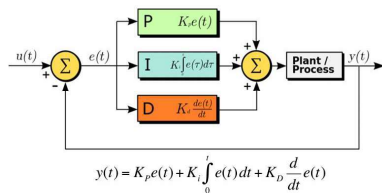


PID Control

Τι είναι ένας PID Controller;

- Ένας PID controller (αναλογικός-ολοκληρωτικός-παραγωγικός ρυθμιστής) είναι ένας μηχανισμός ελέγχου που χρησιμοποιείται σε αυτοματοποιημένα συστήματα για να διατηρήσει ένα επιθυμητό επίπεδο απόδοσης.
- Ο PID controller χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπως η ρομποτική, τα αυτοκίνητα, τα συστήματα θέρμανσης/ψύξης, κινητήρες.

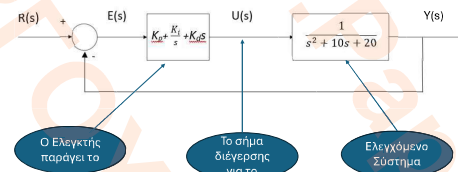
Σχηματική παρουσίαση ενός PID Controller



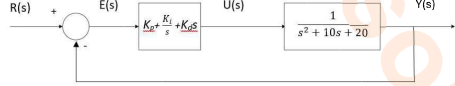
Ρύθμιση: Επιλογή των κατάλληλων τιμών των K_p , K_i , K_d .
Επαναρύθμιση: Δεν χρειάζεται να τα αλλάξουμε όλα, μόνο κάποια ή κάποιο από αυτά.

Σχηματική παρουσίαση ενός PID Controller

- Η υλοποίηση του PID βασίζεται στον προσδιορισμό των K_p , K_i , K_d



Σχηματική παρουσίαση ενός PID Controller



• Το σήμα εξόδου του ελεγκτή στο πεδίο του χρόνου είναι: $u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$

• Το ίδιο σήμα στο πεδίο του Laplace: $U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s)$

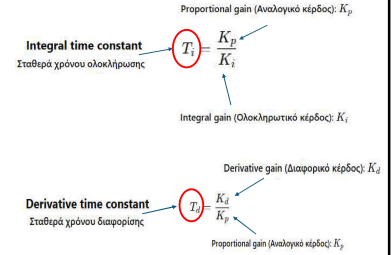
Η έξοδος του ελεγκτή PID σχηματίζεται από το άθροισμα τριών όρων:

- ενός όρου **P (Proportional)** ανάλογου του σφάλματος,
- ενός όρου **I (Integral)** ανάλογου του ολοκληρώματος του σφάλματος, και
- ενός όρου **D (Derivative)** ανάλογου της παραγώγου του σφάλματος.

Ορισμοί

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$= K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$



Επιρροή των όρων P, I και D στην απόκριση του συστήματος

Ο αναλογικός όρος P βοηθά στη βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος τόσο στην μεταβατική όσο και στην μόνιμη κατάσταση, αλλά αδυνατεί να εξαλείψει πλήρως το μόνιμο σφάλμα. Δεν μπορεί να αντεπεξέλθει ικανοποιητικά σε όλους τους τύπους των συστημάτων και των εξωτερικών διαταραχών, γι' αυτό (όπου απαιτείται) συνδυάζεται μαζί με άλλους όρους.

Ο ολοκληρωτικός όρος I χρησιμοποιείται σε συστήματα που παρουσιάζουν σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση, αφού για όσο χρόνο υπάρχει σφάλμα, η έξοδος του ελεγκτή, λόγω του ολοκληρώματος αυξάνεται με αποτέλεσμα την εξάλειψη του σφάλματος, αλλά αυτό γίνεται σε βάρος της ταχύτητας απόκρισης και της ευστάθειας του συστήματος.

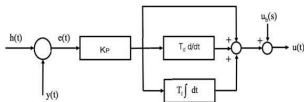
Ο διαφορικός όρος D αυξάνει την ευστάθεια του συστήματος και βελτώνει τη συμπεριφορά του κατά τη μεταβατική κατάσταση, αλλά λόγω της επιβολής στην πράξη περιορισμού της εξόδου του ελεγκτή δεν χρησιμοποιείται ποτέ από μόνος.

