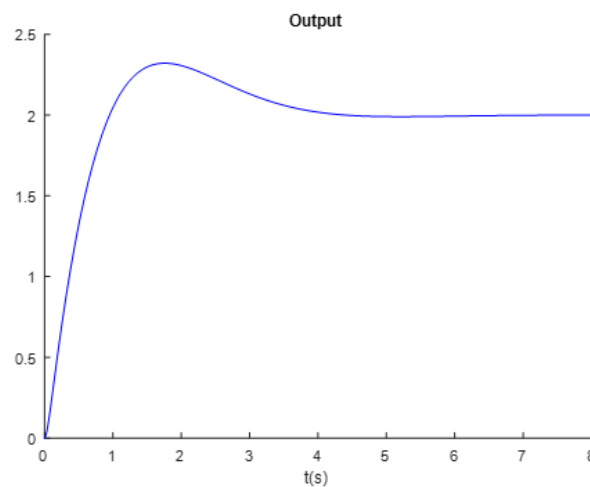


ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Βελτιστοποίηση PID ελέγχου»



Φοιτητής

Αμπεριάδης Χαράλαμπος 514301

Επιβλέπων

Δρ. Κυριάκος Τσιακμάκης

ΙΟΥΝΙΟΣ 2023

Βελτιστοποίηση PID ελέγχου

Κωδικός: 22319

Φοιτητής: Αμπεριάδης Χαράλαμπος

Εισηγητής: Δρ Κυριάκος Τσιακμάκης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 30-10-2022

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 26-05-2023

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του Αμπεριάδη Χαράλαμπου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Περίληψη

Ο έλεγχος PID (Proportional-Integral-Derivative) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική ελέγχου σε διάφορες εφαρμογές. Ο έλεγχος PID μπορεί να μην παρέχει πάντα τη βέλτιστη απόδοση ελέγχου, ειδικά σε συστήματα με μη γραμμική ή χρονικά μεταβαλλόμενη δυναμική. Η βελτίωση του ελέγχου PID μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτερους χρόνους απόκρισης, μειωμένη υπέρβαση και σφάλμα σταθερής κατάστασης και καλύτερη απόρριψη διαταραχών.

Οι παράμετροι PID θα πρέπει να ρυθμίζονται ώστε να ταιριάζουν με τη δυναμική του συστήματος που ελέγχεται. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τον συντονισμό των παραμέτρων PID, συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών και σφαλμάτων, της μεθόδου Ziegler-Nichols και του autotune που παρέχει η Matlab.

Η εργασία αφορά τη βελτιστοποίηση παραμέτρων K του PID, με χρήση του αλγόριθμου Taguchi σε διακριτό χρόνο, για την επίτευξη βέλτιστης ανταπόκρισης ικανοποιώντας συγκεκριμένα κριτήρια ελέγχου.

« Optimization of PID control »

Abstract

PID (Proportional-Integral-Derivative) control is a widely used control technique in various applications. PID control may not always provide optimal control performance, especially in systems with nonlinear or time-varying dynamics. Improving PID control can result in faster response times, reduced overshoot and steady-state error, and better disturbance rejection.

The PID parameters should be tuned to match the dynamics of the system being controlled. There are many methods for tuning the PID parameters, including trial and error, the Ziegler-Nichols method, and the autotune provided by Matlab.

The work concerns the optimization of K parameters of the PID, using the discrete-time Taguchi algorithm, to achieve an optimal response satisfying specific control criteria.

Ευχαριστίες

Να ευχαριστήσω τους φίλους και τους γονείς μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iv
Abstract.....	v
Ευχαριστίες.....	vi
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος Σχημάτων	viii
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	9
1.1 Εισαγωγή.....	9
1.2 Δομή της εργασίας	12
Κεφάλαιο 2ο: Εισαγωγή στα Συστήματα Ελέγχου	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Σύστημα Ελέγχου MRAC	18
2.3 Σύστημα Ελέγχου LQR	19
2.4 Σύστημα Ελέγχου MPC.....	21
2.5 Σύστημα Ελέγχου PID.....	24
Κεφάλαιο 3ο: Εισαγωγή στους αλγόριθμους βελτιστοποίησης.....	28
3.1 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης	28
3.2 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης	29
3.2.1 Αλγόριθμος Gradient Descent	29
3.2.2 Αλγόριθμος Γενετικός αλγόριθμος - Genetic Algorithm (GA).....	30
3.2.3 Αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO).....	32
3.2.4 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Γραμμικός Προγραμματισμός	35
3.2.5 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Taguchi	36
Κεφάλαιο 4ο: Βελτιστοποίηση PID με τη μέθοδο Taguchi.....	39
4.1 Η ανάγκη για βελτιστοποίηση	39
Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα.....	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	59
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	61
Α.1. Κώδικας	61

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 2.1: Σύστημα ελέγχου ανοιχτού βρόχου	13
Εικόνα 2.2: Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου	15
Εικόνα 2.3: MRAC σύστημα ελέγχου.....	18
Εικόνα 2.4: LQR σύστημα ελέγχου	20
Εικόνα 2.5: MPC σύστημα ελέγχου	22
Εικόνα 2.6: PID σύστημα ελέγχου	24
Εικόνα 4.1: Simulink blocks για την συνάρτηση μεταφοράς στο s-domain.....	46
Εικόνα 4.2: Simulink blocks για την συνάρτηση μεταφοράς στο z-domain	47
Εικόνα 4.3: Step response για την $m\gamma Hd$ με την εντολή <code>stepplot</code>	48
Εικόνα 4.4: Response και Error για την $m\gamma Hd$ με κώδικα – Είσοδος step με 2V	49
Εικόνα 4.5: PID με tune	50
Εικόνα 4.6: Οι παράμετροι του PID όπως φαίνονται στο παράθυρο του PID στοιχείου	50
Εικόνα 4.7: Ρύθμιση του step response 1	51
Εικόνα 4.8: Ρύθμιση του step response 1	51
Εικόνα 4.9: Step Response $K_p=21$; $K_i=36$; $K_d=3$; $N_{coeff} = 1$;	52
Εικόνα 4.10: Step Response $K_p=21$; $K_i=36$; $K_d=3$; $N_{coeff} = 1114$;	53
Εικόνα 4.11: Step Response $K_p=27$; $K_i=38$; $K_d=4$; $N_{coeff} = 16$;	54
Εικόνα 4.12: Με Taguchi 1 : Step Response $K_p=7.5$; $K_i=10$; $K_d=2.5$; $N_{coeff} = 275$;	55
Εικόνα 4.13: Με Taguchi 2 : Step Response $K_p=15$; $K_i=15$; $K_d=15$; $N_{coeff} = 475$;	56

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Ένα σύστημα ελέγχου (control system) είναι μια συλλογή συνδεδεμένων στοιχείων (hardware και software) που συνεργάζονται για να διατηρήσουν τη λειτουργία ενός συστήματος ή διεργασίας σε επιθυμητά επίπεδα. Συγκεκριμένα, ένα σύστημα ελέγχου αναλύει την κατάσταση ενός συστήματος, συγκρίνει την πραγματική κατάσταση με μια επιθυμητή κατάσταση και λαμβάνει αποφάσεις για να διορθώσει τυχόν αποκλίσεις.

Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου είναι ένας τύπος συστήματος ελέγχου που χρησιμοποιεί προηγμένη τεχνολογία, όπως υπολογιστές, αισθητήρες και ενεργοποιητές, για να ελέγξει αυτόματα μια διαδικασία ή ένα σύστημα. Αυτά τα συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα, την ακρίβεια και την αξιοπιστία των λειτουργιών μειώνοντας την ανθρώπινη παρέμβαση και ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα.

Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως στη βιομηχανία, την αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική, την ηλεκτρονική και την πληροφορική, για να ελέγχουν τη λειτουργία διαφόρων συστημάτων, όπως παραγωγικές γραμμές, αυτοκίνητα, αεροσκάφη, ρομπότ και ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Κάποια από τα πιο σημαντικά συστήματα ελέγχου είναι το PID, MRAC και LQR όπου είναι όλοι οι τύποι συστημάτων ελέγχου που χρησιμοποιούνται συνήθως σε διάφορες βιομηχανίες και εφαρμογές.

Το σύστημα ελέγχου PID (Proportional-Integral-Derivative) είναι ένας δημοφιλής τύπος συστήματος ελέγχου ανάδρασης που χρησιμοποιείται σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Αποτελείται από τρία στοιχεία - αναλογικό, ολοκλήρωμα και παράγωγος - που συνεργάζονται για να ρυθμίσουν και να σταθεροποιήσουν τη συμπεριφορά ενός συστήματος. Η αναλογική συνιστώσα προσαρμόζει την έξοδο αναλογικά με το σήμα σφάλματος, η ολοκλήρωση-συνιστώσα υπολογίζει το ολοκλήρωμα του σήματος σφάλματος με την πάροδο του χρόνου και η παράγωγος συνιστώσα υπολογίζει τον ρυθμό μεταβολής του σήματος σφάλματος. Τα συστήματα ελέγχου PID χρησιμοποιούνται ευρέως στον έλεγχο διεργασιών, τη ρομποτική και πολλές άλλες εφαρμογές.

Το MRAC (Model Reference Adaptive Control) είναι ένα προσαρμοστικό σύστημα ελέγχου που προσαρμόζει τις παραμέτρους ελέγχου με βάση τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Χρησιμοποιεί μια προσέγγιση αναφοράς μοντέλου για να εκτιμήσει τη συμπεριφορά του συστήματος και προσαρμόζει τις παραμέτρους ελέγχου σε πραγματικό χρόνο για να επιτύχει την επιθυμητή απόδοση. Τα συστήματα ελέγχου MRAC χρησιμοποιούνται συνήθως στην αεροδιαστημική και την άμυνα, τη ρομποτική και άλλες εφαρμογές όπου η συμπεριφορά του συστήματος μπορεί να αλλάξει με την πάροδο του χρόνου.

Το σύστημα ελέγχου LQR (Linear Quadratic Regulator) είναι ένας τύπος βέλτιστου συστήματος ελέγχου που χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, όπως η αεροδιαστημική και η άμυνα, η αυτοκινητοβιομηχανία και η ρομποτική. Χρησιμοποιεί μια μαθηματική τεχνική που ονομάζεται βέλτιστος έλεγχος για την ελαχιστοποίηση ενός δείκτη απόδοσης που αντανάκλα την επιθυμητή απόδοση του συστήματος. Τα συστήματα ελέγχου LQR έχουν σχεδιαστεί για να επιτυγχάνουν βέλτιστη απόδοση, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα την ενέργεια ή την προσπάθεια που απαιτείται για τον έλεγχο του συστήματος. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές όπου η ενεργειακή απόδοση είναι σημαντική, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα ή τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Οι ελεγκτές PID (Proportional-Integral-Derivative), ο MRAC (Model Reference Adaptive Control) και ο LQR (Linear Quadratic Regulator) είναι όλοι διαφορετικοί τύποι αλγορίθμων ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο δυναμικών συστημάτων. Καθένας από αυτούς τους αλγόριθμους έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και αδυναμίες και η επιλογή του ποιος θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή και τις απαιτήσεις του συστήματος.

Οι ελεγκτές PID είναι απλοί και χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλές εφαρμογές βιομηχανικού ελέγχου. Είναι εύκολο να εφαρμοστούν, απαιτούν ελάχιστους υπολογιστικούς πόρους και μπορούν να παρέχουν σταθερή και ισχυρή απόδοση ελέγχου. Ωστόσο, μπορεί να μην έχουν καλή απόδοση σε συστήματα με πολύπλοκη δυναμική, μη γραμμικότητα ή μεγάλες διαταραχές.

Ο MRAC είναι ένας προσαρμοστικός αλγόριθμος ελέγχου που μπορεί να προσαρμόσει τις παραμέτρους του ελεγκτή σε πραγματικό χρόνο με βάση τη συμπεριφορά του συστήματος. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της απόδοσης ελέγχου σε συστήματα με μεταβλητή ή αβέβαιη δυναμική. Ωστόσο, το MRAC απαιτεί περισσότερους υπολογιστικούς πόρους από τους ελεγκτές PID και μπορεί να είναι πιο πολύπλοκο στην εφαρμογή του.

Ο LQR είναι ένας αλγόριθμος ελέγχου ανάδρασης που έχει σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιεί μια τετραγωνική συνάρτηση κόστους των καταστάσεων του συστήματος και των εισόδων ελέγχου. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε συστήματα με γραμμική δυναμική και Gaussian θόρυβο. Το LQR μπορεί να παρέχει βέλτιστη απόδοση ελέγχου και μπορεί να σχεδιαστεί για να πληροί συγκεκριμένες απαιτήσεις συστήματος. Ωστόσο, μπορεί να μην είναι κατάλληλο για συστήματα με μη γραμμική δυναμική ή μεγάλες αβεβαιότητες.

Συνοπτικά, η επιλογή του αλγόριθμου ελέγχου που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή και τις απαιτήσεις του συστήματος. Οι ελεγκτές PID είναι απλοί και χρησιμοποιούνται ευρέως, το MRAC μπορεί να προσαρμοστεί σε μεταβλητές ή αβέβαιες δυναμικές και το LQR μπορεί να παρέχει βέλτιστη απόδοση ελέγχου για γραμμικά συστήματα.

Οι ελεγκτές PID μπορούν να βελτιωθούν χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους. Ένας από αυτούς είναι με τη χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων που περιλαμβάνουν την εύρεση της καλύτερης λύσης από ένα σύνολο πιθανών λύσεων. Αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της μηχανικής, των χρηματοοικονομικών και της μηχανικής μάθησης, μεταξύ άλλων.

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων βρίσκοντας τον καλύτερο τρόπο κατανομής πόρων, προγραμματισμού εργασιών ή σχεδίασης προϊόντων. Για παράδειγμα, αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής μιας παραγωγικής διαδικασίας ή για τη μεγιστοποίηση της χρήσης ενός δικτύου μεταφοράς.

Βρίσκοντας τη βέλτιστη λύση σε ένα πρόβλημα, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση του κόστους που σχετίζεται με ένα σύστημα. Για παράδειγμα, η βελτιστοποίηση της δρομολόγησης των φορτηγών παράδοσης μπορεί να μειώσει το κόστος μεταφοράς ή η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ενός προϊόντος μπορεί να μειώσει το κόστος υλικών.

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους ή ρυθμίζοντας συστήματα ελέγχου. Για παράδειγμα, αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων ελέγχου ενός ρομπότ για τη βελτίωση της κίνησής του ή για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων ενός αλγορίθμου μηχανικής μάθησης για τη βελτίωση της ακρίβειάς του.

Πολλά συστήματα του πραγματικού κόσμου είναι πολύπλοκα και περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό μεταβλητών, περιορισμών και στόχων. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση αυτών των πολύπλοκων προβλημάτων και την εύρεση της καλύτερης λύσης. Για παράδειγμα, αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό πολύπλοκων χημικών διεργασιών ή για τη βελτιστοποίηση συστημάτων παραγωγής και διανομής ενέργειας.

Συνοπτικά, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται για την εύρεση της καλύτερης λύσης σε ένα πρόβλημα, η οποία μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της αποδοτικότητας, στη μείωση του κόστους, στη βελτίωση της απόδοσης και στη διαχείριση πολύπλοκων συστημάτων.

1.2 Δομή της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή της εργασίας, οι στόχοι και η δομή της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εισαγωγή στα συστήματα ελέγχου.

Στο τρίτο κεφάλαιο βρίσκεται η εισαγωγή στους αλγόριθμους βελτιστοποίησης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η βελτιστοποίηση PID με τη μέθοδο PSO.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

Κεφάλαιο 2ο: Εισαγωγή στα Συστήματα Ελέγχου

2.1 Εισαγωγή

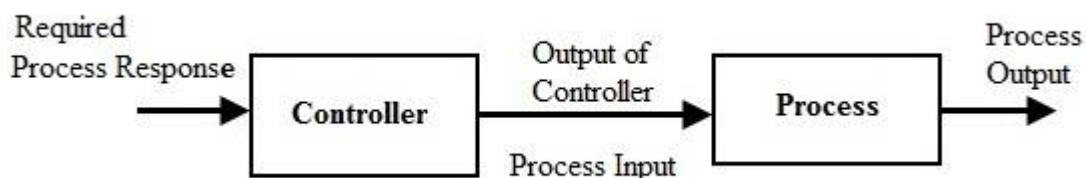
Ένα σύστημα ελέγχου είναι ένα σύστημα που διαχειρίζεται, ρυθμίζει ή ελέγχει μια διαδικασία ή ένα σύστημα για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων ή στόχων. Συνήθως αποτελείται από αισθητήρες, έναν ελεγκτή και ενεργοποιητές, οι οποίοι συνεργάζονται για να μετρήσουν και να προσαρμόσουν τη συμπεριφορά του συστήματος ως απόκριση σε εισόδους ή διαταραχές.

Ο σκοπός ενός συστήματος ελέγχου είναι να διασφαλίσει ότι μια διαδικασία ή ένα σύστημα λειτουργεί αποτελεσματικά και αποτελεσματικά, με ελάχιστα σφάλματα ή αποκλίσεις από τα επιθυμητά αποτελέσματα. Μπορεί να βρεθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους κλάδους, από τον βιομηχανικό αυτοματισμό μέχρι την αεροδιαστημική και την άμυνα, την αυτοκινητοβιομηχανία, την ενέργεια και την ενέργεια, τις ιατρικές συσκευές και πολλά άλλα.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συστημάτων ελέγχου, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων ανοιχτού βρόχου, συστημάτων κλειστού βρόχου και συστημάτων ελέγχου ανάδρασης. Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν με βάση προκαθορισμένες εισόδους χωρίς ανάδραση, ενώ τα συστήματα κλειστού βρόχου ενσωματώνουν ανάδραση για να προσαρμόσουν και να ρυθμίσουν τη συμπεριφορά του συστήματος. Τα συστήματα ελέγχου ανάδρασης είναι ο πιο κοινός τύπος συστήματος ελέγχου, όπου η έξοδος του συστήματος μετριέται και συγκρίνεται με μια επιθυμητή τιμή και ο ελεγκτής προσαρμόζει τις εισόδους για να ελαχιστοποιήσει οποιοδήποτε σφάλμα ή απόκλιση.

Σύστημα ανοιχτού βρόχου

Ο έλεγχος ανοιχτού βρόχου είναι ένας τύπος συστήματος ελέγχου στο οποίο η έξοδος του συστήματος δεν τροφοδοτείται πίσω στην είσοδο για διόρθωση. Με άλλα λόγια, η ενέργεια ελέγχου καθορίζεται αποκλειστικά από την είσοδο και δεν επηρεάζεται από την έξοδο.



Εικόνα 2.1: Σύστημα ελέγχου ανοιχτού βρόχου

[<https://www.elprocus.com/wp-content/uploads/Open-Loop-Control-System.jpg>]

Στον έλεγχο ανοιχτού βρόχου, ένας ελεγκτής στέλνει ένα σήμα στο σύστημα με βάση ένα προκαθορισμένο σημείο ρύθμισης ή επιθυμητό αποτέλεσμα. Στη συνέχεια, το σύστημα ανταποκρίνεται στο σήμα χωρίς μηχανισμό ανάδρασης για να ελέγξει εάν η έξοδος πληροί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Αυτός ο τύπος ελέγχου χρησιμοποιείται συχνά σε απλά συστήματα όπου η σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου είναι καλά κατανοητή και το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι προβλέψιμο. Για παράδειγμα, μια τοστιέρα είναι μια απλή συσκευή που χρησιμοποιεί έλεγχο ανοιχτού βρόχου. Όταν ρυθμίζετε το επίπεδο ψησίματος, η τοστιέρα εφαρμόζει μια προκαθορισμένη ποσότητα θερμότητας για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα, ανεξάρτητα από το πόσο φρυγανισμένο είναι το ψωμί.

Ωστόσο, ο έλεγχος ανοιχτού βρόχου μπορεί να είναι λιγότερο αξιόπιστος σε πολύπλοκα συστήματα ή συστήματα όπου υπάρχουν εξωτερικοί παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν την έξοδο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο έλεγχος κλειστού βρόχου, όπου η έξοδος τροφοδοτείται πίσω στην είσοδο για διόρθωση, μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικός.

