بحث حول المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي
Proportional Integral Derivative
(PID)

Kurdistan Engineering Union

مهندس الكهرباء : علاء حسن علي
رقم عضوية النقابة (14888)

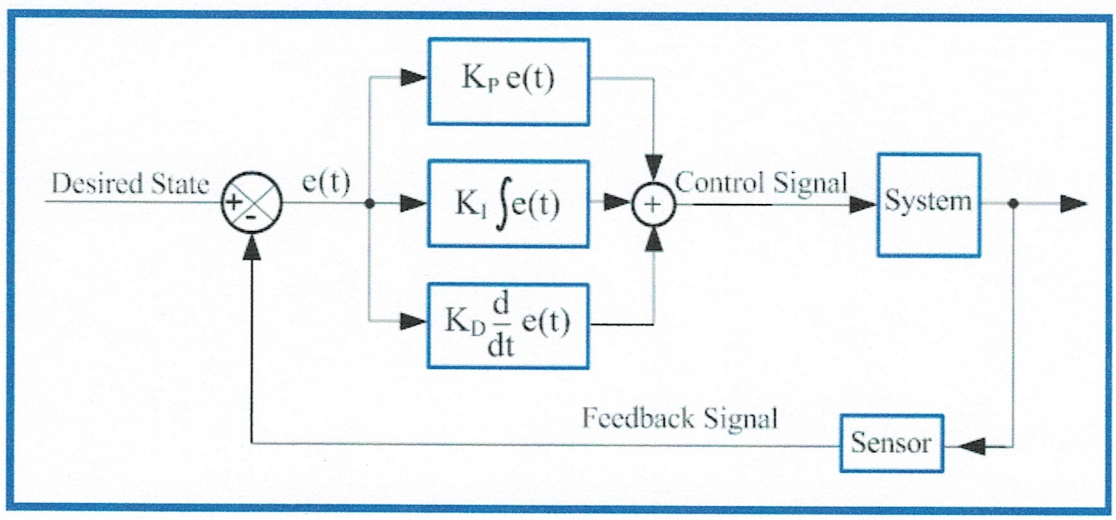
المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي Proportional Integral Derivative (PID)

مقدمة

يقدم هذا البحث عرض لأحد أكثر أنماط التحكم الحديث دقة و استقرار و سرعة في الاستجابة، و هو نظام التحكم التناسبي التكاملي التفاضلي (PID) الذي يعتبر أحد الحالات الخاصة لنظم التحكم بالحلقة المغلقة.

التعريف:
الـ P = Proportional تناسبي
الـ I = Integral تكاملي
الـ D = Derivative تفاضلي

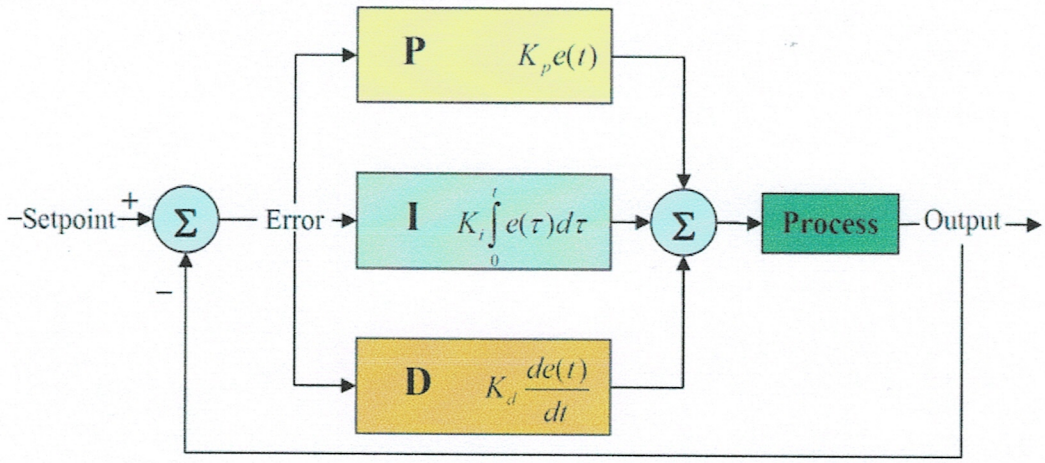
الخصائص:
من الشكل أدناه يلاحظ أن الـ (PID) يوضع بعد عملية المقارن بين الدخل و الخرج.
من الشكل التغذية العكسية (feedback) الفرق بين الدخل (القيمة المطلوبة) و الخرج (قراءة الـ sensor)يسمى بالخطأ (error) و يرمز له بالرمز (e) و هذه الإشارة أو القيمة تنتقل في المتحكم الـ (PID) ثم تنتقل إلى الـ (actuator) يمكن استخدم الـ (P) فقط أو الـ (I) فقط أو الـ (D) فقط أو (PI)أو الـ (PD) أو الـ (PID) أو... و يتم اختيار النوع حسب و التطبيق الPID عبارة عن جمع (تناسبي + تكاملي + تفاضلي) يتم الجمع بينهم بنسبة معينة.