Επιρροή των όρων **P, I, D** στην απόκριση του κλειστού βρόγχου

Όρος	Χρόνος ανόδου (rise time - t_r)	Μέγιστη υπερύψωση (Maximum overshoot - y_{ov})	Χρόνος αποκατάστασης (Settling time - t_s)	Μόνιμο σφάλμα (Steady-state error)
P	Μείωση	Αύξηση	Μικρή αλλαγή	Μείωση
I	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Εξάλειψη
D	Μικρή αλλαγή	Μείωση	Μείωση	Μικρή αλλαγή

Βιομηχανικός PID Controller

- Επειδή ο όρος K_p (το κέρδος του αναλογικού μέρους) είναι «κυρίαρχος», κάποιες φορές είναι πιο κατάλληλο να ρυθμίσουμε πρώτα το αναλογικό κέρδος K_p , πριν τα υπόλοιπα.



$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \right)$$

Παράδειγμα: PID Έλεγχος Ταχύτητας Κινητήρα 1

- Σε ένα πλοίο, η διατήρηση μιας σταθερής ταχύτητας είναι κρίσιμη για την αποδοτικότητα και την ασφάλεια. Οι κινητήρες του πλοίου πρέπει να ρυθμίζονται ώστε να διατηρούν την επιθυμητή ταχύτητα, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες όπως η αντίσταση του νερού και οι καιρικές συνθήκες.

Παράδειγμα: PID Έλεγχος Ταχύτητας Κινητήρα 2

• Αναλογικός Έλεγχος (P):

Αν η ταχύτητα του πλοίου αποκλίνει από την επιθυμητή, ο αναλογικός έλεγχος K_p υπολογίζει μια διόρθωση ανάλογη με τη διαφορά ταχύτητας. Η δύναμη της διόρθωσης είναι ανάλογη της απόκλισης.

• Ολοκληρωτικός Έλεγχος (I):

Ο ολοκληρωτικός έλεγχος K_i λαμβάνει υπόψη την αθροιστική απόκλιση της ταχύτητας με την πάροδο του χρόνου. Αν η απόκλιση διαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, αυξάνει τη διόρθωση για να επιτευχθεί η επιθυμητή ταχύτητα.

• Παραγωγικός Έλεγχος (D):

Ο παραγωγικός έλεγχος K_D προβλέπει μελλοντικές αποκλίσεις με βάση την ταχύτητα αλλαγής της ταχύτητας και προσπαθεί να τις διορθώσει προληπτικά.

Παράδειγμα: PID Έλεγχος Ταχύτητας Κινητήρα 3

- Αισθητήρες Ταχύτητας:** Το σύστημα διαθέτει αισθητήρες που μετρούν την τρέχουσα ταχύτητα του πλοίου.
- Εισαγωγή στο PID Controller:** Οι μετρήσεις από τους αισθητήρες εισάγονται στον PID controller.
- Υπολογισμός Σφάλματος:** Ο PID controller υπολογίζει το σφάλμα (τη διαφορά μεταξύ της τρέχουσας ταχύτητας και της επιθυμητής ταχύτητας).
- Διόρθωση Ταχύτητας:** Ο PID controller υπολογίζει την απαραίτητη διόρθωση και στέλνει σήματα στον μηχανισμό ελέγχου του κινητήρα για να ρυθμίσει την ταχύτητα.

Παράδειγμα: PID Έλεγχος Ταχύτητας Κινητήρα 4

Ας πούμε ότι η επιθυμητή ταχύτητα του πλοίου είναι 20 κόμβοι, αλλά η τρέχουσα ταχύτητα είναι 18 κόμβοι.

1. Αναλογικός Έλεγχος (P):

- Το σφάλμα είναι 2 κόμβοι. Ο αναλογικός έλεγχος υπολογίζει μια διόρθωση ανάλογη με αυτό το σφάλμα. Αν το κέρδος είναι 1, η διόρθωση θα είναι 2 (για να αυξηθεί η ταχύτητα).

2. Ολοκληρωτικός Έλεγχος (I):

- Αν η απόκλιση των 2 κόμβων διαρκεί για κάποιο χρονικό διάστημα, ο ολοκληρωτικός έλεγχος αυξάνει τη διόρθωση για να επαναφέρει την ταχύτητα στους 20 κόμβους.

3. Παραγωγικός Έλεγχος (D):

- Αν η ταχύτητα του πλοίου αυξάνεται γρήγορα, ο παραγωγικός έλεγχος μειώνει την ένταση της διόρθωσης για να αποφύγει την υπερβολική επιτάχυνση.

