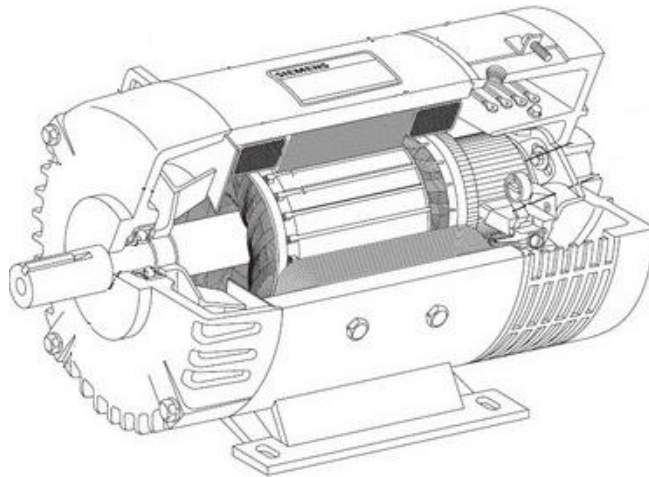




ΑΝΩΤΑΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

Το Simulink ως εργαλείο προσομοίωσης σύγχρονων μεθόδων ελέγχου DC ηλεκτροκινητήρων



Φοιτητές:

ΙΓΓΛΕΣΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ-ΡΑΦΑΗΛ

ΝΤΙΜΕΡΗ ΕΛΕΝΗ

Επιβλέπων Καθηγητής:

ΜΙΧΑΛΗΣ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ

Αιγάλεω, Φεβρουάριος 2016

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Ιγγλέσης Παναγιώτης-Ραφαήλ**, του **Ιωάννη**, με αριθμό μητρώου **42801** φοιτητής 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 απόφασης της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού δμήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

Επίσης δηλώνω υπεύθυνα ότι έχω παρακολουθήσει το σεμινάριο συγγραφής και εκπόνησης πτυχιακής εργασίας που διοργανώνεται από το Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε. κατά το Χειμερινό/Εαρινό Εξάμηνο του Ακ. Έτους **2015-2016**

Ο Δηλών



Ημερομηνία

Φεβρουάριος
2016

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη **Ντίμερη Ελένη**, του **Γρηγορίου**, με αριθμό μητρώου **42907** φοιτήτρια του Τμήματος **Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε.** του **Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ.** πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

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

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

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

Επίσης δηλώνω υπεύθυνα ότι έχω παρακολουθήσει το σεμινάριο συγγραφής και εκπόνησης πτυχιακής εργασίας που διοργανώνεται από το Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε. κατά το Χειμερινό/Εαρινό Εξάμηνο του Ακ. Έτους ~~2015~~ 2016

Ο Δηλών



Ημερομηνία

Φεβρουάριος
2016

Ευχαριστήριο σημείωμα

Αρχικά, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή και επιβλέποντα της πτυχιακής μας εργασίας κ. Μιχαήλ Γ. Παπουτσιδάκη για το ενδιαφέρον και τη διάθεση συνεργασίας που επέδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής. Επίσης, θα θέλαμε να τον ευχαριστήσουμε για τις πολύτιμες συμβουλές και τις γνώσεις, τις οποίες αποκτήσαμε μέσω των μαθημάτων στα οποία ήταν διδάσκων.

Επιπρόσθετα, ευχαριστούμε όλους τους καθηγητές του τμήματος Αυτοματισμού διότι μέσω της διδασκαλίας τους μας προσέφεραν τα θεμέλια για την επαγγελματική μας σταδιοδρομία. Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τις οικογένειές μας και τους φίλους μας για όλη την στήριξη και βοήθεια που μας προσέφεραν και συνεχίζουν να μας προσφέρουν.

Ιγγλέσης Παναγιώτης-Ραφαήλ
Ντίμερη Ελένη
Αιγάλεω, Φεβρουάριος 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Ο Ηλεκτροκινητήρας DC

1.1 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC)	σελ. 7
1.1.2 Εφαρμογές DC κινητήρων.....	σελ. 10
1.2 Εφαρμογές προσομοίωσης	σελ. 11
1.2.1 Τύποι προσομοιώσεων	σελ. 11
1.2.2 Πλεονεκτήματα προσομοίωσης.....	σελ. 13
1.2.3 Μειονεκτήματα προσομοίωσης	σελ. 13
1.2.4 Παράδειγμα λογισμικού προσομοίωσης.....	σελ. 13
1.3 Εισαγωγή στο Simulink.....	σελ. 14
1.3.1 Ενεργοποίηση του Simulink	σελ. 14
1.3.2 Άνοιγμα αρχείων και προσθήκη στοιχείων (blocks) σε αυτά	σελ. 15
1.3.3 Γνωριμία με την βιβλιοθήκη Simulink	σελ. 16
1.3.4 Βιβλιοθήκη Continuous	σελ. 16
1.3.5 Βιβλιοθήκη Math Operators	σελ. 17
1.3.6 Βιβλιοθήκη Sinks	σελ. 18
1.3.7 Βιβλιοθήκη Sources	σελ. 20
1.3.8 Χρήση των στοιχείων των βιβλιοθηκών του simulink	σελ. 21

Κεφάλαιο 2: Έλεγχος Ταχύτητας Ηλεκτροκινητήρα DC Με Χρήση PID Ελεγκτή

2.1 Το μαθητικό μοντέλο του ηλεκτροκινητήρα (DC)	σελ.22
2.1.1 Περιγραφή	σελ. 22
2.1.2 Μέρη που το αποτελούν	σελ. 23
2.2 Ο έλεγχος του ηλεκτροκινητήρα (DC)	σελ. 27
2.2.1 Ο κλασικός έλεγχος του ηλεκτροκινητήρα (DC)	σελ. 27
2.2.2 Ο ελεγκτής τριών όρων και η εφαρμογή του.....	σελ. 31
2.2.3Περιγραφή Συστήματος.....	σελ. 39

Κεφάλαιο 3: Έλεγχος Ταχύτητας Ηλεκτροκινητήρα DC Με Χρήση Ασαφούς Ελεγκτή FUZZY

3.1 Ασαφής Λογική	σελ. 56
3.1.1 Ασαφείς Ελεγκτές	σελ. 58
3.1.2 Βασικοί Όροι	σελ. 61
3.1.3 Βασικές Ιδιότητες Ασαφών Συνόλων	σελ. 62

3.1.4	Συναρτήσεις Συμμετοχής	σελ. 63
3.1.5	Πράξεις Ασαφών Συνόλων	σελ. 66
3.1.6	Λεκτικοί Τροποποιητές ή Φράκτες	σελ. 68
3.1.7	Ασαφείς Κανόνες	σελ. 68
3.1.8	Συστήματα Ασαφούς Λογικής	σελ. 69
3.1.9	Το Ασαφές Μοντέλο Mamdani	σελ. 69
3.1.10	Συστήματα τύπου Sugeno	σελ. 72
3.1.11	Συνοψίζοντας για τις μεθόδους Mamdani και Takagi-Sugeno	σελ. 74
3.2	Εφαρμογή του ελεγκτή FUZZY και η συσχέτιση του με τον ελεγκτή PID	σελ. 74
Κεφάλαιο 4: Μελλοντική Έρευνα		
4.1	Βελτιώσεις	σελ. 80
4.1.1	Μελλοντικοί στόχοι	σελ. 80
Βιβλιογραφία		σελ. 81

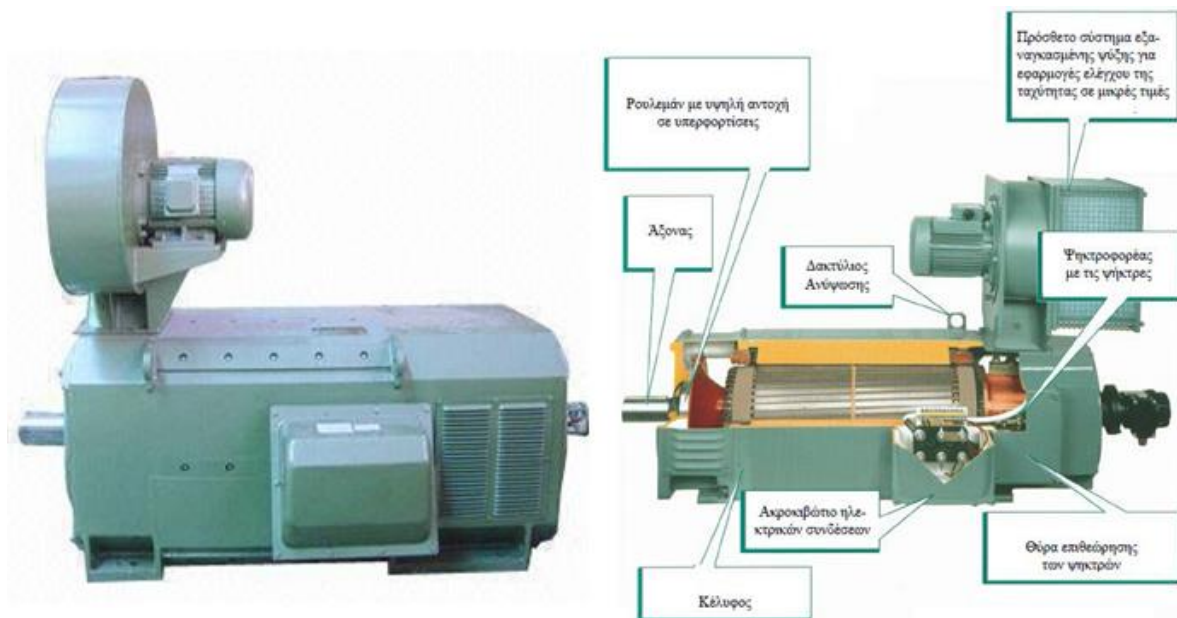
Ο ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΑΣ DC

1.1 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC)

Ο τρόπος ζωής και εργασίας έχει αλλάξει και γίνεται πιο ποιοτικός και πιο αποδοτικός, χάρη στη χρήση του κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Η αρχή λειτουργίας του είναι να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Από τις πρώτες κατασκευές μέχρι τη σημερινή εποχή, ενώ ο σχεδιασμός των ηλεκτροκινητήρων DC έχει διαφοροποιηθεί κατά πολύ, η αρχή λειτουργίας τους παραμένει είναι σταθερή. Ο ηλεκτρικός κινητήρας παράγει κίνηση, καθώς τα πηνία διαρρέονται από ρεύμα βρίσκονται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Ο στάτορας, ο οποίος είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης, παράγει το μαγνητικό πεδίο. Ο ρότορας αποτελείται από συρμάτινα πηνία. Οι ψήκτρες τροφοδοτούν τα πηνία με ηλεκτρικό ρεύμα. Το μαγνητικό πεδίο αλληλεπιδρά με αυτό του στάτορα και έτσι στρέφεται ο ρότορας. Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα χαρακτηρίζεται από τη δύναμη Laplace. Όταν ένας αγωγός από τον οποίο διαρρέει ηλεκτρικό ρεύμα είναι μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο του ασκείται δύναμη ίση με: $F = I * \lambda * B * \eta\mu\phi$

Όπου:

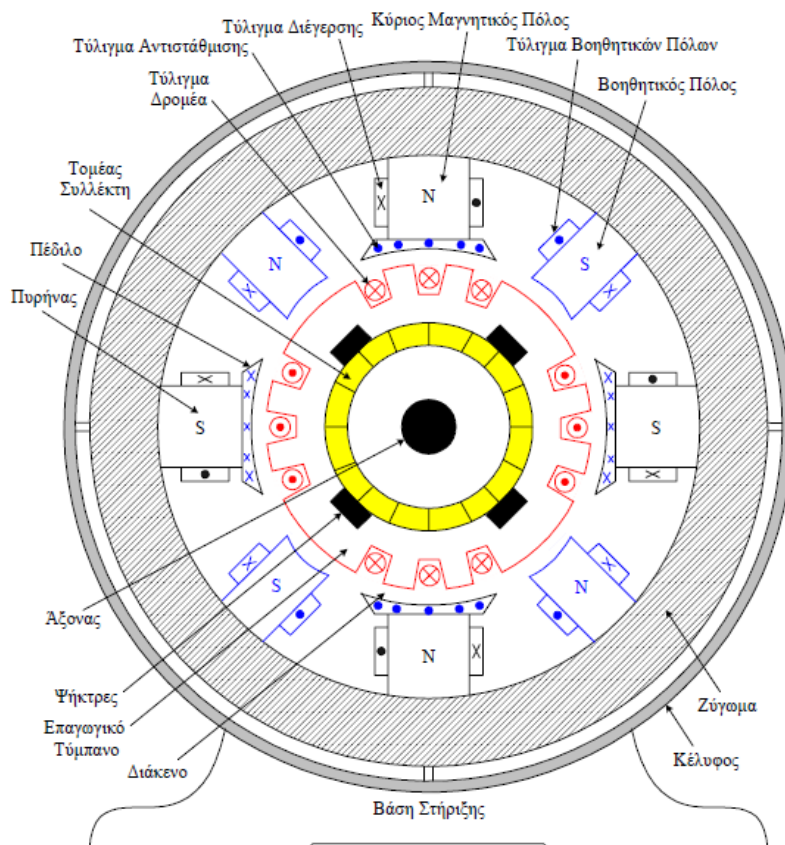
- I = Ένταση Ρεύματος
- λ = Μήκος Αγωγού
- B = Ένταση Μαγνητικού πεδίου
- ϕ = η γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών (B)



Εικόνα 1.1: Ο ηλεκτροκινητήρας DC εξωτερικά και εσωτερικά

Πιο αναλυτικά τα μέρη ενός ηλεκτροκινητήρα είναι τα εξής:

- **Στάτορας:** Ο στάτορας αποτελείται από πηνία που τροφοδοτούνται με ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτό παράγει το μαγνητικό πεδίο, το οποίο ασκεί δύναμη στρέψης στα πηνία του ρότορα.
- **Ρότορας:** Ο ρότορας αποτελείται από πολλά συρμάτινα πηνία. Κατά τη διάρκεια της περιστροφής του, κάθε πηνίο διαρρέεται εναλλάξ με ρεύμα από τις ψήκτρες.
- **Ψήκτρα:** Οι ψήκτρες, από γραφίτη, καθιστούν εφικτή την ηλεκτρική σύνδεση του εναλλάκτη.
- **Εναλλάκτης:** Ο εναλλάκτης (ή μεταλλάκτης) εμπεριέχει μια σειρά μεταλλικών συνδέσεων, οι οποίες είναι τοποθετημένες πάνω σε έναν κύλινδρο. Οι ψήκτρες παρέχουν ρεύμα σε κάθε σύνδεση, εναλλάξ, καθώς ο εναλλάκτης περιστρέφεται.
- **Συλλέκτης:** Ο συλλέκτης είναι ένας μηχανικός ανορθωτής που μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Αποτελείται από τομείς που συνήθως είναι ίσοι σε αριθμό με αυτό των αυλακίων του δρομέα. Οι τομείς του συλλέκτη κατά κύριο λόγο είναι κατασκευασμένοι από επιασημωμένο χαλκό.
- **Βοηθητικοί Πόλοι:** Είναι τοποθετημένοι μεταξύ των κυρίων πόλων και είναι παρόμοιοι με αυτούς, αλλά είναι πάντα συνδεδεμένοι σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα. Και αυτό για να εξουδετερώνουν την αντίδραση του δρομέα. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνουν στο έπακρο την ανάγκη για ρύθμιση των ψηκτρών που είναι πιο δύσκολη και κατά συνέπεια ακριβότερη στην υλοποίησή της. (βλέπε [1])

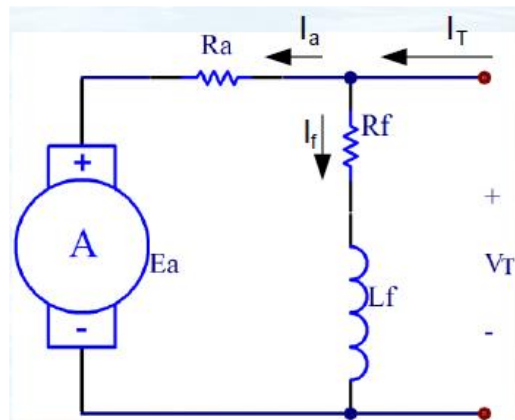


Εικόνα 1.2: Σχεδιάγραμμα του εσωτερικού ενός DC ηλεκτροκινητήρα

Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του τυλίγματος διέγερσης με το τύλιγμα τυμπάνου οι κινητήρες DC διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:
(βλέπε [2])

1. Στους κινητήρες παράλληλης διέγερσης, όπου το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται παράλληλα στο τύλιγμα του κινητήρα

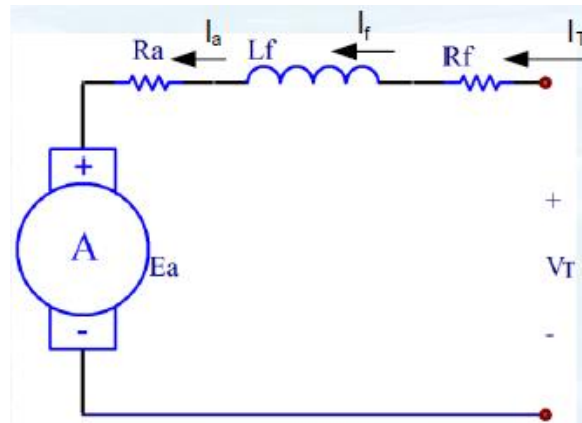
E_a : Τάση επαγωγής τυλιγμάτων κινητήρα
 R_a : Εσωτερική αντίσταση τυλιγμάτων κινητήρα
 L_f : Τύλιγμα διέγερσης
 R_f : Εσωτερική αντίσταση τυλίγματος διέγερσης



Εικόνα 1.3: Κύκλωμα κινητήρα παράλληλης διέγερσης

2. Στους DC κινητήρες διέγερσης σειράς, όπου το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του κινητήρα

E_a : Τάση επαγωγής τυλιγμάτων κινητήρα
 R_a : Εσωτερική αντίσταση τυλιγμάτων κινητήρα
 L_f : Τύλιγμα διέγερσης
 R_f : Εσωτερική αντίσταση τυλίγματος διέγερσης
 Το ρεύμα του τυλίγματος I_f διέγερσης με το ρεύμα του κινητήρα I_a είναι κοινό.