فكرة عامة

يتمثل الخوارزم الحسابي لحاكم PID بثلاثة معاملات منفصلة: التناسب (P)، التكامل (I)، والتفاضل (D). القيمة التناسبية تبين رد الفعل مع الخطأ الحالي. القيمة التكاملية تتناسب مع استمرارية وجود الخطأ مع الزمن. القيمة التفاضلية تتناسب مع معدل التغير في الخطأ.

في الحقيقة ترتيب الاحرف أو الكلمات لا يعكس اسبقية العملية بالضرورة.



أساسيات حلقة التحكم

يمكن مشاهدة مثال حي لحلقة التحكم في حياتنا اليومية كما هو الحال في مرش الحمام حيث يمكن ضبط درجة الحرارة المناسبة يدويا. عندما نشعر بالبرودة فأننا سندير حنفية الماء الساخن لتفتح أكثر وربما العكس مع حنفية الماء البارد. تدعى عملية الشعور أو الإحساس (بتغير درجة الحرارة) بقياس قيمة العملية (Process Variable - PV) وتسمى درجة الحرارة المرغوبة بالقيمة المضبوطة (Set Point - SP) بينما يطلق على عملية التحكم بالصنبور أو الحنفية بالمتغير المتأثر (Manipulated Variable - MV). الأهم هنا هو من يقوم بعملية المعالجة وهو دماغ الإنسان. يمكن استبدال دماغ الإنسان بآلية تقوم بنفس الكيفية مثل تركيب جهاز لضبط الحرارة (ثرموستات مثلا أو خلاط حراري).

يمكن تلخيص حلقة التحكم بثلاثة وظائف أساسية هي:

- **وظيفة القياس**: تتم هذه الوظيفة بواسطة أجهزة تحسس أو مجسات وتدعى أحيانا بالمرسلات. من هذه المجسات مجس الحرارة، مجس الضغط ، مجس الحركة ، مجس التيار، مجس المقاومة ، مجس التردد، وما إلى ذلك. يتم اختيار نوع المرسل وفقا للعملية المراد التحكم بها.

- **وظيفة المقارنة والحساب**: يتم مقارنة القيمة المقاسة عبر المرسل والقيمة المضبوطة مسبقا والتي يراد الوصول إليها. تسمى القيمة المقاسة *PV* بينما القيمة المضبوطة *SP*. نتيجة المقارنة ينشأ عنها قيمة تدعى الخطأ (e) ، وتمرر بدوره إلى أحد أو مجموعة عناصر التحكم السابقة ونتيجة المعالجة أو الحساب ترسل إلى قسم التحكم النهائي للعمل بها.
- **وظيفة التحكم النهائي**: تختلف أنواع عناصر التحكم النهائي باختلاف العملية فهناك مثلا الصمامات لفتح وقفل الأنابيب، المحركات للتحكم بالسرعة والاتجاه ، السخانات للتحكم بالحرارة وهكذا.

من ناحية أخرى يمكن تصنيف الوظائف حسب مبدأ عملها، يوجد ثلاثة أصناف هي:

- وظيفة العمل بضغط الهواءPneumatic air: يتم تمييز هذا النوع في الرسومات الصناعية بالخطوط المتواصلة _____.
- وظيفة العمل بضغط السائل Hydraulic. يتم الرمز لهذا النوع بخطوط متصلة ولكن تقطعها حروف L أي ---L---L---
- وظيفة العمل بالتيار الكهربائي Electric current: يتم ترميز هذا النوع بخطوط متقطعة - - - - - - -.