Σύστημα κλειστού βρόχου

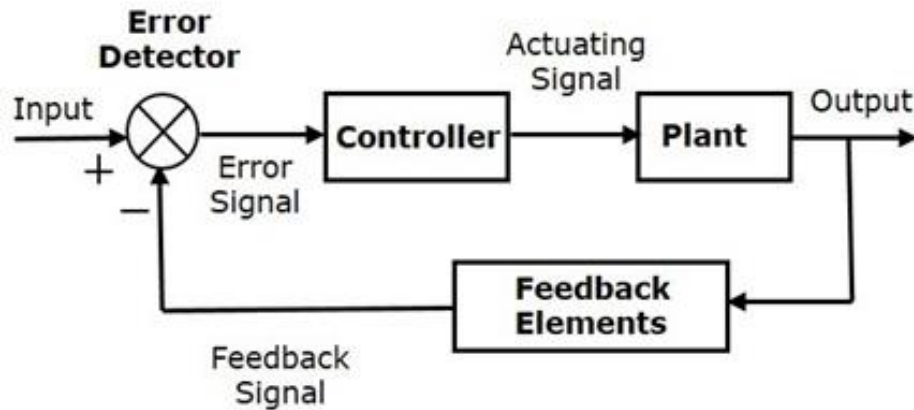
Ένα σύστημα κλειστού βρόχου (closed-loop system) είναι ένα σύστημα ελέγχου, στο οποίο χρησιμοποιείται μια ανατροφοδότηση για να ρυθμίσει την έξοδο του συστήματος και να διορθώσει τυχόν σφάλματα.

Αποτελείται από τρεις βασικές συνιστώσες:

Ένα στοιχείο ελέγχου (controller), το οποίο λαμβάνει την είσοδο του συστήματος και εκπέμπει ένα σήμα ελέγχου.

Ένα στοιχείο εκτέλεσης (actuator), το οποίο λαμβάνει το σήμα ελέγχου και εκτελεί την απαραίτητη ενέργεια στο σύστημα.

Ένα στοιχείο ανατροφοδότησης (feedback element), το οποίο λαμβάνει την έξοδο του συστήματος και επιστρέφει μια πληροφορία στον ελεγκτή, η οποία χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την έξοδο του συστήματος.



Εικόνα 2.2: Σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου

[<https://static.javatpoint.com/tutorial/control-system/images/introduction3.png>]

Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα κλειστού βρόχου ελέγχεται από την ανατροφοδότηση και διορθώνεται αναλόγως, για να διατηρήσει την επιθυμητή έξοδο.

Τύποι συστημάτων ελέγχου

Υπάρχουν πολλοί τύποι συστημάτων ελέγχου, αλλά κάποιοι από τους κύριους τύπους συστημάτων ελέγχου είναι:

Συστήματα ελέγχου on-off: Αυτός είναι ο απλούστερος τύπος συστήματος ελέγχου, όπου μια συσκευή ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται με βάση ένα συγκεκριμένο σημείο ρύθμισης. Για παράδειγμα, ένας θερμοστάτης που ενεργοποιεί έναν θερμαντήρα όταν η θερμοκρασία πέσει κάτω από μια καθορισμένη θερμοκρασία.

Συστήματα αναλογικού ελέγχου: Αυτός ο τύπος συστήματος ελέγχου προσαρμόζει την έξοδο ανάλογα με τη διαφορά μεταξύ του επιθυμητού σημείου ρύθμισης και της μετρούμενης τιμής. Για παράδειγμα, ένα ροοστάτη φωτός που προσαρμόζει τη φωτεινότητα του φωτός ανάλογα με τη θέση του διακόπτη ροοστάτη.

Integral συστήματα ελέγχου: Αυτός ο τύπος συστήματος ελέγχου υπολογίζει το ολοκλήρωμα του σήματος σφάλματος με την πάροδο του χρόνου και προσαρμόζει ανάλογα την έξοδο. Ο ολοκληρωμένος έλεγχος μπορεί να βοηθήσει στην εξάλειψη σφαλμάτων σταθερής κατάστασης που μπορεί να προκύψουν με τον αναλογικό έλεγχο.

Derivative συστήματα ελέγχου: Αυτός ο τύπος συστήματος ελέγχου υπολογίζει τον ρυθμό μεταβολής του σήματος σφάλματος και προσαρμόζει ανάλογα την έξοδο. Ο Derivative έλεγχος μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση του χρόνου απόκρισης του συστήματος και στη μείωση της υπέρβασης.

Συστήματα ελέγχου ανάδρασης: Αυτός ο τύπος συστήματος ελέγχου παρακολουθεί συνεχώς την έξοδο και προσαρμόζει την είσοδο με βάση τη διαφορά μεταξύ του επιθυμητού σημείου ρύθμισης και της μετρούμενης τιμής. Τα συστήματα ελέγχου ανάδρασης χρησιμοποιούνται συνήθως στον βιομηχανικό αυτοματισμό, τη ρομποτική, την αεροδιαστημική και την άμυνα, την αυτοκινητοβιομηχανία και άλλες εφαρμογές.

Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους κλάδους. Να μερικά παραδείγματα:

Βιομηχανικός αυτοματισμός: Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται εκτενώς στις βιομηχανίες για την αυτοματοποίηση των διαδικασιών και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τον έλεγχο της θερμοκρασίας, της πίεσης, του ρυθμού ροής και του επιπέδου στις διαδικασίες παραγωγής.

Ρομποτική: Η ρομποτική είναι ένας τομέας όπου τα συστήματα ελέγχου διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο. Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της κίνησης και των ενεργειών των ρομπότ σε διάφορες εφαρμογές, όπως η κατασκευή, η συναρμολόγηση και η εξερεύνηση.

Αεροδιαστημική και Άμυνα: Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη και διαστημόπλοια για τον έλεγχο των συστημάτων πτήσης, πλοήγησης και επικοινωνίας τους. Διαδραματίζουν επίσης ζωτικό ρόλο στα συστήματα καθοδήγησης και ελέγχου πυραύλων.

Αυτοκίνητο: Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται στα οχήματα για τη διαχείριση της απόδοσης, της ευστάθειας και των συστημάτων ασφαλείας του κινητήρα τους. Παραδείγματα περιλαμβάνουν συστήματα αντιμπλοκαρίσματος πέδησης (ABS), ηλεκτρονικό έλεγχο ευστάθειας (ESC) και συστήματα διαχείρισης κινητήρα.

Ενέργεια και Ισχύς: Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται σε συστήματα παραγωγής και διανομής ενέργειας για τη διασφάλιση σταθερής λειτουργίας και αποδοτικής χρήσης ενέργειας. Παραδείγματα περιλαμβάνουν συστήματα ελέγχου σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, τεχνολογία έξυπνων δικτύων και συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Ιατρικές συσκευές: Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται σε διάφορες ιατρικές συσκευές, όπως αντλίες έγχυσης, αναπνευστήρες και μετρητές γλυκόζης αίματος για να διασφαλιστεί η ακριβής και ασφαλής λειτουργία.

Περιβαλλοντικός έλεγχος: Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC) στα κτίρια για τη διατήρηση ενός άνετου εσωτερικού περιβάλλοντος.

Έλεγχος διαδικασίας: Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται στη χημική και πετροχημική βιομηχανία για τον έλεγχο των χημικών αντιδράσεων και τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας για την επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας και ποσότητας προϊόντος.

Γεωργία: Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται στη γεωργία ακριβείας για τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης και της απόδοσης των καλλιεργειών ελέγχοντας παράγοντες όπως το νερό, τα θρεπτικά συστατικά και το φως.

Συνολικά, τα συστήματα ελέγχου διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών, στη βελτίωση της απόδοσης και στην εξασφάλιση ασφαλούς και αξιόπιστης λειτουργίας σε διάφορους κλάδους και εφαρμογές.

Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της συμπεριφοράς των ενεργοποιητών, οι οποίοι είναι συσκευές που μετατρέπουν ηλεκτρικά ή υδραυλικά σήματα σε φυσική κίνηση. Αυτά τα συστήματα ελέγχου συνήθως χρησιμοποιούν έναν ή περισσότερους αλγόριθμους για να υπολογίσουν το κατάλληλο σήμα ελέγχου που θα κάνει τον ενεργοποιητή να κινηθεί με τον επιθυμητό τρόπο.

Ακολουθούν σύντομες επεξηγήσεις ορισμένων κοινών αλγορίθμων ελέγχου που χρησιμοποιούνται για ενεργοποιητές:

PID: Το PID σημαίνει Αναλογικό, Ολοκληρωμένο και Παράγωγο. Είναι ένας αλγόριθμος ελέγχου που υπολογίζει το σήμα ελέγχου με βάση το σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής εξόδου και της πραγματικής εξόδου του ενεργοποιητή. Ο αναλογικός όρος είναι ανάλογος με το σφάλμα, ο ολοκληρωτικός όρος είναι ανάλογος με το ολοκλήρωμα του σφάλματος με την πάροδο του χρόνου και ο παράγωγος όρος είναι ανάλογος με το ρυθμό μεταβολής του σφάλματος.

PI: Το PI σημαίνει Αναλογικό και Ολοκληρωμένο. Είναι μια απλοποιημένη έκδοση του PID που χρησιμοποιεί μόνο τους αναλογικούς και ολοκληρωτικούς όρους. Αυτός ο αλγόριθμος είναι χρήσιμος όταν ο παράγωγος όρος δεν χρειάζεται ή είναι δύσκολο να υπολογιστεί.

LQR: Το LQR σημαίνει Linear Quadratic Regulator. Είναι ένας βέλτιστος αλγόριθμος ελέγχου που υπολογίζει το σήμα ελέγχου που ελαχιστοποιεί μια τετραγωνική συνάρτηση κόστους. Αυτός ο αλγόριθμος είναι χρήσιμος όταν η δυναμική του συστήματος μπορεί να προσεγγιστεί με ένα γραμμικό μοντέλο.

MRAC: Το MRAC σημαίνει Προσαρμοστικός Έλεγχος Αναφοράς Μοντέλου. Είναι ένας αλγόριθμος ελέγχου που προσαρμόζεται στις αλλαγές στο σύστημα χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο αναφοράς. Το μοντέλο αναφοράς χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των παραμέτρων του συστήματος και το σήμα ελέγχου προσαρμόζεται ώστε να ταιριάζει με τη συμπεριφορά του μοντέλου αναφοράς.

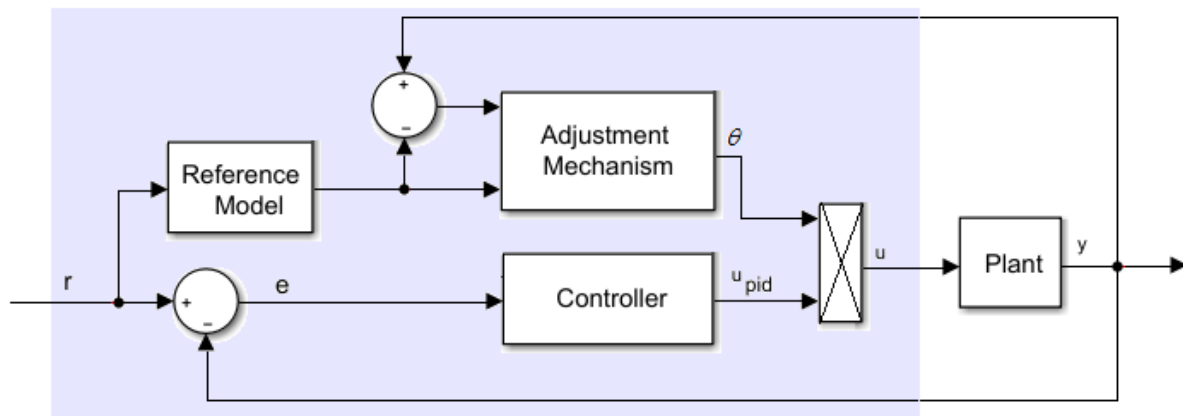
MPC: Το MPC σημαίνει Έλεγχος πρόβλεψης μοντέλου. Είναι ένας αλγόριθμος ελέγχου που χρησιμοποιεί ένα μοντέλο του συστήματος για να προβλέψει τη συμπεριφορά του σε έναν πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα. Το σήμα ελέγχου υπολογίζεται ελαχιστοποιώντας μια συνάρτηση κόστους που τιμωρεί τις αποκλίσεις από την επιθυμητή συμπεριφορά.

Fuzzy Logic: Η ασαφής λογική είναι ένας αλγόριθμος ελέγχου που χρησιμοποιεί ασαφή σύνολα για να αναπαραστήσει αβέβαιες ή ανακριβείς πληροφορίες. Είναι χρήσιμο όταν η δυναμική του συστήματος είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί ή όταν υπάρχει αβεβαιότητα στις παραμέτρους του συστήματος. Η ασαφής λογική επιτρέπει πιο ευέλικτες στρατηγικές ελέγχου που μπορούν να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Συνοπτικά, ο έλεγχος PID είναι μια απλή και αποτελεσματική τεχνική ελέγχου για πολλά συστήματα, ενώ το LQR είναι μια καλή επιλογή για γραμμικά συστήματα με καλά καθορισμένα μοντέλα. Το MRAC είναι μια καλή επιλογή για συστήματα με αβεβαιότητες και το MPC μπορεί να χειριστεί περιορισμούς και να παρέχει καλή απόδοση για μη γραμμικά συστήματα. Η επιλογή της στρατηγικής ελέγχου εξαρτάται από τη δυναμική του συστήματος, την ακρίβεια του μοντέλου και τις απαιτήσεις απόδοσης.

2.2 Σύστημα Ελέγχου MRAC

Το MRAC ή ο προσαρμοζόμενος έλεγχος αναφοράς μοντέλου, είναι ένας τύπος συστήματος ελέγχου που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο δυναμικών συστημάτων με αβέβαιες ή μεταβαλλόμενες παραμέτρους. Στο MRAC, ο ελεγκτής προσαρμόζει τις παραμέτρους του με βάση την έξοδο ενός μοντέλου αναφοράς, το οποίο αντιπροσωπεύει την επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος.



Εικόνα 2.3: MRAC σύστημα ελέγχου

[https://www.mathworks.com/help/sps/ref/model_reference_adaptive_controller_equiv_circuit.png]

Η βασική ιδέα πίσω από το MRAC είναι η χρήση ενός μοντέλου αναφοράς για τη δημιουργία της επιθυμητής απόκρισης του συστήματος. Στη συνέχεια, ο ελεγκτής προσαρμόζει τις παραμέτρους του

ώστε να ταιριάζουν με την έξοδο του μοντέλου αναφοράς, διασφαλίζοντας έτσι ότι το σύστημα ανταποκρίνεται όπως επιθυμεί.

Το MRAC αποτελείται από δύο κύρια στοιχεία: ένα μοντέλο εγκατάστασης και έναν προσαρμοστικό ελεγκτή. Το μοντέλο εγκατάστασης αντιπροσωπεύει το σύστημα που ελέγχεται και μπορεί να υπόκειται σε αβέβαιες ή ποικίλες παραμέτρους. Ο προσαρμοστικός ελεγκτής προσαρμόζει τις παραμέτρους του για να διασφαλίσει ότι η έξοδος του μοντέλου εγκατάστασης ταιριάζει με την έξοδο του μοντέλου αναφοράς.

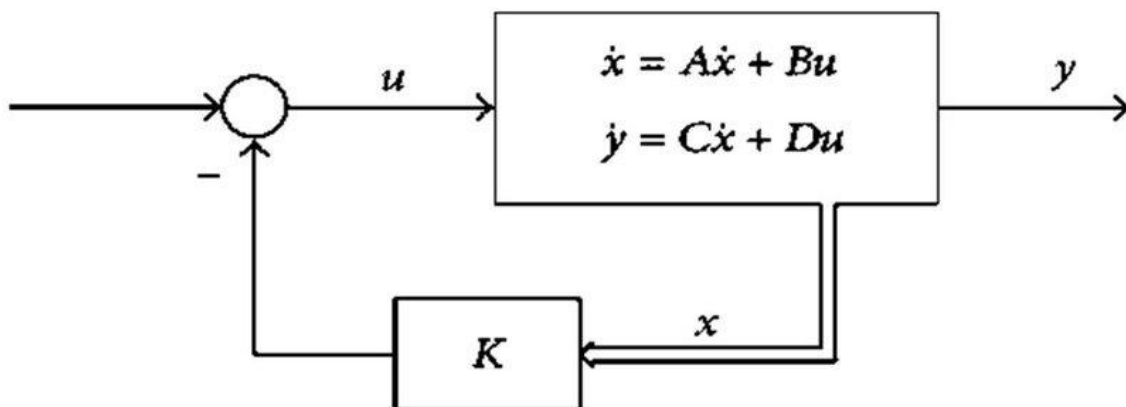
Το μοντέλο αναφοράς είναι συνήθως ένα απλό μοντέλο που αντιπροσωπεύει την επιθυμητή συμπεριφορά του συστήματος. Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του σήματος ελέγχου που εφαρμόζεται στο μοντέλο εγκατάστασης. Στη συνέχεια, ο προσαρμοστικός ελεγκτής προσαρμόζει τις παραμέτρους του για να ταιριάζει την έξοδο του μοντέλου εγκατάστασης με την έξοδο του μοντέλου αναφοράς.

Το MRAC έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα ελέγχου. Είναι σε θέση να χειρίζεται συστήματα με αβέβαιες ή ποικίλες παραμέτρους, οι οποίες μπορεί να είναι δύσκολο να ελεγχθούν με άλλες μεθόδους. Είναι επίσης σε θέση να προσαρμόζεται στις αλλαγές του συστήματος με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που το καθιστά πιο στιβαρό και αξιόπιστο. Ωστόσο, το MRAC μπορεί να είναι πιο περίπλοκο στην εφαρμογή και μπορεί να απαιτεί περισσότερους υπολογιστικούς πόρους από άλλες μεθόδους ελέγχου.

2.3 Σύστημα Ελέγχου LQR

Ο έλεγχος LQR (Linear Quadratic Regulator) είναι μια δημοφιλής στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιείται στη μηχανική έλεγχου για το σχεδιασμό ελεγκτών ανάδρασης για γραμμικά συστήματα. Ο στόχος του ελέγχου LQR είναι να ελαχιστοποιήσει μια συνάρτηση κόστους που ορίζεται ως προς την κατάσταση του συστήματος και τις μεταβλητές εισόδου.

Η συνάρτηση κόστους περιλαμβάνει συνήθως δύο στοιχεία: έναν τετραγωνικό όρο που τιμωρεί τις αποκλίσεις της κατάστασης του συστήματος από μια επιθυμητή τροχιά αναφοράς και έναν τετραγωνικό όρο που τιμωρεί το μέγεθος των εισόδων ελέγχου. Ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση κόστους, ο ελεγκτής δημιουργεί εισόδους ελέγχου που οδηγούν το σύστημα προς την επιθυμητή τροχιά αναφοράς, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την προσπάθεια ελέγχου.



Εικόνα 2.4: LQR σύστημα ελέγχου

[<https://www.researchgate.net/publication/333928071/figure/fig3/AS:772232037036036@1561125873872/Architecture-of-LQR-control-system.jpg>]

Ο ελεγκτής LQR έχει σχεδιαστεί επιλύοντας την εξίσωση Riccati, η οποία είναι μια διαφορική εξίσωση που περιγράφει τα βέλτιστα κέρδη ανάδρασης που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση κόστους. Η λύση της εξίσωσης Riccati παρέχει τον πίνακα κέρδους ανάδρασης που χαρτογραφεί την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος στη βέλτιστη είσοδο ελέγχου.

Η τεχνική ελέγχου LQR έχει πολλά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητάς της να χειρίζεται διαταραχές και αβεβαιότητες στο σύστημα και την ευκολία εφαρμογής της. Χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπως η ρομποτική, η αεροδιαστημική και ο έλεγχος διεργασιών, όπου ο στόχος είναι ο έλεγχος ενός γραμμικού συστήματος για την επίτευξη των επιθυμητών στόχων απόδοσης.

Ο στόχος του ελέγχου LQR είναι να σχεδιάσει έναν ελεγκτή που ελαχιστοποιεί μια συνάρτηση κόστους ενώ ικανοποιεί ορισμένους περιορισμούς. Στο πλαίσιο του ελέγχου ενεργοποιητή, η συνάρτηση κόστους είναι τυπικά ένα σταθμισμένο άθροισμα της απόκλισης της εξόδου του ενεργοποιητή από την επιθυμητή έξοδο και της προσπάθειας ελέγχου που απαιτείται για να επιτευχθεί αυτή η έξοδος. Τα βάρη σε αυτούς τους όρους μπορούν να επιλεγούν για να αντισταθμίσουν την απόδοση παρακολούθησης και την προσπάθεια ελέγχου.

