

# التحكم الحديث 1

## Modern Control 1

كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية – جامعة حلب  
د. أسعد كعدان

المحاضرة 6 – متحكمات PID

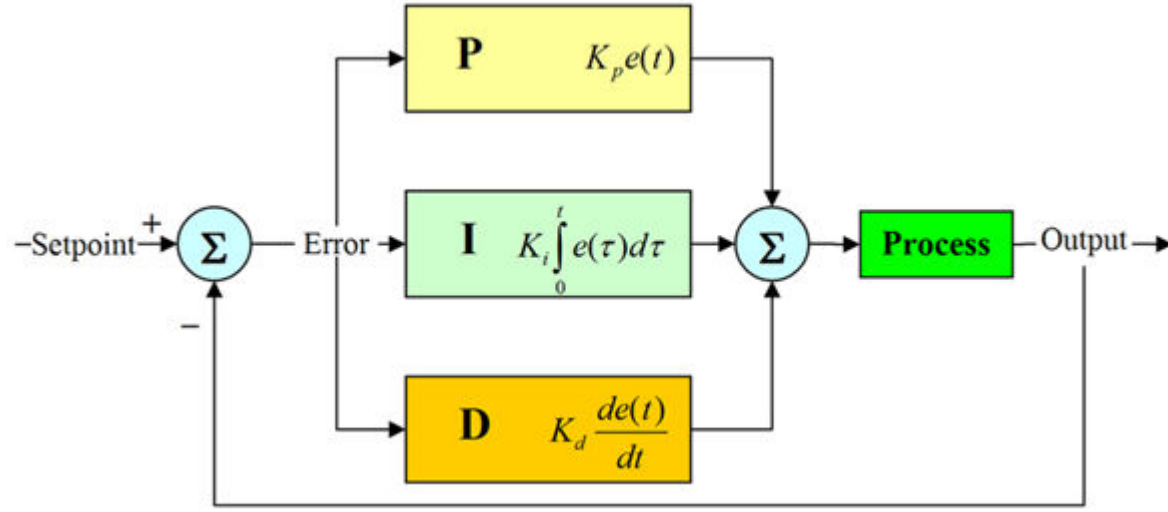
# منظمات PID

## مقدمة

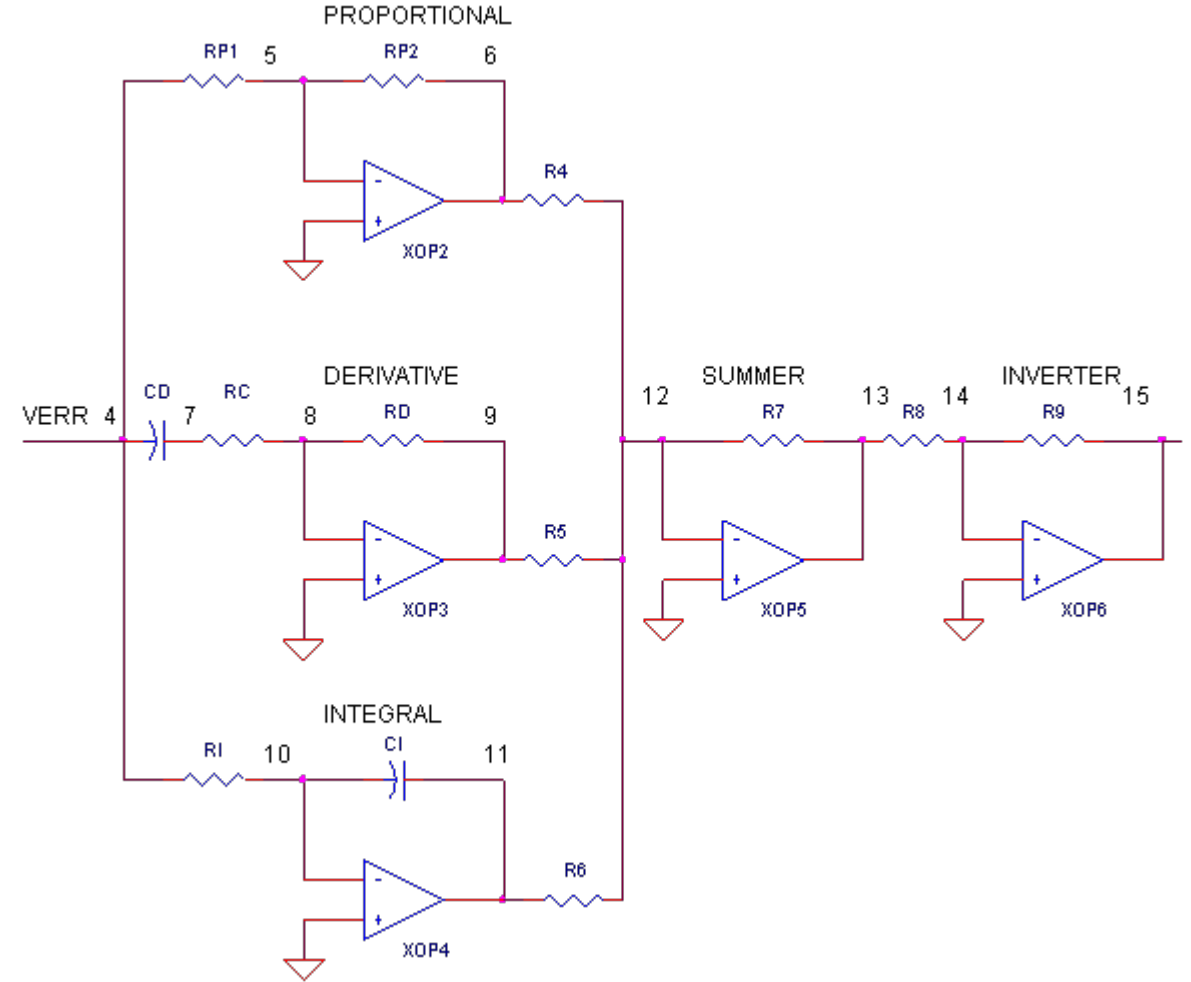
- منظم PID اختصار للمنظم التناسبي – التكاملي – التفاضلي Proportional – Integral – Differential
- يسمى منظم لأنه يسعى لتنظيم إشارة الخطأ نحو الصفر.
- بكل بساطة يعتمد على تناسب وتكامل وتفاضل إشارة الخطأ.
- أشهر أنواع المنظمات وأكثرها استخداماً في الصناعة والروبوتيكس (> 90%).
- أداء المنظم مقبول ولا يحتاج لمعرفة النموذج الرياضي للنظام.
- تنفيذ PID على المتحكمات الرقمية والتشابهية بغاية السهولة. غالباً ما يتم تعديل بنية المنظم من أجل تطبيقات مختلفة.
- أهم مساوئ PID الحاجة لمعايرة ثوابته – المعايرة غالباً يدوية تجريبية ولكن توجد عدة طرق تسرع وتسهل المعايرة بشكل كبير.

