \frac{s * K_p + K_i}{s^2 + A * s + s * K_p + K_i} \rightarrow G_{c(s)} = \frac{s * K_p + K_i}{s^2 + (A + K_p) * s + K_i}$$

Το σύστημα αλλάζει και γίνεται με: $\omega_n = K_i$ και $2 * \zeta * \omega_n = A + K_p$

Επομένως, όταν χρησιμοποιείται ο αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής με αύξηση του ολοκληρωτικού όρου K_i αυξάνεται η φυσική συχνότητα ω_n του συστήματος και με την αύξηση του αναλογικού συντελεστή K_p αυξάνεται το γινόμενο $2 * \zeta * \omega_n$, χωρίς όμως να μεταβάλλεται η ω_n οπότε αυξάνεται ο συντελεστής απόσβεσης του συστήματος με αποτέλεσμα τη μείωση της υπερύψωσης. Η επίδραση του αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή PI είναι ακριβής στην μεταβατική απόκριση του συστήματος και εξαρτάται από το μηδενικό $s = -\frac{K_i}{K_p}$ που εισάγει ο ελεγκτής στο σύστημα. Με την εισαγωγή του όρου ολοκλήρωσης I το σύστημα για βηματική είσοδο παρουσιάζει μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης. [15]

Αναλογικός-Διαφορικός (PD) ελεγκτής

Ο αναλογικός- διαφορικός ελεγκτής PD συνδυάζει αθροιστικά τον αναλογικό και το διαφορικό ελεγκτή. Η συνδεσμολογία του αναλογικού-διαφορικού ελέγχου αποτυπώνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.27: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού-διαφορικού ελεγκτή PD

Ο αναλογικός- διαφορικός εισάγει ένα πόλο στο $-\frac{K_p}{K_d}$ το οποίο προκύπτει από τη συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή:

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



Ο αναλογικός- διαφορικός ελεγκτής PD αυξάνει την απόσβεση του συστήματος και περιορίζει την υπερύψωση της, ωστόσο δεν μειώνει άμεσα το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Η χρήση του διαφορικού όρου D έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη απόσβεση του συστήματος που επιτρέπει την αύξηση του αναλογικού κέρδους και έτσι βελτιώνεται το σφάλμα μόνιμης κατάστασης και αυξάνεται η ταχύτητα απόκρισης του συστήματος. Πρακτικά ο αναλογικός- διαφορικός ελεγκτής λόγω του διαφορικού όρου D προκαλεί ενίσχυση στο θόρυβο ο οποίος μπορεί να εμφανιστεί στην απόκριση του συστήματος, γι' αυτό είναι πιθανό να δημιουργηθούν προβλήματα σε περιπτώσεις που υπάρχουν απότομες αλλαγές στο σήμα αναφοράς, γιατί έχουν ως αποτέλεσμα ο διαφορικός όρος D να παράγει έξοδο σε μορφή κρουστικής. [15]

Αν το σύστημα που ελέγχουμε είναι σε συνάρτηση μεταφοράς τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου με αναλογικό- διαφορικό ελεγκτή είναι η εξής:

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + A*s + B}$$

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

Το χαρακτηριστικά του νέου συστήματος είναι τα εξής:

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

Συνεπώς, η αύξηση του αναλογικού κέρδους K_p έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της φυσικής συχνότητας του συστήματος, και επομένως τη ταχύτερη απόκριση του συστήματος. Η αύξηση του διαφορικού συντελεστή K_d οδηγεί σε αύξηση του γινομένου $2 * \zeta * \omega_n$ με αμετάβλητη τη φυσική συχνότητα και έτσι αυξάνεται ο συντελεστής απόσβεσης του συστήματος που οδηγεί στη μείωση της υπερύψωσης της απόκρισης του συστήματος.

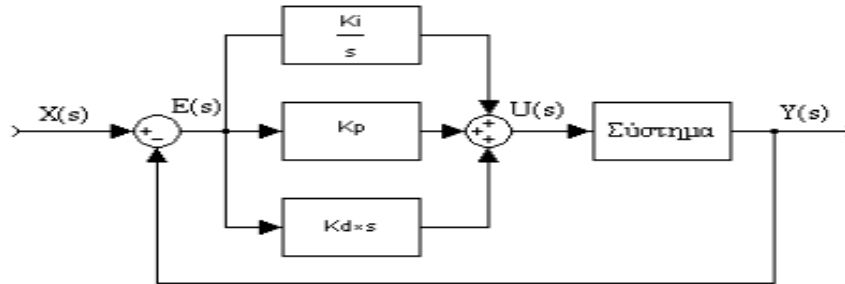
Όσο αυξάνεται το αναλογικό κέρδος μειώνεται το σφάλμα μόνιμης κατάστασης και δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή του διαφορικού συντελεστή. [15]

Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Διαφορικός (PID) ελεγκτής

Η δημοτικότητα του αναλογικού-ολοκληρωτικού-διαφορικού ελεγκτή PID οφείλεται πρώτον στην πολύ καλή συμπεριφορά του σε αντίθεση με μία ευρεία κλίμακα λειτουργικών συνθηκών και δεύτερον στη σχετική του απλότητα η οποία προσφέρει εύκολο και αξιόπιστο χειρισμό. Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός έλεγχος



συνδυάζει αθροιστικά την επίδραση των τριών βασικών όρων ελέγχου. Η συνδεσμολογία του PID ελέγχου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. [15]



Σχήμα 2.28: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού-ολοκληρωτικού-διαφορικού ελεγκτή PID

Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής εισάγει στο υπό έλεγχο σύστημα ανοιχτού βρόγχου ένα πόλο στο μηδέν και δύο μηδενικά. Η συνάρτηση μεταφοράς είναι η παρακάτω:

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

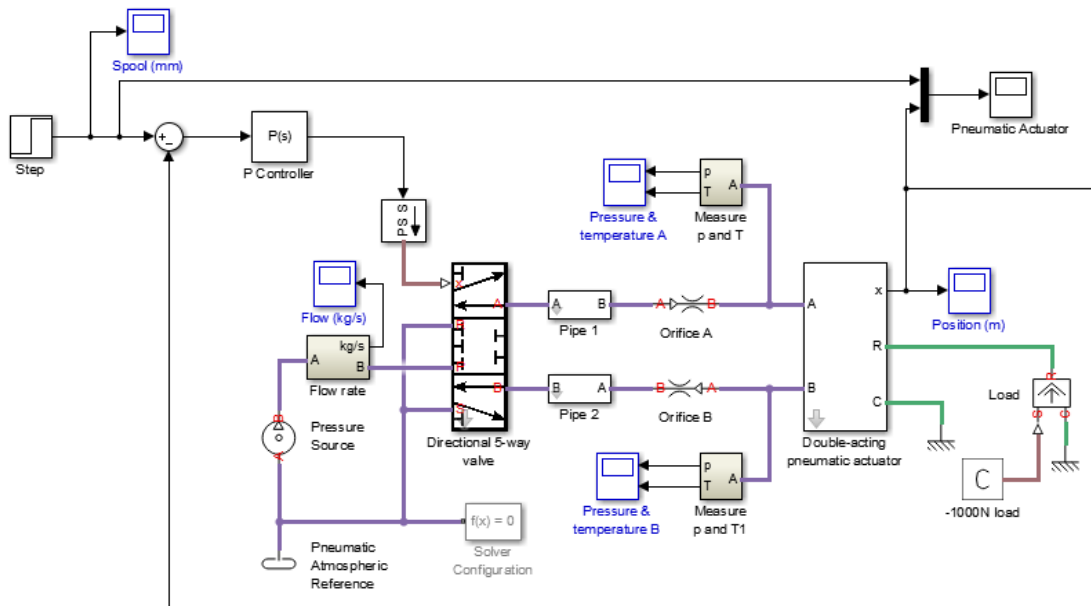
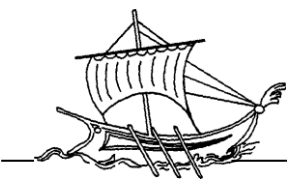
Αρκετές διεργασίες βιομηχανικού τύπου ελέγχονται με χάρη στη χρήση μονάδων ελεγκτών PID. Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής PID έχει συνολικά την καλύτερη απόδοση διότι το σύστημα εμφανίζει ταχεία απόκριση, μηδενική υπερύψωση και μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Για εφαρμογή τέτοιου είδους ελεγκτή, θα πρέπει να σχεδιαστεί κατάλληλη επιλογή των τριών παραμέτρων του αναλογικού κέρδους, του ολοκληρωτικού συντελεστή και του διαφορικού συντελεστή ούτως ώστε το σύστημα κλειστού βρόγχου να έχει τα πλεονεκτήματα όλων των ελεγκτών που συνδυάζονται στον ελεγκτή PID. Ουσιαστικά το δυσκολότερο στη σχεδίαση του συγκεκριμένου ελεγκτή είναι να δοθούν οι κατάλληλες τιμές στα K_p , K_d και K_i για να μην επιδρά το ένα αρνητικά στη λειτουργία του άλλου. [15]

2.2.1 Περιγραφή Συστήματος

Έλεγχος Συστήματος με χρήση Αναλογικού ελεγκτή (P)

Το μοντέλο προσομοίωσης πνευματικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε είναι της MathWorks [έκδοση Matlab R2014b]. Τροποποιήθηκε κατάλληλα για να πραγματοποιήσει τα επιθυμητά είδη ελέγχου. [16]

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το τροποποιημένο μοντέλο προσομοίωσης με αναλογικό έλεγχο.



Σχήμα 2.29: Πνευματικό Σύστημα με ελεγκτή Αναλογίας P

Στο μοντέλο προσομοίωσης πνευματικού συστήματος που παρουσιάστηκε παραπάνω, τα κύρια στοιχεία που το αποτελούν είναι μια βαλβίδα ελέγχου κατεύθυνσης 5/3, η οποία διαθέτει και μια ενδιάμεση θέση που είναι κλειστή και χρησιμοποιείται για τον σωστό έλεγχο της κατεύθυνσης ροής του πεπιεσμένου αέρα προς και από το έμβολο, καθώς και για την έξοδο και την επιστροφή του βάκτρου. 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.

Επιπρόσθετα, στο σύστημα υπάρχει και ένας κύλινδρος διπλής ενέργειας με απλό βάκτρο, ώστε η δύναμη που εξασκεί ο πεπιεσμένος αέρας να κινεί το έμβολο και προς τις δύο κατευθύνσεις κίνησης. Η τιμή που δόθηκε στην παράμετρο του μήκους της διαδρομής του εμβόλου είναι ίση με 0.1 m.

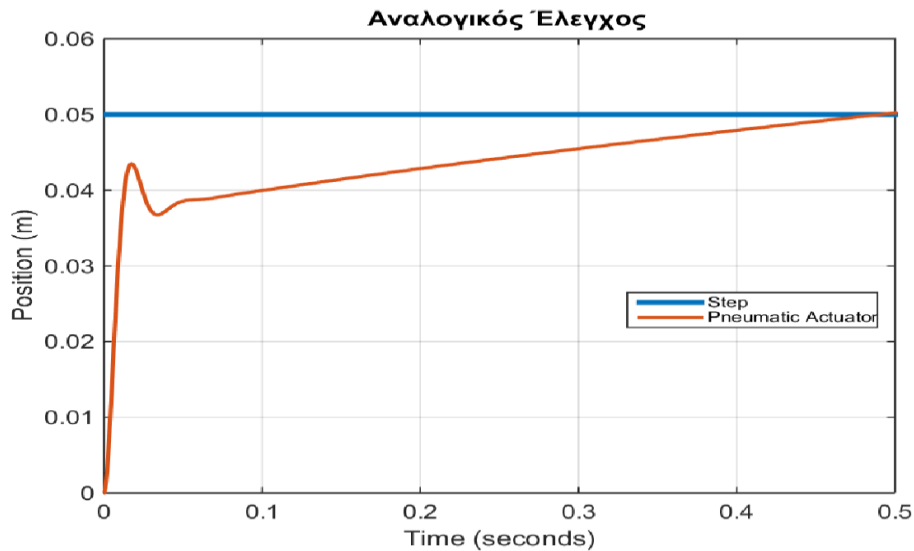
Επίσης, το σύστημα περιλαμβάνει και τον ρυθμό ροής (Flow Rate) όπου συνδέεται με την βαλβίδα. Στο εσωτερικό του ρυθμού ροής περιέχεται ένα υποσύστημα που περιλαμβάνει έναν αισθητήρα ροής μάζας και ροής θερμότητας (Mass and Heat Flow Sensor), καθώς και την τιμή του μετατροπέα των φυσικών παραμέτρων (PS-Simulink Converter).

Η πίεση αέρα (Pressure Source) είναι ένας συμπιεστής αέρα που διατηρεί μια καθορισμένη διαφορά πίεσης ανεξάρτητα από τον ρυθμό ροής. Η τιμή της διαφοράς πίεσης που δόθηκε στον συμπιεστή είναι ίση με 6 bar.

Τέλος, στο μοντέλο προσομοίωσης προστέθηκε μια βηματική είσοδος (Step), με σκοπό τον υπολογισμό της απόκρισης του συστήματος. Οι τιμές που τέθηκαν στις παραμέτρους της βηματικής εισόδου, για το λόγο ότι στο block του πνευματικού ενεργοποιητή έχει τεθεί η τιμή 0.1 m στην παράμετρο του μήκους διαδρομής του εμβόλου, είναι για το Step Time μηδέν και για το Final Value 0.05 m.



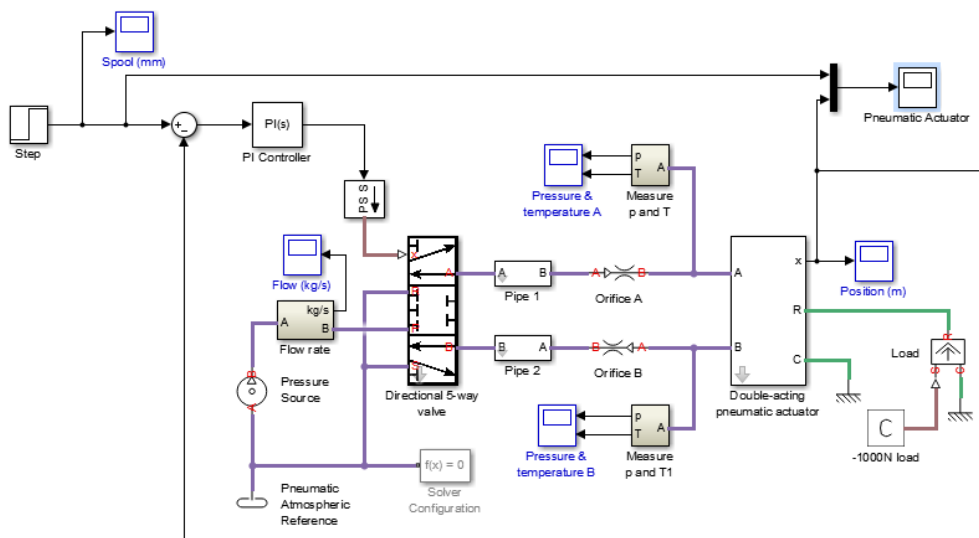
Επίσης, χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο του ελεγκτή Proportional–Integral–Derivative (PID), δίνοντας τιμή μόνο στην παράμετρο του ελεγκτή P, έτσι ώστε να υλοποιηθεί ο αναλογικός έλεγχος. Για το κέρδος του αναλογικού ελεγκτή δόθηκε η τιμή $K_p = 7.5$. Με την συγκεκριμένη τιμή το σύστημα επιτυγχάνει την επιθυμητή απόκριση. Ο χρόνος προσομοίωσης είναι 0.5 sec.



Σχήμα 2.30: Γραφική Απεικόνιση συστήματος με Αναλογικό ελεγκτή

Έλεγχος Συστήματος με χρήση Αναλογικού-Ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI)

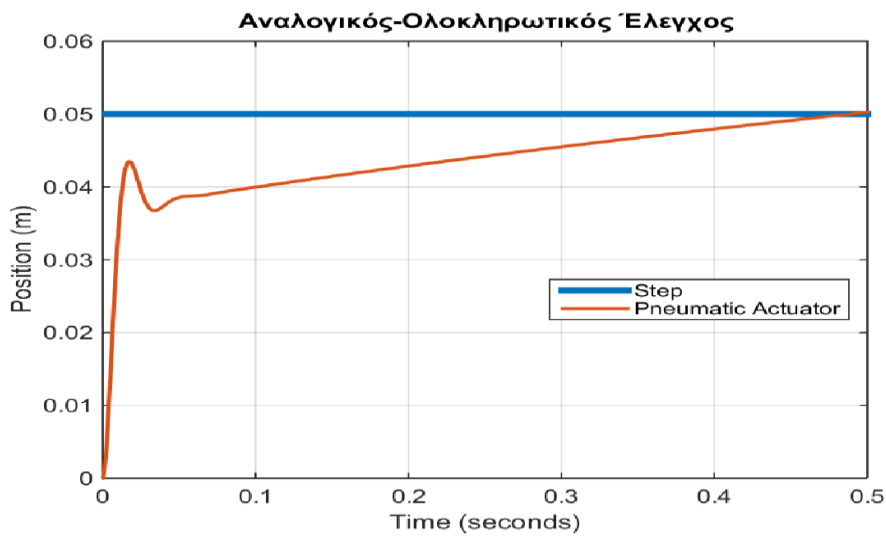
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το τροποποιημένο μοντέλο προσομοίωσης με Αναλογικό-Ολοκληρωτικό έλεγχο.



Σχήμα 2.31: Πνευματικό Σύστημα με Αναλογικό- Ολοκληρωτικό ελεγκτή PI



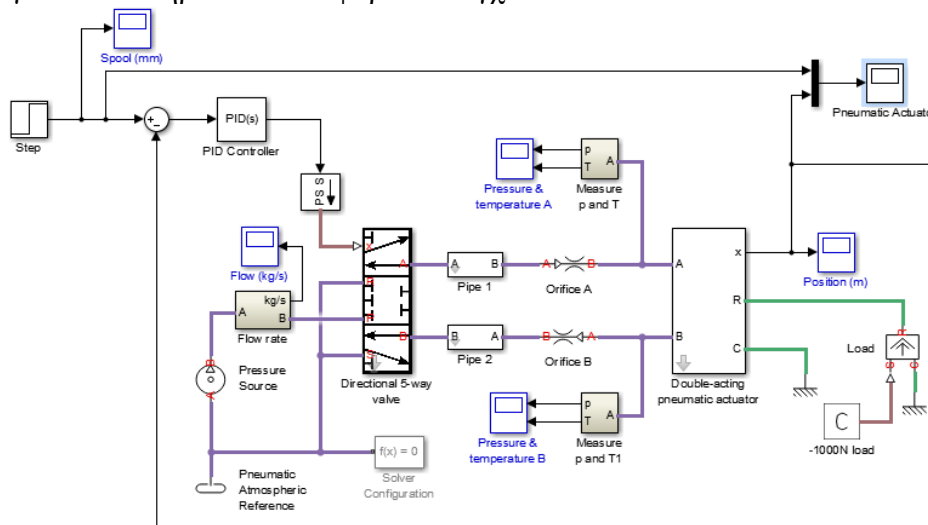
Για την υλοποίηση του παραπάνω συστήματος διατηρήθηκαν οι προηγούμενες μετατροπές, με κύρια αλλαγή αυτή του ελεγκτή. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο του ελεγκτή Proportional-Integral-Derivative (PID), δίνοντας τιμή μόνο στις παραμέτρους του ελεγκτή P και I, έτσι ώστε να υλοποιηθεί ο έλεγχος. Για το κέρδος του αναλογικού ελεγκτή δόθηκε η τιμή $K_p = 7.5$ και για το κέρδος του ολοκληρωτικού ελεγκτή δόθηκε η τιμή $K_i = 0.1$. Με τις συγκεκριμένες τιμές το σύστημα επιτυγχάνει την επιθυμητή απόκριση. Ο χρόνος προσομοίωσης είναι 0.5 sec.