Ο ελεγκτής LQR έχει σχεδιαστεί επιλύοντας μια εξίσωση Riccati που χαρακτηρίζει τον βέλτιστο νόμο ελέγχου. Η λύση της εξίσωσης Riccati δίνει τον πίνακα κέρδους ανάδρασης που χαρτογραφεί την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος στην ενέργεια ελέγχου που απαιτείται για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους.

Μόλις υπολογιστεί ο πίνακας κέρδους ανάδρασης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου για τη ρύθμιση της εξόδου του ενεργοποιητή. Σε κάθε χρονικό βήμα, μετράται η τρέχουσα κατάσταση του ενεργοποιητή και ο πίνακας κέρδους ανάδρασης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ενέργειας ελέγχου που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους. Αυτή η διαδικασία

επαναλαμβάνεται σε κάθε χρονικό βήμα για να διασφαλιστεί ότι η έξοδος του ενεργοποιητή παρακολουθεί την επιθυμητή έξοδο ενώ ελαχιστοποιείται η προσπάθεια ελέγχου.

2.4 Σύστημα Ελέγχου MPC

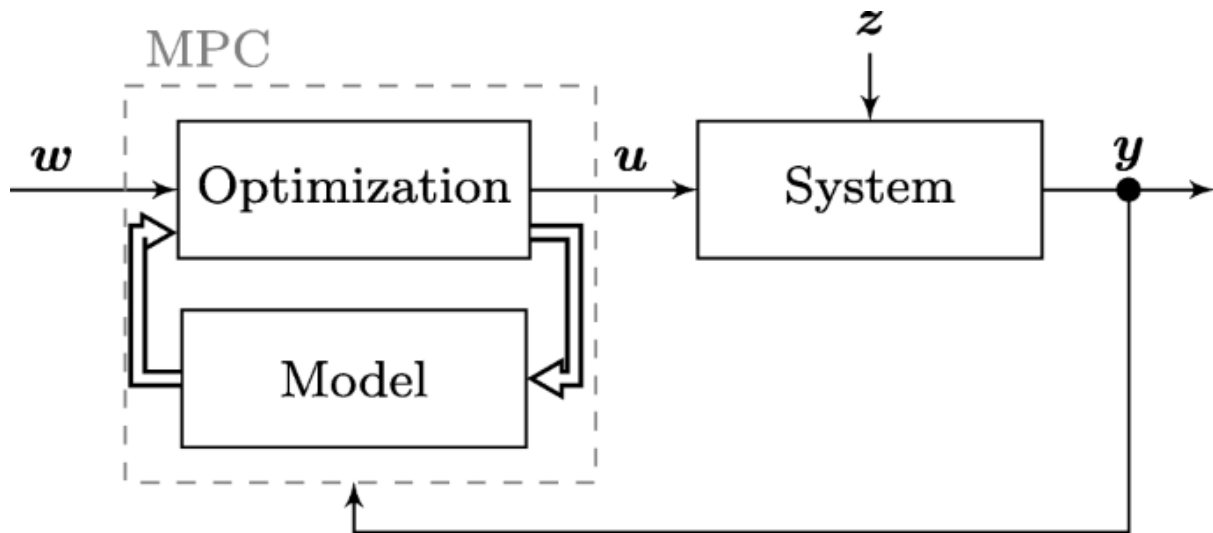
Το MPC (Model Predictive Control) είναι μια στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο του συστήματος που ελέγχεται για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τις ενέργειες ελέγχου που πρέπει να γίνουν. Στο πλαίσιο του ελέγχου ενεργοποιητή, το MPC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των βέλτιστων εισόδων ελέγχου στον ενεργοποιητή που επιτυγχάνουν την επιθυμητή έξοδο.

Στο MPC, ένα μοντέλο του ενεργοποιητή χρησιμοποιείται για να προβλέψει τη συμπεριφορά του σε έναν πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα. Αυτό το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις εισόδους στον ενεργοποιητή, τη δυναμική του συστήματος και τυχόν περιορισμούς στον ενεργοποιητή, όπως η μέγιστη ροπή ή ταχύτητα. Με βάση αυτό το μοντέλο, ο αλγόριθμος ελέγχου υπολογίζει μια ακολουθία εισόδων ελέγχου που ελαχιστοποιούν μια συνάρτηση κόστους στον χρονικό ορίζοντα.

Στη συνέχεια, οι εισόδοι ελέγχου εφαρμόζονται στον ενεργοποιητή μία κάθε φορά και η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε χρονικό βήμα. Καθώς το σύστημα εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου, η προβλεπόμενη συμπεριφορά μπορεί να αποκλίνει από την πραγματική συμπεριφορά λόγω διαταραχών ή σφαλμάτων μοντελοποίησης. Για να ληφθεί υπόψη αυτό, το μοντέλο ενημερώνεται σε κάθε χρονικό βήμα με βάση τις μετρούμενες εξόδους και οι εισόδοι ελέγχου υπολογίζονται εκ νέου με βάση το ενημερωμένο μοντέλο.

Το MPC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια ποικιλία εφαρμογών ελέγχου ενεργοποιητή, όπως η τοποθέτηση, ο έλεγχος ταχύτητας και ο έλεγχος δύναμης. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν υπάρχουν περιορισμοί στον ενεργοποιητή, όπως όρια στη ροπή ή την ταχύτητά του, καθώς μπορεί να διασφαλίσει ότι ο ενεργοποιητής λειτουργεί εντός των ασφαλών ορίων του ενώ επιτυγχάνει την επιθυμητή απόδοση.

Συνολικά, ο έλεγχος MPC για ενεργοποιητές είναι μια ισχυρή τεχνική που επιτρέπει τον ακριβή και αποτελεσματικό έλεγχο των συστημάτων ενεργοποιητών, επιτρέποντάς τους να εκτελούν πολύπλοκες εργασίες με υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία.



Εικόνα 2.5: MPC σύστημα ελέγχου

[https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1007%2Fs00170-021-07682-3/MediaObjects/170_2021_7682_Fig2_HTML.png]

Ένα παράδειγμα ελέγχου MPC για ενεργοποιητές είναι ο έλεγχος ενός ρομποτικού βραχίονα. Ο ρομποτικός βραχίονας έχει πολλαπλούς ενεργοποιητές που ελέγχουν τη θέση των αρθρώσεων του και ο στόχος είναι να μετακινηθεί ο τελικός τελεστής (το εργαλείο που συνδέεται στο άκρο του βραχίονα) σε μια επιθυμητή θέση στο διάστημα.

Για να επιτευχθεί αυτό, μπορεί να αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος MPC που λαμβάνει υπόψη την τρέχουσα θέση και την ταχύτητα του τελικού τελεστή, την επιθυμητή θέση και τη δυναμική του ρομποτικού βραχίονα. Οι εισόδοι ελέγχου στους ενεργοποιητές, όπως η ροπή ή η τάση, βελτιστοποιούνται για να ελαχιστοποιούν μια συνάρτηση κόστους που τιμωρεί τις αποκλίσεις από την επιθυμητή θέση, καθώς και τις παραβιάσεις τυχόν περιορισμών στους ενεργοποιητές.

Σε κάθε χρονικό βήμα, ο αλγόριθμος MPC προβλέπει τη μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος σε έναν πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα και υπολογίζει τις βέλτιστες εισόδους ελέγχου που επιτυγχάνουν την επιθυμητή θέση ενώ ικανοποιούν τους περιορισμούς. Η πρώτη είσοδος ελέγχου στην ακολουθία εφαρμόζεται στη συνέχεια στους ενεργοποιητές και η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε χρονικό βήμα.

Καθώς το σύστημα εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου, ο αλγόριθμος MPC ενημερώνει συνεχώς το μοντέλο του συστήματος και υπολογίζει εκ νέου τις εισόδους ελέγχου με βάση το ενημερωμένο μοντέλο. Αυτό διασφαλίζει ότι ο ρομποτικός βραχίονας παρακολουθεί την επιθυμητή θέση με ακρίβεια, διατηρώντας παράλληλα ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας για τους ενεργοποιητές.

Ο αλγόριθμος ελέγχου MPC επιτρέπει τον ακριβή και αποτελεσματικό έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα, επιτρέποντάς του να εκτελεί πολύπλοκες εργασίες όπως συναρμολόγηση, συγκόλληση ή χειρισμό υλικού με υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία.

Το Discrete MPC (Model Predictive Control) είναι μια στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιεί ένα μοντέλο διακριτού χρόνου του συστήματος που ελέγχεται για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τις ενέργειες ελέγχου που πρέπει να γίνουν. Στο πλαίσιο του ελέγχου ενεργοποιητή, το διακριτό MPC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των βέλτιστων εισόδων ελέγχου στον ενεργοποιητή που επιτυγχάνουν την επιθυμητή έξοδο.

Η βασική διαφορά μεταξύ του διακριτού MPC και του MPC συνεχούς χρόνου είναι ότι οι εισοδοί μοντέλου και ελέγχου ορίζονται σε διακριτά χρονικά διαστήματα αντί να είναι συνεχείς. Αυτό επιτρέπει στον ελεγκτή να λειτουργεί σε μια δειγματοληπτική έκδοση του συστήματος και τον καθιστά κατάλληλο για ψηφιακή εφαρμογή χρησιμοποιώντας μικροεπεξεργαστές ή προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές.

Για την εφαρμογή διακριτού MPC για έλεγχο ενεργοποιητή, το μοντέλο ενεργοποιητή διακριτοποιείται χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η αριθμητική ολοκλήρωση ή η προσέγγιση της δυναμικής του συστήματος. Το διακριτικό μοντέλο χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να προβλέψει τη μελλοντική συμπεριφορά του ενεργοποιητή σε έναν πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα. Με βάση αυτή την πρόβλεψη, ο αλγόριθμος ελέγχου υπολογίζει μια ακολουθία εισόδων ελέγχου που ελαχιστοποιούν μια συνάρτηση κόστους κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα.

Οι εισοδοί ελέγχου εφαρμόζονται στον ενεργοποιητή μία κάθε φορά και η διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε χρονικό βήμα. Σε κάθε χρονικό βήμα, το μοντέλο ενημερώνεται με την πιο πρόσφατη μέτρηση της εξόδου του ενεργοποιητή και οι εισοδοί ελέγχου υπολογίζονται εκ νέου με βάση το ενημερωμένο μοντέλο.

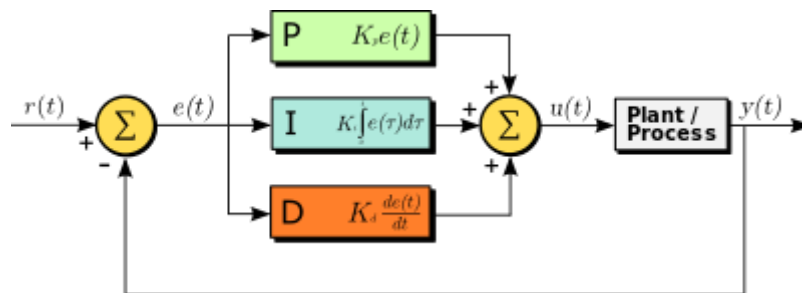
Το διακριτό MPC έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνικές ελέγχου για ενεργοποιητές, όπως ο έλεγχος αναλογικού-ολοκληρωτικού παραγώγου (PID). Επιτρέπει την ενσωμάτωση περιορισμών στον ενεργοποιητή, όπως όρια στην ταχύτητα ή τη ροπή του, και μπορεί να χειριστεί μη γραμμικότητες και διαταραχές στο σύστημα. Επιπλέον, το διακριτό MPC μπορεί να προσφέρει καλύτερη απόδοση και σταθερότητα από τον έλεγχο PID, ιδιαίτερα για πολύπλοκα συστήματα με πολλαπλές εισόδους και εξόδους.

Συνολικά, ο διακριτός έλεγχος MPC για ενεργοποιητές είναι μια ισχυρή τεχνική που επιτρέπει τον ακριβή και αποτελεσματικό έλεγχο των συστημάτων ενεργοποιητών, επιτρέποντάς τους να εκτελούν πολύπλοκες εργασίες με υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία.

2.5 Σύστημα Ελέγχου PID

Ο έλεγχος PID (Proportional-Integral-Derivative) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη στρατηγική ελέγχου σε μηχανικές και βιομηχανικές εφαρμογές. Είναι ένα σύστημα ελέγχου ανάδρασης που χρησιμοποιεί το σήμα σφάλματος μεταξύ του επιθυμητού σημείου ρύθμισης και της πραγματικής εξόδου για να προσαρμόσει το σήμα ελέγχου που αποστέλλεται στον ενεργοποιητή.

Ο έλεγχος PID ονομάζεται από τους τρεις όρους που συνθέτουν το σήμα ελέγχου: Αναλογικό, Ολοκληρωμένο και Παράγωγο. Ο αναλογικός όρος προσαρμόζει το σήμα ελέγχου με βάση το τρέχον σφάλμα, ο ολοκληρωτικός όρος συσσωρεύει το σφάλμα με την πάροδο του χρόνου και ο όρος παράγωγος προβλέπει μελλοντικό σφάλμα με βάση τον ρυθμό μεταβολής του σφάλματος.



Εικόνα 2.6: PID σύστημα ελέγχου

[https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller]

με εξίσωση

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{Εξ 2.1})$$

Αναλογικός Έλεγχος

Ο αναλογικός όρος βασίζεται στη διαφορά μεταξύ του σημείου ρύθμισης και της τρέχουσας εξόδου. Η έξοδος του ελεγκτή είναι ανάλογη με αυτό το σφάλμα, το οποίο ονομάζεται αναλογικό κέρδος (K_p). Το αναλογικό κέρδος είναι μια παράμετρος συντονισμού που καθορίζει την ευαισθησία του ελεγκτή στις αλλαγές στο σφάλμα.

Ένα υψηλό αναλογικό κέρδος έχει ως αποτέλεσμα μια ισχυρή απόκριση στις αλλαγές του σφάλματος, αλλά μπορεί επίσης να οδηγήσει σε υπέρβαση και αστάθεια. Ένα χαμηλό αναλογικό κέρδος έχει ως

αποτέλεσμα μια αργή απόκριση και αργή σύγκλιση στο σημείο ρύθμισης. Η βέλτιστη τιμή για το αναλογικό κέρδος εξαρτάται από το σύστημα που ελέγχεται και πρέπει να προσδιοριστεί μέσω πειραματισμού.

Ολοκληρωμένος έλεγχος

Ο ολοκληρωτικός όρος συσσωρεύει το σφάλμα με την πάροδο του χρόνου, το οποίο βοηθά στην εξάλειψη του σφάλματος σταθερής κατάστασης στο σύστημα. Η έξοδος του ελεγκτή είναι ανάλογη με το ολοκλήρωμα του σφάλματος, το οποίο ονομάζεται ολοκληρωτικό κέρδος (K_i).

Ο όρος ολοκλήρωσης χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση σφαλμάτων που παραμένουν ακόμη και όταν ο αναλογικός όρος είναι μηδέν. Αυτά τα σφάλματα προκαλούνται συνήθως από προκαταλήψεις στο σύστημα, όπως η τριβή ή η μη μοντελοποιημένη δυναμική. Ο ολοκληρωτικός όρος μπορεί να αντισταθμίσει αυτές τις προκαταλήψεις συσσωρεύοντας το σφάλμα με την πάροδο του χρόνου και αυξάνοντας σταδιακά το σήμα ελέγχου.

Ωστόσο, το πολύ υψηλό συνολικό κέρδος μπορεί να οδηγήσει σε υπέρβαση και αστάθεια, ειδικά σε συστήματα με σημαντικές χρονικές καθυστερήσεις. Η βέλτιστη τιμή για το ολοκληρωτικό κέρδος εξαρτάται επίσης από το σύστημα και πρέπει να προσδιοριστεί μέσω πειραματισμού.

Έλεγχος παραγώγων

Ο παράγωγος όρος προβλέπει μελλοντικό σφάλμα με βάση το ρυθμό μεταβολής του σφάλματος. Η έξοδος του ελεγκτή είναι ανάλογη με την παράγωγο του σφάλματος, η οποία ονομάζεται παράγωγος κέρδος (K_d).

Ο παράγωγος όρος χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της μεταβατικής απόκρισης του συστήματος προβλέποντας αλλαγές στο σφάλμα και προσαρμόζοντας ανάλογα το σήμα ελέγχου. Μπορεί επίσης να βοηθήσει στην απόσβεση των ταλαντώσεων και στη μείωση της υπέρβασης.

Ωστόσο, ο παράγωγος όρος μπορεί να ενισχύσει τον θόρυβο στο σύστημα, ο οποίος μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια. Επομένως, είναι σημαντικό να χρησιμοποιείτε τεχνικές φιλτραρίσματος για τη μείωση του θορύβου πριν από την εφαρμογή του παραγώγου όρου. Η βέλτιστη τιμή για το κέρδος της παραγώγου εξαρτάται από το σύστημα και πρέπει να προσδιοριστεί μέσω πειραματισμού.

Συντονισμός του ελεγκτή PID

Η διαδικασία προσδιορισμού των βέλτιστων τιμών για τα κέρδη PID ονομάζεται συντονισμός. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τον συντονισμό των ελεγκτών PID, που κυμαίνονται από απλές μη αυτόματες μεθόδους έως πιο εξελιγμένες αυτοματοποιημένες τεχνικές.

Ο χειροκίνητος συντονισμός περιλαμβάνει την προσαρμογή των κερδών με βάση την απόκριση του συστήματος σε μια βηματική είσοδο ή μια διαταραχή. Αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι χρονοβόρα και απαιτεί από έμπειρους χειριστές να αποφεύγουν την αστάθεια ή τις ταλαντώσεις.

Οι μέθοδοι αυτοματοποιημένου συντονισμού χρησιμοποιούν αλγόριθμους για τον προσδιορισμό των βέλτιστων κερδών με βάση τεχνικές αναγνώρισης συστήματος ή αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Αυτές οι μέθοδοι είναι πιο αποτελεσματικές και μπορούν συχνά να επιτύχουν καλύτερη απόδοση από τον χειροκίνητο συντονισμό, αλλά απαιτούν πιο πολύπλοκο υλικό και λογισμικό.

Εφαρμογές PID Control

Ο έλεγχος PID χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές και μηχανολογικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου διεργασιών, της ρομποτικής και του ελέγχου κίνησης. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε συστήματα που απαιτούν ακριβή έλεγχο και έχουν γραμμική ή σχεδόν γραμμική απόκριση.

Ο έλεγχος PID μπορεί να υλοποιηθεί με χρήση αναλογικού ή ψηφιακού υλικού ή μέσω λογισμικού σε μικροελεγκτή ή υπολογιστή. Η επιλογή της υλοποίησης εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συστήματος και τους διαθέσιμους πόρους.

Ένα παράδειγμα χρήσης ελέγχου PID για έναν ενεργοποιητή είναι ο έλεγχος ενός κινητήρα που χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση ενός ρομποτικού βραχίονα. Ο κινητήρας πρέπει να μετακινήσει τον βραχίονα στην επιθυμητή θέση, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την υπέρβαση και το σφάλμα σταθερής κατάστασης.

Ο αναλογικός όρος του ελεγκτή PID προσαρμόζει το σήμα ελέγχου με βάση το τρέχον σφάλμα, το οποίο είναι η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής θέσης και της τρέχουσας θέσης του βραχίονα. Η έξοδος του ελεγκτή είναι ανάλογη με αυτό το σφάλμα, το οποίο ονομάζεται αναλογικό κέρδος (K_p).

Ο ολοκληρωτικός όρος του ελεγκτή PID συσσωρεύει το σφάλμα με την πάροδο του χρόνου, το οποίο βοηθά στην εξάλειψη του σφάλματος σταθερής κατάστασης στο σύστημα. Η έξοδος του ελεγκτή είναι ανάλογη με το ολοκλήρωμα του σφάλματος, το οποίο ονομάζεται ολοκληρωτικό κέρδος (K_i).

Ο παράγωγος όρος του ελεγκτή PID προβλέπει μελλοντικό σφάλμα με βάση τον ρυθμό μεταβολής του σφάλματος. Η έξοδος του ελεγκτή είναι ανάλογη με την παράγωγο του σφάλματος, η οποία ονομάζεται παράγωγο κέρδος (K_d).