# منظمات PID

مقدمة



$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] + u_0(t)$$



# المنظم التناسبي Proportional (P) Regulator

• خرج المنظم التناسبي هو نسبة ثابتة من إشارة الدخل  $u = K_p e + u_0$

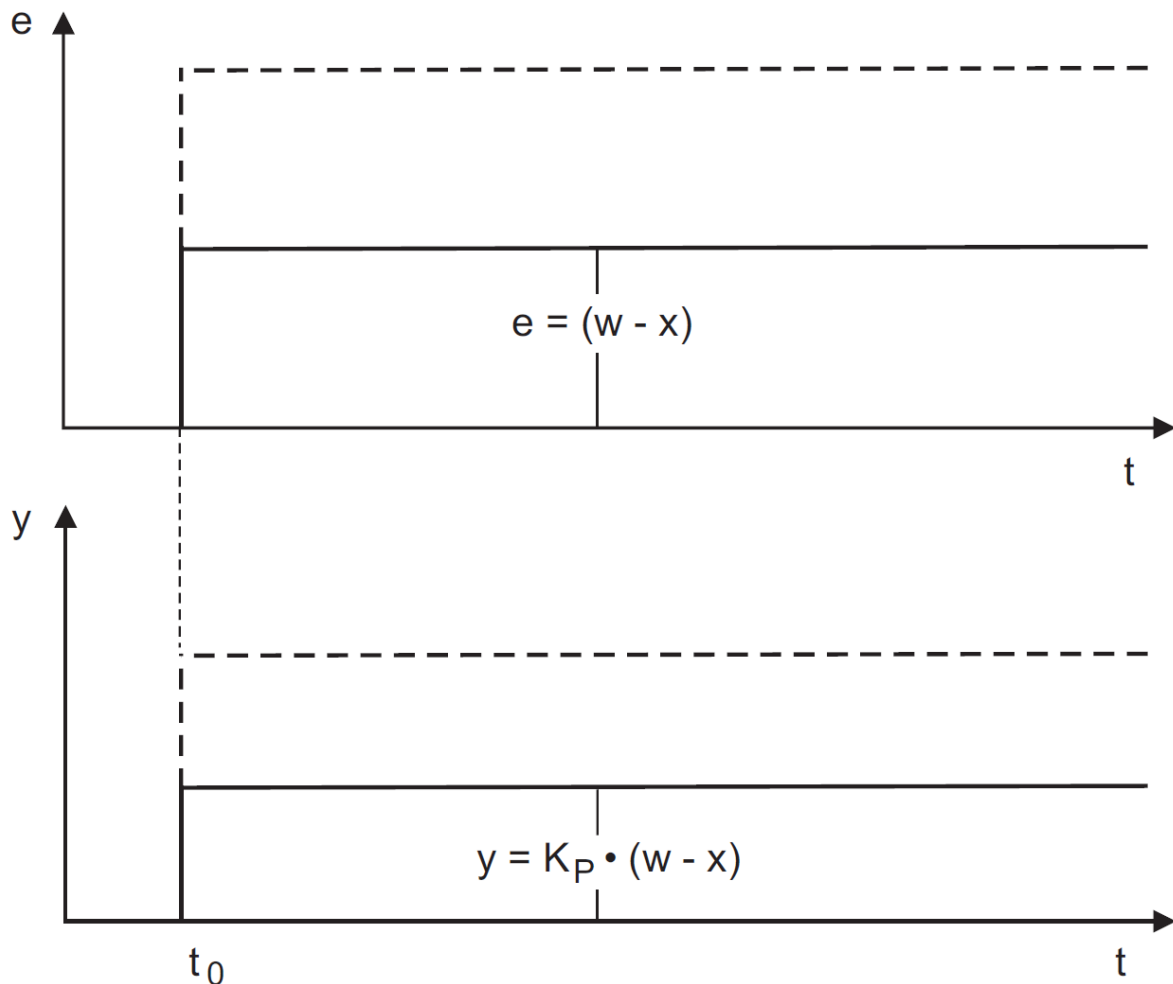
• المنظم التناسبي يولد استجابة سريعة لإشارة الخطأ. لذلك يستخدم لإيصال الخرج إلى القيمة المطلوبة بأسرع ما يمكن.

• ولكنه لا يزيل الخطأ المتبقي في الإشارة (أو خطأ الحالة الثابتة steady state error).

• يمكن أن يؤدي إلى عدم الاستقرار بسهولة إذا كانت قيمة خرج المنظم كبيرة.

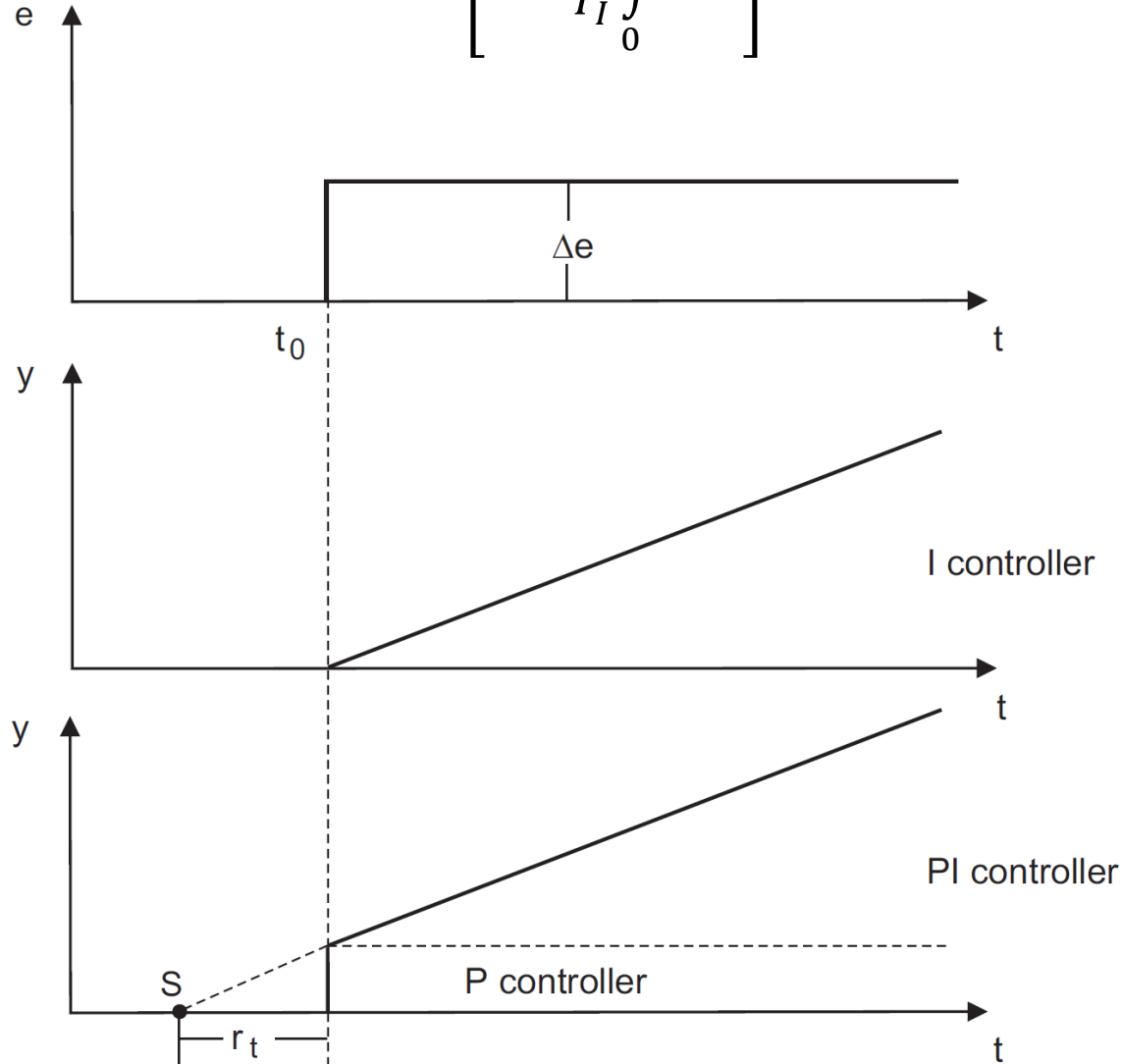
• غير فعال في التعامل مع إشارة خطأ متغيرة.

• لا يتم استخدام هذا المنظم بمفرده عادة لأنه يفتقد للمرونة.



# المنظم التناسبي التكاملي (PI) Regulator المنظم التناسبي التكاملي

$$u = K_p \left[ e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt \right] + u_0$$



- خرج المنظم التكاملي **نسبة من مجموع** إشارات الدخل – تتناقص مع تناقص الخطأ.
- المنظم التكاملي **يقلل نسبة الخطأ** في الخرج بشكل تدريجي إلى أن تنعدم.
- جمع المنظمين التناسبي والتكامل معاً يسمح لنا بالوصول إلى الخرج المطلوب بسرعة والتخلص من أي نسبة خطأ متبقية.
- نسمي  $T_I$  الثابت الزمني التكامل.
- هذا المنظم شائع الاستخدام بشكل كبير وخاصة للتحكم بدرجة الحرارة حيث **تتغير إشارة الخطأ ببطء**.
- يمكن أن يؤدي منظم PI إلى تجاوز overshoot الخرج بسهولة أو حتى اهتزازه.

# المنظم التناسبي التكاملي (PI) Regulator

$$u = K_p \left[ e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt \right] + u_0$$

- خرج المنظم التكاملي **نسبة من مجموع** إشارات الدخل – تتناقص مع تناقص الخطأ.

- المنظم التكاملي **يقلل نسبة الخطأ** في الخرج بشكل تدريجي إلى أن تنعدم.