التقنيات المتوفرة

- تقنية التحكم الهوائي PID Pneumatic Controller: وتعد من أوئل التقنيات التي تم تصنيعها لتطبيق نظرية التحكم بالعنصر التناسبي التكاملي التفاضلي.
- تقنية التحكم الإلكتروني Electronics PID Controller: وتعتمد بشكل رئيسي على مكبر العمليات.
- تقنية التحكم الرقمي Digital Controller: وهي الأحدث والأكثر شيوعاً في الصناعة حيث تعتمد تقنيات تحكم متطورة قابلة للبرمجة والموالفة الذاتية.

نظرية التحكم نوع PID

يوجد ثلاثة أنواع رئيسية من نمط التحكم PID هي:

- النوع التسلسي أو المتفاعل : Series PID وفيه تكون عناصر أو حدود I و D مرتكز تماما على الحد (P) ،بمعنى أنها لا تعمل بدونه.
- النوع المتفرع أو المستقل : Parallel PID تؤدى الوظائف P , I و D بشكل مستقل عن بعضها ثم تجمع معا إلى خرج واحد.
- النوع المختلط : Mixed PID وهو مزيج من التسلسلي والمتوازي.

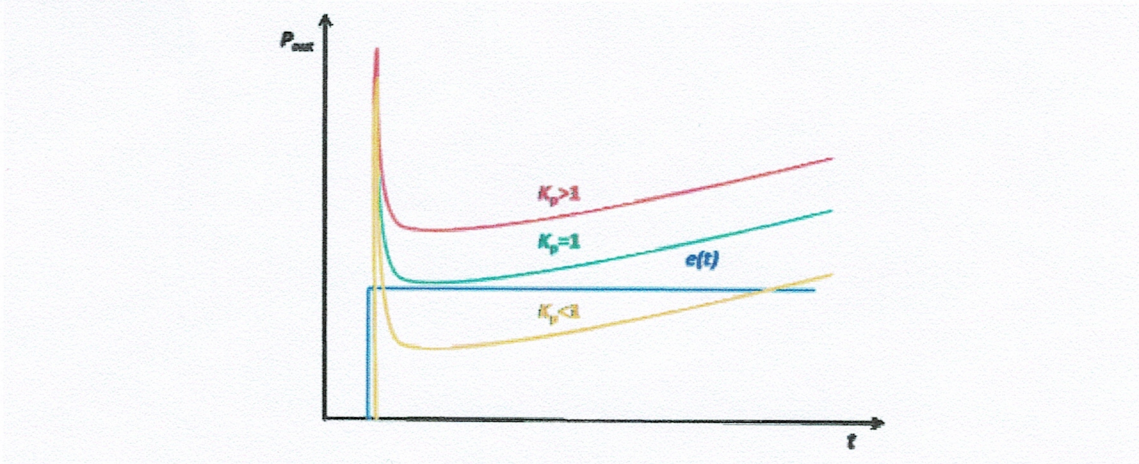
كما أن الأنواع الثلاثة يمكن دراستها عند الحلقة المفتوحة Open Loop والحلقة المغلقة Closed Loop إذا تم الأخذ بعين الاعتبار القيمة المقاسة تسمى الحلقة مغلقة أما إذا تما عزلها فيسمى النمط بالحلقة المفتوحة. سيتم التكيز هنا على PID ذي النوع المتوازي أو المتفرع. تعطى وظيفة الخرج له بالعلاقة:

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out}$$

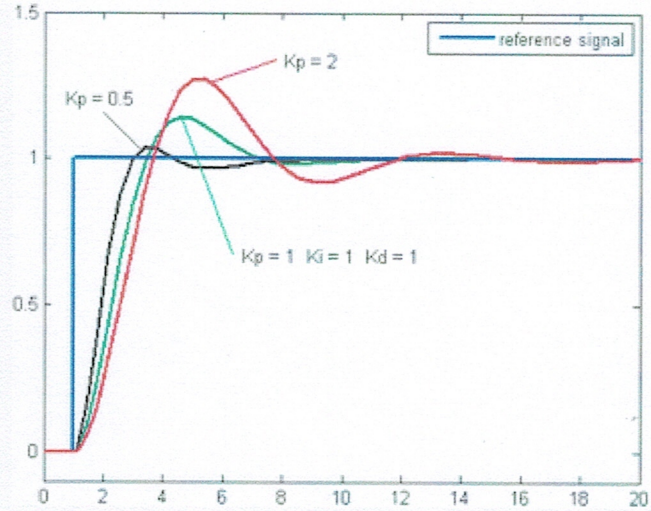
حيث:

P_{out}، I_{out} و D_{out} هي المساهمات التي تؤديها كل وظيفة من الحدود الثلاثة على حدة إلى الخرج كما سيتبين فيما يلي.

