قسم الميكاترونيكس

عميد الكلية
د. إياد حاتم

المحاضرة الخامسة

النماذج الصناعية لنظم التحكم والمبادئ الأساسية لنظم التحكم ذات التغذية الخلفية

نظم تحكم

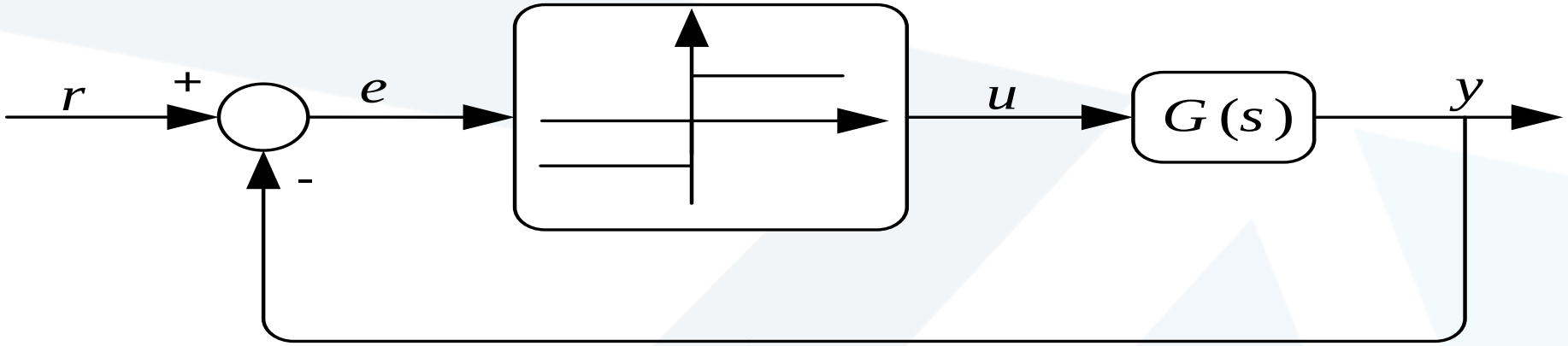
د.بلال شيحا

- أنماط التحكم الأساسية
- أغراض التحكم
- خصائص نظام التغذية الخلفية

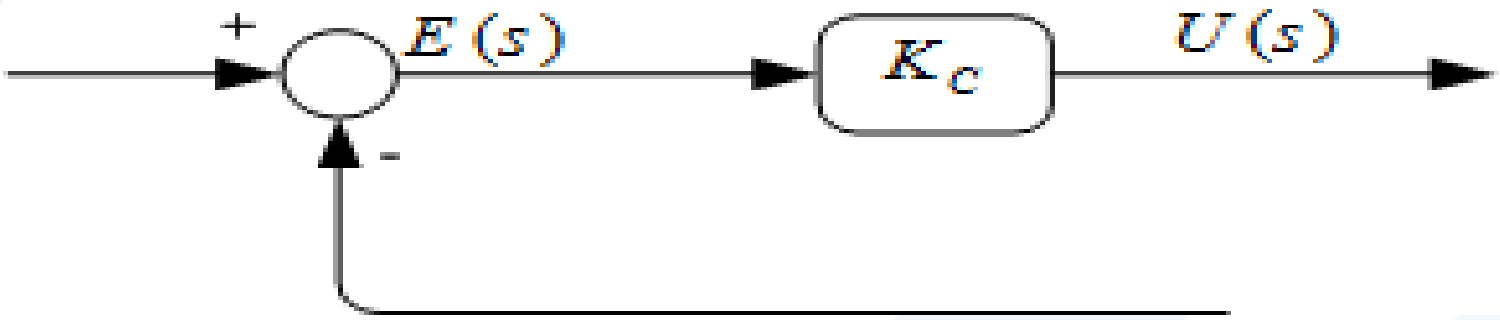
أنماط التحكم الأساسية

- التحكم فتح/إغلاق On-off.
- التحكم التناسبي Proportional.
- التحكم التكاملي Integral.
- التحكم التفاضلي Derivative.
- التحكم التناسبي-التكاملي-التفاضلي PID

التحكم فتح/إغلاق On-off.



التحكم التناسبي Proportional



(a)تحكم تناسبي

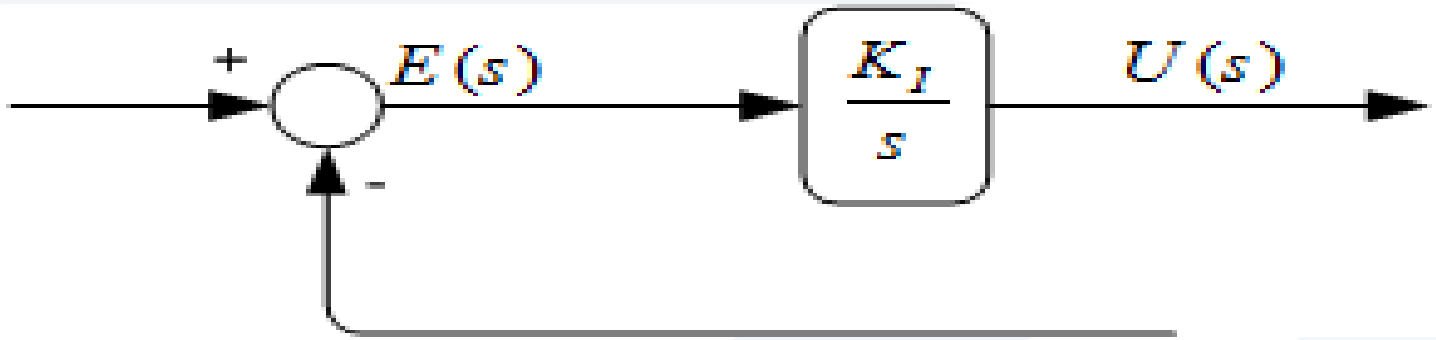
$$u(t) = K_C e(t)$$

$$U(s) = K_C E(s)$$

- حيث K_C هو ربح المتحكم.