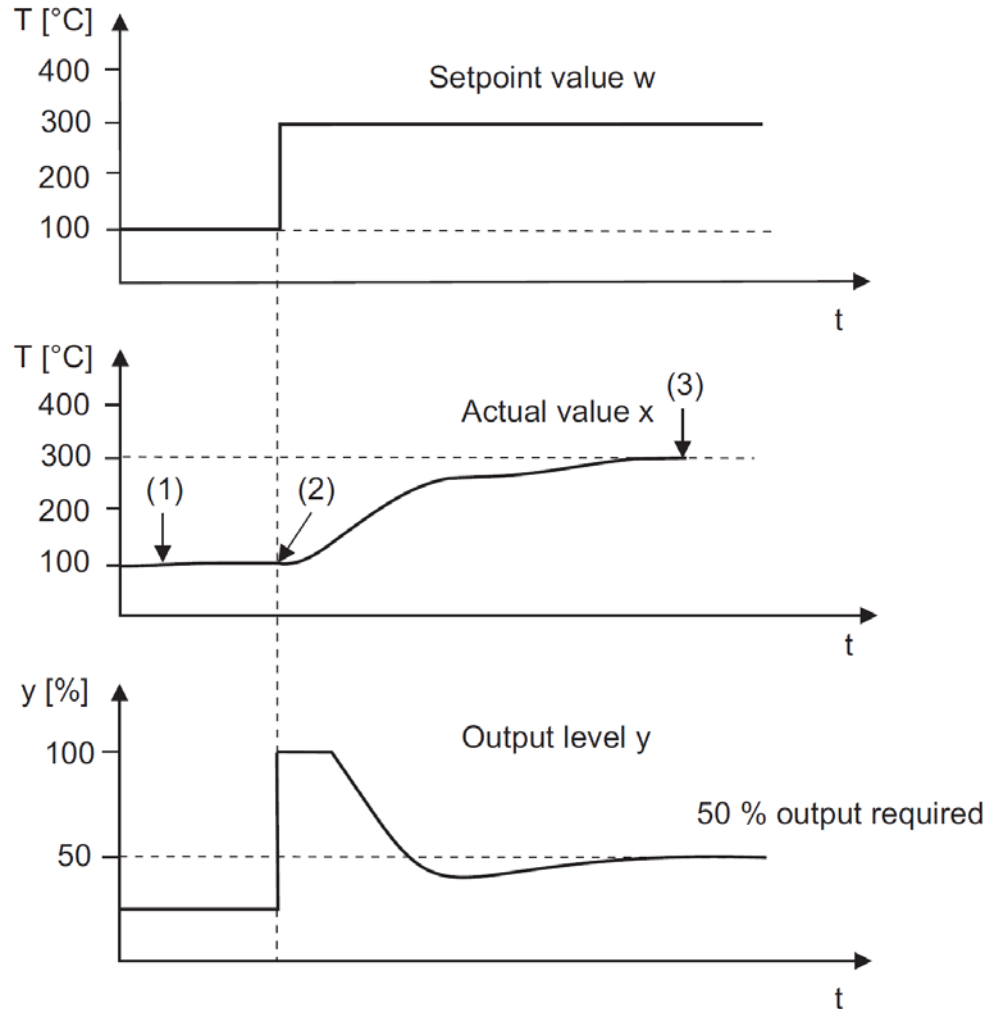
- جمع المنظمين التناسبي والتكامل معاً يسمح لنا بالوصول إلى الخرج المطلوب بسرعة والتخلص من أي نسبة خطأ متبقية.

- نسمي  $T_I$  الثابت الزمني التكاملي.

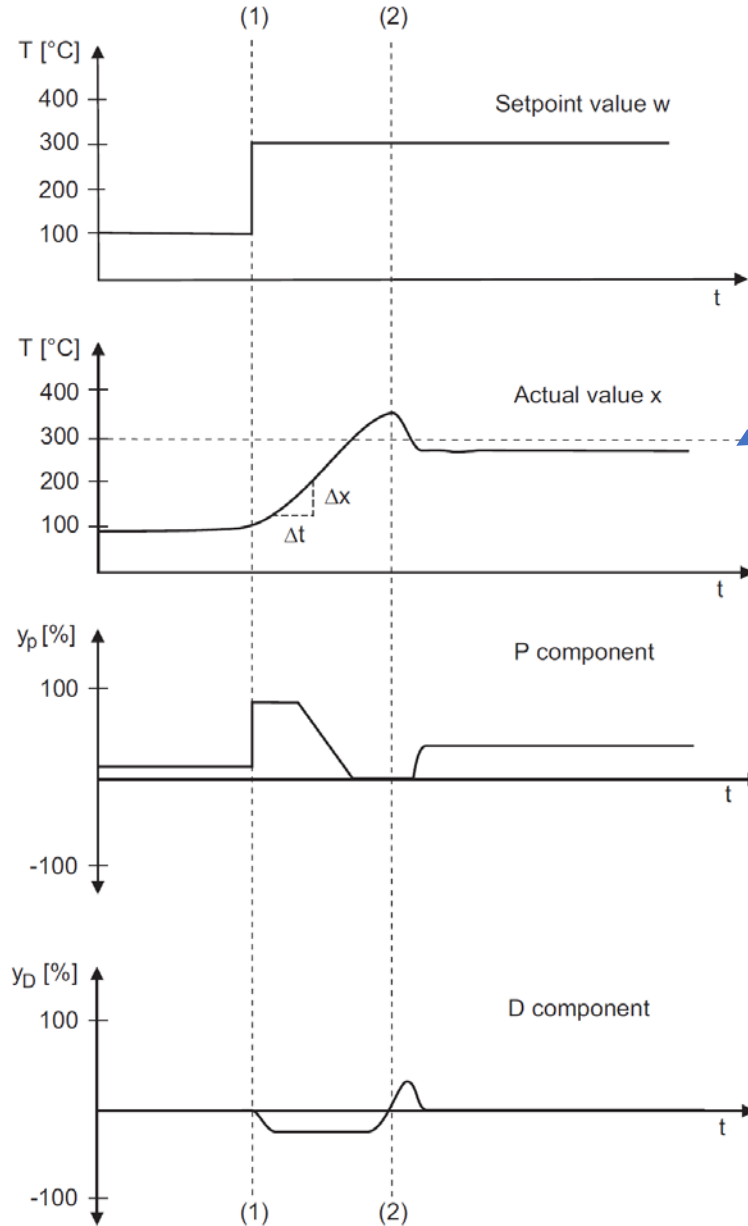
- هذا المنظم شائع الاستخدام بشكل كبير وخاصة للتحكم بدرجة الحرارة حيث **تتغير إشارة الخطأ ببطء**.

- يمكن أن يؤدي منظم PI إلى تجاوز overshoot الخرج بسهولة أو حتى اهتزازه.

- **مثال:** تنظيم درجة حرارة (لاحظ كيف تم تحديد خرج السخان عند 100%)  
(100%)



# المنظم التناسبي التفاضلي (PD) Regulator



• خرج المنظم التفاضلي **نسبة من تغير إشارة الدخل** –  $u = K_p \left[ e + T_D \frac{de}{dt} \right] + u_0$   
تتناقص مع تناقص التغير في الإشارة.

• المنظم التفاضلي يعاكس وبالتالي **يقلل نسبة الاهتزاز والتجاوز** في الخرج بشكل تدريجي إلى أن تنعدم.

• جمع المنظمين التناسبي والتفاضلي معاً يسمح لنا بالوصول إلى الخرج المطلوب بسرعة والتخلص من أي اهتزازات أو تجاوز overshoot للخرج أي أنه **يحسن الاستجابة الديناميكية**.

• نسمي  $T_D$  الثابت الزمني التفاضلي.