الحد التناسبي



شكل يبين الخرج مقابل الزمن، لقيم مختلفة من K_p (أي أن K_i و K_d تبقى ثابتة) في الحلقة المفتوحة.



شكل يبين PV مقابل الزمن، لقيم مختلفة من K_p (أي أن K_i و K_d تبقى ثابتة) في الحلقة المغلقة.

يدعى أحيانا الحد التناسبي بالتضخيم ويتسبب في تغير قيمة الخرج بمقدار يتناسب طرديا مع قيمة الخطأ الحالية. يمكن ضبط الاستجابة التناسبية بضرب قيمة الخطأ بقيمة ثابتة (قابلة للضبط) , K_p وتدعى أيضا بالتضخيم التناسبي. يستخدم وصفا اخر في بعض أنظمة التحكم هو النطاق التناسبي Proportional Band,ويرمز له عادة PB% ويرتبط بالحد التناسبي بالعلاقة:

$$K_p = \frac{100}{PB\%}$$

يكون الخرج الناتج عن الحد التناسبي هو:

$$P_{out} = K_p\, e(t)$$

حيث P_{out} : الحد التناسبي في الخرج
K_p : التضخيم التناسبي، قابل للتعديل
e : الخطأ ويساوي $SP - PV$
t : الزمن

إذا كانت قيمة التضخيم التناسبي كبيرة فسينتج عنها تغيرا كبيرا في الخرج عند قيمة معينة للخطأ. أما إذا كانت هذه القيمة كبيرة جدا فسيصبح النظام غير مستقر (انظر قسم موالفة الحلقة في نهاية البحث).

الجدير بالذكر هو أن الحد التناسبي

لا يستطيع إلغاء الخطأ أو الإزاحة Offset بدون وجود الحد التكاملي. يمكن إثبات ذلك في حالة تغير الخطوة مثلا، باستخدام معادلات لابلاس يمكن إثبات أن الخطأ المتبقي عند زمن الاستقرارية

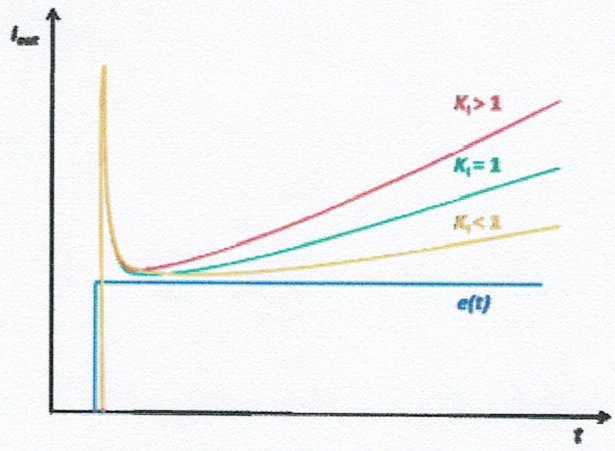
$$e_{ss} = \lim_{t\to\infty} e(t) = \frac{K_p}{K_p + 1}$$ هو (t → ∞ اي عندما)

حيث :

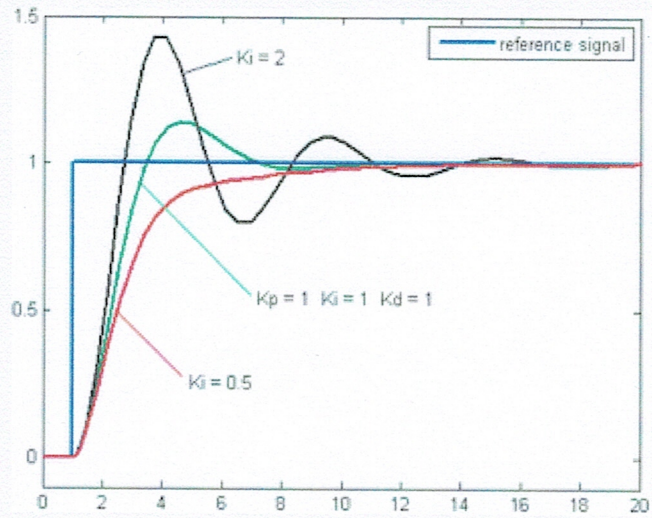
e_{ss} خطأ الحالة المستقرة steady state error (اي عندما ∞ → t).