Οι τιμές των κερδών K_p , K_i και K_d προσδιορίζονται μέσω πειραματισμού και συντονισμού. Το αναλογικό κέρδος ορίζεται αρκετά υψηλό ώστε να παρέχει ισχυρή απόκριση στις αλλαγές του

σφάλματος, αλλά αρκετά χαμηλό για να αποφευχθεί η υπέρβαση και η αστάθεια. Το ολοκληρωτικό κέρδος ρυθμίζεται για την εξάλειψη του σφάλματος σταθερής κατάστασης και το κέρδος παραγώγου ρυθμίζεται για τη βελτίωση της μεταβατικής απόκρισης του συστήματος.

Το σήμα ελέγχου PID αποστέλλεται στη συνέχεια στον κινητήρα, ο οποίος προσαρμόζει την ταχύτητα ή τη ροπή του για να μετακινήσει τον ρομποτικό βραχίονα στην επιθυμητή θέση. Η ανάδραση από τον κινητήρα χρησιμοποιείται για την ενημέρωση του σήματος σφάλματος και τον επανυπολογισμό του σήματος ελέγχου σε κάθε χρονικό βήμα.

Ο έλεγχος PID είναι μια ισχυρή και αποτελεσματική τεχνική για τον έλεγχο ενεργοποιητών σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, παρέχοντας ακριβή και αξιόπιστο έλεγχο της ταχύτητας, της θέσης και της ροπής του κινητήρα.

Κεφάλαιο 3ο: Εισαγωγή στους αλγόριθμους βελτιστοποίησης

3.1 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

Ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης είναι μια μαθηματική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εύρεση της καλύτερης λύσης σε ένα πρόβλημα που περιλαμβάνει τη μεγιστοποίηση ή την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της μηχανικής, της οικονομίας, των οικονομικών, της επιστήμης των υπολογιστών και άλλων.

Υπάρχουν πολλοί τύποι αλγορίθμων βελτιστοποίησης, ο καθένας με τα δικά του πλεονεκτήματα και αδυναμίες. Ακολουθούν ορισμένοι συνηθισμένοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης:

Gradient Descent: Το Gradient Descent είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί τη διαβάθμιση της αντικειμενικής συνάρτησης για να βρει τη βέλτιστη λύση. Χρησιμοποιείται συνήθως στη μηχανική μάθηση και τη βαθιά μάθηση για την εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων.

Γενετικός αλγόριθμος: Οι γενετικοί αλγόριθμοι εμπνέονται από τη διαδικασία της φυσικής επιλογής και της εξέλιξης. Είναι αλγόριθμοι βασισμένοι σε πληθυσμό που δημιουργούν νέες λύσεις συνδυάζοντας και μεταλλάσσοντας υπάρχουσες. Χρησιμοποιούνται συνήθως για παγκόσμια προβλήματα βελτιστοποίησης που είναι δύσκολο να επιλυθούν με άλλες μεθόδους.

Βελτιστοποίηση σμήνος σωματιδίων: Η βελτιστοποίηση σμήνος σωματιδίων είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης βάσει πληθυσμού που προσομοιώνει την κίνηση των σωματιδίων σε έναν χώρο αναζήτησης. Χρησιμοποιείται συνήθως για προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων.

Γραμμικός προγραμματισμός: Ο γραμμικός προγραμματισμός είναι μια μαθηματική μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση μιας γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης που υπόκειται σε γραμμικούς περιορισμούς. Χρησιμοποιείται συνήθως στην επιχειρησιακή έρευνα και την επιστήμη διαχείρισης για προβλήματα κατανομής πόρων και προγραμματισμού.

Αυτά είναι μερικά μόνο παραδείγματα αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Η επιλογή του αλγορίθμου εξαρτάται από το συγκεκριμένο πρόβλημα που πρέπει να λυθεί και τις ιδιότητες της αντικειμενικής συνάρτησης και τους περιορισμούς.

3.2 Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

3.2.1 Αλγόριθμος Gradient Descent

Το Gradient Descent είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους προσαρμόζοντας τις παραμέτρους ενός μοντέλου ή συστήματος. Χρησιμοποιείται συνήθως στη μηχανική μάθηση και την τεχνητή νοημοσύνη για την εκπαίδευση μοντέλων και τη βελτίωση της απόδοσής τους.

Η συνάρτηση κόστους είναι ένα μέτρο του πόσο καλά αποδίδει το μοντέλο ή το σύστημα σε μια δεδομένη εργασία. Ο στόχος του Gradient Descent είναι να βρει το σύνολο των παραμέτρων που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση κόστους και παράγουν την καλύτερη απόδοση.

Η βασική ιδέα πίσω από το Gradient Descent είναι η επαναληπτική προσαρμογή των παραμέτρων του μοντέλου προς την κατεύθυνση της πιο απότομης καθόδου της συνάρτησης κόστους. Αυτό γίνεται με τον υπολογισμό της διαβάθμισης της συνάρτησης κόστους σε σχέση με κάθε παράμετρο και στη συνέχεια προσαρμόζοντας κάθε παράμετρο στην αντίθετη κατεύθυνση της κλίσης.

Ο αλγόριθμος ξεκινά με ένα αρχικό σύνολο τιμών παραμέτρων και τις ενημερώνει επαναληπτικά έως ότου η συνάρτηση κόστους φτάσει στο ελάχιστο. Ο κανόνας ενημέρωσης είναι:

$$\theta = \theta - \alpha \nabla J(\theta) \quad (\text{Εξ. 3.1})$$

όπου θ είναι το διάνυσμα των παραμέτρων, α είναι ο ρυθμός εκμάθησης, $J(\theta)$ είναι η συνάρτηση κόστους και $\nabla J(\theta)$ είναι η διαβάθμιση της συνάρτησης κόστους ως προς το θ .

Ο ρυθμός εκμάθησης καθορίζει το μέγεθος του βήματος σε κάθε επανάληψη και επηρεάζει την ταχύτητα σύγκλισης και τη σταθερότητα του αλγορίθμου. Ένας υψηλός ρυθμός εκμάθησης μπορεί να προκαλέσει ταλάντωση ή υπέρβαση του ελάχιστου αλγορίθμου, ενώ ένας χαμηλός ρυθμός εκμάθησης μπορεί να προκαλέσει αργή σύγκλιση και να κολλήσει στα τοπικά ελάχιστα.

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές του Gradient Descent, συμπεριλαμβανομένων παρτίδας, στοχαστικής και μίνι-παρτίδας. Στο Batch Gradient Descent, ολόκληρο το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διαβάθμισης και την ενημέρωση των παραμέτρων σε κάθε επανάληψη. Στη στοχαστική κάθοδο κλίσης, χρησιμοποιείται μόνο ένα παράδειγμα εκπαίδευσης για την ενημέρωση των παραμέτρων σε κάθε επανάληψη, η οποία μπορεί να είναι υπολογιστικά ταχύτερη, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε περισσότερο θόρυβο στις εκτιμήσεις κλίσης. Στο mini-batch Gradient Descent, ένα μικρό υποσύνολο του συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης χρησιμοποιείται για την

ενημέρωση των παραμέτρων σε κάθε επανάληψη, εξισορροπώντας τα πλεονεκτήματα των προσεγγίσεων κατά παρτίδες και στοχαστικές προσεγγίσεις.

Το Gradient Descent είναι ένας ισχυρός και ευρέως χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος βελτιστοποίησης που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων μηχανικής μάθησης, βελτιστοποίησης και ελέγχου. Είναι ένας ευέλικτος και επεκτάσιμος αλγόριθμος που μπορεί να χειριστεί μεγάλα σύνολα δεδομένων και πολύπλοκα μοντέλα, αλλά απαιτεί προσεκτική ρύθμιση του ρυθμού εκμάθησης και άλλων υπερπαραμέτρων για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης.

3.2.2 Αλγόριθμος Γενετικός αλγόριθμος - Genetic Algorithm (GA)

Ο γενετικός αλγόριθμος (GA) είναι ένας τύπος αλγόριθμου βελτιστοποίησης που εμπνέεται από τη διαδικασία της φυσικής επιλογής και της εξέλιξης. Χρησιμοποιείται για την εύρεση της βέλτιστης λύσης σε ένα πρόβλημα επιλέγοντας και εξελίσσοντας επαναληπτικά έναν πληθυσμό υποψήφιων λύσεων.

Το GA ξεκινά με την προετοιμασία ενός πληθυσμού υποψήφιων διαλυμάτων, τα οποία αναπαρίστανται ως χρωμοσώματα σε μια γενετική αναλογία. Κάθε χρωμόσωμα αντιπροσωπεύει μια υποψήφια λύση στο πρόβλημα και αποτελείται από ένα σύνολο γονιδίων που κωδικοποιούν τις παραμέτρους ή τις μεταβλητές της λύσης.

Η συνάρτηση fitness χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ποιότητας κάθε χρωμοσώματος στον πληθυσμό. Αντιπροσωπεύει την αντικειμενική συνάρτηση που προσπαθεί να βελτιστοποιήσει το GA και εκχωρεί μια τιμή καταλληλότητας σε κάθε χρωμόσωμα με βάση το πόσο καλά αποδίδει. Όσο υψηλότερη είναι η αξία καταλληλότητας, τόσο καλύτερη είναι η λύση.

Στη συνέχεια, το GA επιλέγει τα χρωμοσώματα με τις καλύτερες επιδόσεις στον πληθυσμό που θα χρησιμοποιηθούν ως γονείς για την επόμενη γενιά. Αυτή η διαδικασία επιλογής βασίζεται συνήθως στην τιμή καταλληλότητας κάθε χρωμοσώματος, με τις υψηλότερες τιμές καταλληλότητας να έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να επιλεγούν.

Τα επιλεγμένα χρωμοσώματα στη συνέχεια ανασυνδυάζονται ή διασταυρώνονται για να δημιουργηθούν χρωμοσώματα απογόνων για την επόμενη γενιά. Αυτή η διαδικασία μιμείται τη φυσική διαδικασία του γενετικού ανασυνδυασμού, όπου το γενετικό υλικό δύο γονέων συνδυάζεται για να δημιουργήσει απογόνους με νέους συνδυασμούς γονιδίων.

Η μετάλλαξη εισάγεται επίσης στα χρωμοσώματα των απογόνων για να εισάγει μικρές τυχαίες αλλαγές στα γονίδια. Αυτό βοηθά στην εξερεύνηση νέων περιοχών του χώρου αναζήτησης και αποτρέπει τον αλγόριθμο από το να κολλήσει στο τοπικό optima.

Στη συνέχεια, τα νέα χρωμοσώματα απογόνων αξιολογούνται χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση καταλληλότητας και επιλέγονται τα χρωμοσώματα με την καλύτερη απόδοση για να σχηματίσουν την επόμενη γενιά. Αυτή η διαδικασία επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης επαναλαμβάνεται για πολλές γενιές μέχρι να βρεθεί μια ικανοποιητική λύση.

Το GA έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητάς του να χειρίζεται μη γραμμικές, μη διαφοροποιήσιμες και ασυνεχείς συναρτήσεις, καθώς και την ικανότητά του να χειρίζεται πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις. Ωστόσο, έχει επίσης ορισμένους περιορισμούς, όπως η τάση του να κολλάει στο τοπικό βέλτιστο και η υψηλή υπολογιστική του πολυπλοκότητα για προβλήματα μεγάλης κλίμακας.

Συνοπτικά, το GA είναι ένας ισχυρός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που μιμείται τη διαδικασία της φυσικής επιλογής και της εξέλιξης για να βρεθεί η βέλτιστη λύση σε ένα πρόβλημα. Έχει πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της μηχανικής, των οικονομικών και της βιολογίας, και είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Ένα παράδειγμα αλγορίθμου βελτιστοποίησης γενετικού αλγορίθμου είναι η βελτιστοποίηση των παραμέτρων ενός νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιείται για την ταξινόμηση εικόνων. Ο στόχος είναι να βρεθεί το σύνολο των παραμέτρων που έχουν ως αποτέλεσμα την υψηλότερη ακρίβεια για το δεδομένο σύνολο δεδομένων.

Σε αυτό το παράδειγμα, το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο backpropagation, ο οποίος περιλαμβάνει επαναληπτική προσαρμογή των βαρών και των προκαταλήψεων του δικτύου για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών εξόδων. Ο αλγόριθμος backpropagation είναι ευαίσθητος στις αρχικές τιμές των βαρών και των προκαταλήψεων, επομένως η εύρεση καλών αρχικών τιμών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη σύγκλιση και την ακρίβεια του αλγορίθμου.

Ένας γενετικός αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναζήτηση του χώρου πιθανών τιμών βάρους και μεροληψίας για να βρεθεί ένα καλό σύνολο αρχικών τιμών. Ο αλγόριθμος λειτουργεί αντιπροσωπεύοντας κάθε σύνολο βαρών και προκαταλήψεων ως «χρωμόσωμα» σε έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων. Στη συνέχεια, ο πληθυσμός εξελίσσεται κατά τη διάρκεια μιας σειράς γενεών, με τα πιο κατάλληλα άτομα (αυτά με την υψηλότερη ακρίβεια) να επιλέγονται για να αναπαραχθούν και να παράγουν απογόνους με νέους συνδυασμούς βαρών και προκαταλήψεων.

Η διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Αρχικοποίηση: Ένας πληθυσμός N ατόμων δημιουργείται τυχαία, με κάθε άτομο να αντιπροσωπεύει ένα σύνολο βαρών και προκαταλήψεων για το νευρωνικό δίκτυο.

Αξιολόγηση φυσικής κατάστασης: Κάθε άτομο στον πληθυσμό αξιολογείται εκπαιδώντας το νευρωνικό δίκτυο με το σύνολο βαρών και προκαταλήψεων και μετρώντας την ακρίβειά του σε ένα σύνολο δεδομένων επικύρωσης.

Επιλογή: Επιλέγονται τα πιο κατάλληλα άτομα για αναπαραγωγή, με πιθανότητα επιλογής ανάλογη με την καταλληλότητά τους.

Crossover: Ζεύγη επιλεγμένων ατόμων συνδυάζονται για να παράγουν απογόνους με νέους συνδυασμούς βαρών και προκαταλήψεων. Η διαδικασία διασταύρωσης περιλαμβάνει την τυχαία επιλογή ενός υποσυνόλου βαρών και προκαταλήψεων από κάθε γονέα και τον συνδυασμό τους για να σχηματίσει ένα νέο σύνολο τιμών για τους απογόνους.

Μετάλλαξη: Ένα μικρό ποσοστό των απογόνων μεταλλάσσεται τυχαία προσθέτοντας ή αφαιρώντας μια μικρή τιμή από τα βάρη και τις προκαταλήψεις τους.

Επανάληψη: Ο νέος πληθυσμός αξιολογείται, επιλέγεται, διασταυρώνεται και μεταλλάσσεται με τον ίδιο τρόπο για αρκετές γενιές μέχρι να ικανοποιηθεί ένα κριτήριο διακοπής (όπως ένας μέγιστος αριθμός γενεών ή ένα επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας).

Στο τέλος της διαδικασίας, το άτομο με την υψηλότερη φυσική κατάσταση (δηλαδή την υψηλότερη ακρίβεια) επιλέγεται ως λύση. Το σύνολο των βαρών και των προκαταλήψεων που αντιστοιχούν σε αυτό το άτομο μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ως αρχικές τιμές για τον αλγόριθμο backpropagation, ο οποίος μπορεί να βελτιστοποιήσει περαιτέρω το νευρωνικό δίκτυο για το δεδομένο σύνολο δεδομένων.

Συνολικά, οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι μια ισχυρή τεχνική βελτιστοποίησης για την εύρεση καλών αρχικών τιμών για πολύπλοκους αλγόριθμους όπως τα νευρωνικά δίκτυα, όπου ο χώρος αναζήτησης είναι μεγάλος και η βέλτιστη λύση είναι δύσκολο να βρεθεί χρησιμοποιώντας παραδοσιακές μεθόδους.

3.2.3 Αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO)

Το Particle Swarm Optimization (PSO) είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης βάσει πληθυσμού, εμπνευσμένος από τη συλλογική συμπεριφορά σμηνών πουλιών ή ψαριών. Εισήχθη το 1995 από τους James Kennedy και Russell Eberhart και έκτοτε έχει γίνει μια δημοφιλής τεχνική για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Η βασική ιδέα του PSO είναι να δημιουργήσει ένα σμήνος σωματιδίων, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει μια υποψήφια λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Τα σωματίδια κινούνται στον

χώρο αναζήτησης και προσαρμόζουν τη θέση και την ταχύτητά τους με βάση τη δική τους εμπειρία και αυτή των άλλων σωματιδίων στο σμήνος.

Κάθε σωματίδιο έχει μια θέση στο χώρο αναζήτησης και μια ταχύτητα που καθορίζει την κίνησή του. Η θέση του σωματιδίου αντιπροσωπεύει μια υποψήφια λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης και η ταχύτητα καθορίζει την κατεύθυνση και το μέγεθος της κίνησής του.

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, η συνάρτηση καταλληλότητας αξιολογείται για κάθε σωματίδιο, η οποία καθορίζει την ποιότητα ή την καταλληλότητά του ως λύση στο πρόβλημα. Η συνάρτηση καταλληλότητας παρέχει ένα μέτρο του πόσο καλά η θέση του σωματιδίου ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος και επιτυγχάνει την αντικειμενική συνάρτηση.

Τα σωματίδια ενημερώνουν τη θέση και την ταχύτητά τους με βάση τη δική τους πιο γνωστή θέση (προσωπική καλύτερη) και την πιο γνωστή θέση οποιουδήποτε σωματιδίου στο σμήνος (παγκόσμια καλύτερη). Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για να προσαρμόσουν την ταχύτητα του σωματιδίου και να το μετακινήσουν προς καλύτερες λύσεις στον χώρο αναζήτησης.

Η ταχύτητα κάθε σωματιδίου ενημερώνεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$v_i(t+1) = w * v_i(t) + c1 * rand() * (pbest_i - x_i(t)) + c2 * rand() * (gbest - x_i(t)) \quad (\text{Εξ 3.2})$$

όπου $v_i(t)$ είναι η ταχύτητα του σωματιδίου i τη χρονική στιγμή t , w είναι το βάρος αδράνειας που ελέγχει την αντιστάθμιση μεταξύ εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, $c1$ και $c2$ είναι σταθερές που ελέγχουν την επιρροή του προσωπικού καλύτερου και του παγκόσμιου καλύτερου, η $rand()$ είναι α γεννήτρια τυχαίων αριθμών, το $pbest_i$ είναι η προσωπική καλύτερη θέση του σωματιδίου i , το $x_i(t)$ είναι η τρέχουσα θέση του σωματιδίου i τη χρονική στιγμή t και το $gbest$ είναι η παγκόσμια καλύτερη θέση μεταξύ όλων των σωματιδίων στο σμήνος.

Στη συνέχεια, η θέση κάθε σωματιδίου ενημερώνεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (\text{Εξ 3.3})$$

Ο αλγόριθμος συνεχίζει να επαναλαμβάνεται μέσα από το σμήνος, ενημερώνοντας τις θέσεις και τις ταχύτητες των σωματιδίων, μέχρι να ικανοποιηθεί ένα κριτήριο διακοπής, όπως ένας μέγιστος αριθμός επαναλήψεων ή ένα επιθυμητό επίπεδο καταλληλότητας.

Το PSO έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης, όπως η απλότητα, η γρήγορη σύγκλιση και η ικανότητά του να χειρίζεται πολύπλοκα και πολυτροπικά προβλήματα βελτιστοποίησης. Έχει εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένου του μηχανικού σχεδιασμού, της επεξεργασίας εικόνας και της μηχανικής μάθησης.

Ωστόσο, το PSO έχει επίσης ορισμένους περιορισμούς, όπως η ευαισθησία του στην επιλογή των παραμέτρων, ο κίνδυνος πρόωρης σύγκλισης και η δυσκολία κλιμάκωσης σε χώρους αναζήτησης υψηλών διαστάσεων. Ωστόσο, παραμένει μια δημοφιλής και αποτελεσματική τεχνική βελτιστοποίησης και πολλές παραλλαγές και επεκτάσεις του αλγορίθμου έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων.

Ένα παράδειγμα χρήσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης PSO είναι η βελτιστοποίηση των βαρών ενός νευρωνικού δικτύου για μια εργασία ταξινόμησης. Ο στόχος είναι να βρεθεί το σύνολο των βαρών που ελαχιστοποιεί το σφάλμα ταξινόμησης σε ένα δεδομένο σύνολο δεδομένων.