Σχήμα 2.32: Γραφική Απεικόνιση συστήματος με Αναλογικό - Ολοκληρωτικό ελεγκτή

Έλεγχος Συστήματος με χρήση Αναλογικού-Ολοκληρωτικού-Διαφορικού ελεγκτή (PID)

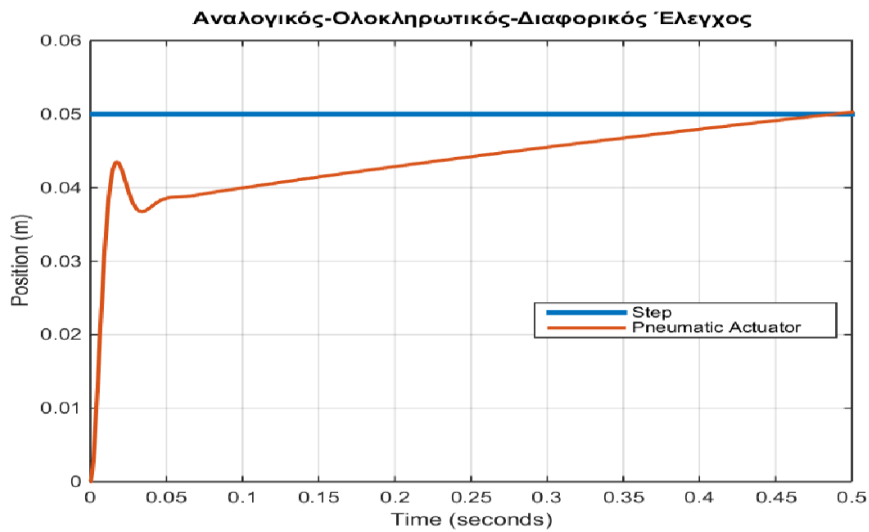
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το τροποποιημένο μοντέλο προσομοίωσης με Αναλογικό-Ολοκληρωτικό- Διαφορικό έλεγχο.



Σχήμα 2.33: Πνευματικό Σύστημα με Αναλογικό- Ολοκληρωτικό-Διαφορικό ελεγκτή PID



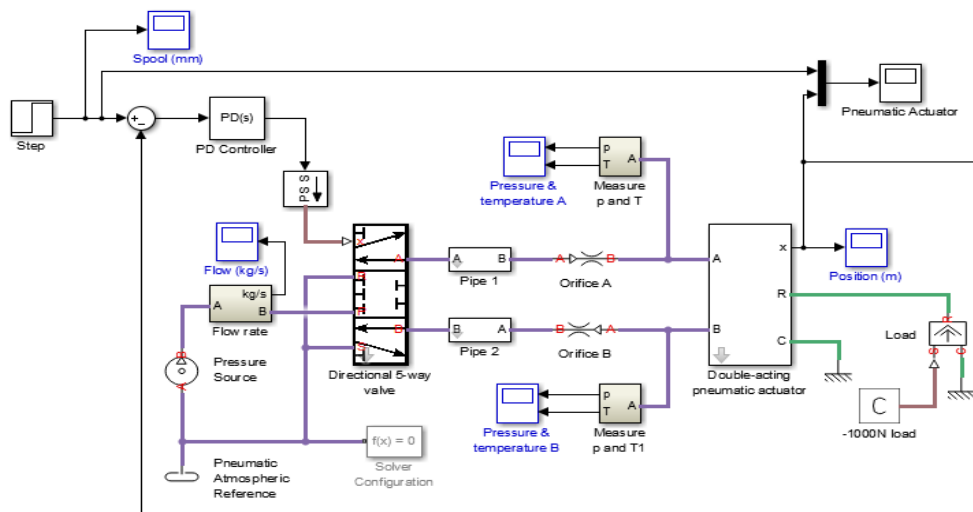
Για την υλοποίηση του παραπάνω συστήματος διατηρήθηκαν οι προηγούμενες μετατροπές, με κύρια αλλαγή αυτή του ελεγκτή. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο του ελεγκτή Proportional–Integral–Derivative (PID). Για το κέρδος του αναλογικού ελεγκτή δόθηκε η τιμή $K_p = 7.5$, για το κέρδος του ολοκληρωτικού ελεγκτή δόθηκε η τιμή $K_i = 0.1$, και για το κέρδος του διαφορικού ελεγκτή δόθηκε η τιμή $K_d = 10$. Με τις συγκεκριμένες τιμές το σύστημα επιτυγχάνει την επιθυμητή απόκριση. Ο χρόνος προσομοίωσης είναι 0.5 sec.



Σχήμα 2.34: Γραφική Απεικόνιση συστήματος με Αναλογικό – Ολοκληρωτικό-Διαφορικό ελεγκτή

Έλεγχος Συστήματος με χρήση Αναλογικού -Διαφορικού ελεγκτή (PD)

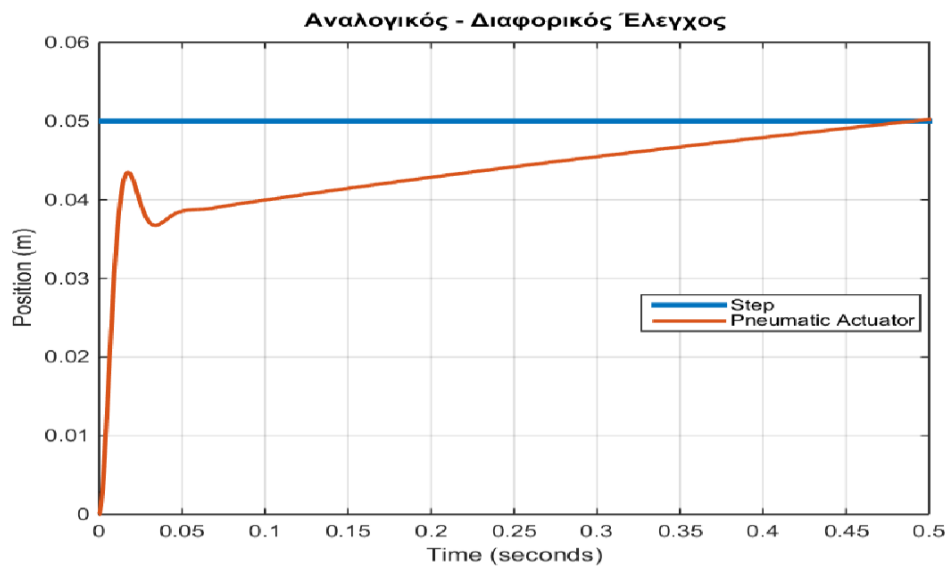
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το τροποποιημένο μοντέλο προσομοίωσης με Αναλογικό - Διαφορικό έλεγχο.



Σχήμα 2.35: Πνευματικό Σύστημα με Αναλογικό-Διαφορικό ελεγκτή PD



Για την υλοποίηση του παραπάνω συστήματος διατηρήθηκαν οι προηγούμενες μετατροπές, με κύρια αλλαγή αυτή του ελεγκτή. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο του ελεγκτή Proportional–Integral–Derivative (PID), , δίνοντας τιμή μόνο στις παραμέτρους του ελεγκτή P και D, έτσι ώστε να υλοποιηθεί ο έλεγχος.. Για το κέρδος του αναλογικού ελεγκτή δόθηκε η τιμή $K_p = 7.5$ και για το κέρδος του διαφορικού ελεγκτή δόθηκε η τιμή $K_d = 10$. Με τις συγκεκριμένες τιμές το σύστημα επιτυγχάνει την επιθυμητή απόκριση. Ο χρόνος προσομοίωσης είναι 0.5 sec.



Σχήμα 2.36: Γραφική Απεικόνιση συστήματος με Αναλογικό – Διαφορικό ελεγκτή

Κεφάλαιο 3: Έλεγχος Πνευματικού Συστήματος Με Χρήση Lookup table για εφαρμογή Ελεγκτή Fuzzy

3.1 Ασαφής Λογική

Η Ασαφής λογική (fuzzy logic) χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στον έλεγχο των μηχανών. Ο όρος «Ασαφής» δίνεται για να αποτυπώσει την έννοια που δεν μπορεί να αποδοθεί με τις εκφράσεις αλήθεια ή ψέμα ή ακόμα και την έκφραση μερικώς ψέμα. Ωστόσο, υπάρχουν εναλλακτικές προτάσεις όπως για παράδειγμα οι Γενετικοί Αλγόριθμοι και τα Νευρωνικά Δίκτυα τα οποία μπορούν να αποδώσουν και να λειτουργήσουν τόσο καλά όσο η Ασαφής Λογική. Επίσης, η ασαφής λογική έχει το πλεονέκτημα της επίλυσης προβλημάτων που κοστίζουν αρκετά στον άνθρωπο. Με την εμπειρία που αποκτά ο άνθρωπος από την ασαφή λογική είναι ικανός να σχεδιάσει και να κατασκευάσει ελεγκτές για να τον βοηθούν στο να αντιμετωπίζει πιο εύκολα μηχανισμούς που κατέχει ήδη ή ακόμα και να δημιουργήσει καινούργιους. Η ασαφής λογική χρησιμοποιείται σε πολλά προγράμματα υπολογιστών, σε δορυφορικά συστήματα, στον έλεγχο τριφασικών κινητήρων, και σε πολλές άλλες εφαρμογές. Η ασαφής λογική αποτελεί μία επέκταση της κλασσικής αριστοτέλειας λογικής. Μια

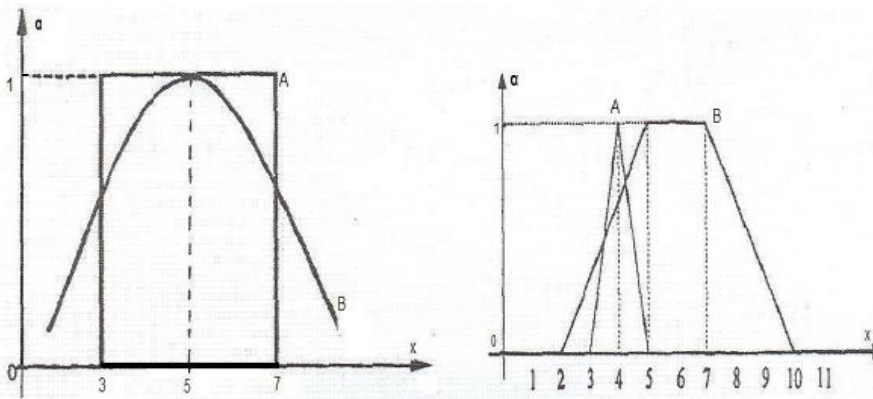


πρόταση μπορεί να είναι αληθής "με κάποιο βαθμό αληθείας", και όχι απλά αληθής ή ψευδής, δηλαδή η ασαφής λογική λέει ότι τα πράγματα συχνά δεν είναι «άσπρο-μαύρο» αλλά «αποχρώσεις του γκρι». Αυτή η ιδέα επέφερε επανάσταση στη θεωρία της λογικής, καθώς ξέφυγε από το μοντέλο που κυριαρχούσε 2500 χρόνια, δηλαδή το μοντέλο του «0-1», «αληθές-ψευδές». Ο τρόπος λειτουργίας της επιστήμης απαιτεί προτάσεις οι οποίες είναι είτε αληθείς είτε ψευδείς. Ωστόσο, ο τρόπος λειτουργίας της ανθρώπινης λογικής δεν θέτει όρια μεταξύ αληθούς και ψευδούς με ακρίβεια. Ο πρώτος που ασχολήθηκε με την ασαφή λογική είναι ο Lotfi A. Zadeh το 1965. [21]

Η Ασαφής Λογική στηρίζεται στην επέκταση της έννοιας του Δίτιμου Συνόλου (1), στη γενικευμένη έννοια του Ασαφούς Συνόλου (2):

$$I_A : X \rightarrow \{0,1\}, \quad \mu_{I_A}(x) = \begin{cases} 1, & \text{αν } x \in A \\ 0, & \text{αν } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1], \quad \mu_A(x) = \alpha \in [0,1], \quad (2)_{11}$$



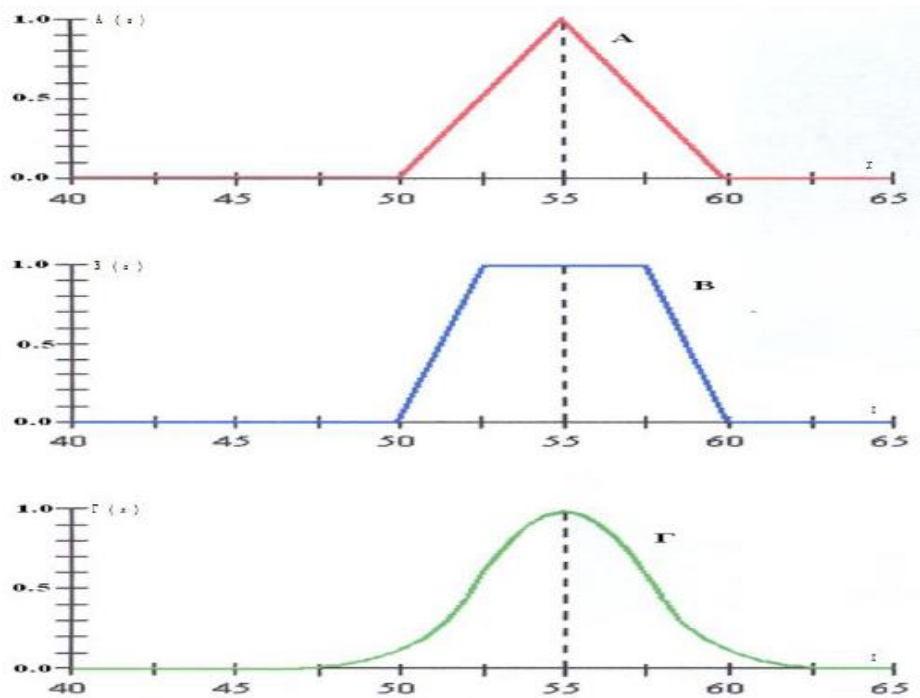
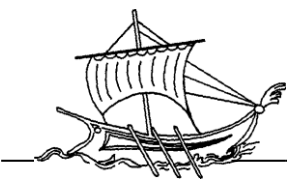
Σχήμα 3.1: Σύγκριση κλασικού και ασαφούς συνόλου

Κλασικό Σύνολο, $A = \{3, 5, 7\}$ Συνήθη στη πράξη, ασαφή σύνολα:

A, Τριγωνικό, "περίπου 4"

Ασαφές Σύνολο, $B = \{\text{περίπου } 5\}$

B, Τραπεζοειδές, "περίπου μεταξύ 5 και 7"



Σχήμα 3.2: Σύγκριση ασαφών συνόλων, Α-τριγωνικού, Β-τραπεζοειδούς, Γ-καμπανοειδούς, που εκφράζουν την ίδια ασαφή έννοια, «χ περίπου 55»

Έτσι για την αντιμετώπιση τέτοιων γλωσσικών ασαφών εκφράσεων, το Ασαφές Σύνολο επεκτείνει την έννοια ενός δίτιμου συνόλου μέσω της *συνάρτησης συμμετοχής*, δηλ.

$$\mu_A : x \in X \rightarrow \mu_A(x) \in [0,1]$$

Δηλαδή:

$\mu_A(x)=1$, σημαίνει ότι το x ανήκει ολοκληρωτικά στο A ,

$\mu_A(x)=0$, σημαίνει ότι το x δεν ανήκει καθόλου στο A ,

$0 < \mu_A(x) < 1$, σημαίνει ότι το x ανήκει μερικά, δηλαδή κατά κάποιο βαθμό στο A .

Ο αριθμός $\mu_A(x) \in [0,1]$ δηλώνει τον βαθμό συμμετοχής με τον οποίο το στοιχείο $x \in X$ ανήκει (συμμετέχει) στο ασαφές υποσύνολο A του X . [21]

3.1.1 Ασαφείς Ελεγκτές

Οι ασαφείς ελεγκτές αποτελούν συστήματα διακριτού χρόνου και χαρακτηρίζονται από έντονη μη γραμμικότητα. Αντίθετα, οι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες σχεδόν περιπτώσεις του αυτομάτου ελέγχου συνήθως είναι διακριτού ή



συνεχούς χρόνου και είναι κυρίως γραμμικοί. Και στις δύο περιπτώσεις οι είσοδοι αποτελούν το σφάλμα της εξόδου του ελεγχόμενου συστήματος με την είσοδο αναφοράς και τα χαρακτηριστικά αυτού του σφάλματος, όπως για παράδειγμα η μεταβολή και ο ρυθμός μεταβολής του. Η έξοδος των ασαφών όσο και των γραμμικών ελεγκτών μπορεί να είναι το σήμα ελέγχου ή η προσαύξηση του σήματος αυτού, ανάλογα πάντα με την μορφή του ελεγκτή. [21]

Το βασικό μειονέκτημα των ασαφών ελεγκτών είναι ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων που πρέπει να ρυθμιστούν για να υλοποιηθούν τα κριτήρια που έχουν τεθεί στην κάθε περίπτωση, ως προς την επιθυμητή απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος. Η εύρεση του πεδίου τιμών των ασαφών μεταβλητών, η μορφή των συναρτήσεων συμμετοχής των ασαφών συνόλων, η επιλογή του μηχανισμού εξαγωγής συμπεράσματος και των τελεστών που χρησιμοποιεί η ασαφής λογική, ο σχεδιασμός της ασαφούς βάσης κανόνων, ο καθορισμός των πιθανών κερδών κλιμακοποίησης που μπορεί να διαθέτει ο ελεγκτής, η επιλογή του χρόνου δειγματοληψίας και ένας αριθμός ακόμη παραμέτρων καθιστούν την διαδικασία ρύθμισης του ασαφούς ελεγκτή μια χρονοβόρα και δύσκολη διαδικασία. [21]

Επιπρόσθετα, η έλλειψη πλήρους θεωρητικού και μαθηματικού υπόβαθρου για την κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων αυτών καθιστά των ασαφή έλεγχο μια διαδικασία η οποία βασίζεται κατά κύριο λόγο σε προσπάθειες δοκιμής και σφάλματος. Οι παρατηρήσεις που ειπώθηκαν παραπάνω έχουν επιφέρει μεγάλη κριτική στη χρήση της ασαφούς λογικής πάνω στον έλεγχο συστημάτων σε σχέση με την απλότητα του γραμμικού ελέγχου. Στο γραμμικό έλεγχο απαιτείται η εύρεση των τιμών το πολύ τριών κερδών και υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα μαθηματικά εργαλεία τα οποία είναι σε θέση να προσφέρουν μια πλήρη θεωρητική αντιμετώπιση του προβλήματος. [21]

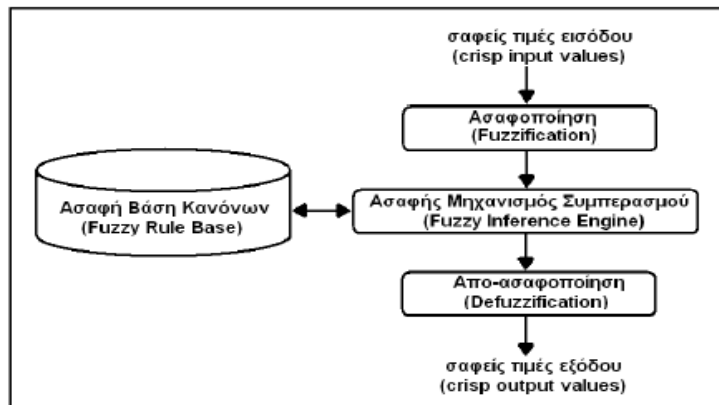
Η μη γραμμικότητα των ασαφών ελεγκτών επιφέρει προβληματισμό στο θέμα της ευστάθειας των συστημάτων ασαφούς ελέγχου στις πρακτικές εφαρμογές. Έχουν γίνει κάποια βήματα ωστόσο για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ευστάθειας των FLC με χρήση τεχνικών της θεωρίας των μη γραμμικών συστημάτων. Από τις τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί μερικές αφορούν την χρήση της άμεσης μεθόδου Lyapunov για τον καθορισμό συνθηκών για τη γενική ευστάθεια συστημάτων υπό ασαφή έλεγχο, την ύπαρξη συνθηκών για την απόλυτη ευστάθεια των συστημάτων ασαφούς ελέγχου ή την εφαρμογή του κριτηρίου Popov για τον ασαφή έλεγχο συστημάτων συνεχούς χρόνου και του κριτηρίου δίσκου για τον έλεγχο διακριτών συστημάτων. Όμως, οι περισσότερες σχεδόν από αυτές τις τεχνικές στηρίζονται σε συνθήκες και υποθέσεις που στον πραγματικό κόσμο είναι δύσκολο να ικανοποιηθούν. Συνεπώς η ευστάθεια των ασαφών ελεγκτών αποτελεί ένα ανοικτό πρόβλημα. [21]

Τα κύρια δομικά στοιχεία ενός *ασαφούς ελεγκτή (fuzzy controller)* είναι τα εξής:

- **Η βάση γνώσης (knowledge base)** όπου είναι αποθηκευμένοι οι κανόνες (if-then rules) για τον έλεγχο της διαδικασίας.



