

Μέθοδος Ziegler–Nichols

Η μέθοδος Ziegler-Nichols επιτρέπει τη ρύθμιση ή τον «συντονισμό» ενός ελεγκτή PID εμπειρικά, χωρίς να χρειάζεται να γνωρίζουμε τις εξισώσεις της εγκατάστασης ή του ελεγχόμενου συστήματος. Αυτοί οι κανόνες συντονισμού που προτάθηκαν από τους Ziegler και Nichols δημοσιεύθηκαν το 1942 και από τότε αποτελούν μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους συντονισμού.

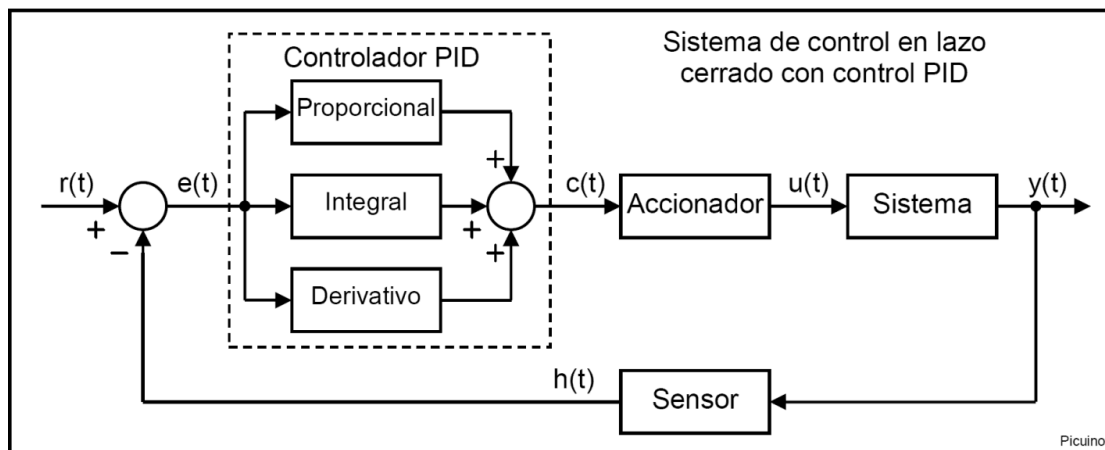
Οι τιμές που προτείνονται με αυτή τη μέθοδο προσπαθούν να επιτύχουν στο σύστημα ανάδρασης μια βηματική απόκριση με μέγιστη υπέρβαση 25%, που είναι μια στιβαρή τιμή με καλά χαρακτηριστικά ταχύτητας και σταθερότητας για τα περισσότερα συστήματα.

Η μέθοδος συντονισμού του ρυθμιστή PID Ziegler-Nichols επιτρέπει τον καθορισμό των σταθερών ή των αναλογικών, ολοκληρωτικών και διαφορικών κερδών (K_p , K_i και K_d) από την απόκριση του συστήματος σε ανοιχτό βρόχο ή από την απόκριση του συστήματος σε κλειστό βρόχο. Καθεμία από τις δύο δοκιμές ταιριάζει καλύτερα σε έναν τύπο συστήματος.

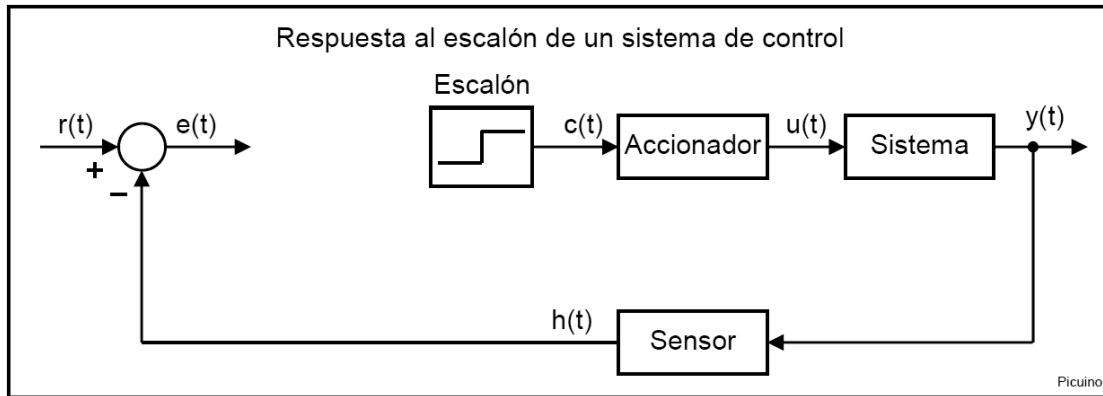
Συντονισμός μέσω βηματικής απόκρισης

Αυτή η μέθοδος συντονισμού είναι κατάλληλη για συστήματα που είναι ευσταθή σε ανοιχτό βρόχο και έχουν χρονική καθυστέρηση από τη στιγμή που λαμβάνουν το σήμα ελέγχου έως τη στιγμή που αρχίζουν να ενεργούν.