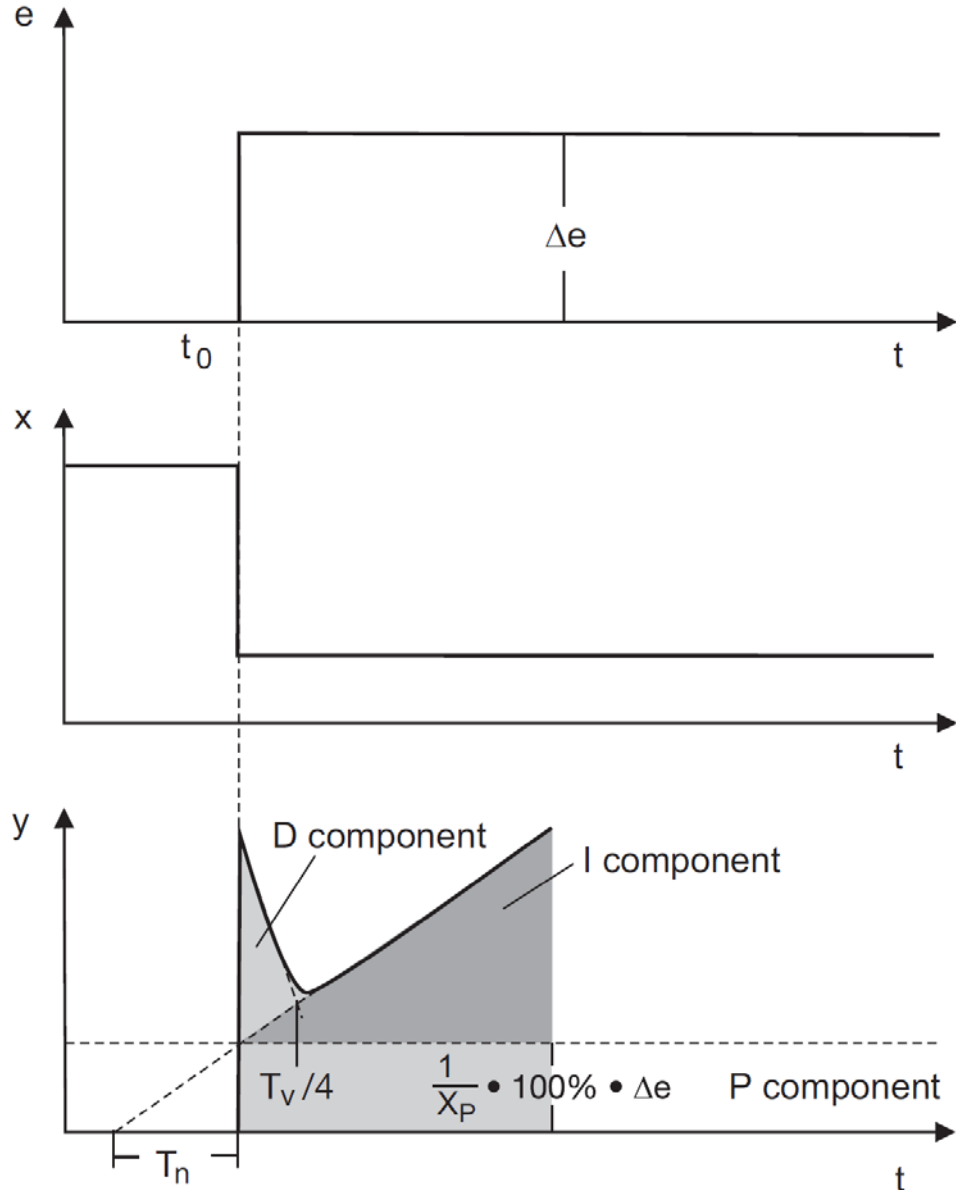
• استخدام هذا المنظم غير شائع كثيراً ولكنه مفيد عند حدوث تغيرات كبيرة وسريعة في إشارة الدخل.

• عملياً لا تتغير القيمة الحقيقية لإشارة ما بشكل فجائي ولكن القيمة المرجعية قد تتغير فجائياً (وخاصة في الأنظمة المقطعة).

• من أهم مساوئ المنظم التفاضلي **تضخيم إشارات الضجيج** التي ترافق قيم الحساس المقاسة.

لاحظ الخطأ المتبقي لغياب المنظم التكاملي

# المنظم التناسبي التكاملي التفاضلي (PID) Regulator

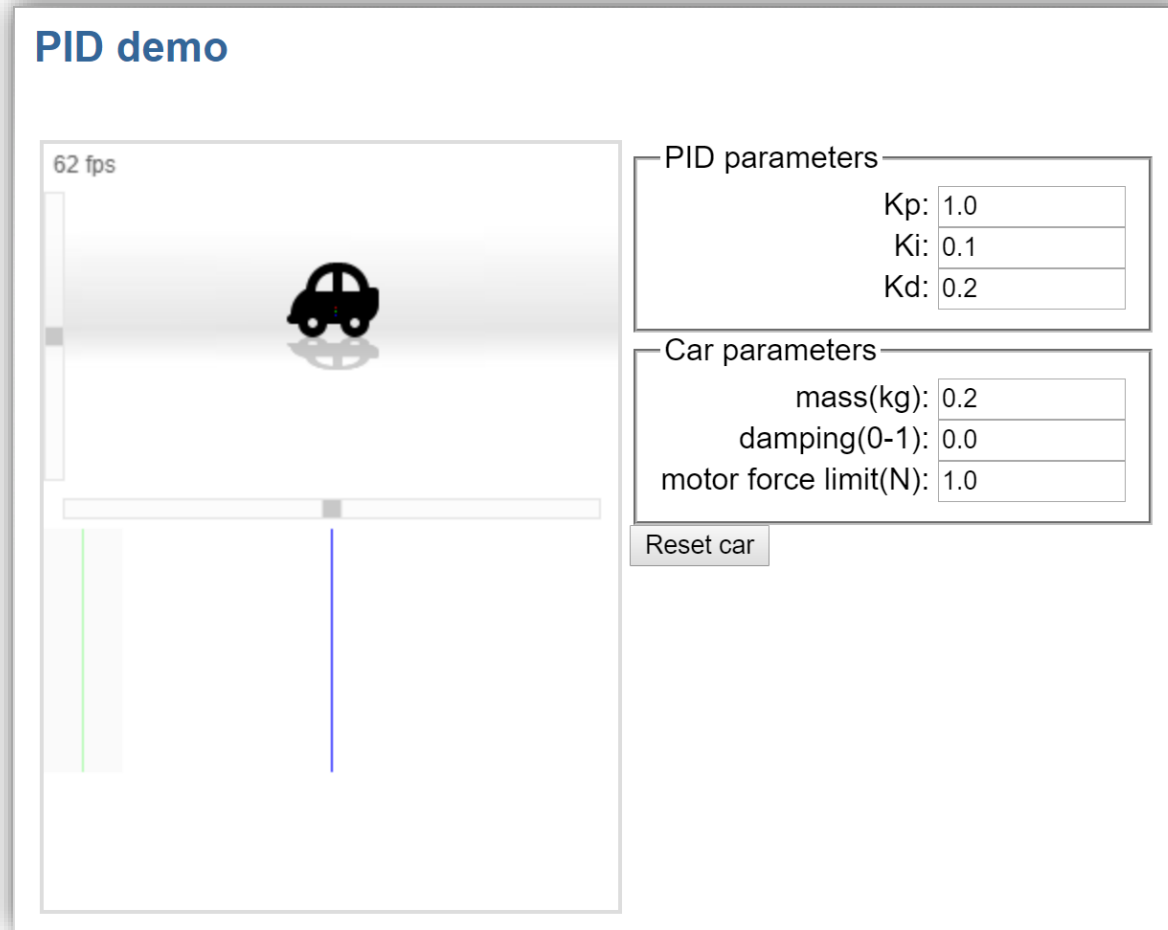


- يجمع هذا المنظم أفضل المزايا:
- الوصول السريع للقيمة المطلوبة باستخدام المنظم التناسبي.
- إزالة الخطأ المتبقي في الإشارة باستخدام المنظم التكاملي.
- القضاء على الاهتزازات وتجاوز الخرج overshoot باستخدام المنظم التفاضلي.
- أكثر المنظمات استخداماً في العالم الحقيقي. غالباً ما يتم استخدام عدة حلقات متداخلة من منظمات PI و PID.

$$u = K_p \left[ e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt + T_D \frac{de}{dt} \right] + u_0$$