Ο αλγόριθμος PSO λειτουργεί ορίζοντας ένα σμήνος σωματιδίων, όπου κάθε σωματίδιο αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Κάθε σωματίδιο έχει μια θέση στο χώρο αναζήτησης και μια ταχύτητα που καθορίζει την κίνησή του μέσα στο χώρο.

Ο αλγόριθμος PSO ξεκινά αρχικοποιώντας το σμήνος σωματιδίων με τυχαίες θέσεις και ταχύτητες. Η καταλληλότητα κάθε σωματιδίου αξιολογείται με τον υπολογισμό του σφάλματος ταξινόμησης στο σύνολο δεδομένων χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο σύνολο βαρών.

Στη συνέχεια, η θέση και η ταχύτητα κάθε σωματιδίου ενημερώνονται με βάση τη δική του πιο γνωστή θέση και την πιο γνωστή θέση των γειτόνων του στο σμήνος. Η ενημέρωση θέσης δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{νέα_θέση} = \text{τρέχουσα_θέση} + \text{ταχύτητα}$$

όπου η ταχύτητα υπολογίζεται ως:

$$\text{ταχύτητα} = w * \text{ταχύτητα} + c1 * \text{rand}() * (\text{καλύτερη_τοπική_θέση} - \text{τρέχουσα_θέση}) + c2 * \text{rand}() * (\text{καλύτερη_σφαιρική_θέση} - \text{τρέχουσα_θέση})$$

Εδώ, w είναι το βάρος αδράνειας, $c1$ και $c2$ είναι οι συντελεστές επιτάχυνσης, $\text{rand}()$ είναι ένας τυχαίος αριθμός μεταξύ 0 και 1, $\text{best_local_position}$ είναι η πιο γνωστή θέση των γειτόνων του σωματιδίου και $\text{best_global_position}$ είναι η πιο γνωστή θέση του ολόκληρου σμήνους.

Η διαδικασία ενημέρωσης των θέσεων και των ταχυτήτων επαναλαμβάνεται για σταθερό αριθμό επαναλήψεων ή μέχρι να ικανοποιηθεί ένα κριτήριο διακοπής, όπως ένα ελάχιστο όριο σφάλματος.

Στο τέλος της διαδικασίας βελτιστοποίησης, το σωματίδιο με την καλύτερη τιμή καταλληλότητας (δηλαδή το χαμηλότερο σφάλμα ταξινόμησης) επιλέγεται ως η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα. Το αντίστοιχο σύνολο βαρών χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την εργασία ταξινόμησης.

Το PSO είναι ένας ισχυρός και αποτελεσματικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών για την εύρεση της βέλτιστης λύσης σε ένα δεδομένο πρόβλημα.

3.2.4 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Γραμμικός Προγραμματισμός

Ο Γραμμικός Προγραμματισμός (LP) είναι μια μαθηματική τεχνική βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται για τη μεγιστοποίηση ή την ελαχιστοποίηση μιας γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης που υπόκειται σε ένα σύνολο γραμμικών περιορισμών. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι μια γραμμική εξίσωση που αντιπροσωπεύει τον στόχο του προβλήματος βελτιστοποίησης, ενώ οι περιορισμοί είναι γραμμικές ανισότητες ή ισότητες που ορίζουν την εφικτή περιοχή του προβλήματος.

Τα προβλήματα LP μπορούν να λυθούν χρησιμοποιώντας διάφορους αλγόριθμους βελτιστοποίησης, ο πιο δημοφιλής από τους οποίους είναι η μέθοδος simplex. Η μέθοδος simplex ξεκινά με μια αρχική εφικτή λύση και βελτιώνει επαναληπτικά τη λύση μετακινώντας από τη μια κορυφή της εφικτής περιοχής στην άλλη μέχρι να επιτευχθεί η βέλτιστη λύση.

Ακολουθούν τα βήματα που εμπλέκονται στη μέθοδο simplex:

1. Διατύπωση του προβλήματος LP: Το πρώτο βήμα για την επίλυση ενός προβλήματος LP χρησιμοποιώντας τη μέθοδο simplex είναι η διατύπωση του προβλήματος ορίζοντας την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι μια γραμμική εξίσωση που αντιπροσωπεύει τον στόχο του προβλήματος βελτιστοποίησης, ενώ οι περιορισμοί είναι γραμμικές ανισότητες ή ισότητες που ορίζουν την εφικτή περιοχή του προβλήματος.
2. Μετατροπή του προβλήματος LP σε τυπική μορφή: Για να εφαρμοστεί η μέθοδος simplex, το πρόβλημα LP πρέπει να μετατραπεί σε τυπική μορφή, η οποία περιλαμβάνει τη μετατροπή όλων των περιορισμών σε ισότητες και την εισαγωγή μη αρνητικών μεταβλητών slack για τη μετατροπή τυχόν ανισοτήτων σε ισότητες.
3. Προσδιορίστε την αρχική εφικτή λύση: Η μέθοδος simplex ξεκινά με μια αρχική εφικτή λύση, η οποία είναι ένα σημείο στην εφικτή περιοχή του προβλήματος που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την εύρεση της αρχικής εφικτής λύσης, όπως η αλγεβρική μέθοδος, η γραφική μέθοδος ή η μέθοδος της τεχνητής μεταβλητής.

4. Υπολογίστε την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης: Μόλις εντοπιστεί η αρχική εφικτή λύση, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογίζεται συνδέοντας τις τιμές των μεταβλητών απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση.
5. Προσδιορισμός της μεταβλητής εισαγωγής: Η μεταβλητή εισαγωγής είναι η μεταβλητή που μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί για να βελτιωθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Προσδιορίζεται επιλέγοντας τη μεταβλητή με τον πιο αρνητικό συντελεστή στη συνάρτηση αντικειμενικού.
6. Προσδιορισμός της μεταβλητής αποχώρησης: Η μεταβλητή αποχώρησης είναι η μεταβλητή που θα αφήσει τη βάση της λύσης όταν η μεταβλητή εισόδου αυξηθεί ή μειωθεί. Αναγνωρίζεται επιλέγοντας τη μεταβλητή που περιορίζει περισσότερο τη μεταβλητή εισαγωγής, δηλ. τη μεταβλητή με τη μικρότερη αναλογία της τιμής περιορισμού RHS προς τον συντελεστή της μεταβλητής εισαγωγής στην εξίσωση περιορισμού.
7. Ενημέρωση της λύσης: Η λύση ενημερώνεται μεταβαίνοντας από την τρέχουσα κορυφή της εφικτής περιοχής σε μια άλλη κορυφή που βελτιώνει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό γίνεται με την αντικατάσταση της μεταβλητής εξόδου με τη μεταβλητή εισαγωγής στην τρέχουσα βάση της λύσης και υπολογίζοντας εκ νέου τις τιμές των μεταβλητών απόφασης.
8. Επαναλάβετε τα βήματα 4-7 μέχρι να επιτευχθεί η βέλτιστη λύση: Η μέθοδος simplex επαναλαμβάνεται έως ότου η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης δεν μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, δηλαδή όλες οι μεταβλητές που εισάγουν έχουν μη αρνητικούς συντελεστές στη συνάρτηση αντικειμενικού.

Τα προβλήματα LP μπορούν επίσης να λυθούν χρησιμοποιώντας άλλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης, όπως η μέθοδος εσωτερικού σημείου, η μέθοδος dual simplex ή η μέθοδος διακλάδωσης και δέσμευσης. Κάθε αλγόριθμος έχει τα δικά του δυνατά και αδύνατα σημεία και είναι κατάλληλος για διαφορετικούς τύπους προβλημάτων LP.

3.2.5 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Taguchi

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Taguchi είναι μια μέθοδος σχεδιασμού και βελτιστοποίησης διαδικασιών με πολλαπλές παραμέτρους. Αναπτύχθηκε από τον Ιάπωνα μηχανικό Genichi Taguchi και χρησιμοποιείται ευρέως σε μηχανικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Taguchi βασίζεται στην αρχή της στιβαρής σχεδίασης, η οποία στοχεύει στη δημιουργία διεργασιών που δεν είναι ευαίσθητες στις διακυμάνσεις των παραμέτρων εισόδου. Ο στόχος είναι η παραγωγή προϊόντων ή υπηρεσιών που να είναι συνεπείς και αξιόπιστες, ακόμη και με την παρουσία θορύβου ή μεταβλητότητας.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Taguchi περιλαμβάνει τρία κύρια βήματα:

1. Σχεδιασμός πειραμάτων (DOE): Σε αυτό το βήμα, ένα σύνολο πειραμάτων έχει σχεδιαστεί για να ελέγξει τις επιδράσεις διαφορετικών παραμέτρων εισόδου στη μεταβλητή εξόδου που μας ενδιαφέρει. Τα πειράματα σχεδιάζονται συνήθως χρησιμοποιώντας έναν ορθογώνιο πίνακα, ο οποίος διασφαλίζει ότι κάθε παράμετρος ελέγχεται σε πολλαπλά επίπεδα, ενώ ελαχιστοποιεί τον αριθμό των απαιτούμενων πειραμάτων.
2. Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA): Σε αυτό το βήμα, τα αποτελέσματα των πειραμάτων αναλύονται χρησιμοποιώντας τεχνικές ANOVA για τον εντοπισμό των πιο σημαντικών παραμέτρων εισόδου και τις αλληλεπιδράσεις τους. Η ανάλυση ANOVA βοηθά στον προσδιορισμό των βέλτιστων επιπέδων κάθε παραμέτρου για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.
3. Βελτιστοποίηση: Σε αυτό το βήμα, τα βέλτιστα επίπεδα κάθε παραμέτρου εισόδου προσδιορίζονται με βάση την ανάλυση ANOVA. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Taguchi χρησιμοποιεί μια αναλογία σήματος προς θόρυβο (S/N) για την αξιολόγηση της ποιότητας της εξόδου, η οποία βασίζεται συνήθως στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης από την τιμή στόχο και στη μεγιστοποίηση της ανοχής στη μεταβλητότητα.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Taguchi έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης, όπως:

- Μειωμένη ευαισθησία στο θόρυβο και μεταβλητότητα στις παραμέτρους εισόδου
- Μειωμένος αριθμός πειραμάτων που απαιτούνται για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων
- Ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλαπλών παραμέτρων
- Εύκολη ερμηνεία και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Taguchi έχει χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής, του σχεδιασμού προϊόντων και της βελτιστοποίησης υπηρεσιών. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε καταστάσεις όπου η έξοδος επηρεάζεται από πολλαπλές παραμέτρους εισόδου και όπου υπάρχει μεταβλητότητα ή θόρυβος.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Taguchi είναι μια ισχυρή μέθοδος για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος με τον εντοπισμό του καλύτερου συνδυασμού παραμέτρων εισόδου που ελαχιστοποιούν τη διακύμανση στην έξοδο. Ένα παράδειγμα εφαρμογής του αλγόριθμου βελτιστοποίησης Taguchi είναι η κατασκευή τσιπ ημιαγωγών.

Στην κατασκευή ημιαγωγών, η απόδοση των καλών τσιπ από μια γκοφρέτα είναι μια σημαντική μέτρηση για την ποιότητα και την κερδοφορία της διαδικασίας παραγωγής. Η απόδοση επηρεάζεται

από πολλές παραμέτρους εισόδου, όπως η θερμοκρασία, η πίεση και ο χρόνος των διαφόρων σταδίων της διαδικασίας. Ο στόχος είναι να εντοπιστεί ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων εισόδου που μεγιστοποιεί την απόδοση και ελαχιστοποιεί τη διακύμανση της απόδοσης.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Taguchi χρησιμοποιεί μια σειρά από ορθογώνιους πίνακες για να προσδιορίσει τον βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων εισόδου. Ένας ορθογώνιος πίνακας είναι ένας πίνακας που περιέχει ένα σύνολο τιμών παραμέτρων εισόδου που έχουν επιλεγεί για να παρέχουν ένα ισορροπημένο και αντιπροσωπευτικό δείγμα του χώρου παραμέτρων. Δοκιμάζοντας ένα υποσύνολο των πιθανών συνδυασμών παραμέτρων εισόδου, η μέθοδος Taguchi μπορεί γρήγορα και αποτελεσματικά να εντοπίσει τον βέλτιστο συνδυασμό που παρέχει την καλύτερη απόδοση.

Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι οι παράμετροι εισόδου για μια διαδικασία κατασκευής ημιαγωγών είναι η θερμοκρασία, η πίεση και ο χρόνος και ότι η μέτρηση εξόδου είναι η απόδοση των καλών τσιπ. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Taguchi θα χρησιμοποιούσε έναν ορθογώνιο πίνακα για να δοκιμάσει ένα υποσύνολο των πιθανών συνδυασμών παραμέτρων εισόδου, όπως:

Πίνακας 3.1. Παράμετροι Εισόδου

Run	Temperature	Pressure	Time
1	Low	Low	Low
2	Low	High	High
3	High	Low	High
4	High	High	Low

Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR), που είναι ένα μέτρο της διακύμανσης στην έξοδο. Το SNR χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων εισόδου που ελαχιστοποιεί τη διακύμανση στην έξοδο.

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Taguchi για τον εντοπισμό του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων εισόδου, οι κατασκευαστές ημιαγωγών μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των καλών τσιπ και να μειώσουν τη διακύμανση της απόδοσης, οδηγώντας σε υψηλότερη ποιότητα και κερδοφορία.

Κεφάλαιο 4ο: Βελτιστοποίηση PID με τη μέθοδο Taguchi

4.1 Η ανάγκη για βελτιστοποίηση

Ο έλεγχος PID (Proportional-Integral-Derivative) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική ελέγχου σε διάφορες εφαρμογές. Ωστόσο, ο έλεγχος PID μπορεί να μην παρέχει πάντα την επιθυμητή απόδοση ελέγχου. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους κάποιος μπορεί να θέλει να βελτιώσει τον έλεγχο PID, όπως:

Βελτιωμένη απόδοση ελέγχου: Ο έλεγχος PID μπορεί να μην παρέχει πάντα τη βέλτιστη απόδοση ελέγχου, ειδικά σε συστήματα με μη γραμμική ή χρονικά μεταβαλλόμενη δυναμική. Η βελτίωση του ελέγχου PID μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτερους χρόνους απόκρισης, μειωμένη υπέρβαση και σφάλμα σταθερής κατάστασης και καλύτερη απόρριψη διαταραχών.

Ισχυρότητα: Ο έλεγχος PID μπορεί να είναι ευαίσθητος σε αλλαγές στη δυναμική του συστήματος, όπως αλλαγές στο κέρδος της διαδικασίας ή χρονικές καθυστερήσεις. Η βελτίωση του ελέγχου PID μπορεί να τον καταστήσει πιο εύρωστο σε τέτοιες αλλαγές, διασφαλίζοντας ότι η απόδοση του ελέγχου παραμένει αποδεκτή ακόμη και υπό διαφορετικές συνθήκες.

Ειδικές απαιτήσεις ελέγχου: Ορισμένες εφαρμογές ενδέχεται να έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις ελέγχου που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από τον τυπικό έλεγχο PID. Για παράδειγμα, ορισμένες εφαρμογές μπορεί να απαιτούν ταχύτερους χρόνους απόκρισης, καλύτερη απόρριψη διαταραχών ή αυστηρότερο έλεγχο συγκεκριμένων μεταβλητών. Η βελτίωση του ελέγχου PID μπορεί να συμβάλει στην κάλυψη αυτών των ειδικών απαιτήσεων ελέγχου.

Ενεργειακή απόδοση: Ο έλεγχος PID μπορεί να καταναλώσει σημαντική ποσότητα ενέργειας, ειδικά σε συστήματα με μεγάλους ενεργοποιητές ή όταν ελέγχονται συστήματα υψηλής ισχύος. Η βελτίωση του ελέγχου PID μπορεί να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

Συνοπτικά, η βελτίωση του ελέγχου PID μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη απόδοση ελέγχου, αυξημένη ευρωστία, ικανοποίηση συγκεκριμένων απαιτήσεων ελέγχου και βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση.

Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

Ο έλεγχος PID είναι ένας απλός αλγόριθμος ελέγχου που μπορεί να παρέχει σταθερή και ισχυρή απόδοση ελέγχου, αλλά μπορεί να μην αποδίδει βέλτιστα σε όλες τις περιπτώσεις.

Ορισμένοι τρόποι βελτίωσης του ελέγχου PID είναι:

Ρύθμιση των παραμέτρων PID: Ο σωστός συντονισμός των παραμέτρων PID (αναλογικά, ολοκληρωτικά και παράγωγα κέρδη) είναι κρίσιμης σημασίας για την επίτευξη καλής απόδοσης ελέγχου. Οι παράμετροι PID θα πρέπει να ρυθμίζονται ώστε να ταιριάζουν με τη δυναμική του συστήματος που ελέγχεται. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για τον συντονισμό των παραμέτρων PID, συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών και σφαλμάτων, της μεθόδου Ziegler-Nichols και της μεθόδου Cohen-Coon.

Προσθήκη ελέγχου τροφοδοσίας: Ο έλεγχος προώθησης μπορεί να προστεθεί στο στοιχείο ελέγχου PID για τη βελτίωση της απόδοσής του. Ο έλεγχος τροφοδοσίας περιλαμβάνει την εκτίμηση της διαταραχής ή των αλλαγών του σημείου ρύθμισης που αναμένεται να επηρεάσουν το σύστημα και την αντιστάθμισή τους πριν επηρεάσουν την έξοδο του συστήματος. Αυτό μπορεί να βελτιώσει τον χρόνο απόκρισης και να μειώσει την υπέρβαση και το σφάλμα σταθερής κατάστασης.

Χρήση προηγμένων τεχνικών ελέγχου: Προηγμένες τεχνικές ελέγχου, όπως ο προγνωστικός έλεγχος μοντέλου (MPC) ή ο προσαρμοστικός έλεγχος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της απόδοσης του ελέγχου PID. Το MPC χρησιμοποιεί ένα μοντέλο του συστήματος για να προβλέψει τη συμπεριφορά του και να βελτιστοποιήσει τις εισόδους ελέγχου σε έναν πεπερασμένο χρονικό ορίζοντα. Ο προσαρμοστικός έλεγχος μπορεί να προσαρμόσει τις παραμέτρους PID σε πραγματικό χρόνο με βάση τη συμπεριφορά του συστήματος, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει την απόδοση ελέγχου σε συστήματα με μεταβλητή ή αβέβαιη δυναμική.

Εφαρμογή ενός Cascade Control: Ο έλεγχος Cascade περιλαμβάνει τη χρήση δύο ή περισσότερων ελεγκτών PID σε σειρά για τη βελτίωση της απόδοσης ελέγχου. Η έξοδος του πρώτου ελεγκτή PID χρησιμοποιείται ως σημείο ρύθμισης για τον δεύτερο ελεγκτή PID, ο οποίος μπορεί να παρέχει ταχύτερο και ακριβέστερο έλεγχο της διαδικασίας.

Προσθήκη προστασίας κατά του τυλίγματος: Μπορεί να προστεθεί προστασία κατά του τυλίγματος στο χειριστήριο PID για να αποφευχθεί η υπέρβαση και η αστάθεια που προκαλούνται από κορεσμό ή όρια στην είσοδο ελέγχου. Η προστασία κατά της περιέλιξης μπορεί να εφαρμοστεί περιορίζοντας την ενσωματωμένη δράση του ελεγκτή PID όταν η είσοδος ελέγχου είναι κορεσμένη.

Συνοπτικά, η βελτίωση της απόδοσης του ελέγχου PID περιλαμβάνει τον συντονισμό των παραμέτρων PID, την προσθήκη ελέγχου ροής προς τα εμπρός, τη χρήση προηγμένων τεχνικών ελέγχου, την εφαρμογή ενός ελέγχου καταρράκτη και την προσθήκη προστασίας κατά της περιέλιξης. Η συγκεκριμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συστήματος και το συγκεκριμένο πρόβλημα ελέγχου.

Εφαρμογή αλγόριθμου βελτιστοποίησης στο PID

Η χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με τον έλεγχο PID μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της απόδοσης ελέγχου του συστήματος. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να βοηθήσουν στο συντονισμό των παραμέτρων του ελεγκτή PID για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης ελέγχου, ειδικά σε συστήματα με μη γραμμική ή χρονικά μεταβαλλόμενη δυναμική. Ακολουθούν ορισμένοι λόγοι για τους οποίους κάποιος μπορεί να θέλει να χρησιμοποιήσει αλγόριθμους βελτιστοποίησης για να συντονίσει τον ελεγκτή PID:

Σε πολύπλοκα συστήματα, μπορεί να είναι δύσκολο να ρυθμίσετε χειροκίνητα τον ελεγκτή PID για να επιτύχετε τη βέλτιστη απόδοση. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να βοηθήσουν στην εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του ελεγκτή PID πραγματοποιώντας αναζήτηση σε έναν μεγάλο χώρο πιθανών συνδυασμών παραμέτρων.