التحكم التكاملي Integral

- نمط التحكم التكاملي(reset control)



(b)تحكم تكاملي

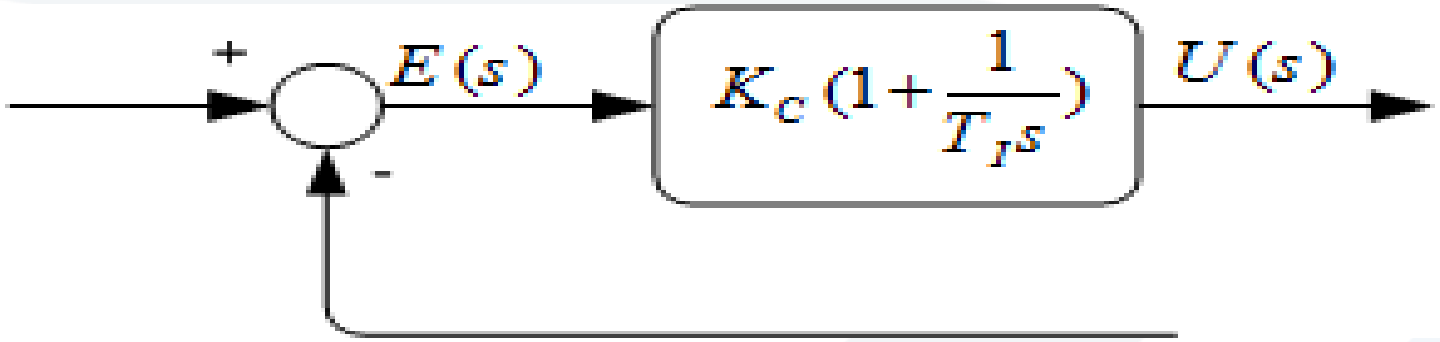
$$u(t) = K_I \int_0^t e(t)dt$$

$$U(s) = \frac{K_I}{s} E(s)$$

- حيث K_I هو ربح التكامل.

التحكم التناسبي-التكاملي PI

- اتحاد النمط التناسبي مع النمط التكاملي PI



(c) تحكم PI

$$U(s) = K_C E(s) + \frac{K_I}{s} E(s)$$

$$= K_C (1 + \frac{1}{T_I s}) E(s)$$

$$u(t) = K_C [e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt]$$

التحكم التفاضلي Derivative

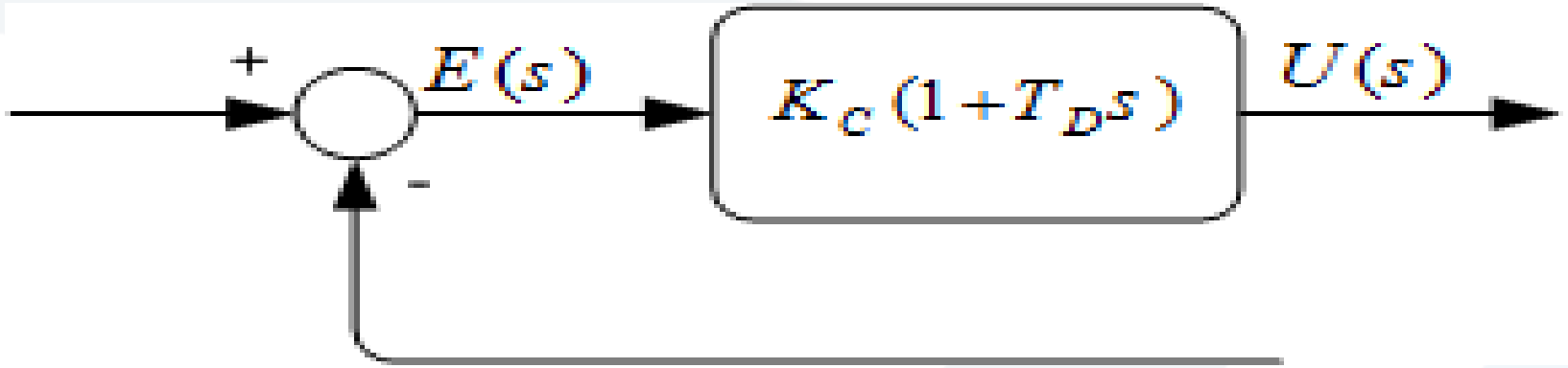
- التحكم التفاضلي(rate control)

$$u(t) = K_D \frac{d}{dt} e(t)$$

$$U(s) = K_D s E(s)$$

- حيث K_D هو الربح التفاضلي.
- ولا يُستخدم نمط التحكم التفاضلي عادةً لوحده وذلك لأنّ التحكم في هذا النمط لا يولّد جهداً تصحيحياً لأي خطأ ثابت.
- ويشكّل PD:

التحكم التناسبي-التفاضلي PD



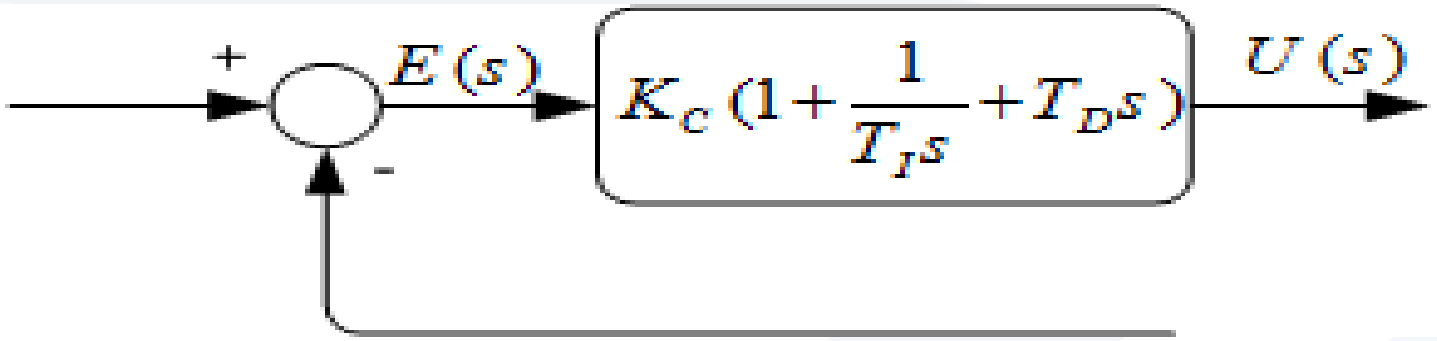
(d) تحكم PD

$$U(s) = K_C E(s) + K_D s E(s)$$
$$= K_C (1 + T_D s) E(s)$$

$$u(t) = K_C [e(t) + T_D \frac{d}{dt} e(t)]$$

حيث T_D هو زمن التفاضل أو زمن المعدِّل.

التحكم التناسبي-التكاملي-التفاضلي PID

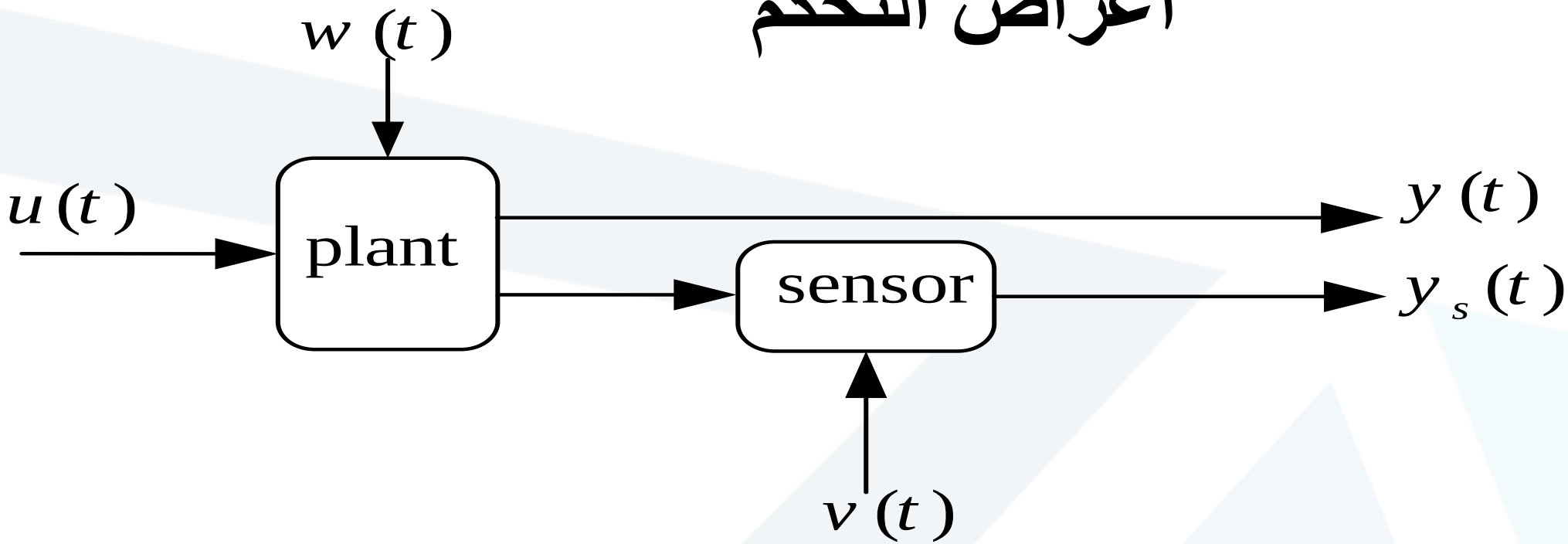


(e) تحكم PID

$$U(s) = K_C\left(1+\frac{1}{T_I s}+T_D s\right)E(s)$$

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

أغراض التحكم



- وهدف التحكم هو إجبار المتغير المتحكم به في الوصول إلى القيمة المطلوبة بسرعة والبقاء عندها بعد فترة عابرة صغيرة؛
- و هو زمن الاستقرار settling time.
- steady state accuracy مهمة في نظم التحكم.

أغراض التحكم

عند تصميم نظم التحكم يجب الأخذ بعين الاعتبار المفاهيم التالية:

- الاستقرار stability
- محددات مطال الدخل Input Amplitude constrains
- رفض الاضطراب Disturbance Rejection
- ترشيح التشويش Noise Filtering
- الحساسية و الصلادة Sensitivity and Robustness

الاستقرار stability

- الاستقرار في نظام ما يتضمن التغيرات الصغيرة في المداخل المرجعية ومداخل التشويش والشروط الابتدائية والتي لا تؤدي إلى تغيرات كبيرة في خرج النظام، وإنّ الاستقرار خاصية مهمة جداً في نظم التحكم. أغلب النظم تُصمم لتعمل بشكل مستقر والمطلوب تحسين الاستجابة ودقة الحالة الثابتة مع الأخذ بعين الاعتبار محددات الاستقرار.
- تميل نظم التحكم ذات التغذية الخلفية لعدم الاستقرار حيث أنّه من أجل منشأة مستقرة فإنّ نظام الحلقة المغلقة يمكن أن لا يكون دائماً مستقر وبالتالي يتطلب تصميم نظام تحكم ما الموازنة بين تحقيق أغراض التحكم من جهة وبين الاستقرار من جهة أخرى.