# Proportional Integral Differential المنظم التناسبي التكاملي التفاضلي (PID) Regulator

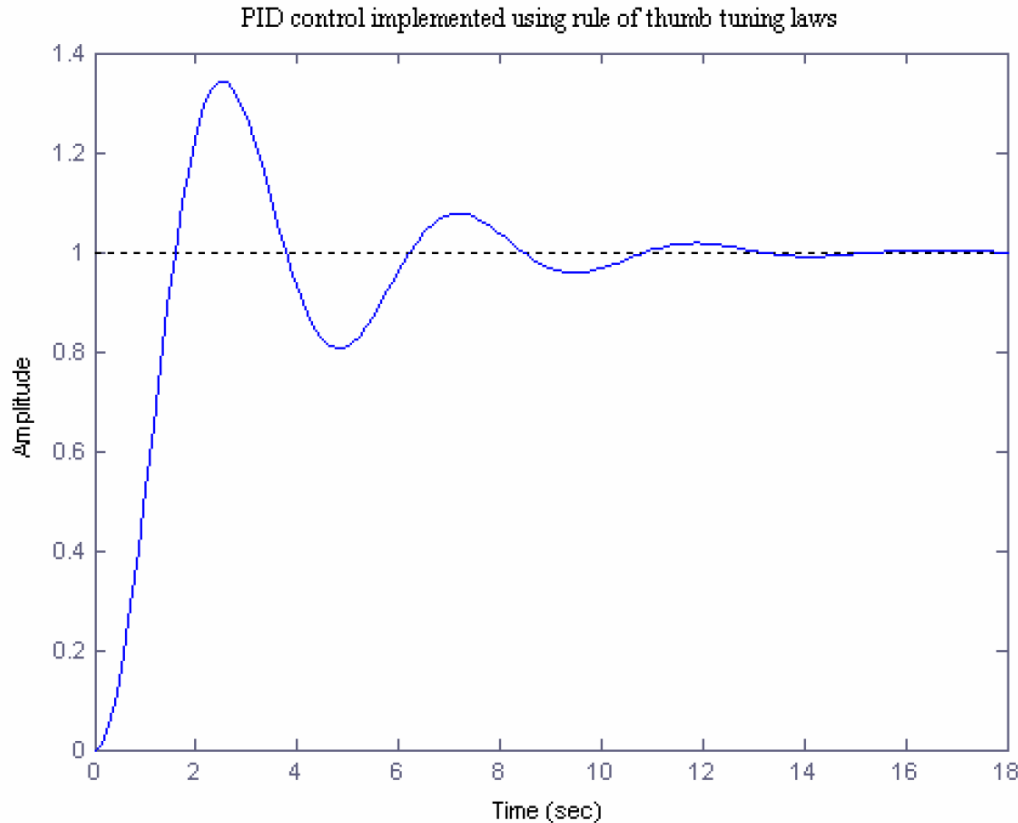


<https://sites.google.com/site/fpgaandco/pid>

# معايرة منظمات PID

## 1. المعايرة باستخدام القاعدة الشائعة Rule-of-Thumb Tuning

- قاعدة شائعة الاستخدام في الحياة العملية ولكنها غير خاضعة لأساس علمي متين.
- تحقق أداء مقبول بسهولة ولكن الخرج يستغرق وقت أكثر للاستقرار ويعاني من تجاوز إشارة overshoot وتأخير أكبر من طرق المعايرة ذات الحلقة المغلقة (4).



### طريقة المعايرة:

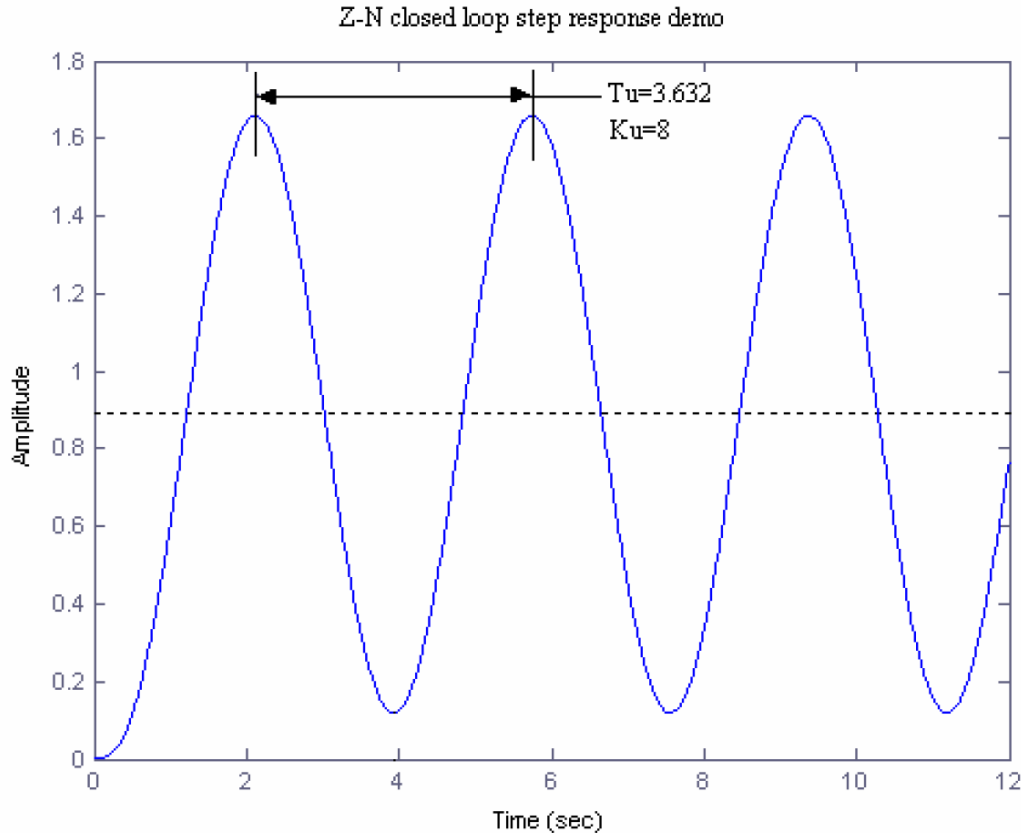
1. أوجد الربح النهائي للنظام  $(K)$  ultimate gain
2. أوجد الدور النهائي للنظام  $(T)$  ultimate period
3. استخدم الجدول التالي:

	$K_p$	$T_i$	$T_D$
PID	$0.5 \times K$	$0.8 \times T$	$0.1 \times T_i$

# معايرة منظمات PID

## 1. المعايرة باستخدام القاعدة الشائعة Rule-of-Thumb Tuning

- قاعدة شائعة الاستخدام في الحياة العملية ولكنها غير خاضعة لأساس علمي متين.
- تحقق أداء مقبول بسهولة ولكن الخرج يستغرق وقت أكثر للاستقرار ويعاني من تجاوز إشارة overshoot وتأخير أكبر من طرق المعايرة ذات الحلقة المغلقة (4).



### كيف توجد الربح والدور النهائيين؟

1. قم ببرمجة المتحكم وتوصيله مع المشغل والنظام.
2. أطفئ المنظم التكاملي – أي اجعل  $T_I \rightarrow \infty$  (أي قيمة كبيرة جداً).
3. أطفئ المنظم التفاضلي – أي اجعل  $T_D = 0$ .
4. قم بزيادة الثابت التناسبي  $K_p$  حتى تبدأ المنظومة بالاهتزاز.
5. عندما يحدث الاهتزاز يكون الربح هو الربح النهائي ودور الاهتزاز

هو الدور النهائي!

# معايرة منظمات PID

## 2. المعايرة اليدوية Empirical Tuning

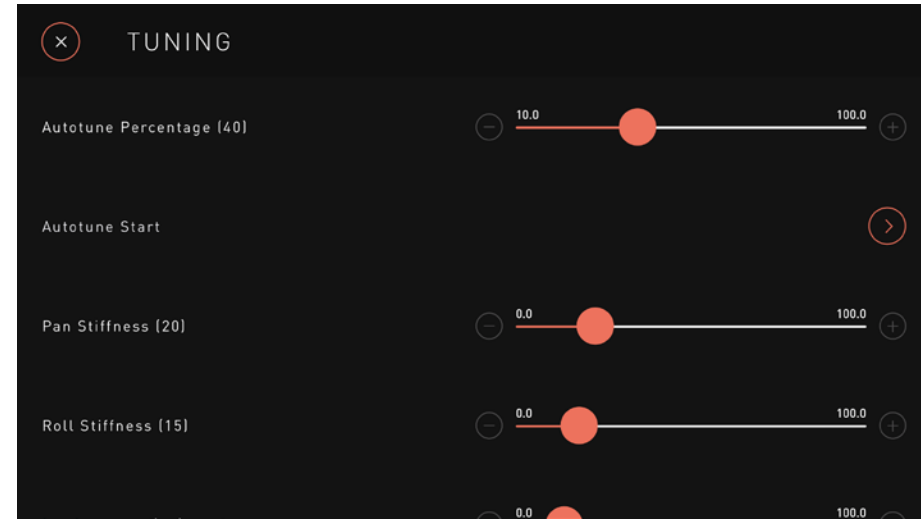
- نحتاج غالباً بعد المعايرة بالطريقة الشائعة (أو طرق أخرى) إلى معايرة يدوية بسيطة لتحسين الأداء.
- يجب البدء من قيم ثوابت معينة << الطريقة الشائعة نقطة بدء ممتازة.
- بعد ذلك نقوم بتغيير الثابت المطلوب بقيمة صغيرة لا تتجاوز 10% كل مرة ونراقب الأداء. يجب أن نتذكر أن تغيير ثابت معين غالباً ما يحل مشكلة ولكن يسبب مشاكل أخرى << نحاول الوصول إلى حل وسط