Ο μη αυτόματος συντονισμός του ελεγκτή PID μπορεί να είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, ειδικά σε πολύπλοκα συστήματα. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να μειώσουν τον χρόνο που απαιτείται για τον συντονισμό του ελεγκτή PID, επιτρέποντας ταχύτερη υλοποίηση και δοκιμή του συστήματος ελέγχου.

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να βοηθήσουν στη ρύθμιση του ελεγκτή PID ώστε να είναι πιο ανθεκτικός σε αλλαγές στη δυναμική του συστήματος, όπως αλλαγές στο κέρδος της διαδικασίας ή καθυστερήσεις χρόνου. Αυτό μπορεί να βοηθήσει να διασφαλιστεί ότι η απόδοση του ελέγχου παραμένει αποδεκτή ακόμη και υπό διαφορετικές συνθήκες.

Ορισμένες εφαρμογές ενδέχεται να έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις ελέγχου που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από τον τυπικό έλεγχο PID. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να βοηθήσουν στο συντονισμό του ελεγκτή PID ώστε να πληροί αυτές τις συγκεκριμένες απαιτήσεις ελέγχου, όπως ταχύτερους χρόνους απόκρισης, καλύτερη απόρριψη διαταραχών ή αυστηρότερο έλεγχο συγκεκριμένων μεταβλητών.

Η χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης για τον συντονισμό του ελεγκτή PID μπορεί να βοηθήσει στη βελτίωση της απόδοσης ελέγχου του συστήματος, στη μείωση του χρόνου συντονισμού, στην αύξηση της ευρωστίας και στην κάλυψη συγκεκριμένων απαιτήσεων ελέγχου.

Εφαρμογή του PSO στον PID έλεγχο

Το PSO (Particle Swarm Optimization) είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης βάσει πληθυσμού που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Είναι ένας αλγόριθμος στοχαστικής βελτιστοποίησης που αναζητά τη βέλτιστη λύση ενημερώνοντας επαναληπτικά μια ομάδα υποψήφιων λύσεων (σωματίδια) χρησιμοποιώντας ένα απλό σύνολο μαθηματικών εξισώσεων.

Το PSO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων ενός ελεγκτή PID, όπως το αναλογικό κέρδος, το ολοκληρωτικό κέρδος και το κέρδος παραγώγου, για τη βελτίωση της απόδοσης ελέγχου ενός συστήματος. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εύρεση των τιμών αυτών των παραμέτρων που ελαχιστοποιούν έναν δείκτη απόδοσης, όπως το ολοκλήρωμα του τετραγωνικού σφάλματος ή το ολοκλήρωμα του απόλυτου σφάλματος.

Ορισμένοι λόγοι για τους οποίους το PSO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση του ελέγχου PID είναι:

Βελτιωμένη απόδοση ελέγχου: Με τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων ενός ελεγκτή PID με χρήση PSO, είναι δυνατό να βρεθούν τιμές που παρέχουν καλύτερη απόδοση ελέγχου από τη χρήση των προεπιλεγμένων ή μη αυτόματα συντονισμένων παραμέτρων. Το PSO μπορεί να αναζητήσει αποτελεσματικά έναν μεγάλο χώρο παραμέτρων και να συγκλίνει γρήγορα στη βέλτιστη λύση.

Robustness: Το PSO μπορεί να βρει παραμέτρους που παρέχουν ισχυρή απόδοση ελέγχου ακόμα και όταν αλλάζει η δυναμική του συστήματος ή όταν υπάρχουν διαταραχές στο σύστημα. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές όπου η δυναμική του συστήματος δεν είναι καλά γνωστή ή όταν υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα στις παραμέτρους του συστήματος.

Ελαχιστοποίηση της προσπάθειας ελέγχου: Το PSO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ελαχιστοποίηση της προσπάθειας ελέγχου που απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης ελέγχου. Αυτό μπορεί να είναι σημαντικό σε εφαρμογές όπου η κατανάλωση ενέργειας ή η φθορά του ενεργοποιητή είναι ανησυχίες.

Αυτοματισμός: Το PSO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας συντονισμού των παραμέτρων του ελεγκτή PID. Αυτό μπορεί να εξοικονομήσει χρόνο και προσπάθεια σε σύγκριση με τις μεθόδους χειροκίνητου συντονισμού, οι οποίες μπορεί να είναι χρονοβόρες και απαιτούν εξειδίκευση.

Το PSO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων ενός ελεγκτή PID και τη βελτίωση της απόδοσης, της ευρωστίας και της αποδοτικότητας του ελέγχου.

Περιγραφή της μεθόδου εφαρμογής της PSO βελτιστοποίησης στον PID έλεγχο

Το PSO μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του ελεγκτή PID για τη βελτίωση της απόδοσης του ελέγχου. Μια γενική μέθοδος για τη χρήση του PSO για τον συντονισμό του ελέγχου PID είναι:

Ορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης (objective or cost function): Η αντικειμενική συνάρτηση πρέπει να αντικατοπτρίζει την απόδοση ελέγχου που πρέπει να βελτιστοποιηθεί. Για παράδειγμα,

μπορεί να θέλετε να ελαχιστοποιήσετε το σφάλμα σταθερής κατάστασης, να μειώσετε την υπέρβαση ή να βελτιώσετε τον χρόνο καθίζησης. Η αντικειμενική συνάρτηση θα πρέπει να λαμβάνει τις παραμέτρους του ελεγκτή PID ως είσοδο και να εξάγει μια βαθμωτή τιμή που αντικατοπτρίζει την απόδοση του ελέγχου.

Καθορισμός χώρου αναζήτησης: Ο χώρος αναζήτησης πρέπει να ορίζει το εύρος τιμών που μπορούν να λάβουν οι παράμετροι του ελεγκτή PID. Για παράδειγμα, το αναλογικό κέρδος (K_p) μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως 10, το ολοκληρωτικό κέρδος (K_i) μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως 1 και το κέρδος παραγώγου (K_d) μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως 1.

Ξεκινάει ο αλγόριθμος PSO καθορίζοντας το μέγεθος του σμήνους, τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων, το βάρος αδράνειας και τους συντελεστές επιτάχυνσης.

Αξιολόγηση της συνάρτησης fitness: Για κάθε σωματίδιο στο σμήνος, αξιολογείται η αντικειμενική συνάρτηση προσομοιώνοντας την απόκριση του συστήματος σε μια είσοδο βήματος με τις τρέχουσες παραμέτρους ελεγκτή PID.

Αρχή Επανάληψης:

Ενημερώνονται οι θέσεις και οι ταχύτητες των σωματιδίων: Ενημερώνονται οι θέσεις και οι ταχύτητες των σωματιδίων σύμφωνα με τις εξισώσεις ενημέρωσης του αλγόριθμου PSO.

Αξιολογούνται οι νέες τιμές καταλληλότητας: Αφού ενημερωθούν οι θέσεις και οι ταχύτητες των σωματιδίων, αξιολογούνται οι νέες τιμές καταλληλότητας για κάθε σωματίδιο.

Ενημέρωση της global best solution: Ενημερώνεται την παγκόσμια καλύτερη λύση με βάση το σωματίδιο με την καλύτερη αξία φυσικής κατάστασης.

Τέλος Επανάληψης

Επαναλαμβάνονται τα βήματα της επανάληψης μέχρι τη σύγκλιση: Ο τερματισμός επιτυγχάνεται μέχρι ο αλγόριθμος PSO να συγκλίνει ή να φτάσει τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων.

Χρησιμοποιούμε την global best solution: Η παγκόσμια καλύτερη λύση αντιπροσωπεύει τις βελτιστοποιημένες παραμέτρους του ελεγκτή PID που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση αντικειμένου. Χρησιμοποιούμε αυτές τις παραμέτρους στον ελεγκτή PID για να βελτιώσουμε την απόδοση του ελέγχου.

Ο αλγόριθμος PSO μπορεί να απαιτεί συντονισμό των δικών του παραμέτρων για να διασφαλίσει τη σωστή σύγκλιση και βελτιστοποίηση των παραμέτρων του ελεγκτή PID. Επίσης, η σύγκλιση του αλγορίθμου PSO μπορεί να εξαρτάται από την επιλεγμένη αντικειμενική συνάρτηση και τον χώρο αναζήτησης και μπορεί να απαιτούνται πολλές επαναλήψεις για να βρεθεί μια ικανοποιητική λύση.

Εφαρμογή της βελτιστοποίησης Taguchi στον PID έλεγχο

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Taguchi μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος ελέγχου PID προσδιορίζοντας τον καλύτερο συνδυασμό κερδών PID που ελαχιστοποιούν τη διακύμανση στην έξοδο του συστήματος.

Για να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Taguchi στον έλεγχο PID, πρέπει πρώτα να ορίσουμε τις παραμέτρους εισόδου και τις μετρήσεις εξόδου του συστήματος. Οι παράμετροι εισόδου είναι τα τρία κέρδη του ελεγκτή PID: K_p (αναλογικό κέρδος), K_i (ολοκληρωμένο κέρδος) και K_d (παράγωγο κέρδος). Η μέτρηση εξόδου είναι το σφάλμα μεταξύ του σημείου ρύθμισης και της πραγματικής εξόδου του συστήματος με την πάροδο του χρόνου.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε έναν ορθογώνιο πίνακα για να δοκιμάσουμε ένα υποσύνολο των πιθανών συνδυασμών των κερδών PID. Ο ορθογώνιος πίνακας παρέχει ένα ισορροπημένο και αντιπροσωπευτικό δείγμα του χώρου παραμέτρων, επιτρέποντάς μας να εντοπίσουμε γρήγορα και αποτελεσματικά τον βέλτιστο συνδυασμό κερδών που παρέχει την καλύτερη απόδοση.

Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι χρησιμοποιούμε έναν ορθογώνιο πίνακα L_9 για να δοκιμάσουμε ένα υποσύνολο των πιθανών συνδυασμών των κερδών PID. Ο πίνακας μπορεί να μοιάζει με αυτό:

Πίνακας 4.1. Πιθανοί συνδυασμοί των κερδών PID στο Taguchi

Run	K_p	K_i	K_d
1	Low	Low	Low
2	Low	High	High
3	High	Low	High
4	High	High	Low
5	Low	Mid	Mid
6	Mid	Low	Mid
7	Mid	Mid	Low
8	High	Mid	Mid
9	Mid	High	Mid

Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR), που είναι ένα μέτρο της διακύμανσης του σφάλματος. Το SNR χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού κερδών PID που ελαχιστοποιεί τη διακύμανση του σφάλματος.

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Taguchi για τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού κερδών PID, μπορούμε να βελτιώσουμε την απόδοση του συστήματος ελέγχου, μειώνοντας τη διακύμανση του σφάλματος και επιτυγχάνοντας πιο ακριβή και αξιόπιστο έλεγχο της

εξόδου του συστήματος. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε πολύπλοκα και δυναμικά συστήματα όπου ο βέλτιστος συνδυασμός κερδών PID μπορεί να μην είναι άμεσα προφανής.

Περιγραφή της μεθόδου εφαρμογής της Taguchi βελτιστοποίησης στον PID έλεγχο χρησιμοποιώντας ως μοναδικό κριτήριο τη σύγκριση τελική τιμής

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Taguchi μπορεί να εφαρμοστεί για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης ενός ελεγκτή PID προσδιορίζοντας τον βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων PID που ελαχιστοποιούν το σφάλμα μεταξύ των επιθυμητών και πραγματικών εξόδων ενός συστήματος ελέγχου. Ακολουθεί ένα παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Taguchi μπορεί να εφαρμοστεί στον έλεγχο PID:

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σύστημα που πρέπει να ελέγχει τη θερμοκρασία ενός κλιβάνου χρησιμοποιώντας έναν ελεγκτή PID. Οι παράμετροι εισόδου του ελεγκτή είναι το αναλογικό κέρδος (Kp), το ολοκληρωτικό κέρδος (Ki) και το κέρδος παραγωγού (Kd). Η μέτρηση εξόδου είναι η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής θερμοκρασίας και της πραγματικής θερμοκρασίας του κλιβάνου.

Επιλέγουμε έναν ορθογώνιο πίνακα: Επιλέγουμε πρώτα έναν ορθογώνιο πίνακα που μας επιτρέπει να δοκιμάσουμε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα του χώρου παραμέτρων ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των πειραμάτων. Ένας τυπικός ορθογώνιος πίνακας για τρεις παραμέτρους εισόδου θα ήταν ο L9 (3⁴), ο οποίος έχει 9 σειρές και 4 στήλες.

Προσδιορισμός των επιπέδων για κάθε παράμετρο εισόδου: Στη συνέχεια προσδιορίζουμε τα επίπεδα για κάθε παράμετρο εισόδου που θα ελεγχθεί. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να δοκιμάσουμε τρία επίπεδα για κάθε παράμετρο: χαμηλό, μεσαίο και υψηλό.

Εκτελούμε τα πειράματα: Εκτελούμε τα πειράματα σύμφωνα με τον επιλεγμένο ορθογώνιο πίνακα, χρησιμοποιώντας τους διαφορετικούς συνδυασμούς των επιπέδων για κάθε παράμετρο εισόδου.

Υπολογισμός της αναλογίας σήματος προς θόρυβο (SN): Στη συνέχεια υπολογίζουμε την αναλογία SN για κάθε συνδυασμό παραμέτρων εισόδου. Ο λόγος SN είναι ένα μέτρο της διακύμανσης στην έξοδο και υπολογίζεται ως:

Λόγος SN = $-10 \log$ (μέσο τετραγωνικό σφάλμα)

Θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε την αναλογία SN, που σημαίνει ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής θερμοκρασίας.

Προσδιορισμός του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων εισόδου: Χρησιμοποιούμε τους λόγους SN για να προσδιορίσουμε τον βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων εισόδου. Ο συνδυασμός με την

υψηλότερη αναλογία SN είναι ο βέλτιστος συνδυασμός που ελαχιστοποιεί το σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής θερμοκρασίας.

Εφαρμογή των βέλτιστων παραμέτρων PID: Τέλος, υλοποιούμε τον βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων PID στον ελεγκτή για να επιτύχουμε την επιθυμητή θερμοκρασία με ελάχιστο σφάλμα.

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Taguchi στον έλεγχο PID, μπορούμε γρήγορα και αποτελεσματικά να εντοπίσουμε τον βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων PID που ελαχιστοποιεί το σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής θερμοκρασίας ενός κλιβάνου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένο έλεγχο και μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα σε μια σειρά εφαρμογών συστημάτων ελέγχου.

Περιγραφή της μεθόδου εφαρμογής της Taguchi βελτιστοποίησης στον PID έλεγχο χρησιμοποιώντας ως κριτήρια overshoot, πρώτο undershot και settling time.

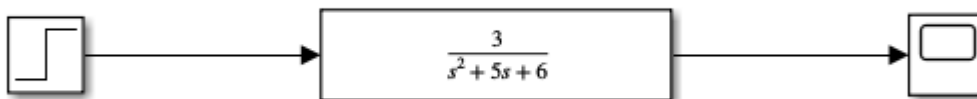
```
myHc= tf([3],[1 5 6])
```

```
myHc =
```

```
  3
```

```
-----
```

```
s^2 + 5s + 6
```



Εικόνα 4.1: Simulink blocks για την συνάρτηση μεταφοράς στο s-domain

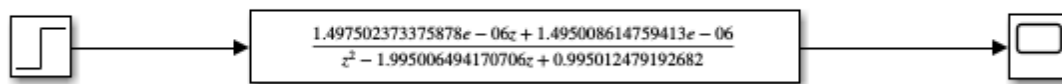
```
myHd = c2d(myHc,0.001)
```

myHd =

$$1.498e-06 z + 1.495e-06$$

$$z^2 - 1.995 z + 0.995$$

Sample time: 0.001 seconds



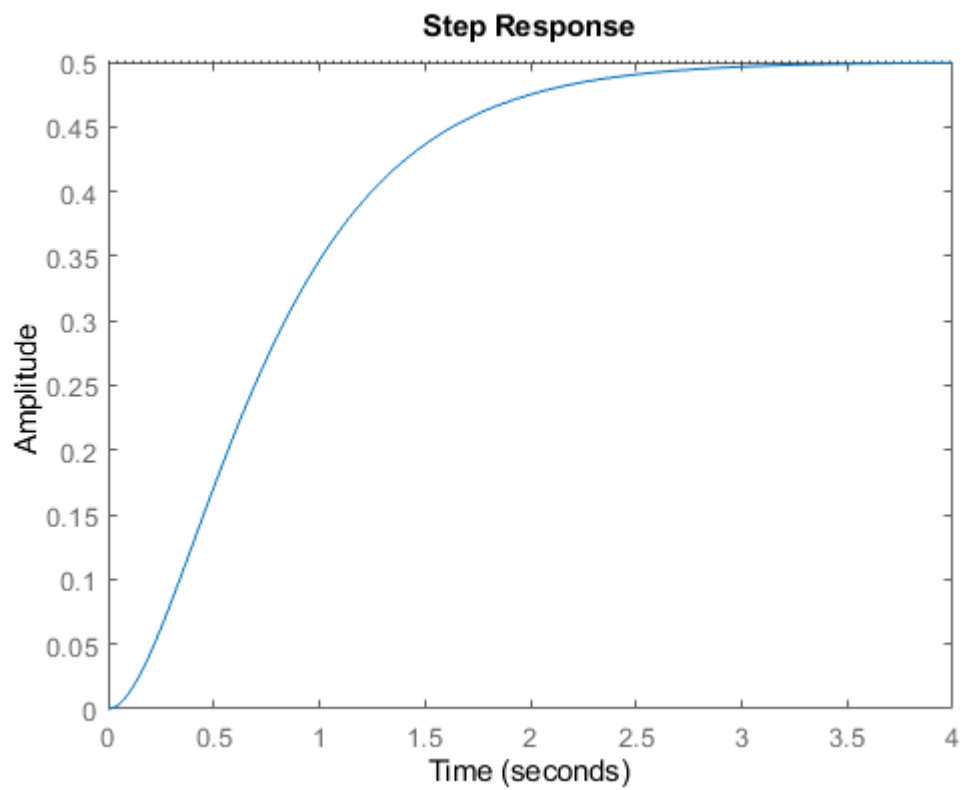
Εικόνα 4.2: Simulink blocks για την συνάρτηση μεταφοράς στο z-domain

Num = [0 1.497502373375878e-06 1.495008614759413e-06]

Den = [1 -1.995006494170706 0.995012479192682]

Με την εντολή

stepplot(myHd)