محددات مطال الدخل

Input Amplitude constrains

- في نظم التحكم المصممة وفق مبادئ النظرية الخطية فإنّ الأجهزة المستخدمة تعمل بشكل خطي تحت ظروف التشغيل المختلفة، غير أنّه وفق ظروف تشغيل معينة يمكن أنّ تنتقل الأجهزة المستخدمة للعمل في منطقة المميزات غير الخطية عندئذٍ فإنّ التصميم وفق النظرية الخطية يصبح تقريبي وغير دقيق أي يُعطي توقعات خاطئة عن أداء النظام. زيادة كبيرة في مطال الإشارات عند سويات مختلفة لنظام التحكم يمكن أن تقود الأجهزة المكونة له إلى منطقة العمل اللاخطية ويحدث هذا في :
- منحيات خواص عزم_سرعة للمحركات وفي الصمامات المستخدمة في عملية التحكم وفي المضخمات وفي المسننات.....
- وبالتالي يتم فرض قيود على مجال القيم العليا.

رفض الاضطراب
Disturbance Rejection

- الاضطرابات الخارجية تؤثر على المنشأة بطريقة غير قابلة للتنبؤ وهي تغيرات غير متحكم بها على حمولة النظام. ففي نظم التحكم بالحركات الميكانيكية يمكن أن تمثل اضطرابات الحمولة بقوى الرياح على الهوائي المستقر أو بتموجات السفينة بينما في نظم تنظيم الجهد تشكل تغيرات الحمولة الكهربائية مصدر رئيسي للاضطرابات. وفي النظم الحرارية تحدث اضطرابات الحمولة عن طريق تغيرات الحرارة المحيطة. في نظم السوائل يمكن أن تنتج اضطرابات الحمولة من تغيرات تدفق التغذية أو من تغيرات التدفق المطلوب. بشكل عام تغيرات اضطرابات الحمولة تكون بطيئة والأخطاء الناتجة عنها يتم تصحيحها بتصميم مناسب لتحكم التغذية الخلفية.

ترشيح التشويش
Noise Filtering

- تكون إشارات خطأ القياس ذات تردد عالي (تشويش المراقبة) وتؤثر على المنشأة بطريقة غير متنبأ بها. في نظم التحكم بالحركات الميكانيكية يمكن أن تقود التغيرات الميكانيكية إلى مركبات تردد عالي في إشارات خرج حساسات الموضع والسرعة، وإنّ استمرار تحريك السوائل في الحوض يعطي تشويش في إشارة خرج حساس درجة الحرارة (الترموكابل أو أي حساس آخر). يعتمد التحكم ذو التغذية الخلفية على القياسات الدقيقة للمتغيرات المتحكم بها لأنّ فعل التغذية الخلفية يقدم تصحيح قليل لأخطاء المعلومات القادمة عن طريق الحساسات ولذلك لتقليل تأثير هذا التشويش نستخدم الترشيح في التجهيزات.

الحساسية و الصلادة
Sensitivity and Robustness

- ترتبط الصلادة بتصميم نظام التحكم وسوف نناقش هنا باختصار مشهدين لمسألة الصلادة.
- الأول نتيجة أنّ كل نظام تحكم يصمم اعتماداً على نموذج المنشأة التقريبي، حيث أنّ نجاح التطبيق التحليلي للتصميم يعتمد بشكل كبير على بساطة النموذج الرياضي. نلجأ إلى العديد من الافتراضات المثالية التي تقود إلى عدم الدقة ليس فقط في بارامترات النموذج وإنما أيضاً في بنية النموذج. إنّ استخدام نموذج خطي لعملية لاخطية هو مثال للانحراف في بنية النموذج، وهناك مثال آخر هو حذف أزمنة تأخير معينة من أجل الحصول على نموذج ذي درجة أقل.

الحساسية و الصلادة
Sensitivity and Robustness

- ويظهر المشهد الثاني في أنّ التصميم يعتمد على نموذج يصف العديد من الخواص الاسمية للمنشأة غير أنّ هذه الخواص تختلف عن الخواص الفيزيائية للنظام عند عمل المنشأة المتحكم بها وذلك نتيجة التأثيرات المحيطية من تآكل wear وصدأ aging وعوامل طبيعية أخرى.

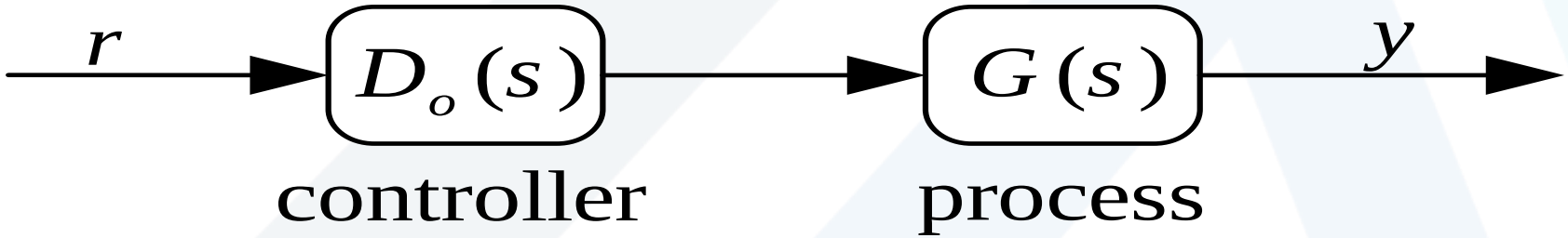
خصائص نظام التغذية الخلفية

- حساسية النظام System Sensitivity
- رفض الاضطراب Disturbance Rejection
- تشكيل الاستجابة الديناميكية Shaping the Dynamic Response
- دقة الحالة الثابتة Steady State Accuracy