- **Τα ασαφή σύνολα (fuzzy sets)** χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν της μεταβλητές εισόδου και εξόδου με τους λεκτικούς όρους.
- **Ο ασαφοποιητής (fuzzifier)** μετατρέπει τις πραγματικές τιμές της εισόδου σε ασαφή σύνολα
- **Ο μηχανισμός συμπερασμού (inference engine)** επεξεργάζεται τις εξόδους του ασαφοποιητή και με χρήση της βάσης γνώσης εξάγει τα ασαφή σύνολα των συμπερασμάτων.
- **Ο αποασαφοποιητής (defuzzifier)** μετατρέπει τα συμπεράσματα που εξάγει ο μηχανισμός συμπερασμού σε πραγματικούς αριθμούς ούτως ώστε να μπορεί να γίνει μετάδοση της δράσης ελέγχου στην διαδικασία. [21]



Σχήμα 3.3: Χαρακτηριστικό διάγραμμα ροής του ασαφούς συμπερασμού

Σε έναν ασαφή ελεγκτή οι εισοδοι είναι σήματα και ο σχεδιαστής ενός ασαφούς ελεγκτή πρέπει να κάνει τα βήματα που ακολουθούν:

1. **Λεκτική κατανομή των εισόδων:** Ο σχεδιαστής πρέπει να αναπαραστήσει τις μεταβλητές εισόδου και εξόδου με τους λεκτικούς όρους.
2. **Διατύπωση των κανόνων:** Μετά την κατανομή των εισόδων και εξόδων τα ασαφή σύνολα αποθηκεύονται υπό τη μορφή συναρτήσεων συμμετοχής στον υπολογιστή και μετά ακολουθεί η διατύπωση των κανόνων.
3. **Καθορισμό του τύπου της ασαφούς συνεπαγωγής:** Μετά τη διατύπωση των κανόνων ακολουθεί ο καθορισμός του ασαφούς τύπου συνεπαγωγής. Οι πιο γνωστοί τύποι ασαφούς συνεπαγωγής είναι:



α) του **Mamdani**, στον οποίο χρησιμοποιείται ο τελεστής max-min, που λαμβάνει το μικρότερο από τους βαθμούς συμμετοχής των ασαφοποιημένων τιμών και παράγει το βαθμό εκπλήρωσης (*degree of fulfillment*) του κάθε κανόνα. Ο βαθμός εκπλήρωσης του κανόνα εκφράζει τη βαρύτητα που έχει το αποτέλεσμα του κανόνα.

β) του **Larsen**, στον οποίο χρησιμοποιείται ο τελεστής max-product, που πολλαπλασιάζει τους βαθμούς συμμετοχής των ασαφοποιημένων τιμών και υπολογίζει το βαθμό εκπλήρωσης του κανόνα. [21]

4. **Από-ασαφοποίηση:** Η από-ασαφοποίηση παράγει μία αυστηρή ή crisp τιμή από ένα ασαφές σύνολο. Είναι δηλαδή η αντίθετη διαδικασία από την ασαφοποίηση. Οι μέθοδοι από-ασαφοποίησης είναι:

- **Από-ασαφοποίηση κεντρικής τιμής** (*Centroid defuzzycation* ή *center of area* ή *COA*), υπολογίζεται το κέντρο βάρους της κατανομής του ασαφούς συνόλου της εξόδου:

$$x'_{COA} = \frac{\int x \cdot \mu(x) dx}{\int \mu(x) dx}$$

- **Από-ασαφοποίηση μέσου όρου των μεγίστων** (*Mean of Maxima* ή *MOM*), υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών εξόδου που έχουν τον μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής:

$$x'_{MOM} = \frac{1}{m} \sum \max \mu(x)$$

- **Από-ασαφοποίηση μικρότερου από τους μεγίστους** (*Smallest of maxima* ή *SOM*), υπολογίζεται από τις μέγιστες τιμές εξόδου εκείνη που έχει το μικρότερο βαθμό συμμετοχής.
- **Από-ασαφοποίηση μεγαλύτερου από τους μεγίστους** (*Largest of maxima* ή *LOM*), υπολογίζεται από τις μέγιστες τιμές εξόδου εκείνη που έχει το μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής. [21]

- Η μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως είναι η μέθοδος από- ασαφοποίησης της κεντρικής τιμής ή κεντρώου (*Centroid* ή *COA*), λόγω της ικανότητάς της να παρουσιάζει σε σχέση με τις άλλες μεθόδους το μικρότερο σφάλμα. Ο Zadeh με το βιβλίο του “Fuzzy Sets” το 1965, παρουσίασε τη θεωρία των ασαφών συνόλων (*fuzzy set theory*), με την οποία μια τιμή μπορεί να ανήκει ταυτόχρονα σε πολλά υποσύνολα, στο κάθε ένα με ένα βαθμό συμμετοχής. Ένα τέτοιο υποσύνολο είναι το ασαφές σύνολο, το οποίο περιλαμβάνει στοιχεία, που το κάθε ένα έχει ένα βαθμό συμμετοχής. [21]



3.1.2 Βασικοί Όροι

Στην κλασική θεωρία των συνόλων, ένα σύνολο αποτελείται από ένα πεπερασμένο ή άπειρο αριθμό στοιχείων και μπορεί να αναπαρασταθεί από την απαρίθμηση των στοιχείων του ως εξής:

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$$

Τα στοιχεία όλων των συνόλων υπό μελέτη ανήκουν σε ένα *υπερσύνολο αναφοράς* (universe of discourse).

Αν αυτά τα στοιχεία a_i ($i=1, \dots, n$) του A είναι όλα μαζί ένα υποσύνολο του υπερσυνόλου αναφοράς X , το σύνολο A μπορεί να αναπαρασταθεί από όλα τα στοιχεία $x \in X$ από τη χαρακτηριστική συνάρτηση

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{αν } x \in A \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

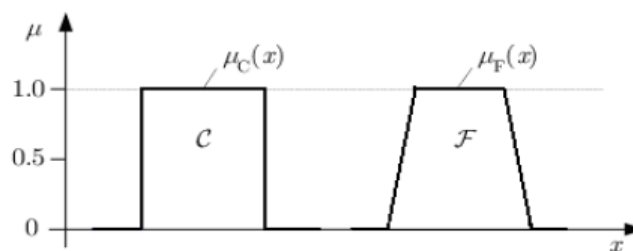
Στην κλασική θεωρία των συνόλων το $\mu_A(x)$ έχει μόνο τις τιμές 0 ("false") και 1 ("true") που είναι οι τιμές της αλήθειας. Τέτοια σύνολα ονομάζονται επίσης *crisp σύνολα* (crisp sets). Τα μη- crisp σύνολα ονομάζονται *ασαφή σύνολα* (fuzzy sets).

Ασαφές Σύνολο είναι οποιοδήποτε σύνολο που επιτρέπει τα μέλη του να έχουν διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής (συνάρτηση συμμετοχής) στο διάστημα $[0,1]$.

Για τα ασαφή σύνολα μπορεί να οριστεί μία συνάρτηση, η οποία ονομάζεται *Συνάρτηση Συμμετοχής* (Membership Function). [21]

Η συνάρτηση συμμετοχής (ή *MF*) υποδεικνύει το βαθμό κατά τον οποίο το σύνολο x ανήκει στο σύνολο A , δηλαδή

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1]$$



Σχήμα 3.4: Χαρακτηριστική συνάρτηση συμμετοχής ενός κλασικού ή crisp συνόλου (αριστερά) και ενός ασαφούς συνόλου (δεξιά)



Τα ασαφή σύνολα αναπαρίστανται συχνά από σύνολα διατεταγμένων ζευγών (ordered pairs) κατά τον εξής τρόπο:

$$A = \int \{\mu_A(x)/x\} \quad \eta \quad \sum \{\mu_A(x)/x\} \quad \text{για } x \in X$$

Τα σύμβολα \int και \sum εκφράζουν το σύνολο και όχι το κλασικό ολοκλήρωμα ή το άθροισμα. Σε πιο απλή μορφή η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως:

$$\mu_A(x) = \{\mu_1(x)/x_1, \mu_2(x)/x_2, \dots, \mu_n(x)/x_n\}$$

3.1.3 Βασικές Ιδιότητες Ασαφών Συνόλων

- Το ύψος (*height*) ενός ασαφούς συνόλου A , $hgt(A)$, ορίζεται ως :

$$hgt(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x)$$

Τα ασαφή σύνολα των οποίων το ύψος είναι ίσο με το 1, ονομάζονται *κανονικά*.

- Ο κόρος (*core*) ενός ασαφούς συνόλου είναι το υποσύνολο του πεδίου ορισμού της συνάρτησης συμμετοχής για το οποίο το πεδίο τιμών παίρνει τιμές ίσες με τη μονάδα.

$$core(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) = 1\}$$

Το *σύνολο στήριξης* (*support set*) ενός ασαφούς συνόλου είναι το σύνολο των στοιχείων του υπερσυνόλου αναφοράς X για το οποίο ισχύει το εξής :

$$supp(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\}$$

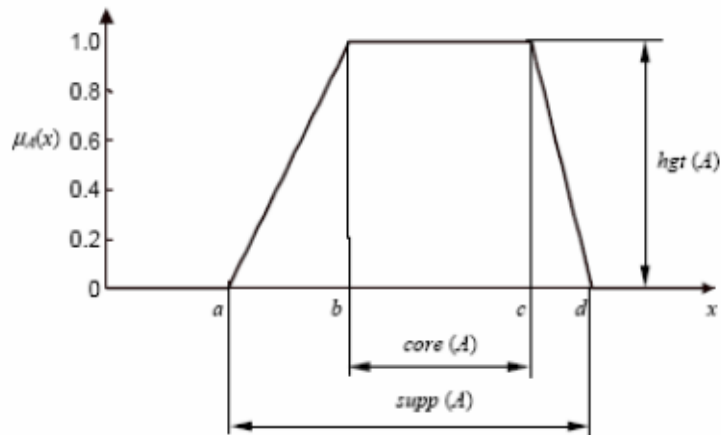
Κανονικό ασαφές σύνολο (*normal set*) είναι το ασαφές σύνολο στο οποίο ο πυρήνας δεν είναι κενό σύνολο, υπάρχει δηλαδή τουλάχιστον ένα στοιχείο του τέτοιο έτσι ώστε $\mu_A(x) = 1$

Σύνολο α-τομής (*a-cut*) A_a είναι ένα κλασσικό ή crisp σύνολο το οποίο εμπεριέχει όλα τα στοιχεία $x \in X$ που έχουν μεγαλύτερο βαθμό συμμετοχής από μία τιμή a .

$$A_a = \{x \in X \mid \mu_A(x) \geq a\} \quad \text{όπου } 0 < a \leq 1$$



Κυρτό ασαφές σύνολο (*convex fuzzy set*) είναι το ασαφές σύνολο το οποίο έχει μονότονα αύξουσα ή μονότονα φθίνουσα συνρτηση συμμετοχής.



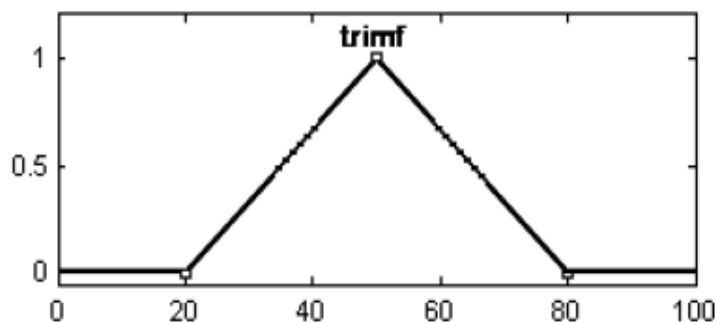
Σχήμα 3.5: Ύψος, υποστήριξη και κόρος ενός ασαφούς συνόλου

3.1.4 Συναρτήσεις Συμμετοχής

Υπάρχουν διάφοροι **τύποι συναρτήσεων συμμετοχής** (*Membership functions* ή *MF's*) που αναπαριστούν τα ασαφή σύνολα όπως είναι η τριγωνική μορφή (*triangular mf*), η τραπεζοειδή (*trapezoidal mf*), η καμπανοειδή (*generalize bell mf* ή *gbell mf*), η γκαουσιανή (*gaussian mf*), η μορφή s (*s mf*), η μορφή pi (*pi mf*), η μορφή z (*z mf*), η σιγμοειδή (*sigmoidal mf*) ή ακόμα και μια συγκεκριμένη μαθηματική τιμή. [21]

- Η **τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής** (*triangular mf*) χαρακτηρίζεται από τις τρεις παραμέτρους {a, b, c}, ως εξής:

$$triangle(x; a, b, c) = \max \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right)$$

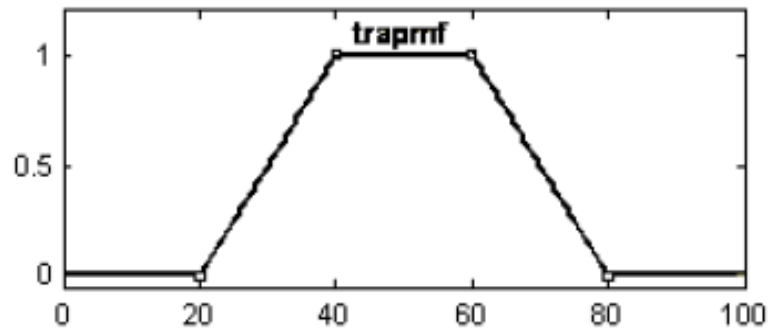


Σχήμα 3.6: Παράδειγμα τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής (x; 20, 50, 80)



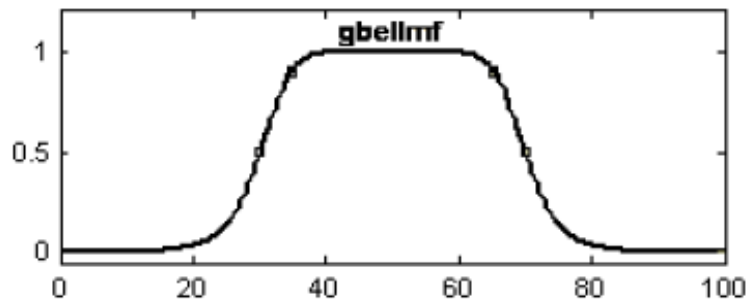
- Η **τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής** (*trapezoidal mf*) χαρακτηρίζεται από τις τέσσερις παραμέτρους {a, b, c, d}, ως εξής:

$$\text{trapezoid}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$$



Σχήμα 3.7: Παράδειγμα τραπεζοειδής συνάρτησης συμμετοχής (x; 20, 40, 60, 80)

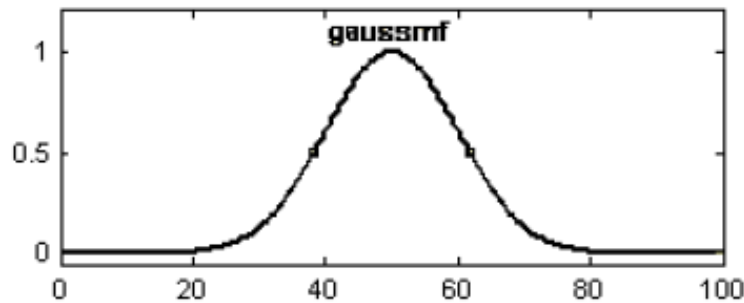
- Η **καμπανοειδής συνάρτηση συμμετοχής** (*generalize bell mf* ή *gbell mf*) χαρακτηρίζεται από τις τρεις παραμέτρους {a, b, c}, ως εξής:



Σχήμα 3.8: Παράδειγμα καμπανοειδής συνάρτησης συμμετοχής (x; 20, 4, 50)

- Η **γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής** (*gaussian mf*) χαρακτηρίζεται από τις δύο παραμέτρους {σ, c}, όπου το σ καθορίζει το πλάτος της συνάρτησης συμμετοχής (mf) και το c αναπαριστά το κέντρο της mf :

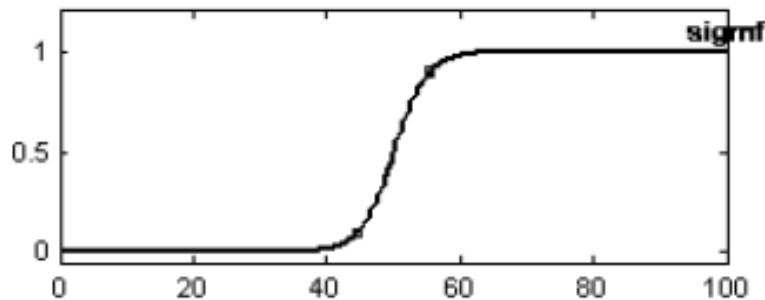
$$\text{gaussian}(x; \sigma, c) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}$$



Σχήμα 3.9: Παράδειγμα γκαουσιανής συνάρτησης συμμετοχής ($x; 10, 50$)

- Η **σιγμοειδή συνάρτηση συμμετοχής** (*sigmoidal mf*) χαρακτηρίζεται από τις δύο παραμέτρους $\{a, c\}$, ως εξής:

$$\text{sigmoid}(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$



Σχήμα 3.10: Παράδειγμα σιγμοειδής συνάρτησης συμμετοχής ($x; 0.4, 50$)

3.1.5 Πράξεις Ασαφών Συνόλων

Στα ασαφή σύνολα ορίζονται μεταξύ τους ορισμένες πράξεις όπως η ένωση (union), η τομή (intersection), το γινόμενο (product), το αλγεβρικό άθροισμα (probor) και το συμπλήρωμα (complement) ενός ασαφούς συνόλου. [21]

- Η **ένωση** (*union*) δύο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται ως εξής:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in X$$

- Η **τομή** (*intersection*) δύο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται ως εξής:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in X$$