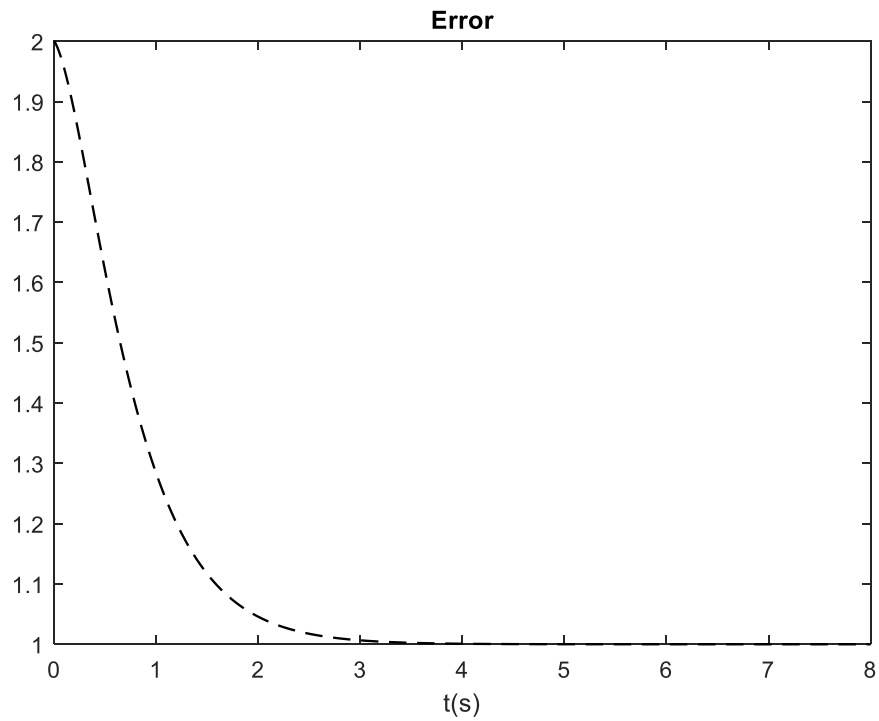
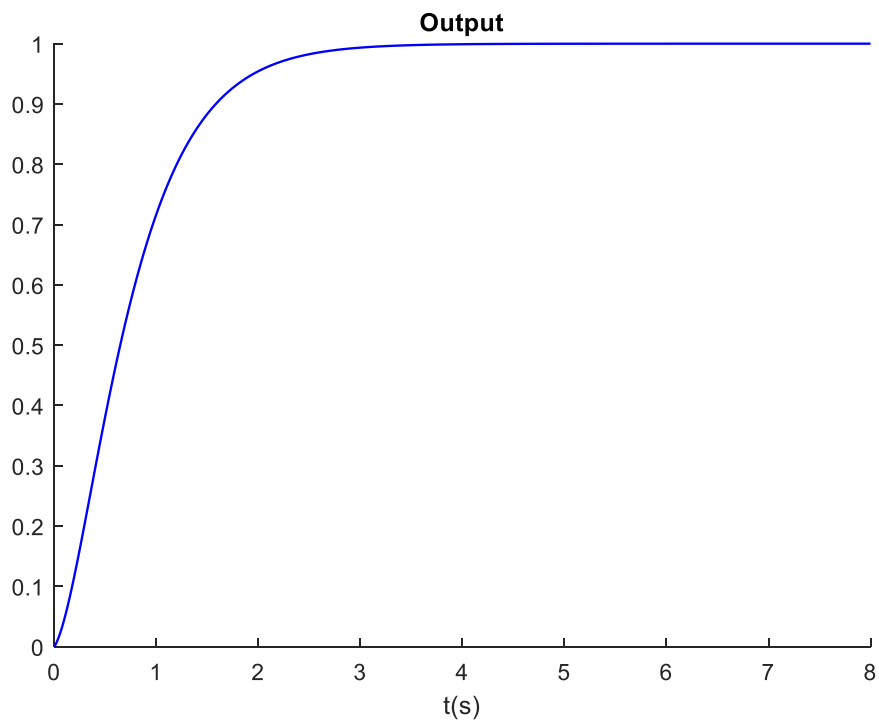


Εικόνα 4.3: Step response για την myHd με την εντολή stepplot

```
for n=3:howmanyperiods*sampling
```

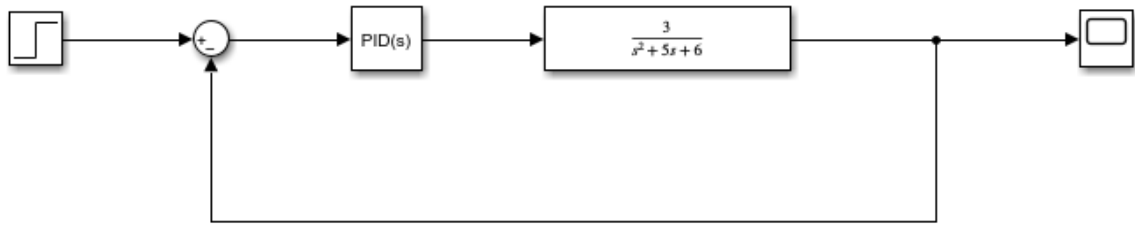
```
    yp(n) = - ( den(2)*yp(n-1) +den(3)*yp(n-2) ) + (num(2)*u(n-1)+num(3)*u(n-2));
```

```
end
```



Εικόνα 4.4: Response και Error για την $myHd$ με κώδικα – Είσοδος step με 2V

Χρησιμοποιώντας PID tune



Εικόνα 4.5: PID με tune

Controller: PID Form: Parallel

Time domain:
 Continuous-time
 Discrete-time

Discrete-time settings
Sample time (-1 for inherited): -1

Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Output Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 21.681204643315

Integral (I): 36.2879146941885

Derivative (D): 3.02583693907203

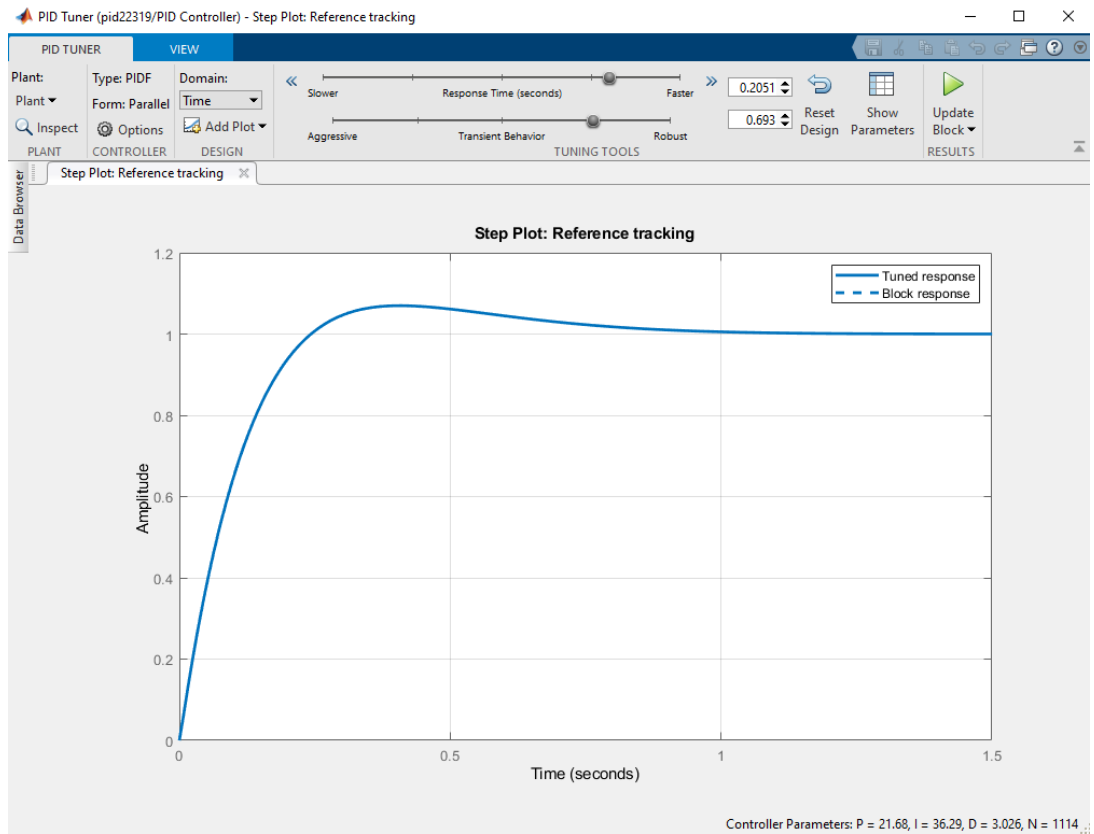
Use filtered derivative

Filter coefficient (N): 1114.43947861816

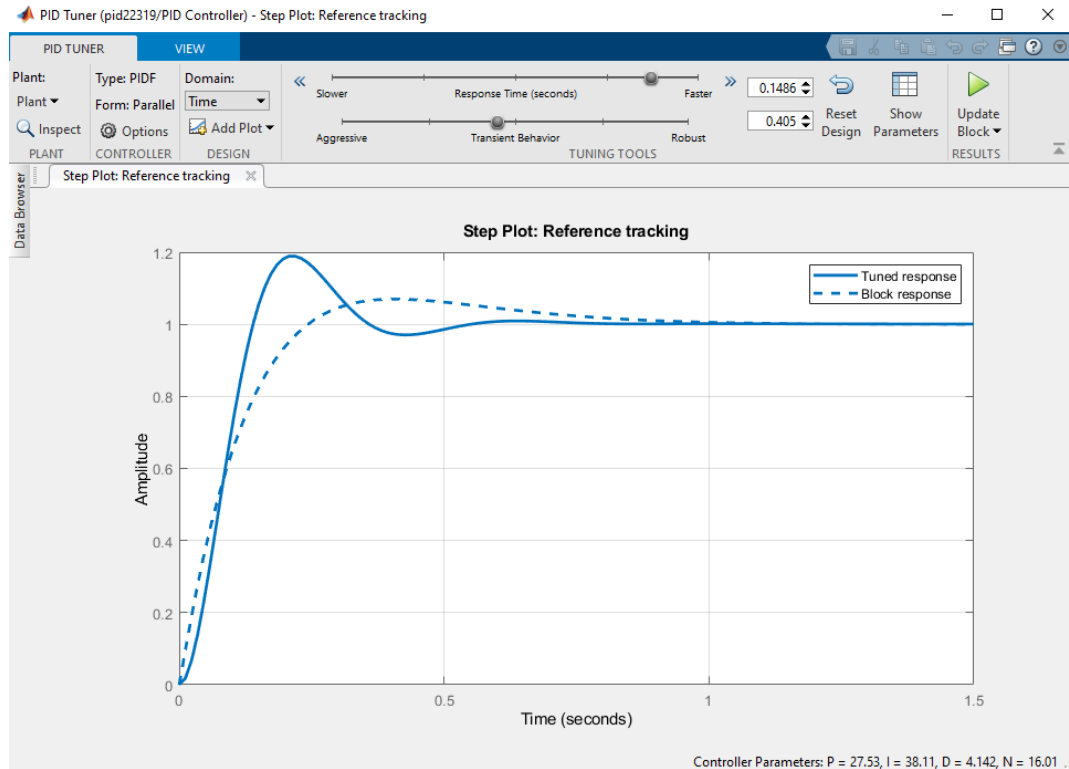
Automated tuning

Select tuning method: Transfer Function Based (PID Tuner App) Tune...

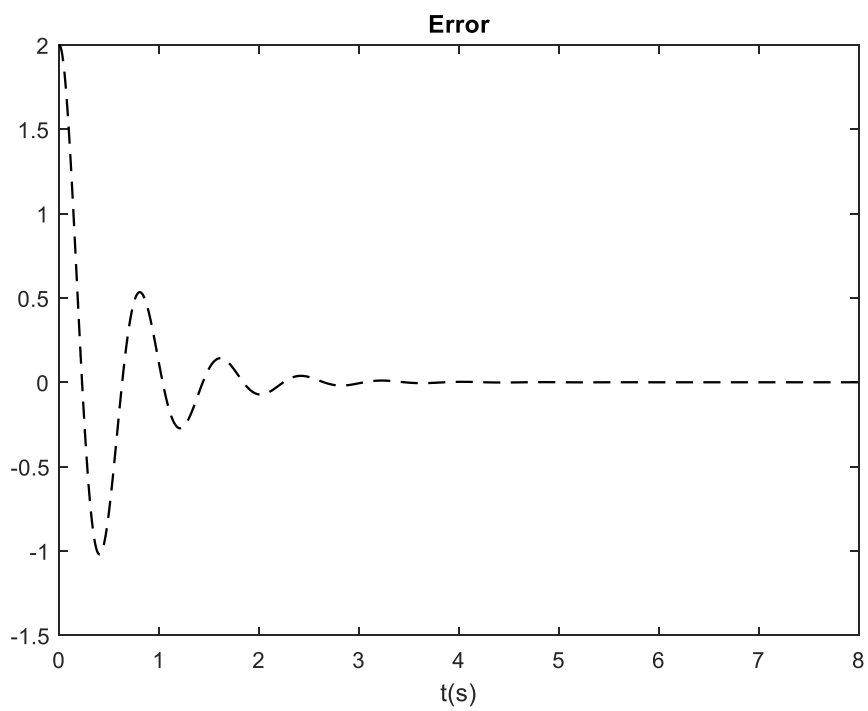
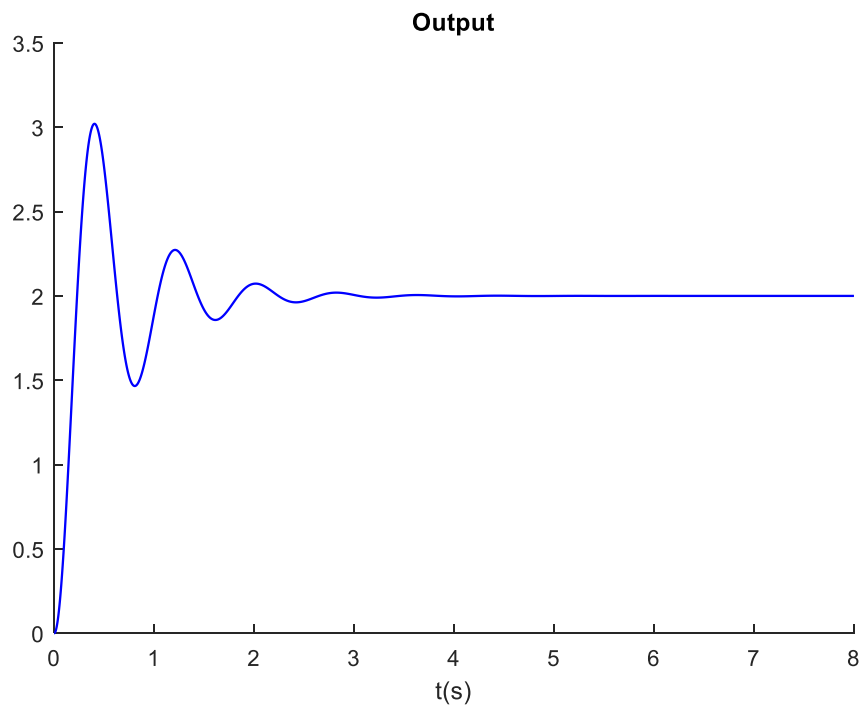
Εικόνα 4.6: Οι παράμετροι του PID όπως φαίνονται στο παράθυρο του PID στοιχείου



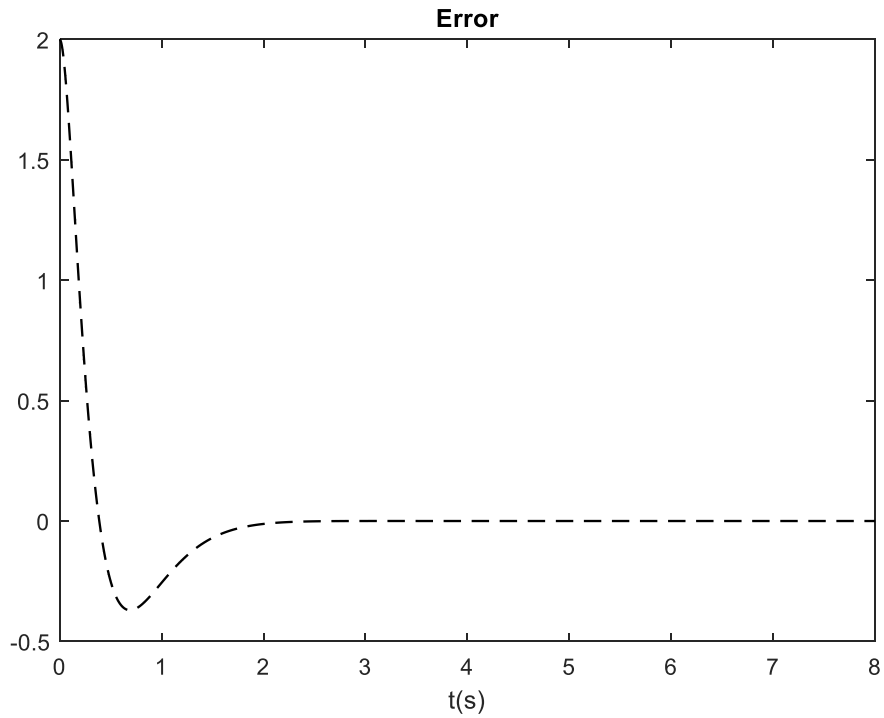
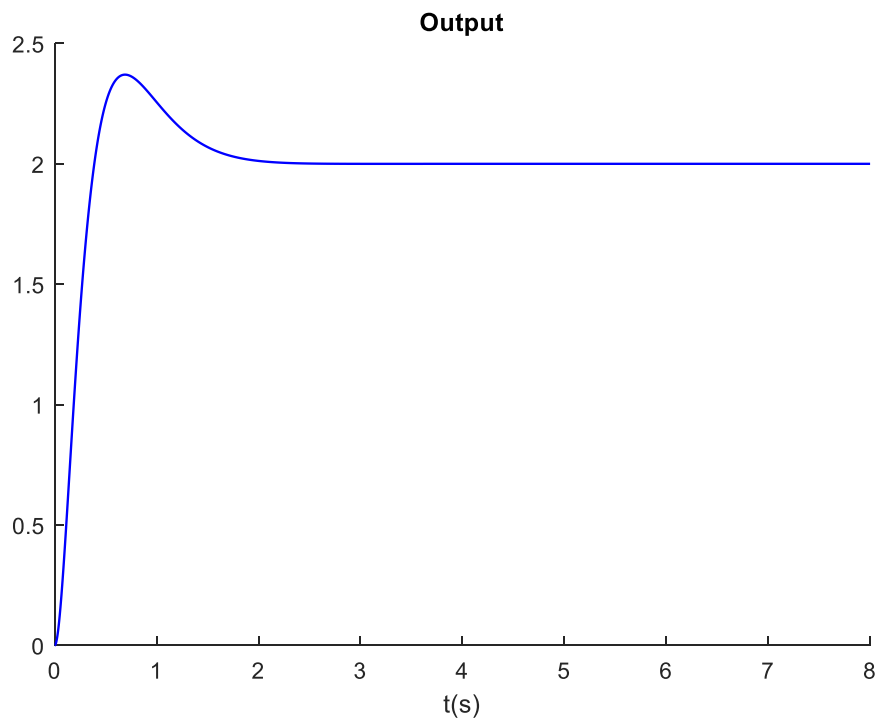
Εικόνα 4.7: Ρύθμιση του step response 1



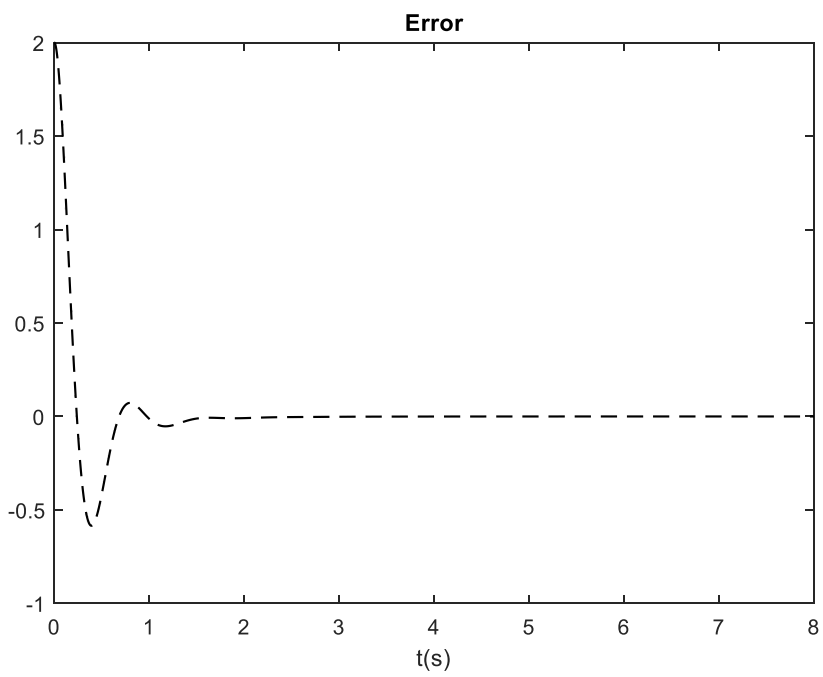
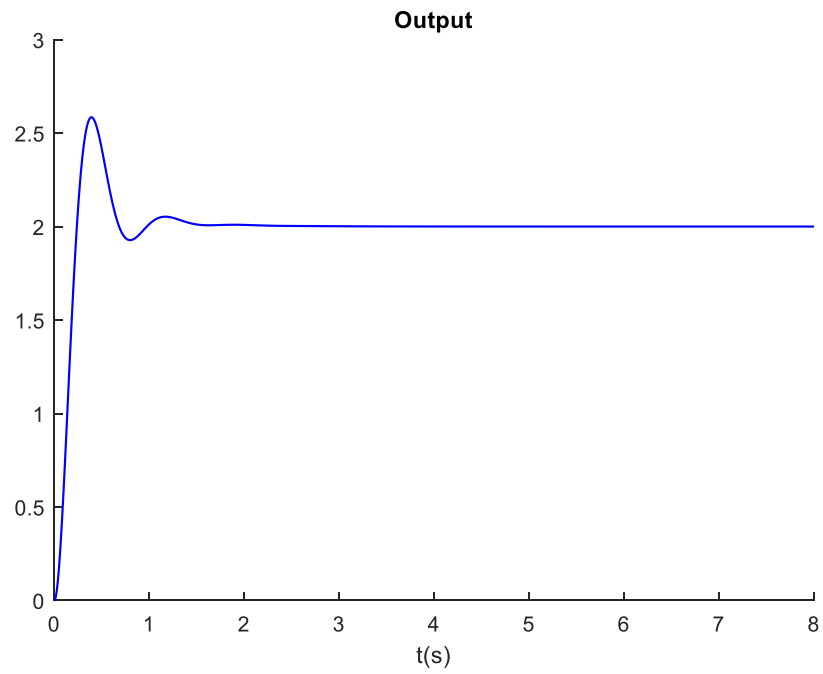
Εικόνα 4.8: Ρύθμιση του step response 1