حساسية النظام
System Sensitivity

- لنفرض نظام تحكم ذو حلقة مفتوحة:

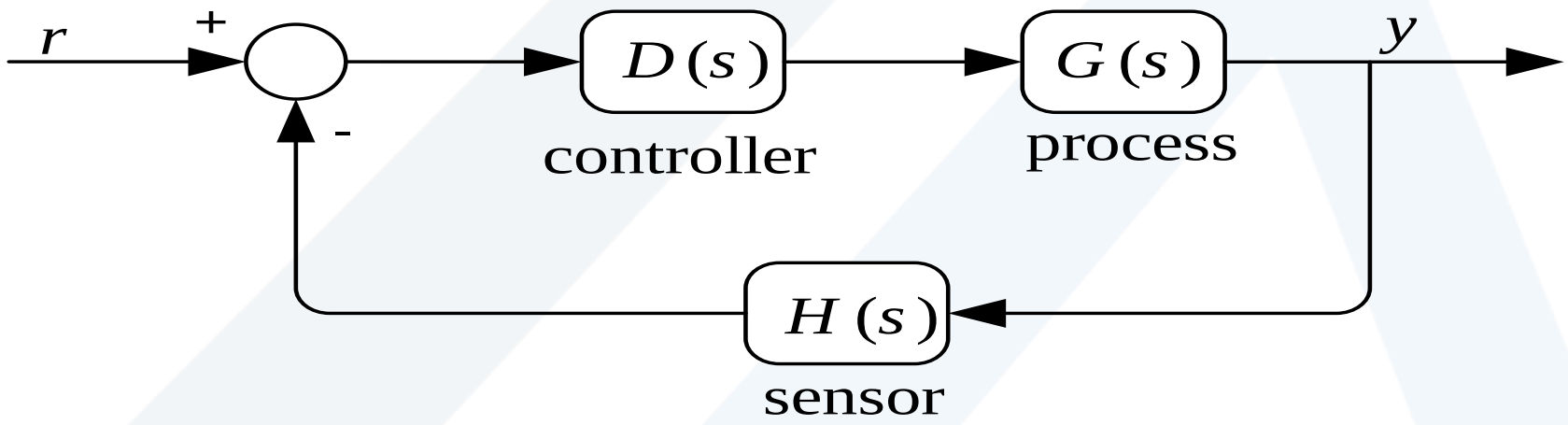
عند تصميم D_o على أساس نموذج دالة الانتقال المعطاة للعملية و ذلك لمقابلة المواصفات على خرج النظام فإنّ خرج العملية يقترب من القيمة المرغوبة فقط إذا اقترب السلوك الديناميكي للعملية الحقيقية من نموذجها. إنّ التقريب عند النمذجة بالإضافة إلى تغيرات سلوك العملية مع الزمن خلال العمل يؤديان إلى خرج غير دقيق. وفي هذا النوع من النظم لا توجد آلية لتصحيح الخرج.



حساسية النظام
System Sensitivity

- ففي نظام التحكم ذو الحلقة المغلقة:

وتُعطي إشارة التغذية الخلفية هذا النظام مقدرة على تنفيذ آلية تصحيح ذاتية. وتتبع الحساسية بشكل مباشر الدالة ***H(s)*** ولذلك فإنّ التغيرات في هذه الدالة يؤثر على خرج النظام ومن أجل تجاوز هذه المشكلة يتم بشكل عام استخدام حساس بمكونات مستقرة وبنوعية عالية. ويشكّل استخدام التغذية الخلفية في التقليل من حساسية تغيرات البارامترات ميزة مهمة لهذه النظم.