- Το **γινόμενο** (*product*) δύο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται ως εξής:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad \forall x \in X$$

- Το **αλγεβρικό άθροισμα** (*probor*) δύο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται ως εξής:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad \forall x \in X$$

- Το **συμπλήρωμα** (*complement*) ενός ασαφούς συνόλου ορίζεται ως εξής:

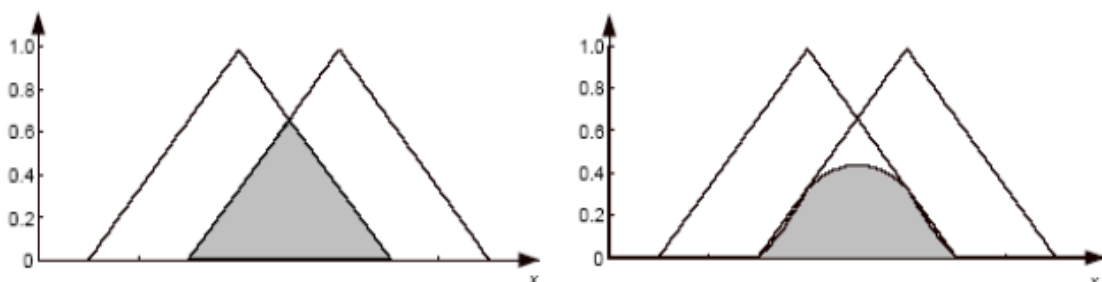
$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X$$

Στη περίπτωση που η συνάρτηση συμμετοχής ενός ασαφούς συνόλου A είναι μικρότερη ή ίση με τη συνάρτηση συμμετοχής ενός ασαφούς συνόλου B , τότε το ασαφές σύνολο A είναι **υποσύνολο** (*subset*) του ασαφούς συνόλου B :

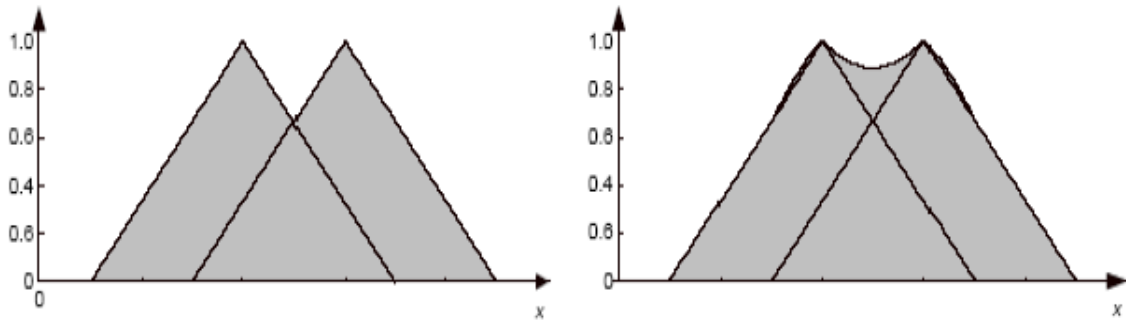
$$(A \subseteq B) \text{ αν } \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in X$$

Ισότητα (*identical*) ασαφή σύνολα είναι δύο ασαφή σύνολα A και B όταν οι συναρτήσεις συμμετοχής τους σε όλα τα σημεία είναι όμοιες:

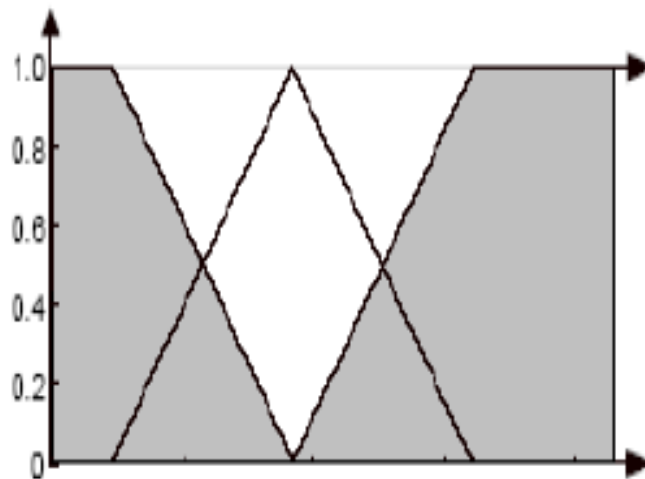
$$A = B \text{ αν } \mu_A(x) \equiv \mu_B(x) \quad \forall x \in X$$



Σχήμα 3.11: Minimum (αριστερά) και Product (δεξιά) δύο ασαφή συνόλων



Σχήμα 3.12: Maximum (αριστερά) δύο ασαφή συνόλων και Probabilistic sum(δεξιά) δύο ασαφή συνόλων



Σχήμα 3.13: Complement ενός ασαφούς συνόλου

3.1.6 Λεκτικοί Τροποποιητές ή Φράκτες

Τα ασαφή σύνολα εκφράζουν ασαφή έννοιες που χρησιμοποιούνται στη φυσική γλώσσα του ανθρώπου καθημερινά, όπως για παράδειγμα οι λεκτικοί όροι “κοντός”, “μέτριος” και “ψηλός”. Οι ασαφείς αυτές έννοιες έχουν τη δυνατότητα να παράγουν άλλες ασαφείς έννοιες με την χρήση *λεκτικών τροποποιητών ή φρακτών (linguistic modifiers or linguistic hedges)*, όπως "πολύ" (very), "πάρα πολύ" (very very), "ελαφρά" (slightly), "σχεδόν" (rather), "επιπλέον" (plus) και "λιγότερο" (minus). Για παράδειγμα ο παραπάνω λεκτικός όρος “ψηλός” με χρήση λεκτικών τροποποιητών παράγει ασαφείς έννοιες όπως "πολύ ψηλός" (very tall), "πολύ πολύ ψηλός" (very very tall), "ελαφρώς ψηλός" (slightly tall) κτλ. [21]



Αν "A" ένας λεκτικός όρος και $\mu_A(x)$ η συνάρτηση συμμετοχής του, τότε σύμφωνα με τα παραπάνω οι τροποποιημένοι όροι του που θα παραχθούν, θα έχουν τις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής :

- "Very A": $\mu_{\text{very}A}(x) = \mu_A^2(x)$
- "Very Very A": $\mu_{\text{veryvery}A}(x) = \mu_A^4(x)$
- "Plus A": $\mu_{\text{plus}A}(x) = \mu_A^{1.25}(x)$
- "Minus A": $\mu_{\text{minus}A}(x) = \mu_A^{0.75}(x)$
- "Slightly A": $\mu_{\text{slightly}A}(x) = \sqrt{\mu_A(x)}$

3.1.7 Ασαφείς Κανόνες

Ένας ασαφής κανόνας (if-then rule) είναι στην πιο απλή μορφή του:

"If x is A then y is B"

όπου το τμήμα «If x is A» είναι το τμήμα υπόθεσης (premise part) και το τμήμα «then y is B» είναι το τμήμα απόφασης ή συμπεράσματος (consequent part).

Οι ασαφείς κανόνες είναι υποθετικές προτάσεις και αποτελούν κύρια δομικά στοιχεία συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων. Για την κατανόηση του αρκεί να ερμηνευτούν τα στοιχεία του παραπάνω κανόνα:

- A, B είναι τα ασαφή σύνολα που συνδυάζονται μεταξύ τους,
- x είναι η τιμή μιας μεταβλητής εισόδου η οποία παίρνει ένα βαθμό συμμετοχής στο ασαφές σύνολο A (διαδικασία της ασαφοποίησης "fuzzification"),
- y είναι η έξοδος του συστήματος η οποία εξάγεται από μηχανισμό συμπεράσματος (inference engine) σε ασαφή μορφή και δηλώνει την απόφαση του κανόνα.



Το ασαφές συμπέρασμα μετά από-ασαφοποιείται με τον μηχανισμό της αποσαφοποίησης (defuzzification) έτσι ώστε τελικά να προκύψει μία σαφής τιμή. Σε περίπτωση περισσότερων της μίας εισόδου $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ οι κανόνες έχουν την εξής μορφή:

If x_1 is A_1 and x_2 is A_2 and.... x_n is A_n then y is B

Ακολούθως μπορούν να υπάρχουν και παραπάνω από μία έξοδοι. [21]

3.1.8 Συστήματα Ασαφούς Λογικής

Τα Συστήματα Ασαφούς Λογικής διαφέρουν ανάλογα με τις μορφές που μπορεί να πάρει ένας κανόνας. Οι γνωστότερες από αυτές τις μορφές είναι:

- **Τύπου Mamdani:** είναι η μορφή που αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή "*If x is A then y is B* ", και ονομάστηκε έτσι προς τιμή του Ebrahim Mamdani, που ήταν ένας από τους πρώτους που εφάρμοσε την Ασαφή Λογική. Οι έξοδοι των κανόνων της μορφής αυτής είναι ασαφή σύνολα.
- **Τύπου Sugeno – Takagi:** είναι ένας κανόνας της μορφής "*If x is A then y is c* ", όπου το c είναι αριθμός ή και ένα crisp ασαφές σύνολο.
- **Τύπου Takagi - Sugeno – Kang ή T-S-K:** είναι μία επέκταση του προηγούμενου κανόνα και αποτελεί έναν από τους κυριότερους τύπους ασαφούς κανόνα ο οποίος χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές ανάπτυξης ασαφών συστημάτων. Έχει τη μορφή "*If x is A then y is $c_0 + c_1 x$* ", όπου $c_0, c_1 \in R$. Οι έξοδοι των κανόνων της μορφής αυτής είναι συναρτήσεις των εισόδων. [21]

3.1.9 Το Ασαφές Μοντέλο Mamdani

Το **ασαφές μοντέλο Mamdani** προτάθηκε σαν μία πρώτη προσπάθεια ελέγχου ενός συστήματος -συγκεκριμένα ενός συνδυασμού μία ατμομηχανής και ενός λέβητα- από ένα σύνολο ασαφών κανόνων (fuzzy if-then rules) . [21]

Η διαδικασία του ασαφούς συμπερασμού του μοντέλου Mamdani αρχικά εκτελείται με την **ασαφοποίηση** των τιμών των εισόδων (fuzzyfication), την **εκτίμηση των κανόνων** (rule evaluation), την **συνάθροιση** (aggregation) **των συμπερασμάτων των εξόδων** και τέλος την **από-ασαφοποίηση** τους (defuzzification). Τα βήματα της διαδικασίας αυτής είναι τα εξής :

1ο βήμα: Στη διαδικασία της **ασαφοποίησης** καθορίζεται ο βαθμός κατά τον οποίο οι τιμές των εισόδων ανήκουν στο καθένα από τα ασαφή σύνολα.



2ο βήμα: Έπειτα αφού οι είσοδοι ασαφοποιηθούν, εφαρμόζονται στα υποθετικά μέρη (antecedents) των κανόνων. Αν ένας κανόνας έχει πολλές υποθέσεις, τότε μέσω των τελεστών AND ή OR δίνεται ένα αριθμός που αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα της εκτίμησης του μέρους της υπόθεσης.

Αν χρησιμοποιηθεί ο τελεστής **AND** τότε υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

α) αν ο AND χρησιμοποιείται ως **min** (τελεστής ελαχίστου **Mamdani**) τότε δίνεται ο μικρότερος αριθμός που εκφράζει την εκτίμηση του κανόνα

β) αν χρησιμοποιείται ως **prod** (τελεστής γινομένου **Larsen**) τότε δίνεται ένας αριθμός που εκφράζει το γινόμενο της εκτίμησης του κανόνα.

Επιπρόσθετα, αν χρησιμοποιηθεί ο τελεστής **OR** τότε υπάρχουν δύο περιπτώσεις:

α) αν ο OR χρησιμοποιείται ως **max** (τελεστής μεγίστου **Mamdani**) τότε δίνεται ο μεγαλύτερος αριθμός της αποτίμησης του κανόνα

β) αν χρησιμοποιείται ως **probor** τότε δίνεται ένας αριθμός που εκφράζει το αλγεβρικό άθροισμα της εκτίμησης του κανόνα.

Ο αριθμός αυτός εφαρμόζεται στη συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος (consequent) και η συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος παρουσιάζεται είτε με ευθεία αποκοπή (clipping) είτε με διαβαθμισμένη αποκοπή (scaling) στο επίπεδο της τιμής της υπόθεσης του κανόνα. Όταν η συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος παρουσιάζεται με ευθεία αποκοπή τότε η μέθοδος ονομάζεται **Συσχέτιση Ελαχίστου (Correlation Minimum)** ενώ η μέθοδος που παρουσιάζεται με διαβαθμισμένη αποκοπή ονομάζεται **Συσχέτιση Γινομένου (Correlation Product)**.

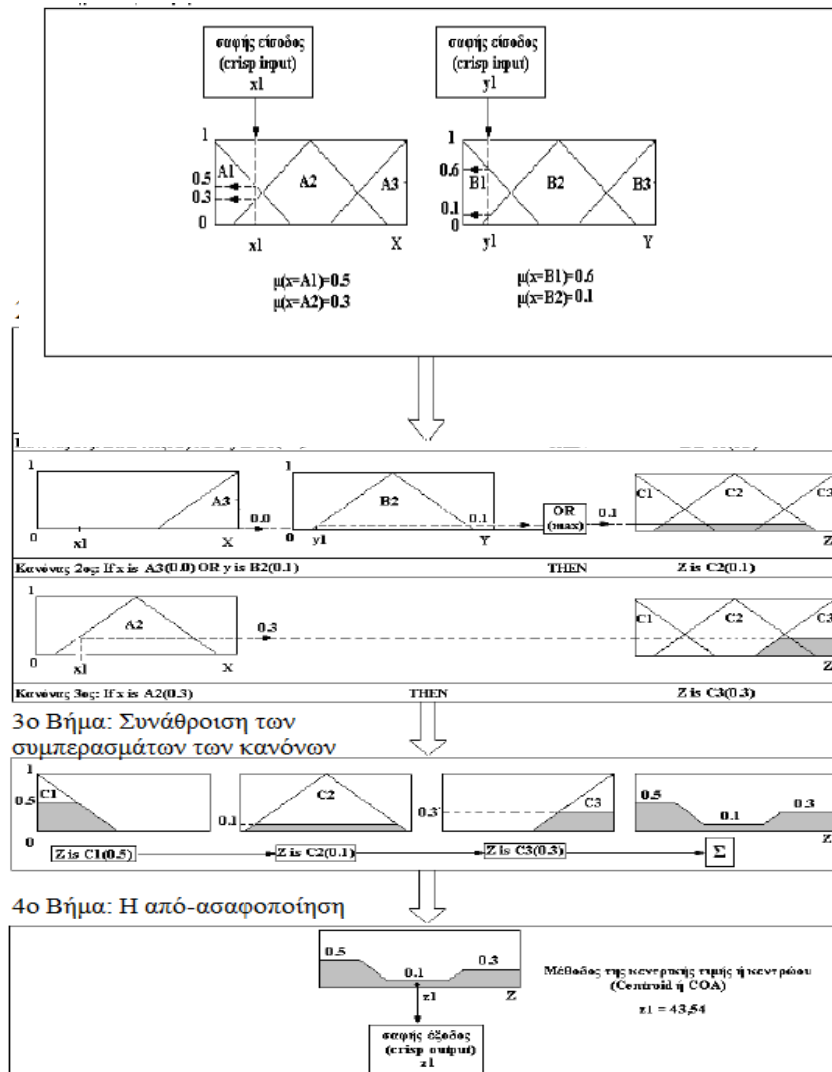
Η μέθοδος της Συσχέτισης Ελαχίστου επιλέγεται για την απλότητα και τους ταχείς μαθηματικούς της υπολογισμούς, παρόλο που συχνά παρουσιάζει απώλεια πληροφορίας λόγω του ότι αποκόπτονται τα πάνω μέρη των συναρτήσεων συμμετοχής. Αντίθετα, η μέθοδος της Συσχέτισης Γινομένου διατηρεί καλύτερα το σχήμα του ασαφούς συνόλου και έχει σαν αποτέλεσμα τη μικρότερη απώλεια πληροφορίας, καθώς η συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος του κανόνα προσαρμόζεται στον πολλαπλασιασμό των βαθμών συμμετοχής της τιμής των υποθέσεων του κανόνα.

3ο βήμα: Σε αυτό το σημείο τα συμπεράσματα όλων των κανόνων συναθροίζονται. **Συνάθροιση (Aggregation)** ονομάζεται η διαδικασία της συνένωσης των συμπερασμάτων όλων των κανόνων. Συγκεκριμένα οι συναρτήσεις συμμετοχής των συμπερασμάτων συνδυάζονται σε ένα ασαφή σύνολο.

4ο βήμα: Η **από-ασαφοποίηση** είναι η διαδικασία μετατροπής του ασαφούς συνόλου σε μία crisp τιμή. Υπάρχουν όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους πολλές μέθοδοι από-ασαφοποίησης όπως είναι η COA, MOM, SOM, LOM κτλ. [21]

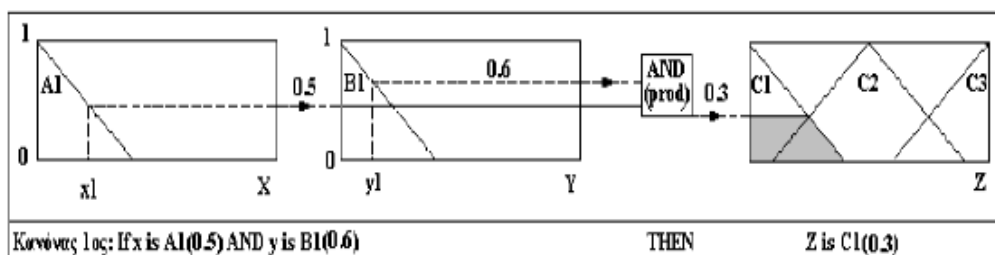


1^ο Βήμα: Αποσαφοποίηση Εισόδων



Σχήμα 3.14: Βασική δομή του Mamdani ασαφή συμπερασμού

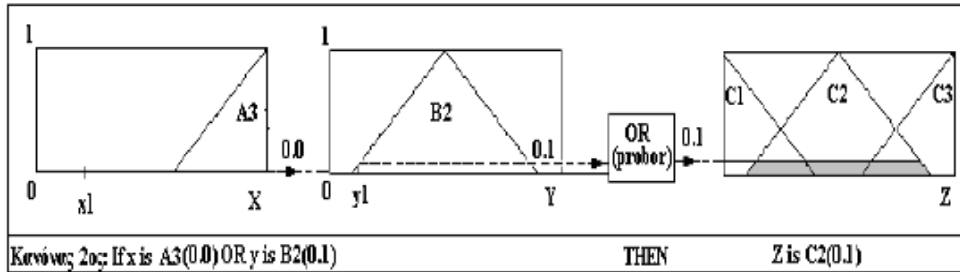
Ο κανόνας 1 μπορεί αν χρησιμοποιηθεί το AND (prod) να αναπαρασταθεί ως εξής:



Σχήμα 3.15: Ο τελεστής AND product στον ασαφή συμπερασμό



Ο κανόνας 2 μπορεί αν χρησιμοποιηθεί το OR (probor) να αναπαρασταθεί ως εξής:



Σχήμα 3.16: Ο τελεστής OR probor στον ασαφή συμπερασμό

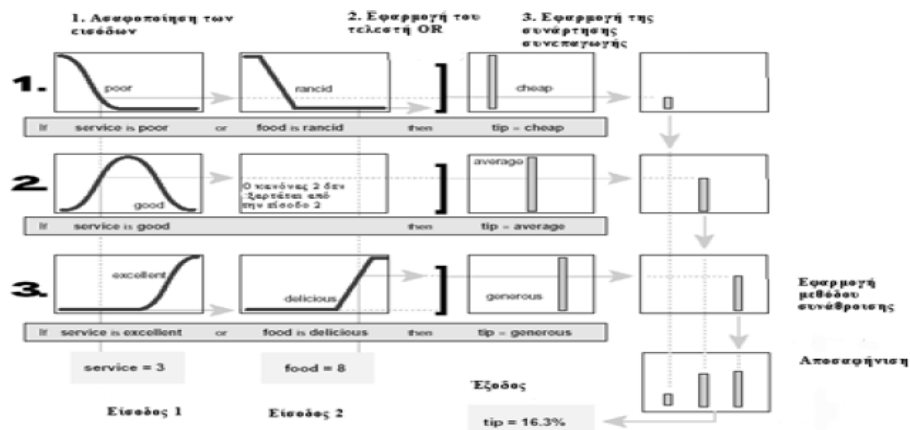
3.1.10 Συστήματα τύπου Sugeno

Προηγουμένως ασχοληθήκαμε με τα συστήματα Mamdani που είναι περισσότερο χρησιμοποιούμενα. Όμως υπάρχει και η μέθοδος Sugeno η οποία εισήχθηκε το 1985 και έχει αρκετές ομοιότητες με τη μέθοδο των συστημάτων Mamdani. Τα 2 πρώτα βήματά της για παράδειγμα (ασαφοποίηση των εισόδων και εφαρμογή των τελεστών) είναι ακριβώς τα ίδια. Η βασική διαφορά ανάμεσα στα δύο συστήματα εντοπίζεται στο ότι οι συναρτήσεις συμμετοχής στην έξοδο των συστημάτων Sugeno είναι μόνο γραμμικές ή σταθερές συναρτήσεις. [21]

Ένας τυπικός ασαφής κανόνας σε συστήματα sugeno μηδενικής τάξης έχει την μορφή:

$$\text{if } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = k$$

όπου A και B είναι τα ασαφή σύνολα της προϋπόθεσης ενώ k είναι μια αριθμητική τιμή. Εφόσον το αποτέλεσμα του κανόνα είναι μια σταθερά τότε αυτό σημαίνει ότι το βήμα 3 εκφυλίζεται σε ένα απλό πολλαπλασιασμό ενώ το βήμα 4 καταλήγει να είναι η συγκέντρωση όλων των σταθερών. [21]



Σχήμα 3.17: Ένα σύστημα sugeno



Ένα σύστημα sugeno πρώτης τάξης θα έχει κανόνες με τη γενική μορφή

$$\text{if } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = p*x + q*y + r$$

όπου A και B είναι τα ασαφή σύνολα της προϋπόθεσης ενώ τα p,q,r είναι σταθερές. Για να δούμε τα συστήματα πρώτης τάξης ένας τρόπος είναι να θεωρήσουμε ότι κάθε κανόνας προσδιορίζει τη θέση ενός κινούμενου singleton. Το singleton αυτό είναι σε θέση να κινείται στο χώρο της εξόδου, με γραμμικό τρόπο και η θέση του εξαρτάται από τις τιμές των εισόδων.

Επίσης μπορούν να επιτευχθούν συστήματα sugeno ανώτερης, ωστόσο δεν προσφέρουν σημαντικές βελτιώσεις ενώ ταυτόχρονα δημιουργούν σημαντική πολυπλοκότητα.

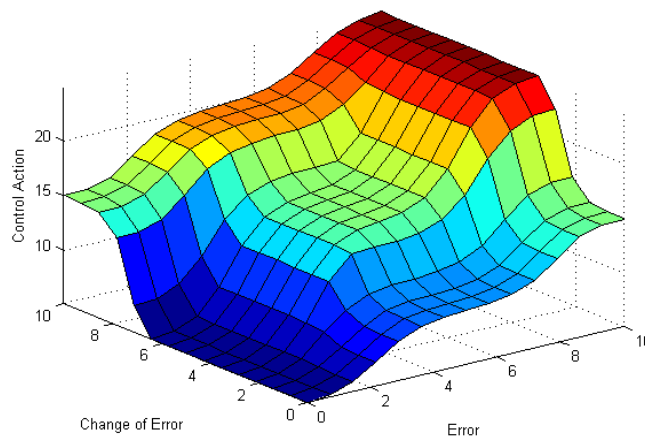
Στη συλλογιστική μέθοδο Takagi-Sugeno ή αλλιώς «συναρτησιακή συλλογιστική» (*functional reasoning*) το συμπέρασμα των κανόνων δίνεται με τη μορφή γραμμικών συναρτήσεων. Αυτή είναι και η κύρια διαφορά με τη μέθοδο του Mamdani που αναφέρθηκε. Το μοντέλο Takagi-Sugeno έχει αποδειχθεί ότι έχει την ικανότητα να προσεγγίσει οποιαδήποτε συνάρτηση με κάθε βαθμό ακρίβειας.

3.1.11 Συνοψίζοντας για τις μεθόδους Mamdani και Takagi-Sugeno

- Η μέθοδος Mamdani είναι αποδεκτή ευρέως για τη σύλληψη έμπειρης γνώσης και επιτυγχάνει την περιγραφή της με έναν τρόπο πιο κοντά στον ανθρώπινο (human-like). Παρόλα αυτά είναι αρκετά πολύπλοκη μέθοδος.
- Η συλλογιστική Takagi-Sugeno είναι απλή και οδηγεί σε γρήγορους υπολογισμούς. Επίσης είναι εφαρμόζεται εύκολα και αποδίδει ικανοποιητικά σε τεχνικές βελτιστοποίησης και προσαρμογής. Τα στοιχεία αυτά την καθιστούν κατάλληλη για δυναμικά μη γραμμικά προβλήματα ελέγχου. [21]

3.1.12 Lookup Table Fuzzy PID Controller

Ένα σύστημα ασαφούς συμπερασμού (FIS) χαρτογραφεί δεδομένες εισόδους στις εξόδους χρησιμοποιώντας ασαφή λογική. Για παράδειγμα, μια τυπική αντιστοίχιση ενός ασαφούς ελεγκτή δύο εισόδων μπορεί να απεικονιστεί σε μια απεικόνιση 3-D. Το γράφημα αναφέρεται συχνά ως το γράφημα επιφάνειας ελέγχου όπως αυτό που φαίνεται παρακάτω. [22]



Σχήμα 3.18: Γράφημα Επιφάνειας Ελέγχου

Οι τυπικές εισοδοί FIS είναι τα σήματα σφάλματος ($e(k)$) και η αλλαγή σφάλματος ($e(k) - e(k-1)$). Η έξοδος FIS είναι η ενέργεια ελέγχου που συνάγεται από τους ασαφείς κανόνες. Το Fuzzy Logic Toolbox™ παρέχει εντολές και εργαλεία GUI για τον σχεδιασμό ενός FIS για μια επιθυμητή επιφάνεια ελέγχου. Το σχεδιασμένο FIS μπορεί στη συνέχεια να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας το μπλοκ Fuzzy Logic Controller στο Simulink

Οι μη γραμμικές επιφάνειες ελέγχου μπορούν συχνά να προσεγγιστούν με Lookup Tables για την απλοποίηση του παραγόμενου κώδικα και τη βελτίωση της ταχύτητας εκτέλεσης. Για παράδειγμα, ένα μπλοκ Fuzzy Logic Controller στο Simulink μπορεί να αντικατασταθεί από ένα σύνολο Lookup Tables, έναν πίνακα δηλαδή, για κάθε έξοδο που ορίζεται στο FIS. Το Fuzzy Logic Toolbox παρέχει εντολή όπως το evalfis για τον υπολογισμό των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στα Lookup Tables.

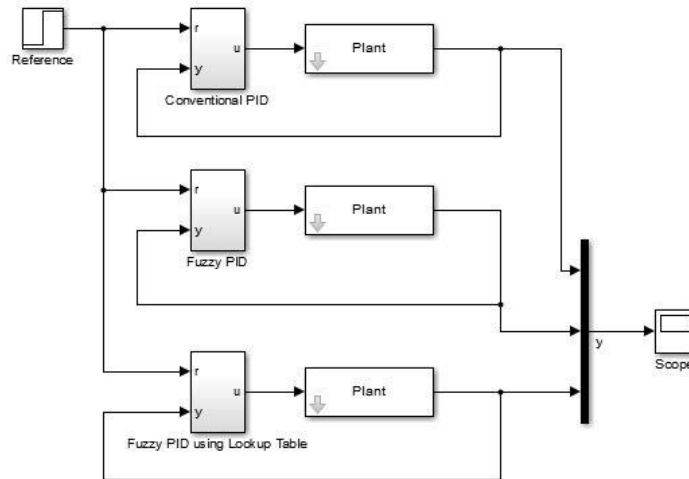
Σχεδιάστηκε ένας μη γραμμικός ελεγκτής PID για ένα plant στο Simulink. Το plant είναι ένα ενιαίο σύστημα εισόδου με ενιαία έξοδο σε διακριτό χρόνο και ο στόχος είναι η επίτευξη καλών επιδόσεων παρακολούθησης αναφοράς. [22]

Ο ασαφής ελεγκτής στην συγκεκριμένη περίπτωση, βρίσκεται στον βρόχο ανατροφοδότησης και υπολογίζει τις πράξεις που μοιάζουν με PID μέσω ασαφούς συμπερασμού. Η δομή του βρόχου εμφανίζεται ως εξής :



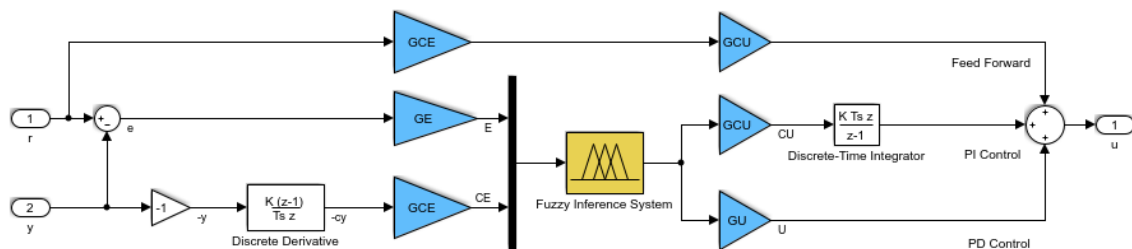
Using Lookup Table to Implement a Fuzzy PID Controller

Copyright (c) 2002-2011 The MathWorks, Inc.



Σχήμα 3.19: Δομή Ασαφούς Ελεγκτή PID

Ο ασαφής ελεγκτής PID χρησιμοποιεί μια παράλληλη δομή όπως φαίνεται παρακάτω. Είναι ένας συνδυασμός ασαφούς ελέγχου PI και ασαφούς ελέγχου PD.

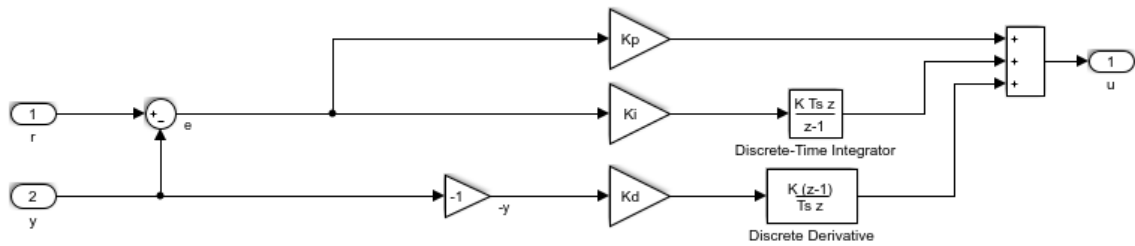


Σχήμα 3.20: Εσωτερική Δομή Ασαφούς Ελεγκτή PID

Χρησιμοποιείται η αλλαγή μέτρησης $-(y(k) - y(k-1))$, αντί η αλλαγή του σφάλματος $e(k) - e(k-1)$. Σε σήμα αναφοράς από την άμεση ενεργοποίηση της παράγωγης ενέργειας. Οι δύο μονάδες κέρδους, GCE και GCU χρησιμοποιούνται στη διαδρομή προώθησης από r προς u , για να εξασφαλίσουν ότι το σήμα σφάλματος e χρησιμοποιείται σε αναλογική δράση όταν ο ασαφής ελεγκτής PID είναι γραμμικός.

Ο σχεδιασμός ενός ασαφούς ελεγκτή PID περιλαμβάνει τη διαμόρφωση του συστήματος ασαφούς συμπερασμού και τον καθορισμό των τεσσάρων παραγόντων κλιμάκωσης: GE, GCE, GCU και GU. [22]

Ο συμβατικός ελεγκτής PID είναι ένας ελεγκτής PID διακριτού χρόνου με την μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης του Euler που χρησιμοποιείται τόσο στην ολοκληρωμένη όσο και στην παραγώμενη ενέργεια. Τα κέρδη του ελεγκτή είναι K_p , K_i και K_d . Ο ελεγκτής υλοποιείται στο Simulink ως εξής:



Σχήμα 3.21: Συμβατικός Ελεγκτής PID

Παρόμοια με τον ασαφή ελεγκτή PID, το σήμα εισόδου στην παράγωγη ενέργεια είναι $-y(k)$, αντί για $e(k)$. Τα κέρδη του ελεγκτή PID μπορούν να συντονιστούν είτε χειροκίνητα είτε με τη χρήση τύπων συντονισμού. Με χρήση της εντολής `pidtune` από το Control System Toolbox™ δημιουργείται ένα αρχικό σχέδιο PID. Με τη διαμόρφωση του FIS και την επιλογή τεσσάρων συντελεστών κλιμάκωσης, αποκτάται ένας γραμμικός ασαφής έλεγχος PID που αναπαράγει την ακριβή απόδοση ελέγχου, όπως κάνει ο συμβατικός ελεγκτής PID. [22]

Η κατασκευή του συστήματος ασαφούς εξαγωγής συμπερασμάτων είναι η εξής:

```
FIS =  
newfis('FIS', 'FISType', 'mamdani', 'AndMethod', 'prod', 'OrMethod', 'probor', ...  
      'ImplicationMethod', 'prod', 'AggregationMethod', 'sum');
```

Ορισμός εισόδου E:

```
FIS = addvar(FIS, 'input', 'E', [-10 10]);  
FIS = addmf(FIS, 'input', 1, 'Negative', 'trimf', [-20 -10 0]);  
FIS = addmf(FIS, 'input', 1, 'Zero', 'trimf', [-10 0 10]);  
FIS = addmf(FIS, 'input', 1, 'Positive', 'trimf', [0 10 20]);
```

Ορισμός εισόδου CE:

```
FIS = addvar(FIS, 'input', 'CE', [-10 10]);  
FIS = addmf(FIS, 'input', 2, 'Negative', 'trimf', [-20 -10 0]);  
FIS = addmf(FIS, 'input', 2, 'Zero', 'trimf', [-10 0 10]);  
FIS = addmf(FIS, 'input', 2, 'Positive', 'trimf', [0 10 20]);
```

Ορισμός εξόδου u:

```
FIS = addvar(FIS, 'output', 'u', [-20 20]);  
FIS = addmf(FIS, 'output', 1, 'LargeNegative', 'trimf', [-20 -20 -20]);  
FIS = addmf(FIS, 'output', 1, 'SmallNegative', 'trimf', [-10 -10 -10]);  
FIS = addmf(FIS, 'output', 1, 'Zero', 'trimf', [0 0 0]);  
FIS = addmf(FIS, 'output', 1, 'SmallPositive', 'trimf', [10 10 10]);  
FIS = addmf(FIS, 'output', 1, 'LargePositive', 'trimf', [20 20 20]);
```

Ορισμός κανόνων:

1. EAN E είναι Αρνητικό ΚΑΙ CE είναι Αρνητικό ΤΟΤΕ u είναι -20
2. EAN E είναι Αρνητικό ΚΑΙ CE είναι Μηδέν ΤΟΤΕ u είναι -10
3. EAN E είναι Αρνητικό ΚΑΙ CE είναι Θετικό ΤΟΤΕ u είναι 0



4. EAN Ε είναι Μηδέν ΚΑΙ CE είναι Αρνητικό ΤΟΤΕ u είναι -10
5. EAN Ε είναι Μηδέν ΚΑΙ CE είναι Μηδέν ΤΟΤΕ u είναι 0
6. EAN Ε είναι Μηδέν ΚΑΙ CE είναι Θετικό ΤΟΤΕ u είναι 10
7. EAN Ε είναι Θετικό ΚΑΙ CE είναι Αρνητικό ΤΟΤΕ u είναι 0
8. EAN Ε είναι Θετικό ΚΑΙ CE είναι Μηδέν ΤΟΤΕ u είναι 10
9. EAN Ε είναι Θετικό ΚΑΙ CE είναι Θετικό ΤΟΤΕ u είναι 20

```
ruleList = [1 1 1 1 1;... % Rule 1
            1 2 2 1 1;... % Rule 2
            1 3 3 1 1;... % Rule 3
            2 1 2 1 1;... % Rule 4
            2 2 3 1 1;... % Rule 5
            2 3 4 1 1;... % Rule 6
            3 1 3 1 1;... % Rule 7
            3 2 4 1 1;... % Rule 8
            3 3 5 1 1]; % Rule 9
```

```
FIS = addrule(FIS,ruleList);
```

```
[22]
```

Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι συντελεστές GE, GCE, GCU και GU από τα κέρδη K_p , K_i , K_d που χρησιμοποιούνται από τον συμβατικό ελεγκτή PID. Συγκρίνοντας τις εκφράσεις του παραδοσιακού PID και του γραμμικού ασαφούς PID, οι μεταβλητές σχετίζονται ως εξής:

- $K_p = GCU * GCE + GU * GE$
- $K_i = GCU * GE$
- $K_d = GU * GCE$

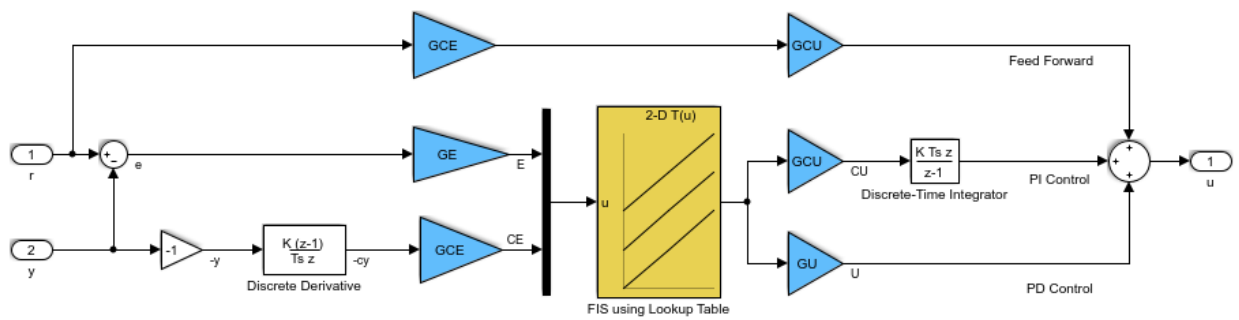
Το μέγιστο βήμα αναφοράς είναι 1, με το μέγιστο σφάλμα e να είναι 1. Δεδομένου ότι η περιοχή εισόδου του E είναι [-10 10], καθορίζεται πρώτα το GE στα 10. Οι GCE, GCU και GU στη συνέχεια λύνονται από τις παραπάνω εξισώσεις. [22]

- $GE = 10;$
- $GCE = GE * (K_p - \sqrt{K_p^2 - 4 * K_i * K_d}) / 2 / K_i;$
- $GCU = K_i / GE;$
- $GU = K_d / GCE;$