الأداء	التغيير	الأداء	التغيير
بطء في الاستجابة	زيادة الثابت التناسبي	يوجد اهتزاز ذو تردد منخفض ومطال منخفض على الخرج	انقاص الثابت التكاملي
تجاوز overshoot كبير	انقاص الثابت التناسبي و/أو زيادة التفاضلي	يوجد اهتزاز ذو تردد منخفض ومطال مرتفع على الخرج	انقاص الثابت التناسبي
يوجد خطأ متبقي دائماً	زيادة الثابت التكاملي	يوجد اهتزاز ذو تردد مرتفع (ضجيج) على الخرج	انقاص الثابت التفاضلي و/أو ترشيح إشارة الحساس و/أو زيادة دور التقطيع
الخرج يقفز بين قيمتين بسرعة	انقاص الثابت التناسبي	الخرج يصل إلى حالة إشباع (عدم استجابة)	انقاص الثابت التكاملي و/أو انقاص دور التقطيع

$\frac{1}{T_I}$

# معايرة منظمات PID

- في التطبيقات الحقيقية وخاصة الروبوتية – نستخدم أحياناً أوصاف مختلفة لبارامترات منظم PID تربطها بالخواص الفيزيائية للنظام << تسهل على المستخدم النهائي فهم تأثير هذه البارامترات.
- الثابت التناسبي لمنظم السرعة الزاوية يسمى أحياناً **الصلابة Stiffness**
- الثابت التناسبي لمنظم الزاوية يسمى أحياناً **قوة الثبات Hold strength**



# معايرة منظمات PID

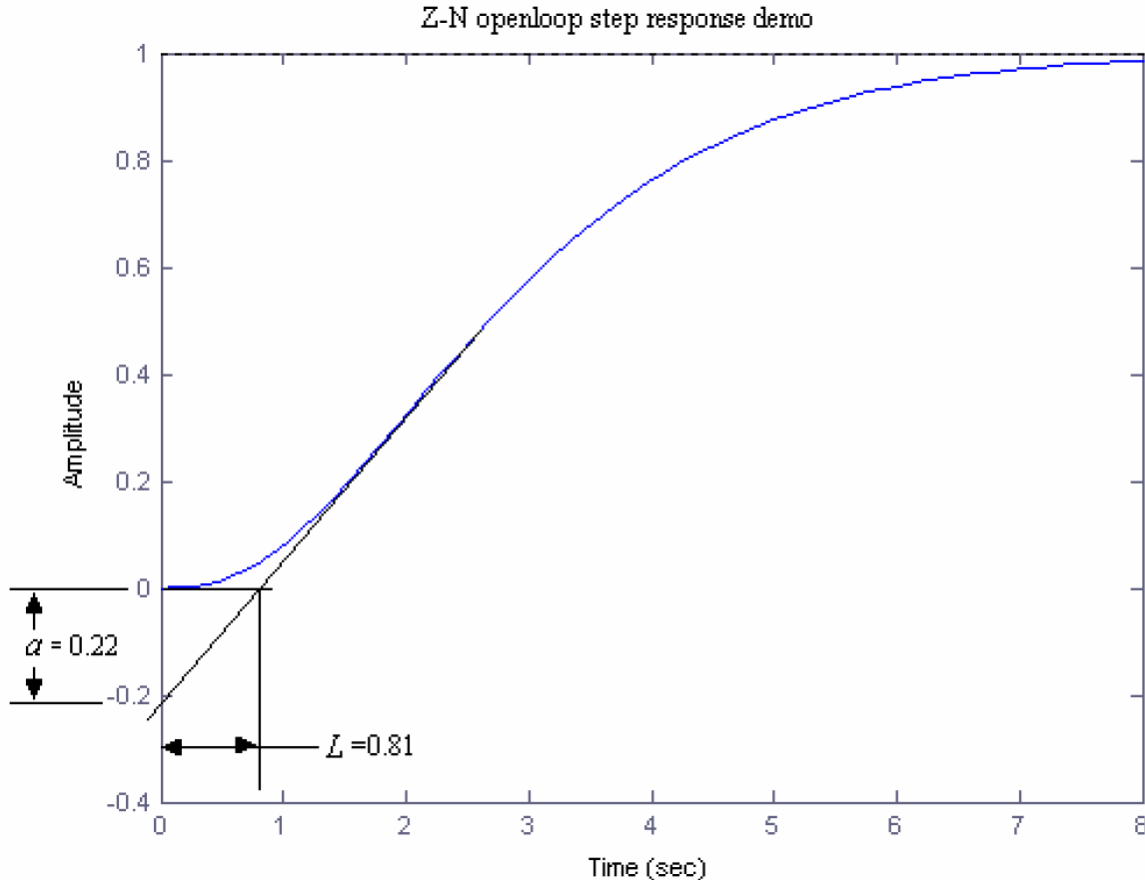
## 3. المعايرة باستخدام الثابت الزمني للحلقة المفتوحة Open-loop Timing (Ziegler-Nichols) Tuning

- تعرف بطريقة الحلقة المفتوحة أو طريقة الاستجابة للقفزة الواحدية step response.

### طريقة المعايرة:

1. طبق إشارة قفزة واحدية على النظام (بدون متحكم).
2. أوجد النقطة حيث يكون ميل الاستجابة أكبر ما يمكن (أي أقرب إلى المحور الشاقولي) وارسم مماس للمنحني.
3. نقطة تقاطع التماس مع المحور الشاقولي عند اللحظة 0 تمثل القيمتين  $\alpha$  و  $L$ .
4. استخدم الجدول التالي:

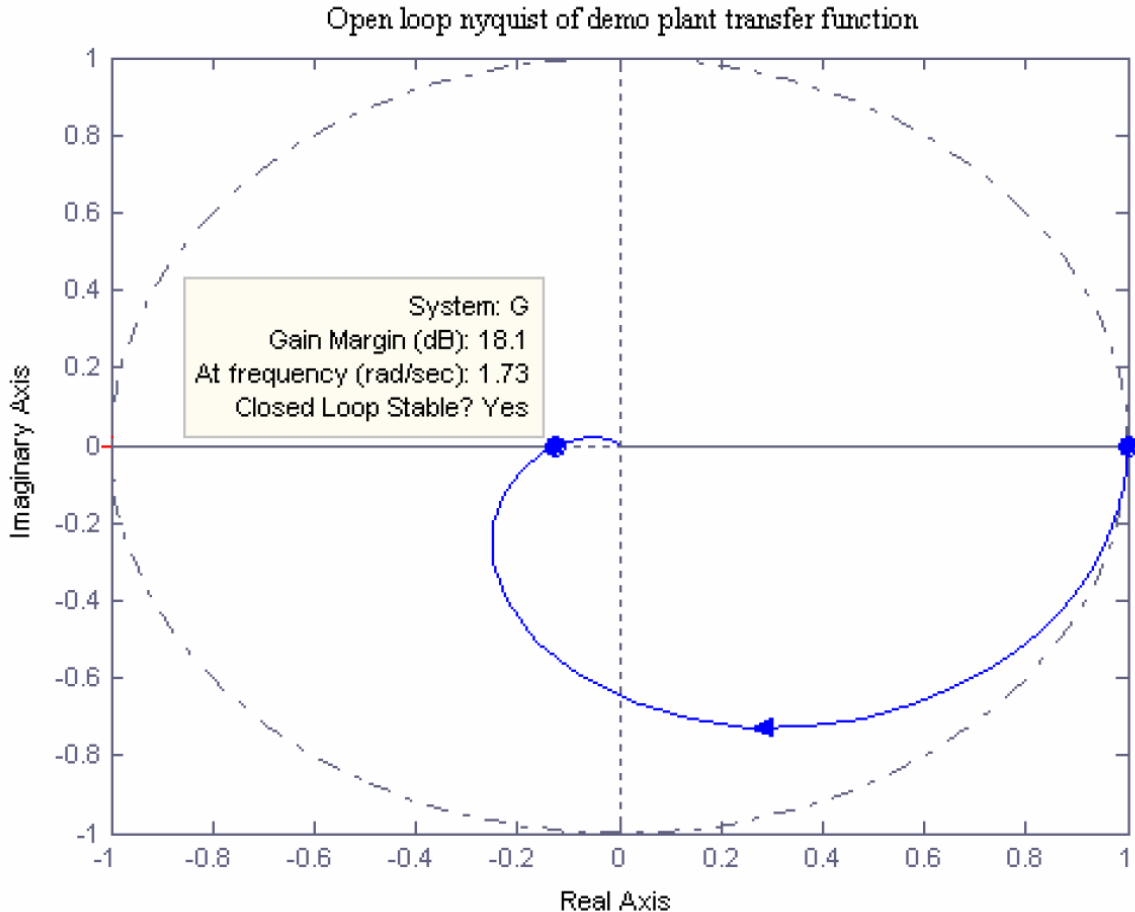
	$K_p$	$T_i$	$T_D$
P	$1/\alpha$		
PI	$0.9/\alpha$	$3 \times L$	
PID	$1.2/\alpha$	$2 \times L$	$L/2$