Εικόνα 1.4: Κύκλωμα κινητήρα διέγερσης σειράς

3. Στους DC κινητήρες σύνθετης διέγερσης χρησιμοποιούνται δύο τυλίγματα διέγερσης. Το ένα συνδέεται σε σειρά και το άλλο παράλληλα

E_a : Τάση επαγωγής τυλιγμάτων κινητήρα

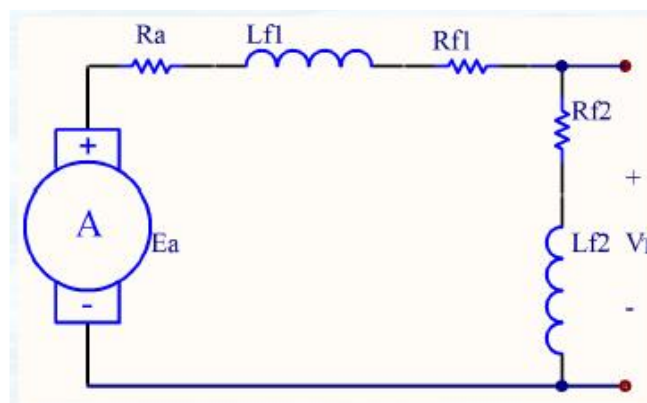
R_a : Εσωτερική αντίσταση τυλιγμάτων κινητήρα

L_{f1} : Τύλιγμα διέγερσης σειράς

R_{f1} : Εσωτερική αντίσταση τυλίγματος διέγερσης σειράς

L_{f2} : Τύλιγμα παράλληλης διέγερσης

R_{f2} : Εσωτερική αντίσταση τυλίγματος παράλληλης διέγερσης



Εικόνα 1.5: Κύκλωμα κινητήρα σύνθετης διέγερσης

1.1.2 Εφαρμογές DC κινητήρων

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται για να προσφέρουν κίνηση σε μια τεράστια σειρά μηχανισμών. Καλύπτουν μια πολύ μεγάλη γκάμα εφαρμογών από μηχανήματα που προορίζονται για οικιακή χρήση μέχρι τις πιο μεγάλες και πιο σύνθετες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Για παράδειγμα, σε μία οικία συνήθως υπάρχουν 15-40 ηλεκτροκινητήρες σε διάφορες εφαρμογές, όπως ανεμιστήρες, ψυγεία, πλυντήρια, φούρνοι, συστήματα κλιματισμού, wi-fi συστήματα κλπ. Στη βιομηχανία το άθροισμα των ηλεκτρικών κινητήρων πολλαπλασιάζεται, σε σύγκριση με μία κατοικία και περιλαμβάνει από πολύ μικρούς κινητήρες σε αυτόματα συστήματα μέχρι τεράστιους ηλεκτροκινητήρες ισχύος χιλιάδων ίππων.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος προσφέρουν πολύ μεγάλη ευκολία όσον αφορά τον έλεγχο της ταχύτητας του άξονά τους. Διαθέτουν, επίσης, σημαντική ευκολία στον αξιόπιστο έλεγχο των κινήσεων σε βιομηχανικά μηχανήματα τα οποία ενεργοποιούνται από αυτούς. Ένα ακόμη κύριο τους πλεονέκτημα, σε σχέση με τους κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος, είναι ότι για δεδομένη ισχύ έχουν τη δυνατότητα να αναπτύσσουν αρκετά μεγαλύτερη μηχανική ροπή στο άξονα τους που έχει ως αποτέλεσμα να είναι κατάλληλοι για τον έλεγχο των κινήσεων σε βιομηχανικούς μηχανισμούς, οι οποίοι χρειάζεται να διαχειριστούν ιδιαίτερα μηχανικά φορτία. (βλέπε [1])

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. (βλέπε [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. (βλέπε [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. (βλέπε [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. (βλέπε [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. (βλέπε [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

(βλέπε [3])

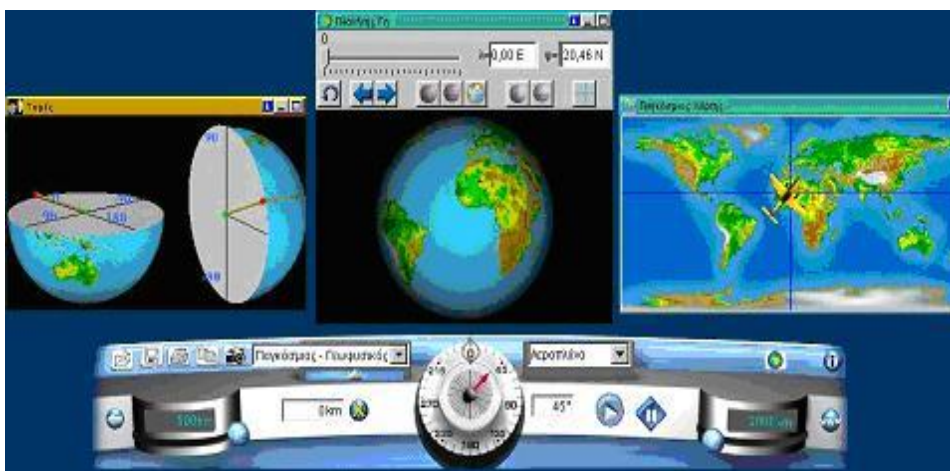
1.2.3 Μειονεκτήματα προσομοίωσης

- 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 εγγυηθεί ότι θα οδηγήσει στην καλύτερη δυνατή λύση του προβλήματος
- Δεν είναι βέβαιο ότι αντανακλά με απόλυτη ακρίβεια την υπό μελέτη κατάσταση (βλέπε [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. (βλέπε [3])



Εικόνα 1.6: Περιβάλλον λογισμικού ΓΑΙΑ II

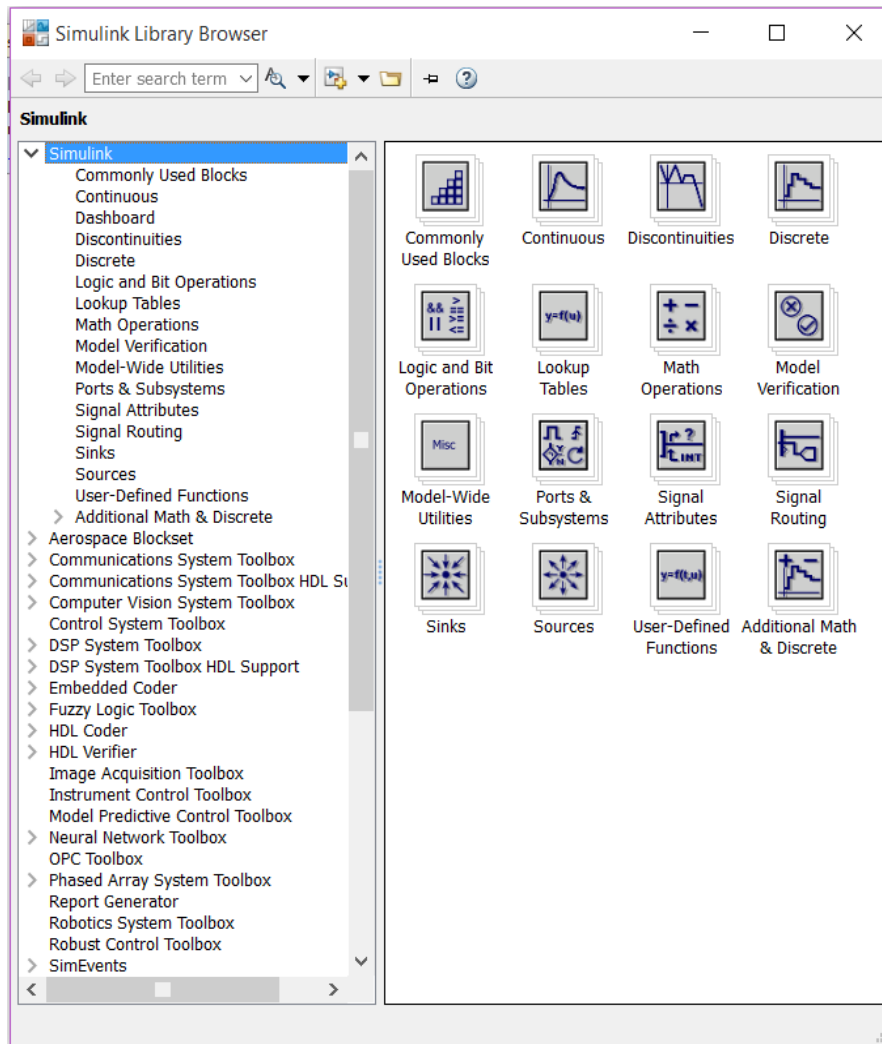
1.3 Εισαγωγή στο Simulink

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. (βλέπε [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. (βλέπε [4])



Εικόνα 1.7: 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. (βλέπε [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. (βλέπε [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:

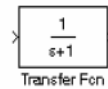
- Αρχική συνθήκη: Η αρχική συνθήκη της ολοκλήρωσης έχει τη δυνατότητα να αλλάξει. Επίσης είναι δυνατόν αν επιλεγεί το external στην ρύθμιση Initial Condition Source δίνει την αρχική συνθήκη εξωτερικά από μία άλλη πηγή.



- 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. $12+s$



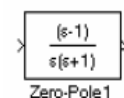
Transport Delay: Όταν χρησιμοποιείται δημιουργεί καθυστέρηση στο σήμα εισόδου. Το σήμα εξόδου συνεπώς είναι ίδιο με το σήμα εισόδου, αλλά με μία καθυστέρηση η οποία ορίζεται από το menu ρυθμίσεων. Πέρα από το κομμάτι της καθυστέρησης είναι δυνατόν να αλλάξει και η αρχική τιμή της εξόδου.



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).



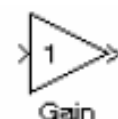
Zero – Pole: Με χρήση αυτού του block ορίζεται η συνάρτηση μεταφοράς, όπως και στο Transfer Function, όμως διαφέρει στο ότι δεν ορίζονται τα πολυώνυμα, αλλά οι ρίζες τους. Στην ένδειξη Zeros εισάγονται οι ρίζες του αριθμητή ενώ στην ένδειξη Poles εισάγονται οι ρίζες του παρονομαστή. Αν για παράδειγμα 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. (βλέπε [4])



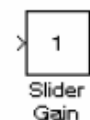
1.3.5 Βιβλιοθήκη Math Operators

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

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



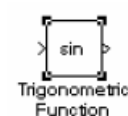
Slider Gain: Με παρόμοια λογική όπως παραπάνω αλλά με την διαφορά ότι κάνοντας διπλό click στο menu με τις ρυθμίσεις εμφανίζεται γραμμή κύλισης με την οποία μπορεί να αλλάξει η τιμή της ενίσχυσης κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.



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.



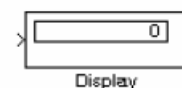
Trigonometric Function: Η έξοδος του είναι η τριγωνομετρική συνάρτηση της εισόδου του. Στο menu ρυθμίσεων μπορεί να καθοριστεί το είδος της τριγωνομετρικής συνάρτησης (sin, cos, tan κ.λ.π.). Ακόμη είναι δυνατό να καθοριστεί αν η έξοδος θα είναι πραγματική, μιγαδική, ή αν θα επιλέγεται αυτόματα ανάλογα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

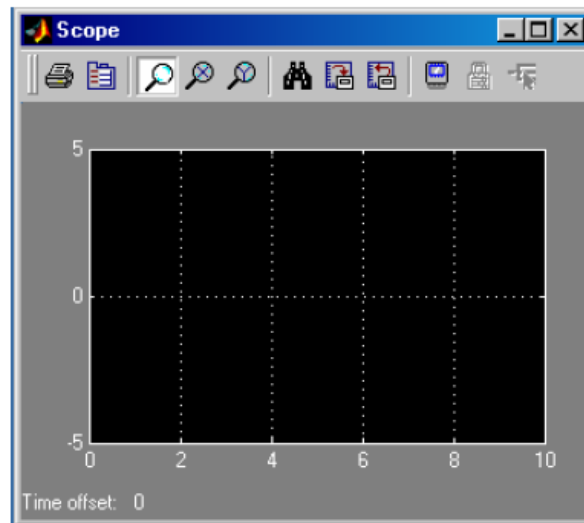


Scope: Εμφανίζει το σήμα της εισόδου σε συνάρτηση με το χρόνο. Δεν «ανοίγει» αυτόματα με την έναρξη της προσομοίωσης. Πρέπει να γίνει διπλό click πάνω του. Στη περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να παρακολουθήσει το σήμα εισόδου όταν αυτό δημιουργείται στην διάρκεια της προσομοίωσης, τότε ανοίγει το scope 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:



Εικόνα 1.8: 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.

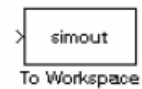
Παρατηρείται στο κάτω μέρος αριστερά ο όρος Time offset. Πρόκειται για την χρονική στιγμή της προσομοίωσης η οποία αντιστοιχεί στο μηδέν του άξονα των x. Εάν εκτελεστεί για παράδειγμα μία προσομοίωση για 50 sec, και το διάγραμμα εμφανίζει μόνο τα τελευταία 5 sec, ο άξονας του χρόνου θα ξεκινά από το 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 αφεθεί η επιλογή auto, το εύρος χρόνου καθορίζεται αυτόματα από το simulink. (βλέπε [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 οριστεί 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.



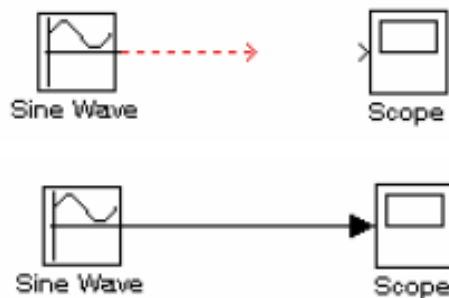
(βλέπε [4])

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.

(βλέπε [4])



Εικόνα 1.9: 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.

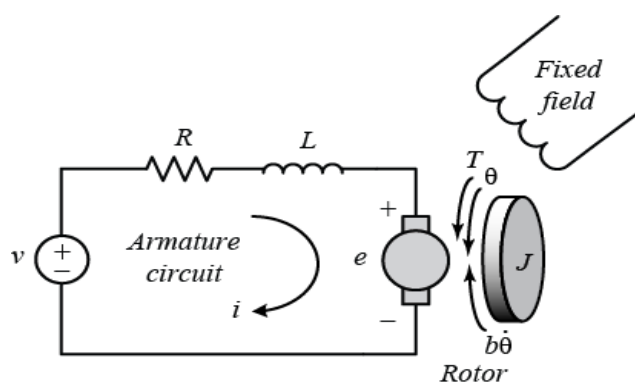
(βλέπε [4])

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΑ DC ΜΕ ΧΡΗΣΗ PID ΕΛΕΓΚΤΗ

2.1 Το μαθητικό μοντέλο του ηλεκτροκινητήρα (DC)

2.1.1 Περιγραφή

Ένας συχνός μηχανισμός στα συστήματα ελέγχου είναι ο ηλεκτροκινητήρας DC. Παρέχει άμεσα περιστροφική κίνηση και σε συνδυασμό με τροχούς ή εξέλκτρα και τα καλώδια, μπορεί να προσφέρει μεταφορική κίνηση. Το ηλεκτρικό κύκλωμα του οπλισμού και το διάγραμμα ελεύθερου σώματος του δρομέα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 2.1: Το ηλεκτρικό κύκλωμα του οπλισμού και το διάγραμμα ελεύθερου σώματος

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, θεωρήθηκε ότι η είσοδος του συστήματος είναι η πηγή τάσης (V) που εφαρμόζεται στον οπλισμό του κινητήρα, ενώ η έξοδος είναι η ταχύτητα περιστροφής του άξονα d/dt . Επίσης, ότι ο ρότορας και ο άξονας είναι άκαμπτοι. Τέλος, ότι η ροπή τριβής είναι ανάλογη προς τον άξονα γωνιακής ταχύτητας. (βλέπε [5])

Οι φυσικές παράμετροι για το παράδειγμα μας είναι:

(J) Ροπή αδρανείας του δρομέα	0.01 kg.m^2
(b) ηλεκτρομηχανική σταθερά κινητήρα	$0,1 \text{ NMS}$
(Ke) Σταθερά ηλεκτρεγερτικής δύναμης	$0,01 \text{ V / rad / sec}$
(Kt) Σταθερά ροπής του κινητήρα	$0,01 \text{ Nm / Amp}$
(R) Ηλεκτρική αντίσταση	1 Ohm
(L) Ηλεκτρική επαγωγή	0.5 H

Γενικά, η ροπή που παράγεται από έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι ανάλογη προς το ρεύμα οπλισμού και την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Σε αυτό το παράδειγμα, θεωρήθηκε ότι το μαγνητικό πεδίο είναι σταθερό και, ως εκ τούτου, ότι η ροπή του κινητήρα είναι ανάλογη με μόνο το ρεύμα οπλισμού i κατά ένα σταθερό παράγοντα K_t όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση. Αυτό αναφέρεται ως οπλισμός-ελεγχόμενου κινητήρα.

$$T = K_t i \quad (1)$$

Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, e , είναι ανάλογο με την γωνιακή ταχύτητα του άξονα κατά ένα σταθερό παράγοντα K_e .

$$e = K_e \dot{\theta} \quad (2)$$

Σε μονάδες SI, η ροπή του κινητήρα και η σταθερά ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ίσες, δηλαδή $K_t = K_e$. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιήθηκε το K για να αντιπροσωπεύει τόσο την σταθερά ροπής του κινητήρα, όσο και τη σταθερά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. (βλέπε [5])

2.1.2 Μέρη που το αποτελούν

Ο σχεδιασμός του συστήματος, διαμορφώθηκε αθροίζοντας τις ροπές που ενεργούν για την αδράνεια του ρότορα και την ενσωμάτωση της επιτάχυνσης, έτσι ώστε να δώσει σαν αποτέλεσμα την ταχύτητα. Επίσης, εφαρμόστηκαν οι νόμοι του Kirchoff στο κύκλωμα οπλισμού. Πρώτον, μοντελοποιήθηκαν τα ολοκληρώματα της περιστροφικής επιτάχυνσης και του ρυθμού μεταβολής του ρεύματος οπλισμού. (βλέπε [5])

$$\int \frac{d^2\theta}{dt^2} dt = \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

$$\int \frac{di}{dt} dt = i \quad (4)$$

Κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο Simulink:

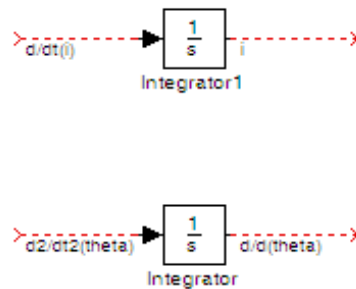
Επιλέγεται η βιβλιοθήκη του Simulink, και έπειτα γίνεται η επιλογή να ανοίξει ένα νέο παράθυρο για τη δημιουργία του μοντέλου. Στη συνέχεια, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα.

Θα τοποθετηθεί το μπλοκ Integrator από το Simulink, που βρίσκεται στο Continuous library, και θα σχεδιαστούν γραμμές από και προς τα τερματικά εισόδου και εξόδου του.

Η γραμμή εισόδου και η γραμμή εξόδου θα ονομαστούν "d2 / dt2 (theta) και "d / dt (theta)", αντίστοιχα, όπως φαίνεται παρακάτω. Για να προστεθεί μια τέτοια ετικέτα, πρέπει να γίνει διπλό κλικ στον κενό χώρο ακριβώς κάτω από τη γραμμή.

Έπειτα, θα τοποθετηθεί ένα άλλο μπλοκ Integrator πάνω από την προηγούμενο και σχεδιάζονται γραμμές από και προς τα τερματικά εισόδου και εξόδου του.

Η γραμμή εισόδου θα ονομαστεί "d / dt (i)" και η γραμμή εξόδου "i" αντίστοιχα.



Εικόνα 2.2: Τοποθέτηση των Integrator στο Simulink

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ο νόμος του Νεύτωνα και ο νόμος του Kirchhoff στο κινητικό σύστημα, για να δημιουργηθούν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T - b \frac{d\theta}{dt} \implies \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J} (K_t i - b \frac{d\theta}{dt}) \quad (5)$$

$$L \frac{di}{dt} = -Ri + V - e \implies \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} (-Ri + V - K_e \frac{d\theta}{dt}) \quad (6)$$

Η γωνιακή επιτάχυνση είναι ίση με $1 / J$ και πολλαπλασιάζεται με το άθροισμα των δύο όρων (ένα θετικό, ένα αρνητικό). Ομοίως, η παράγωγος του ρεύματος είναι ίση με $1 / L$ και πολλαπλασιάζεται με το άθροισμα τριών όρων (ένα θετικό, δύο αρνητικά). Για να διαμορφωθούν αυτές τις εξισώσεις στο Simulink, ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα.

Τοποθετήθηκαν δύο Gain μπλόκ από τη βιβλιοθήκη Simulink / Math Operations, και συνδέθηκαν με τα μπλόκ ολοκλήρωσης (integrator).

Πραγματοποιήθηκε επεξεργασία στο μπλόκ Gain ώστε να αντιστοιχεί σε γωνιακή επιτάχυνση κάνοντας διπλό κλικ και αλλάζοντας την τιμή του στο "1 / J".

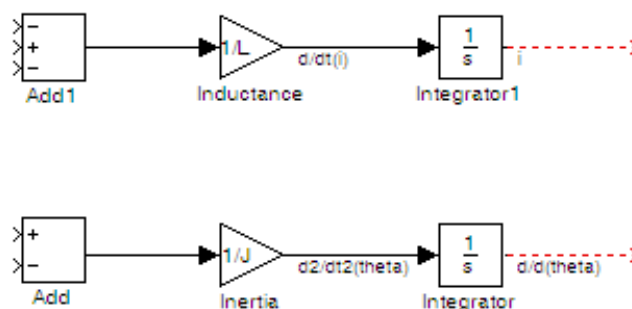
Έγινε αλλαγή στην ετικέτα του μπλοκ Gain σε "Inertia" (αδράνεια) κάνοντας κλικ στη λέξη Gain κάτω από το μπλοκ.

Ομοίως, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία στο άλλο Gain μπλόκ για να αντιστοιχεί σε "1 / L" και μετονομάστηκε η ετικέτα του σε "Inductance" (αυτεπαγωγή).

Τοποθετήθηκαν δύο Add μπλόκ από τη βιβλιοθήκη Simulink / Math Operations, το καθένα συνδεδεμένο με μια γραμμή για κάθε ένα από τα μπλόκ Gain.

Επεξεργάστηκαν τα σημεία του Add μπλόκ που αντιστοιχούν σε περιστροφή, με το "+ -" δεδομένου ότι ο ένας όρος είναι θετικός και ο άλλος είναι αρνητικός.

Επεξεργάστηκαν τα σημεία και του Add1 μπλόκ "- + -" έτσι ώστε να παριστάνει τα σημεία των όρων της ηλεκτρικής εξίσωσης. (βλέπε [5])



Εικόνα 2.3: Σύνδεση των Add, Gain και Integrator μπλόκ

Προστέθηκαν οι ροπές οι οποίες εκπροσωπούνται στην περιστροφική εξίσωση όπως επίσης και απόσβεση της ροπής.

Τοποθετήθηκε ένα μπλόκ Gain κάτω από το μπλόκ "Inertia". Στη συνέχεια, με δεξί κλικ στο μπλόκ και την επιλογή Format > Flip Block από το μενού που εμφανίζεται, αναστράφηκε το μπλόκ από αριστερά προς τα δεξιά. Επίσης υπάρχει δυνατότητα περιστροφής ενός μπλόκ κρατώντας πατημένο το πλήκτρο Ctrl-I.

Έγινε ρύθμιση στην τιμή Gain με "b" και μετονομάστηκε αυτό το μπλόκ "Damping" (απόσβεση).