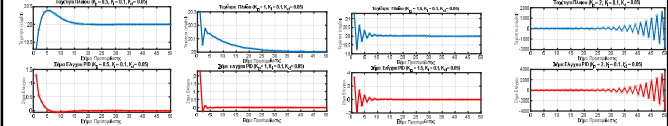
Παράδειγμα: PID Επίδραση K_p

$$K_p = 0.5, K_i = 0.1, K_d = 0.05$$

$$K_p = 1, K_i = 0.5, K_d = 0.05$$

$$K_p = 1.5, K_i = 0.5, K_d = 0.05$$

$$K_p = 2.0, K_i = 0.5, K_d = 0.05$$



Μικρή τιμή του K_p μπορεί να προκαλέσει αργή απόκριση του συστήματος, καθώς οι διακυβάνσεις θα είναι μεγάλες και θα χρειαστεί περισσότερος χρόνος για να φτάσει η ταχύτητα στην επιθυμητή τιμή.

- Όταν η τιμή του K_p είναι **μεγάλη**, ο PID controller γίνεται πολύ ευαίσθητος στις αποκλίσεις από την επιθυμητή τιμή.
- Το σύστημα θα ανηδρά γρήγορα στις αποκλίσεις από την επιθυμητή τιμή. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του πλοίου θα προσεγγίζει γρήγορα την επιθυμητή τιμή.
- Εξαιτίας της υψηλής ευαισθησίας, οι διακυβάνσεις που εμφανίζει ο PID controller μπορεί να είναι υπερβολικές, οδηγώντας σε απότομες αυξομειώσεις της ταχύτητας (oscillations).
- Το σύστημα μπορεί να γίνει ασταθές, με συνεχείς ταλαντώσεις γύρω από την επιθυμητή τιμή χωρίς να σταθεροποιείται.
- Οι συνεχείς ταλαντώσεις μπορεί να μειώσουν την ακρίβεια του συστήματος, καθώς η ταχύτητα δεν θα μπορεί να σταθεροποιηθεί στην επιθυμητή τιμή.

Παράδειγμα: PID Έλεγχος Επίδραση K_p

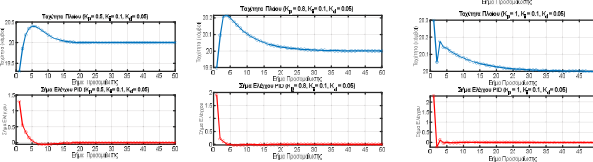
Συμβουλές για Ρυθμίσεις

•Επιλογή K_p :

Μια καλή πρακτική είναι να αυξάνουμε σταδιακά την τιμή του K_p και να παρακολουθούμε την αντίδραση του συστήματος.

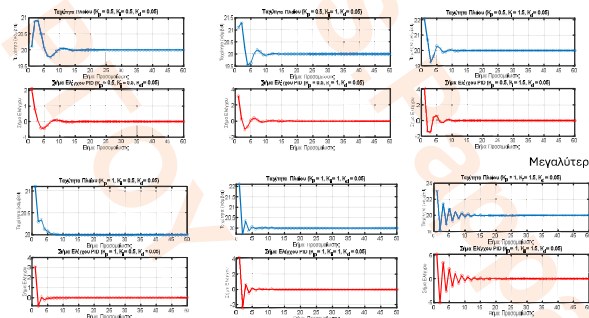
•Συνδυασμός με K_i και K_d :

Ενας υψηλός K_p μπορεί να συνδυαστεί με χαμηλότερους K_i και K_d για να μειωθεί η πιθανότητα ταλαντώσεων. Ο ολοκληρωτικός και παραγωγικός όρος μπορεί να βοηθήσουν στη σταθεροποίηση του συστήματος.



Παράδειγμα: PID Έλεγχος Επίδραση K_i

Μικρότερο K_p



Μεγαλύτερο K_p

Παράδειγμα: PID Έλεγχος Επίδραση K_i

Παράδειγμα με Μικρότερο K_i

- Η ταχύτητα του πλοίου μπορεί να φτάσει κοντά στην επιθυμητή τιμή, αλλά μπορεί να υπάρχει σταθερό μακροχρόνιο σφάλμα (offset).