يستعمل هذا النوع من عناصر التحكم في ضبط الحرارة وبعض التطبيقات الأخرى مثل ضبط مستوى السائل في الخزانات إذا لم تكن عملية إزالة الخطأ ذات أهمية.

الحد التكاملي



مخطط لقيمة التغير في الخطأ والخرج مع الزمن في الحلقة المفتوحة وذلك لقيم مختلفة من K_i (أي أن K_p و K_d تبقى ثابتة).



مخطط لقيمة PV مع الزمن في الحلقة المغلقة، وذلك لقيم مختلفة من K_i (أي أن K_p و K_d تبقى ثابتة).

يطلق على الحد التكاملي أحيانا **إعادة الضبط reset** وذلك لقدرته على إزالة الخطأ المتبقي والذي لايستطيع الحد التناسبي إلغاؤه. يمكن فهم السبب بالنظر في الحلقة المفتوحة حيث نرى أن الحد التكاملي يستمر في التغير صعودا أو هبوطا بشكل يتناسب مع مقدار الخطأ ولايتوقف مع مرور الوقت إلا إذا كان الخطأ صفرا. عمليا يتوقف الحد التكاملي عندما يصل إلى مرحلة الإشباع وهي القدرة العظمى للخرج العملياتي. يمتلك الحد التكاملي ثابتا قابلا للضبط في عمليات الموالفة ويدعى K_i . غالبا يستبدل هذا الثابت بمقلوبه والذي يحمل مغزى للتكامل ويطلق عليه T_i حيث:

$$K_i = \frac{1}{T_i}$$

يعرف T_i على أنه الزمن اللازم للوصول بالخرج لنفس قيمة الخطأ أو الدخل منذ بدء الخطأ بمقدار خطوة Step .

يعطى الحد التكاملي بالعلاقة:

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau)\, d\tau$$

حيث I_{out} : الحد التكاملي للخرج.

K_i : تضخيم التكامل، قابل للموالفة.

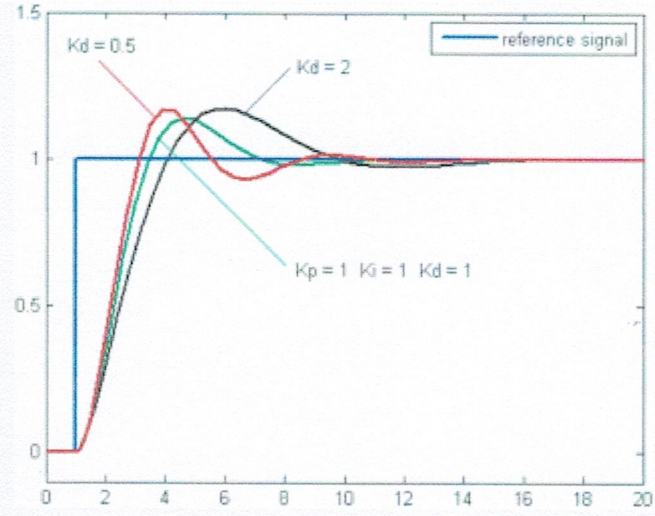
e : الخطأ ويساوي ***SP – PV***.

t : الزمن اللحظي.

τ : متغير اعتباطي.

يستعمل الحد التكاملي مع الحد التناسبي بشكل واسع في التطبيقات الصناعية لتعجيل عملية الاستجابة وإزالة الخطأ عند الاستقرارية. ومع ذلك قد يتسبب الحد التكاملي في ظهور قفزة overshoot فوق القيمة المراد الوصول لها بسبب تجميعه لبيانات الخطأ المتراكمة. يمكن التوفيق بين سرعة الاستجابة والقفزة بواسطة موالفة ثوابت الحدود كما في قسم الموالفة في نهاية البحث.