# معايرة منظمات PID

## 4. المعايرة باستخدام الثابت الزمني للحلقة المغلقة (أو الاستجابة الترددية) Closed-loop Timing (Frequency Response) (Ziegler-Nichols) Tuning

- تعتمد على نقطة تقاطع الاستجابة الترددية (منحنى نايكويسـت مع المحور التخيلي).



### طريقة المعايرة:

1. أوصل المتحكم مع النظام (حلقة مغلقة).
2. أوجد الربح النهائي للنظام  $(K)$  ultimate gain
3. أوجد الدور النهائي للنظام  $(T)$  ultimate period
4. استخدم الجدول التالي:

	$K_p$	$T_i$	$T_D$
P	$0.5 \times K$		
PI	$0.4 \times K$	$0.8 \times T$	
PID	$0.6 \times K$	$0.5 \times T$	$0.125 \times T$

# معايرة منظمات PID

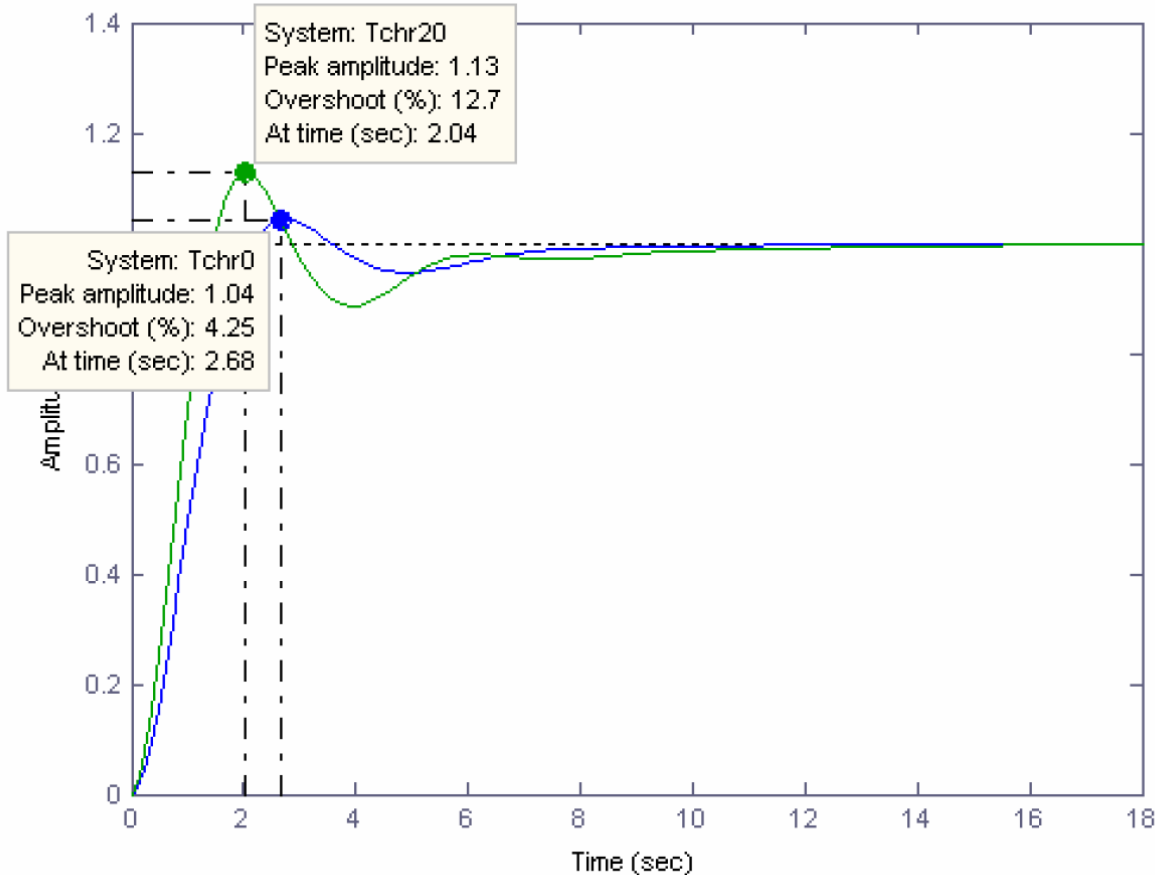
## 5. المعايرة بطريقة Chien, Hrones, and Reswick Tuning Method – CHR

- طريقة **حلقة مفتوحة** تعتمد على طريقة Ziegler-Nichols للحلقة المفتوحة وتسعى للحصول على أسرع استجابة بدون تجاوز وأسرع استجابة بتجاوز نسبته 20%..
- عملياً لا نحصل على قيم التجاوز نفسها ولكن قيم تقريبية.

### طريقة المعايرة:

1. طبق إشارة قفزة واحدة على النظام (بدون متحكم).
2. أوجد النقطة حيث يكون ميل الاستجابة أكبر ما يمكن (أي أقرب إلى المحور الشاقولي) وارسم مماس للمنحني.
3. نقطة تقاطع التماس مع المحور الشاقولي عند اللحظة 0 تمثل القيمتين  $\alpha$  و  $L$ .
4. أوجد الثابت الزمني لتابع النقل الخاص بالنظام  $T_u$  .. أي الزمن الذي تستغرقه الاستجابة للوصول إلى 63% من قيمتها النهائية.
5. استخدم الجداول التالية حسب نسبة التجاوز المطلوبة.

CHR step respses for PID controlled system at 0 and 20% O.S.





# معايرة منظمات PID

## 5. المعايرة بطريقة Chien, Hrones, and Reswick Tuning Method – CHR

- طريقة **حلقة مفتوحة** تعتمد على طريقة Ziegler-Nichols للحلقة المفتوحة وتسعى للحصول على أسرع استجابة بدون تجاوز وأسرع استجابة بتجاوز نسبته 20%.