- Το σήμα ελέγχου μπορεί να είναι σταθερό και να μην έχει μεγάλες διακυμάνσεις.

Παράδειγμα με Μεγαλύτερο K_i

- Η ταχύτητα του πλοίου μπορεί να ταλαντώνεται γύρω από την επιθυμητή τιμή, με συνεχή αυξομειώσεις.
- Το σήμα ελέγχου θα έχει μεγάλες διακυμάνσεις, με συνεχή αύξησης και μειώσεις, προσπαθώντας να διορθώσει το σφάλμα.

Για να αποφευχθούν οι αρνητικές συνέπειες της υπερβολικής αύξησης του K_i μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω στρατηγικές:

Βήμα-βήμα Συντονισμός:

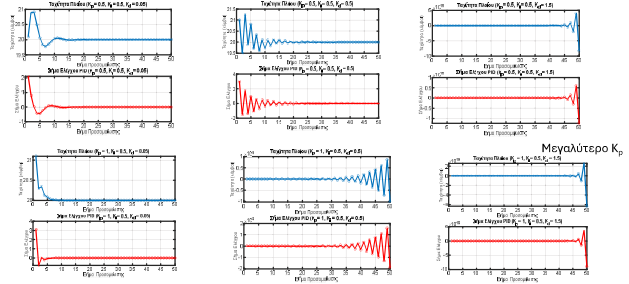
- Αυξάνουμε το K_i σταδιακά και παρακολουθούμε την αποκρίση του συστήματος, ώστε να βρούμε την ιδανική τιμή που μειώνει το offset χωρίς να προκαλεί αστάθεια.

Συνδυασμός με K_p , K_d , K_f :

- Ένας κατάλληλος συνδυασμός όλων των παραμέτρων μπορεί να βοηθήσει στη σταθεροποίηση του συστήματος, μειώνοντας την πιθανότητα ταλαντώσεων και αστάθειας.

Παράδειγμα: PID Έλεγχος Επίδραση K_d

Μικρότερο K_d



Παράδειγμα: PID Έλεγχος Επίδραση K_d

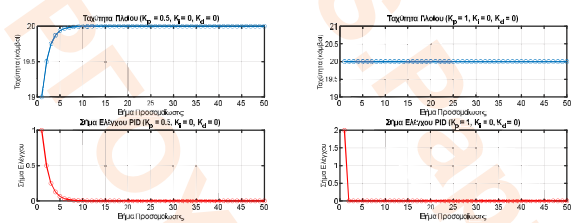
Παράδειγμα με Μικρότερο K_d

- Η ταχύτητα του πλοίου μπορεί να παρουσιάζει ταλαντώσεις γύρω από την επιθυμητή τιμή, καθώς ο παραγωγικός όρος δεν επαρκεί για να αντισταθμίσει τις αλλαγές του σφάλματος.
- Το σήμα ελέγχου μπορεί να έχει μικρότερες διακυμάνσεις, αλλά το σύστημα μπορεί να είναι λιγότερο σταθερό.

Παράδειγμα με Μεγαλύτερο K_d

- Η ταχύτητα του πλοίου μπορεί να φτάσει πιο ομαλά στην επιθυμητή τιμή, με λιγότερες ταλαντώσεις, αν και η ευαισθησία στον θόρυβο μπορεί να προκαλέσει μικρές, απότομες αλλαγές.
- Το σήμα ελέγχου μπορεί να παρουσιάζει μεγαλύτερες αλλαγές, ειδικά αν υπάρχει θόρυβος στο σύστημα, με αποτέλεσμα να χρειάζεται φίλτρα για τη μείωση του θορύβου.

Συνοψίζοντας.....



Επειδή ο όρος K_d (το κέρδος του αναλογικού μέρους) είναι «κυρίαρχος», κάποιες φορές είναι πιο κατάλληλο να ρυθμίσουμε πρώτα το αναλογικό κέρδος K_p , πριν τα υπόλοιπα!