Εικόνα 4.9: Step Response $K_p=21$; $K_i=36$; $K_d=3$; $N_{\text{coeff}} = 1$;

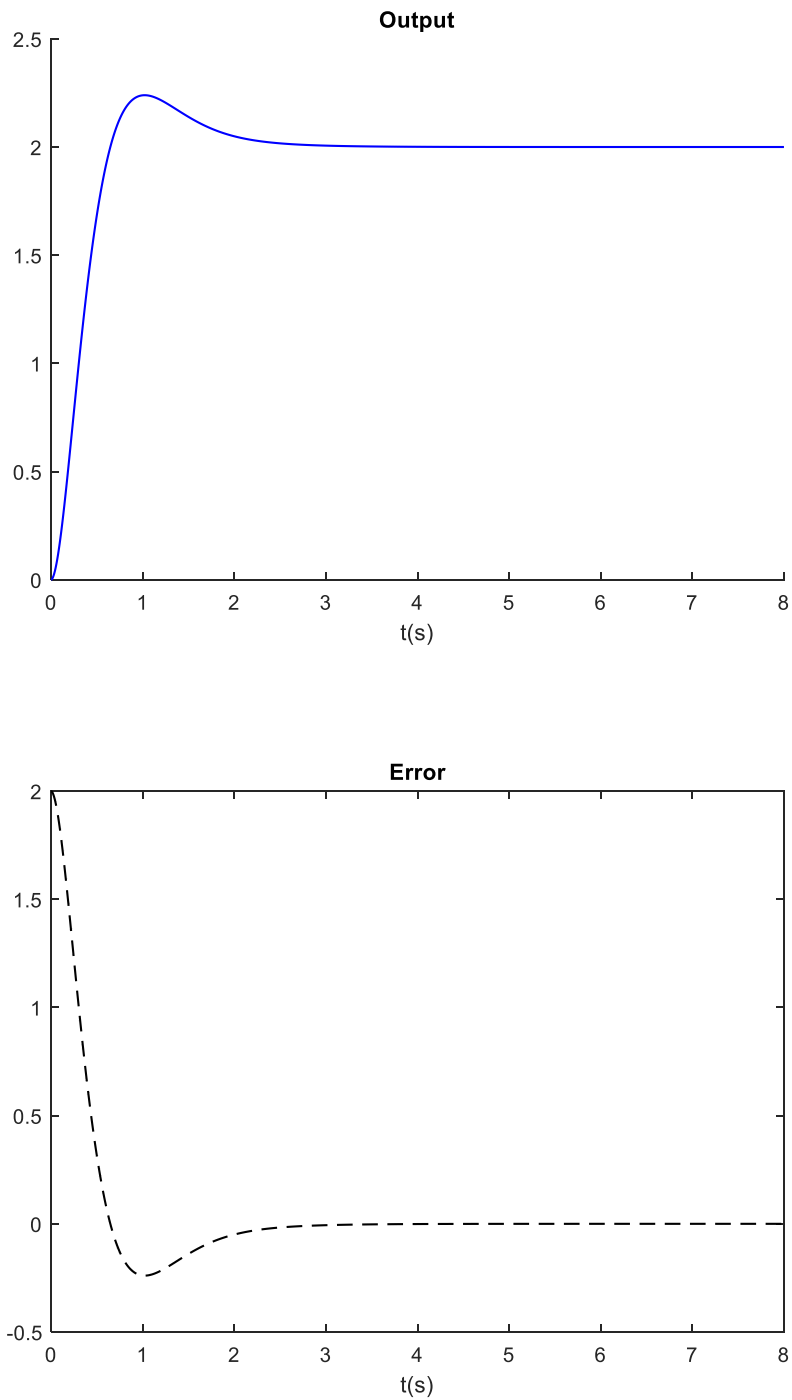


Εικόνα 4.10: Step Response $K_p=21$; $K_i=36$; $K_d=3$; $N_{\text{coeff}} = 1114$;

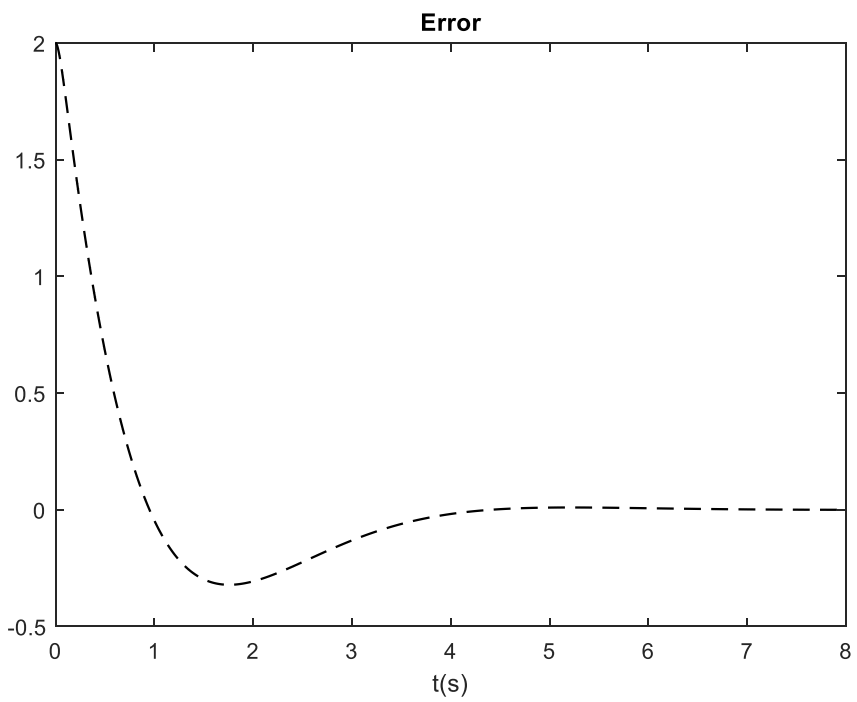
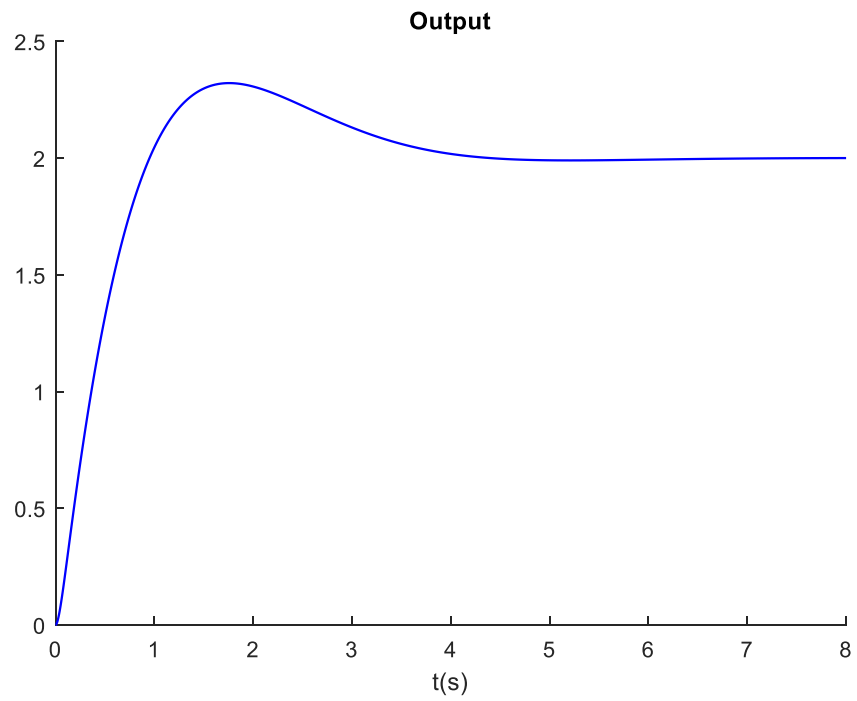


Εικόνα 4.11: Step Response $K_p=27$; $K_i=38$; $K_d=4$; $N_{\text{coeff}} = 16$;

Με χρήση αλγόριθμου Taguchi και διακριτών μοντέλων και διαδικασιών προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα.



Εικόνα 4.12: Με Taguchi 1 : Step Response $K_p=7.5$; $K_i=10$; $K_d=2.5$; $N_{\text{coeff}} = 275$;



Εικόνα 4.13: Με Taguchi 2 : Step Response $K_p=15$; $K_i=15$; $K_d=15$; $N_{\text{coeff}} = 475$;

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε περιγράφεται στο Παράρτημα Α.

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα

Ο έλεγχος PID, που σημαίνει έλεγχος αναλογικός-ολοκληρωμένος-παράγωγος, είναι μια τεχνική ελέγχου που χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές. Ωστόσο, μπορεί να μην παρέχει σταθερά βέλτιστη απόδοση ελέγχου, ιδιαίτερα όταν αντιμετωπίζουμε συστήματα που παρουσιάζουν μη γραμμική ή χρονικά μεταβαλλόμενη δυναμική. Η βελτίωση του ελέγχου PID μπορεί να οδηγήσει σε βελτιώσεις όπως ταχύτερους χρόνους απόκρισης, μειωμένη υπέρβαση και σφάλμα σταθερής κατάστασης και βελτιωμένες δυνατότητες απόρριψης διαταραχών.

Για να ταιριάζει με τη δυναμική του ελεγχόμενου συστήματος, είναι απαραίτητο να ρυθμίσουμε κατάλληλα τις παραμέτρους PID. Υπάρχουν πολυάριθμες μέθοδοι για τον συντονισμό αυτών των παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών και σφαλμάτων, της μεθόδου Ziegler-Nichols και της δυνατότητας αυτόματου συντονισμού που προσφέρει το Matlab.

Στην εργασία αυτή πετύχαμε βελτιστοποίηση των παραμέτρων K του ελεγκτή PID χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Taguchi διακριτού χρόνου. Μέσω αυτής της διαδικασίας βελτιστοποίησης τελικά πραγματοποιήθηκε επίτευξη βέλτιστης απόκρισης που πληροί συγκεκριμένα κριτήρια ελέγχου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Johnson, M. A., & Moradi, M. H. (2005). *PID control*. London, UK: Springer-Verlag London Limited.
- Knospe, C. (2006). PID control. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(1), 30-31.
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2001). The future of PID control. *Control engineering practice*, 9(11), 1163-1175.
- Borase, R. P., Maghade, D. K., Sondkar, S. Y., & Pawar, S. N. (2021). A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 9, 818-827.
- Visioli, A. (2006). *Practical PID control*. Springer Science & Business Media.
- Li, Y., Ang, K. H., & Chong, G. C. (2006). PID control system analysis and design. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(1), 32-41.
- Ang, K. H., Chong, G., & Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE transactions on control systems technology*, 13(4), 559-576.
- Tan, K. K., Wang, Q. G., & Hang, C. C. (2012). *Advances in PID control*. Springer Science & Business Media.
- Argentim, L. M., Rezende, W. C., Santos, P. E., & Aguiar, R. A. (2013, May). PID, LQR and LQR-PID on a quadcopter platform. In *2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)* (pp. 1-6). IEEE.
- He, J. B., Wang, Q. G., & Lee, T. H. (2000). PI/PID controller tuning via LQR approach. *Chemical Engineering Science*, 55(13), 2429-2439.
- Darby, M. L., & Nikolaou, M. (2012). MPC: Current practice and challenges. *Control Engineering Practice*, 20(4), 328-342.
- Karna, S. K., & Sahai, R. (2012). An overview on Taguchi method. *International journal of engineering and mathematical sciences*, 1(1), 1-7.
- Taguchi, G. (1995). Quality engineering (Taguchi methods) for the development of electronic circuit technology. *IEEE Transactions on Reliability*, 44(2), 225-229.
- Ghani, J. A., Choudhury, I. A., & Hassan, H. H. (2004). Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of materials processing technology*, 145(1), 84-92.
- Unal, R., & Dean, E. B. (1990, January). Taguchi approach to design optimization for quality and cost: an overview. In *1991 Annual conference of the international society of parametric analysts*.
- Hasanien, H. M. (2012). Design optimization of PID controller in automatic voltage regulator system using Taguchi combined genetic algorithm method. *IEEE systems journal*, 7(4), 825-831.
- Dewantoro, G. (2015, October). Robust fine-tuned PID controller using Taguchi method for regulating DC motor speed. In *2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)* (pp. 173-178). IEEE.
- Rospigliosi, P. A. (2023). Artificial intelligence in teaching and learning: what questions should we ask of ChatGPT. *Interactive Learning Environments*, 31(1), 1-3.

- Jittapramualboon, S., & Assawinchaichote, W. (2016, December). Optimization of PID controller based on taguchi combined particle swarm optimization for AVR system of synchronous generator. In *2016 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Lee, C. T., Su, B. R., Chang, C. H., Hsu, T. Y., & Lee, W. D. (2018, April). Applications of Taguchi method to PID control for path tracking of a wheeled mobile robot. In *2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)* (pp. 453-456). IEEE.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται ενδεικτικά οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν.

A.1. Κώδικας

```
clear all;

close all;

clc

%----- Ρυθμίσεις -----

amplitude = 2;

sampling = 1000;

howmanyperiods = 8; %πόσα δευτερόλεπτα να απεικονίσω

diastima = howmanyperiods;

Ts = diastima / (howmanyperiods*sampling); %Sampling Time

%----- Time Data -----

t = linspace(0, diastima, howmanyperiods*sampling);

%----- Input Voltage Data -----

%u = amplitude * square(2 * pi * t / period); %Square

%u = amplitude * sin(2 * pi * t / period); %Sinus

u(1:howmanyperiods*sampling) = amplitude; % Step

%-----

%-----

%Plant

num = [0 1.497502373375878e-06 1.495008614759413e-06];

den = [1 -1.995006494170706 0.995012479192682];

%-----

%-----

%Initialization

e = zeros(1,howmanyperiods*sampling);
```

```

Kp=21; Ki=36; Kd=3; Ncoff = 1114;
%Kp=27; Ki=38; Kd=4; Ncoff = 320;
%-----
% Αρχικοποιήσεις
yp = e;
ypid = e;
integ = 0;

error(1) = u(1);
ypid(1) = Kp*error(1) + Kd*(error(1));
yp(1) = 0;
yp(2) = -den(2)*yp(1) + (num(2)*ypid(1));
integ = integ + (error(1) * Ts);
integr(1) = integ;

error(2) = u(2) - yp(2);
ypid(2) = Kp*error(2) + Kd*(error(2));
integ = integ + (error(2) * Ts);
integr(2) = integ;

%-----
%-----
% Αρχικοποιήσεις Taguchi
reducedby = 0.8;

protipo_OA = [1 1 1 1;
1 2 2 2;
1 3 3 3;

```

```

2 1 2 3;
2 2 3 1;
2 3 1 2;
3 1 3 2;
3 2 1 3;
3 3 2 1];
SizeOA = length(protipo_OA);
Levels= max(protipo_OA(:));

Par = 4;

%Taguchi 1
%Fores = 20;
%xmin(1) = 0; xmax(1) = 30;
%xmin(2) = 0; xmax(2) = 40;
%xmin(3) = 0; xmax(3) = 10;
%xmin(4) = 100; xmax(4) = 2000;

%Taguchi 2
Fores = 100;
xmin(1) = -10; xmax(1) = 50;
xmin(2) = -10; xmax(2) = 50;
xmin(3) = -10; xmax(3) = 50;
xmin(4) = 100; xmax(4) = 2000;

sum= zeros(Par,Levels);

tstart = tic;

```

```

counter=1;

%-----
%-----

%Ξεκινάει το Taguchi
for fora = 1:Fores

    if fora==1

        for i = 1:Par

            LD(i) = (xmax(i) - xmin(i)) / (Levels + 1);

            arxikoLD(i) = LD(i);

            for j = 1:Levels

                lev(i,j) = xmin(i) + (j) * LD(i);

            end

        end

    end

    for i = 1:SizeOA

        for j = 1:Par

            for k = 1:Levels

                if protipo_OA(i,j) == k

                    OA(i,j) = lev(j,k);

                end

            end

        end

    end

end

for i = 1:SizeOA

```

```

counter=counter+1;

for n=3:howmanyperiods*sampling

    yp(n) = - ( den(2)*yp(n-1) +den(3)*yp(n-2) ) + (num(2)*ypid(n-1)+num(3)*ypid(n-2));
    error(n) = u(n) - yp(n);

    integ = integ + (error(n) * Ts);
    integr(n) = integ;
    ypid(n) = OA(i,1)*error(n) + OA(i,2)*integr(n)+ OA(i,3)*OA(i,4)*(error(n)-error(n-1));
    %ypid(n) = Kp*error(n) + Ki*integr(n)+ Kd*Ncoff*(error(n)-error(n-1));
end

overshoot = max(ypid);
steadystate = ypid(6000);
undershoot = max(ypid(1000:6000));

stopValue = 100000;
if(overshoot>3) f(i) = stopValue; end
if(steadystate>2.3) f(i) = stopValue; end
if(steadystate<1.8) f(i) = stopValue; end
if(steadystate-undershoot>0.4) f(i) = stopValue; end

if f(i) ~= stopValue f(i) = (overshoot-steadystate-undershoot); end
end

[Min,posn] = min(f.);
pos = protipo_OA(posn,:);

```

```

for i = 1:Par
    for j = 1:Levels
        if (pos(i) == j)
            centre(i) = lev(i,j);
        end
    end
end
end

```

```

for i = 1:Par
    LD(i) = LD(i) * reducedby;
    startOfLev = centre(i) - (0.5*Levels-0.5)*LD(i);
    for j = 1:Levels
        lev(i,j) = startOfLev + (j-1)*LD(i);
    end
end
end

```

```

if LD(1) / arxikoLD(1) < 0.01
    break;
end

```

```

end

```

```

toc(tstart);

```

```

Loops = fora*SizeOA;

```

```

%-----

```

```

%-----

```

```

yp = e;

```

```

ypid = e;

```

```

integ = 0;

error(1) = u(1);
ypid(1) = Kp*error(1) + Kd*(error(1));
yp(1) = 0;
yp(2) = -den(2)*yp(1) + (num(2)*ypid(1));
integ = integ + (error(1) * Ts);
integr(1) = integ;

error(2) = u(2) - yp(2);
ypid(2) = Kp*error(2) + Kd*(error(2));
integ = integ + (error(2) * Ts);
integr(2) = integ;

for n=3:howmanyperiods*sampling

    ypid(n) = - ( den(2)*yp(n-1) +den(3)*yp(n-2) ) + (num(2)*ypid(n-1)+num(3)*ypid(n-2));
    error(n) = u(n) - yp(n);

    integ = integ + (error(n) * Ts);
    integr(n) = integ;

    ypid(n) = arxikoLD(1)*error(n) + arxikoLD(2)*integr(n)+ arxikoLD(3)*arxikoLD(4)*(error(n)-
error(n-1));

    %ypid(n) = u(n); %normal
end
%-----
%-----

```

```
f=figure
f.Position = [100 0 600 1500];

subplot(2,1,1);
hold on
plot(t, yp, 'b-', 'LineWidth', 1);
xlabel('t(s)');
ylabel("");
title('Output');
subplot(2,1,2);
plot(t, error, 'k--', 'LineWidth', 1);
xlabel('t(s)');
ylabel("");
title('Error');
%-----
%-----
%-----
```