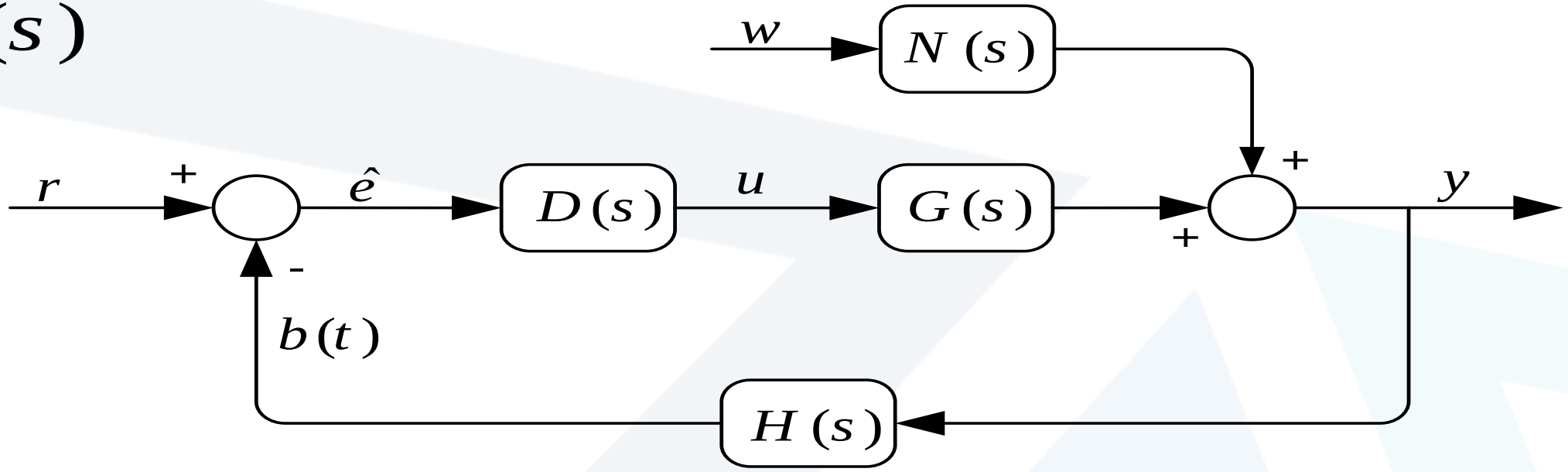


حساسية النظام
System Sensitivity

- من أجل الحصول على دقة عالية في نظم التحكم ذات الحلقة المفتوحة يجب اختيار مكونات النظام بحرص بحيث أنّ بارامترات النظام الفيزيائي تقترب من الدالة ***G(s)*** (النموذج المستخدم في التصميم) تحت كافة شروط التشغيل. ومن جهة أخرى في نظم التحكم ذات الحلقة المغلقة يُسمح بأن تكون الدالة ***G(s)*** أقل دقة بحيث أنّ التأثيرات الناتجة عن التغير في البارامترات يمكن حذفها باستخدام التغذية الخلفية. في نظم التحكم ذات الحلقة المغلقة يجب اختيار مكونات حساس التغذية الخلفية بحرص مما يؤدي إلى تقليل تكلفة ***G(s)*** نظراً لأنّ المنشأة تتكوّن من عناصر قدرة عالية بينما الحساس يتكوّن من عناصر قياس تعمل عند سويّات طاقة منخفضة.

رفض الاضطراب
Disturbance Rejection

$W(s)$



$$Y(s) = \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)H(s)} R(s) + \frac{N(s)}{1 + D(s)G(s)H(s)} W(s)$$

$$R(s) = 0 \Rightarrow Y(s) = \frac{N(s)}{1 + D(s)G(s)H(s)} W(s)$$

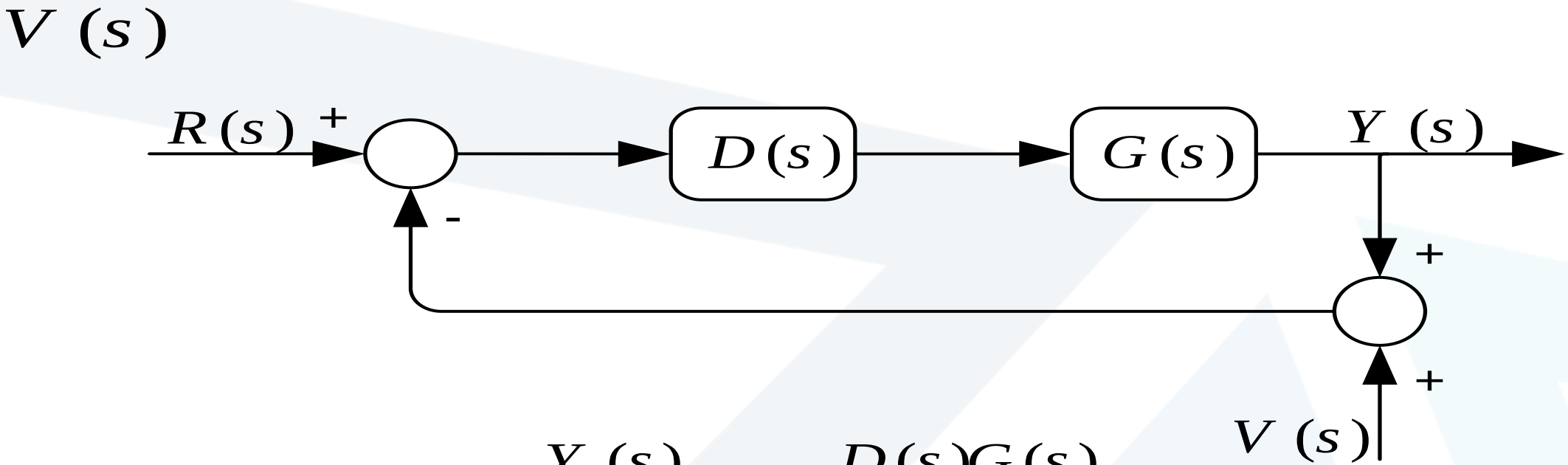
$open \quad loop$

$$Y(s) = N(s)W(s)$$

رفض الاضطراب
Disturbance Rejection

- من السهولة استنتاج أنّ التغذية الخلفية تقلل من تأثير الاضطراب على الخرج المتحكم به، ويحدث هذا عندما تكون $N(s)$ صغيرة غير أنّه لا يمكن تعديلها لأنّها دالة في بارامترات المنشأة. وأيضاً يمكن التقليل من تأثير الاضطراب بزيادة ربح الحلقة ويحدث هذا إما بزيادة ربح المنشأة $G(s)$ أو بزيادة ربح $D(s)$ ، لكن زيادة ربح المنشأة يزيد أيضاً ربح $N(s)$ وبالتالي في هذه الحالة يمكن أن لا يُحسّن رفض التشويش. وهكذا لرفض تشويش يجب زيادة ربح الحلقة بأي أسلوب بحيث أنّ الربح من دخل الاضطراب إلى خرج النظام لا يزداد.
- ويبيّن المخطط الصندوقي التالي موقع تشويش القياس $V(s)$ في نظام التحكم ذو الحلقة المغلقة. دالة انتقال الحلقة المغلقة لهذا الاضطراب هي:

رفض الاضطراب
Disturbance Rejection



$$\frac{Y(s)}{V(s)} = -\frac{D(s)G(s)}{1+D(s)G(s)}$$

رفض الاضطراب
Disturbance Rejection

$$\frac{Y(s)}{V(s)} = -\frac{D(s)G(s)}{1+D(s)G(s)}$$

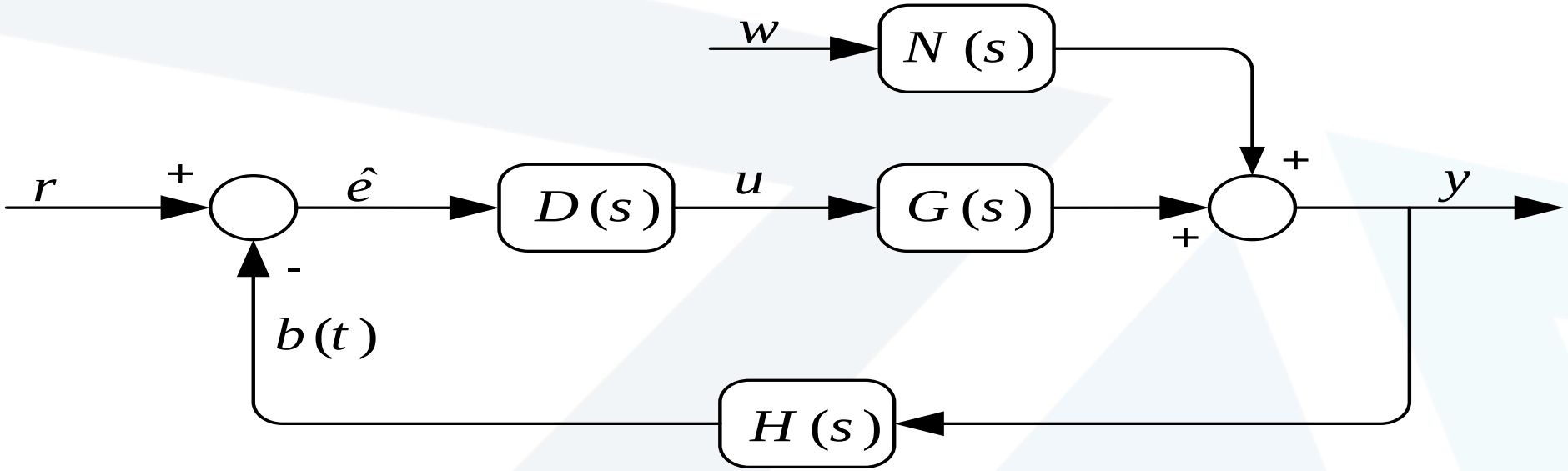
- وبالتالي ينتقل تشويش القياس إلى الخرج طالما أنّ ربح الحلقة يكون

$$|D(s)G(s)| > 1$$

- أي أنّ ربح حلقة كبير سيقود إلى خطأ خرج كبير ناتج من تشويش القياس. وبما أنّه في خاصية رفض الاضطراب نحتاج إلى ربح حلقة كبير لذلك ولتجاوز هذا التداخل نلجأ إلى أجهزة قياس مناسبة ومع تعديل مناسب للترشيح.

تشكيل الاستجابة الديناميكية
Shaping the Dynamic Response

- في نظام التحكم ذو الحلقة المغلقة



- عندما

$$W(s) = 0 \Rightarrow$$

- يكون الخرج

$$Y(s) = \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)H(s)} R(s) = M(s)R(s)$$

تشكيل الاستجابة الديناميكية
Shaping the Dynamic Response

- عند إيجاد الأقطاب والأصفار يمكننا التعرّف على سلوك استجابة نظام التحكم ذو الحلقة المغلقة من أجل دخل مرجعي.

$$\frac{D_1(s)}{D_2(s)} \triangleq D(s), \quad \frac{G_1(s)}{G_2(s)} \triangleq G(s), \quad \frac{H_1(s)}{H_2(s)} \triangleq H(s)$$

$$\Rightarrow M(s) = \frac{D_1(s)G_1(s)H_2(s)}{D_2(s)G_2(s)H_2(s) + D_1(s)G_1(s)H_1(s)}$$

$$D_2(s)G_2(s)H_2(s) + D_1(s)G_1(s)H_1(s) = 0$$

- يمكن تشكيل الاستجابة الديناميكية لنظام الحلقة المغلقة بالتحكم بمواقع أقطاب وأصفار ***M(s)*** من خلال المتحكم ***D(s)*** .

تشكيل الاستجابة الديناميكية
Shaping the Dynamic Response

- إنّ الاستجابة الكلية لنظام حلقة مغلقة من أجل الدخلين المرجعي والاضطراب هي:

$$Y(s) = \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)H(s)} R(s) + \frac{N(s)}{1 + D(s)G(s)H(s)} W(s)$$
$$= M(s)R(s) + M_w(s)W(s)$$

- إنّ مقامات ***M*** و ***Mw*** متماثلة وهذا يعني أنّ لدالتي الانتقال نفس الأقطاب. والأصفار مختلفة وهذا الاختلاف مطلوب لأنّه بالتأكيد لا نريد أن يستجيب النظام لمداخل التشويش بنفس الطريقة التي يستجيب للمداخل المرجعية.