الحد التفاضلي



رسم يوضح قيمة PV بالنسبة للزمن، مع ثلاث قيم مختلفة لـ K_d (هنا K_p و K_iتبقى ثابتة).

يطلق على الحد التفاضلي أحيانا **بالمعدل rate** وذلك لأنه يظهر فقط عندما يكون هناك تغير في قيمة الخطأ بالنسبة للزمن ويتناسب طرديا مع معدل هذا التغير. يمتلك الحد التفاضلي ثابتا قابلا للتغيير في عملية الموالفة ويرمز له رياضيا K_d وفي الأنظمة الصناعية عادة T_d لأنها ترمز لميل دالة الخطأ.

يمكن التعبير عن الحد التفاضلي رياضيا بالصورة:

$$D_{\text{out}} = K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

حيث D_{out} : الحد التفاضلي للخرج.

K_p : التضخيم التفاضلي ، قابل للموالفة.

e : الخطأ ويساوي ***SP – PV***.

t : الزمن.

مع أن الحد التفاضلي يحسن أحيانا في عملية التحكم إلا أنه يتأثر بالضوضاء بشكل كبير ويمكن أن يتسبب في عدم استقرارية النظام. لهذا السبب لايستخدم الحد التفاضلي في الصناعة إلا بشكل نادر وبحذر شديد.

خلاصة

تعمل الحدود التناسبي، التكاملي والتفاضلي معا لتجمع وتعطي خرجا واحدا لعنصر التحكم PID. إذا رمزنا $u(t)$ لدالة الخرج فستكون قيمتها معطاة بالعلاقة:

$$\mathrm{u(t)} = \mathrm{MV(t)} = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)\,d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

بحيث تكون عناصر الموالفة هي:

التضخيم التناسبي , K_p

ويمكن زيادتها لتسريع الاستجابة ولكن إلى الحد الذي يبقي على استقرارية النظام.

التضخيم التكاملي , K_i

لتسريع عملية إزالة الخطأ.

التضخيم التفاضلي , K_d

لتقليل عملية الطلقة أو القفزة مع مراعاة تأثير الضوضاء.

موالفة

تعد عملية موالفة الحلقة Loop tuning من أعقد وأخطر عمليات التحكم لاسيما الموالفة المباشرة أثناء العمليات والسبب هو عدم وجود قانون ثابت يحكم العملية Process . إذا أخطأنا باختيار القيم المناسبة لعناصر الموالفة (معاملات المضخم التناسبي، التكاملي، والتفاضلي) يمكن أن تصبح العملية المراد التحكم بها غير مستقرة وربما تخرج عن السيطرة. فبدلا من الحصول على قيمة مستقرة بعد فترة من الزمن قد يصبح هناك إما وقت أطول للحصول على هذه القيمة المستقرة أو ربما لا تستقر وتظل في حالة تذبذب طوال الوقت وربما ما هو أسوأ وهو تضخيم عملية التذبذب مع الوقت حتى تخرج عن السيطرة تماما.

هناك بعض الطرق المشهورة في عملية الموالفة التقريبية والتي تحاول الاستفادة من تجربة عملية تتم عادة بالأسلوب اليدوي (Manual Mode) أولية أو أكثر على العملية (Process) وقد تكون إما حلقة مفتوحة أو مغلقة أشهرها مايلي.

اختيار طريقة الموالفة		
الطريقة	المزايا	العيوب
الموالفة اليدوية	لا تحتاج لحسابات رياضية. تتم مباشرة أثناء سيران العمليات.	تتطلب أفراد ذوي خبرة.
Ziegler – Nichols زيغلر- نيكولس	طريقة مثبتة. مباشرة أثناء سيران العمليات online.	اضطراب في العمليات، تعتمد على التجربة والخطأ ,موالفة تتطلب المزيد من الكفاح.
Software Tools أدوات برامجية	موالفة متسقة. طريقة مباشرة أو حتى أثناء توقف العمليات. قدد تتضمن معها عملية تحليل للمحبس والمجس. السماح بالمحاكاة قبل التنزيل.	تتطلب دورة تدريبية مكلفة.
Cohen - Coon كوهن- كون	نماذج جيدة للعمليات.	بعض الرياضيات. أثناء توقف العمليات. مناسبة فقط لعمليات من الرتبة الأولى.