Δημιουργήθηκε μια γραμμή (κρατώντας πατημένο το πλήκτρο Ctrl ενώ γίνεται η σχεδίαση ή κάνοντας δεξί κλικ στη γραμμή) από την έξοδο του Integrator και συνδέθηκε στην είσοδο του "Damping" μπλόκ.

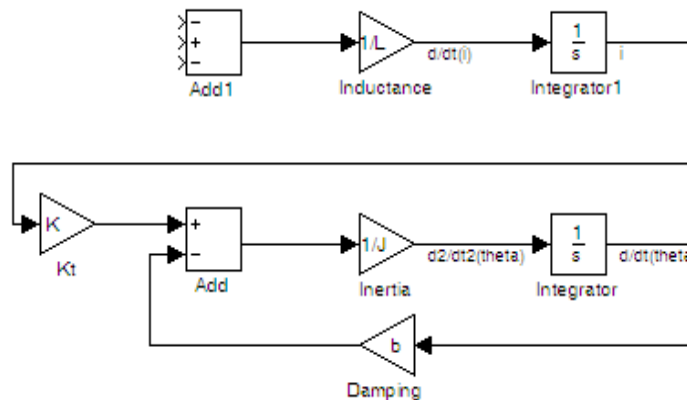
Σχεδιάστηκε μια γραμμή από την έξοδο του "Damping" μπλόκ στην αρνητική είσοδο του Add μπλόκ.

Στη συνέχεια, θα προστέθηκε η ροπή από τον οπλισμό.

Τοποθετήθηκε ένα Gain μπλόκ και το συνδέθηκε με τη θετική είσοδο του Add μπλόκ με μια γραμμή.

Επεξεργάστηκε η τιμή του στο «K» για να εκπροσωπεί τη σταθερά του κινητήρα και την ονομάστηκε «Kt».

Συνεχίζοντας τη σχεδίαση της γραμμής που οδηγείται από το Integrator συνδέθηκε με το μπλόκ «Kt». (βλέπε [5])



Εικόνα 2.4: Σύνδεση των Add, Gain και Integrator με τα Damping και Kt μπλόκ

Προστέθηκε η πτώση τάσης κατά μήκος της αντίστασης του οπλισμού.

Τοποθετήθηκε ένα Gain μπλόκ πάνω από το "Inductance" μπλόκ και περιστράφηκε από αριστερά προς τα δεξιά.

Ρυθμίστηκε η τιμή του Gain μπλόκ σε "R" και το μετονομάστηκε σε "Resistance"(αντίσταση).

Δημιουργήθηκε μια γραμμή από την έξοδο του Integrator και συνδέθηκε στην είσοδο του "Resistance" μπλόκ.

Σχεδιάστηκε μια γραμμή από την έξοδο του "Resistance" μπλόκ προς την άνω αρνητική είσοδο του Add1 μπλόκ.

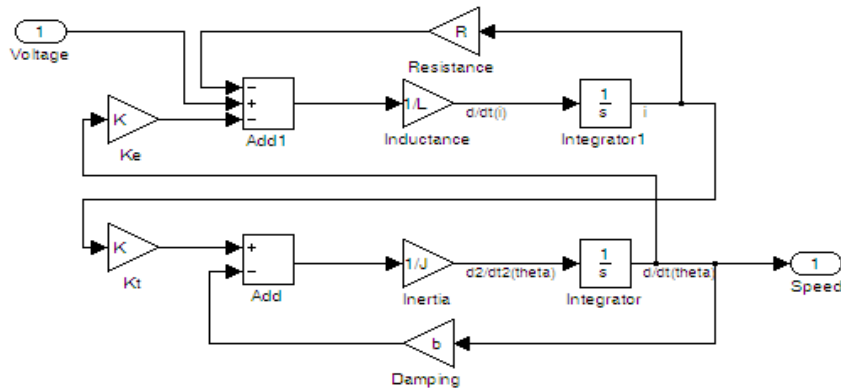
Στη συνέχεια, προστέθηκε το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από τον κινητήρα.

Τοποθετήθηκε ένα μπλόκ Gain και συνδέθηκε με μια γραμμή με την άλλη αρνητική είσοδο του Add1 μπλόκ.

Επεξεργάστηκε η τιμή «K» για να παριστάνει τη σταθερά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του κινητήρα και μετονομάστηκε το μπλόκ σε "Ke".

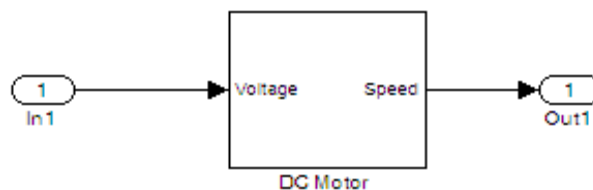
Δημιουργήθηκε μια γραμμή από την έξοδο του Integrator και συνδέθηκε με το μπλόκ "Ke".

Προστέθηκαν τα In1 και Out1 μπλόκ από το Simulink /Ports & Subsystems library και αντίστοιχα ονομάστηκαν σε "Voltage" και "Speed". (βλέπε [5])



Εικόνα 2.5: Τελική σύνδεση κυκλώματος

Για να αποθηκευθεί το κύκλωμα ως subsystem(υποσύστημα) μπλόκ, γίνεται επιλογή πρώτα όλα τα μπλόκ και στη συνέχεια, η επιλογή Create Subsystem από το Edit menu. Δίνεται όνομα στο υποσύστημα "DC Motor" και έπειτα αποθηκεύεται. Το μοντέλο που πρέπει να εμφανίζεται είναι το εξής: (βλέπε [5])



Εικόνα 2.6: Sybsystem μπλόκ

2.2 Ο έλεγχος του ηλεκτροκινητήρα (DC)

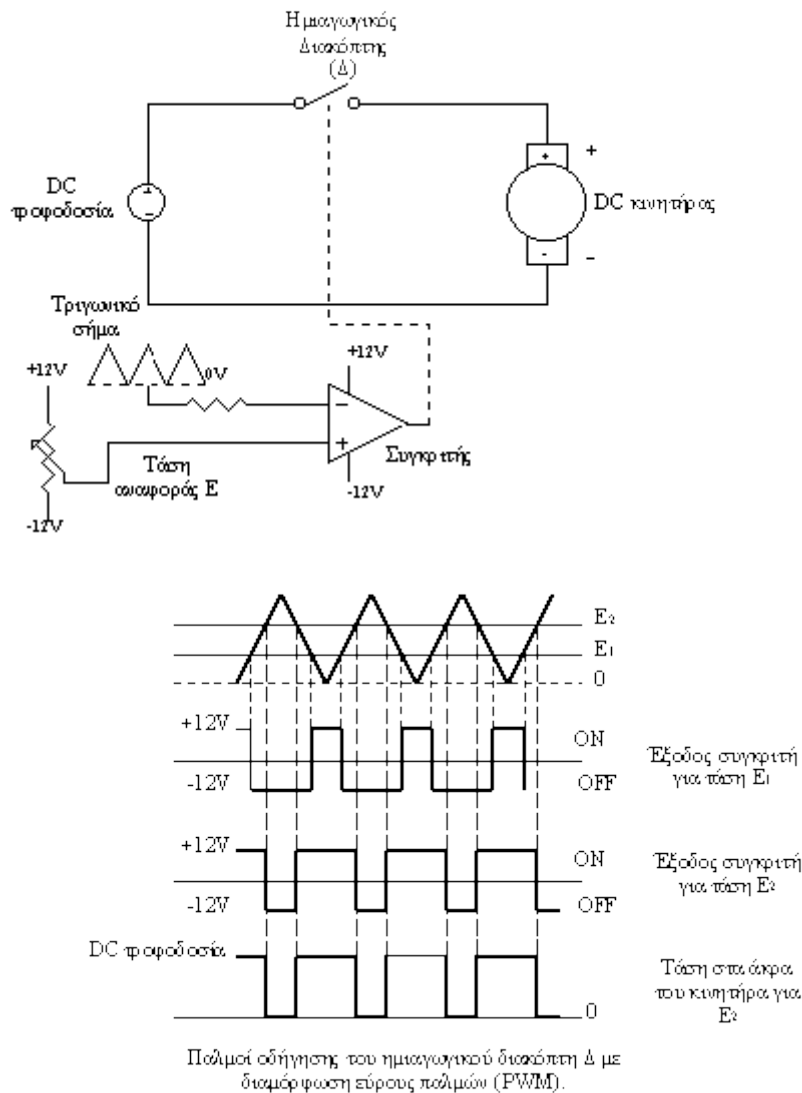
2.2.1 Ο κλασικός έλεγχος του ηλεκτροκινητήρα (DC)

Ηλεκτρονικός Έλεγχος:

Ο έλεγχος ταχύτητας ενός ηλεκτροκινητήρα DC γίνεται μέσω ελέγχου της τάσης στα άκρα του τυμπάνου του. Με αυξομείωση της τάσης τυμπάνου υπάρχει η δυνατότητα αυξομείωσης της ταχύτητας του κινητήρα.

Με χρήση του ηλεκτρονικού συστήματος που παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της τάσης τυμπάνου. Το κύκλωμα αυτό ονομάζεται τεμαχιστής (chopper) καθώς τεμαχίζει την DC τάση τροφοδοσίας και την εφαρμόζει στα άκρα του κινητήρα. Στην περίπτωση αυτή ο ημιαγωγικός διακόπτης Δ τεμαχίζει την τάση εισόδου με σταθερή διακοπτική συχνότητα αλλά με μεταβλητό

εύρος ούτως ώστε να εμφανίζεται μια παλμοσειρά τάσης στα άκρα του κινητήρα. Αυξομειώνοντας μέσω του διακόπτη Δ το εύρος αυτής της παλμοσειράς έχει ως αποτέλεσμα να αυξομειώνεται η μέση τιμή της τάσης τυμπάνου του κινητήρα και κατά συνέπεια υπάρχει αυξομείωση της ταχύτητας του. (βλέπε [6])



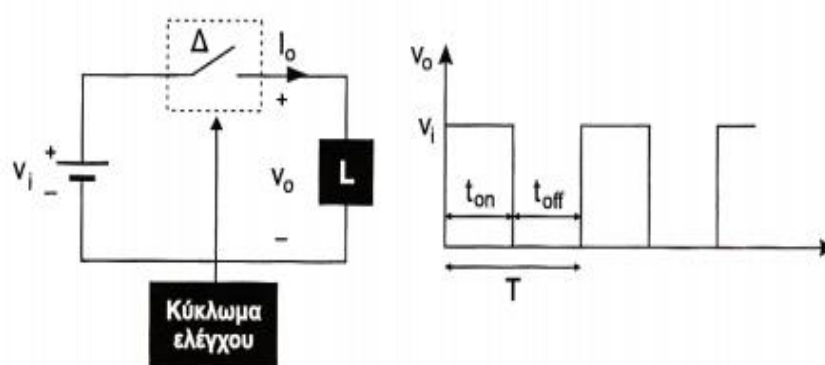
Εικόνα 2.7: Κύκλωμα και γραφική αναπαράσταση ηλεκτρονικού ελέγχου

Ο ημιαγωγικός διακόπτης Δ ανοιγοκλείνει ανάλογα με τους παλμούς οδήγησης που προέρχονται από την έξοδο του συγκριτή. Στη μία είσοδο του συγκριτή υπάρχει μία τριγωνική κυματομορφή, η οποία δημιουργείται από μία γεννήτρια, και στην άλλη μία τάση DC (τάση αναφοράς) τιμής E, η οποία προέρχεται από ένα ποτενσιόμετρο. Ο συγκριτής παράγει στην έξοδό του μια παλμική τάση της οποίας η συχνότητα είναι η ίδια με την συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής και μεταβλητού εύρους. Η μεταβολή του εύρους των παλμών εξαρτάται από την DC τάση αναφοράς E. Όταν η τάση αναφοράς E είναι μεγαλύτερη από την τριγωνική κυματομορφή η έξοδος του συγκριτή πηγαίνει στα +12Volts. Όταν η τάση αναφοράς E είναι μικρότερη από την τριγωνική κυματομορφή τότε η έξοδος του συγκριτή πηγαίνει στα -12Volts. Άρα ο συγκριτής λειτουργεί ως διακόπτης του οποίου η έξοδος πηγαίνει στα +12Volts ή -12Volts αναλόγως με το αποτέλεσμα της

σύγκρισης των δύο σημάτων εισόδου. Συνεπώς, το εύρος των παλμών της τάσης εξόδου του συγκριτή καθορίζεται από τα σημεία τομής της τριγωνικής κυματομορφής και της τάσης αναφοράς E . Αυξομειώνοντας την τάση αναφοράς E επιτυγχάνονται παλμοί οδήγησης για τον ημιαγωγικό διακόπτη Δ σταθερής συχνότητας και μεταβλητό εύρους. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία παλμοσειρά τάσης μεταβλητού εύρους στα άκρα του κινητήρα και επομένως μεταβλητής μέσης τιμής που έχει ως αποτέλεσμα τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα. Ο ημιαγωγικός διακόπτης Δ ο οποίος στην περίπτωση αυτή λειτουργεί είτε στην περιοχή κορεσμού είτε στην περιοχή αποκοπής είναι δυνατό να υλοποιηθεί με τρανζίστορ ισχύος, MOSFET ισχύος, θυρίστορ, GTO ή IGBT ανάλογα με τις απαιτήσεις ισχύος του DC ηλεκτροκινητήρα. (βλέπε [6])

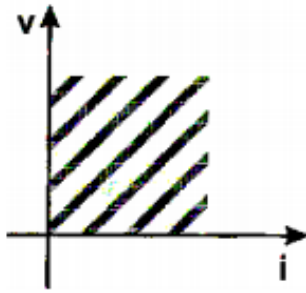
Έλεγχος κινητήρων DC μέσω μετατροπέα DC-DC:

Ο μετατροπέας DC-DC μετατρέπει μια συνεχή τάση σε μια ακολουθία θετικών παλμών. Μεταβάλλοντας το βαθμό χρησιμοποίησης (duty-cycle) των παλμών αυτών, δηλαδή τον χρόνο αγωγής σε σχέση με την περίοδο λειτουργίας, πραγματοποιείται έλεγχος της μέσης τιμής της τάσης εξόδου. (βλέπε [7])



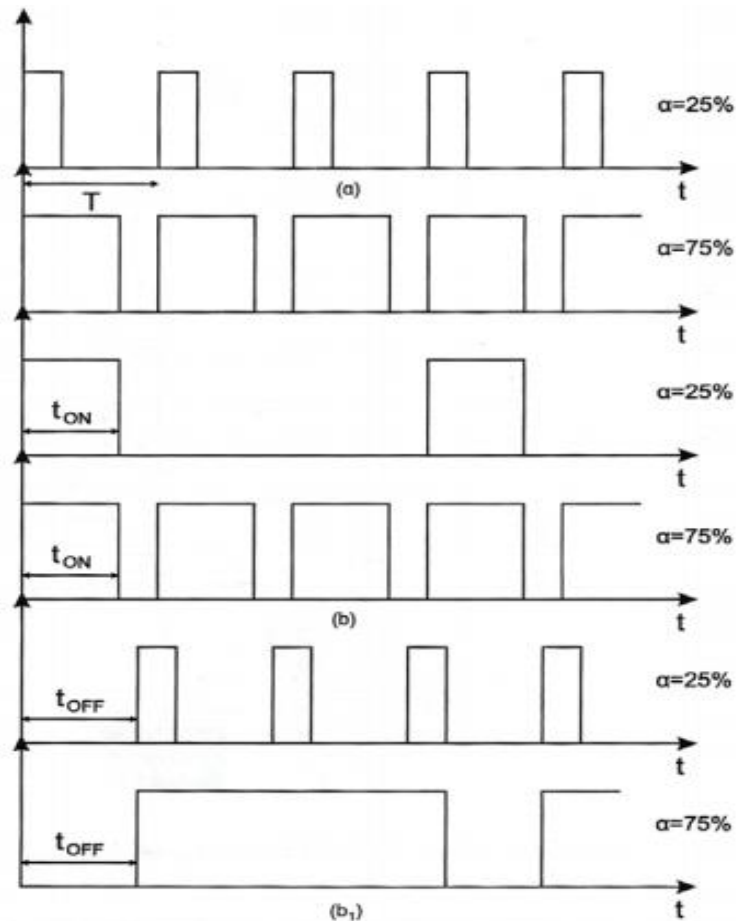
Εικόνα 2.8: Μετατροπέας DC-DC- Τάση εξόδου

Οι μετατροπείς DC-DC ανάλογα με τα τεταρτημόρια λειτουργίας στα οποία λειτουργούν, χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες. Σύμφωνα με την εικόνα 2.8 και έχοντας ως φορτίο μια μηχανή DC, με τον μετατροπέα μας, η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας στο 1ο τεταρτημόριο (εικόνα 2.9)



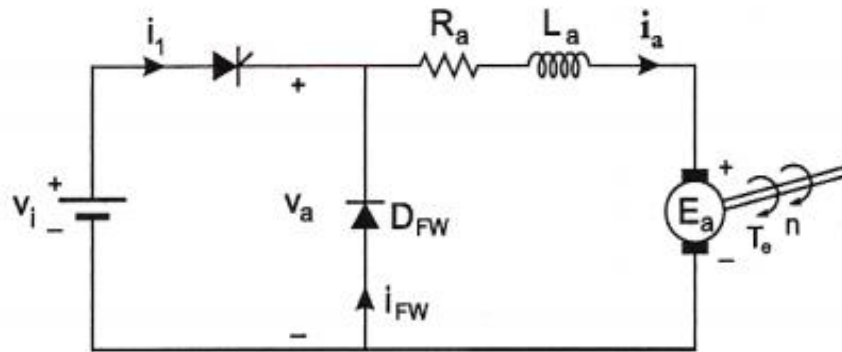
Εικόνα 2.9: Τεταρτημόριο λειτουργίας του μετατροπέα

Σημαντικό είναι να τονισθεί ότι οι ελεγχόμενοι ηλεκτρονικοί διακόπτες που παρεμβάλλονται μεταξύ πηγής και φορτίου, είναι δυνατό να είναι τρανζίστορ ισχύος, θυρίστορ ή GTO. Η χρήση των τρανζίστορ (MOSFET ισχύος, IGBT) και των GTO προσφέρεται περισσότερο, καθώς αποφεύγονται τα κυκλώματα εξαναγκασμένης μεταγωγής που απαιτεί η χρήση των θυρίστορ. (βλέπε [7])



Εικόνα 2.10: Μέθοδοι μεταβολής του βαθμού χρησιμοποίησης

Ένα κύριο χαρακτηριστικό του μετατροπέα είναι ότι η μέση τιμή της τάσης εξόδου δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου (step-down converter). Στην εικόνα 2.11, παρουσιάζεται το κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα, με φορτίο το τύλιγμα τυμπάνου ενός κινητήρα DC ξένης διέγερσης. (βλέπε [7])



Εικόνα 2.11: Μετατροπέας-Κινητήρας Σ.Ρ./Ξ.Δ.

Στα διαστήματα παλμοδότησης του θυρίστορ, εφαρμόζεται στα άκρα του τυλίγματος τυμπάνου η τάση εισόδου του μετατροπέα. Στα διαστήματα μη αγωγής του θυρίστορ, λόγω της συσσωρευμένης ενέργειας στην αυτεπαγωγή, βραχυκυκλώνεται το τύλιγμα τυμπάνου μέσω της διόδου ελευθέρως ροής. Ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης του κινητήρα και την τιμή του βαθμού χρησιμοποίησης, η αγωγή του ρεύματος τυμπάνου είτε είναι συνεχής είτε ασυνεχής. Πιο συχνά αυτή που επιδιώκεται είναι η συνεχής, διότι είναι πρακτικότερη, οικονομικότερη και βελτιώνει τη δυναμική απόκριση του συστήματος. Στην πράξη ο μετατροπέας λειτουργεί και με τους δυο τρόπους, δηλαδή με συνεχή και ασυνεχή αγωγή ταυτόχρονα, οι οποίοι όμως έχουν έντονα διαφορετικά χαρακτηριστικά. Γι' αυτό τον λόγο, ένας μετατροπέας και ο ελεγχός του πρέπει να σχεδιάζονται με βάση και τους δυο τρόπους λειτουργίας. (βλέπε [7])

2.2.2 Ο ελεγκτής τριών όρων και η εφαρμογή του

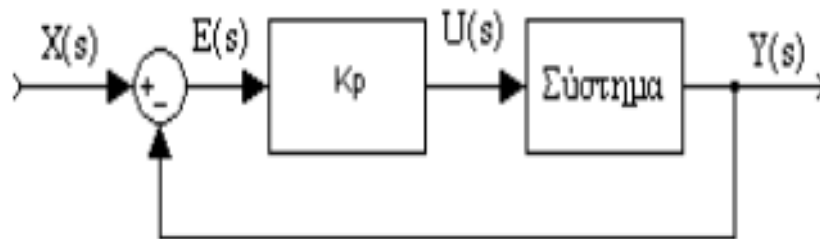
Ελεγκτές Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου

Στα συστήματα αυτόματου ελέγχου χρησιμοποιούνται συνδυασμοί 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 βρόχου, 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. (βλέπε [8])

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. (βλέπε [8])



Εικόνα 2.12: 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:

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

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:

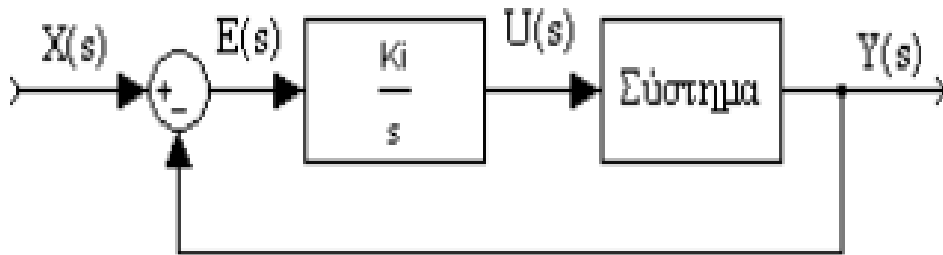
$$e_{ss} = 1 - \lim_{s \rightarrow 0} (s * G_{c(s)} * \frac{1}{s}) = 1 - \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K_p}{s^2 + s * A + B + K_p} \rightarrow e_{ss} = 1 - \frac{K_p}{B + K_p}$$

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 . (βλέπε [8])

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:

(βλέπε [8])



Εικόνα 2.13: Μπλόκ-Διάγραμμα του ολοκληρωτικού 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:

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

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

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

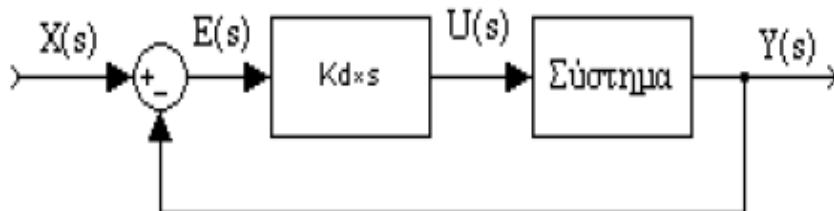
Επομένως το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μηδενίζεται με τη χρήση ολοκληρωτικού ελεγκτή I.