Για την εφαρμογή του συστήματος το μπλοκ ασαφούς ελεγκτή έχει δύο εισόδους (E και CE) και μία έξοδο (u) που μπορεί να αντικατασταθεί από έναν 2-D lookup table. Ο lookup table 2-D για το FIS δημιουργείται με τη δημιουργία βρόχου μέσα από το σύμπλεγμα εισόδου και τον υπολογισμό της εξόδου με την εντολή evalfis. [22]



```
Step = 10; % use 3 break points for both E and CE inputs
E = -10:Step:10;
CE = -10:Step:10;
N = length(E);
LookUpTableData = zeros(N);
for i=1:N
    for j=1:N
        % compute output u for each combination of break points
        LookUpTableData(i,j) = evalfis([E(i) CE(j)],FIS);
    end
end
end
```



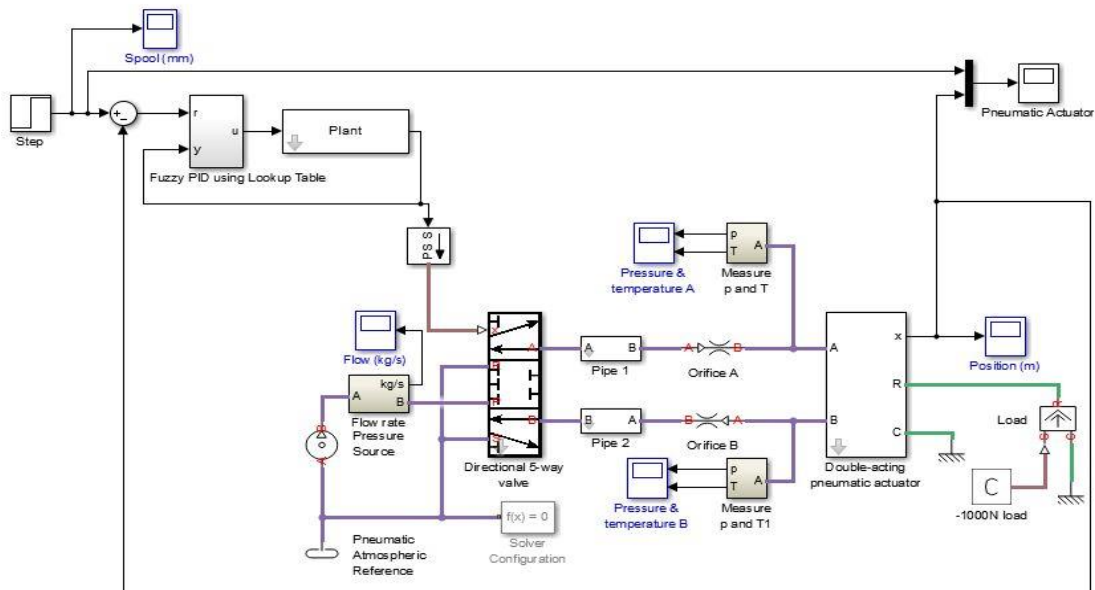
Σχήμα 3.22: Ο ασαφής ελεγκτής PID που χρησιμοποιεί 2-D Lookup Table

Όταν η επιφάνεια ελέγχου είναι γραμμική όπως ήδη σχεδιάστηκε παραπάνω, ο ασαφής ελεγκτής PID χρησιμοποιώντας τον 2-D lookup table πρέπει να παράγει ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα με αυτό που χρησιμοποιεί το block fuzzy logic controller.

Στο μοντέλο Simulink, χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά υποσυστήματα, δηλαδή το συμβατικό PID, το Fuzzy PID και το Fuzzy PID χρησιμοποιώντας Lookup Table, για τον έλεγχο της ίδιας μονάδας. Οι αποκρίσεις κλειστού βρόχου σε μια αλλαγή αναφοράς βημάτων εμφανίζονται στο πεδίο εφαρμογής και είναι ακριβώς ίδιες (τρεις καμπύλες απόκρισης όπου αλληλεπικαλύπτονται). [22]

3.2 Εφαρμογή Lookup table για Ελεγκτή Fuzzy και συσχέτιση με τον ελεγκτή PID

Με εφαρμογή του PID ,χρησιμοποιώντας Lookup Table, υλοποιήθηκε το παρακάτω σύστημα.

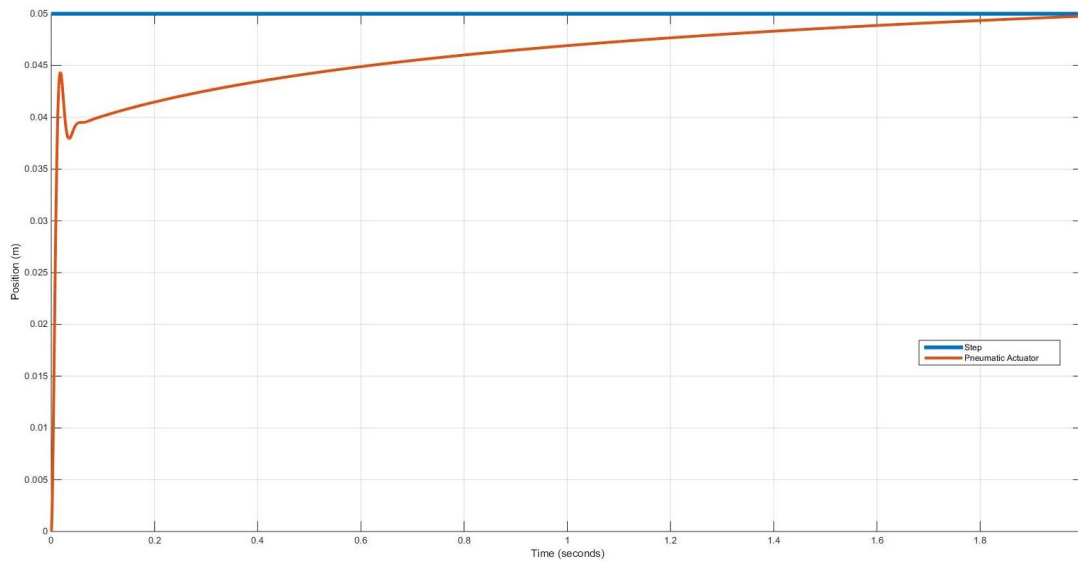


Σχήμα 3.23: Πνευματικό Σύστημα με ελεγκτή PID χρησιμοποιώντας Lookup Table

Θέτοντας σε λειτουργία το `sllookuptable`, με χρόνο προσομοίωσης 12 sec, και εφαρμόζοντας τον ελεγκτή PID με χρήση Lookup Table στο πνευματικό σύστημα με χρόνο προσομοίωσης 2 sec τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

Name	Value
C	1x1 pid
C0	1x1 pid
CE	1x21 double
E	1x21 double
FIS	1x1 struct
GCE	3.4285
GCU	2.8631
GE	10
GU	2.0138
i	21
j	21
Kd	6.9041
Ki	28.6308
Kp	29.9537
LookupTableData	21x21 double
N	21
Plant	1x1 zpk
ruleList	4x5 double
ScopeData4	1x1 struct
Step	1
tout	1000x1 double
Ts	0.1000

Σχήμα 3.24: Αποτελέσματα Workspace



Σχήμα 3.25: Γραφική Απεικόνιση συστήματος με ελεγκτή PID χρησιμοποιώντας Lookup Table

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα και Μελλοντική Έρευνα

4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδων ελέγχου

Λαμβάνοντας τα αποτελέσματα των αποκρίσεων του συστήματος, χρησιμοποιώντας ως μεθόδους έλεγχου τον Αναλογικό ελεγκτή, τον Αναλογικό-Ολοκληρωτικό ελεγκτή, τον Αναλογικό-Ολοκληρωτικό-Διαφορικό ελεγκτή, και τον Αναλογικό –Διαφορικό ελεγκτή προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Με τη χρήση του Αναλογικού ελεγκτή (P), το πνευματικό σύστημα δρά γρήγορα και προσφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ωστόσο, ο αναλογικός ελεγκτής δεν θεωρείται ιδανικός για υψηλές απαιτήσεις εφαρμογών, καθώς η απόδοση του υπό την επίδραση του φορτίου δεν προβλέπεται άμεσα. Αυτό έχει ως αντίκτυπο να μην είναι σε θέση να αντιμετωπίσει πιθανές διαταραχές. [17]

Με τη χρήση του Αναλογικού-Ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI) το πνευματικό σύστημα δρά γρήγορα και προσφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ωστόσο ο ολοκληρωτικός ελεγκτής I, ο οποίος ενισχύει τη συνεχή δύναμη που ενεργείται στο πνευματικό έμβολο, προκαλεί την μη σταθεροποίηση του συστήματος και δημιουργεί ταλαντώσεις. Για αυτό το λόγο, ο Αναλογικός-Ολοκληρωτικός ελεγκτής δεν θεωρείται κατάλληλος, για το συγκεκριμένο πείραμα. [17],[18],[19],[20]

Με τη χρήση του Αναλογικού-Ολοκληρωτικού-Διαφορικού ελεγκτή (PID) το πνευματικό σύστημα δρά άμεσα και προσφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Χάρη στον ολοκληρωτικό ελεγκτή I, ο οποίος ενισχύει τη συνεχή δύναμη που ενεργείται στο



πνευματικό έμβολο, αυτό προκαλλεί την μη σταθεροποίηση του συστήματος και δημιουργεί ταλαντώσεις. Παρόλο που ο διαφορικός ελεγκτής μειώνει την υπερύψωση, στο σύνολό του ο αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής δεν είναι ιδανικός για μη γραμμικά συστήματα. [17],[18],[19],[20]

Με τη χρήση του Αναλογικού-Διαφορικού ελεγκτή (PD), το πνευματικό σύστημα δρά άμεσα, και διαθέτει υψηλή ακρίβεια θέσης. Προσφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα, χωρίς να δημιουργείται υπερύψωση. Έρευνες έχουν αποδείξει ότι ο αναλογικός-διαφορικός ελεγκτής προσφέρει την καλύτερη απόδοση σε μη γραμμικά συστήματα. [17],[18],[19],[20],

Με τη χρήση του Lookup table για την εφαρμογή του Ελεγκτή Fuzzy, επιτεύχθηκε το επιθυμητό αποτέλεσμα, ωστόσο το πνευματικό σύστημα είχε πιο απότομη συμπεριφορά, και έφτασε την επιθυμητή τιμή πιο αργά σε σχέση με τις παραπάνω μεθόδους ελέγχου.

Συνοψίζοντας, διαπιστώθηκε ότι ο Αναλογικός-Διαφορικός ελεγκτής (PD) προσφέρει την βέλτιστη απόδοση στο μη γραμμικό σύστημα της συγκεκριμένης μελέτης, και θεωρείται η πιο επωφελής λύση τόσο σε πρακτικό όσο και σε μαθηματικό επίπεδο μπορεί για τον σωστό έλεγχο θέσης του πνευματικού εμβόλου.

4.2 Μελλοντικές Βελτιστοποιήσεις

Μία πιθανή βελτίωση του συστήματος θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη χρήση ενός Γραμμικού Μεταβλητού Διαφορικού Μετασχηματιστή (Linear Variable Differential Transformer-LVDT). Στην πραγματικότητα είναι ένας αισθητήρας μέτρησης της γραμμικής μετατόπισης. Το εύρος των μετρούμενων μετατοπίσεων ανάλογα με το είδος του LVDT και την εφαρμογή κυμαίνεται από 0,1mm έως 1000mm. Οι γραμμικοί μεταβλητοί διαφορικοί μετασχηματιστές είναι όργανα μεγάλης ακρίβειας και παρουσιάζουν μικρό σφάλμα ($\pm 0.5\%$), επειδή ο πυρήνας τους δεν βρίσκεται σε επαφή με τα πηνία, με αποτέλεσμα να υπάρχει πολύ μικρή μηχανική τριβή και φθορά. Παρ' όλα τα πλεονεκτήματά τους τα LVDT είναι όργανα που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση μικρών μετατοπίσεων, είναι αρκετά ευαίσθητα και επηρεάζονται από τους κραδασμούς και την θερμοκρασία. [23]

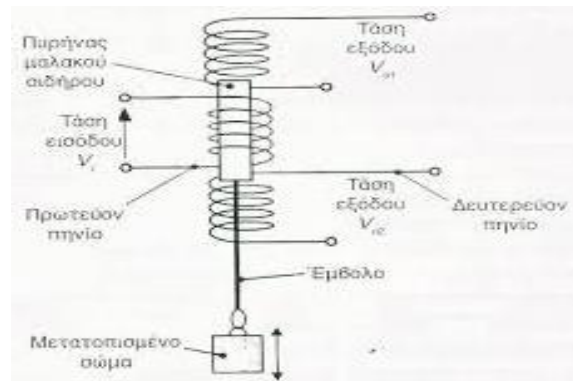


Σχήμα 4.1: Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής

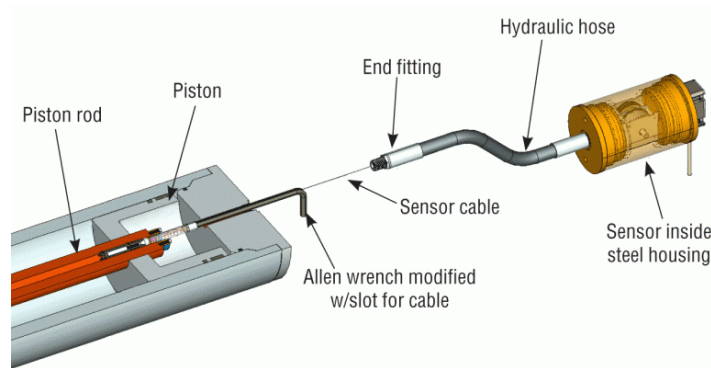
Η διάταξη αποτελείται από τρία πηνία, ένα πρωτεύον και δύο δευτερεύοντα, στο κέντρο του πρωτεύον βρίσκεται ένας πυρήνας από μαλακό μαγνητικό υλικό (μαλακό σίδηρο, άμορφο σύρμα FeSiB κ.α.). Το πρωτεύον τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη



υψηλής συχνότητας τάση και τα δευτερεύοντα συνδέονται σε σειρά και με αντίθετη πολικότητα. Όταν ο μαγνητικός πυρήνας βρίσκεται στο κέντρο, λόγω συμμετρίας οι τάσεις που επάγονται στα δευτερεύοντα πηνία είναι ίσες και αφού συνδέονται αντίθετα, η έξοδος είναι μηδέν. Η μετακίνηση του πυρήνα δημιουργεί ένα σήμα (εναλλασσόμενη τάση) στην έξοδο που το πλάτος του είναι ανάλογο της μετατόπισης και η φάση του δείχνει την κατεύθυνση της κίνησης. [24]



Σχήμα 4.2: Διάταξη LVDT



Σχήμα 4.3: Εσωτερική δομή Αισθητηρίου LVDT

Ο Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής βρίσκει πολλές εφαρμογές στο χώρο της βιομηχανίας εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η χρήση του. Πιο συγκεκριμένα ο LVDT χρησιμοποιείται:

- Για τον έλεγχο της στάθμης νερού σε ένα δοχείο.
- Σε μηχανουργεία.
- Στη ρομποτική.
- Σε συστήματα μέτρησης δύναμης, πίεσης και επιτάχυνσης.
- Για τον έλεγχο της θέσης υδραυλικών και πνευματικών εμβόλων.
- Για τον έλεγχο της κίνησης γερανών [25]



Βιβλιογραφία

- [1] Αυτόματος Έλεγχος Υδραυλικών και Πνευματικών Συστημάτων, Μιχάλης Γ. Σκαρπέτης, Φώτης Ν. Κουμπούλης, Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα 2016.
- [2] Αυτοματισμοί και Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου, Α' τεύχος του τομέα Ηλεκτρολογίας, Λιγνός Ι, Μπουσλής Π, Πολίτης Γ., Χαμηλοθώρης Γ., Αθήνα 2001.
- [3] Επιμορφωτικό υλικό για την εκπαίδευση των επιμορφωτών - Τεύχος 2: Κλάδοι ΠΕ60-70 ΕΑΙΤΥ - Τομέας Επιμόρφωσης και Κατάρτισης (ΤΕΚ).
- [4] ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ SIMULINK, Εργαστήριο Ρύθμισης και Πληροφορικής Σχολή Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- [5] Υδραυλικά-Πνευματικά Συστήματα και Εφαρμογές, Αθανάσιος Τ. Ρούτουλας, Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα 2008.
- [6] 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.
- [7] Esteve Codina, Josep Xercavins, "Flow Rate Characteristics of Pneumatic Fittings", Proceedings of the 45th National Conference on Fluid Power, 1992.
- [8] 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.
- [9] A. Chitty, T. H. Lambert, "Modelling a Loaded Two-Way Pneumatic actuator", Measurement and Control, Vol 9, January, 1976.
- [10] 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.
- [11] Mads Grahl-Madsen, "Computerised Analysis of a Pneumatic Actuator", c11, SIMS'S 96, Trondheim Norway.
- [12] 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.
- [13] http://islab.teipir.gr/web/Downloads/Simeiwseis/pneu_theory2.pdf
- [14] https://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/562/themelism_plc.pdf?sequence=1
- [15] Πτυχιακή εργασία: ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΛΕΚΤΩΝ, Δρόσο Ελευθέριο, Ντουντουλάκη Άρη, Τ.Ε.Ι. Κρήτης- Τμήμα Ηλεκτρονικής, Τομέας Αυτοματισμού
- [16] <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/examples/pneumatic-actuation-circuit.html>
- [17] Astrom K., Häglund T., "PID Controllers Theory, Design and Tuning", Library of Congress Cataloguing-in-Publication Data, 1999.
- [18] 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.
- [19] Yaolong Tan, "Nonlinear Observer/Controller Design and Its Application to Friction Compensation", PhD thesis, University Of California, Los Angeles, 2000.



- [20] 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.
- [21] Πτυχιακή Εργασία : Σχεδίαση ενός θερμοκηπιακού συστήματος θέρμανσης και εξαερισμού με χρήση Ασαφούς ελεγκτή, Σπαγάκος-Λιακάκος Παναγιώτης, Σαμπαθιανάκης Νικόλαος
- [22] <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/examples/using-lookup-table-in-simulink-to-implement-fuzzy-pid-controller.html>
- [23] <http://www.metrolog.net/lvdt.php?lang=en>
- [24] Πτυχιακή εργασία με θέμα: Μέτρηση ταχύτητας με χρήση αισθητήρων, Ζαχαριουδάκης Στέφανος, Τμήμα Ηλεκτρονικής, Τ.Ε.Ι Κρήτης, 2010
- [25] Ενότητα 6: Μέτρηση Κίνησης (μετατόπισης, προσέγγισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης), Μηχανικής Τάσης και Βάρους, Λάμπρος Μπισδούνης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας



Παραρτήματα

Παράρτημα 1 [PAPER]

Comparative Study of Control Methods's Application For Pneumatic System in Simulation Environment

E.Ntimeri,
Piraeus University of Applied
Sciences, Dept. of Automation
Engineering
elenadimery@hotmail.com

Dr. Christos Drosos, Piraeus
University of Applied Science,
Dept. of Automation
Engineering Laboratory
drososx@puas.gr

Prof. D. Tseles
Deputy President
P. Ralli & Thivon 250
12244 Aegaleo, Athens
dtsel@teipir.gr

ABSTRACT

In light of the rapid rates of technology development in our times, there has been a continuous effort to introduce everyday technological advances in order to cover better and easier human needs. Especially in the sector of research and applications, the need for simulation programs was seen as offering security to errors, reduce costs and they are accessible to use by professionals and higher education students. This thesis will present the study of control methods's application for pneumatic system in simulation environment. In addition, it will analyze and describe the operation of the pneumatic system and all the testing methods used in it. The object of the study, which comes with MSc, since it deals with modern automation technology applications, will try to cover questions such as whether these control methods are appropriate and effective for the pneumatic system which is studied, and especially how effective it is the use of a Lookup table to Implement Fuzzy Controller (Fuzzy) with Proportional-Integral-Derivative Controller (PID). For the use of this Lookup table in the pneumatic system of the present study, results have not been extracted to date. These two events are the main purpose of this thesis, in an attempt to perform control of the system on the applications above. The main part of the study will explain the design of the system as well as the type of controllers and the Lookup table. The way of connecting and operating among the pneumatic system, the control methods and the Lookup table, in the simulation environment will be presented in detail, while all this will emerge the conclusions of use specific control methods, the advantages and disadvantages will be discussed and both will be proposed optimizations to further expanding benefits of their operation. As a possible result of using these methods will occur to achieve the optimal and efficient control of the system.