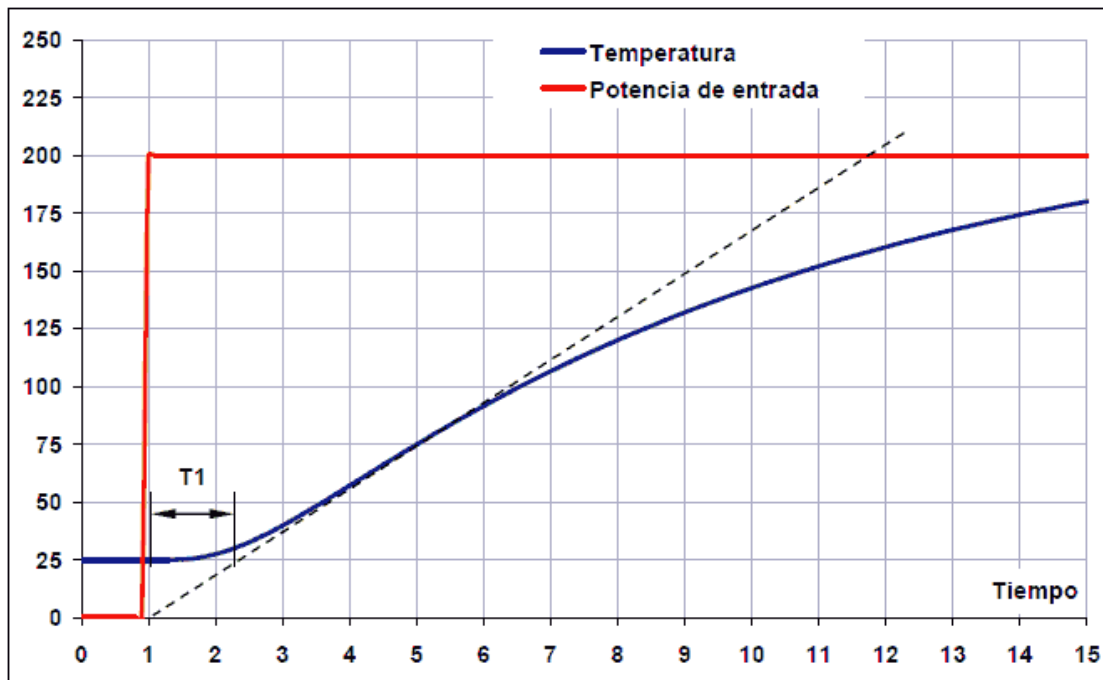
Προκειμένου να προσδιοριστεί η βηματική απόκριση της ελεγχόμενης μονάδας ή συστήματος, ο ελεγκτής PID πρέπει να αφαιρεθεί και να αντικατασταθεί με σήμα βήματος που εφαρμόζεται στον ενεργοποιητή.



Το παρακάτω σχήμα δείχνει την τροποποίηση που πρέπει να γίνει στο σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου για να μετατραπεί σε σύστημα ανοικτού βρόχου που αποκρίνεται σε σήμα βήματος, αφαιρώντας τον ελεγκτή PID:



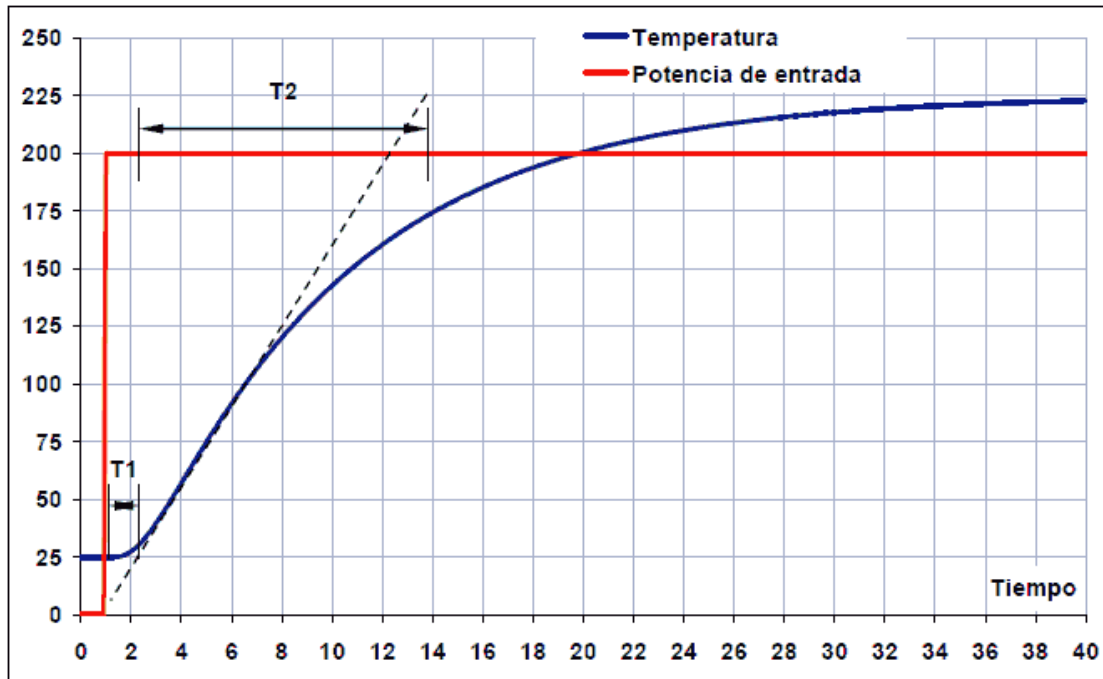
Στην παρακάτω εικόνα μπορείτε να δείτε τη βηματική είσοδο στον ενεργοποιητή ή το σήμα $c(t)$ που αναπαρίσταται με κόκκινο χρώμα. Με μπλε χρώμα αναπαρίσταται η έξοδος του συστήματος που μετράται από τον αισθητήρα ή το σήμα $h(t)$. Το βήμα εισόδου $c(t)$ πρέπει να είναι μεταξύ 10% και 20% της ονομαστικής τιμής εισόδου. Όπως φαίνεται, η απόκριση του συστήματος παρουσιάζει μια καθυστέρηση, που ονομάζεται και νεκρός χρόνος, και αναπαρίσταται με το T_1 .



Για να υπολογίσουμε τις παραμέτρους, ξεκινάμε σχεδιάζοντας μια εφαπτόμενη ευθεία στο σήμα εξόδου του συστήματος (μπλε καμπύλη). Αυτή η εφαπτομένη σχεδιάζεται στην εικόνα με μια διακεκομμένη γραμμή.

Ο **χρόνος T_1** αντιστοιχεί στον **νεκρό χρόνο**. Αυτός είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να αρχίσει να ανταποκρίνεται το σύστημα. Αυτό το διάστημα μετριέται από τη στιγμή που ανεβαίνει το σήμα βήματος, μέχρι το σημείο τομής της εφαπτομένης με την αρχική τιμή του συστήματος, η οποία εν προκειμένω είναι 25°C.

Ο **χρόνος T_2** είναι ο **χρόνος ανόδου**. Ο χρόνος T_2 ξεκινά εκεί όπου η εφαπτομένη τέμνει την αρχική τιμή εξόδου (25° στα 2 s) και θα τελειώσει εκεί όπου η εφαπτομένη τέμνει την τελική τιμή εξόδου (225° στα 14 s).



Βήμα απόκρισης. Ο χρόνος T2 ξεκινά μετά το T1 και τελειώνει όταν η εφαπτομένη γραμμή φτάσει στη μέγιστη τιμή εξόδου, εν προκειμένω 225°C.

Εκτός από αυτούς τους δύο χαρακτηριστικούς χρόνους, πρέπει επίσης να υπολογιστεί η μεταβολή του σήματος βήματος dX και η μεταβολή της απόκρισης του συστήματος dY .

Η μεταβολή dX αντιστοιχεί στο βήμα του σήματος ελέγχου. Στο παράδειγμα που εμφανίζεται στις εικόνες, η μεταβολή του σήματος βήματος αντιστοιχεί σε $dX = 5$ volt του σήματος ελέγχου $c(t)$.

Η μεταβολή dY του συστήματος λόγω του σήματος βήματος που έχουμε εισαγάγει αντιστοιχεί στο παράδειγμα σε $dY = 200^\circ\text{C}$ που μετράται από τον αισθητήρα $h(t)$ σε μια ορισμένη ποσότητα V .

Από αυτές τις τιμές, η σταθερά συστήματος K_o μπορεί να υπολογιστεί:

$$K_o = (dX \times T_2) / (dY \times T_1)$$

Και από τη σταθερά K_o είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραμέτρων του ελεγκτή PID μόνο με αναλογική (P), αναλογική και ολοκληρωτική (PI), αναλογική και παράγωγη (PD) ή αναλογική ενέργεια ολοκληρώματος και παραγώγου (PID):

Έλεγχος	K_p	K_i	K_d
P	K_o		
PI	$0,9 \cdot K_o$	$0,27 \cdot K_o / T_1$	
PD	$1,6 \cdot K_o$		$0,60 \cdot K_o \cdot T_1$

Έλεγχος	Kp	Ki	Kd
PID	1.2*Ko	0.60*Ko/T1	0.60*Ko*T1

Η σταθερά Kp αντιστοιχεί στο αναλογικό κέρδος, το Ki είναι το ολοκληρωτικό κέρδος και το Kd είναι το διαφορικό κέρδος.