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 $2\zeta\omega_n$, 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. (βλέπε [8])

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. (βλέπε [8])



Εικόνα 2.14: Μπλόκ-Διάγραμμα του διαφορικού ελεγκτή D

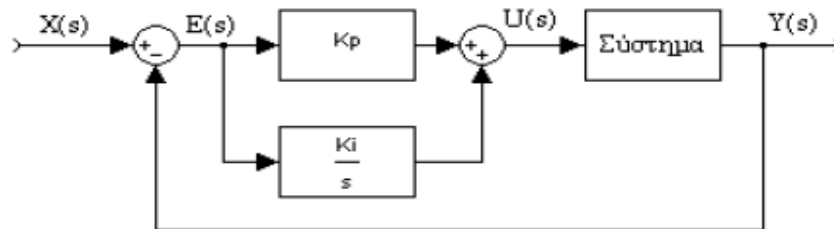
Ο διαφορικός ελεγκτής εισάγει στο σύστημα ένα μηδενικό και η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι η εξής:

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

Ο διαφορικός ελεγκτής περιορίζει το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση στο στάδιο της μεταβατικής απόκρισης των συστημάτων, ωστόσο στη πράξη δεν χρησιμοποιείται ποτέ μόνος του. (βλέπε [8])

Αναλογικός-Ολοκληρωτικός(PI) ελεγκτής

Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής PI αθροίζει τον αναλογικό και τον ολοκληρωτικό έλεγχο. Η συνδεσμολογία του φαίνεται στο εξής σχήμα. (βλέπε [8])



Εικόνα 2.15: 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:

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

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

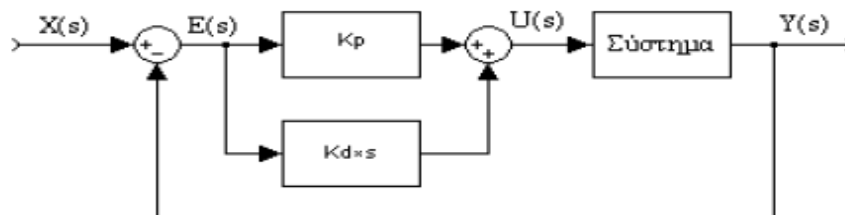
Το σύστημα αλλάζει και γίνεται με: $\omega_n = K_i$ και $2 * \zeta * \omega_n = A + K_p$

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.

(βλέπε [8])

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:



Εικόνα 2.16: 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. (βλέπε [8])

Αν το σύστημα που ελέγχουμε είναι σε συνάρτηση μεταφοράς $G_{(s)} = \frac{1}{s^2 + A*s + B}$

τότε η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου με αναλογικό-διαφορικό ελεγκτή είναι η εξής:

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

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

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

Το χαρακτηριστικά του νέου συστήματος είναι τα εξής:

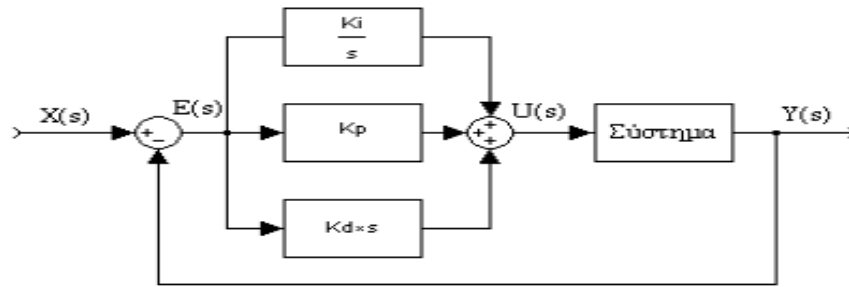
$$\omega_n = B + K_p \text{ και } 2 * \zeta * \omega_n = A + K_d$$

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. (βλέπε [8])

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. (βλέπε [8])



Εικόνα 2.17: Μπλόκ-Διάγραμμα του αναλογικού-ολοκληρωτικού-διαφορικού ελεγκτή PID

Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής εισάγει στο υπό έλεγχο σύστημα ανοιχτού βρόχου 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 ελεγκτής, θα πρέπει να σχεδιαστεί κατάλληλη επιλογή των τριών παραμέτρων του αναλογικού κέρδους, του ολοκληρωτικού συντελεστή και του διαφορικού συντελεστή ούτως ώστε το σύστημα κλειστού βρόχου 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. (βλέπε [8])

2.2.3 Περιγραφή Συστήματος

Οι δυναμικές εξισώσεις Laplace και η συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου του DC κινητήρα είναι οι εξής :

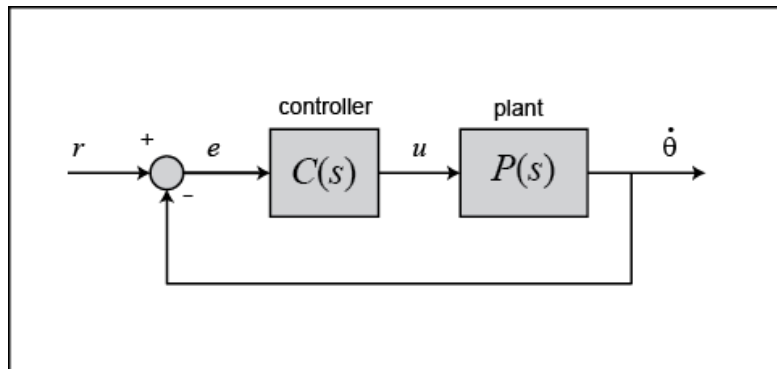
(βλέπε [9])

$$s(Js + b)\Theta(s) = KI(s) \quad (1)$$

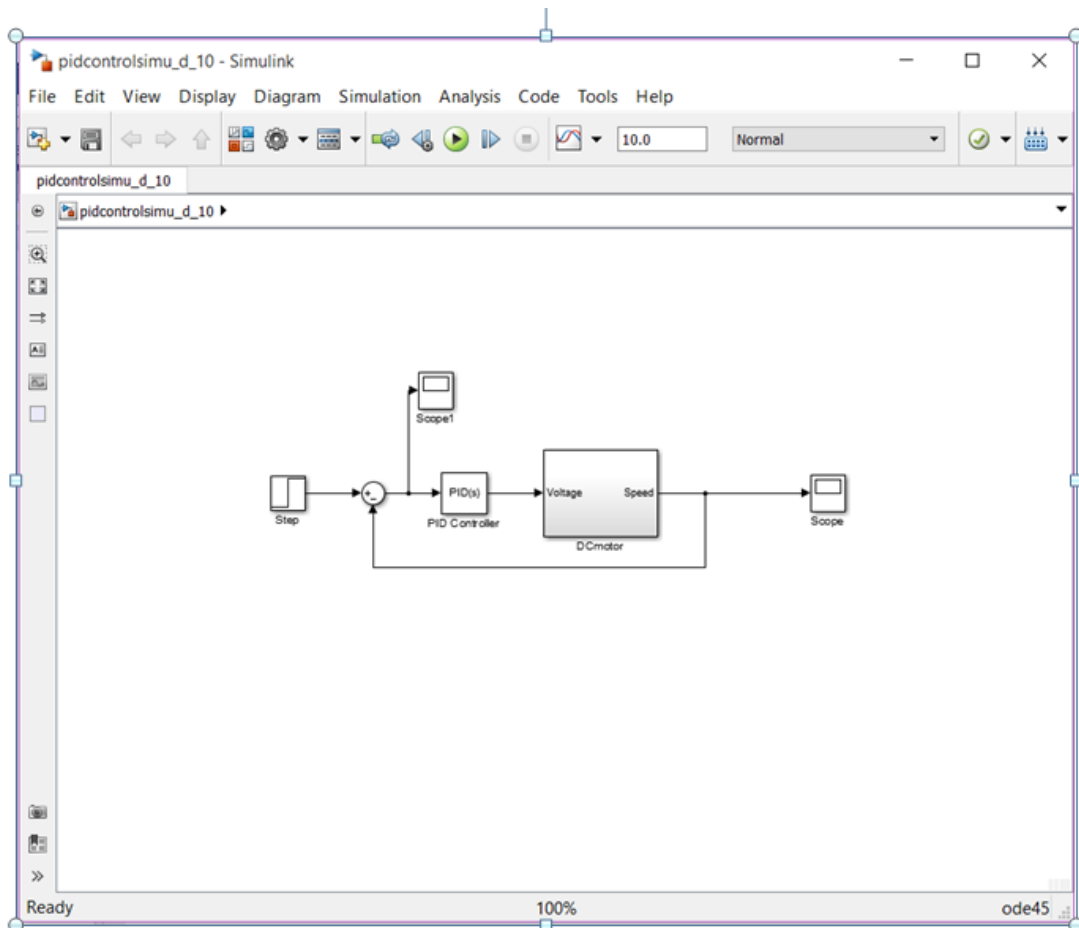
$$(Ls + R)I(s) = V(s) - Ks\Theta(s) \quad (2)$$

$$P(s) = \frac{\dot{\Theta}(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2} \quad \left[\frac{\text{rad/sec}}{V} \right] \quad (3)$$

Η δομή του συστήματος ελέγχου έχει τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:




Εικόνα 2.18: Μπλόκ-Διάγραμμα Συστήματος



Εικόνα 2.19: Απεικόνιση του συστήματος στο Simulink

Για το κύκλωμα χρησιμοποιήθηκαν τα εξής μπλόκ:

Μία βηματική είσοδος Step 
Step

Ένας αθροιστή Sum 
Sum

Ένας ελεγκτή PID 
PID Controller

Ο ηλεκτοκινητήρας DC 
DCmotor

Δύο παλμογράφοι Scope 
Scope

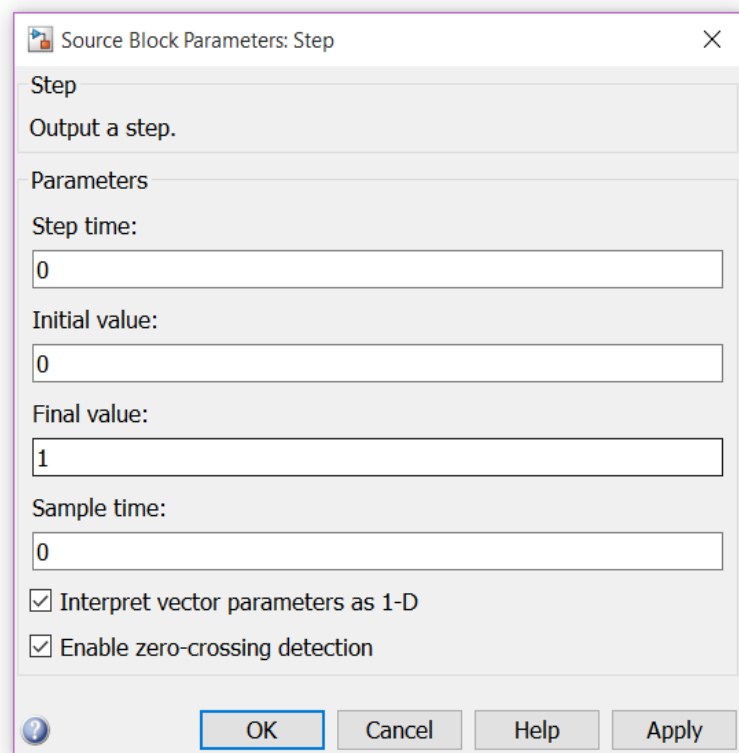
Ο κύριος κώδικας του συστήματος είναι ο εξής:

```
J = 0.01;  
B = 0.1;  
K = 0.01;  
R = 1;  
L = 0.5;  
S = tf('s');  
MOTOR = K/((J*S+B)*(L*S+R)+K^2);
```

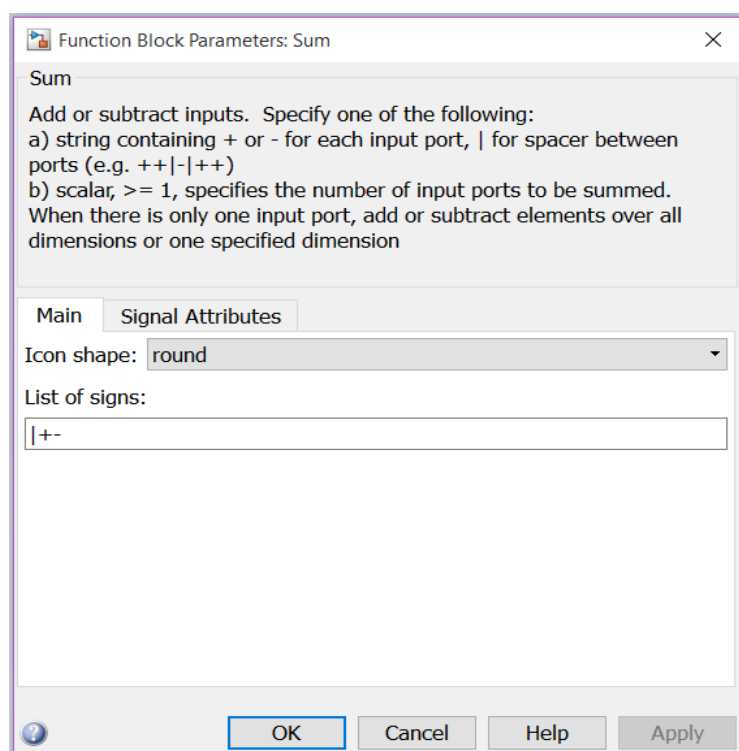
Ορίστηκαν, δηλαδή, οι μεταβλητές J,b,K,R,L έτσι ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμητή συνάρτηση μεταφοράς.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}$$

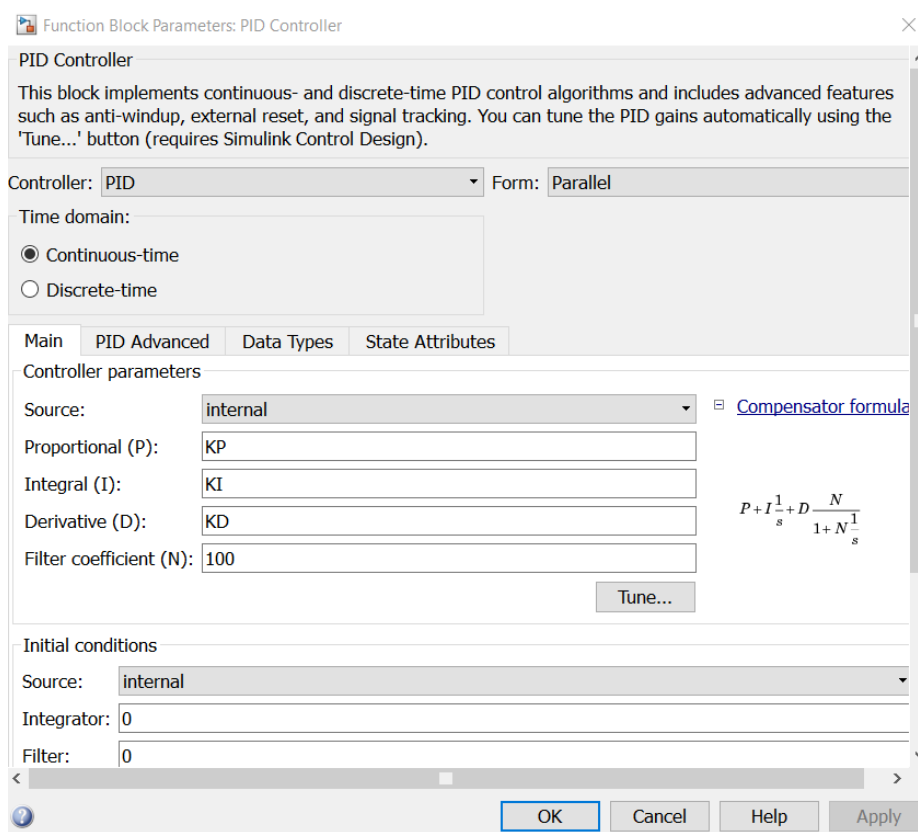
Τα μπλόκ Step και Sum και PID έχουν τα εξής στοιχεία:



Εικόνα 2.20: Παράθυρο του Step μπλόκ



Εικόνα 2.21: Παράθυρο του Sum μπλόκ



Εικόνα 2.22: Παράθυρο του PID μπλόκ

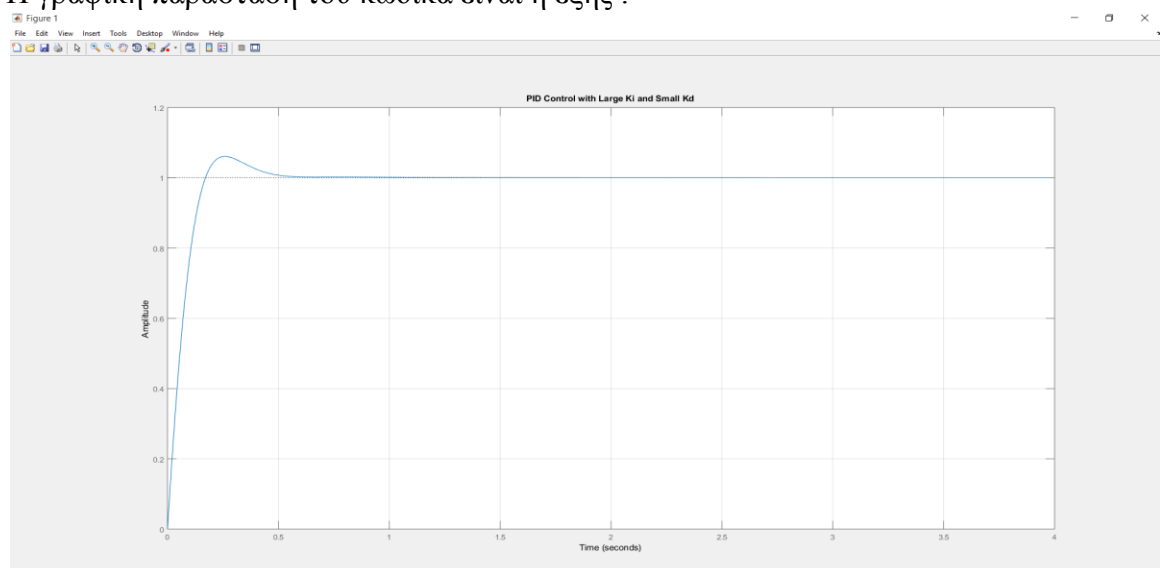
Στη συνέχεια εισάχθηκαν στον κώδικα οι τιμές των ελεγκτών K_p, K_i, K_d :

```

KP = 100;
KI = 200;
KD = 5;
Z = pid(KP,KI,KD);
sys_c = feedback(Z*MOTOR,1);
step(sys_c, 0:0.01:4)
grid
title('PID Control with Large Ki and Small Kd')

```

Η γραφική παράσταση του κώδικα είναι η εξής :



Εικόνα 2.23: Γραφική παράσταση του κώδικα

Οι γραφικές παραστάσεις που έχουν σαν αποτέλεσμα οι δύο παλμογράφοι είναι οι εξής:



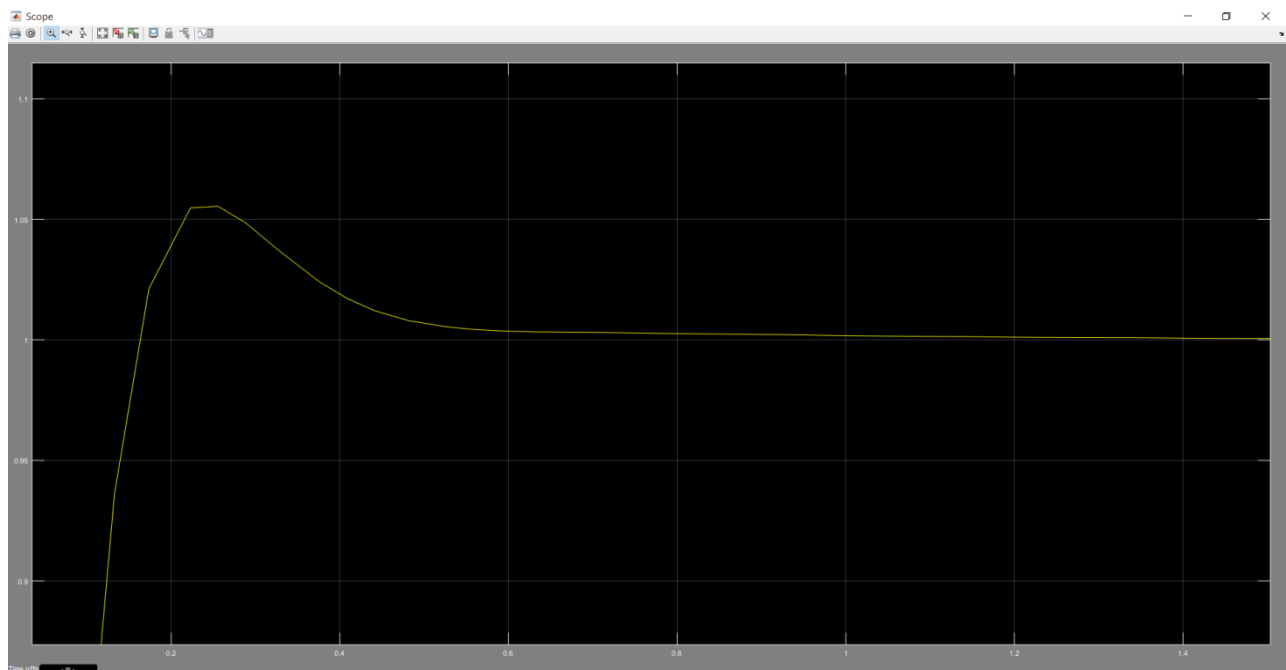
Εικόνα 2.24: Γραφική απεικόνιση του Scope1



Εικόνα 2.25: Γραφική απεικόνιση του Scope



Εικόνα 2.26: Γραφική απεικόνιση του Scope όταν σταθεροποιείται το σύστημα

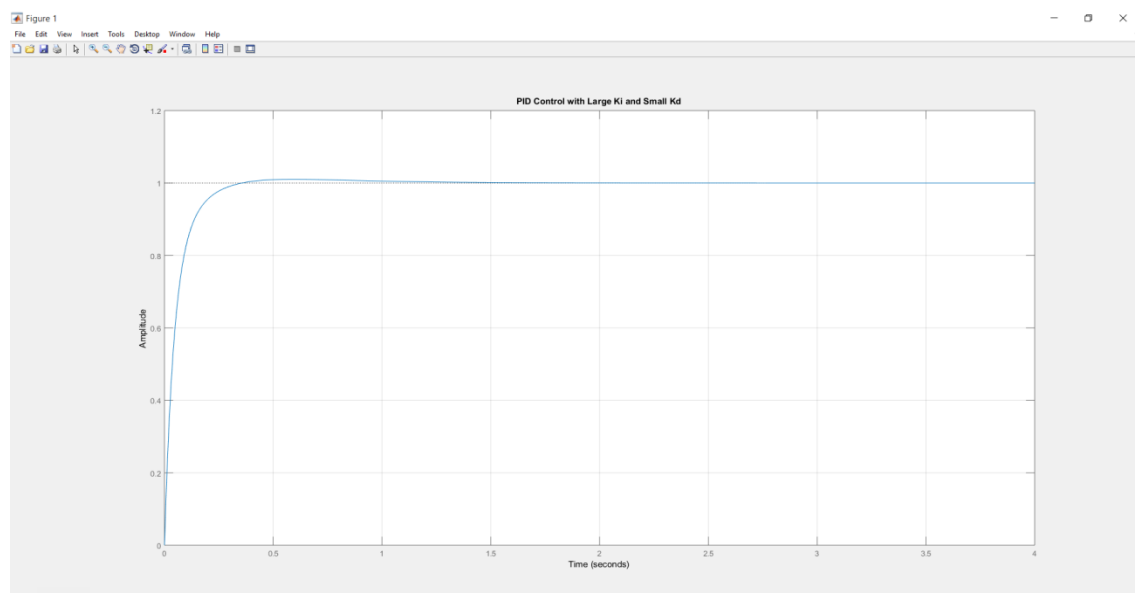


Εικόνα 2.27: Γραφική απεικόνιση του Scope του χρόνου αποκατάστασης

Όπως φαίνεται από τις αποκρίσεις του συστήματος πριν τον έλεγχο (Εικόνα 2.24) η γραφική παράσταση κατευθύνεται ανάποδα ενώ μετά τον έλεγχο (Εικόνα 2.26) κατευθύνεται στο επιθυμητό αποτέλεσμα που είναι το 1. Ωστόσο παρατηρήθηκε ότι το σύστημα κινείται αρχικά με απότομη κίνηση για την επίτευξη του στόχου και ότι οι τιμές των K_p, K_i, K_d δεν μας έδωσαν ακριβώς το επιθυμητό αποτέλεσμα διότι το σύστημα δεν σταθεροποιείται στο 1 αλλά στο 1.0002. Εφόσον λοιπόν υπάρχει υπερύψωση στο σύστημα χρειάζεται να αλλάξουν οι τιμές των ελεγκτών. Γνωρίζοντας ότι ο διαφορικός ελεγκτής D όσο αυξάνεται τόσο μειώνεται η υπερύψωση δημιουργήθηκε ο παρακάτω κώδικας.

```
J = 0.01;
B = 0.1;
K = 0.01;
R = 1;
L = 0.5;
S = tf('s');
MOTOR = K/((J*S+B)*(L*S+R)+K^2);
KP = 100;
KI = 200;
KD = 10;
Z = pid(KP,KI,KD);
sys_c = feedback(Z*MOTOR,1);
step(sys_c, 0:0.01:4)
grid
title('PID Control with Large Ki and Small Kd')
```

Η γραφική παράσταση του κώδικα είναι η εξής :



Εικόνα 2.28: Γραφική παράσταση του κώδικα

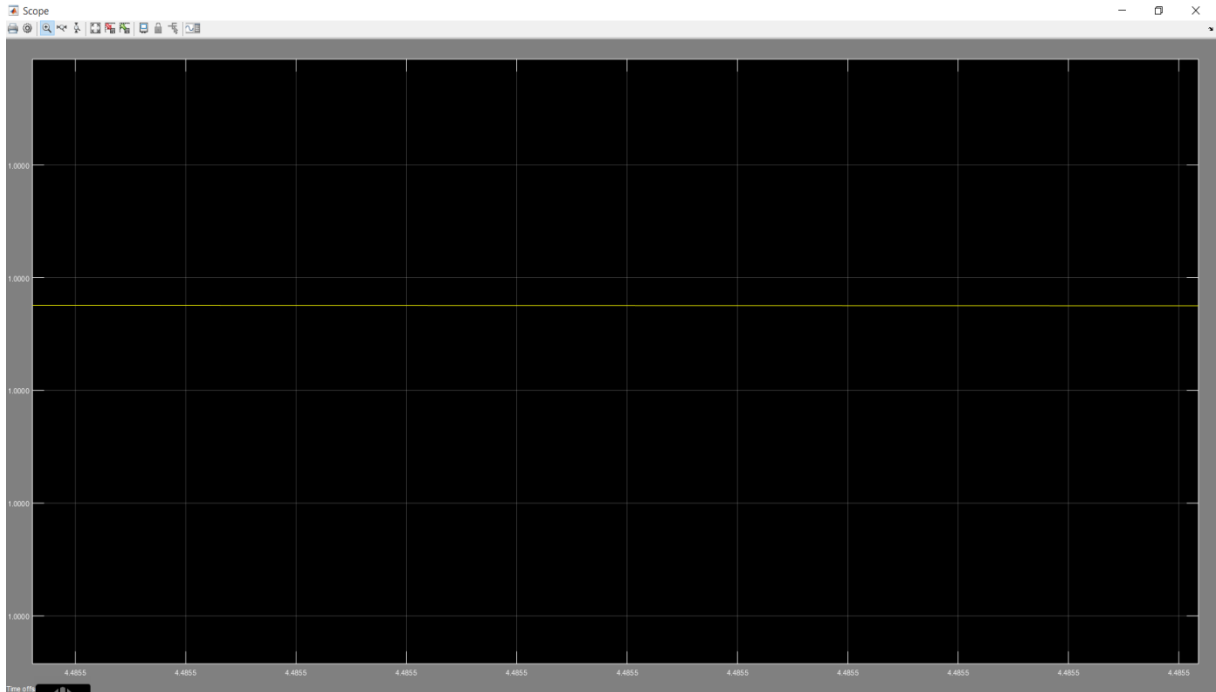
Οι γραφικές παραστάσεις που έχουν σαν αποτέλεσμα οι δύο παλμογράφοι είναι οι εξής:



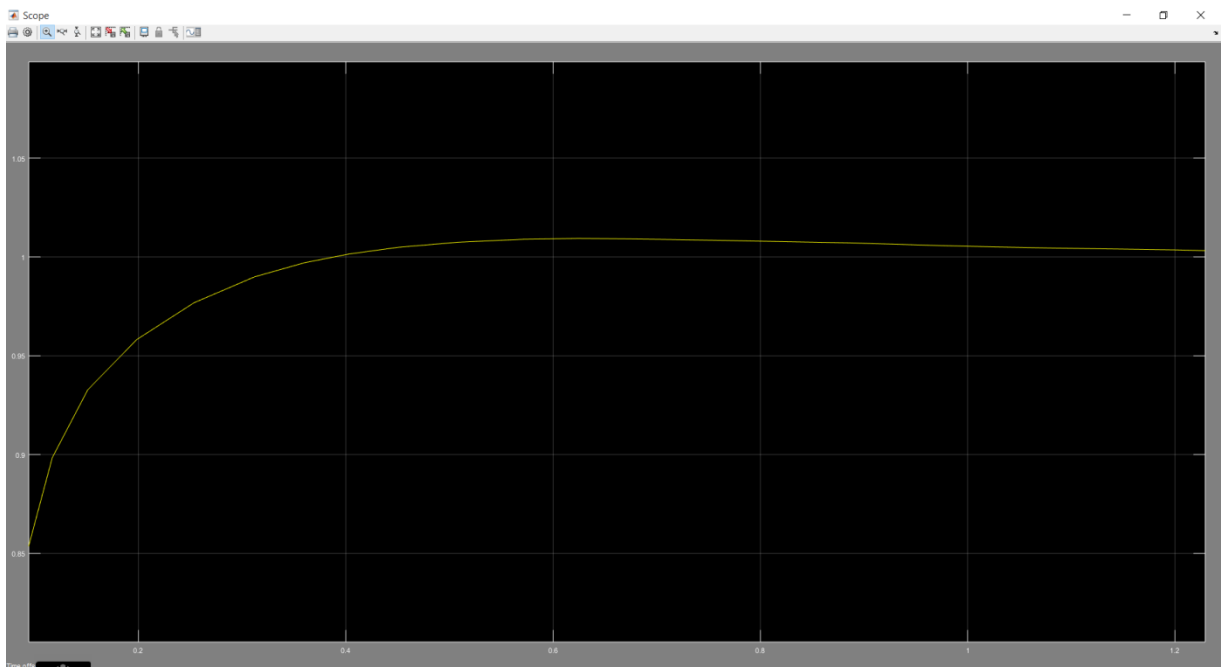
Εικόνα 2.29: Γραφική απεικόνιση του Scope1



Εικόνα 2.30: Γραφική απεικόνιση του Scope



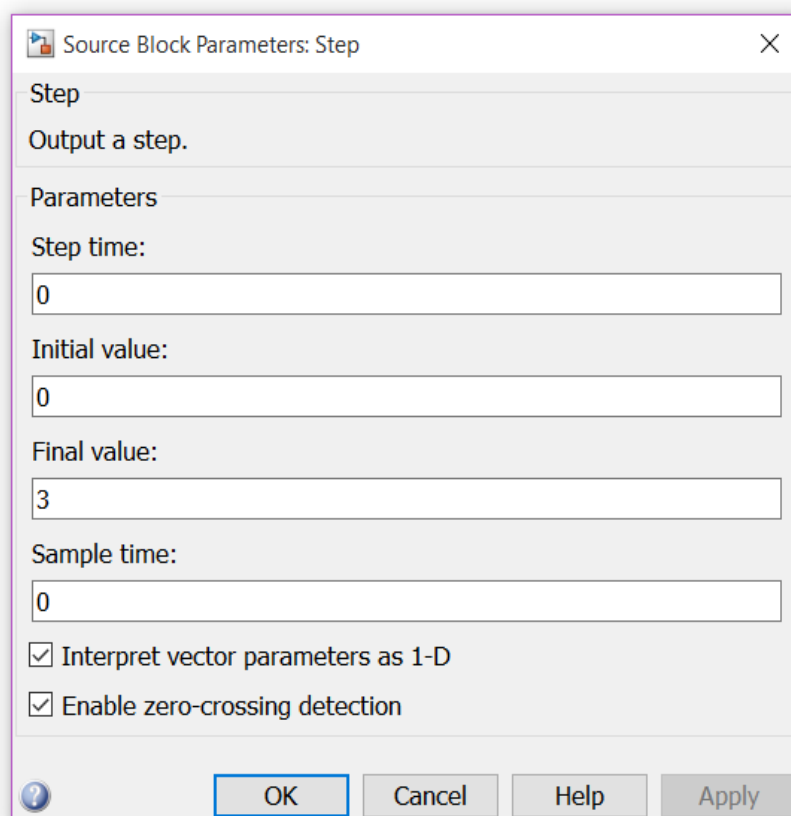
Εικόνα 2.31: Γραφική απεικόνιση του Scope όταν σταθεροποιείται το σύστημα



Εικόνα 2.32: Γραφική απεικόνιση του Scope του χρόνου αποκατάστασης

Μέσα από τις αποκρίσεις του συστήματος γίνεται αντιληπτό ότι πριν τον έλεγχο (Εικόνα 2.29) η γραφική παράσταση κατευθύνεται ανάποδα ενώ μετά τον έλεγχο (Εικόνα 2.30) κατευθύνεται στο επιθυμητό αποτέλεσμα που είναι το 1. Παρατηρήθηκε ότι το σύστημα κινείται με ομαλή κίνηση για την επίτευξη του στόχου και ότι οι τιμές των K_p, K_i, K_d μας έδωσαν ακριβώς το επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς το σύστημα σταθεροποιείται στο 1. Διαπιστώθηκε λοιπόν ότι αυξάνοντας την τιμή του διαφορικού ελεγκτή D μειώνεται το σφάλμα της υπερύψωσης.

Έπειτα ήταν απαραίτητο να εξεταστεί αν οι τιμές των ελεγκτών λειτουργούν για όλες τις πιθανές τιμές βηματικής εισόδου. Γι αυτό πραγματοποιήθηκε η ακόλουθη διαδικασία. Ο κώδικας του συστήματος και οι τιμές K_p, K_i, K_d παρέμειναν ίδιες αλλά τοποθετήθηκε ως τιμή εισόδου ο αριθμός 3, αντί για τον αριθμό 1 που είχαμε στο προηγούμενο σύστημα.



Εικόνα 2.33: Παράθυρο του Step μπλόκ

Οι γραφικές παραστάσεις που έχουν σαν αποτέλεσμα οι δύο παλμογράφοι είναι οι εξής:



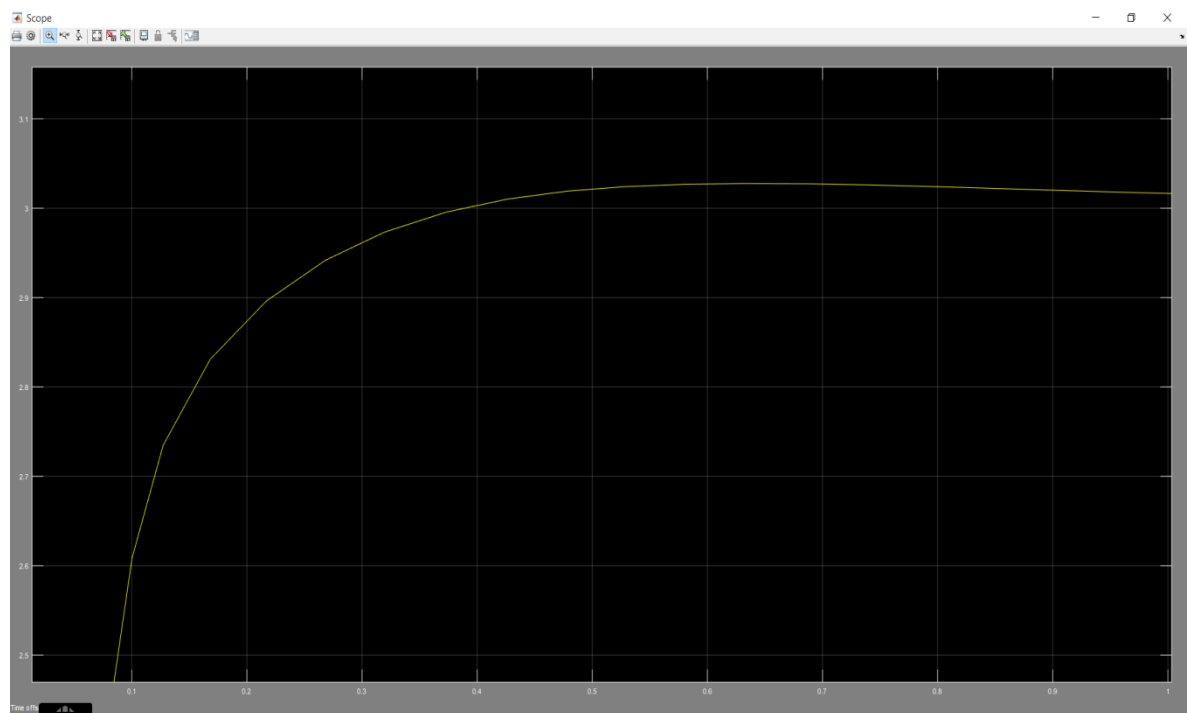
Εικόνα 2.34: Γραφική απεικόνιση του Scope1



Εικόνα 2.35 Γραφική απεικόνιση του Scope



Εικόνα 2.36: Γραφική απεικόνιση του Scope όταν σταθεροποιείται το σύστημα

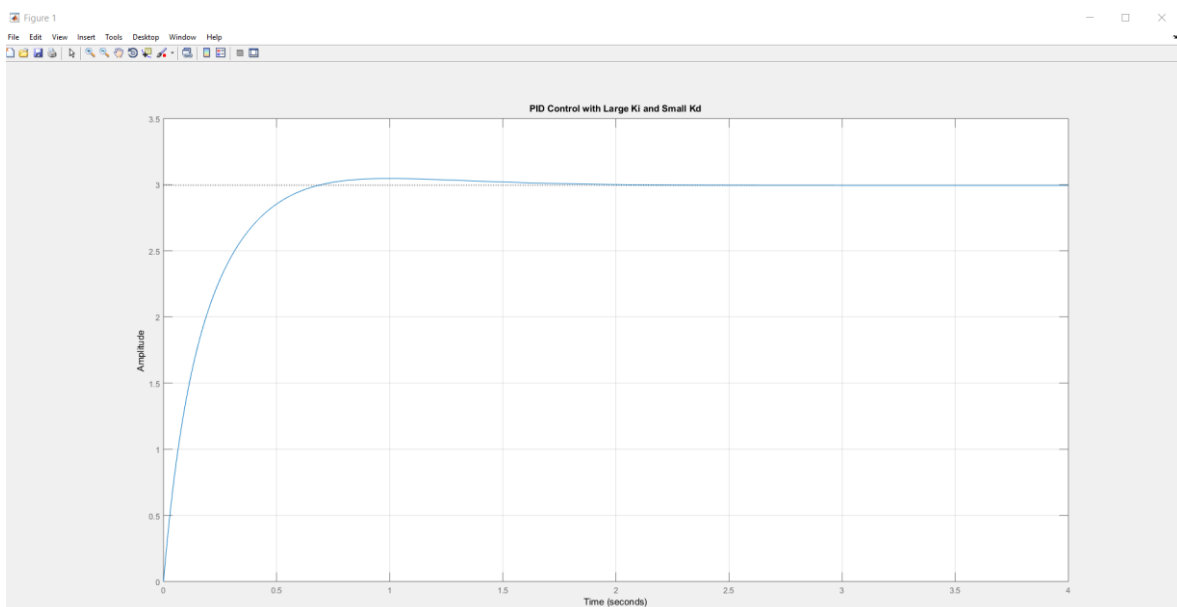


Εικόνα 2.37: Γραφική απεικόνιση του Scope του χρόνου αποκατάστασης

Από τις αποκρίσεις του συστήματος είναι αντιληπτό ότι πριν τον έλεγχο (Εικόνα 2.34) η γραφική παράσταση κατευθύνεται ανάποδα ενώ μετά τον έλεγχο (Εικόνα 2.35) κατευθύνεται στο επιθυμητό αποτέλεσμα που είναι το 3. Παρατηρήθηκε ότι το σύστημα κινείται με απότομη κίνηση για την επίτευξη του στόχου και ότι οι τιμές των K_p, K_i, K_d δεν μας έδωσαν ακριβώς το επιθυμητό αποτέλεσμα διότι το σύστημα δεν σταθεροποιείται στο 3 αλλά στο 3.0003. Διαπιστώθηκε λοιπόν ότι οι τιμές των ελεγκτών δεν επιφέρουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα για όλες τις τιμές βηματικών εισόδων. Εφόσον λοιπόν υπάρχει υπερέγωση στο σύστημα χρειάζεται να αλλάξει ο διαφορικός ελεγκτής D, έτσι δημιουργήθηκε ο παρακάτω κώδικας.

```
J = 0.01;
B = 0.1;
K = 0.01;
R = 1;
L = 0.5;
S = tf('s');
MOTOR = K/((J*S+B)*(L*S+R)+K^2);
KP = 100;
KI = 200;
KD = 11.84;
Z = pid(KP,KI,KD);
sys_c = feedback(Z*MOTOR,0.334);
step(sys_c, 0:0.01:4)
grid
title('PID Control with Large Ki and Small Kd')
```