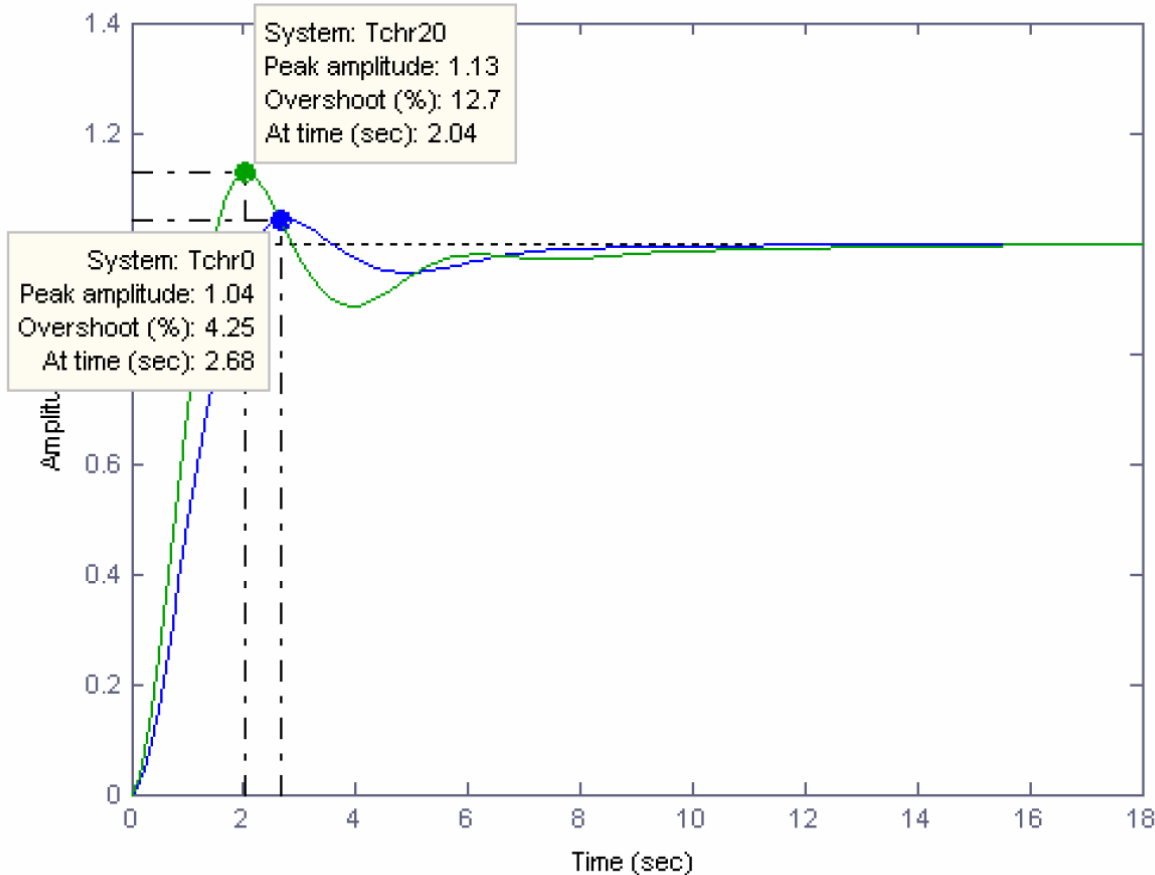
تجاوز (overshoot) بنسبة 0%:

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.3/\alpha$		
PI	$0.35/\alpha$	$1.2 \times T_u$	
PID	$0.6/\alpha$	$T_u$	$0.5/L$

تجاوز (overshoot) بنسبة 20%:

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.7/\alpha$		
PI	$0.6/\alpha$	$T_u$	
PID	$0.95/\alpha$	$1.4 \times T_u$	$0.47/L$

CHR step respses for PID controlled system at 0 and 20% O.S.

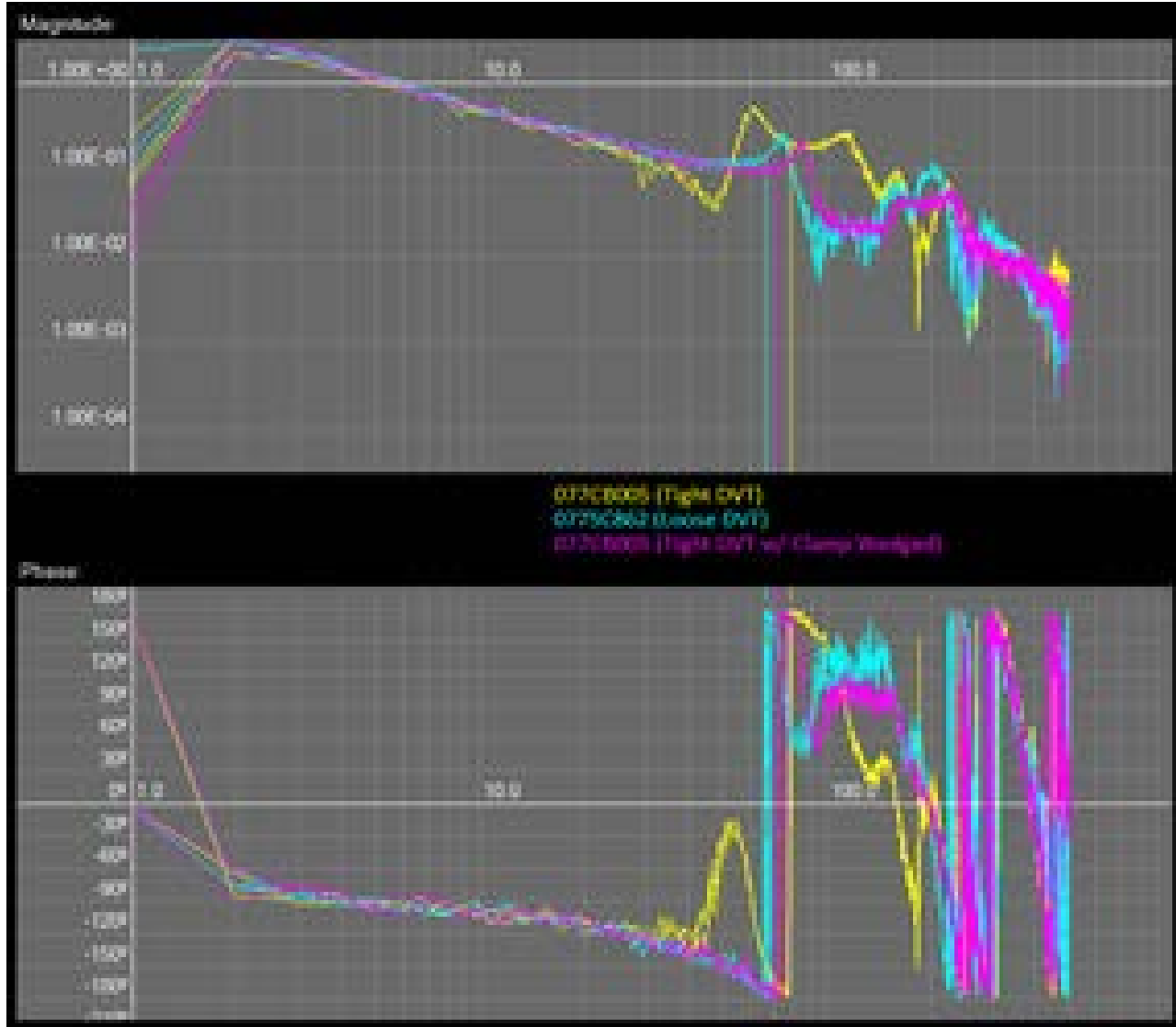


# معايرة منظمات PID

- هناك طرق أخرى للمعايرة أكثر تعقيداً:

- باستخدام المتحكمات التكيفية مثل طريقة **Model Reference Adaptive Controller** (MRAC) حيث نقوم بمقارنة النظام مع نظام آخر معروف واستنتاج بارامترات المنظم.
- عن طريق التعرف على النظام **system identification**. حيث نقوم بحقن إشارة ضجيج أبيض شبه عشوائي **pseudo random white noise** – ومن ثم إيجاد الاستجابة الترددية **frequency response** وحساب بارامترات المنظم التي تحقق أكبر مجال ربح **gain margin**.
- ...

# معايرة منظمات PID



- مثال عن الاستجابة الترددية لنظام ميكانيكي.
- لاحظ كيف تنعكس زاوية الاستجابة 180 درجة عند تردد معين.. هذا هو التردد الذي يفقد النظام عنده الاستقرار. أي هذا هو التردد الأعظمي لحلقة التحكم لهذا النظام.

# حلقات التحكم المتداخلة Nested PID Loops

• معظم التطبيقات الحقيقية عبارة عن عدة حلقات تحكم/تنظيم متداخلة مع بعضها البعض. حيث يكون خرج المنظم الأول قيمة مرجعية للمنظم الثاني وهكذا.. على سبيل المثال:

■ في محركات السيرفو، قد نستخدم ثلاث حلقات متداخلة:

1. **حلقة تيار داخلية** تتحكم بتيار المحرك والتالي العزم المطبق.
2. **حلقة سرعة وسطى** تتحكم بسرعة دوران المحرك. خرج منظم السرعة هو القيمة المرجعية للتيار.
3. **حلقة موضع خارجية** تتحكم بزاوية المحرك. خرج منظم الزاوية هو القيمة المرجعية للسرعة.