General Terms

Simulation

Keywords

Pneumatic System, Control Methods, Simulink, PID Controller, Lookup Table FuzzyPID Controller

1. INTRODUCTION

Based on the rapid growth of technology, a perpetual effort has been made to bring technological breakthroughs into everyday life so that human needs are met in the best possible way. More specifically, in the field of industry, research and applications, the need for simulation programs was observed, because they are safe for potential errors, minimize costs and are fairly affordable in terms of both professionals and higher education students. This paper will present the study of the application of pneumatic control methods in a simulation environment. In addition, the function of the mental system being studied, as well as all the control methods used in it, will be analyzed and described. The subject of the study will attempt to answer questions such as whether the specific control methods are appropriate and effective for the particular mental system, and most importantly how efficient is the use of a Fuzzy Matching Proportional -Integral-Derivative Controller (PID).

1.1 Controllers

Proportional Controller (P)

A Proportional (P) Controller (Proportional Control) gives the signal output corresponding to the error received at the input. In essence, it is a gain amplification device with KR gain. A Proportional Controller increases the response rate of the system, but it is likely to create a permanent state error depending on the system type, and for zero error it will also have zero output. [15]

Integral Controller (I)

Integral Controller I (Integral Control) gives the output a signal Proportional out to the integrity of the error it receives at the input. Also contains Ki parameter, which has a unit of measurement of 1 sec and is called an integration factor. Each system using the integral controller I, from one system has been converted to another system where the value of the integration coefficient is similar to a physical frequency of the system. As the integration coefficient increases, the physical frequency of the system increases, resulting in a faster response of the system and a decrease in the depreciation factor. [15]



Derivative Controller (D)

Derivative Control D (Derivative Control) when at the input of the error signal is in the form of step excitation, the output of the controller is the impulse function with a theoretically infinite width for $t = 0$. If the error is stable then the output of the Derivative controller is zero. The Derivative Controller limits the error to the permanent state at the stage of the transient response of the systems, but in practice it is never used by itself. [15]

Proportional - Integral Controller (PI)

The Proportional-Integral (PI Controller) sums up the proportional and total control. The use of the integration term is intended to eliminate the error in the permanent state and change the DC gain of the system. The Proportional term improves the stability of the system and increases the response rate. [15]

Proportional - Derivative Controller (PD)

The Proportional - Derivative (PD) Controller combines the Proportional and the Derivative Controller cumulatively. A Proportional-Derivative Controller (PD) controller increases system damping and limits its elevation, but does not directly reduce the permanent error. Using the derivative term D, results increased system damping, allowing for an increase in the proportional gain, thus improving the permanent state error and increasing the system response rate. In practice, the Proportional - Derivative Controller due to derivative D causes amplification of the noise that may occur in the system response, so it is likely to cause problems in cases where there are abrupt changes in the reference signal because the Derivative D to produce output in impact form. [15]

Proportional - Integral- Derivative Controller (PID)

The popularity of the Proportional-Integral-Derivative Controller is primarily due to its very good behavior in contrast to a wide range of operating conditions and secondly its relative simplicity which offers easy and reliable handling. Proportional -Integral- Derivative control combines the effect of the three basic control conditions. The PID control connection is shown in the figure below. [15]

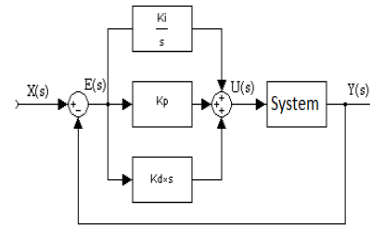


Fig 1: Block Diagram of Proportional -Integral- Derivative Controller

Several industrial-type processes are controlled by the use of PID controllers. The PID proportional-integral Derivative controller has the best overall performance because the system displays a fast response, zero overhead and zero permanent error. To implement such a controller, an appropriate selection of the three parameters of proportional gain, total factor, and Derivative factor should be designed so that the closed loop system has the advantages of all of the controllers associated with the PID controller. In fact, the more difficult to design the particular controller is to give the appropriate values to K_p , K_d and K_i so that one does not adversely affect the other's function. [15]

1.2 Fuzzy Logi

Fuzzy logic is primarily used in machine control. The term "Fuzzy" is given to capture the notion that cannot be attributed to the expressions of truth or lie or even the expression of a lie in part. However, there are alternative suggestions such as Genetic Algorithms and Neural Networks that can perform and function as well as Fuzzy Logic. Also, Fuzzy logic has the advantage of solving problems that cost a lot to humans. With man's experience of Fuzzy logic, he is able to design and build controllers to help him more easily deal with mechanisms he already owns or even create new ones.

Fuzzy logic is used in many computer programs, in satellite systems, in three-phase motors, and in many other applications. Fuzzy logic is an extension of the classical logic of aristocracy. A suggestion may be true "to a certain degree of truth," and not just true or false, that is, the vague logic says things are often not "white-black" but "shades of gray". This idea revolutionized logic theory as it escaped from the 2500-year model, the "0-1" model, "true-false." The way science works require proposals that are either true or false. However, the mode of human logic does not set limits between truth and false accuracy. The first to deal with Fuzzy logic is Lotfi A. Zadeh in 1965. [8]



1.3 Fuzzy Controllers

Fuzzy controllers are discrete time systems and are characterized by intense non-linearity. Instead, the controllers used in most cases of automated control are usually discrete or continuous and are mainly linear. In both cases the inputs are the error of the output of the controlled system with the reference input and the characteristics of this error, such as the change and the rate of change. The output of Fuzzy and linear controllers may be the control signal or the increment of this signal, depending on the form of the controller. [8]

The main disadvantage of Fuzzy controllers is the large number of parameters that need to be adjusted to meet the criteria set in each case for the desired response of the audited system. Finding the field of Fuzzy variables, the form of the participation functions of the Fuzzy sets, the choice of the deduction mechanism and the operators used by the Fuzzy logic, the design of the Fuzzy rule base, the determination of the possible scaling gains the controller can have, the choice of sampling time and a number of other parameters make the process of tuning the Fuzzy Controller a time-consuming and difficult process. [8]

Additionally, the lack of a complete theoretical and mathematical background for the proper adjustment of these parameters makes the vague control a process that is primarily based on testing and error attempts. The above-mentioned observations have high criticism of the use of Fuzzy logic over system control in relation to the simplicity of linear control. Linear control requires a maximum of three profits, and there are several mathematical tools available that are able to provide a complete theoretical approach to the problem. [8]

The non-linearity of Fuzzy controllers raises concerns about the stability of Fuzzy control systems in practical applications. However, some steps have been taken to address the FLC's stability problem using non-linear systems theory. From the techniques developed a few relate to the use of Lyapunov's direct method to determine conditions for the general stability of systems under ambiguous control, the existence of conditions for the absolute stability of Fuzzy control systems or the application of the Popov criterion for Fuzzy control of continuous systems time and disc criterion for discrete system control. However, most of these techniques are based on conditions and assumptions that are difficult to meet in the real world. Therefore, the stability of Fuzzy controllers is an open problem. [8]

The main building blocks of a Fuzzy Controller are:

- The knowledge base where the if-then rules are stored to control the process.
- Fuzzy sets are used to represent the input and output variables with verbal terms.
- The fuzzifier converts the actual input values into Fuzzy sets
- The inference engine processes the Fuzzy outputs and uses the knowledge base to extract the Fuzzy sets of conclusions.
- The defuzzifier converts the conclusions drawn by the deduction mechanism into real numbers so that the control action can be transmitted to the process. [8]

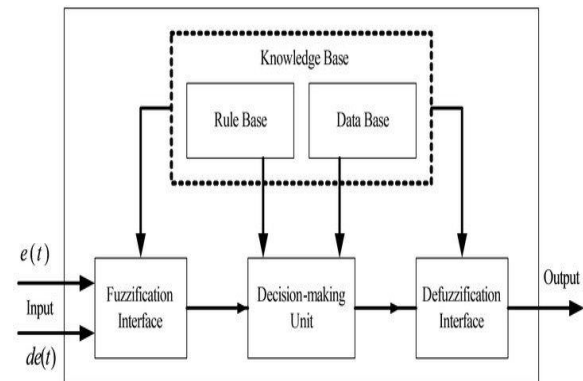


Fig 2: Block Diagram of Fuzzy Controller

In a Fuzzy Controller the inputs are signals and the designer of a Fuzzy Controller has to do the following steps:

1. Verbal distribution of inputs: The designer must represent the input and output variables with the terms.
2. Formulation of rules: After allocating inputs and outputs, vague sets are stored in the form of computer participation functions, followed by the wording of the rules.
3. Definition of the type of Fuzzy implication: Following the formulation of the rules follows the definition of the Fuzzy type of implication. The most common types of Fuzzy implications are:
 - a) of Mamdani, which uses the max-min operator, which receives the smallest of the participation rates of the undefined values and produces



the degree of fulfillment of each rule. The degree of fulfillment of the rule expresses the gravity of the effect of the rule.

- b) of Larsen, which uses the max-product operator, which multiplies the participation rates of the undefined values and calculates the degree of fulfillment of the rule. [8]

4. De-imprecision: De-imprecision produce a strict or crisp value from a Fuzzy set. It is the opposite process of deciphering. De-phasing methods are:

- Centroid defuzzycation or center of area or COA, the center of weight distribution of the Fuzzy set of output is calculated:
- Average Mean of Maxima (MOM) is calculated by averaging the highest exit prices:
- Smallest of maxima or SOM is calculated from the highest exit values that have the lowest degree of participation.
- Higher than maximum (Largest of maxima or LOM) de-falsification, it is calculated from the highest exit values that have the highest degree of participation. [8]
- The method commonly used is Centroid or COA deinter leaving because of its ability to display the smallest error in relation to the other methods. Zadeh, with his book "Fuzzy Sets" in 1965, presented the theory of Fuzzy set theory, with which a price can belong simultaneously to many subsets, each with a degree of participation. Such a subset is the Fuzzy set, which includes elements, each of which has a degree of involvement. [8]

1.4 Fuzzy Rules

An if-then rule is in its simplest form:

"If x is A then y is B"

where the section "If x is A" is the premise part and the section "then y is B" is the decision-making or consequent part.

Fuzzy rules are hypothetical proposals and are the main building blocks of conclusions. For the sake of understanding it is sufficient to interpret the elements of the above rule:

- A, B are the fuzzy sets that come together,
- x is the value of an input variable which takes a degree of participation in the fuzzy set A (fuzzyfication process)
- y is the output of the system which is derived from an inference engine in an Fuzzy form and states the decision of the rule.

The vague conclusion is then de-falsified by the defuzzification mechanism so that a clear figure is finally obtained.

In the case of more than one input $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ the rules are as follows:

If x_1 is A_1 and x_2 is A_2 and \dots, x_n is A_n then y is B

Then there may be more than one output. [8]

1.5 Fuzzy Logic Systems

Fuzzy Logic Systems vary according to the forms a rule can take. The most famous of these forms are:

- Mamdani press: is the form mentioned above, ie "If x is A then y is B", and was named in honor of Ebrahim Mamdani, who was one of the first to apply Fuzzy Logic. Exits of rules of this form are vague sets.
- Sugeno - Takagi type: is a rule of the form "If x is A then y is c", where c is a number or a crisp fuzzy set.
- Takagi - Sugeno - Kang or T-S-K type: is an extension of the previous rule and is one of the main types of fuzzy rule used in many Fuzzy systems. It has the form "If x is A then y is $c_0 + c_1 x$ ", where $c_0, c_1 \in R$. The outputs of rules of this form are functions of the inputs. [8]

2.1 Simulation applications

Simulation as a technique to represent the behavior of a system by another system has a high place in educational applications. Simulation is defined as a method of studying a system with the help of another system. Simulation is a representation that is designed to mimic and allow understanding of the operation of a system. The simulation system results in familiarity with the features and understanding of the functions of the system it represents.



The simulation system is often a "running" model on a computer, and in this way the user does not have to perform his experiments on the actual system he is studying but on the corresponding program through his computer. The aim of a simulation system is to study and experiment with various kinds of systems (to which access is mostly not possible). Users handle the components of the system in a completely interactive way, such as simulating the handling of a warship.

The need for simulation first appeared in the field of scientific research as a technique of studying the effects of an action on a phenomenon without requiring intervention in the phenomenon itself. Simulations are used to explore and understand principles of operation of many technological, physical and social processes. [1]

Types of simulations:

Those who simulate something

- a) physical simulation, in which a natural phenomenon is represented by the computing system allowing the user to understand information about it when handling some variables
- b) iterative simulation, in which the user executes the program sequentially and selects different values for each parameter

Those who show how to do something:

- c) procedural simulation, which aims to teach a sequence of procedures to achieve a goal
- d) simulation of a situation in which the user explores alternative paths in a system in order to understand their effects. [1]

2.2 Simulation benefits

- It is the only approach to solving problems related to the operation of an inaccessible system
- Compared to handling the actual system, it has lower costs
- Provides greater "sensitivity" to understanding the relationship between problems
- It is a safe method in contrast to many of the real experiments
- It offers the possibility of repeating the same phenomenon whenever the user wishes

- It has the possibility of integrated insight into the system under study from all sides [3]

2.3 Simulation disadvantages

- Sometimes it takes a lot of time to grow and cost a lot
- In some cases it may not be the most appropriate method of solving the problem being studied
- It is not in a position to guarantee that it will lead to the best possible solution to the problem
- It is not certain that it reflects with absolute precision the situation under study [1]

2.2 Introduction to Simulink

Simulink is a valuable tool in Matlab that can simulate systems from a wide range of scientific areas. Its use does not necessitate the knowledge of Matlab, this knowledge is an important advantage because it offers the possibility of more efficient use of it. One of the most important advantages of simulink is its simplicity as it provides the user with many possibilities. [4] In Simulink, systems are drawn as block diagrams. It offers a great variety of elements of block diagrams, for example summing junctions, transfer functions, and many others. It also provides virtual input and output devices such as function generators. Because of the combination with MATLAB, Simulink's data can be transferred very easily, between the programs.

The simulink can be activated by typing the simulink command in the Matlab Command Window or by clicking left in the menu in the menu bar on the top left. Once this is done, a window called Simulink Library Browser will open. The libraries for various applications are shown in the left pane. Each library consists of smaller ones and each of them has a number of blocks, which are displayed in the right part of the window. These libraries cover a wide range of applications, but the following analysis will only be found in the Simulink library. [4]

To open a new simulink file or an existing one, the windows shortcuts are used in the menu bar at the top left in the Simulink Library Browser window. To add a block to the new file from the Simulink Library Browser window, it is simply dragged from the window to the file, in the same way as in windows that are moving files from one window to



another. To make the transfer another way, right click on the block and the menu that will appear, select 'add to untitled'. Once a block has been placed in the new file, double-clicking on it opens a window with its settings. Each block has different properties that are discussed below. Also, by right clicking on

the block, a menu appears. Selecting Help will show detailed help for this. [4]

2.3 Lookup Table FuzzyPID Controller

A Fuzzy Inference System (FIS) , maps out given inputs to outputs using Fuzzy logic. For example, a standard assignment of a Fuzzytwo-input controller can be depicted in a 3-D display. The graph is often referred to, as the control surface graph as shown below. [9]

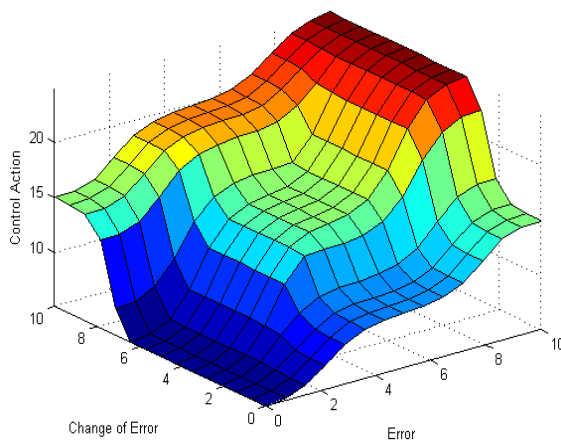


Fig 3: Control Panel Graph

The typical FIS inputs are error signals ($e(k)$) and error's change ($e(k) - e(k-1)$). The FIS output is the control action resulting from the Fuzzy rules. The Fuzzy Logic Toolbox™ provides GUI commands and tools to design a FIS for a desired control surface. The designed FIS can then be simulated using the FuzzyLogic Controller block in Simulink. Nonlinear control surfaces can often be accessed with Lookup Tables to simplify the generated code and improve execution speed. For example, a Fuzzy Logic Controller block in Simulink can be replaced by a set of Lookup Tables, a table, for each output defined in the FIS. The Fuzzy Logic Toolbox provides a command like evalfis to calculate the data used in the Lookup Tables.

A non-linear PID controller for a plant in Simulink was designed. The plant is a single entry system with single output at discrete time and the goal is to achieve good benchmarking performance. [9]

The Fuzzy Controller in this case is in the feedback loop and calculates PID-like operations through an

inconclusive conclusion. The structure of the loop appears are the following

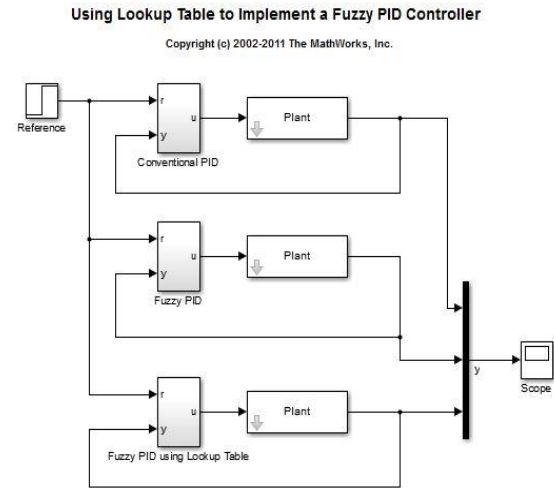


Fig 4: FuzzyPID Controller Structure

The FuzzyPID controller uses a parallel structure as shown below. It is a combination of FuzzyPI control and FuzzyPD control.

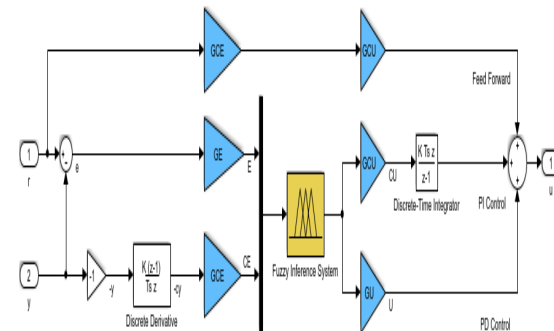


Fig 5: Internal FuzzyPID Controller Internal Structure

The change of measurement - ($y(k) - y(k-1)$) is used instead of the change of error $e(k) - e(k-1)$. In reference signal, direct activation of the derivative energy. The two gain units, GCE and GCU, are used in the forwarding path from r to u to ensure that the error signal e is used in Proportional ue action when the FuzzyPID controller is linear.