Η γραφική παράσταση του κώδικα είναι η εξής :



Εικόνα 2.38: Γραφική παράσταση του κώδικα

Οι γραφικές παραστάσεις που έχουν σαν αποτέλεσμα οι δύο παλμογράφοι είναι οι εξής:



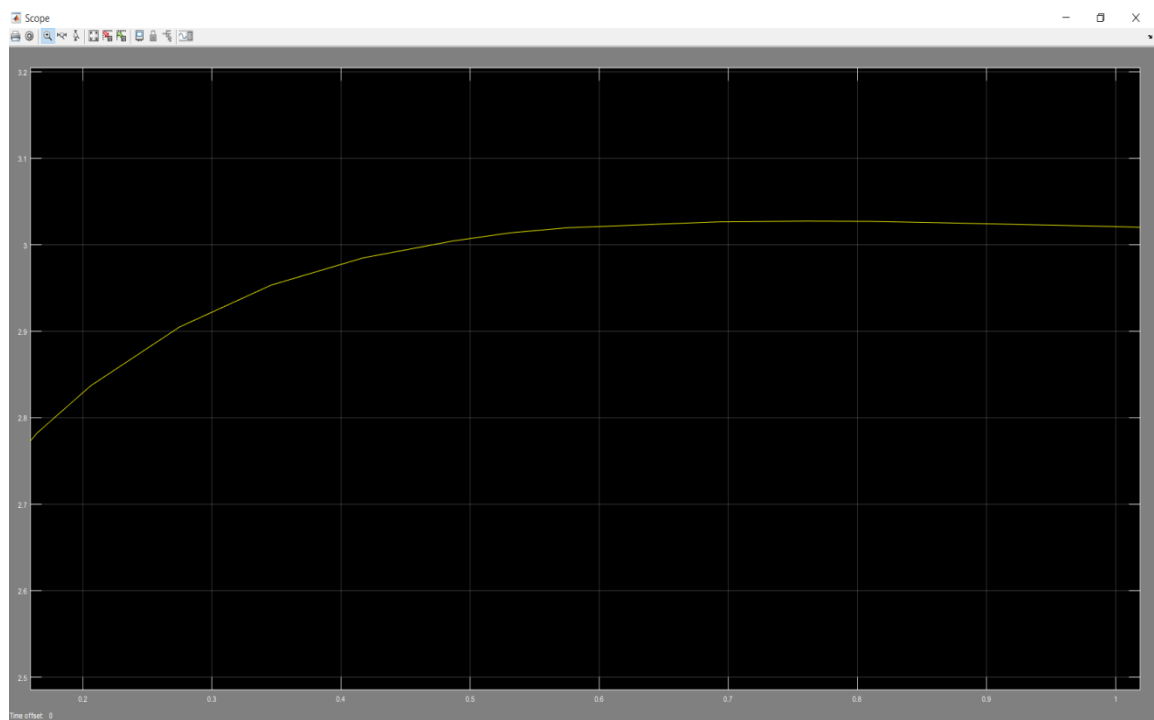
Εικόνα 2.39 Γραφική απεικόνιση του Scope1



Εικόνα 2.40 Γραφική απεικόνιση του Scope



Εικόνα 2.41: Γραφική απεικόνιση του Score όταν σταθεροποιείται το σύστημα



Εικόνα 2.42: Γραφική απεικόνιση του Score του χρόνου αποκατάστασης

Είναι φανερό από τις αποκρίσεις του συστήματος ότι πριν τον έλεγχο (Εικόνα 2.39) η γραφική παράσταση κατευθύνεται ανάποδα ενώ μετά τον έλεγχο (Εικόνα 2.40) κατευθύνεται στο επιθυμητό αποτέλεσμα που είναι το 3. Παρατηρήθηκε ότι το σύστημα κινείται με ομαλή κίνηση για την επίτευξη του στόχου και ότι οι τιμές των K_p, K_i, K_d μας έδωσαν ακριβώς το επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς το σύστημα σταθεροποιείται στο 3. Διαπιστώθηκε ξανά λοιπόν ότι αυξάνοντας την τιμή του διαφορικού ελεγκτή D μειώνεται το σφάλμα της υπερύψωσης.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΑ DC ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΣΑΦΟΥΣ ΕΛΕΓΚΤΗ FUZZY

3.1 Ασαφής Λογική

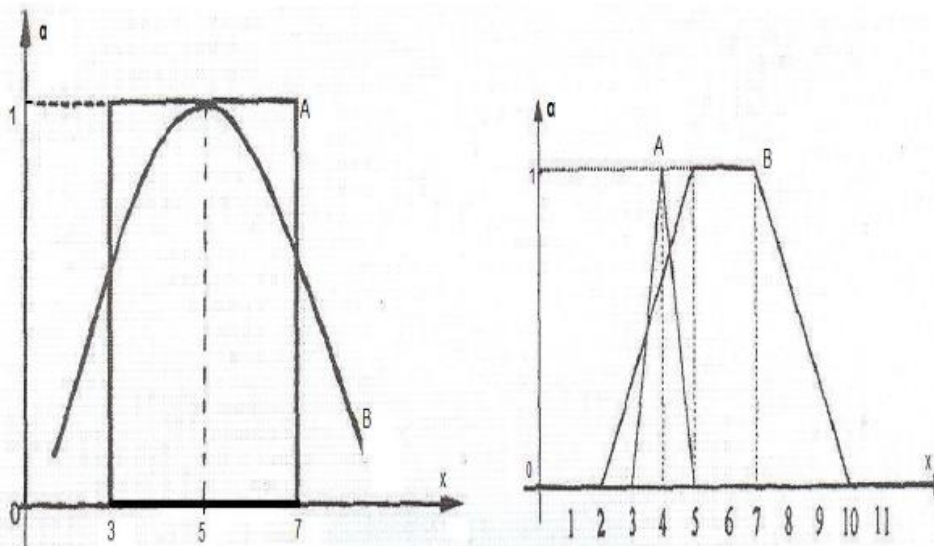
Η Ασαφής λογική (fuzzy logic) χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στον έλεγχο των μηχανών. Ο όρος «Ασαφή» δίνεται για να αποτυπώσει την έννοια που δεν μπορεί να αποδοθεί με τις εκφράσεις αλήθεια ή ψέμα ή ακόμα και την έκφραση μερικώς ψέμα. Ωστόσο, υπάρχουν εναλλακτικές προτάσεις όπως για παράδειγμα οι Γενετικοί Αλγόριθμοι και τα Νευρωνικά Δίκτυα τα οποία μπορούν να αποδώσουν και να λειτουργήσουν τόσο καλά όσο η Ασαφής Λογική. Επίσης, η ασαφή 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. (βλέπε [10])

Βασικές έννοιες-ορισμοί

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

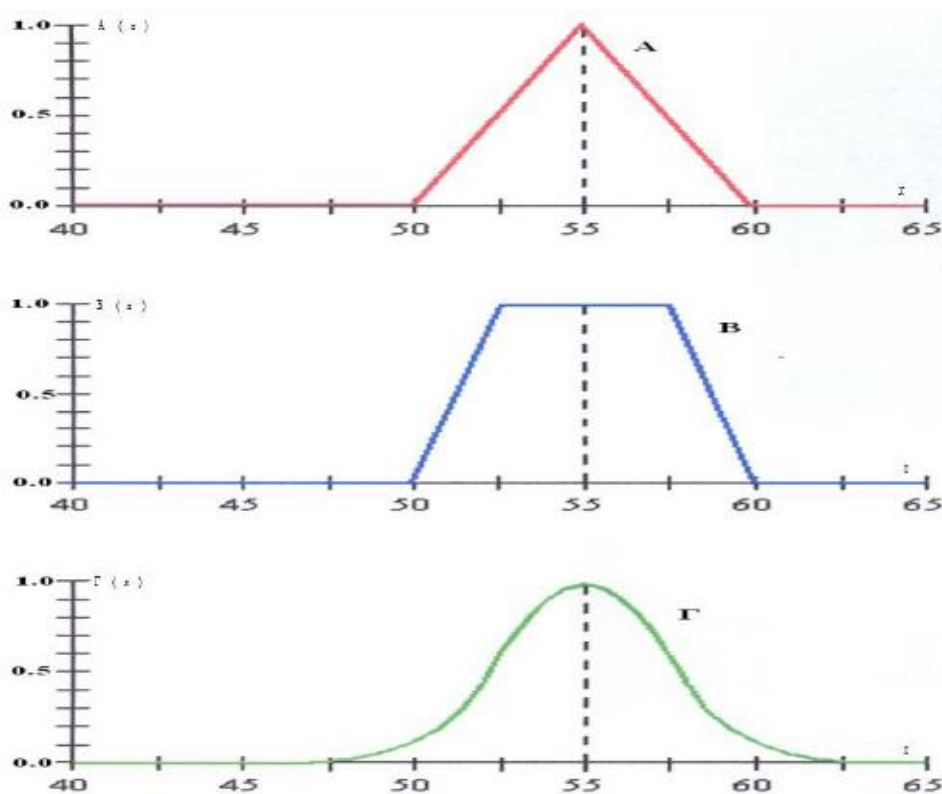
$$I_A : X \rightarrow \{0,1\}, \quad \mu_{I_A}(x) = \begin{cases} 1, & \text{αν } x \in A \\ 0, & \text{αν } x \notin A \end{cases}, \quad (1)$$

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



Εικόνα 3.1: Σύγκριση κλασικού και ασαφούς συνόλου

Κλασικό Σύνολο, $A = \{3, 5, 7\}$ Συνήθη στη πράξη, ασαφή σύνολα :
 Α, Τριγωνικό, "περίπου 4"
 Ασαφές Σύνολο, $B = \{\text{περίπου } 5\}$ Β, Τραπεζοειδές, "περίπου μεταξύ 5 και 7"



Εικόνα 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 .

(βλέπε [10])

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. (βλέπε [10])

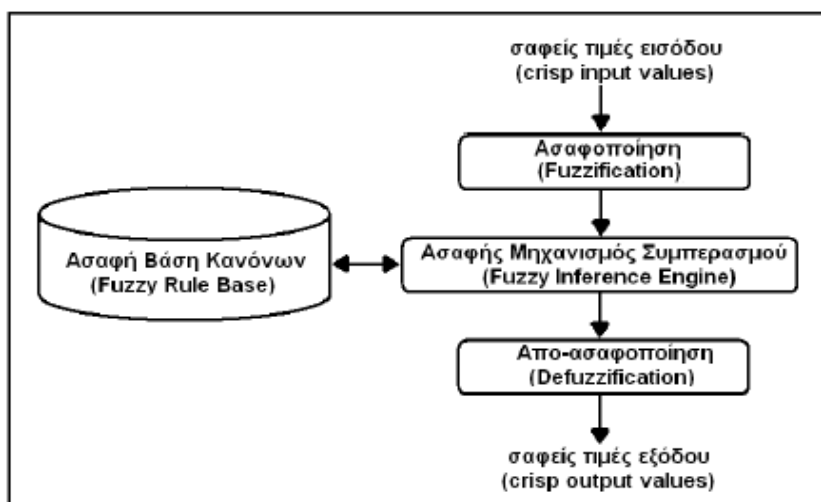
Το βασικό μειονέκτημα των ασαφών ελεγκτών είναι ο μεγάλος αριθμός των παραμέτρων που πρέπει να ρυθμιστούν για να υλοποιηθούν τα κριτήρια που έχουν τεθεί στην κάθε περίπτωση, ως προς την επιθυμητή απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος. Η εύρεση του πεδίου τιμών των ασαφών μεταβλητών, η μορφή των συναρτήσεων 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. (βλέπε [10])

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. (βλέπε [10])

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. (βλέπε [10])

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.
(βλέπε [10])



Εικόνα 3.3: Χαρακτηριστικό διάγραμμα ροής του ασαφούς συμπερασμού

Σε έναν ασαφή ελεγκτή οι εισόδοι 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. (βλέπε [10])

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. (βλέπε [10])

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. (βλέπε [10])

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

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

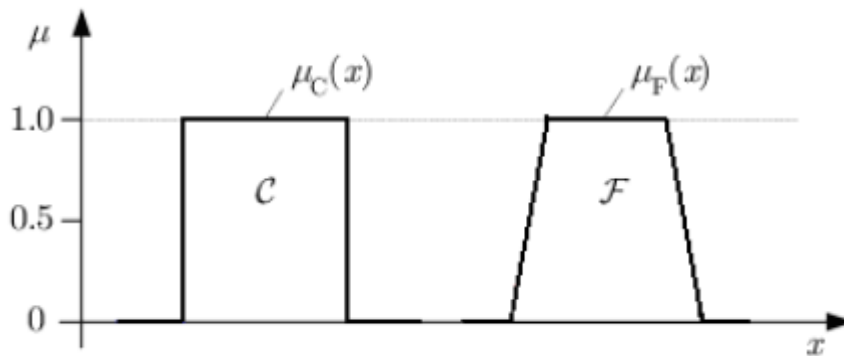
Στην κλασική θεωρία των συνόλων το $\mu_A(x)$ έχει μόνο τις τιμές 0 (“false”) και 1 (“true”) που είναι οι τιμές της αλήθειας. Τέτοια σύνολα ονομάζονται επίσης *crisp* σύνολα (*crisp sets*). Τα μη- *crisp* σύνολα ονομάζονται *ασαφή σύνολα* (fuzzy sets).

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). (βλέπε [10])

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

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



Εικόνα 3.4: Χαρακτηριστική συνάρτηση συμμετοχής ενός κλασσικού 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 , $\text{hgt}(A)$, ορίζεται ως :

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

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.

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

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

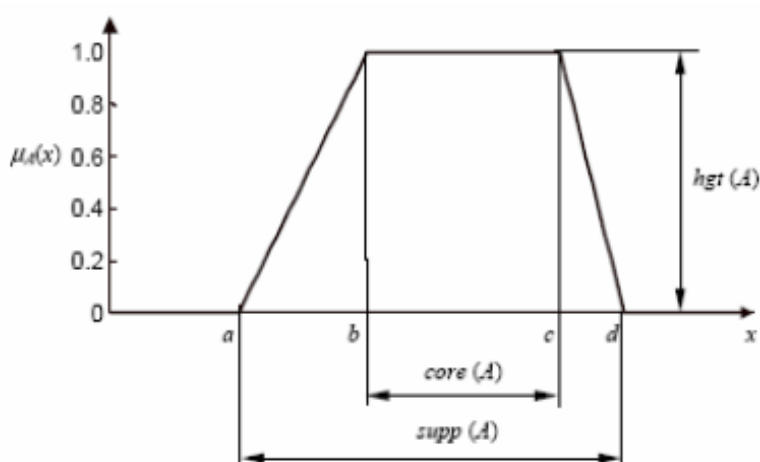
$$\text{supp}(A) = \{ x \in X \mid \mu_A(x) > 0 \}$$

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 περιέχει 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 συνάρτηση συμμετοχής.



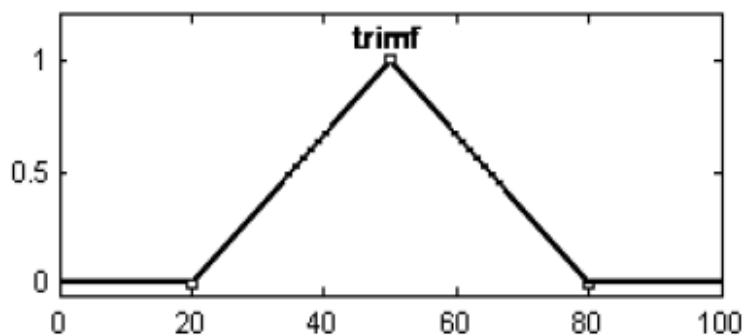
Εικόνα 3.5: Ύψος, υποστήριξη και κόρος ενός ασαφούς συνόλου

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. (βλέπε [10])

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

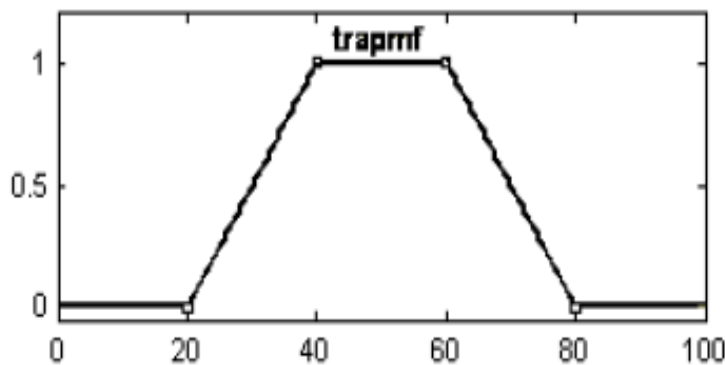
$$\text{triangle}(x; a, b, c) = \max \left(\min \left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right)$$



Εικόνα 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:

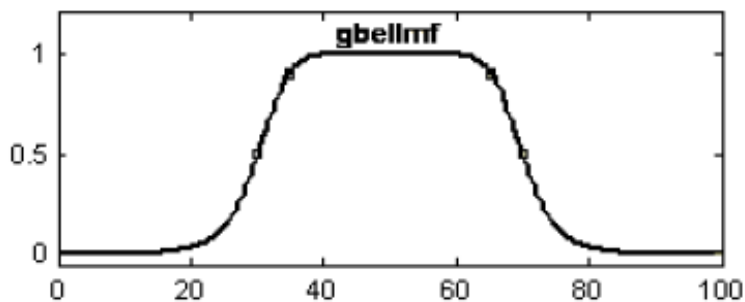
$$\text{trapezoid}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$$



Εικόνα 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:

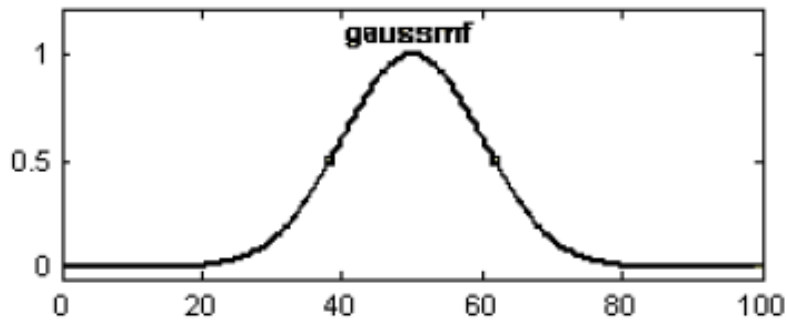
$$\text{bell}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}}$$



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

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

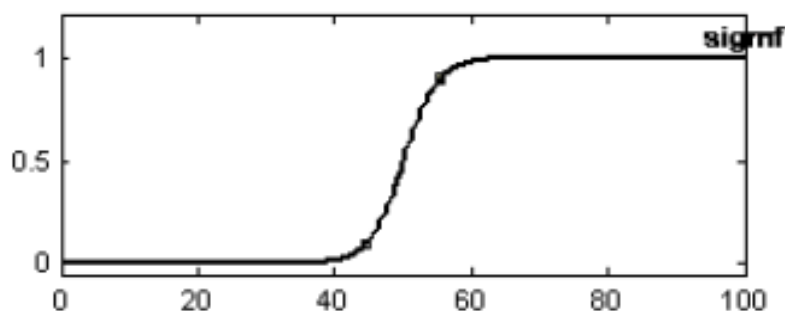
$$gaussian(x; \sigma, c) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}$$