$$D_o(s) = \frac{1}{G(s)}$$

تشكيل الاستجابة الديناميكية
Shaping the Dynamic Response

- يمكن بسهولة لنظام الحلقة المفتوحة أن يقوم بتشكيل ديناميكيات الخرج المتحكم به حيث أنّ الخرج يتبع الدخل بالضبط إذا كان:

$$D_o(s) = \frac{1}{G(s)}$$

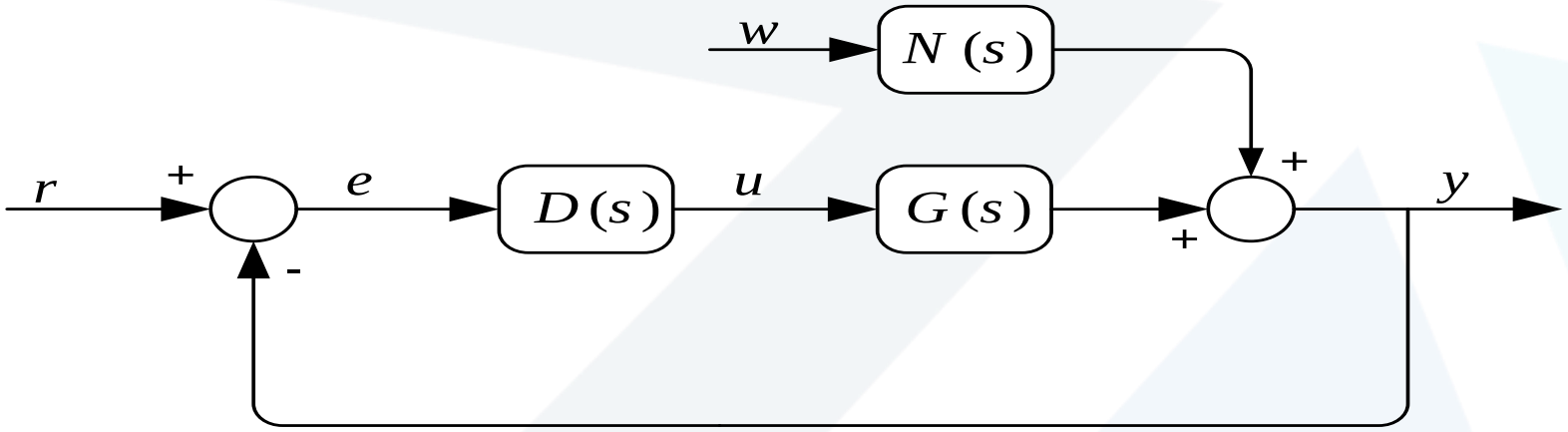
- إذا كان D_o قابلاً للتحقيق (هذا يعني إمكانية بناء نظام فيزيائي بدالة انتقال D_o)، من الممكن حذف ديناميكيات العملية بالكامل في هذه الحالة ويمكن عندها طرح السؤال التالي ما هي ميزة نظام التغذية الخلفية في هذه الحالة؟

تشكيل الاستجابة الديناميكية
Shaping the Dynamic Response

- ففي حالة نظام الحلقة المفتوحة وعند التمكن من إيجاد D_o الذي يساوي مقلوب دالة انتقال $G(s)$ فإنّ الدالة $G(s)\ D_o\ (s)$ سوف تختلف عن الواحد نتيجةً لتغير بارامترات $G(s)$ خلال عمل النظام وأيضاً نتيجةً لفعل تشويش البيئة الخارجية على العملية $G(s)$ مما يؤدي إلى انحراف الخرج y عن الدخل r.
- غير أنّه في نظام الحلقة المغلقة يتم مراقبة الخرج بشكل مستمر وبالتالي إعطاء إشارة مشغلة تقلل من تأثير تغيرات البارامتر والتشويش مما يشجع على استخدام التغذية الخلفية

دقة الحالة الثابتة
Steady State Accuracy

- وسوف نقوم بمقارنة خطأ الحالة الثابتة النهائي من أجل نظام الحلقة المفتوحة ونظام الحلقة المغلقة.



$$W(s)=0 \Rightarrow E(s)=\frac{1}{1+D(s)G(s)}R(s)$$

دقة الحالة الثابتة
Steady State Accuracy

$$e_{ss} = \lim_{t \to \infty}[r(t) - y(t)] = \lim_{s \to 0} sE(s)$$

$$R(s) = \frac{1}{s} \Rightarrow$$

$$e_{ss} = \lim_{s \to 0} s \left[\frac{1}{1 + D(s)G(s)} \right] \frac{1}{s}$$

$$= \frac{1}{1 + D(0)G(0)}$$

- قيمة الدالة $D(0)G(0)$ عندما $s=0$ تُدعى ربح الحلقة المستمر dc loop gain، وبالتالي عندما يكون لنظام الحلقة المغلقة ربح حلقة مستمر كبير بشكل معقول فإنّ خطأ الحالة الثابتة يكون صغيراً.

دقة الحالة الثابتة
Steady State Accuracy

- الحلقة المفتوحة:

$$E(s) = R(s) - Y(s) = [1 - D_0(s)G(s)]R(s)$$

$$R(s) = \frac{1}{s} \Rightarrow$$

$$e_{ss} = \lim_{s \to 0} sE(s) = 1 - D_0(0)G(0)$$

دقة الحالة الثابتة
Steady State Accuracy

- من المعادلة السابقة يمكن ملاحظة أنّه من أجل نظام التحكم ذو الحلقة المفتوحة يمكن الوصول إلى خطأ حالة ثابتة صفري عن طريق ضبط ربح الحلقة المستمر بحيث يكون

$$D_0(0)G(0)=1$$

- غير أنّه خلال عمل النظام حتماً ستتغير بارامترات الدالة ***G(s)*** وبالتالي يصبح ربح الحلقة المستمر مختلفاً عن الواحد وعندها سيكون خطأ الحالة الثابتة مختلفاً عن الصفر حتى إعادة معايرة النظام من جديد.
- بالمقابل فإنّ نظام الحلقة المغلقة يراقب خطأ الحالة الثابتة بشكل مستمر ويعطي إشارة مشغّلة تعمل على تقليله.