Παράδειγμα συντονισμού PID με απόκριση βήματος

Στο παράδειγμα που εμφανίζεται στις προηγούμενες εικόνες, έχει χρησιμοποιηθεί η προσομοίωση ενός φούρνου που έγινε με υπολογιστικό φύλλο. Διατίθεται επίσης προσομοιωτής συστήματος θέρμανσης με δύο λέβητες.

Προσομοιωτής ελέγχου θερμοκρασίας: [Thermal Control. Version 0.11](#)

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του συστήματος, μια βηματική απόκριση επιβάλλεται ρυθμίζοντας το σήμα ελέγχου στα 0 V με βήμα 5 V. Το σύστημα ανταποκρίνεται αλλάζοντας από 25 βαθμούς Κελσίου (0.25V) σε 225 βαθμούς Κελσίου (2.25V). Οι χρόνοι είναι αυτοί που εμφανίζονται στα προηγούμενα γραφήματα, με τα οποία οι τιμές της καμπύλης απόκρισης του συστήματος είναι οι εξής:

$$dX = 5 - 0 = 5 \text{ volts}$$

$$dY = 2.25 - 0.25 = 2 \text{ volts}$$

$$T1 = 2.2 - 1 = 1.2 \text{ seconds}$$

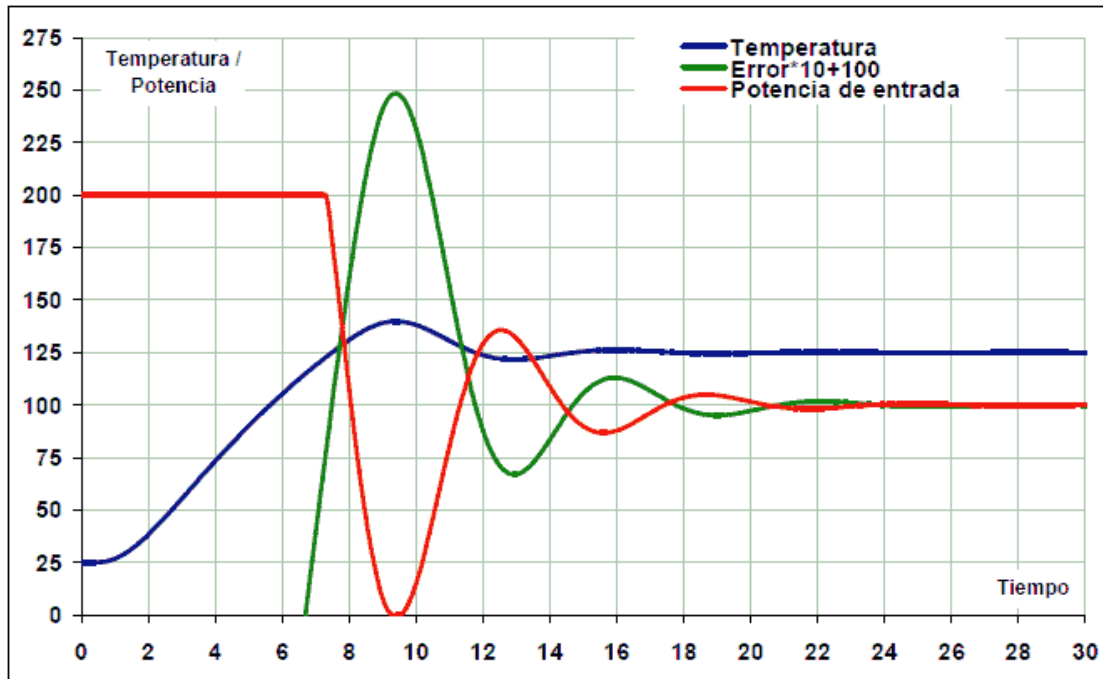
$$T2 = 13.8 - 2.2 = 11.6 \text{ seconds}$$

Από αυτές τις τιμές, μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι του ρυθμιστή PID:

$$K_o = (dX \times T2) / (dY \times T1) = (5 * 11,6) / (2 * 1,2) = 24,2$$

Έλεγχος	Kp	Ki	Kd
P	24.2		
PI	21.8	5.44	
PD	38.7		17.4
PID	29.0	12.1	17.4

Μετά την εισαγωγή των τιμών Kp, Ki και Kd στο PID, λαμβάνεται η ακόλουθη απόκριση:



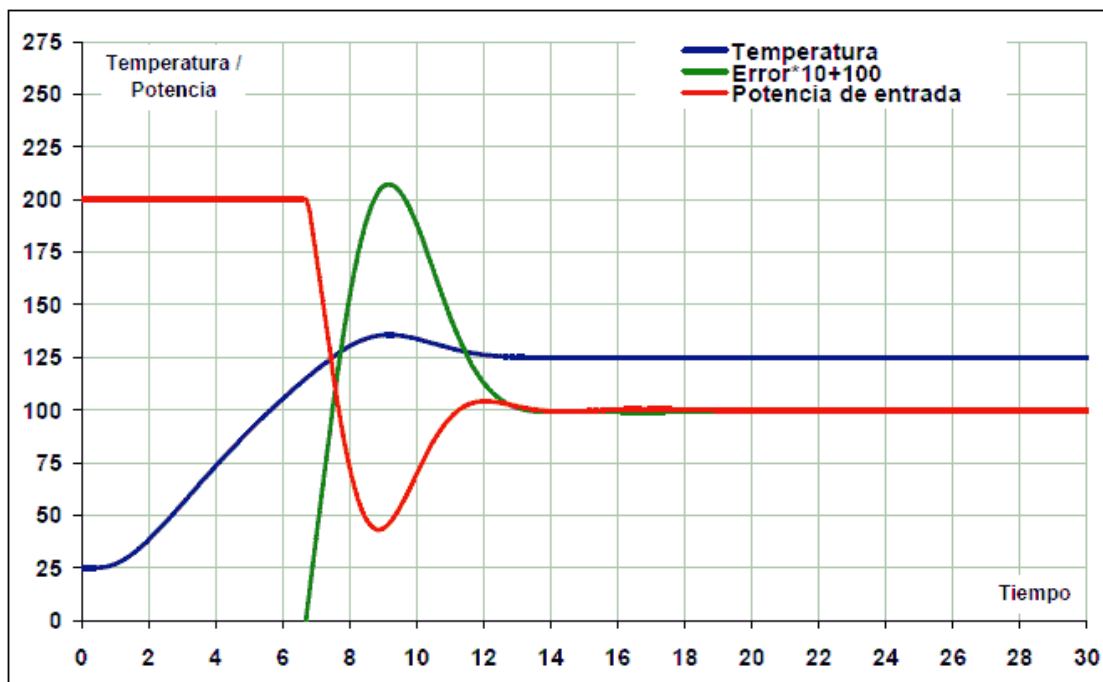
Οι παράμετροι PID μπορούν τώρα να ρυθμιστούν χειροκίνητα για να επιτευχθεί μια ελαφρώς πιο σταθερή απόκριση. Το διαφορικό κέρδος έχει αυξηθεί και το ολοκληρωτικό έχει μειωθεί για να μειωθούν οι ταλαντώσεις:

$$K_p = 28$$

$$K_i = 10$$

$$K_d = 21$$

Ως αποτέλεσμα, το σύστημα σταθεροποιείται τώρα σε 12 seconds:

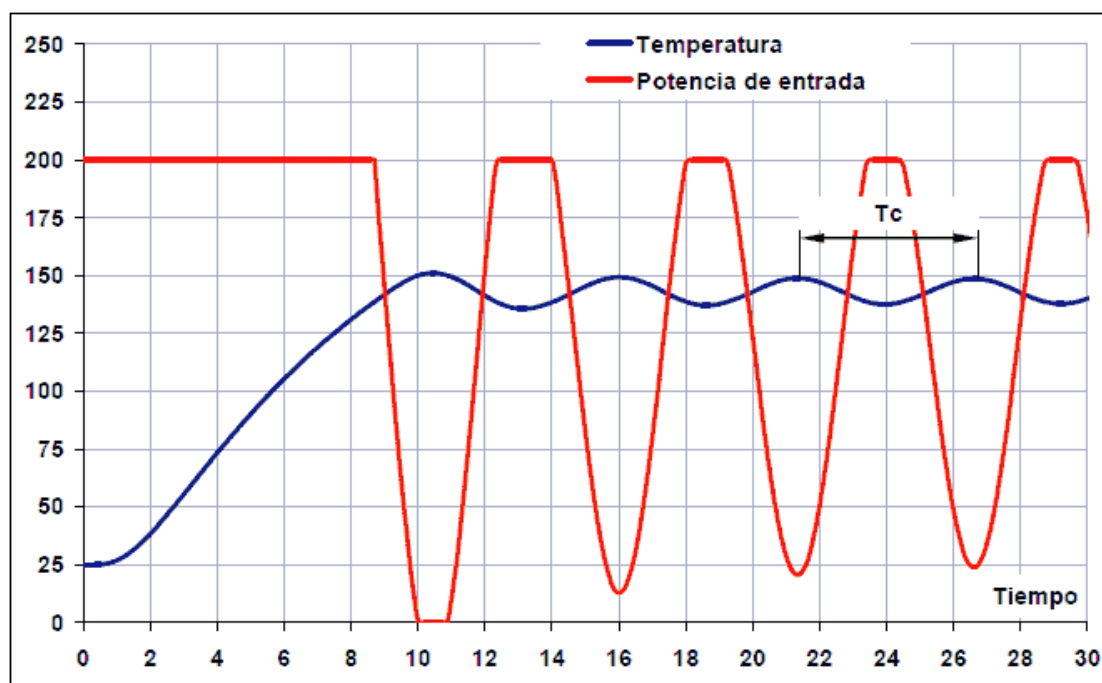


Σε όλες τις περιπτώσεις, η ολοκληρωτική απόκριση έχει περιοριστεί ώστε να μηδενίζεται όταν το σφάλμα είναι μεγαλύτερο από 40°C. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας

του ολοκληρωτικού κέρδους ονομάζεται [anti-windup](#) και χρησιμεύει για την αποφυγή υπερβολικής υπέρβασης στην απόκριση. Αυτή η υπέρβαση συμβαίνει επειδή ο ολοκληρωτικός έλεγχος αυξάνεται ενώ ο ενεργοποιητής είναι κορεσμένος, έτσι ώστε να συσσωρεύει μια τιμή που είναι πολύ υψηλή και δεν προσαρμόζεται στην πραγματική απόκριση του συστήματος.

Συντονισμός κρίσιμου κέρδους κλειστού βρόχου

Αυτή η μέθοδος δεν απαιτεί την αφαίρεση του ελεγκτή PID από τον κλειστό βρόχο. Σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητο μόνο να ελαχιστοποιηθούν η δράση παραγώγων και η ολοκληρωτική δράση του ρυθμιστή PID. Η δοκιμή κλειστού βρόχου συνίσταται στη σταδιακή αύξηση του αναλογικού κέρδους έως ότου το σύστημα ταλαντωθεί με αυτοδιατηρούμενο τρόπο σε περίπτωση διαταραχής. Αυτή η ταλάντωση πρέπει να είναι γραμμική, χωρίς κορεσμούς. Αυτή τη στιγμή είναι απαραίτητο να μετρηθεί το αναλογικό κέρδος, που ονομάζεται κρίσιμο κέρδος ή K_c , και η περίοδος ταλάντωσης T_c σε s.



Αφού μετρηθούν αυτές οι δύο τιμές, μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι του ελεγκτή PID είτε με μόνο αναλογική (P), αναλογική και ολοκληρωτική (PI), αναλογική και διαφορική (PD), είτε με αναλογική, ολοκληρωτική και διαφορική (PID) δράση:

Έλεγχος	K_p	K_i	K_d
P	$0.50 \cdot K_c$		
PI	$0.45 \cdot K_c$	$0.54 \cdot K_c / T_c$	
PD	$0.80 \cdot K_c$		$0.075 \cdot K_c \cdot T_c$

Έλεγχος	K_p	K_i	K_d
PID	$0.59 \cdot K_c$	$1.18 \cdot K_c / T_c$	$0.075 \cdot K_c \cdot T_c$

Η σταθερά K_p αντιστοιχεί στο αναλογικό κέρδος, το K_i είναι το ολοκληρωτικό κέρδος και το K_d είναι το διαφορικό κέρδος.

Παράδειγμα συντονισμού PID με το κρίσιμο κέρδος

Θα εκτελέσουμε έναν συντονισμό του προηγουμένως προσομοιωμένου θερμικού συστήματος:

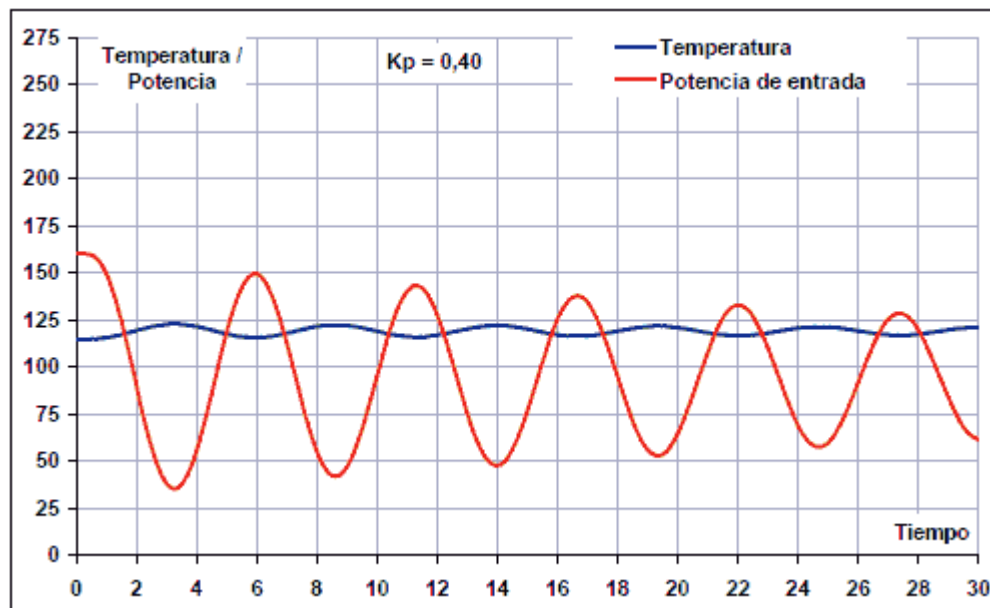
Η πρώτη πράξη θα είναι η ακύρωση των παραγώγων και των ολοκληρωτικών κερδών:

$$K_d = 0$$

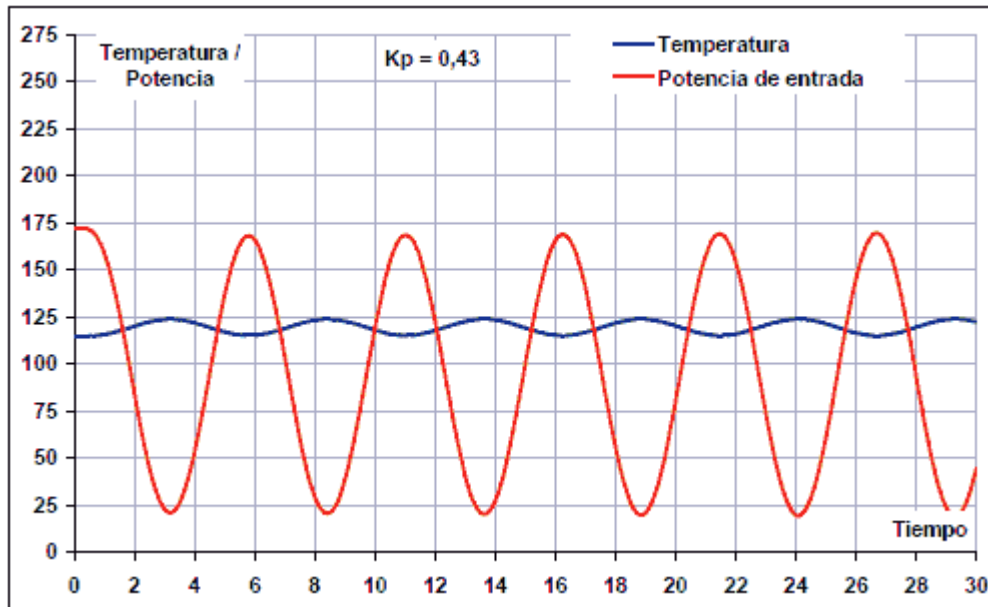
$$K_i = 0$$

Στη συνέχεια, ρυθμίζεται μια θερμοκρασία λειτουργίας στην αναφορά και το αναλογικό κέρδος αυξάνεται μέχρι να επιτευχθεί μια αυτοδιατηρούμενη ταλαντωτική απόκριση.

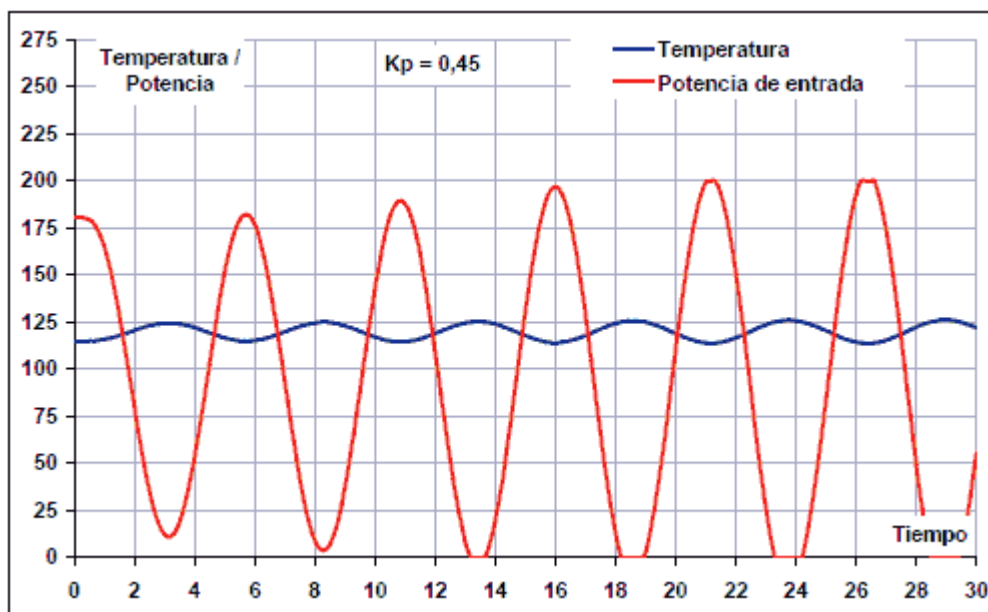
Με αναλογικό κέρδος $K_p = 0,40$ η απόκριση εξακολουθεί να αποσβένεται:



Αυξάνοντας το αναλογικό κέρδος έως $K_p = 0,43$, λαμβάνεται μια απόκριση με αυτοδιατηρούμενες ταλαντώσεις:



Αυξάνοντας το κέρδος έως $K_p = 0.45$, οι ταλαντώσεις αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου, οπότε το κέρδος θα ήταν υπερβολικά υψηλό.



Σε αυτή την περίπτωση, λοιπόν, το κρίσιμο κέρδος και η περίοδος είναι:

$$K_c = 0.43$$

$$T_c = 21/4 = 5.3 \text{ seconds}$$

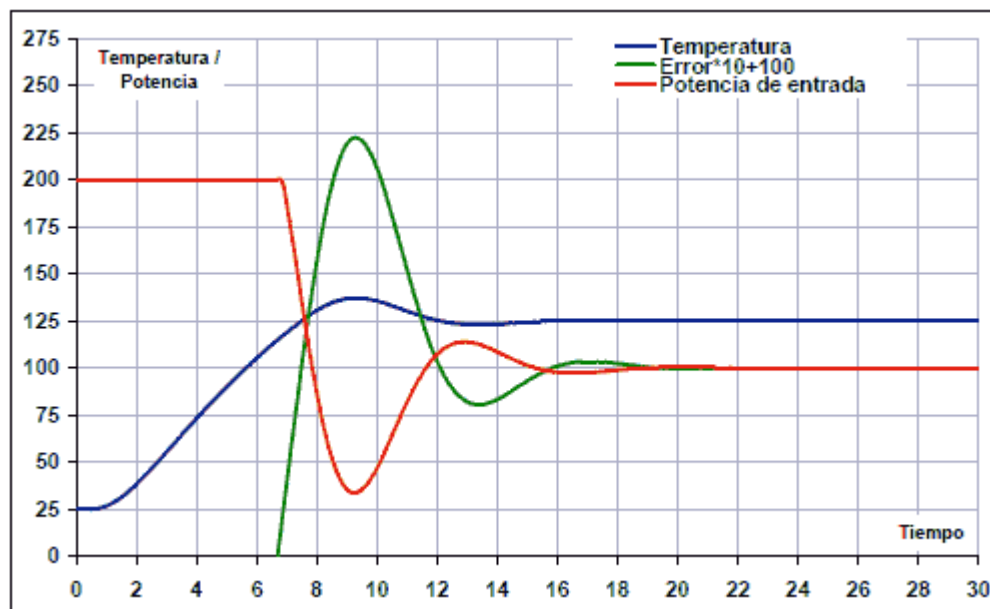
Από αυτές τις τιμές υπολογίζονται οι παράμετροι του ελεγκτή PID:

Έλεγχος	K_p	K_i	K_d
P	0.215		

Έλεγχος	Kp	Ki	Kd
PI	0.195	0.044	
PD	0.344		0.169
PID	0.254	0.096	0.169

Όπως φαίνεται, οι τιμές είναι παρόμοιες με τις τιμές που ελήφθησαν προηγουμένως με τη μέθοδο βηματικής απόκρισης. Οι διαφορές οφείλονται στο γεγονός ότι αυτό το σύστημα δεν είναι γραμμικό και επομένως έχει μια παραμορφωμένη ταλαντωτική απόκριση κατά την αναζήτηση του κρίσιμου κέρδους.

Εισάγοντας τις παραπάνω τιμές στον ελεγκτή PID, λαμβάνεται η ακόλουθη απόκριση του θερμικού συστήματος με ελεγκτή PID:



Σε αυτήν την περίπτωση, μπορείτε επίσης να ολοκληρώσετε τον συντονισμό του ρυθμιστή PID με το χέρι για να έχετε μια ελαφρώς πιο σταθερή απόκριση.