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

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

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



Εικόνα 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. (βλέπε [10])

- 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:

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

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

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

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

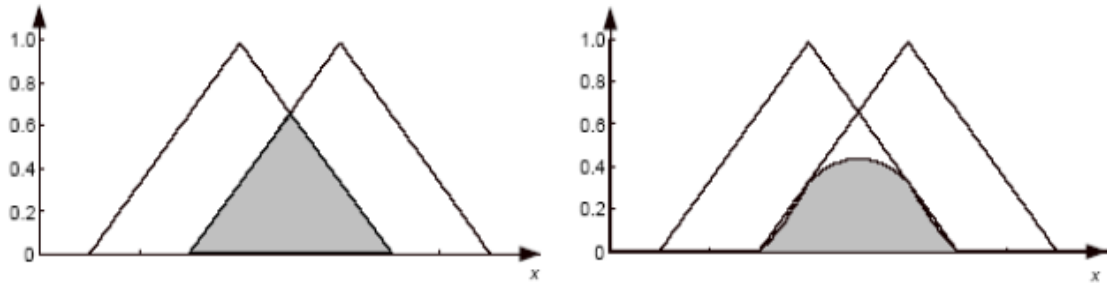
$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X$$

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 :

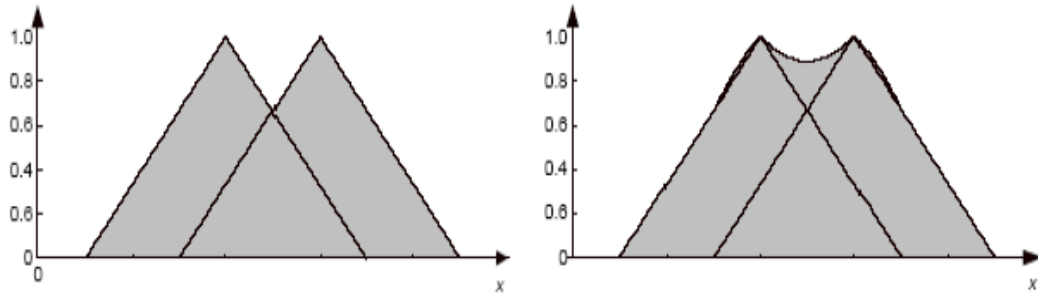
$$(A \subseteq B) \text{ αν } \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in X$$

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

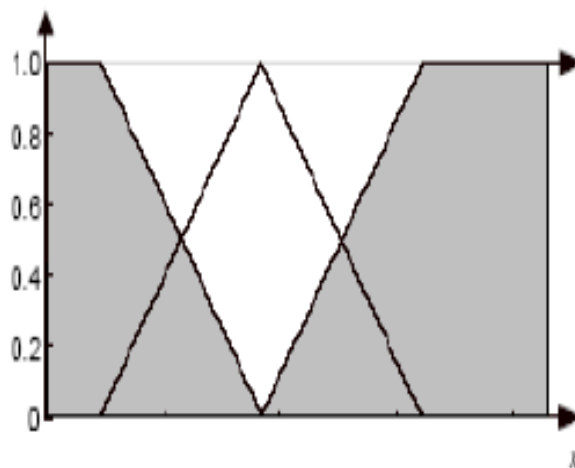
$$A = B \text{ αν } \mu_A(x) \equiv \mu_B(x) \quad \forall x \in X$$



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



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



Εικόνα 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. (βλέπε [10])

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 "fuzzyfication"),
- 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

Ακολουθως μπορούν να υπάρχουν και παραπάνω από μία έξοδοι. (βλέπε [10])

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. (βλέπε [10])

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). (βλέπε [10])

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.

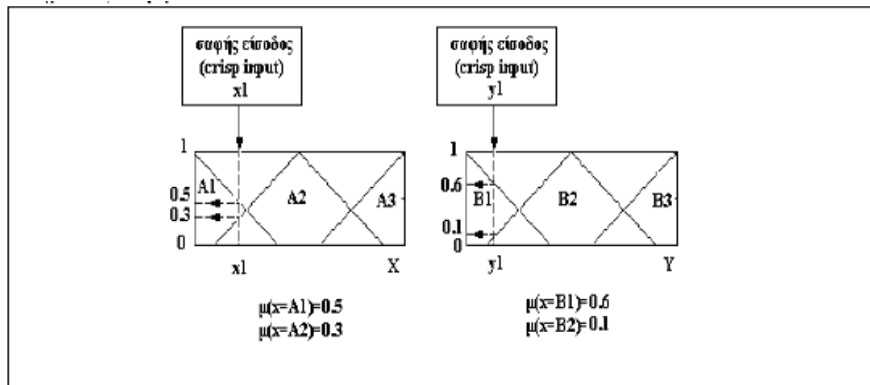
Ο αριθμός αυτός εφαρμόζεται στη συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος (consequent) και η συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος παρουσιάζεται είτε με ευθεία αποκοπή (clipping) είτε με διαβαθμισμένη αποκοπή (scaling) στο επίπεδο της τιμής της υπόθεσης του κανόνα. Όταν η συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος 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.

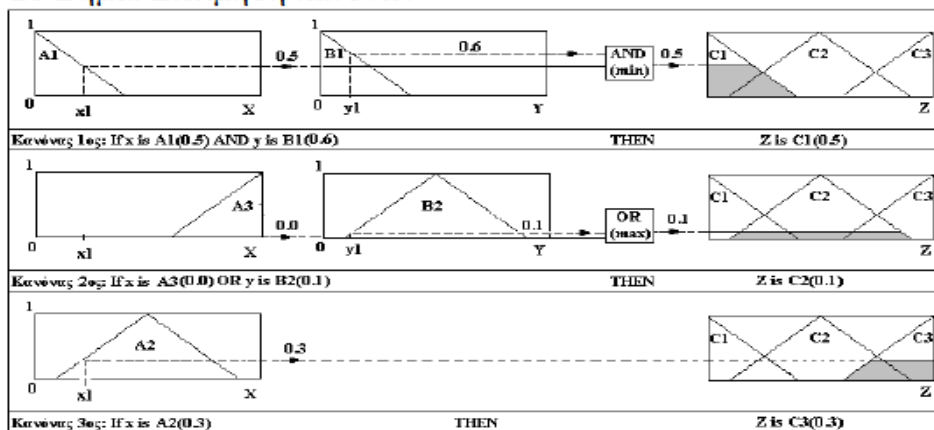
3ο βήμα: Σε αυτό το σημείο τα συμπεράσματα όλων των κανόνων συναθροίζονται. **Συνάθροιση (Aggregation)** ονομάζεται η διαδικασία της συνένωσης των συμπερασμάτων όλων των κανόνων. Συγκεκριμένα οι συναρτήσεις συμμετοχής των συμπερασμάτων συνδυάζονται σε ένα ασαφή σύνολο.

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. (βλέπε [10])

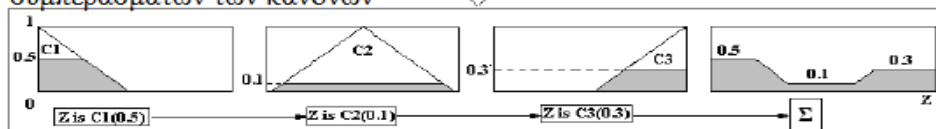
1ο Βήμα: Αποσαφοποίηση Εισόδων



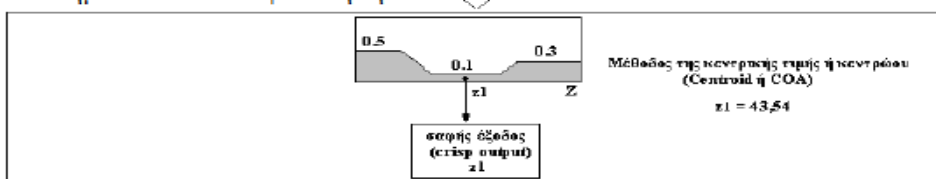
2ο Βήμα: Εκτίμηση κανόνων



3ο Βήμα: Συνάθροιση των συμπερασμάτων των κανόνων

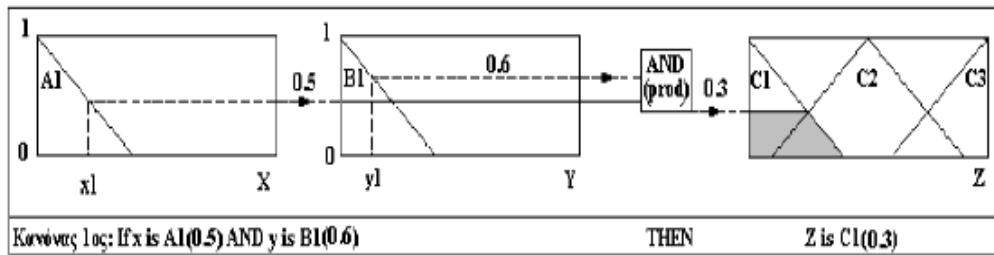


4ο Βήμα: Η από-ασαφοποίηση



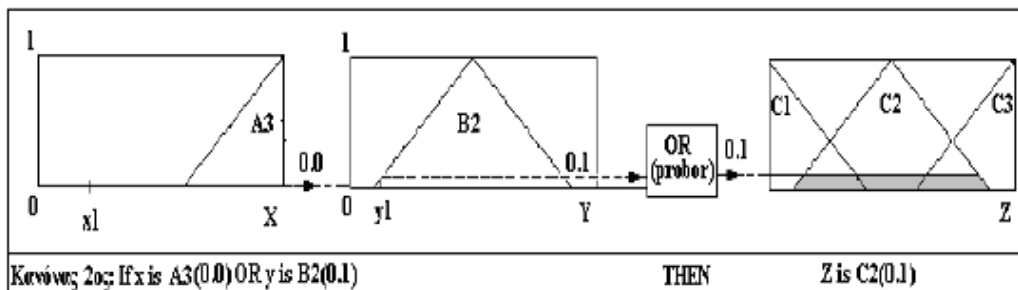
Εικόνα 3.14: Βασική δομή του Mamdani ασαφή συμπερασμού

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



Εικόνα 3.15: Ο τελεστής AND product στον ασαφή συμπερασμό

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



Εικόνα 3.16: Ο τελεστής OR probor στον ασαφή συμπερασμό

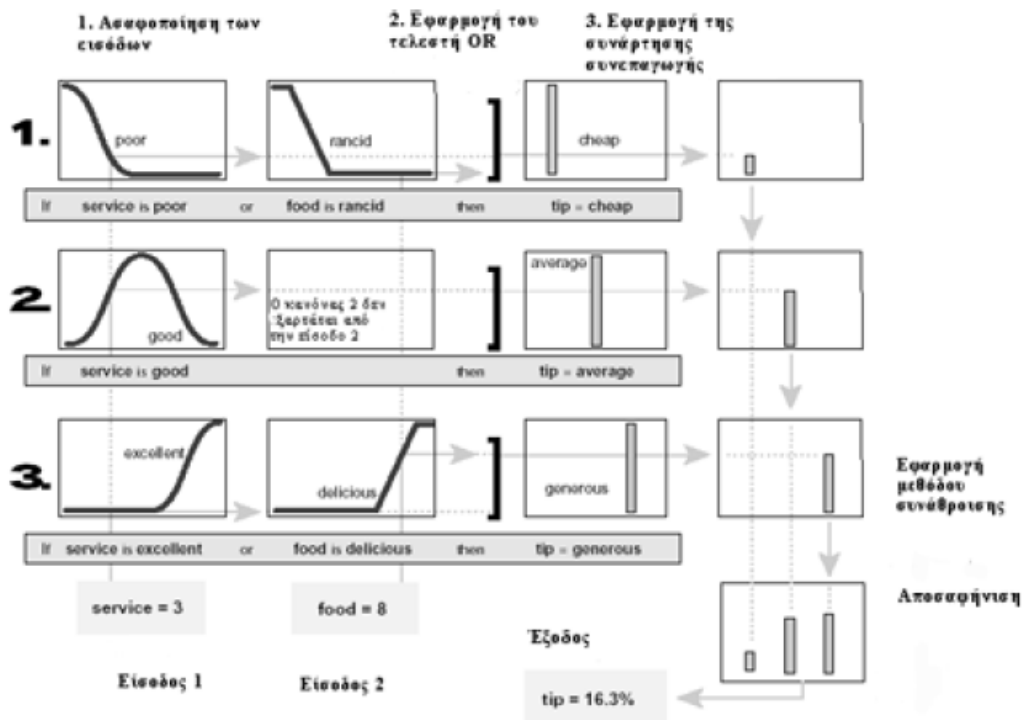
3.1.10 Συστήματα τύπου Sugeno

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. (βλέπε [10])

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. (βλέπε [10])



Εικόνα 3.17: Ένα σύστημα sugeno

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

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

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.

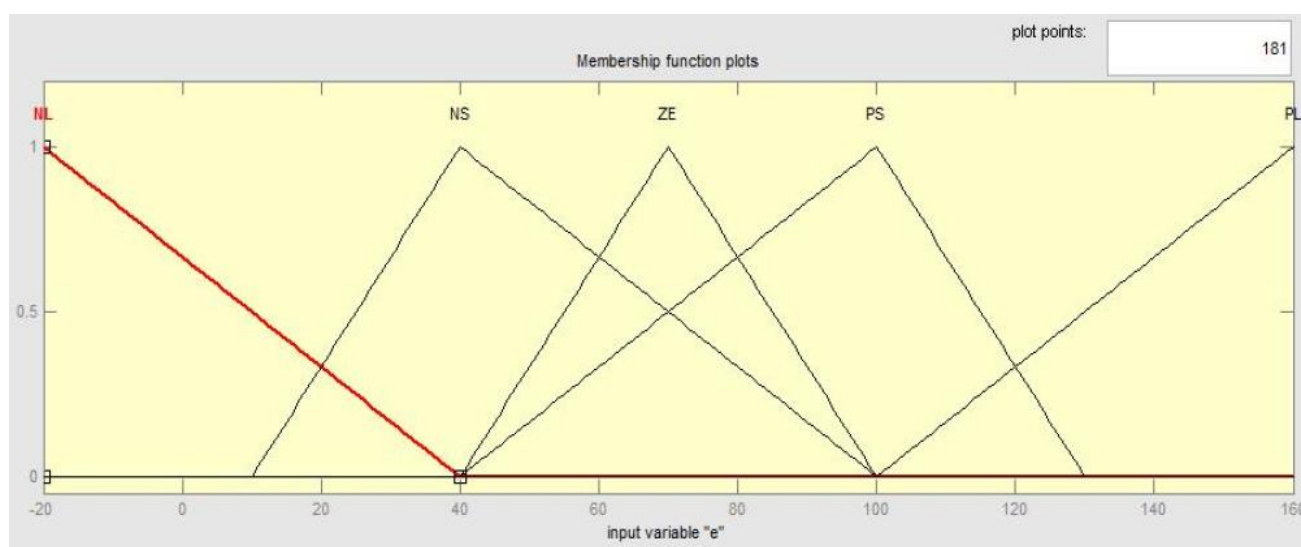
Στη συλλογιστική μέθοδο Takagi-Sugeno ή αλλιώς «συναρτησιακή συλλογιστική» (*functional reasoning*) το συμπέρασμα των κανόνων δίνεται με τη μορφή γραμμικών συναρτήσεων. Αυτή είναι και η κύρια διαφορά με τη μέθοδο του Mamdani που αναφέρθηκε. Το μοντέλο Takagi-Sugeno έχει αποδειχθεί ότι έχει την ικανότητα 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. (βλέπε [10])

3.2 Εφαρμογή του ελεγκτή FUZZY και η συσχέτιση του με τον ελεγκτή PID

Οι μεταβλητές $e_w(k)$ και $de_w(k)$, του PID ελεγκτή, μετατρέπονται σε ασαφές μεταβλητές e και de αντίστοιχα. Οι συναρτήσεις συμμετοχής που συνδέονται με τις μεταβλητές ελέγχου έχουν επιλεγεί με τριγωνικά σχήματα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.18. Κάθε σύστημα χωρίζεται σε επτά επικαλυπτόμενα ασαφή σύνολα: NL (Αρνητικά μεγάλο), NM (Αρνητικά μεσαίο), NS (Αρνητικά μικρό), ZE (Μηδέν), PS (Θετικά μικρό), PM (Θετικά μεσαίο), και PL (Θετικά μεγάλο). Κάθε ασαφή μεταβλητή είναι μέλος των υποσύνολων με βαθμό συμμετοχής μ που κυμαίνονται μεταξύ 0 (μηδενική συμμετοχή) και 1 (πλήρη συμμετοχή). Όλες οι συναρτήσεις μεταφοράς έχουν ασύμμετρο σχήμα με περισσότερη κλίση κοντά στη σταθερή κατάσταση. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια. (βλέπε [11])



Εικόνα 3.18: Γραφική απεικόνιση των συναρτήσεων συμμετοχής

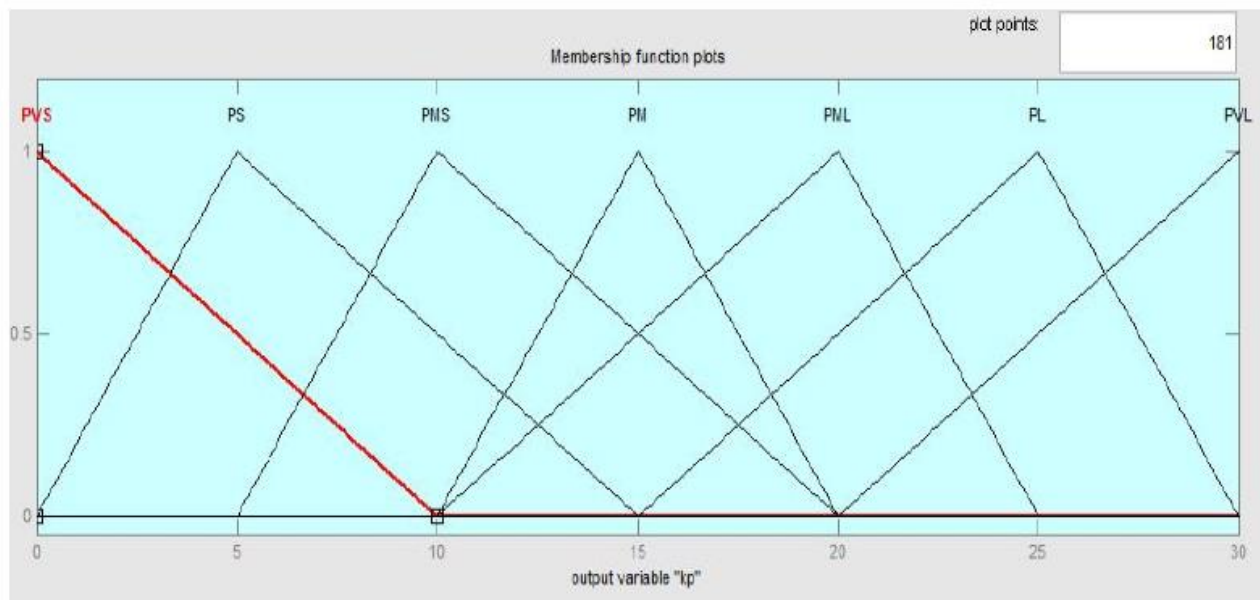
Έπειτα δημιουργήθηκαν πίνακες για κάθε ελεγκτή όπου στον καθένα εκτελούνται 25 κανόνες (5x5). Οι κανόνες καθορίστηκαν με βάση τις γνώσεις πάνω στη συμπεριφορά του συστήματος. Ο κάθε κανόνας εκφράζεται ως εξής:

EAN (e ω είναι Αρνητικά μεγάλο) **ΚΑΙ** (ce ω είναι Θετικά μεγάλο) **TOTE** (*qs ci είναι Μηδέν)

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Max-product (βλέπε [11])

de		NL	NS	ZE	PS	PL
	e					
NL		PVL	PVL	PVL	PVL	PVL
NS		PML	PML	PML	PL	PVL
ZE		PVS	PVS	PS	PMS	PMS
PS		PML	PML	PML	PL	PVL
PL		PVL	PVL	PVL	PVL	PVL