الموالفة اليدوية

عندما يكون من الضروري بقاء النظام عاملا، يمكن أولا موالفة K_i و K_d إلى قيم صفرية. يتم زيادة K_p تدريجيا حتى يبدأ خرج الحلقة بالتذبذب، حينئذ ينبغي إنقاص قيمة K_p إلى النصف تقريبا من أجل استجابة من نوع (اضمحلال ربع الاتساع). ثم تزاد قيمة K_i حتى يتم تصحيح أي انزياح خلال زمن كاف للعملية. ومع ذلك، فإن زيادة كبيرة جدا في K_i ستسبب عدم استقرارية. وأخيرا، يتم زيادة K_d , إذا كان مطلوبا، حتى تصبح الحلقة سريعة بشكل ماقبل و بعد حدوث اضطراب في حمل. ولكن مرة أخرى، فإن زيادة K_d كثيرا قد يتسبب في استجابة زائدة عن الحاجة وظهور القفزة. في العادة تتسبب عملية الموالفة السريعة في PID بظهور قفزة طفيفية من أجل الوصول لقيمة الضبط setpoint بشكل أسرع، بالرغم من هذا، فبعض الأنظمة لا تتقبل هذه القفزة، وفي هذه الحال يكون النظام المغلق ذو " إخماد قوي over - damped " ضروريا، والذي يتطلب ضبط K_p أقل من نصف القيمة K_p التي تسببت في التذبذب.

تأثيرات زيادة المعاملات				
المعامل	زمن الصعود	القفزة	زمن الاستقرار	الخطا عند الاتزان
K_p	نقص	زيادة	تغير طفيف	نقص
K_i	نقص	زيادة	زيادة	عزل
K_d	لانهائي (نقص أو زيادة طفيفة)	نقص	نقص	لاشيئ

طريقة زيغلر نيكولس

سميت هذه الطريقة نسبة لمقدميها جون زيغلر وناتانيل نيكولس .كما الطريقة السابقة، توضع قيم K_i و K_d على الصفر. تزاد قيمة التضخم P حتى تصل إلى التضخيم الحرج , K_c ,حيث يبدأ الخرج بالتذبذب K_c . وفترة التذبذب P_c تستعمل لضبط القيم كما يلي:

طريقة زيغلر نيكولس			
نوع التحكم	K_p	K_i	K_d
P	0.5 K_C	-	-
PI	0.45 K_C	1.2 K_p / P_c	-
PID	0.60 K_C	2 K_p / P_c	K_p P_c / 8

برامج موالفة PID

لم تعد الطرق التقليدية السابقة مستخدمة كثيرا في أنظمة التحكم الصناعية الحديثة. بدلا من ذلك تقوم برامج حديثة بعمل الموالفة والأمثلية. تقوم هذه البرامج بجمع البيانات، تطوير نماذج عمليات، ومن ثم تقترح الموالفة المثلى كما أن بعض هذه البرامج تستطيع تطوير عملية الموالفة بالاعتماد على تغييرات مرجعية (كما في أنظمة APC التحكم المتقدم بالعمليات).

تكمن فكرة موالفة الحلقة الرياضية في استحثاث قدحة Impulse في النظام، ثم تسخير الاستجابة الترددية للنظام المحكوم لتصميم قيم حلقة PID المطلوبة. تفضل هذه العملية في حالة الحلقات التي تتراوح استجابتها الزمنية بضع دقائق. من الصعوبة بمكان إيجاد القيم المثلى. تقدم بعض حلقات التحكم الرقمية ميزة "الموالفة الذاتية" حيث يتم إرسال تغيرات طفيفة جدا في القيمة المضبوطة SPإلى العمليات، سامحة لأجهزة التحكم بحساب قيم موالفة مثلى.

البرمجة

يمكن برمجة عناصر التحكم السابقة في حلقة مغلقة افتراضية دون الحاجة لتصنيعها عمليا وهذا هو فعلا ماتقوم به أنظمة التحكم الحديث. المثال التالي يمثل كيفية بناء البرنامج باستعمال لغة كيو بيسك مثلا:

```
previous_error = 0
integral = 0
begin:
  recent_error = setpoint - actual_position
  integral = integral + (recent_error*dt)
  derivative = (recent_error- previous_error)/dt
  recent_output = (Kp*recent_error) + (Ki*integral) + (Kd*derivative)
  previous_error = recent_error
  SLEEP (dt)
  GOTO begin
```