Πλεονεκτήματα PID

- 1. Ακριβεία Ελέγχου:** Μπορεί να διατηρήσει μια επιθυμητή κατάσταση με υψηλή ακρίβεια, ακόμα και σε συστήματα με μεταβαλλόμενες συνθήκες.
- 2. Αντιμετώπιση Δυναμικών Αλλαγών:** Χάρη στον παραγωγικό όρο (D), ο PID controller μπορεί να προβλέψει και να αντισταθμίσει γρήγορες αλλαγές, βελτιώνοντας την απόκριση του συστήματος.
- 3. Μείωση Μακροχρόνιων Σφαλμάτων:** Ο ολοκληρωτικός όρος (I) βοηθά στη μείωση μακροχρόνιων σφαλμάτων, επιτρέποντας στο σύστημα να φτάσει και να διατηρήσει την επιθυμητή κατάσταση ακόμα και αν υπάρχουν συσσωρευμένα σφάλματα.
- 4. Ευελιξία και Προσαρμοστικότητα:** Οι συντελεστές του PID (K_p , K_i , K_d) μπορούν να ρυθμιστούν για να προσαρμοστούν στις ιδιαιτερότητες του κάθε συστήματος, καθιστώντας τον PID controller εξαιρετικά ευέλικτο και προσαρμόσιμο σε διαφορετικές εφαρμογές.
- 5. Απλότητα Υλοποίησης:** Είναι σχετικά απλός να υλοποιηθεί και να προγραμματιστεί, είτε σε αναλογική είτε σε ψηφιακή μορφή. Η βασική του αρχιτεκτονική είναι εύκολα κατανοητή και εφαρμόσιμη.
- 6. Σταθερότητα:** Με σωστή ρύθμιση των συντελεστών, ο PID controller μπορεί να προσφέρει σταθερότητα στο σύστημα, αποτρέποντας ταλαντώσεις και ανεπιθύμητες διακυμάνσεις.
- 7. Ευρεία Εφαρμοσιμότητα:** Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, από τον έλεγχο θερμοκρασίας και πίεσης μέχρι τον έλεγχο ταχύτητας και θέσης σε ρομποτικά συστήματα.
- 8. Αντιμετώπιση Διαταραχών:** Μπορεί να αντιμετωπίσει εξωτερικούς διαταραχές και να επαναφέρει το σύστημα στην επιθυμητή κατάσταση γρήγορα και αποτελεσματικά.

Περιορισμοί PID

- 1. Ευαισθησία σε Θόρυβο:** Οι PID controllers είναι ευαίσθητοι στον θόρυβο του σήματος. Ο παραγωγικός όρος K_d είναι ιδιαίτερα επιρρεπής στον θόρυβο, καθώς βασίζεται στην ταχύτητα αλλαγής του σφάλματος. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες ταλαντώσεις.
- 2. Μη Γραμμικά Συστήματα:** Οι PID controllers λειτουργούν καλύτερα σε γραμμικά συστήματα. Σε μη γραμμικά συστήματα, η απόδοση του PID controller μπορεί να είναι περιορισμένη και να απαιτείται πιο σύνθετος έλεγχος.
- 3. Ανεπάρκεια για Συνεχώς Μεταβαλλόμενες Συνθήκες:** Εάν το σύστημα που ελέγχεται υπόκειται σε συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες ή έχει μεγάλη δυναμική ποικιλία, οι σταθερές τιμές των K_p , K_i και K_d μπορεί να μην είναι επαρκείς για αποτελεσματικό έλεγχο.
- 4. Απαιτήσεις για Ρύθμιση Παραμέτρων:** Η εύρεση των βέλτιστων τιμών για K_p , K_i και K_d μπορεί να είναι χρονοβόρα και απαιτεί εμπειρία. Η διαδικασία αυτή, γνωστή ως συντονισμός (tuning), είναι κρίσιμη για την απόδοση του PID controller.
- 5. Καθυστερήσεις και Διαταραχές:** Σε συστήματα με μεγάλες καθυστερήσεις ή συχνές διαταραχές, η απόδοση του PID controller μπορεί να μειωθεί. Οι PID controllers δυσκολεύονται να προβλέψουν και να αντισταθμίσουν μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις.
- 6. Σταθερότητα:** Εάν οι παράμετροι δεν έχουν ρυθμιστεί σωστά, ο PID controller μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα, με υπερβολικές ταλαντώσεις ή συνεχή αποκλίνουσα συμπεριφορά.
- 7. Περιορισμένη Αντιμετώπιση Πολύπλοκων Σημάτων:** Οι PID controllers έχουν περιορισμένη ικανότητα να αντιμετωπίζουν περίπλοκα σήματα που απαιτούν μη γραμμικό ή προσαρμοστικό έλεγχο.