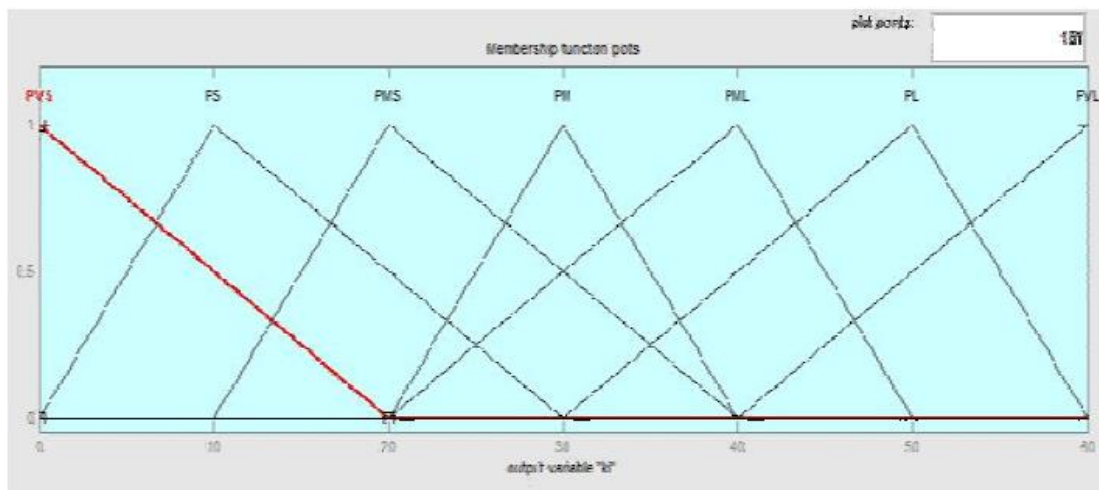
Εικόνα 3.19: Πίνακας κανόνων για τον ελεγκτή P



Εικόνα 3.20: Γραφική απεικόνιση των συναρτήσεων συμμετοχής για τον ελεγκτή P

de		NL	NS	ZE	PS	PL
	e					
NL		PM	PM	PM	PM	PM
NS		PMS	PMS	PMS	PMS	PMS
ZE		PS	PS	PVS	PS	PS
PS		PMS	PMS	PMS	PMS	PMS
PL		PM	PM	PM	PM	PM

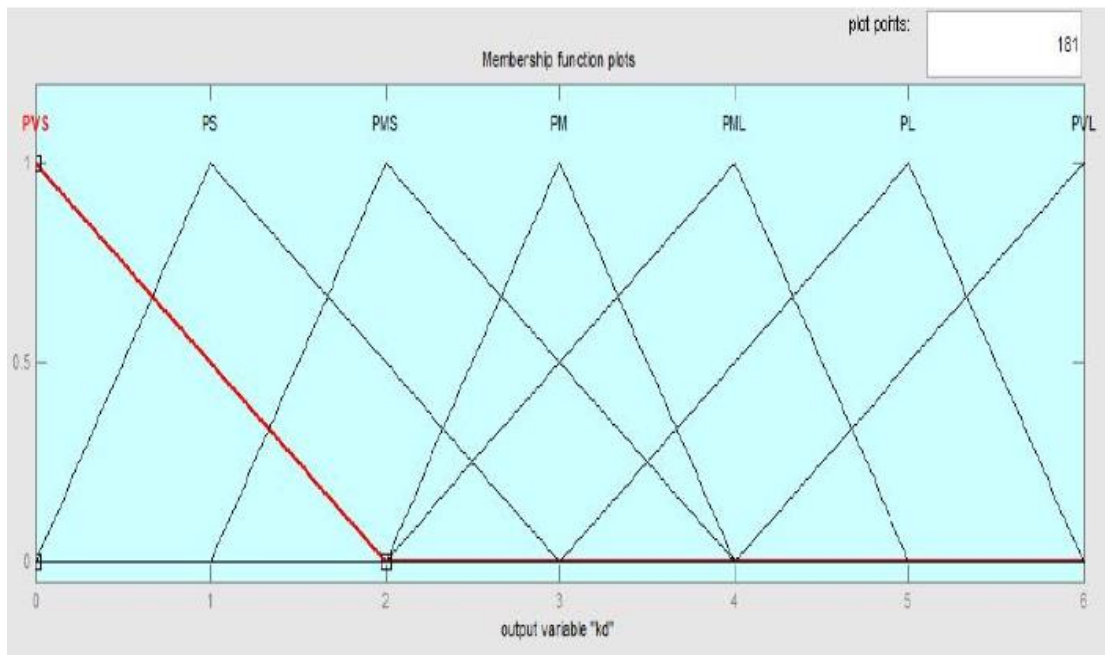
Εικόνα 3.21: Πίνακας κανόνων για τον ελεγκτή I



Εικόνα 3.22: Γραφική απεικόνιση των συναρτήσεων συμμετοχής για τον ελεγκτή I

De		NL	NS	ZE	PS	PL
	e					
NL		PVS	PMS	PM	PL	PVL
NS		PMS	PML	PL	PVL	PVL
ZE		PM	PL	PL	PVL	PVL
PS		PML	PVL	PVL	PVL	PVL
PL		PVL	PVL	PVL	PVL	PVL

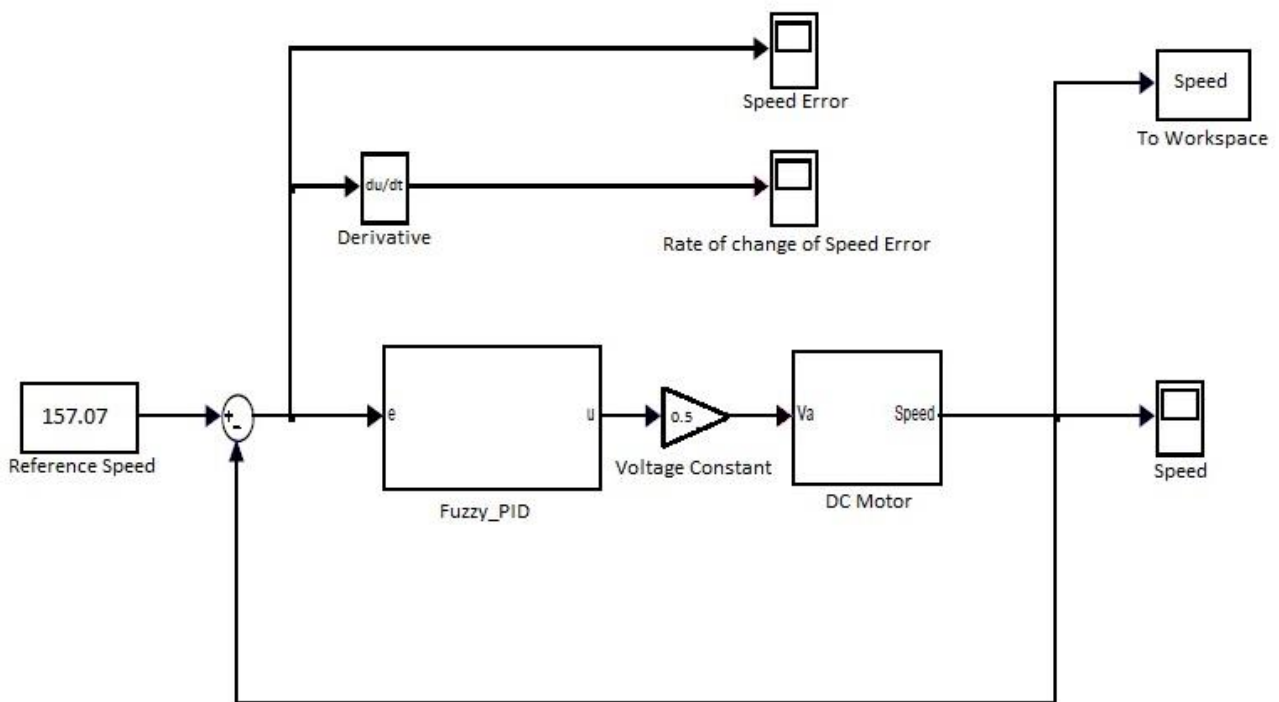
Εικόνα 3.23: Πίνακας κανόνων για τον ελεγκτή D



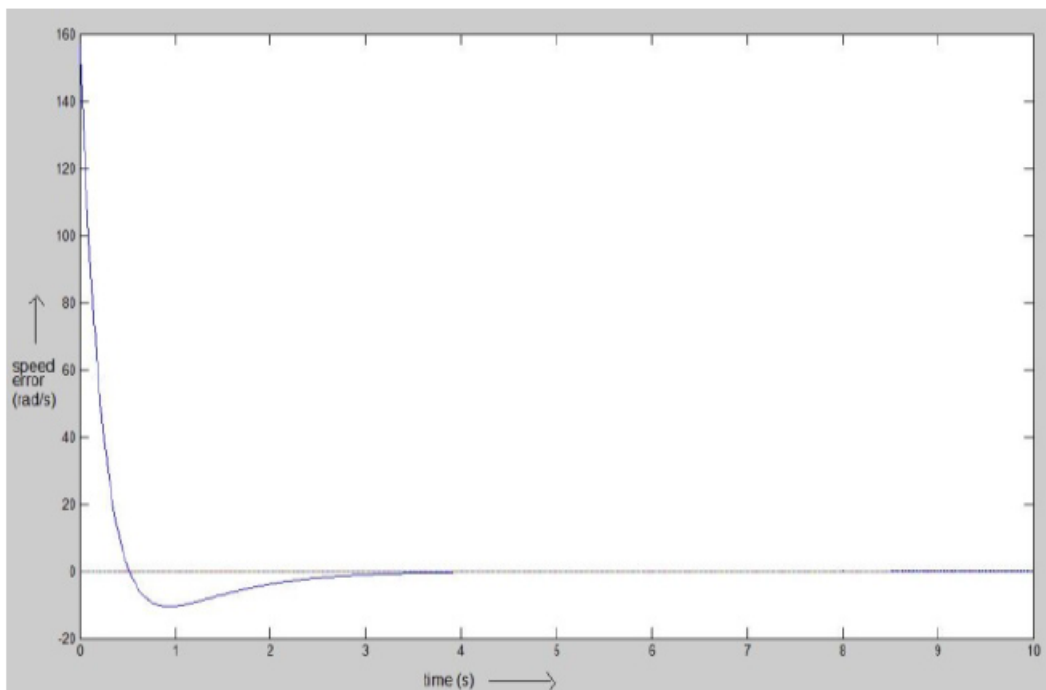
Εικόνα 3.24: Γραφική απεικόνιση των συναρτήσεων συμμετοχής για τον ελεγκτή D

Για τη συσχέτιση των ελεγκτών PID και FUZZY είναι απαραίτητο να βρεθεί η ασαφής σχέση μεταξύ των τριών όρων του PID, του σφάλματος «e» και της διόρθωσης του σφάλματος «de», και σύμφωνα με την αρχή του ασαφούς ελέγχου, να διαμορφωθούν οι τρεις όροι του PID έτσι ώστε όταν οι τιμές «e» και «de» είναι διαφορετικές να ανταποκρίνεται. Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος, ρυθμίστηκαν οι κανόνες και οι συναρτήσεις συμμετοχής. Οι συναρτήσεις συμμετοχής αρχικά ρυθμίστηκαν για να είναι όσο πιο κοντά γινόταν στην περιοχή μηδέν(ZE) και είχε σαν αποτέλεσμα μία καλή απεικόνιση του ελέγχου. Από την άλλη πλευρά, όταν απομακρύθηκαν από την περιοχή μηδέν(ZE) το αποτέλεσμα ήταν ταχύτερη απόκριση ελέγχου. Τέλος, η απόδοση μπορεί να βελτιωθεί με την αλλαγή των κανόνων.

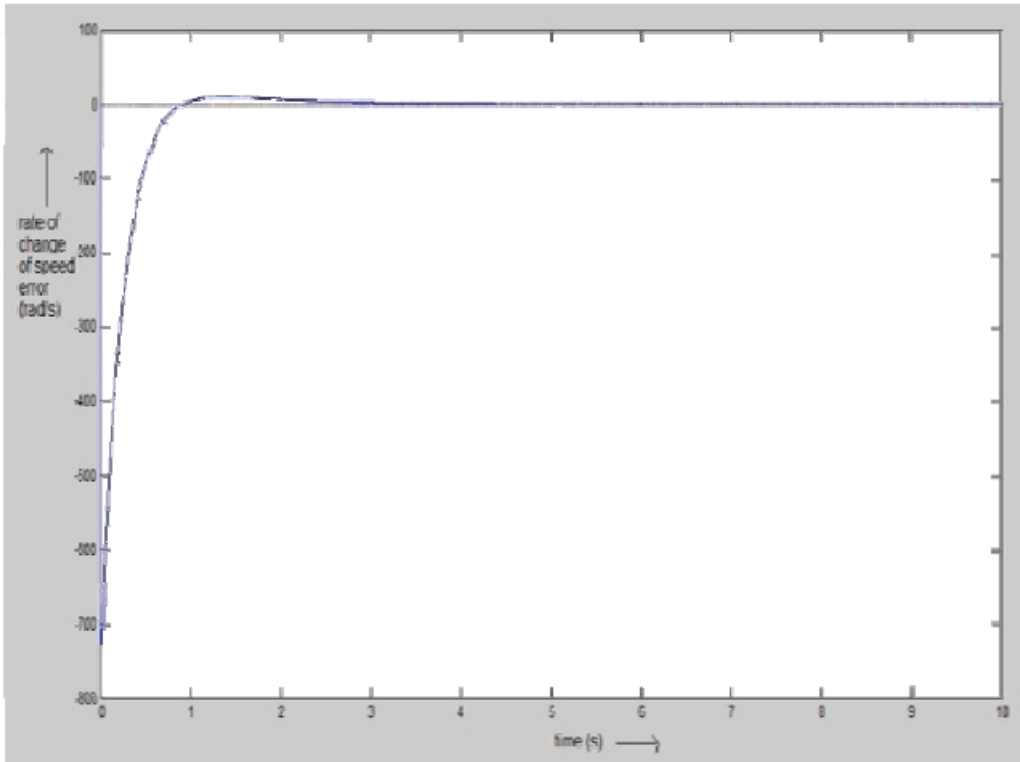
Στο παρακάτω σύστημα χρησιμοποιήθηκαν τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής και μελετήθηκε η επίδραση του χρόνου ανόδου (T_r), η μέγιστη υπερύψωση (M_p) και η σταθερά λάθους (SSE) όταν μεταβάλλονται οι όροι K_p , K_i και K_d . Οι τρεις όροι χρησιμοποιήθηκαν ως μεταβλητές εξόδου και το σφάλμα και η διόρθωση σφάλματος ως μεταβλητές εισόδου. (βλεπε [11])



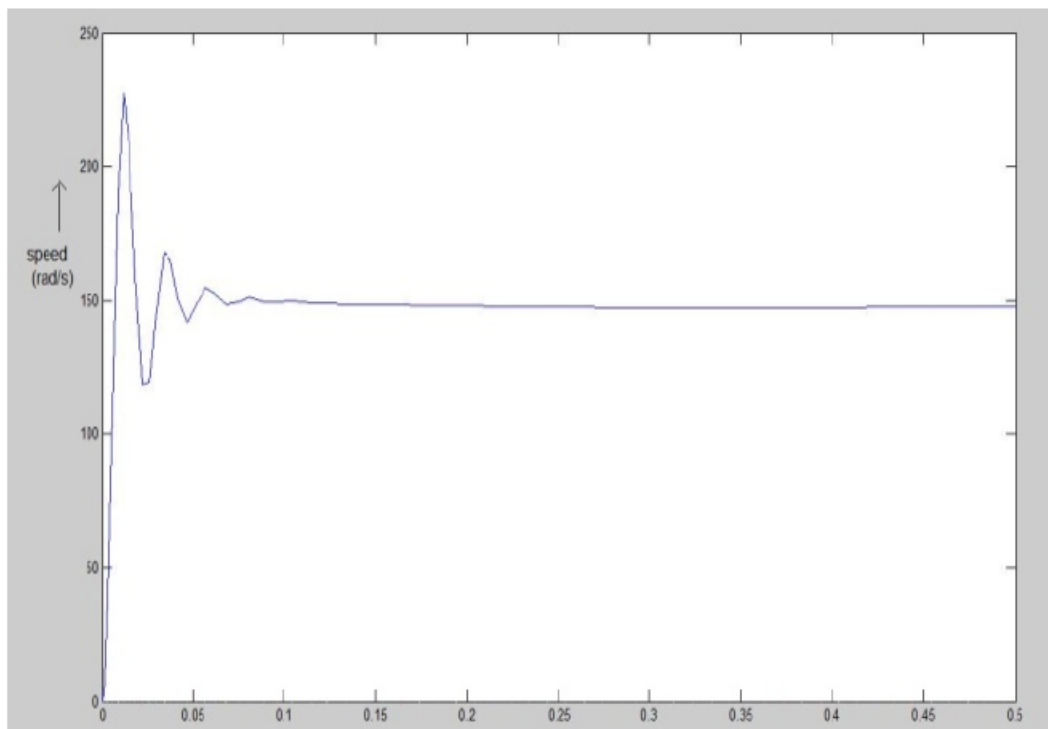
Εικόνα 3.25: Διάγραμμα Self-Tuning Fuzzy_PID ελεγκτή στο Simulink



Εικόνα 3.26: Απόκριση του παλμογράφου Speed Error



Εικόνα 3.27: Απόκριση του παλμογράφου Rate of change of Speed Error



Εικόνα 3.28: Απόκριση του παλμογράφου Speed

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω εξομοίωσης καταλήγουμε ότι με τη χρήση ενός ελεγκτή FUZZY υπάρχει πιο δυναμική απόκριση, πιο γρήγορος χρόνος απόκρισης, μικρή υπερύψωση, μικρή σταθερά σφάλματος, και τέλος μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τον απλό ελεγκτή PID. (βλέπε [11])

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

4.1 Βελτιώσεις

Μετά την ολοκλήρωση της εργασίας διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης του συστήματος. Τα περιθώρια αυτά αναφέρονται στον τομέα του κώδικα, της προσομοίωσης καθώς και στις μεθόδους ελέγχου. Αρχικά, ο κώδικας επιδέχεται βελτίωση στον τομέα των εντολών και της έκτασης. Έπειτα, η προσομοίωση είναι δυνατό να βελτιωθεί όσον αφορά τα μέρη που την αποτελούν καθώς και τα στοιχεία που εμπεριέχονται σε αυτά. Επιπρόσθετα, βελτίωση μπορεί να υπάρξει στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων που μας προσφέρει ο συνδυασμός της προσομοίωσης με τον κώδικα. Τέλος, στο υπάρχον μοντέλο μόνο με αλλαγή του ελεγκτή είναι δυνατόν να δοκιμαστούν και άλλες μέθοδοι ελέγχου, όπως για παράδειγμα νευρωνικά δίκτυα, παρατηρητές κατάστασης, αυτοματοποιημένο σχεδιασμό ελέγχου κερδών κ.α.

4.1.1 Μελλοντικοί στόχοι

Κάθε ερευνητική εργασία είναι μία πρόκληση και μετά την ολοκλήρωση της δημιουργεί την ανάγκη επεκτασής της. Γι' αυτό το λόγο θέτονται νέοι στόχοι για αναζήτηση, έρευνα και πειραματισμούς. Οι μελλοντικοί στόχοι για το σύστημα αυτής της εργασίας είναι για αρχή να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στο τομέα των αποτελεσμάτων. Επίσης, να πραγματοποιηθεί ένα πείραμα με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που υπήρξαν στη μελέτη, μέσω του προγράμματος προσομοίωσης Simulink, με αυτά ενός πραγματικού ηλεκτροκινητήρα και ενός (τσίπ) ελεγκτή, έτσι ώστε να φανεί η ακρίβεια του προγράμματος και να μελετηθούν οι πιθανές διαφορές. Το αντικείμενο συγκριτικών μελετών έχει από μόνο του εξαιρετικό ενδιαφέρον, καθώς το ένα σύστημα επιβεβαιώνει το άλλο, όπως επίσης προβλέπει πιθανά σφάλματα. Επιπρόσθετα, ένα μέρος μελέτης θα είναι οι εφαρμογές του συστήματος σε καθημερινές ανάγκες τόσο σε οικιακές συσκευές όσο και βιομηχανικά μηχανήματα. Ακόμη, θα μπορούσε να ερευνηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό ο έλεγχος σε συστήματα που περιέχουν περισσότερους από έναν ηλεκτρικούς κινητήρες DC. Τέλος, θα μελετηθεί ο έλεγχος των ηλεκτροκινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος AC, οι οποίοι διακρίνονται επιμέρους στους "ασύγχρονους ή επαγωγικούς κινητήρες" και στους "σύγχρονους κινητήρες".

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] http://users.sch.gr/imirinakis/electric_engines.htm
- [2] <http://islab.teipir.gr/web/Donwloads/Simeiwseis/notes06.pdf>
- [3] http://users.sch.gr/nikbalki/epim_kse/Edusoft_files/edusoft_files/Programs_files/Systimata_Prosoimoiosis.pdf
- [4] http://www.chemeng.ntua.gr/labs/control_lab/zipfiles/Mathima%203.pdf
- [5] <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=SimulinkModeling>
- [6] http://users.ntua.gr/manias/hlektrinos%20_elenxos_%20kin%20DC.html
- [7] http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2013-0035/DT2013-0035.pdf
- [8] http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/sefe/hlk/2011/DrososEleftherios,NtountoulakisAris/attacheddocument13210125904051043898/Drosos_Ntountoulakis2011.pdf
- [9] <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=MotorSpeed§ion=ControlPID>
- [10] http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/sefe/hlk/2014/SpagakosLiakakosPanagiotis,SampathianakisNikolaos/attacheddocument141132897352653719681/SpagakosLiakakosPanagiotis_SampathianakisNikolaos2014.pdf
- [11] http://www.ripublication.com/aeee/070_pp%20%20%20%20%201209-1220.pdf

CD-ROM