The design of a FuzzyPID controller involves defining the Fuzzyconjecture system and determining the four scaling factors: GE, GCE, GCU and GU. [9]

The conventional PID controller is a discrete time PID controller with the Euler numerical integration method used in both integrated and generated energy. The gains of the controller are K_p , K_i and K_d . The controller is implemented in Simulink are the following

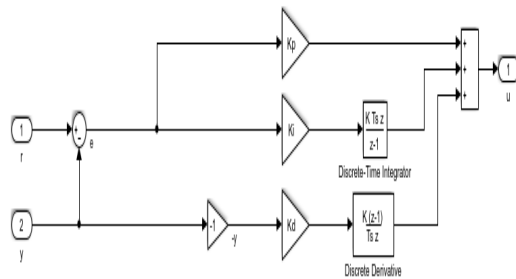


Fig 6: Conventional PID Controller

Similar to the FuzzyPID controller, the input signal in the derivative action is $-y(k)$ instead of $e(k)$. The gains of the PID controller can be tuned either manually or using coordinate types. By using the `pdtune` command from the Control System Toolbox™, an original PID is created. By configuring the FIS and selecting four scaling factors, a linear FuzzyPID control is obtained that reproduces the exact control performance, as the conventional PID controller does. [9]

The construction of the Fuzzyconclusion deduction system is the following

```
FIS=newfis('FIS','FISType','mamdani','AndMethod',
'prod','OrMethod','probor',...
'ImplicationMethod','prod','AggregationMethod','su
m');
```

Set input E:

```
FIS = addvar(FIS,'input','E',[-10 10]);
FIS = addmf(FIS,'input',1,'Negative','trimf',[-20 -10
0]);
FIS = addmf(FIS,'input',1,'Zero','trimf',[-10 0 10]);
FIS = addmf(FIS,'input',1,'Positive','trimf',[0 10
20]);
```

Set input CE:

```
FIS = addvar(FIS,'input','CE',[-10 10]);
FIS = addmf(FIS,'input',2,'Negative','trimf',[-20 -10
0]);
FIS = addmf(FIS,'input',2,'Zero','trimf',[-10 0 10]);
FIS = addmf(FIS,'input',2,'Positive','trimf',[0 10
20]);
```

Set output u:

```
FIS = addvar(FIS,'output','u',[-20 20]);
FIS = addmf(FIS,'output',1,'LargeNegative','trimf',[-
20 -20 -20]);
FIS = addmf(FIS,'output',1,'SmallNegative','trimf',[-
10 -10 -10]);
FIS = addmf(FIS,'output',1,'Zero','trimf',[0 0 0]);
FIS = addmf(FIS,'output',1,'SmallPositive','trimf',[10
10 10]);
FIS = addmf(FIS,'output',1,'LargePositive','trimf',[20
20 20]);
```

Set rules:

1. IF E is Negative AND CE is Negative THEN u is -20
2. IF E is Negative AND CE is Zero THEN u is -10
3. IF E is Negative AND CE is Positive THEN u is 0
4. IF E is Zero AND CE is Negative THEN u is -10
5. IF E is Zero AND CE is Zero THEN u is 0
6. IF E is Zero AND CE is Positive THEN u is 10
7. IF E is Positive AND CE is Negative THEN u is 0
8. IF E is Positive AND CE is Zero THEN u is 10
9. IF E is Positive AND CE is Positive THEN u is 20

```
ruleList = [1 1 1 1 1;... % Rule 1
1 2 2 1 1;... % Rule 2
1 3 3 1 1;... % Rule 3
2 1 2 1 1;... % Rule 4
2 2 3 1 1;... % Rule 5
2 3 4 1 1;... % Rule 6
3 1 3 1 1;... % Rule 7
3 2 4 1 1;... % Rule 8
3 3 5 1 1; % Rule 9
```

```
FIS = addrule(FIS,ruleList);
[9]
```

Then the GE, GCE, GCU and GU coefficients are determined from the K_p , K_i , K_d gains used by the conventional PID controller. By comparing the expressions of the traditional PID and the linear FuzzyPID, the variables are related are the following

- $K_p = GCU * GCE + GU * GE$
- $K_i = GCU * GE$
- $K_d = GU * GCE$

The maximum reference step is 1, with the maximum error e being 1. Given that the input area of E is $[-10 10]$, first determine the GE at 10. GCE , GCU and GU are then solved by the above equations [9]

- $GE = 10;$
- $GCE = GE * (K_p - \sqrt{K_p^2 - 4 * K_i * K_d}) / 2 / K_i;$
- $GCU = K_i / GE;$
- $GU = K_d / GCE;$



To implement the system, the Fuzzy Controller has two inputs (E and CE) and one output (u) that can be replaced by a 2-D lookup table. The lookup table 2-D for FIS is created by creating a loop through the input cluster and calculating the output with the evalfis command. [9]

```

Step = 10;
E = -10:Step:10;
CE = -10:Step:10;
N = length(E);
LookUpTableData = zeros(N);
for i=1:N
for j=1:N
LookUpTableData(i,j) = evalfis([E(i) CE(j)],FIS);
end
end

```

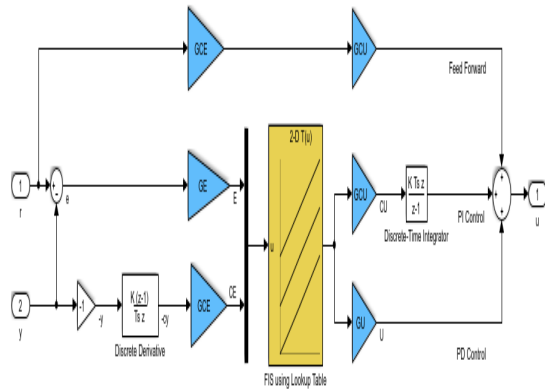


Fig 7: The FuzzyPID controller that uses the 2-D Lookup Table

When the control surface is linear as already designed above, the FuzzyPID controller using the 2-D lookup table must produce exactly the same result as the block Fuzzylogic controller uses. In the Simulink model, three different subsystems, namely PID, FuzzyPID and FuzzyPID, are used using the Lookup Table to control the same unit. Closed loop responses to a step change appear in the scope and are exactly the same (three response curves overlapping). [9]

2.2 Application of Lookup table for Fuzzy controller and correlation with PID controller

By using the PID, using the Lookup Table, are the following system was implemented.

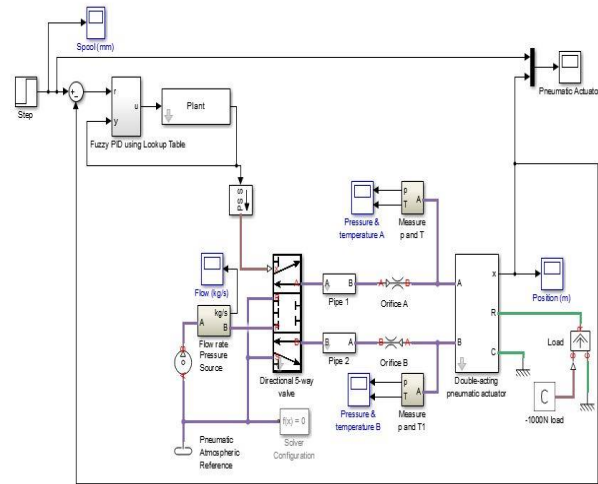


Fig 8: Pneumatic System with a PID controller using the Lookup Table

Running the sllookuptable, with a simulation time of 12 seconds, and applying the PID controller using the Lookup Table to the pneumatic system with a simulation time of 2 seconds, the results are the following

Name	Value
C	1x1 pid
C0	1x1 pid
CE	1x21 double
E	1x21 double
FIS	1x1 struct
GCE	3.4285
GCU	2.8631
GE	10
GU	2.0138
i	21
j	21
Kd	6.9041
Ki	28.6308
Kp	29.9537
LookUpTableData	21x21 double
N	21
Plant	1x1 zpk
ruleList	4x5 double
ScopeData4	1x1 struct
Step	1
tout	1000x1 double
Ts	0.1000

Fig 9: Workspace Results

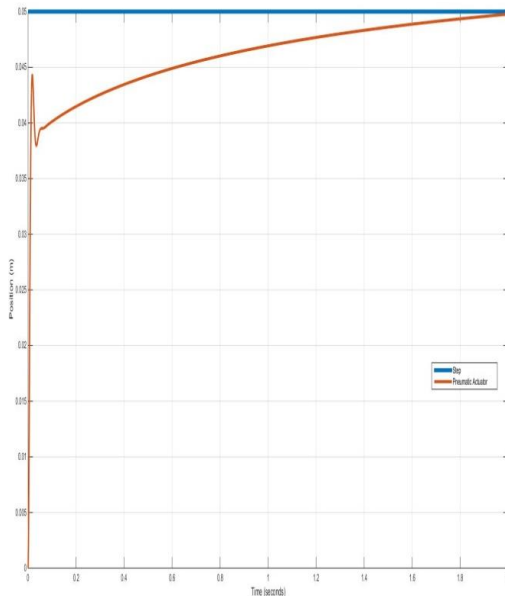


Fig 10: Graphical depiction with a PID controller using the Lookup Table

3.1 Comparison of control methods results

Taking the results of the system responses, the following conclusions were drawn as the methods of control of the proportional Controller, proportional - Integral Controller, proportional - Integral - derivative Control and proportional - derivative:

By using the proportional Controller (P), the pneumatic system acts quickly and offers the desired effect. However, the proportional Controller is not considered to be ideal for high application requirements as its performance under the influence of the load is not immediately predictable. This has the effect of not being able to deal with possible disorders. [4]

By using the proportional -Integral Controller (PI), the pneumatic system acts quickly and offers the desired effect. However, the integral controller I, which enhances the continuous force acting on the pneumatic piston, causes the system to fail to stabilize and creates oscillations. For this reason, proportional -Integral Controller is not considered appropriate for this experiment. [4], [5], [6], [7]

By using Proportional -Integral- derivative Controller (PID) the pneumatic system acts directly and offers the desired effect. Thanks to the integral I controller, which enhances the continuous force acting on the pneumatic piston, this causes the system to fail to stabilize and creates vibrations.

Although the derivative controller reduces elevation, as a whole the proportional - integral - derivative controller is not ideal for non-linear systems. [4], [5], [6], [7]

By using the Proportional - Derivative Controller (PD), the pneumatic system acts instantly and has

high positioning accuracy. It delivers the desired result, without overlaps. Research has shown that Proportional -Derivative Controller offers the best performance in nonlinear systems. [4], [5], [6], [7]

Using the Lookup table to implement the Fuzzy Controller, the desired result was achieved, but the pneumatic system had a more abrupt behavior, and it reached the desired value more slowly than the above control methods.

In summary, it was found that the proportional - derivative Controller (PD) offers the optimal performance in the non-linear system of the particular study, and is considered the most beneficial solution at both practical and mathematical level for the correct position control of the pneumatic piston.

3.2 Future Optimizations

A possible improvement of the system could be achieved by using a Linear Variable Derivative Transformer (LVDT). It is actually a linear displacement measuring sensor. The range of measured displacements depending on the type of LVDT and application ranges from 0.1mm to 1000mm.

Linear variable Derivative transformers are instruments of high precision and have a small error ($\pm 0.5\%$) because their core is not in contact with the coils, resulting in very low mechanical friction and wear. Despite all their advantages, LVDTs are instruments used to measure small displacements, are quite sensitive and are affected by vibration and temperature. [10]



Fig 11: Linear Variable Derivative Transformer

The device consists of three coils, one primary and two secondary, in the center of the core there is a core of soft magnetic material (soft iron, amorphous FeSiB wire etc). The primary is powered by alternating high frequency voltage and the secondary are connected in series and with opposite polarity.

When the magnetic core is centered, because of the symmetry the voltages induced in the secondary coils are equal and since they are connected to the opposite, the output is zero. Movement of the kernel generates a signal (alternating voltage) at the output whose width is proportional to the displacement and its phase indicates the direction of motion. [11]

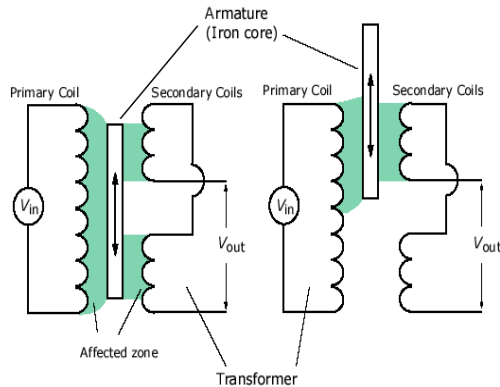


Fig 12: Provision of LVDT Sensor

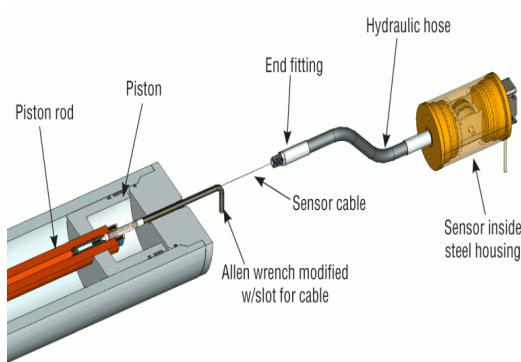


Fig 13: Internal LVDT Sensor Structure

The Linear Variable Derivative Transformer finds many applications in the industry because of the advantages of using it.

More specifically, LVDT is used:

- To control the water level in a container.
- In machining.
- In robotics.
- In force, pressure and acceleration measurement systems.
- To control the position of hydraulic and pneumatic pistons.
- To control crane movement [12]

4. ACKNOWLEDGMENT

I would like to begin by thanking the professor and supervisor of my diplomatic work, Mr. Christos Drosos, for his valuable help, as well as the willingness to cooperate with him during this work. Furthermore, I would like to thank him for the valuable advice and knowledge I have gained through the courses he was taught. In addition, I would like to thank all the professors of the postgraduate program "Automation of Production and Services" because through their teaching they

have provided me with the foundation for my professional career.

5. REFERENCES

[1] Educational material for the training of trainers - Chapter 2: Sectors ΠΕ60-70 ΕΑΙΤΥ- Training and Training Sector.

[2] INTRODUCTION TO SIMULINK, Laboratory of Regulation and Informatics, School of Chemical Engineering.

[3] Bachelor Thesis: ELECTRICAL STUDY AND APPLICATIONS, Drosos Eleftherios, Duntoulakis Maris, T.E.I. Department of Electronics, Department of Automation.

[4] Astrom K., Häglund T., "PID Controllers Theory, Design and Tuning", Library of Congress Cataloguing-in-Publication Data, 1999.

[5] 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.

[6] Yaolong Tan, "Nonlinear Observer/Controller Design and Its Application to Friction Compensation", PhD thesis, University Of California, Los Angeles, 2000.

[7] 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.

[8] Bachelor Thesis: Designing a Greenhouse Heating and Ventilation System Using Fuzzy Controller, Spagakos-Liakakos Panagiotis, Sabathianakis Nikolaos.

[9] <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/example/s/using-lookup-table-in-simulink-to-implement-fuzzy-pid-controller.html>

[10] <http://www.metrolog.net/lvdt.php?lang=en>

[11] Bachelor thesis: Sensor Speed Measurement, Zacharioudakis Stefanos, Department of Electronics, TEI of Crete, 2010.

[12] Module 6: Movement Measurement (Displacement, Approach, Speed, Acceleration), Mechanical Voltage and Weight, Lampros Bissoudis, Department of Electrical Engineering, TEI Of Western Greece.



Παράρτημα 2 [PROPOSAL]

Με γνώμονα τους ταχύτετους ρυθμούς ανάπτυξης της τεχνολογίας στην σημερινή εποχή, έχει σημειωθεί μια αδιάκοπη προσπάθεια να εισαχθούν στην καθημερινότητα τεχνολογικά επιτεύγματα ούτως ώστε να καλυφθούν καλύτερα, ευκολότερα και πιο οικονομικά οι ανθρώπινες ανάγκες. Ειδικότερα στον τομέα της βιομηχανίας, της έρευνας και των εφαρμογών παρατηρήθηκε η ανάγκη ύπαρξης προγραμμάτων προσομοίωσης, καθώς προσφέρουν ασφάλεια σε τυχόν σφάλματα, μειώνουν το κόστος και είναι προσιτά ως προς τη χρήση σε επαγγελματίες και σπουδαστές ανώτερης εκπαίδευσης. Στην παρούσα διατριβή θα παρουσιαστεί η μελέτη εφαρμογής μεθόδων ελέγχου πνευματικού συστήματος σε περιβάλλον προσομοίωσης. Επιπροσθέτως, θα αναλυθεί και θα περιγραφεί η λειτουργία του συγκεκριμένου πνευματικού συστήματος καθώς και όλοι οι μέθοδοι ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό. Το αντικείμενο της μελέτης, το οποίο εμπίπτει με το Π.Μ.Σ, δεδομένου ότι πραγματεύεται σύγχρονες εφαρμογές τεχνολογιών αυτοματισμού, θα προσπαθήσει να καλύψει ερωτήματα όπως εάν οι συγκεκριμένοι μέθοδοι ελέγχου είναι κατάλληλοι και αποτελεσματικοί για το πνευματικό σύστημα όπου μελετάται, και κυρίως πόσο αποτελεσματική είναι η χρήση ενός πίνακα αντιστοίχισης Ασαφούς ελεγκτή (Fuzzy) με Αναλογικό-Ολοκληρωτικό-Διαφορικό ελεγκτή (PID). Για τη χρήση του συγκεκριμένου πίνακα στο πνευματικό σύστημα της παρούσας μελέτης δεν έχουν εξαχθεί αποτελέσματα μέχρι σήμερα. Τα δύο αυτά γεγονότα αποτελούν τον κύριο σκοπό αυτής της διατριβής, σε μια προσπάθεια οι παραπάνω εφαρμογές να πραγματοποιούν τον έλεγχο του συστήματος. Το κυρίως μέρος της μελέτης θα επεξηγεί τον σχεδιασμό του συστήματος καθώς επίσης το είδος των ελεγκτών και του πίνακα αντιστοίχισης. Ο τρόπος σύνδεσης και λειτουργίας μεταξύ του πνευματικού συστήματος, των μεθόδων ελέγχου και του πίνακα, στο περιβάλλον προσομοίωσης θα παρουσιαστούν αναλυτικά, ενώ από όλα τα ανωτέρω θα προκύψουν τα συμπεράσματα χρήσης των συγκεκριμένων μεθόδων ελέγχου, θα συζητηθούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους και ταυτόχρονα θα προταθούν βελτιστοποιήσεις έτσι ώστε να επεκταθούν περαιτέρω τα οφέλη από την λειτουργία τους. Ως πιθανό αποτέλεσμα της χρήσης των παραπάνω μεθόδων αναμένεται να προκύψει η επίτευξη του βέλτιστου και αποδοτικότερου ελέγχου του συστήματος. Υπολογίζεται ότι η μελέτη θα ολοκληρωθεί εντός 4 μηνών, δεδομένου ότι η συλλογή βιβλιογραφίας από το διαδίκτυο θα συνοδευτεί από την υλοποίηση του συστήματος και των μεθόδων ελέγχου του στο περιβάλλον προσομοίωσης. Κατά τον τελευταίο (τέταρτο) μήνα θα πραγματοποιηθεί η συγγραφή της διατριβής και οι διορθώσεις αυτής σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή.