



المملكة العربية السعودية  
المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني  
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

## الكليات التقنية

الحقيبة التدريبية:

# تقنية التحكم الآلي ( نظري )

في تخصصات

الآلات والمعدات الكهربائية

والقوى الكهربائية ومشغل لوحة التحكم





## مقدمة

الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد بن عبدالله وعلى آله وصحبه، وبعد:

تسعى المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على الله ثم على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التتموي: لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " تقنية التحكم الآلي - نظري " لمتدربي تخصصات "الألات والمعدات الكهربائية والقوى الكهربائية ومشغل لوحة التحكم" للكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، مدعم بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه؛ إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج



## الفهرس

رقم الصفحة	الموضوع
٨	الوحدة الأولى: أساسيات نظم التحكم
١٠	١-١ مقدمة
١١	٢-١ المكونات الأساسية لنظم التحكم
١٣	٣-١ أمثلة توضيحية لأنظمة التحكم
١٣	1-3-1 التحكم اليدوي لنظام حراري
١٤	1-3-1 التحكم الآلي لنظام حراري
١٥	1-3-1 التحكم في مستوى الماء في خزان
١٧	1-3-1 نظام تحكم بيولوجي
١٩	5-3-1 نظام تحكم إلكتروني في سرعة محرك تيار مستمر
٢٠	٤-١ تحويلات لابلاس
٢١	1-4-1 تحويلات لابلاس لبعض الدوال
٢٣	2-4-1 نظريات التحويل اللابلاسي
٢٨	٥-١ تحويلات لابلاس العكسية
٢٩	٦-١ تصنيف أنظمة التحكم الآلي
٣٢	1-6-1 أنظمة التحكم ذات الحلقة المفتوحة
٣٢	2-6-1 أنظمة التحكم ذات الحلقة المغلقة
٣٣	3-6-1 مقارنة بين أنظمة التحكم ذات الحلقة المفتوحة والمغلقة
٣٤	٧-١ دالة التحويل
٣٥	1-7-1 إيجاد دالة التحويل من المعادلة التفاضلية للنظام
٣٥	2-7-1 إيجاد دالة التحويل لحلقة تغذية خلفية مثالية
٣٨	٨-١ المخطط الصندوقي
٣٩	1-8-1 مكونات المخطط الصندوقي



رقم الصفحة	الموضوع
٤١	2-8-1 قواعد تبسيط المخطط الصندوقي
٤٨	9-1 مخطط تدفق الإشارة
٤٩	1-9-1 قواعد مخطط تدفق الإشارة
٥١	2-9-1 قاعدة ماسون
٥٤	<b>تمارين</b>
٥٨	<b>الوحدة الثانية : نظم التحكم الصناعية وخواصها</b>
٦٠	١-٢ مقدمة
٦١	٢-٢ النمذجة الرياضية لنظم التحكم
65	٣-٢ أنواع الحاكمات الصناعية.
65	١-٣-٢ الحاكمات المتقطعة
65	١-١-٣-٢ الحاكم ذو الموضوعين
٦٦	٢-١-٣-٢ الحاكم ذو الموضوعين مع فرق تخلفي
٦٧	٢-٣-٢ الحاكمات المستمرة
٦٧	١-٢-٣-٢ الحاكم التناسبي
٦٩	٢-٢-٣-٢ الحاكم التكاملي
٧١	٣-٢-٣-٢ الحاكم التفاضلي
٧٢	٤-٢-٣-٢ الحاكم التناسبي التكاملي
٧٣	٥-٢-٣-٢ الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي
٧٥	٤-٢ الحساسات والمبدلات
٧٦	٥-٢ عناصر التحكم النهائي
٧٧	١-٥-٢ صمامات التحكم
٧٨	٢-٥-٢ المحرك الكهربائي
٨٠	<b>تمارين</b>



رقم الصفحة	الموضوع
٨٢	الوحدة الثالثة : الاستجابة الزمنية لنظم التحكم
٨٤	١-٣ . مقدمه
٨٥	٢-٣ . الدوال القياسية للدخل.
٨٨	٣-٣ الاستجابة الزمنية لدالة الخطوة
٨٨	١-٣-٣ رتبة النظام
٨٨	٢-٣-٣ الاستجابة الزمنية لنظم الرتبة الأولى
٩١	١-٢-٣-٣ خصائص نظم الرتبة الأولى
٩٢	٢-٢-٣-٣ الاستجابة العابرة والاستجابة الدائمة
٩٤	٣-٣-٣ الاستجابة الزمنية لنظم الرتبة الثانية
٩٥	١-٣-٣-٣ حالة الإخماد الزائد
٩٥	٢-٣-٣-٣ حالة الإخماد الحرج
٩٥	٣-٣-٣-٣ حالة الإخماد الناقص
١٠٠	٤-٣-٣-٣ خصائص نظم الرتبة الثانية
١٠٤	تمارين
١٠٧	الوحدة الرابعة : منظومة التحكم ذات الحلقة المغلقة
١٠٩	١-٤ . التحكم ذو الحلقة المغلقة
١١٠	٢-٤ . الخواص المرغوبة في نظم التحكم ذات الحلقة المغلقة.
١١١	٣-٤ . دور الحاكمات في ضبط الدائرة المغلقة
١١٢	٤-٤ . التحويل اللابلاسي لإشارة الخطأ
١١٣	٥-٤ . تأثير الحاكم التناسبي على إشارة الخطأ
١١٥	٦-٤ . تأثير الحاكم التكاملي على إشارة الخطأ
١١٧	٧-٤ . تأثير الحاكم التناسبي التكاملي على إشارة الخطأ
١١٩	٨-٤ . تأثير الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي على إشارة الخطأ



رقم الصفحة	الموضوع
١٢٢	تمارين
١٢٥	مصطلحات
١٣٠	المراجع



## تمهيد

الحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على سيدنا محمد وآله وصحبه، أما بعد، فهذه حقيبة تعليمية بعنوان: "تقنية التحكم الآلي" نقدمها لأبنائنا متدربي الكليات التقنية التابعة للمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني، تخصص "تقنية كهربائية".

الهدف من دراسة هذا المقرر تُمكن المتدرب من معرفة أساسيات التحكم الآلي، ونظم التحكم الصناعية وخواصها كما تمكن المتدرب من نمذجة و تحليل منظومة التحكم، وتحليل إشارة الخطأ التي تتولد في أنظمة التحكم وتأثير استخدام أنواع الحاكنات المختلفة عليها.

وقد تم توزيع محتوى المادة العلمية على أربع وحدات تعليمية هي:

الوحدة الأولى: بعنوان أساسيات التحكم الآلي ونتناول في هذه الوحدة العناصر الأساسية لمنظومة التحكم ووظيفة كل عنصر، وتصنيف أنظمة التحكم الآلي، و تحويلات لابلاس وتحويلات لابلاس العكسية وقواعدها ونظرياتها المختلفة، وتعريف دالة التحويل و كيفية بناء المخطط الصندوقي، والقواعد العامة لتبسيط المخطط الصندوقي، ومخطط تدفق الإشارة وكيفية استخدام قاعدة ماسون لحساب دالة التحويل.

الوحدة الثانية: بعنوان نظم التحكم الصناعية وخواصها ونتعرف في هذه الوحدة علي عناصر التحكم النهائية و صمامات التحكم والمشغلات الكهربائية والحاكنات ذات الخرج المتقطع والأنواع المختلفة للحاكنات ذات الخرج المستمر.

الوحدة الثالثة: بعنوان الاستجابة الزمنية لنظم التحكم ونتطرق في هذه الوحدة إلى تعليم المتدرب كيفية تحديد رتبة النظام وكيفية الحصول على المعادلة التفاضلية التي تصف نظام التحكم وكيفية الحصول منها على دالة التحويل وكذلك معرفة الاستجابة الزمنية لأنظمة التحكم الآلي.

الوحدة الرابعة: بعنوان منظومة التحكم ذات الدائرة المغلقة ونتناول فيها تحليل إشارة الخطأ في النظم ذات الحلقة المغلقة مع توضيح تأثير الأنواع المختلفة من الحاكنات عليها.



وقد روعي عند إعداد هذه الحقيبة البساطة في تقديم المادة العلمية بحيث لا نلجأ إلى التحليل الرياضي إلا عند الضرورة ولقد زودت كل الوحدات بأمثلة لتيسير استيعاب المتدرب للمادة العلمية والمفاهيم الأساسية. كما تم وضع أسئلة وتمارين في نهاية كل وحدة تعليمية ليتمكن المتدرب من اختبار ما اكتسبه من جدارة، وتغرس فيه مهارة التعلم الذاتي.





## الوحدة الأولى

### أساسيات التحكم الآلي



### الهدف العام للوحدة :

معرفة المكونات الأساسية لأنظمة التحكم الآلي والطرق المختلفة التي تستخدم في وصفها وتحليل أدائها.

### الأهداف التفصيلية :

١. أن يتعرف المتدرب على تكنولوجيا أنظمة التحكم الآلي.
٢. أن يحدد المتدرب أهم مجالات تطبيق تكنولوجيا أنظمة التحكم الآلي.
٣. أن يتعرف المتدرب على المكونات الأساسية لمنظومة التحكم.
٤. أن يستخدم المتدرب تحويلات لابلاس وتحويلات لابلاس العكسية.
٥. أن يعرف المتدرب أهمية تحويلات لابلاس في تحليل أداء نظم التحكم.
٦. أن يعرف المتدرب ماهية دالة التحويل وكيفية الحصول عليها.
٧. أن يصنف المتدرب أنظمة التحكم الآلي والمقارنة بينها.
٨. أن يعرف المتدرب المخطط الصندوقي ومكوناته.
٩. أن يعرف المتدرب كيفية بناء المخطط الصندوقي وكيفية تبسيطه.
١٠. أن يصف المتدرب مخطط تدفق الإشارة وكذلك معرفة أساسياته.
١١. أن يستخدم المتدرب قواعد مخطط تدفق الإشارة للحصول على دالة التحويل (قاعدة ماسون)





## 1.1 مقدمة - Introduction

تعتبر تكنولوجيا نظم التحكم الآلي (Automatic Control systems) من أهم فروع العلوم الهندسية التي تلعب دوراً بالغ الأهمية في ما يشهده عالمنا اليوم من رفاهية وازدهار. إن علم التحكم الآلي هو الذي يختص بدراسة كيفية التحكم والسيطرة على كثير من العمليات الصناعية وغيرها في شتى مجالات الحياة. ولقد أدى التطور السريع في نظريات و تطبيقات التحكم الآلي إلى توفير وسائل تحقيق الأداء الأمثل للأنظمة الديناميكية مما خفض الكثير من الأعباء التي كانت تقع على كاهل العنصر البشري (المشغل) جراء القيام بالعديد من الأعمال المتكررة والروتينية.

لقد لعب التحكم الآلي دوراً حيوياً في تقدم الهندسة والعلوم في جميع المجالات. ففي علوم الفضاء أصبحت له تطبيقات شتى أهمها التحكم في مركبات الفضاء وأنظمة توجيه الصواريخ والتوجيه الآلي للطائرات (الطيار الآلي) وغيرها. كما أن لنظم التحكم دور كبير في أنظمة القوى الكهربائية والتي تعتبر من أكبر الأنظمة الصناعية التي صنعها الإنسان؛ لذا فالتحكم في الشبكات والآلات والأحمال يعتبر عاملاً أساسياً لضمان التشغيل الاقتصادي والأمثل لهذه الأنظمة. ومن أمثلة تطبيقات نظم التحكم التي ساعدت في تخفيف أعباء الحياة اليومية وجعلتها أكثر رفاهية وخاصة في مجال الكهرباء:

- محطات توليد الطاقة الكهربائية وتحلية المياه،
- آلات النقل الكهربائية،
- التبريد والتكييف،
- التدفئة والأفران،
- الغسالات والنشافات.

لقد أصبح للتطور الكبير الذي نشهده حالياً في تكنولوجيا الحاسبات الإلكترونية (Computers) والإنسان الآلي (Robot) أثراً كبيراً على تزايد تطبيقات أنظمة التحكم المتقدمة في كثير من المجالات مما جعل مفاهيم التحكم الآلي، والتي كانت حكرًا على التقنيين والمهندسين، تُستخدم في شتى مجالات المعرفة مثل علوم الأحياء والاقتصاد والاجتماع والتربية والتخطيط العمراني Urban Planning

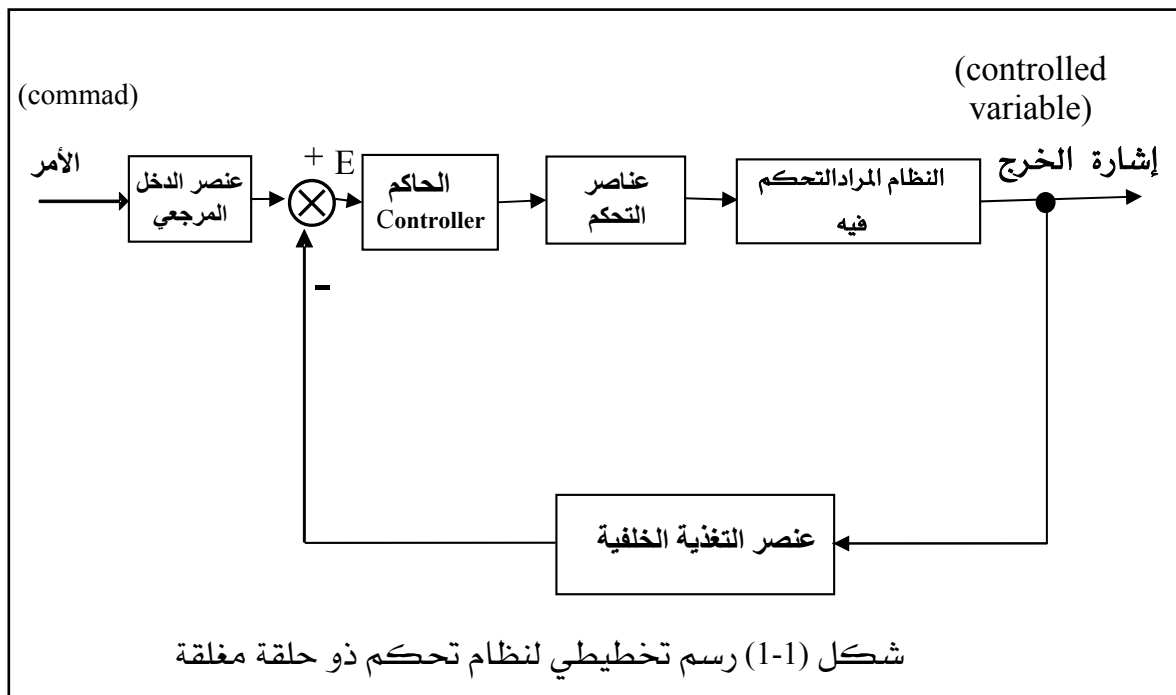


والبيئة (Environment). وبالإضافة إلى ما سبق فإن تطبيقات التحكم الآلي أصبحت جزءاً هاماً ومكماً لمختلف الصناعات الهندسية، مثل:

- مصافي تكرير النفط،
- مصانع تعبئة قارورات الغاز،
- مصانع تعبئة المواد الغذائية،
- صناعة السيارات،
- صناعة الإسمنت،
- الملاحة الجوية والبحرية
- التطبيقات العسكرية... والكثير

## 2.1 المكونات الأساسية لنظم التحكم . (Control System's Components)

الشكل (1-1) يوضح رسم تخطيطي (سوف نطلق عليه لاحقاً المخطط الصندوقي) لعناصر نظام تحكم ذو حلقة مغلقة. وقبل أن نبدأ في مناقشة نظم التحكم الآلي يجب أن نتعرف أولاً على بعض العناصر والمصطلحات الأساسية التي تستخدم للتعرف على عناصر النظام والإشارات المستخدمة لإتمام عملية التحكم :





### • المتغير المحكوم (Controlled Variable)

هو كمية يتم قياسها والسيطرة عليها. عادة ما يكون المتغير المحكوم هو الخرج أو الناتج النهائي من النظام. والمتغير المحكوم هو الكمية المراد التحكم فيها حيث يتم المحافظة عليها في حدود القيم المرغوبة.

### • النظام (Plant)

يتكون النظام من مجموعة من العناصر المترابطة فيما بينها والتي تعمل جميعها لتؤدي هدفاً محدداً أو وظيفة معينة. ويمكن تسميته لأي كائن فيزيائي خاضع للتحكم مثل جهاز ميكانيكي، أو فرن تدفئة، أو مفاعل كيميائي، أو مركبة فضائية.

### • التشويش (Disturbance)

التشويش هو إشارات غير مرغوب فيها حيث أنها تميل إلى التأثير سلباً على الكمية المراد التحكم فيها والتي تعبر عن خرج النظام. وهي نوعان: داخلية تنشأ داخل النظام وخارجية حيث تنشأ خارج النظام أو من محيطه.

### • إشارة الدخل المرجعي (Reference Signal)

وهي الإشارة التي تعبر عن القيمة المرغوب فيها للكمية المراد التحكم فيها. وعادة ما تكون إشارة كهربائية تعبر عن القيمة المرغوبة للكمية المراد التحكم فيها وكيفية تغييرها خلال فترة التشغيل.

### • إشارة الخرج (Output Signal)

وهي الإشارة التي تعبر عن القيمة الفعلية للكمية المراد التحكم فيها. وغالباً ما تعبر عن كميات فيزيائية مثل سرعة محرك كهربائي حيث يتم تحويلها إلى إشارة كهربائية باستخدام حساسات مناسبة.

### • إشارة الخطأ (Error Signal)

هي الإشارة التي تعبر عن الفرق بين إشارة الدخل المرجعي والتي تعبر عن القيمة المرغوبة للكمية المراد التحكم فيها وإشارة الخرج والتي تعبر عن القيمة الفعلية للكمية المراد التحكم فيها. وتنتج هذه الإشارة من عنصر المقارنة (المقارن) حيث يقوم بمقارنة الإشارتين السابقتين.



### • الحاكم (Controller)

يعتبر الحاكم بمثابة العقل المدبر لإدارة النظام ككل حيث يقوم بمعالجة جميع البيانات المتعلقة بالنظام المراد التحكم فيه و إصدار الأوامر المناسبة لاتمام عملية التحكم. ويحاكي الحاكم في نظم التحكم الآلي العقل البشري في نظم التحكم اليدوية.

### • الحساسات (Sensors)

تقوم الحساسات بتحويل الكميات الفيزيائية إلى إشارات كهربائية تعبر عن قيمتها وهي عادة ما تحاكي عمليتي القياس والملاحظة في نظم التحكم اليدوية.

### • المشغلات (Actuators)

تقوم المشغلات بتنفيذ الأوامر التي تصدر من الحاكم ودورها في نظم التحكم الآلي يحاكي يد العامل في نظم التحكم اليدوية.

### • عنصر التحكم النهائي (Final Control Elements)

وهو العنصر الذي يقوم المشغل بتفعيله ليقوم بالتأثير المباشر على عملية التحكم ويمكن أن يكون عبارة عن صمامات يتم غلقها أو فتحها للتأثير المباشر في الكمية المراد التحكم فيها.

## 3.1 أمثلة توضيحية لأنظمة التحكم (Illustrative Examples)

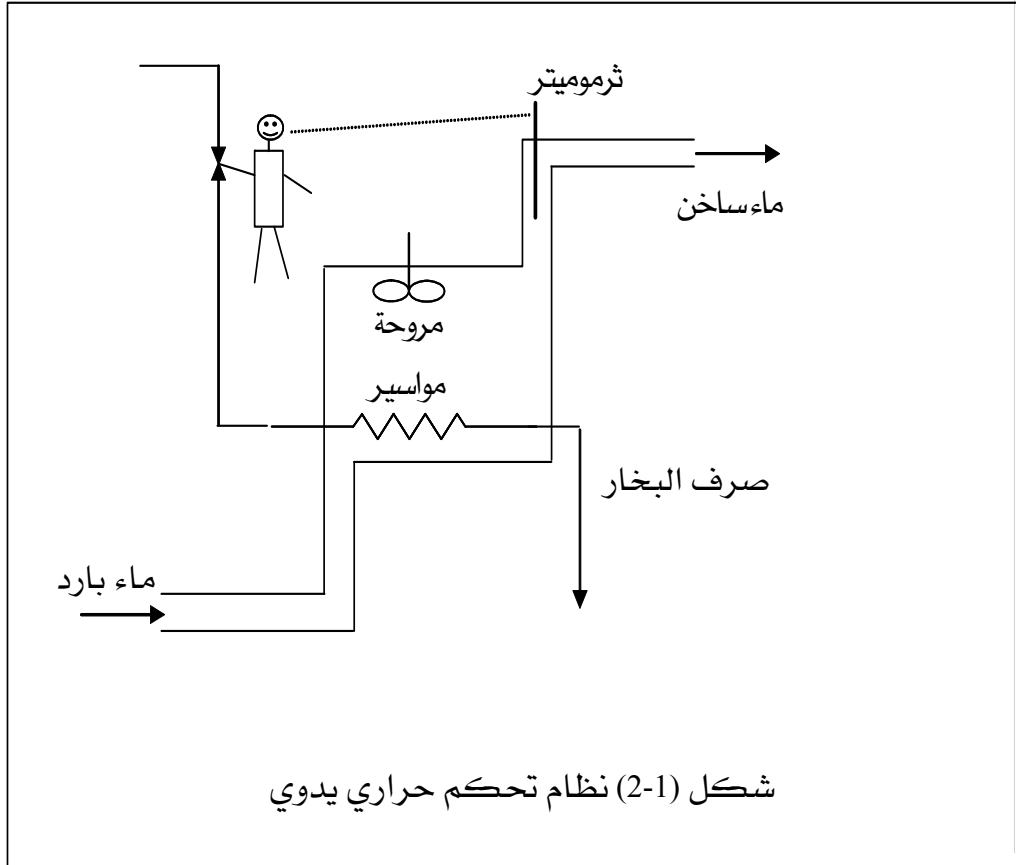
فيما يلي وصف مبسط لبعض أنظمة التحكم بهدف توضيح فكرة التحكم ذات التغذية الخلفية:

### 1.3.1 التحكم اليدوي لنظام حراري:

شكل (1-2) يبين نظام تحكم يدوي ذو تغذية خلفية للتحكم في درجة حرارة نظام حراري عبارة عن عملية تسخين مياه عن طريق إمرارها في وعاء يحتوي على مواسير يمر بها بخار ماء ساخن بدرجة حرارة عالية حيث تتم في هذا الوعاء عملية تبادل حراري بين البخار الساخن والمياه الباردة فترتفع درجة حرارة المياه. وتستخدم المروحة المبينة في الشكل لتقليب المياه داخل الوعاء لرفع كفاءة التبادل الحراري وضمان توزيع درجة الحرارة بانتظام خلال المياه .



ويتم قياس درجة حرارة المياه عن طريق الترمومتر ويقوم الإنسان بمراقبة درجة الحرارة ومقارنتها بدرجة الحرارة المطلوبة. فإذا وجد أن درجة الحرارة المقاسة (خرج نظام التحكم) أقل من المطلوب يقوم بزيادة فتحة صمام البخار ليسمح بمرور كمية أكبر من البخار الساخن



وبذلك ترتفع درجة حرارة المياه . وإذا لاحظ المشغل ارتفاع درجة حرارة المياه أكثر من الدرجة المسموح بها يقوم بتقليل فتحة صمام البخار وذلك لتقليل درجة الحرارة. وبذلك يتم التحكم هنا عن طريق الإنسان ولهذا يسمى تحكماً يدوياً.

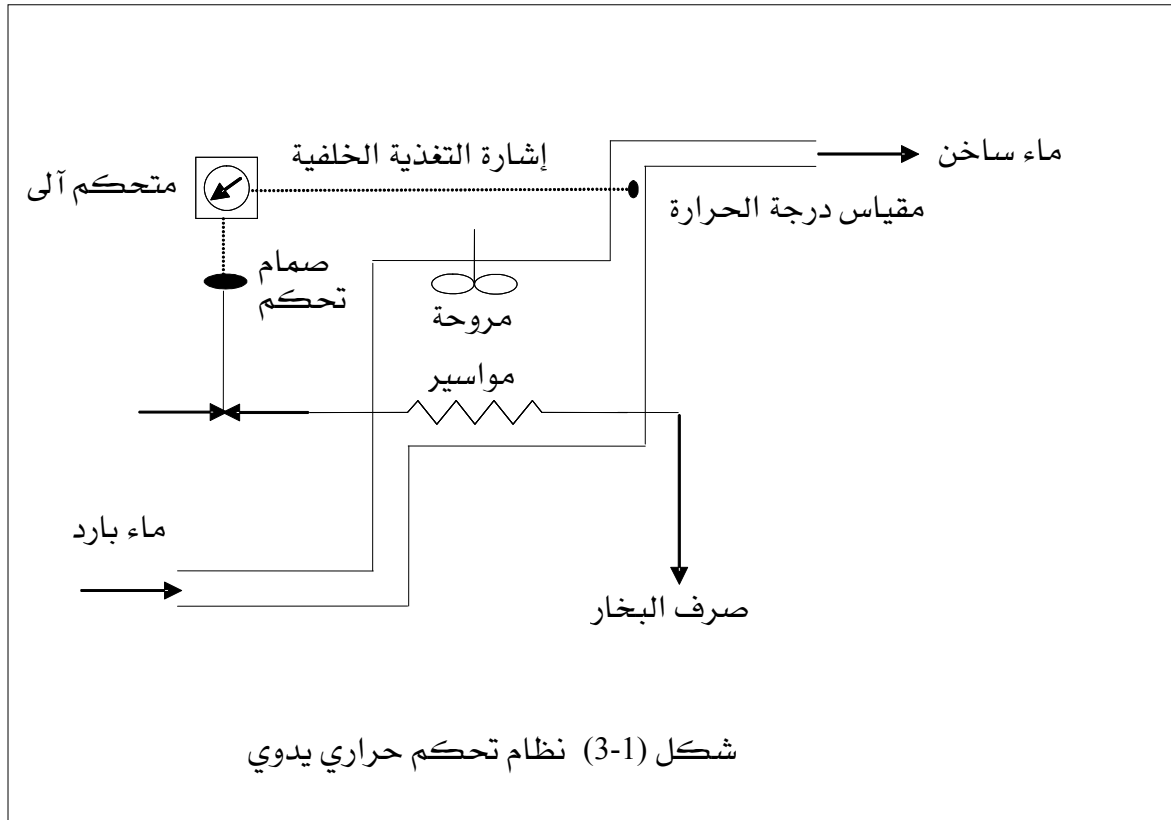
### 2.3.1 التحكم الآلي لنظام الحراري:

حيث تم هنا استخدام آلات للقيام بعملية التحكم بدلاً من الإنسان كما هو موضح في الشكل (3-1) والمطلوب من الآلات هنا تحديد درجة حرارة المياه. ومقارنتها بدرجة الحرارة



المطلوبة وإذا وجد أي خلاف يقوم المتحكم الآلي بتحريك صمام البخار لإعادة ضبط درجة الحرارة إلى القيمة المطلوبة.

ويلاحظ أن مقياس الحرارة هنا يختلف عن الترمومتر العادي الذي يبين درجة الحرارة حيث يتم تحديدها بالنظر. ففي التحكم الآلي تقاس درجة الحرارة وتحويل إلى إشارة يمكن مقارنتها بالدخل المرجعي (وهو الذي يمثل درجة الحرارة المطلوبة). ويمكن أن يتم ذلك عن طريق تحويل درجات الحرارة المقاسة والمطلوبة إلى فروق جهد يمكن مقارنتها مباشرة والفرق بينهما يمكن استخدامه بواسطة المتحكم للتحكم في فتحة صمام البخار عن طريق محرك كهربائي مثلاً.



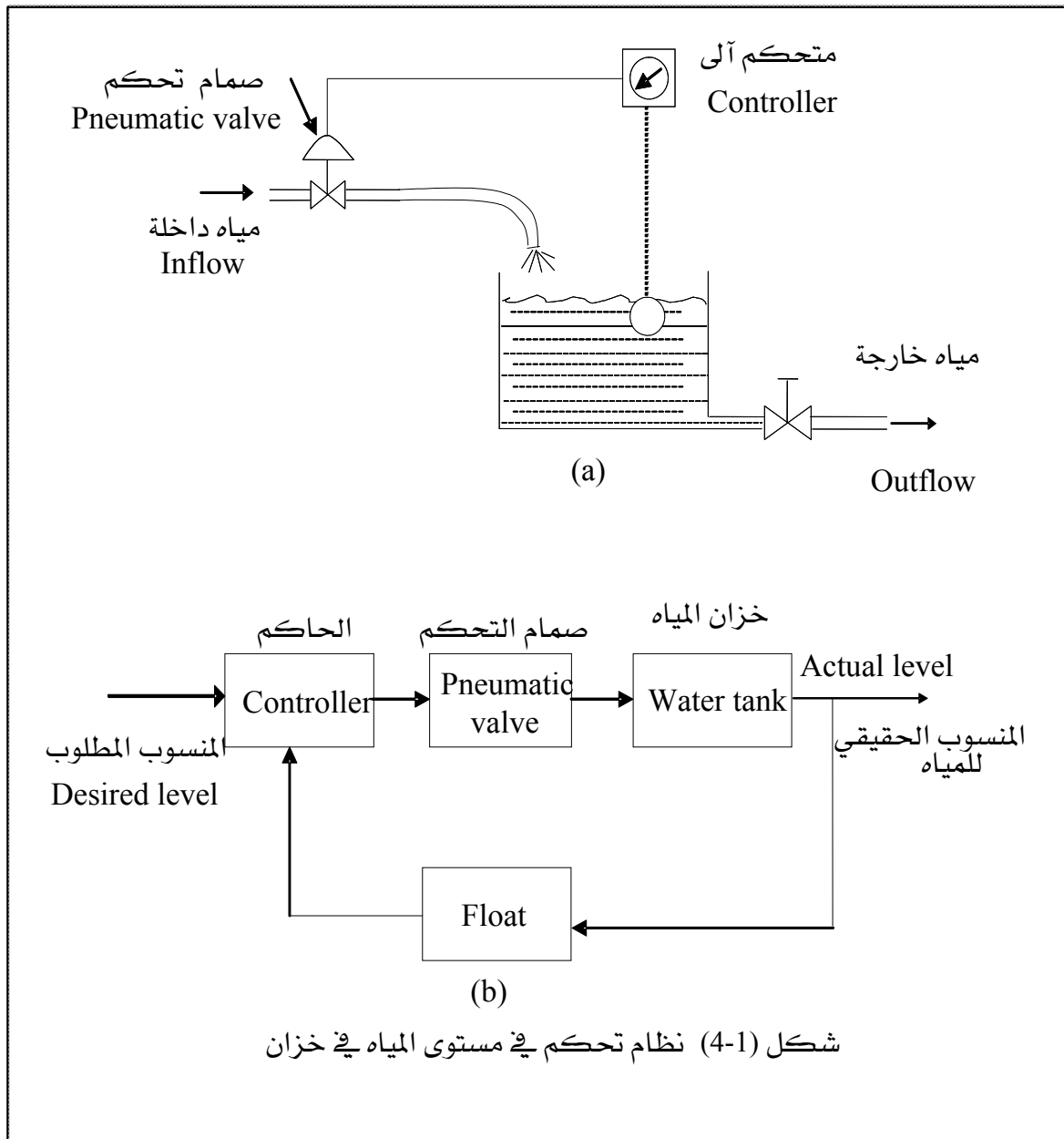
### 3.3.1 التحكم في مستوى المياه في خزان:

كما هو مبين بالشكل (a-4-1) يتم قياس منسوب المياه (خرج النظام) عن طريق عوامة ويقوم المتحكم بمقارنته بالمنسوب الحقيقي للمياه بالمنسوب المطلوب (الدخل المرجعي) وفي حالة وجود أي فرق بينهما يتم تغيير حالة صمام التحكم لتنظيم عملية دخول المياه. وإذا كان لدينا ارتفاع معين للماء في الخزان وأن كمية المياه الخارجة للمستهلكين مساوية لكمية المياه





الداخلة فإن النظام يكون مستقرًا في هذه الحالة. وإذا حدث تغيير في كمية المياه الخارجة مثلا (اضطراب خارجي) يتغير ارتفاع منسوب المياه في الخزان وعليه يتغير وضع العوامة وبذلك يعمل المتحكم على تغيير فتحة صمام التحكم في المياه الداخلة لإعادة ضبط ارتفاع المياه في الخزان.

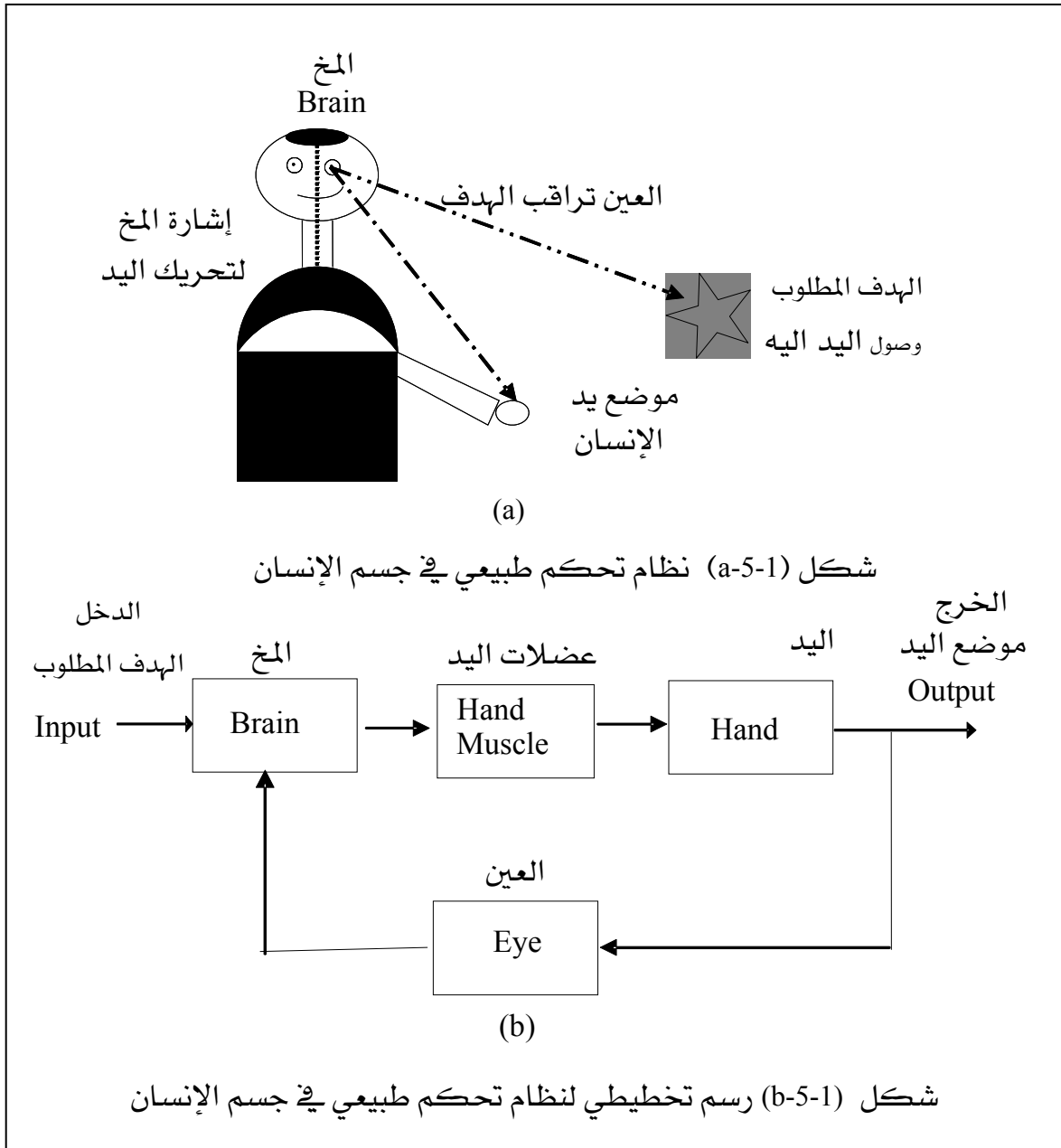




الشكل ( b-4-1 ) يبين رسماً تخطيطياً لنظام التحكم في منسوب المياه وهذا النظام ذو التغذية الخلفية يمثل كل جزء منه بصندوق وبين خطوط التوصيل والأسهم مسارات إشارات التحكم والدخل والخرج والتغذية الخلفية.

#### 4.3.1 نظام تحكم بيولوجي (تحكم طبيعي في جسم الإنسان):

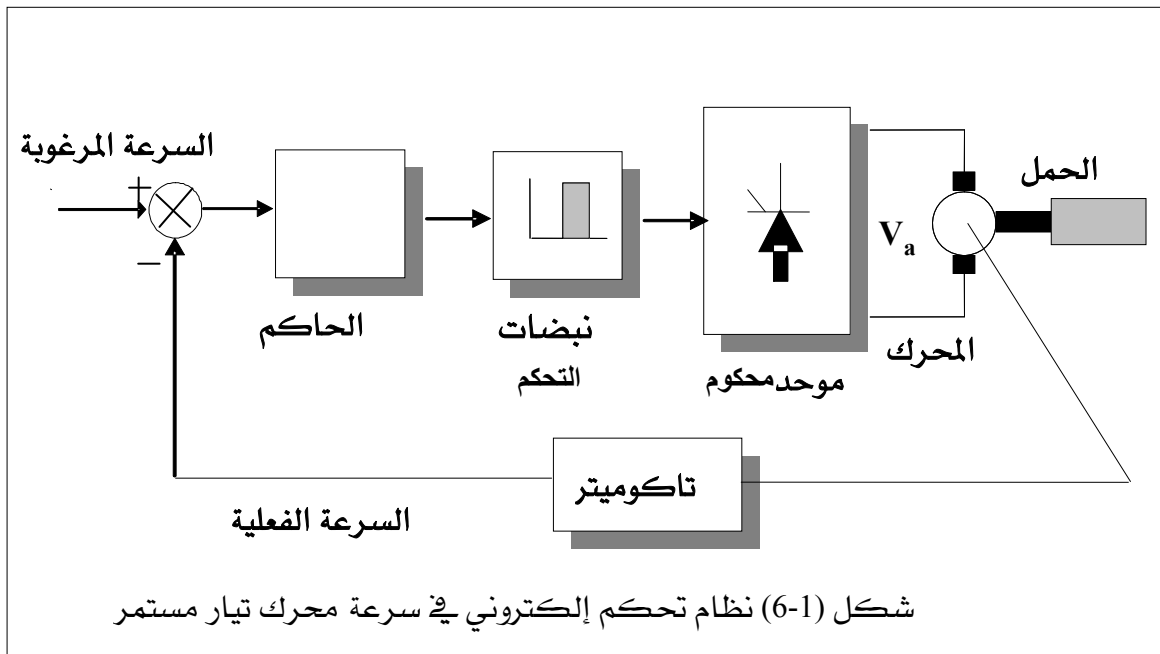
يبين هذا النظام في الشكل (a-5-1) والمطلوب فيه هو وصول اليد إلى التقاط شيء معين ( هدف ) يتم تحديد مكان الهدف في المخ ويقوم المخ بإرسال إشارات تحكم إلى اليد والعضلات حيث تقوم العضلات بتكبير إشارات التحكم وتتحرك اليد للوصول للهدف حيث تراقب العين حركة اليد وتغذي هذه المعلومة إلى المخ الذي تتم فيه مقارنة الخرج (وهو موضع اليد) بالدخل (وهو الهدف المطلوب الوصول إليه) وفي حالة وجود فرق بين الدخل والخرج يرسل المخ إشارات تحكم لليد عن طريق العضلات وتستمر هذه الحركة حتى يتم الوصول إلى الهدف. ويبين الشكل (b-5-1) رسماً تخطيطياً لهذا النظام.





### 5.3.1 نظام تحكم إلكتروني في سرعة محرك تيار مستمر:

يبين الشكل (6-1) رسماً مبسطاً لنظام تحكم إلكتروني في سرعة محرك تيار مستمر يدير حملاً ميكانيكياً. ويقوم الحاكم بإنتاج نبضات Pulses بتوقيتات معينة لإشعال دوائر الثايرستور والتي تقوم بدورها بإنتاج جهد محكوم يتم تطبيقه على أطراف دائرة المنتج لمحرك التيار المستمر  $V_a$ . هذا الجهد ناتج من توحيد التيار المتردد ثلاثي الطور عن طريق موحّدات محكومته حيث يتم التحكم في قيمته عن طريق نبضات التحكم. ويتم قياس سرعة المحرك بواسطة مولد صغير (التاكوميتر) يولد جهداً يتناسب مع السرعة ويتم مقارنة هذا الجهد بالدخل المقارن وهو عبارة عن جهد أيضاً يتناسب مع السرعة المطلوبة، والفرق بين الجهدين يغذي الحاكم.

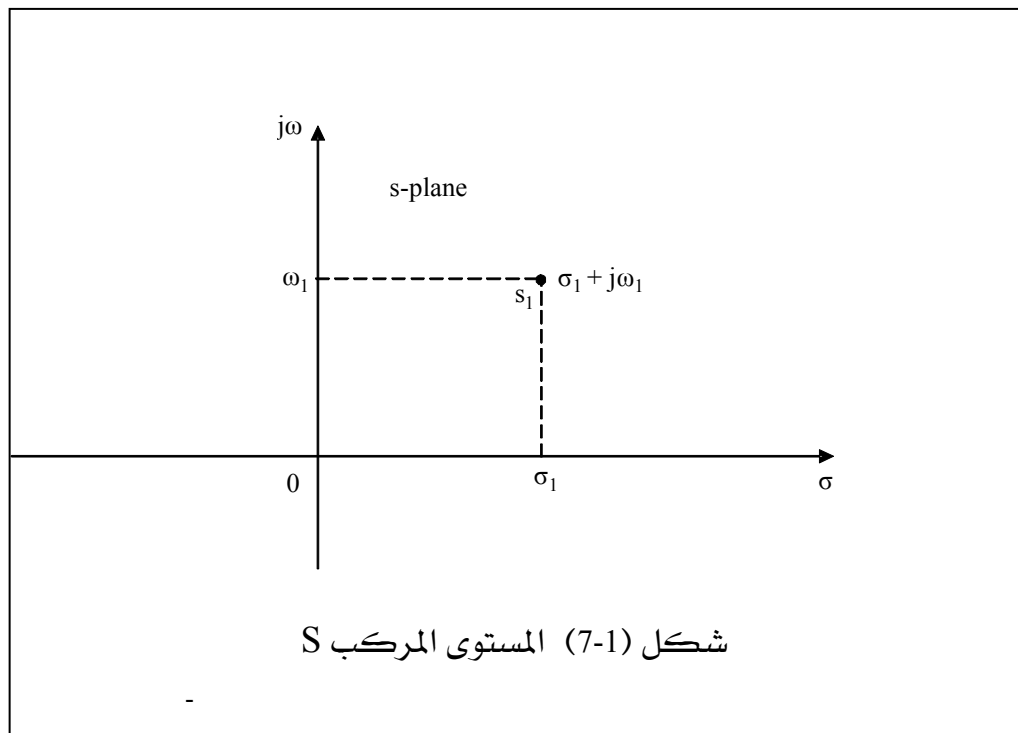




#### 4.1 تحويلات لابلاس Laplace Transformation

تحويلات لابلاس Laplace Transformations هي إحدى التحويلات الرياضية الخطية المعروفة والتي لها دوراً كبيراً في دراسات علم التحكم الآلي ولها العديد من التطبيقات في تصميم وتحليل أداء نظم التحكم. وتتميز تحويلات لابلاس بتيسير حل المعادلات التفاضلية أو التفاضلية التكاملية والتي تستخدم عادة لوصف نظم التحكم والتي يصعب حلها مباشرة في نطاق الزمن  $t$  ولكن عند استخدام تحويلات لابلاس يتم تحويلها إلى نطاق افتراضي مركب يسمى نطاق لابلاس  $S$  فتتحول إلى تعبيرات جبرية بسيطة في المتغير المركب  $S$ . بعد إجراء تحويلات لابلاس يتم فصل المتغير المطلوب في نطاق المتغير المركب  $S$  ثم بعد ذلك تستخدم ما تسمى تحويلات لابلاس العكسية والتي تعيد المتغير مرة أخرى إلى نطاقه الفعلي وهو نطاق الزمن.

ويتكون المتغير المركب من جزأين: أحدهما حقيقي Real Part ويرمز له بالرمز  $\sigma$  والآخر تخيلي Imaginary Part ويرمز له بالرمز  $j\omega$ . ويمكن تمثيله باستخدام الإحداثيات المتعامدة برسم الجزء الحقيقي على الإحداثيات الأفقية  $\sigma$ -axis بينما يرسم الجزء التخيلي على الإحداثيات الرأسية  $j\omega$ -axis والذي يسمى المستوى المركب  $S$  (S-plane) كما هو مبين بالشكل (7-1).





### 1.4.1 تحويلات لابلاس لبعض الدوال

مما سبق نعلم أن تحويلات لابلاس هي إحدى الطرق الرياضية المهمة التي تساعد على دراسة أداء وتصميم نظم التحكم. و جدير بالذكر أن الخطوة الأولى عند دراسة نظم التحكم هي تحويل النظام إلى معادلات تفاضلية تصف النظام وتربط متغيراته بعضها البعض. بعد ذلك يتم تحويل هذه المعادلات الرياضية التي تصف أنظمه التحكم من نطاق الزمن (t) والتي يمكن كتابتها كدالة في المتغير المركب (S) ويطلق عليها  $F(s)$ . ومن مميزات استخدام تحويلات لابلاس في تحليل أداء نظم التحكم:

- تحويل الدوال الجيبية والأسية إلى تعبيرات جبرية في المتغير المركب S.
  - تحويل بعض العمليات مثل التكامل والتفاضل إلى تعبيرات جبرية بسيطة في المتغير المركب S.
  - تحويل المعادلات التفاضلية إلى معادلات جبرية بسيطة في المتغير المركب S.
- دعنا الآن نتعرف على بعض الرموز المستخدمة وهي:

$$f(t) = \text{هي الدالة في نطاق الزمن}$$

$$F(s) = \text{هي الدالة في نطاق المتغير المركب S (التحويل اللابلاسي لدالة الزمن } f(t)\text{).}$$

حيث أن

$$s = \sigma + j\omega \text{ هو المتغير المركب}$$

$$\mathcal{L} = \text{هو رمز للتحويل اللابلاسي}$$

وبالتالي يتم الحصول على تحويل لابلاس للدالة  $f(t)$  بتطبيق المعادلة التالية:

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (1-1)$$

فيما يلي بعض الأمثلة التي توضح كيفية استخدام المعادلة السابقة لإيجاد تحويلات لابلاس لبعض الدوال البسيطة

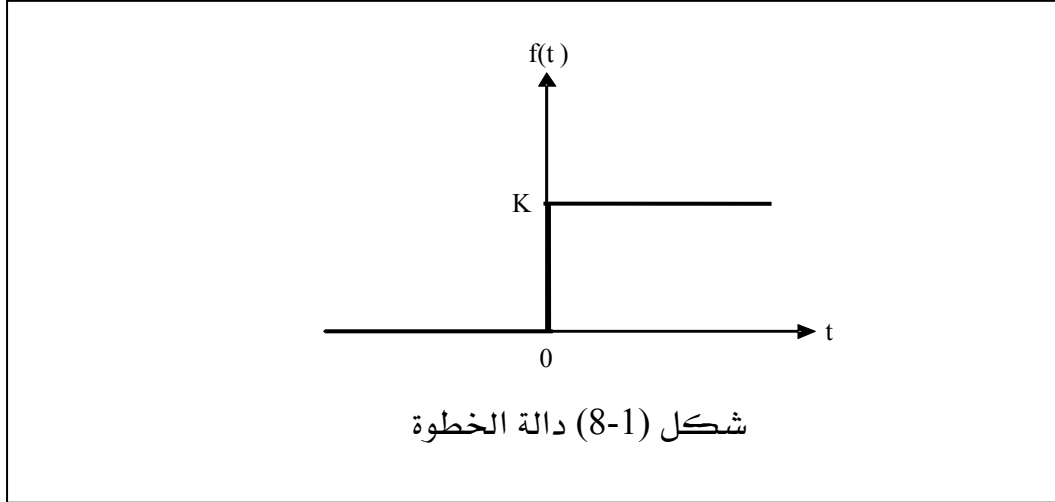
#### مثال 1-1

أوجد تحويل لابلاس لدالة الخطوة التالية والتي خطوتها K

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ K & t \geq 0 \end{cases}$$



حيث  $K$  مقدار ثابت و الشكل (8-1) يوضح دالة الخطوة



**الحل:**

باستخدام تحويلات لابلاس نحصل على:-

$$\mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} K e^{-st} dt$$

$$F(s) = \frac{K}{S} e^{-st} \Big|_0^{\infty} = -\frac{K}{S} [e^{-\infty} - e^{-0}] = \frac{K}{S}$$

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \frac{K}{S}$$

**ملحوظة**

عندما تكون قيمة  $K$  مساوية للوحدة يطلق عليها دالة خطوة الوحدة unit step function ويكون التحويل اللابلاسي لدالة خطوة الوحدة كما يلي

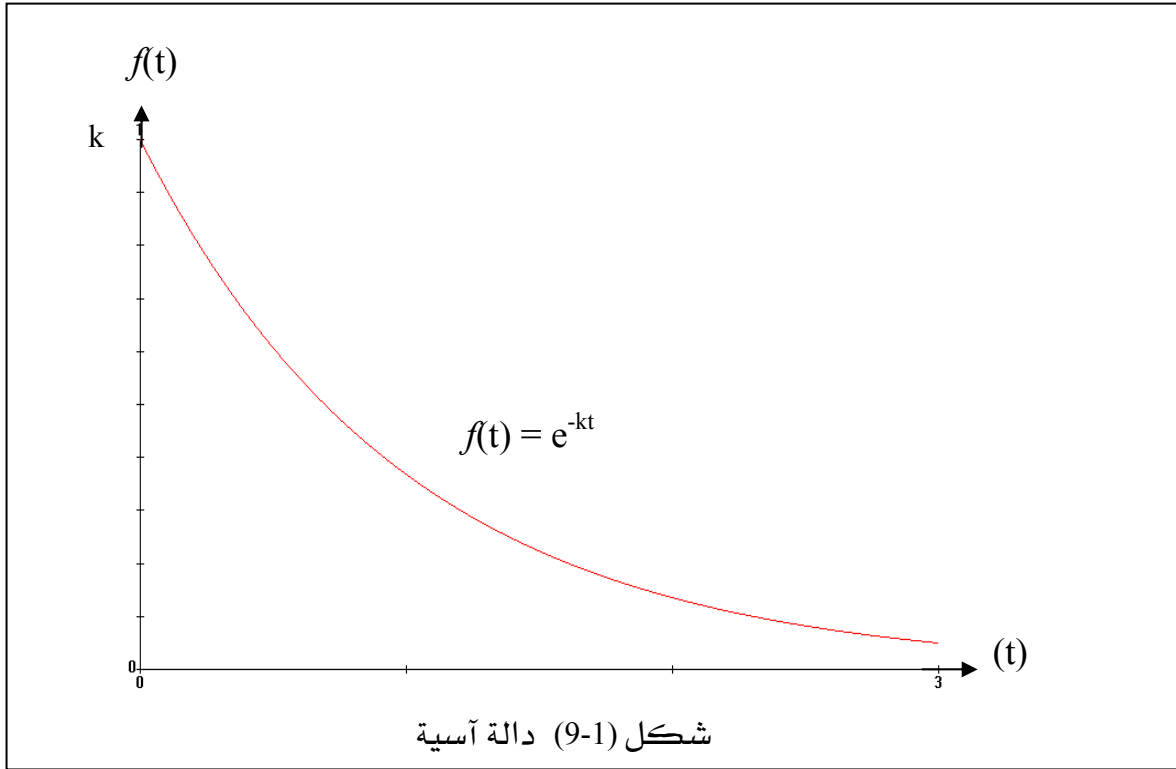
$$F(s) = \frac{1}{S}$$

**مثال 2-1**

أوجد التحويل اللابلاسي للدالة التالية والتي تسمى بالدالة الأسية Exponential Function

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ e^{-kt} & t \geq 0 \end{cases}$$

حيث  $k$  مقدار ثابت. الشكل (9-1) يوضح الدالة الأسية



### الحل

بتطبيق تحويلات لابلاس علي الدالة الآسية نحصل على:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}[f(t)] &= \int_0^{\infty} e^{-kt} e^{-st} dt = \int_0^{\infty} e^{-(s+k)t} dt \\ F(s) &= -\frac{1}{S+K} e^{-(s+k)t} \Big|_0^{\infty} \\ &= -\frac{1}{S+K} [e^{-\infty} - e^{-0}] = \frac{1}{S+K} [0 - 1] \\ \mathcal{L}[f(t)] = F(s) &= \frac{1}{S+K}\end{aligned}$$

### 2.4.1 خصائص ونظريات تحويلات لابلاس Laplace Transform Theorems

فيما يلي بعض الخصائص الشائعة الاستخدام للتحويل اللابلاسي:

- **نظرية التناسب .**

وتنص على أن التحويل اللابلاسي لدالة مضروبة في ثابت هو عبارة عن التحويل اللابلاسي للدالة مضروباً في الثابت نفسه. أي أن





$$\mathcal{L}[k.f(t)] = k.F(s) \quad (2-1)$$

حيث أن  $k$  مقدار ثابت

### • نظرية التجميع

وتستخدم للحصول على التحويل اللابلاسي لمجموع أو الفرق بين دالتين في الزمن ويكتب على الصورة التالية:

$$\mathcal{L}[f_1(t) \pm f_2(t)] = F_1(s) \pm F_2(s) \quad (3-1)$$

### • التحويل اللابلاسي لتفاضل الدالة

بفرض أن  $F(s)$  هي التحويل اللابلاسي للدالة  $f(t)$  فإن التحويل اللابلاسي للمشتقة الأولى للدالة يعطى بالعلاقة التالية

$$\mathcal{L}\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = SF(s) - f(0) \quad (4-1)$$

علماً بأن  $f(0)$  هي القيمة الابتدائية للدالة  $f(t)$  محسوبة عند  $t=0$ . كذلك فإن التحويل اللابلاسي للتفاضل الثاني للدالة هو:

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^2 f(t)}{dt^2}\right] = S^2 F(s) - Sf(0) - f'(0) \quad (5-1)$$

ويكون التحويل اللابلاسي للمشتقة النونية للدالة هو:

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right] = S^n F(s) - \sum_{k=1}^n S^{n-k} f^{(k-1)}(0) \quad (6-1)$$

حيث أن

$$f^{(k-1)}(0) \text{ هو التفاضل الـ } (k-1) \text{ محسوباً عند } t=0$$

### • التحويل اللابلاسي لتكامل الدالة

التحويل اللابلاسي لتكامل الأول للدالة  $f(t)$  يعطى بالعلاقة التالية:

$$\mathcal{L}\left[\int f(t)dt\right] = \frac{F(s)}{S} + \frac{\left(\int f(t)dt\right)_{t=0}}{S} \quad (7-1)$$

حيث أن

$$\left(\int f(t)dt\right)_{t=0} \text{ هو تكامل الدالة محسوباً عند } t=0$$



- **نظرية الإزاحة في مجال الزمن**

$$\mathcal{L} [ f (t - T) ] = e^{-sT} F (s) \quad (8-1)$$

- **نظرية الإزاحة في مجال  $S$ :**

$$\mathcal{L} [ e^{kt} f (t) ] = F (s - k) \quad (9-1)$$

- **تغيير سلم الزمن**

$$\mathcal{L} [ f (at) ] = \frac{1}{a} F \left( \frac{s}{a} \right) \quad (10-1)$$

- **نظرية القيمة الابتدائية**

تستخدم هذه النظرية لإيجاد القيمة الابتدائية للدالة  $f(t)$  والتي تسمى  $f(0)$

$$f(0) = \lim_{t \rightarrow 0} f (t) = \lim_{s \rightarrow \infty} (sF (s)) \quad (11-1)$$

- **نظرية القيمة النهائية**

تستخدم هذه النظرية لإيجاد القيمة النهائية للدالة  $f(t)$  والتي تسمى  $f(\infty)$  وتعرف أيضاً بالقيمة النهائية للدالة أو قيمة الدالة عند الاستقرار.

$$f(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} f (t) = \lim_{s \rightarrow 0} (sF (s)) \quad (12-1)$$

الجدول التالي يوضح تحويلات لابلاس للدوال المستخدمة بكثرة في دراسة نظم التحكم



	f(t)	F(s)
1	unit impulse $\delta(t)$	1
2	Unit step 1(t)	$\frac{1}{s}$
3	t	$\frac{1}{s^2}$
4	$e^{-at}$	$\frac{1}{s+a}$
5	$te^{-at}$	$\frac{1}{(s+a)^2}$
6	$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
7	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
8	$t^n \quad (n=1,2,3,\dots)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
9	$t^n e^{-at} \quad (t=1,2,3,\dots)$	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
10	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$
11	$\frac{1}{b-a}(be^{-bt} - ae^{-at})$	$\frac{s}{(s+a)(s+b)}$
12	$\frac{1}{ab} \left[ 1 + \frac{1}{a-b}(be^{-at} - ae^{-bt}) \right]$	$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$
13	$e^{-at} \sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
14	$e^{-at} \cos \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$
15	$\frac{1}{a^2}(at - 1 + e^{-at})$	$\frac{1}{s^2(s+a)}$
16	$\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t$	$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
17	$\frac{-1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \phi)$ $\phi = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}$	$\frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$



## مثال 3-1

أوجد التحويل اللابلاسي للدوال الآتية:

$$1 - f(t) = 15$$

$$2 - f(t) = 5 + 4e^{-2t}$$

$$3 - f(t) = t - 2e^{-t}$$

$$4 - x(t) = e^{-5t} \sin 4t$$

$$5 - y(t) = 2t + \cos t$$

$$6 - h(t) = 100 + 14t + 8 \cos t$$

**الحل:**

بالنظر في الجدول (2-1) نجد الآتي:

$$1 - F(s) = \mathcal{L}[15] = \frac{15}{s}$$

$$2 - F(s) = \mathcal{L}[5 + 4e^{-2t}] = \mathcal{L}[5] + \mathcal{L}[4e^{-t}] = \frac{5}{s} + \frac{4}{s+2} = \frac{9s+10}{s(s+2)}$$

$$3 - F(s) = \mathcal{L}[t - 2e^{-t}] = \mathcal{L}[t] - \mathcal{L}[2e^{-t}] = \left(\frac{1}{s^2}\right) - \left(\frac{2}{s+1}\right) = \frac{(1+s-2s^2)}{s^2(s+1)}$$

$$4 - X(s) = \mathcal{L}[e^{-5t} \sin 4t] = \left[\frac{4}{(s+5)^2 + 4^2}\right] = \frac{4}{(s+5)^2 + 16}$$

$$5 - Y(s) = \mathcal{L}[2t + \cos 3t] = \frac{2}{s^2} + \frac{s}{s^2 + 9}$$

$$6 - H(s) = \mathcal{L}[100 + 14t + 8 \cos t] = \frac{100}{s} + \frac{14}{s^2} + \frac{8s}{s^2 + 1}$$

ملحوظة: لاحظ كيف استخدمت نظرية الإزاحة في S في الفقرة ٤



### 5.1 تحويلات لابلاس العكسية Inverse Laplace Transformation

تستخدم تحويلات لابلاس العكسية لاسترجاع الدالة من النطاق الافتراضي للمتغير المركب (S) إلى دالة في النطاق الفعلي وهو نطاق الزمن (t). باختصار هي العملية الرياضية التي يتم

فيها تحويل الدالة F(s) إلى الدالة f(t) ويرمز لهذه العملية بالرمز  $\mathcal{L}^{-1}$  :

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s) e^{st} ds \quad (13-1)$$

حيث أن:

F(s) هي التحويل اللابلاسي للدالة f(t)

$\mathcal{L}^{-1}$  هي أداة التحويل العكسي للابلاس

#### مثال 4-1

أوجد تحويل لابلاس العكسي للدالة  $F(s) = \frac{1}{s+10}$

**الحل:**

باستخدام جدول تحويل لابلاس نجد أن التحويل رقم ٤ في الجدول (1-2) يتناسب مع هذا المثال حيث: a=10 فيكون:

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{s+10}\right] = e^{-10t}$$

#### مثال 5-1

أوجد تحويل لابلاس العكسي للدالة  $F(s) = \frac{27}{s^2+81}$

**الحل:**

بالرجوع إلى جدول تحويلات لابلاس نجد أن شكل الدالة المعطاة يتشابه مع التحويل

رقم 6 في الجدول إذا أعدنا كتابة الدالة المعطاة لتصبح كالتالي

$$F(s) = 3 \frac{9}{s^2+9^2}$$



عندئذ نجد أنها عبارة عن التحويل اللابلاسي للدالة الجيبية مضروباً في عدد ثابت هو 3 حيث أن قيمة  $\omega = 9$  :

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)] = 3 \sin(9t)$$

### 1.5.1 طريقة الكسور الجزئية Partial Fraction

بالنسبة للدوال البسيطة يمكن إيجاد تحويلات لابلاس العكسية مباشرة من الجدول (2-1) بدلاً من إجراء التحويل باستخدام المعادلة مما يوفر كثيراً من الوقت. ولكن في معظم أنظمة التحكم الآلي تكون الدوال معقدة ومركبة ولا يمكن إيجاد تحويلها مباشرة من جدول تحويلات لابلاس. في هذه الحالة نقوم بتجزئة تلك الدوال المركبة إلى مجموعة دوال بسيطة يسهل إيجاد تحويلات لابلاس لها من الجدول. وتسمى الطريقة المستخدمة لتقسيم هذه الدوال إلى أجزاء بسيطة بطريقة الكسور الجزئية Partial Fraction.

دعنا نفترض أن دالة تحويل النظام تعطى بالمعادلة التالية بشرط أن تكون درجة البسط أقل من درجة المقام أي أن  $m < n$

$$F(s) = K \frac{(s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_m)}{(s - P_1)(s - P_2) \dots (s - P_n)} \quad (14-1)$$

حيث أن:

K مقدار ثابت .

$(P_1, P_2, \dots, P_n)$  هي مقادير ثابتة وتسمى أقطاب الدالة.

$(z_1, z_2, \dots, z_m)$  هي مقادير ثابتة وتسمى أصفار الدالة.

ويتم تجزئة الدالة السابقة طبقاً لنوعية أقطابها كما يلي.

#### الحالة الأولى: جميع أقطاب الدالة ذات قيم مختلفة.

إذا كانت قيم أقطاب الدالة ذات قيم مختلفة يكتب مفكوك الدالة على النحو التالي.

$$F(s) = \frac{A_1}{s + p_1} + \frac{A_2}{s + p_2} + \dots + \frac{A_n}{s + p_n} \quad (15-1)$$

ويتم حساب الثوابت  $A_1, A_2, \dots, A_n$  بالطرق التالية



$$\begin{aligned} A_1 &= \left. (s + p_1).F(s) \right|_{s=-p_1} \\ A_2 &= \left. (s + p_2).F(s) \right|_{s=-p_2} \\ A_n &= \left. (s + p_n).F(s) \right|_{s=-p_n} \end{aligned} \quad (16-1)$$

وبالتعويض عن قيم الثوابت  $A_1, A_2, \dots, A_n$  في المعادلة (15-1) والتي يمكن إيجاد التحويل اللابلاسي العكسي لهذه الدالة كما يلي:

$$F(t) = L^{-1}[F(s)] = A_1 e^{-p_1 t} + A_2 e^{-p_2 t} + \dots + A_n e^{-p_n t} \quad (17-1)$$

### مثال 6-1

أوجد تحويل لابلاس العكسي للدالة التالية.

$$Y(s) = \frac{12}{s(s+1)(s+4)}$$

#### الحل:

باستخدام الكسور الجزئية تكتب الدالة السابقة على الصورة التالية

$$Y(s) = \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s+1} + \frac{A_3}{s+4}$$

وتحسب قيم الثوابت  $A_1, A_2, A_3$  كالتالي:

$$A_1 = \left. s \frac{12}{s(s+1)(s+4)} \right|_{s=0} = \frac{12}{(0+1)(0+4)} = \frac{12}{4} = 3$$

$$A_2 = \left. (s+1) \frac{12}{s(s+1)(s+4)} \right|_{s=-1} = \frac{12}{1(-1+4)} = \frac{12}{-3} = -4$$

$$A_3 = \left. (s+4) \frac{12}{s(s+1)(s+4)} \right|_{s=-4} = \frac{12}{-4(-4+1)} = \frac{12}{12} = 1$$

وبالتعويض عن هذه الثوابت في المعادلة الأولى نحصل على:

$$Y(s) = \frac{3}{s} - \frac{4}{s+1} + \frac{1}{s+4}$$

$$y(t) = L^{-1}[Y(s)] = L^{-1}\left[\frac{3}{s}\right] - L^{-1}\left[\frac{4}{s+1}\right] + L^{-1}\left[\frac{1}{s+4}\right]$$

$$y(t) = 3 - 4e^{-t} + e^{-4t}$$



### الحالة الثانية: أقطاب الدالة متكررة

إذا كان أحد أقطاب الدالة ذات قيم متكررة. بفرض أن أحد الأقطاب متكرر عدد مرات  $k$  فان مفكوك الدالة يكتب على الصورة التالية:

$$F(s) = \frac{A_k}{(s+p)^k} + \frac{A_{k-1}}{(s+p)^{k-1}} + \dots + \frac{A_1}{(s+p)} \quad (18-1)$$

و يتم حساب الثوابت على النحو التالي.

أولاً: نوجد الثابت  $A_k$  باستخدام القاعدة التالية

$$A_k = (s+p)^k \cdot F(s) \Big|_{s=-p} \quad (19-1)$$

ثانياً: نوجد باقي الثوابت باستخدام القاعدة التالية

$$A_{k-r} = \frac{1}{r!} \frac{d^r}{ds^r} \left( (s+p)^k \cdot F(s) \right) \Big|_{s=-p} \quad (20-1)$$

حيث أن  $r$  تأخذ قيم 1 و 2 و 3 و ..... و  $(k-1)$

### مثال 8-1

أوجد تحويل لابلاس العكسي للدالة التالية

$$F(s) = \frac{S^2 + 2S + 3}{(s+1)^3}$$

### الحل

الدالة ذات ثلاثة أقطاب متساوية (متكررة) لذا يكتب مفكوك الدالة كما يلي:

$$F(s) = \frac{A_3}{(s+1)^3} + \frac{A_2}{(s+1)^2} + \frac{A_1}{(s+1)}$$

وتوجد الثوابت من العلاقات السابقة كما يلي:

$$A_3 = (s+1)^3 \cdot \frac{S^2 + 2S + 3}{(s+1)^3} \Big|_{s=-1} = (-1)^2 + 2(-1) + 3 = 2$$

$$A_2 = \frac{1}{1!} \frac{d^1}{ds^1} \left( (s+1)^3 \cdot \frac{S^2 + 2S + 3}{(s+1)^3} \right) \Big|_{s=-1} = 2s + 2 \Big|_{s=-1} = 0$$

$$A_1 = \frac{1}{2!} \frac{d^2}{ds^2} \left( (s+1)^3 \cdot \frac{S^2 + 2S + 3}{(s+1)^3} \right) \Big|_{s=-1} = \frac{1}{2} 2 \Big|_{s=-1} = 1$$





بعد التعويض بقيم الثوابت في مفكوك الدالة نحصل على.

$$F(s) = \frac{2}{(s+1)^3} + \frac{1}{(s+1)}$$

باستخدام تحويلات لابلاس العكسية وتطبيق نظرية الإزاحة في S نحصل على

$$f(t) = t^2 e^{-t} + e^{-t} = e^{-t}(t^2 + 1)$$

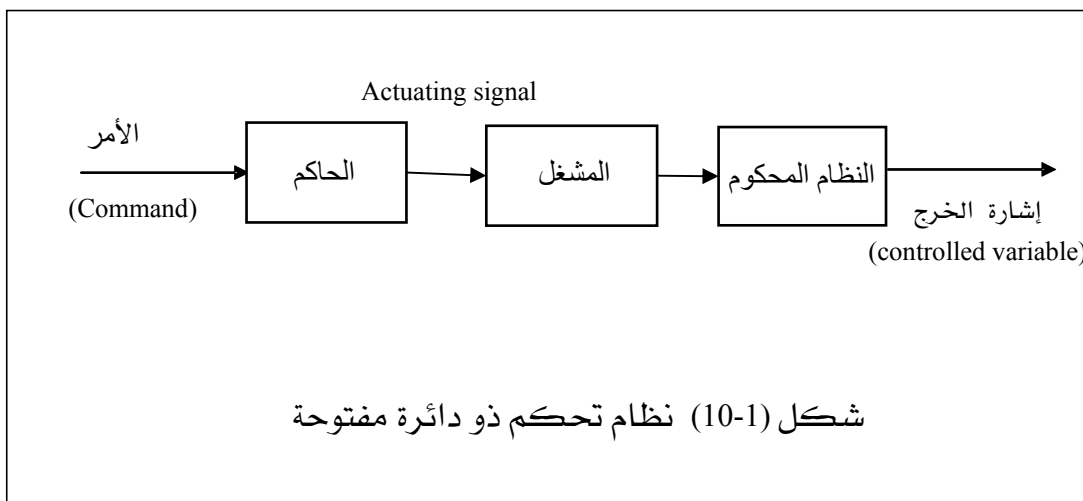
## 6.1 تصنيف أنظمة التحكم الآلي Classification of Control Systems

تنقسم أنظمة التحكم إلى نوعين أساسيين هما:

- نظم التحكم ذات الحلقة المفتوحة Open loop control system
- نظم التحكم ذات الحلقة المغلقة Closed loop control system.

### 1.6.1 أنظمة التحكم ذات الحلقة المفتوحة Open Loop Control Systems

في أنظمة التحكم ذات الحلقة المفتوحة يتم توليد إشارة التحكم بمعزل عن إشارة الخرج. وبالتالي فإن إشارة الخرج ليس لها تأثير على إشارة التحكم ولذلك فإن أنظمة التحكم ذات الحلقة المفتوحة لا تحتوي على عنصر تغذية خلفية ولا تحتوي على عنصر مقارنة بين إشارتي الدخل والخرج.

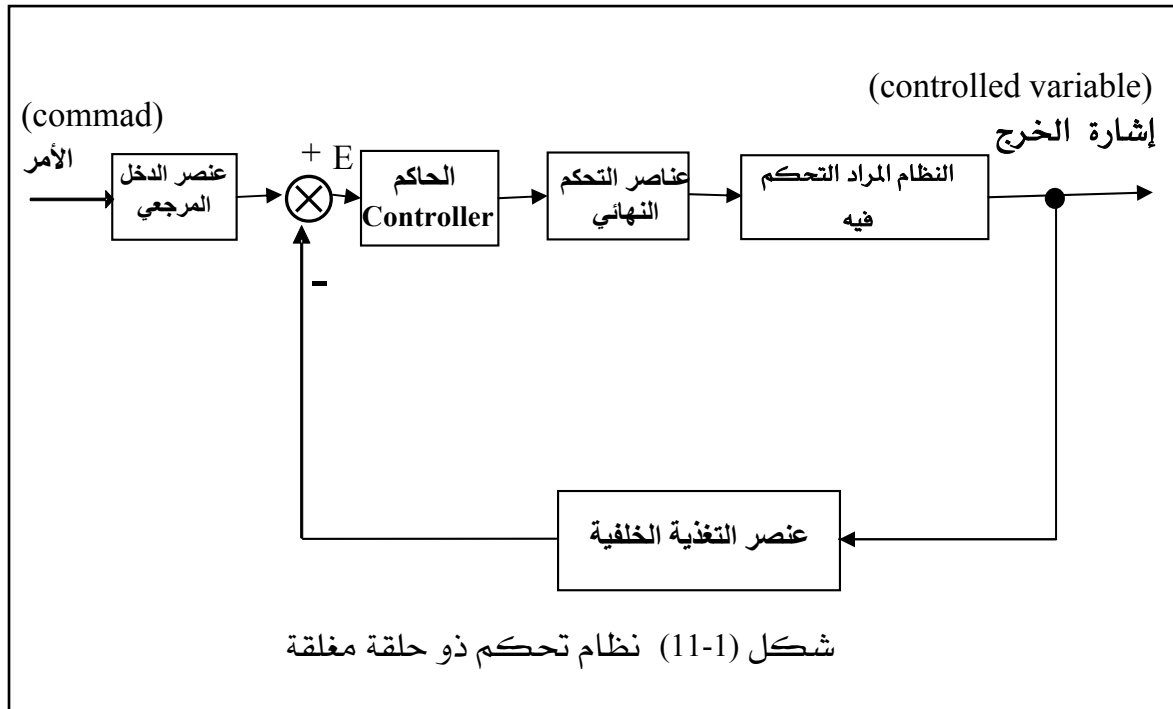




الشكل (10-1) يبين العلاقة بين الخرج والدخل لهذه الأنظمة. وكمثال على أنظمة التحكم ذات الدائرة المفتوحة الغسالة الكهربائية التي تعمل بالتوقيت الزمني حسب برنامج معين وفيها لا يتم قياس الخرج وهو درجة نظافة الملابس وكمثال آخر لذلك إشارات المرور وتعتمد دقة هذه الأنظمة على معايرتها والخبرة بتشغيلها وهي لا تعمل بدقة حين تعرضها إلى أي تغييرات في الجهد ولا توجد اضطرابات داخلية أو خارجية في النظام المراد التحكم فيه.

### 2.6.1 أنظمة التحكم ذات الحلقة المغلقة Closed-loop Control Systems

في نظم التحكم ذات الحلقة المغلقة يتم توليد إشارة التحكم بعد مقارنة إشارة الخرج والتي تعبر عن القيمة الفعلية للكمية المراد التحكم فيها مع إشارة دخل مرجعي (تسمى أيضاً نقطة الضبط) حيث تمثل القيمة المرغوبة للخرج. وبالتالي فإن إشارة التحكم تتغير إذا ما حدث أي تغيير في خرج النظام أو في محيطه أو في معاملاته. لذلك فإن أنظمة التحكم ذات الحلقة المغلقة تحتوي على عنصر تغذية خلفية بالإضافة إلى وجود عنصر مقارنة ويطلق عليها أحياناً نظم التحكم ذات التغذية الخلفية Feedback Control System.





ويبين شكل (11-1) الرسم التخطيطي block diagram لنظام تحكم ذو حلقة مغلقة، وفيه يتم توليد إشارة الخطأ  $E$  وهي الفرق بين إشارتي الدخل المرجعي و التغذية الخلفية والتي تكون بمثابة إشارة الدخل للتحكم controller والذي بدوره يعطي إشارة التحكم للمشغل ومن ثم النظام المراد التحكم فيه plant للعمل على تقليل قيمة الخطأ و ضبط الخرج عند القيمة المطلوبة. وغالباً ما يكون عنصر التغذية الخلفية عبارة عن حساس يقوم بتحويل الخرج إلى إشارة تماثل إشارة الدخل في الوحدات والكميات حتى يمكن مقارنة الدخل والخرج في عنصر المقارنة. ويطلق على إشارة الدخل هنا بالدخل المرجعي حيث يتم مقارنته مع إشارة التغذية الخلفية التي تعبر عن القيمة الفعلية للخرج. وقد يكون المقارن عبارة عن عنصر الكتروني مثل مكبر العمليات Operational Amplifier أو عناصر مقارنة ميكانيكية وغيرها.

### 3.6.1 مقارنة بين أنظمة التحكم ذات الحلقة المفتوحة والمغلقة

- أ- تتميز أنظمة التحكم ذات الحلقة المغلقة باستخدام التغذية الخلفية التي تجعل النظام المتحكم فيه قليل الحساسية للاضطرابات الخارجية والتغيرات الداخلية في معاملات النظام. وعلى ذلك فإنه يمكن الحصول على الدقة المرغوبة في مخرجات النظام، وهذا غير ممكن عند استخدام نظم التحكم ذي الحلقة المفتوحة
- ب- ومن ناحية استقرار وتوازن الأنظمة فإن التحكم ذا الحلقة المفتوحة يعتبر أسهل في بنائه عن التحكم ذي الحلقة المغلقة، حيث يتطلب التحكم ذو الحلقة المغلقة تصميمًا خاصًا للحفاظ على الاستقرار مع الدقة.
- ج- يستخدم نظام التحكم ذو الحلقة المفتوحة عندما يكون الدخل معروفاً ومحددًا وليست هناك أية اضطرابات متوقعة. وتظهر أهمية وأفضلية نظم التحكم ذو الحلقة المغلقة عند احتمال وجود اضطرابات غير محددة أو تغيرات غير معروفة في معاملات عناصر النظام أو محيطه. في بعض الحالات يستخدم التحكم ذا الحلقة المفتوحة لتقليل النفقات، وفي حالات أخرى يكون الجمع بين التحكم ذي الحلقة المفتوحة والتحكم ذي الحلقة المغلقة أقل تكلفة مع إعطاء نتائج وخصائص مرضية لنظام التحكم.



## 7.1 دالة التحويل Transfer Function

دالة التحويل أو النقل Transfer Function تعرف بأنها النسبة بين التحويل اللابلاسي للخرج إلى التحويل اللابلاسي للدخل عندما تكون جميع القيم الابتدائية Initial Conditions مساوية للصفر (منعدمة). وتكتب الصورة الرياضية لدالة التحويل (النقل) على النحو التالي:

$$\text{دالة التحويل} = \frac{\text{التحويل اللابلاسي لإشارة الخرج}}{\text{التحويل اللابلاسي لإشارة الدخل}}$$

### 1.7.1 إيجاد دالة التحويل من المعادلة التفاضلية

نفرض أن نظام تحكم مُعرف بالمعادلة التفاضلية التالية

$$a_n \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + a_{n-2} \frac{d^{n-2} c(t)}{dt^{n-2}} + \dots + a_1 \frac{dc(t)}{dt} + a_0 c(t) \quad (21-1)$$

$$= b_m \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} r(t)}{dt} + b_{m-2} \frac{d^{m-2} r(t)}{dt} + \dots + b_1 \frac{dr(t)}{dt} + b_0 r(t) \quad (n \geq m)$$

حيث أن:

$c$  = output of the system      خرج النظام

$r$  = input of the system      دخل النظام

وبأخذ التحويل اللابلاسي لطرفي المعادلة السابقة مع الأخذ في الاعتبار أن جميع القيم الابتدائية مساوية للصفر نحصل على:

$$\begin{aligned} & (a_n s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots + a_1 s + a_0) C(s) \\ & = (b_m s^m + b_1 s^{m-1} + b_2 s^{m-2} + \dots + b_{m-1} s + b_0) R(s) \end{aligned} \quad (22-1)$$

من تعريف دالة التحويل نجد أن

$$T. F. = G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + b_{m-2} s^{m-2} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + a_{n-2} s^{n-2} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (23-1)$$



## مثال 8-1

أوجد دالة نقل النظام الذي يمثله النموذج الرياضي الآتي:

$$0.1 c''(t) + 2c'(t) + c(t) = 4r(t)$$

الخطوة الأولى : نوجد التحويل اللابلاسي لطرفي المعادلة التفاضلية للنظام باعتبار أن الظروف الابتدائية مساوية للصفر فنحصل على

$$0.1S^2C(s) + 2SC(s) + C(s) = 4R(s)$$

الخطوة الثانية: خذ  $C(s)$  كعامل مشترك في الطرف الأيسر من المعادلة نحصل على

$$(0.1S^2 + 2S + 1)C(s) = 4R(s)$$

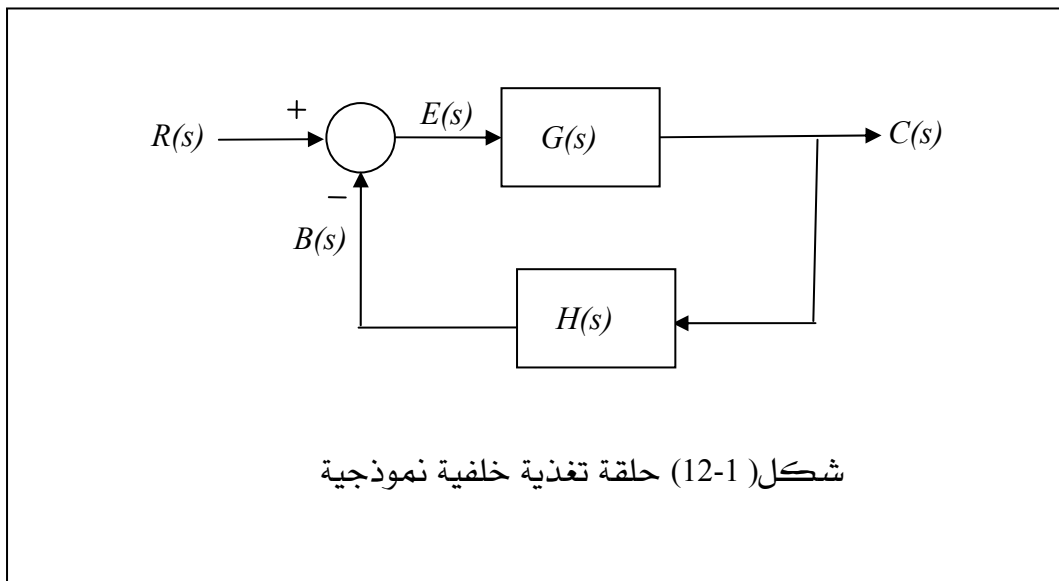
الخطوة الثالثة : أوجد دالة نقل النظام بقسمة تحويلات لابلاس للخرج  $C(s)$  على تحويلات لابلاس للدخل  $R(s)$ .

$$T.F.(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{4}{0.1S^2 + 2S + 1}$$

## 2.7.1 إيجاد دالة التحويل لحلقة تغذية خلفية نموذجية

الشكل (12-1) يوضح مخططاً صندوقياً لحلقة تغذية خلفية نموذجية. دعنا

الآن نوجد دالة التحويل لحلقة تغذية خلفية نموذجية باتباع الخطوات التالية.





بالرجوع إلى الشكل يمكننا كتابة العلاقات التالية:

$$C(s) = E(s)G(s) \quad \text{I}$$

$$E(s) = R(s) - B(s) \quad \text{II}$$

$$B(s) = C(s)H(s) \quad \text{III}$$

بالتعويض من المعادلة III في المعادلة II ثم تعويض الناتج في المعادلة I نحصل على

$$C(s) = [R(s) - C(s)H(s)]G(s)$$

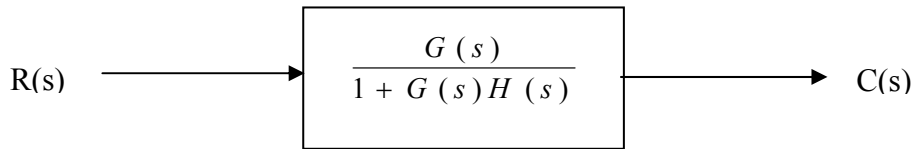
بإعادة ترتيب المعادلة السابقة نحصل على

$$C(s)[1 + G(s)H(s)] = R(s)G(s)$$

بقسمة  $C(s)$  على  $R(s)$  نحصل على دالة نقل الحلقة المغلقة المثالية

$$TF(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (24-1)$$

بناءً على ما وصلنا إليه يمكننا تبسيط المخطط الصندوقي للنظام المثالي المغلق ليصبح كما يلي:-



دالة النقل لحلقة تغذية خلفية نموذجية

علماً بأن

$G(s)$  تسمى دالة تحويل المسار الأمامي forward path transfer function وتعطى بالعلاقة

التالية

$$G(s) = \frac{C(s)}{E(s)}$$

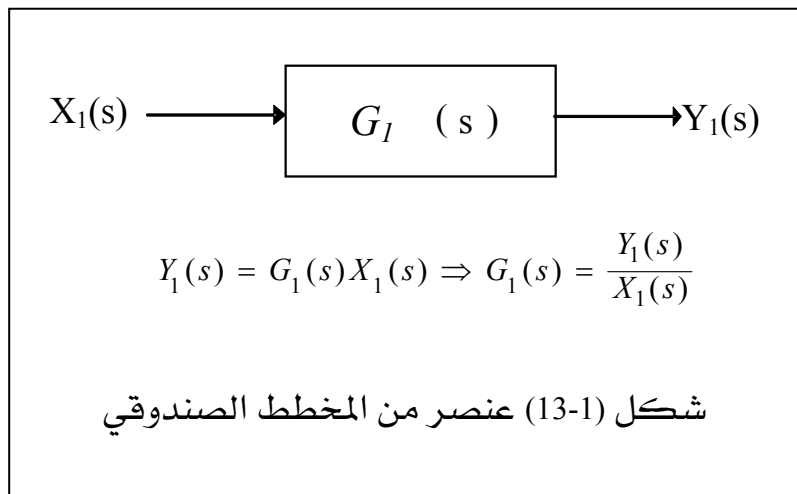
$H(s)$  تسمى دالة تحويل التغذية الخلفية feedback transfer function وتعطى بالعلاقة التالية

$$H(s) = \frac{B(s)}{C(s)}$$



## 8.1 المخطط الصندوقي Block Diagram

المخطط الصندوقي Block diagram هو أحد الطرق البسيطة التي تستخدم لتمثيل نظم التحكم باستخدام المخططات (الرسم التخطيطي) والتي تيسر فهم مكونات وعناصر النظام مع توضيح وظيفة كل عنصر من هذه المكونات وكيفية سريان الإشارات المختلفة بالإضافة إلى العلاقة بين العناصر بعضها البعض. عند تمثيل النظام بالمخطط الصندوقي يتم استخدام صناديق blocks كل صندوق يعبر عن عنصر من عناصر النظام وعادة تكتب داخل كل صندوق دالة التحويل transfer function والتي تحدد علاقة إشارة دخل العنصر بإشارة خرجه. كما تستخدم الخطوط المستقيمة لتوضيح مسارات الإشارات و أسهم لبيان اتجاه سريان الإشارات المختلفة. الشكل (13-1) يوضح كيفية تمثيل أحد عناصر النظام كجزء من المخطط الصندوقي.



وتتميز طريقة استخدام المخطط الصندوقي لتمثيل أنظمة التحكم بأنه يمكن الحصول على الرسم التخطيطي الكامل لنظام التحكم بتوصيل الصناديق الممثلة للمكونات حسب سريان إشارات التحكم. ومن ثم فإنه يمكن تحديد ومعرفة تأثير كل جزء على خصائص نظام التحكم الكلي. و بصفة عامة فإنه قد يكون من الأسهل متابعة طريقة عمل نظام التحكم بفحص المخطط الصندوقي للنظام بدلا من فحص النظام الحقيقي نفسه. ويحتوي الرسم التخطيطي للمخطط الصندوقي على السلوك الديناميكي للأنظمة وليس على تركيبها الطبيعي. وفي النهاية يتم اختصار المخطط الصندوقي كله إلى دالة تحويل شاملة تعبر عن العلاقة بين دخل وخرج النظام ككل.

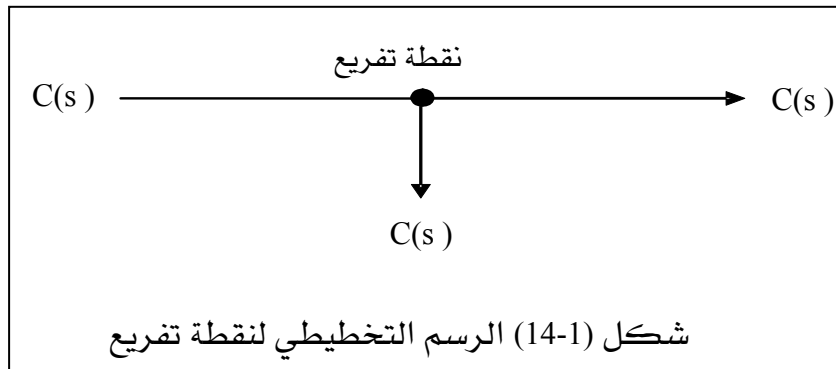


### 1.8.1 عناصر المخطط الصندوقي Elements of Block Diagram

من توضيحنا السابق للمخطط الصندوقي نجد أنه يتكون من مجموعة من الصناديق ترتبط بعضها البعض بخطوط مستقيمة ونقاط تفريع ووصلات تجميع.

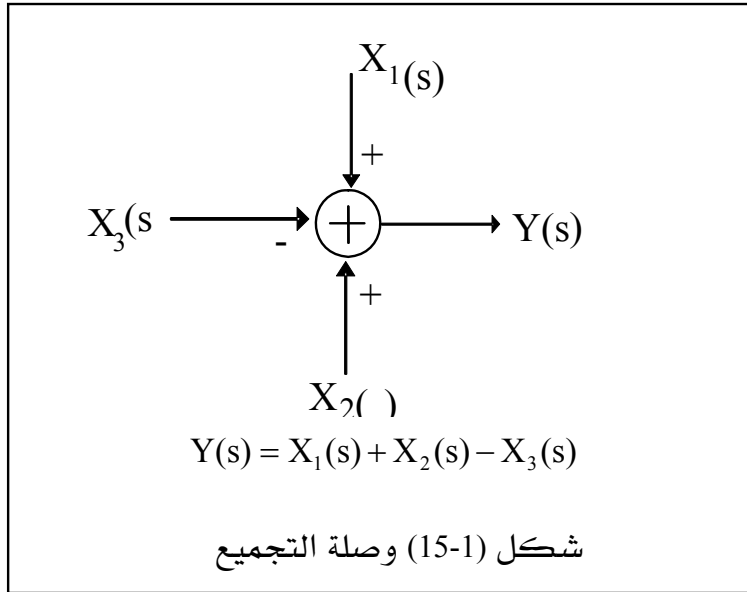
(أ) **الصناديق Blocks**: تستخدم الصناديق لتمثيل عناصر النظام

(ب) **نقاط التفريع Branch points**: عند نقطة التفريع تتوجه الإشارة إلى اتجاهين أو أكثر كما هو مبين بالشكل (14-1). لاحظ أن كل إشارة من الإشارات الخارجة من نقطة التفريع لها نفس قيمة ووحدات إشارة الدخل لنفس النقطة.



(ج) **وصلات التجميع Summing Junctions**: تستخدم وصلات التجميع لإيجاد المجموع الجبري لإشارتين أو أكثر (لإيجاد مجموعهم أو الفرق بينهم) كما هو مبين في الشكل (15-1). ويعتبر المقارن أحد وصلات التجميع التي تعمل على توفير الفرق بين إشارتي الدخل المرجعي وإشارة الخرج.





د) **الخطوط المستقيمة Straight Line**: تستخدم الخطوط المستقيمة للربط بين عناصر النظام

المختلفة كما أنها توضح المسارات المختلفة لسريان الإشارات.

هـ) **الأسهم Arrows**: تستخدم الأسهم لتوضيح اتجاه سريان الإشارات.

ولبناء المخطط الصندوقي نتبع الخطوات التالية:

- يتم كتابة المعادلات التفاضلية أو الجبرية التي تصف أجزاء النظام كل جزء على حدة.
- يتم إجراء التحويل اللابلاسي لهذه المعادلات مع الأخذ في الاعتبار أن جميع القيم الابتدائية تكون صفراً.
- يتم إيجاد دالة التحويل التي تصف كل جزء من أجزاء النظام.
- يتم رسم صندوق ليمثل كل جزء مع كتابة دالة التحويل الخاصة به بداخله مع بيان إشارات الدخل والخرج لكل صندوق .
- يتم تجميع هذه الصناديق عن طريق توصيلها مع بعضها بأسهم لبيان إشارات الدخل والخرج لجميع الأجزاء للحصول على الرسم التخطيطي النهائي للنظام .



### 2.8.1 قواعد تبسيط المخطط الصندوقي Block Diagram Simplifications

في أنظمة التحكم الكبيرة يوجد العديد من العناصر التي تتصل مع بعضها على التابع (التوالي) أو التي تتصل على التوازي بالإضافة إلى عناصر للتغذية الخلفية مما قد يتسبب في وجود تداخلات عديدة بين عناصر النظام مما نحتاج إلى فك هذه التداخلات حتى يتسنى لنا إيجاد دالة التحويل أو العلاقة بين إشارات الدخل والخرج ؛ لذا يجب الإلمام بالقواعد التي تيسر عملية تبسيط المخططات الصندوقية والتي تتمثل في نقل نقطة تفرع أو وصلة تجميع أمام أو خلف صندوق وذلك لفك التداخلات. الجدول التالي يوضح بالتفصيل القواعد المستخدمة لاختصار أو تبسيط المخططات الصندوقية لنظم التحكم حيث يوضح الرسم التخطيطي الأصلي والمكافئ له في كل حالة. ويلاحظ أن الحرف  $G$  استخدم لتمثيل دالة التحويل للعنصر و  $H$  للتغذية العكسية أما الأحرف  $X, Y, Z$  ترمز إلى أي إشارات دالة في المتغير  $S$ .



الإجراء	العلاقة الرياضية التي تربط الدخل بالخرج	المخطط الأصلي	المخطط المكافئ
1 عنصران متصلان على التوالي	$Y = (G_1 G_2)X$		
2 عنصران متصلان على التوازي	$Y = G_1X \pm G_2X$		
3 حذف مستطيل (عنصر) من أحد المسارات الأمامية	$Y = G_1X \pm G_2X$		
4 نظام تحكم ذو حلقة تغذية مغلقة	$Y = G_1(X \mp G_2)Y$		
5 حذف مستطيل (عنصر) من أحد المسارات الخلفية	$Y = G_1(X \mp G_2)Y$		

قواعد تحويل المخطط الصندوقي (يتبع)

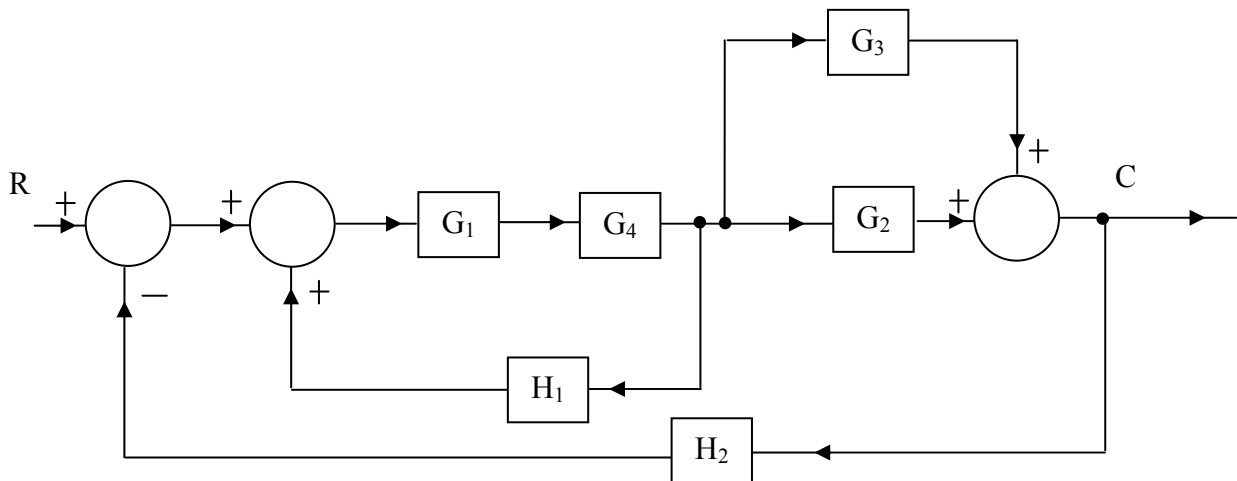


تابع قواعد تحويل المخطط الصندوقي

6	نقل وصلة تجميع أمام صندوق	$Z = GX \pm Y$		
7	نقل وصلة تجميع خلف صندوق	$Z = G(X \pm Y)$		
8	نقل نقطة تفريع أمام صندوق	$Y = GX$		
9	نقل نقطة تفريع خلف صندوق	$Y = GX$		

مثال: 9-1

بسّط المخطط الصندوقي الآتي إلى أبسط صورة ثم اوجد دالة التحويل الكلية للنظام.



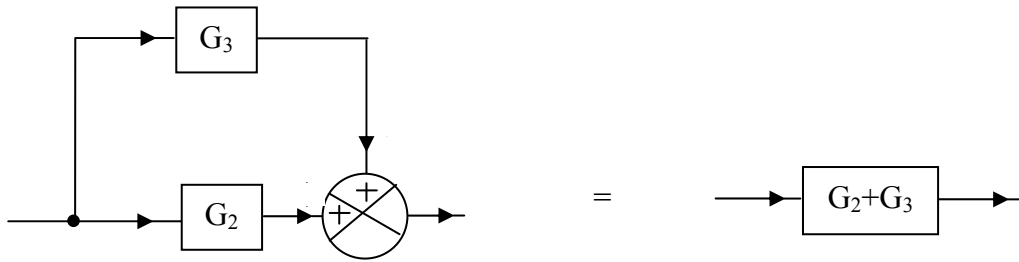


الحل:

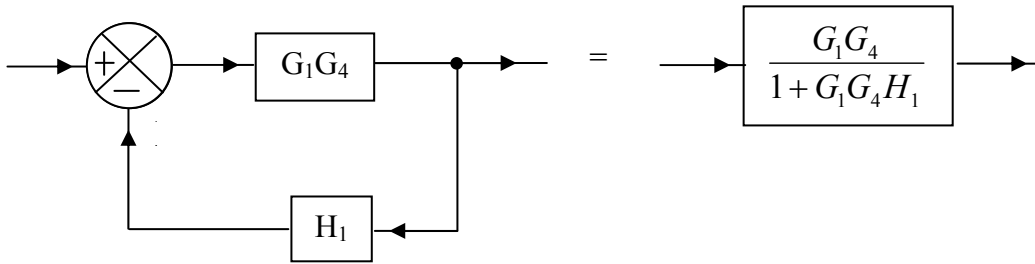
١- استبدال عنصري التوالي  $G_1, G_4$  بعنصر مكافئ كما يلي:



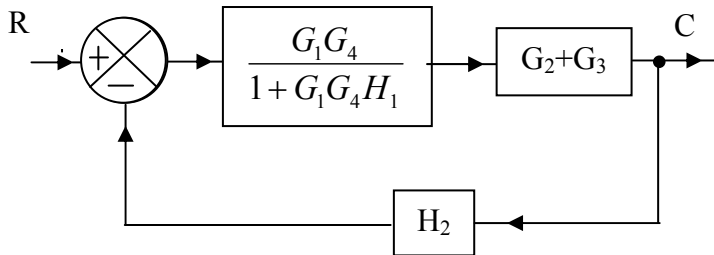
٢- استبدال عنصري التوازي  $G_2, G_3$  بعنصر مكافئ كما يلي:



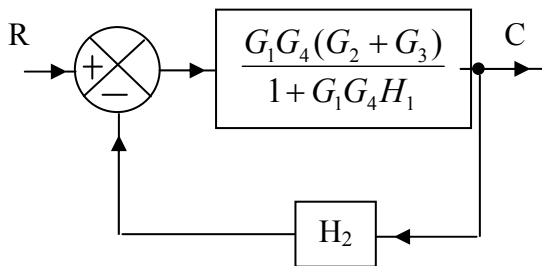
٣- استبدال نظام الحلقة المغلقة المثالي بعنصر مكافئ كما يلي:



٤- مما سبق تصبح الدائرة كما يلي



٥- استبدال عنصري التوالي بعنصر مكافئ لتصبح الدائرة كما يلي





الشكل السابق عبارة عن المخطط الصندوقي لنظام تحكم مغلق مثالي دالة نقله تعطى كما يلي

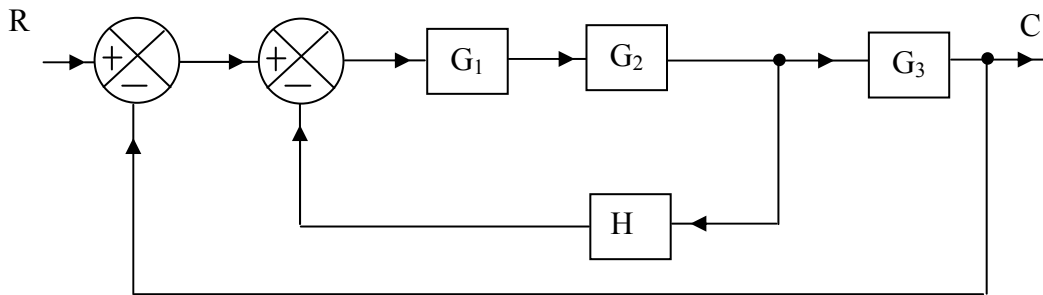
$$G(s) = \frac{C}{R} = \frac{G_1 G_4 (G_2 + G_3)}{1 + \frac{G_1 G_4 (G_2 + G_3) H_2}{1 + G_1 G_4 H_1}}$$

والتي يتم تبسيطها بضرب كلاً من البسط والمقام في  $(1 + G_1 G_4 H)$  لتصبح دالة التحويل للنظام كما يلي

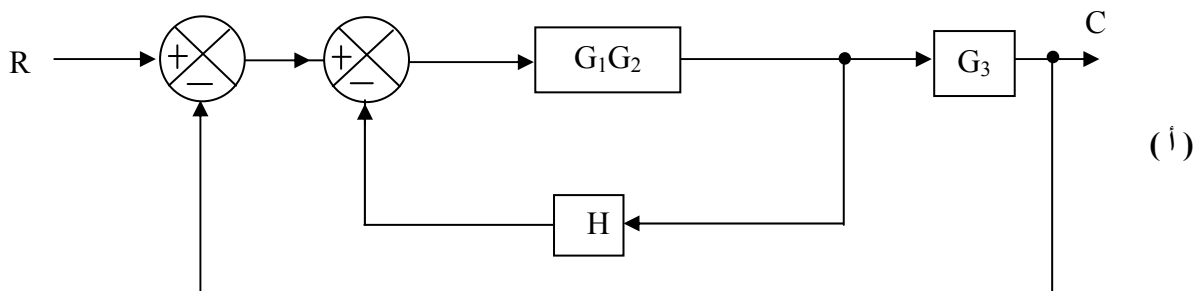
$$G(s) = \frac{G_1 G_4 (G_2 + G_3)}{1 + G_1 G_4 H_1 + G_1 G_4 (G_2 + G_3) H_2}$$

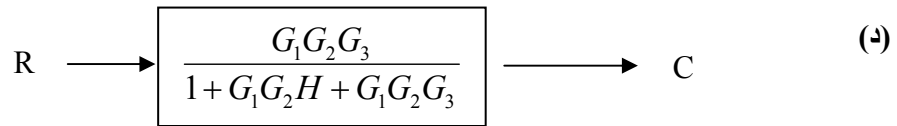
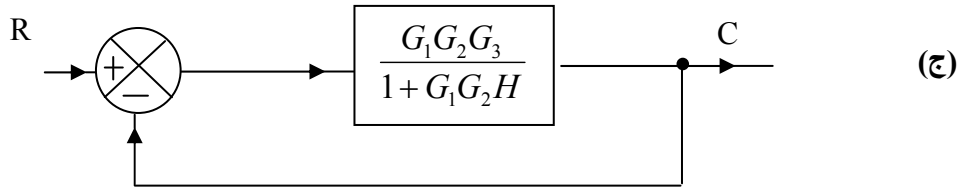
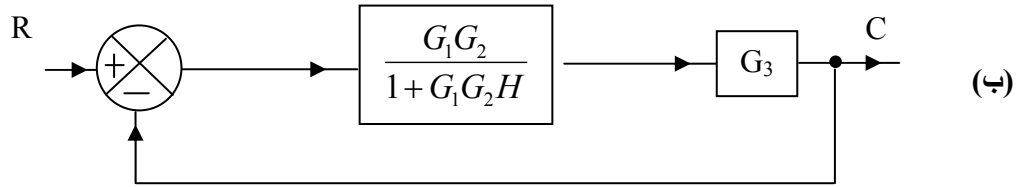
### مثال 10-1

استخدم قواعد تبسيط واختصار المخططات الصندوقية لإيجاد دالة النقل لنظام التحكم ذو المخطط الصندوقي التالي.



**الحل:** باستخدام نفس القواعد السابقة نوجد دالة التحويل





من الشكل (ج) نوجد دالة التحويل وهي:

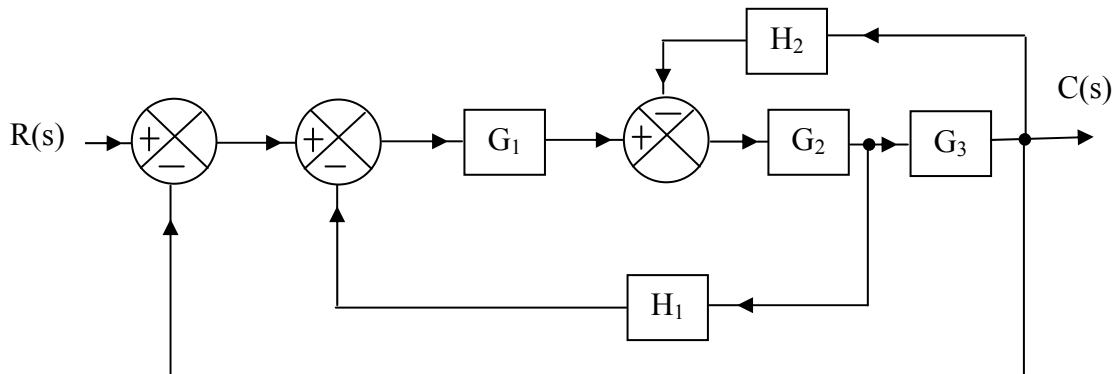
$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\frac{G_1G_2G_3}{1+G_1G_2H}}{1 + \frac{G_1G_2G_3}{1+G_1G_2H}}$$

بضرب كلاً من البسط والمقام في  $(1 + G_1G_2H)$  نحصل على:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1G_2G_3}{1 + G_1G_2H + G_1G_2G_3}$$

### مثال 11-1

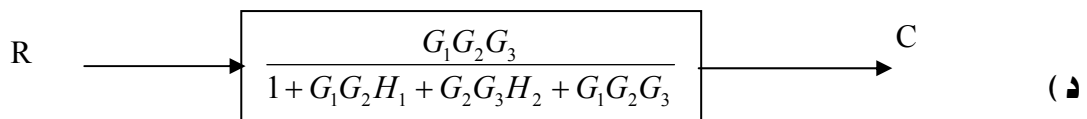
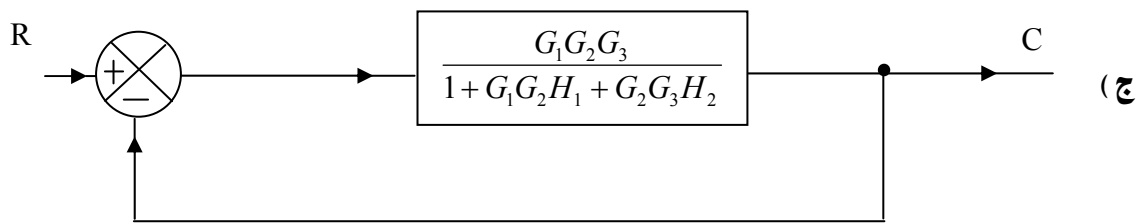
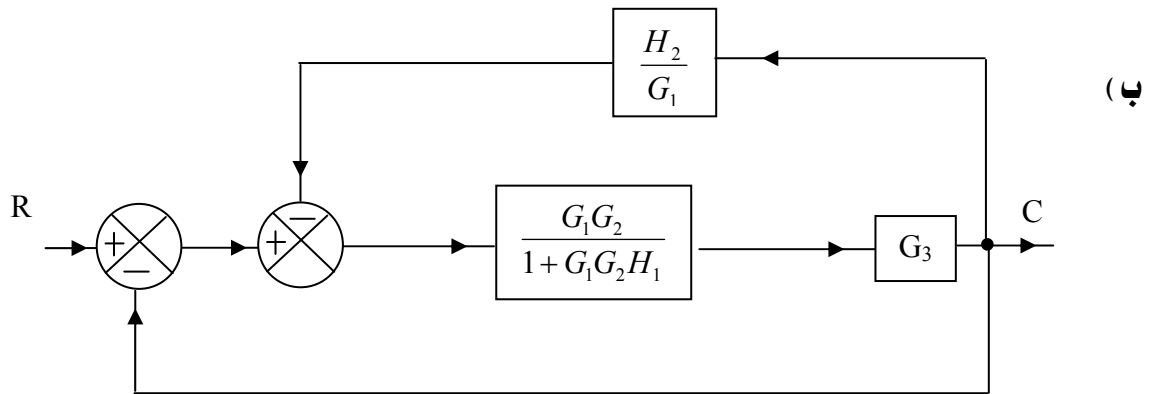
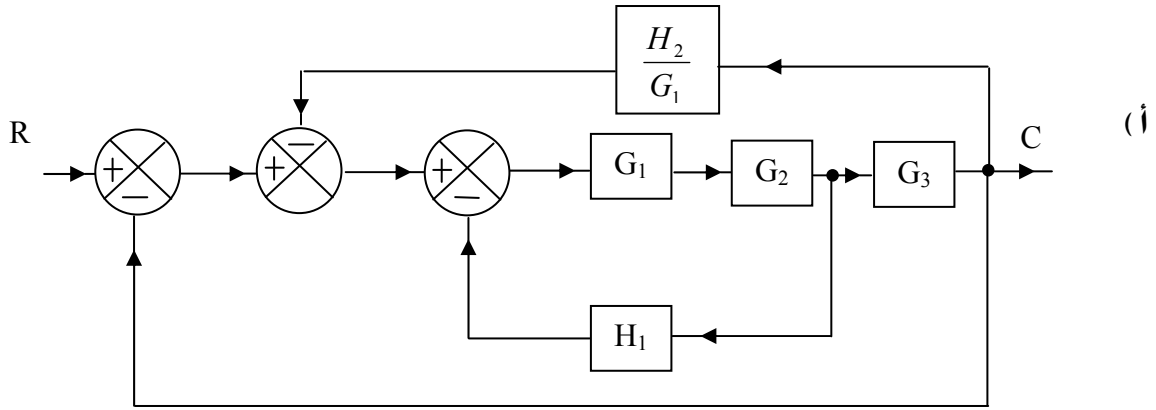
اختصر المخطط الصندوقي التالي إلى أبسط صورة ثم احسب دالة التحويل  $\frac{C}{R}$ .





الحل:

كما تلاحظ في الشكل السابق هناك تداخل بين المسارات المغلقة وبالتالي يجب فك هذا التداخل بنقل وصلة التجميع قبل العنصر  $G_1$  كما يلي :





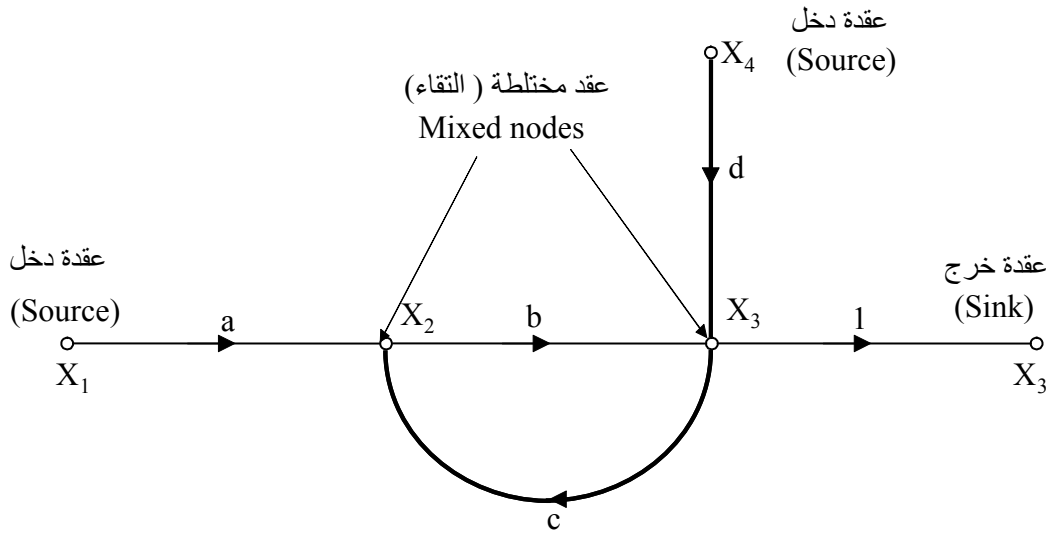


أي أن دالة نقل النظام:

$$G(s) = \frac{C}{R} = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_1 G_2 H_1 + G_2 G_3 H_2 + G_1 G_2 G_3}$$

### 9.1 مخطط تدفق الإشارة Signal Flow Graph

يعتبر مخطط تدفق (سريان) الإشارات أحد الأشكال المبسطة للمخطط الصندوقي. إن مخطط تدفق الإشارة هو أحد وسائل الرسم التخطيطي لتصوير علاقات الدخل بالخرج بين متغيرات مجموعة من المعادلات الجبرية الخطية. ويتكون مخطط التدفق من عدة نقاط اتصال (عقد) حيث تمثل كل نقطة اتصال متغيراً من متغيرات النظام. تتصل هذه العقد ببعضها بواسطة أفرع وكل فرع متصل بين نقطتي التقاء يعتبر كإشارة ويصاحب هذه الأفرع معامل ضرب (نسبة كسب) الإشارة واتجاهها. ويتم تحديد اتجاه سريان الإشارة بسهم يوضع في منتصف الفرع ويكتب فوقه معامل الضرب. ويكون اتجاه تدفق الإشارات في الأفرع في اتجاه الأسهم فقط بالإضافة إلى نقطة للدخل وأخرى للخروج كما هو مبين بالشكل (16-1).



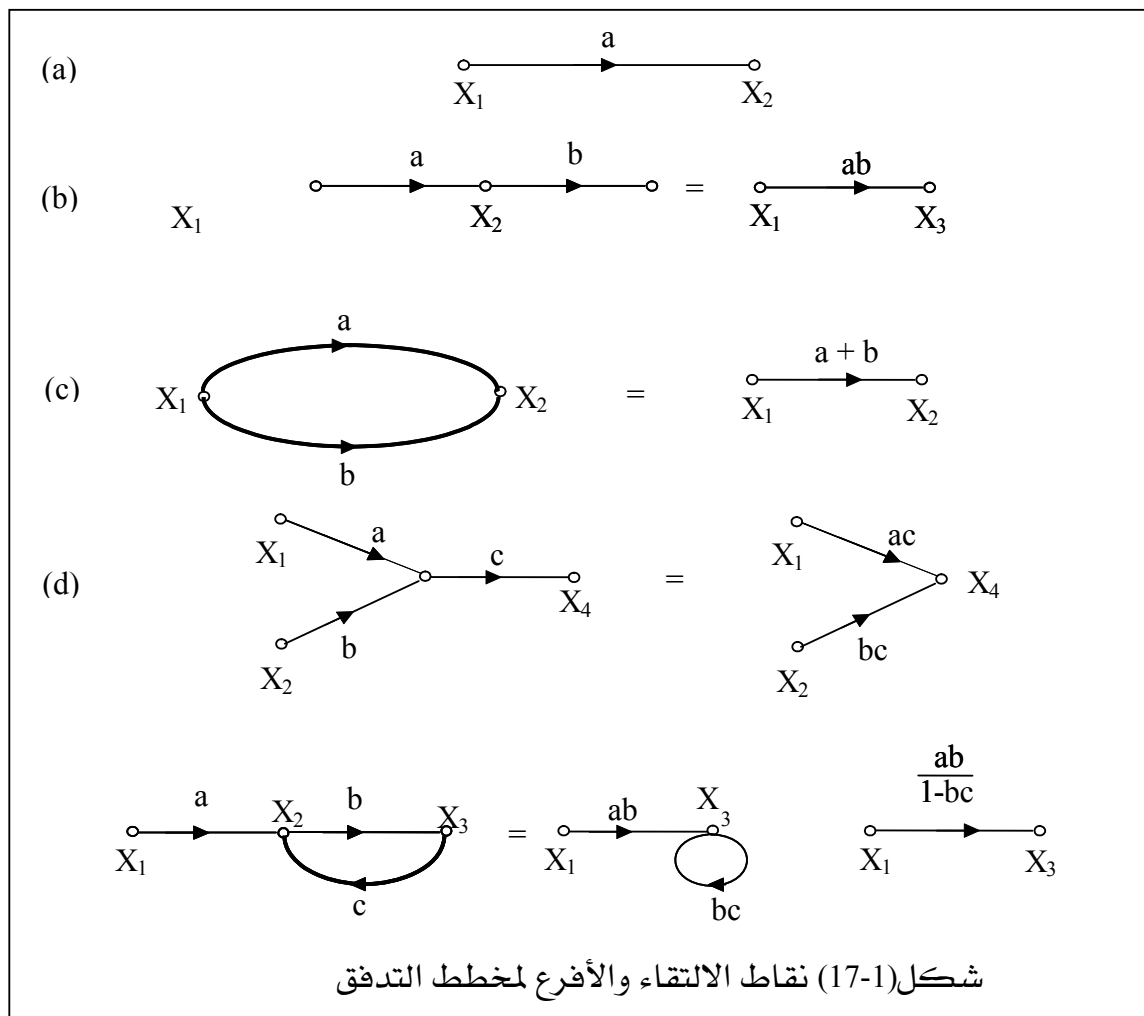
شكل (16-1) مكونات مخطط تدفق سريان الإشارة



وعلى ذلك فإن مخطط تدفق الإشارة يوضح عن طريق الرسم سريان أو تدفق الإشارات من نقطة معينة في النظام إلى نقطة أخرى موضحاً بذلك العلاقات المختلفة بين الإشارات. وعلي الرغم من أن مخطط تدفق الإشارات يحتوي على نفس المعلومات التي يحتوي عليها المخطط الصندوقي لكنه يتميز بسهولة الحصول على العلاقة بين متغيرات الدخل والخرج دون الحاجة إلى تبسيط أو اختصار كما بالمخطط الصندوقي وذلك باستخدام ما يسمى بقاعدة ماسون Mason's rule .

### 1.9.1 قواعد مخطط تدفق الإشارة Basics of Signal Flow Graph

لإيجاد العلاقة بين الدخل والخرج لنظام تحكم عن طريق مخطط التدفق فإن قاعدة ماسون من أسهل الطرق التي تستخدم لذلك. أو استخدام عملية الاختصار لمخطط التدفق الكبير إلى مخطط تدفق آخر يحتوي فقط على نقطة التقاء واحدة للدخل وأخرى للخروج. وفيما يلي سوف نعرض القواعد المستخدمة لذلك كما هو مبين بالشكل (17-1).





وبدراسة الشكل (17-1) نجد الآتي:

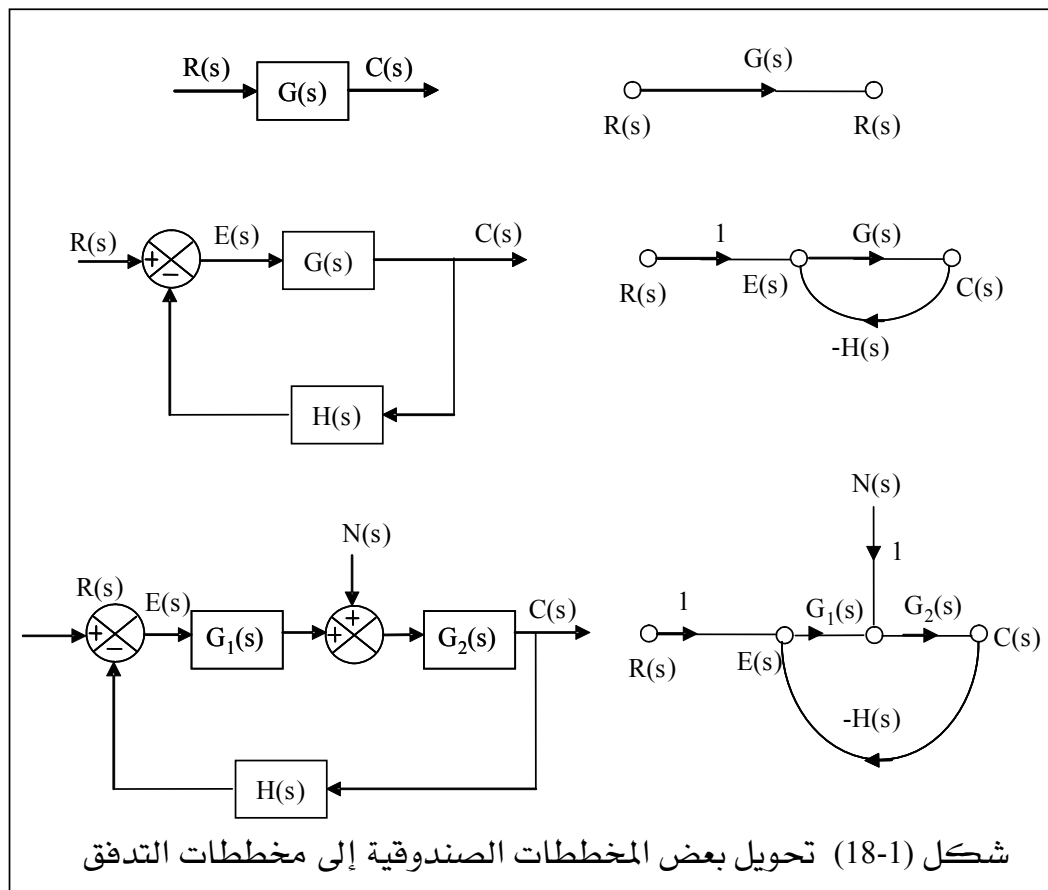
- ١- قيمة نقطة الخرج  $X_2$  والمبينة بالشكل (a17-1) تساوي  $X_2 = aX_1$
- ٢- مجموع الإشارات الخاصة بالأفرع المتصلة على التوالي تساوي حاصل ضربهم كما في شكل (b 17-1).
- ٣- مجموع الإشارات الخاصة بالأفرع المتصلة على التوازي تساوي مجموعها كما في شكل (c 17-1)
- ٤- نقطة الالتقاء يمكن أن تحذف كما في الشكل (d 17-1)
- ٥- نقطة الالتقاء يمكن أن تحذف كما في الشكل (e 17-1) مع ملاحظة أن :

$$x_3 = bx_2, \quad x_2 = ax_1 + cx_3$$

$$x_3 = abx_1 + bcx_3 \quad \text{: أي أن}$$

$$x_3 = [ab / (1 - bc)] x_1 \quad \text{: أو}$$

و الشكل (18-1) يوضح بعض المخططات الصندوقية ومخططات التدفق التي تكافئها.





### 2.9.1 قاعدة ماسون Mason's Rule

وهي عبارة عن صيغة رياضية تعطي الكسب الكلي للنظام  $G$  وهي تمثل دالة التحويل (النقل) أو نسبة الخرج إلى الدخل و تستخدم قاعدة ماسون للحصول على دالة التحويل في الحالات التي يكون فيها مخطط التدفق معقداً. و المعادلة التالية تعطي الصيغة الرياضية لقاعدة ماسون:

$$G = \frac{1}{\Delta} \sum_k p_k \Delta_k \quad (25-1)$$

$p_k$  = path gain of  $k$ th forward path

كسب المسار الأمامي رقم  $K$

$\Delta$  = determinant of graph

يتم حسابها من المخطط

وتحسب كما يلي:

$\Delta = 1 - \{ \text{مجموع كسب جميع المسارات المغلقة كل على حده} \} + \{ \text{مجموع حاصل ضرب كسب كل مسارين مغلقين غير متماسين} \} - \{ \text{ثلاثة مسارات مغلقة غير متماسة} \} + \dots$   
أو بصيغة أخرى:

$$\Delta = 1 - \sum_a L_a + \sum_{b,c} L_b L_c - \sum_{d,e,f} L_d L_e L_f + \dots \quad (26-1)$$

حيث إن:

$$\text{مجموع كسب جميع المسارات المغلقة} = \sum_a L_a$$

$$\text{مجموع حاصل ضرب كسب كل مسارين مغلقين غير متماسين} = \sum_{b,c} L_b L_c$$

$$\text{مجموع حاصل ضرب كسب كل ثلاثة مسارات مغلقة وغير متماسة} = \sum_{d,e,f} L_d L_e L_f$$

متماسة

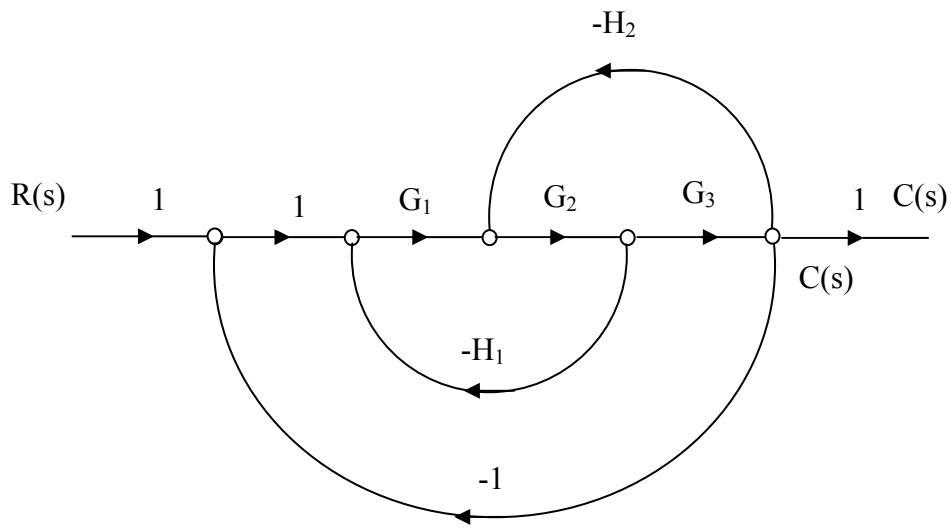
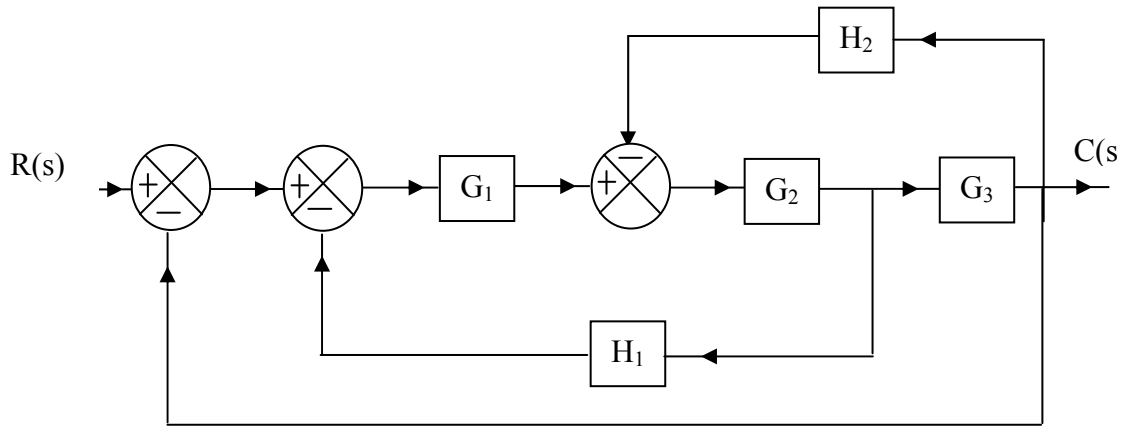
$$\Delta_k = \text{قيمة } \Delta \text{ لكل المسارات ماعدا التي تمس المسار } k$$

ولتوضيح كيفية استخدام قاعدة ماسون لإيجاد دالة التحويل لنظم التحكم فسوف نقوم بحل بعض الأمثلة.



## مثال 12-1

الشكل التالي يبين المخطط الصندوقي لنظام التحكم الذي تم إيجاد دالة نقله باستخدام قواعد تبسيط المخطط الصندوقي ويليه مخطط تدفق الإشارة المكافئ له. استخدام قاعدة ماسون لإيجاد دالة التحويل الكلية  $\frac{C(s)}{R(s)}$ .



من مخطط التدفق نجد أن:

١- يوجد مسار واحد أمامي هو:

$$P_1 = G_1 G_2 G_3$$

٢- توجد ثلاثة مسارات مغلقة هي:

$$L_1 = -G_1 G_2 H_1$$

$$L_2 = -G_2 G_3 H_2$$

$$L_3 = -G_1 G_2 G_3$$



٣- جميع المسارات المغلقة تمس بعضها البعض وبالتالي فإن  $\Delta$  تحسب كمايلي :

$$\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3)$$

$$= 1 + G_1G_2H_1 + G_2G_3H_2 + G_1G_2G_3$$

٤- جميع المسارات المغلقة تمس المسار الأمامي  $P_1$  فتحسب  $\Delta_1$  بحذف جميع المسارات المغلقة من معادلة  $\Delta$  كالتالي :

$$\Delta_1 = 1$$

باستخدام قاعدة ماسون فان دالة التحويل الكلية والتي تمثل العلاقة بين الدخل والخرج  $\frac{C(s)}{R(s)}$

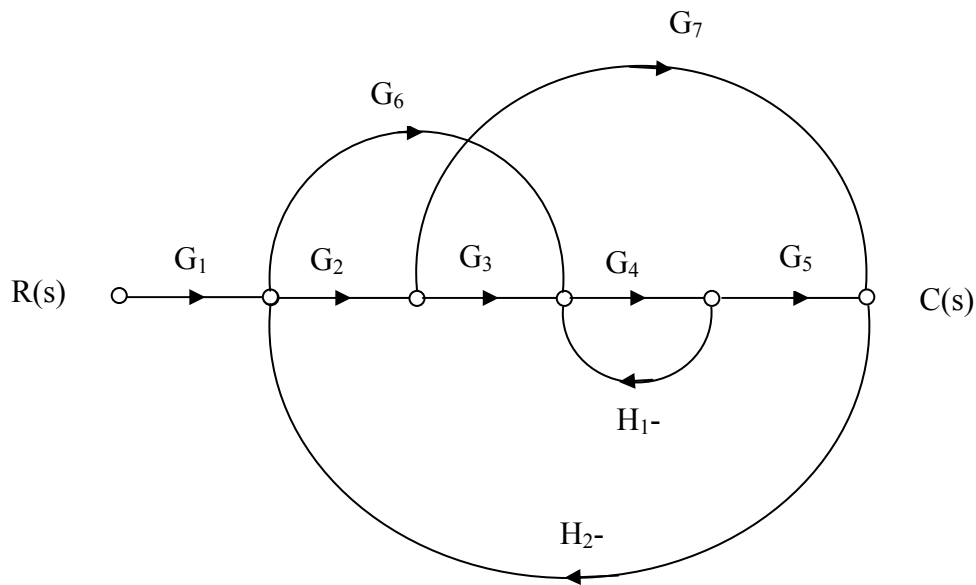
$$\frac{C(s)}{R(s)} = G = \frac{P_1\Delta_1}{\Delta}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1G_2G_3}{1 + G_1G_2H_1 + G_2G_3H_2 + G_1G_2G_3}$$

وهي نفس النتيجة التي حصلنا عليها سابقاً ولكن بمجهود أقل

### مثال 13-1

أوجد دالة التحويل الكلية لنظام التحكم الذي له مخطط سريان الإشارة التالي باستخدام قاعدة ماسون.





## الحل:

من مخطط سريان الإشارات نستنتج أن:

١- توجد ثلاثة مسارات أمامية هي:

$$P_1 = G_1 G_2 G_3 G_4 G_5$$

$$P_2 = G_1 G_6 G_4 G_5$$

$$P_3 = G_1 G_2 G_7$$

٢- توجد أربعة مسارات مغلقة هي:

$$L_1 = -G_4 H_1$$

$$L_2 = -G_2 G_7 H_2$$

$$L_3 = -G_6 G_4 G_5 H_2$$

$$L_4 = -G_2 G_3 G_4 G_5 H_2$$

٣- المساران المغلقان  $L_1$  و  $L_2$  غير متماسين و تحسب  $\Delta$  كالتالي:

$$\Delta = 1 - (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) + L_1 L_2$$

$$\Delta = 1 + G_4 H_1 + G_2 G_7 H_2 + G_6 G_4 G_5 H_2 + G_2 G_3 G_4 G_5 H_2 + G_2 G_4 G_7 H_1 H_2$$

وكذلك  $\Delta_1$  و  $\Delta_2$  و  $\Delta_3$  تحسب بحذف المسارات المغلقة التي تمس المسارات الأمامية  $P_1$  و  $P_2$  و

$P_3$  كالتالي:

جميع المسارات المغلقة تمس المسارين  $P_1$  و  $P_2$

$$\Delta_1 = \Delta_2 = 1$$

المسار المغلق  $L_1$  لا يمس المسار الأمامي  $P_3$  وبالتالي

$$\Delta_3 = 1 + G_4 H_1$$

$$G = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{P_1 \Delta_1 + P_2 \Delta_2 + P_3 \Delta_3}{\Delta}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_1 G_2 G_3 G_4 G_5 + G_1 G_6 G_4 G_5 + G_1 G_2 G_7 + G_1 G_2 G_4 G_7 H_1}{1 + G_4 H_1 + G_2 G_7 H_2 + G_6 G_4 G_5 H_2 + G_2 G_3 G_4 G_5 H_2 + G_2 G_4 G_7 H_1 H_2}$$



## تمارين

- ١- اذكر الأنواع الرئيسية لأنظمة التحكم وما الفرق بينها ؟
- ٢- اذكر مميزات وعيوب أنظمة التحكم ذات الحلقة المفتوحة
- ٣- قارن بين أنظمة التحكم ذات الحلقة المفتوحة والمغلقة
- ٤- هل نظام التحكم ذو الحلقة المغلقة أكثر دقة من مثيله ذي الحلقة المفتوحة ؟ اذكر السبب؟
- ٥- اذكر أمثلة لأنظمة التحكم ذات الحلقة المفتوحة والمغلقة في الحياة العملية بالمنزل
- ٦- أوجد التحويل اللابلاسي للدوال التالية:

(a)  $g(t) = 5te^{-5t}u(t)$

(b)  $g(t) = (t \sin 2t + e^{-2t})u(t)$

(c)  $g(t) = 2e^{-2t} \sin 2tu(t)$

(d)  $g(t) = \sin 2t \cos 2tu(t)$

- ٧- أوجد تحويل لابلاس العكسي للدوال التالية:

(a)  $G(s) = \frac{1}{s(s+2)(s+3)}$

(b)  $G(s) = \frac{10}{(s+1)^2(s+3)}$

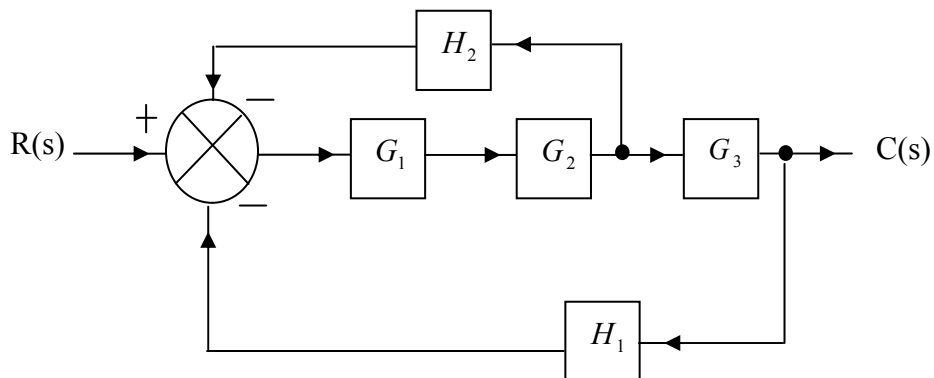
(c)  $G(s) = \frac{100(s+2)}{s(s^2+4)(s+1)}$

(d)  $G(s) = \frac{2(s+1)}{s(s^2+s+2)}$

(e)  $G(s) = \frac{1}{(s+1)^3}$

(f)  $G(s) = \frac{2(s^2+s+1)}{s(s+1.5)(s^2+5s+5)}$

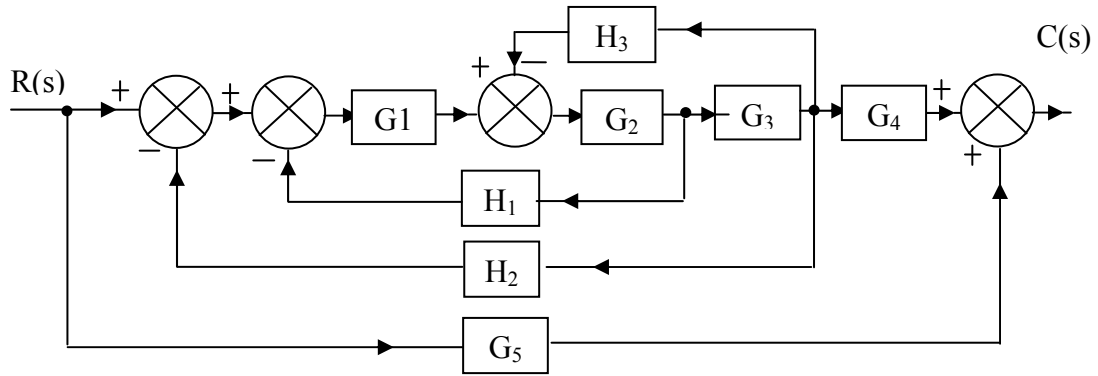
- ٨- اختصر المخطط الصندوقي التالي إلى أبسط صورة ثم أوجد دالة التحويل.



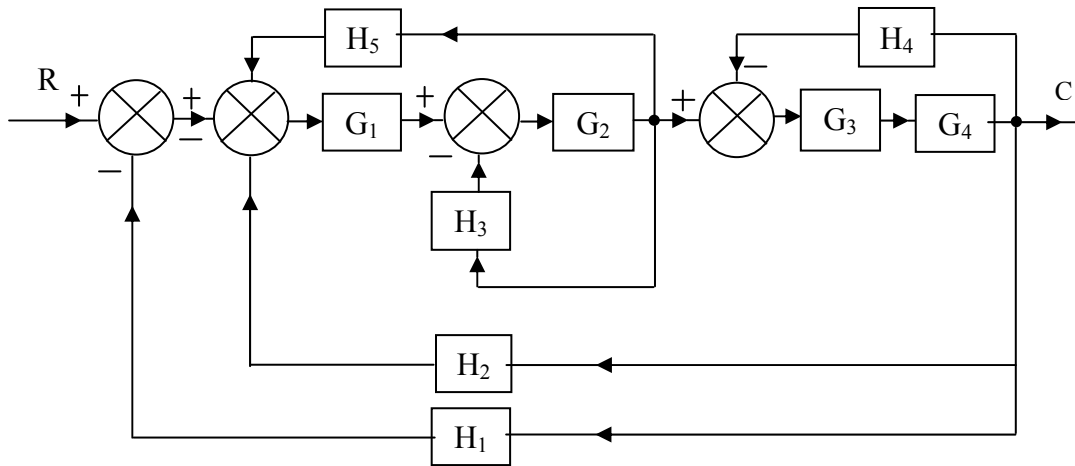




٩- في نظام التحكم ذي التغذية الخلفية المبين بالشكل أوجد دالة التحويل بعد تبسيط المخطط.

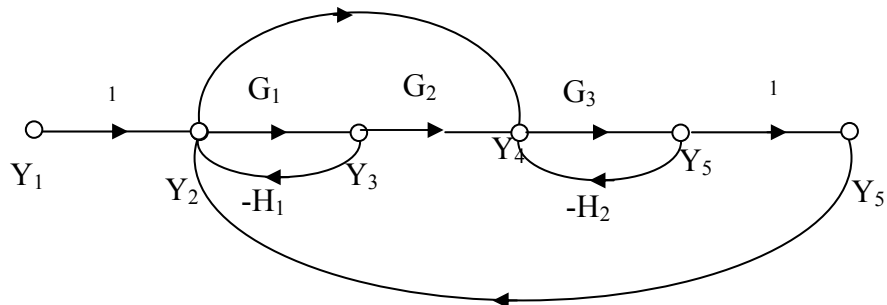


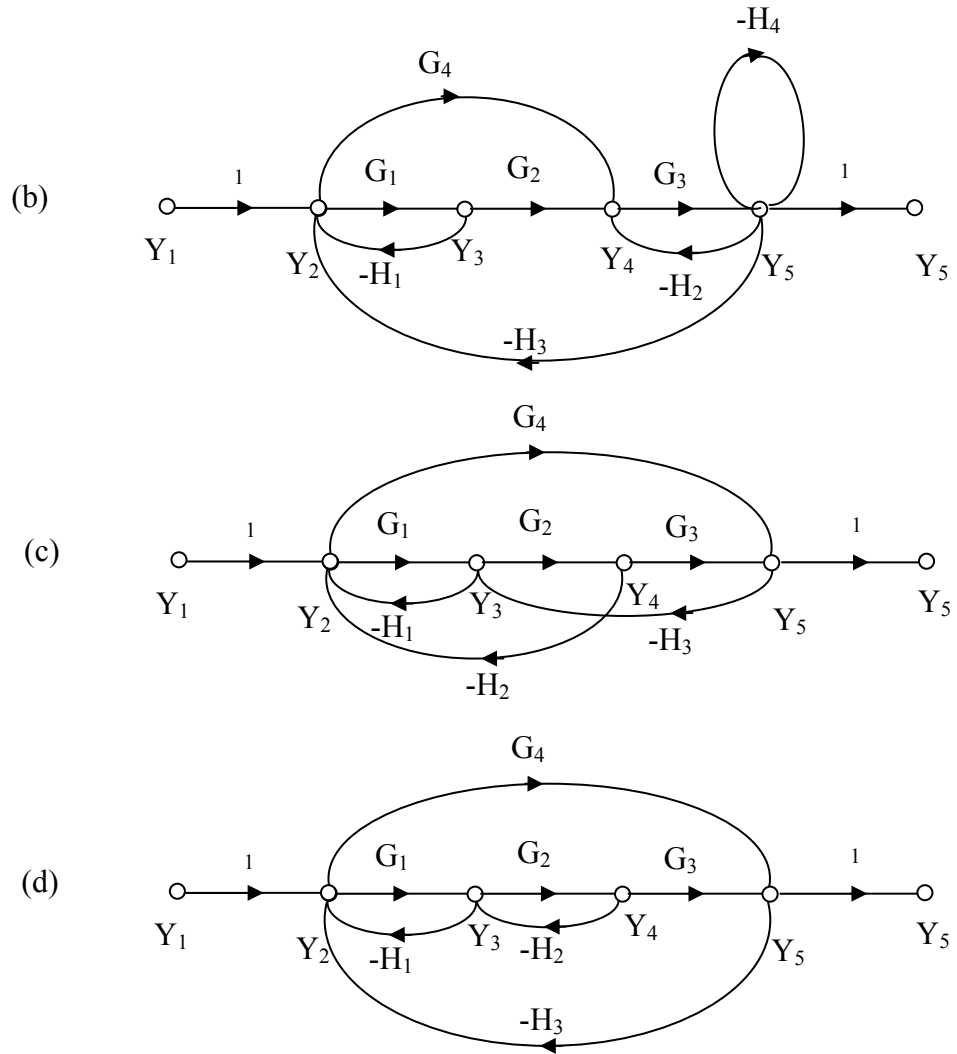
١٠- اختصر المخطط الصندوقي التالي تم احسب  $\frac{C(s)}{R(s)}$ .



٩- الشكل التالي يبين عدداً من مخططات التدفق لعدة أنظمة. استخدم قاعدة ماسون

لإيجاد دالة التحويل لكل منها  $\left( \frac{Y_5}{Y_2} \right)$







## الوحدة الثانية

### نظم التحكم الصناعية و خواصها

**الهدف العام للوحدة :**

معرفة كيفية تمثيل نظم التحكم بمعادلات تفاضلية (النمذجة) والتعرف على عناصر التحكم المختلفة ودورها في عملية التحكم.

**الأهداف التفصيلية :**

١. أن يعرف المتدرب كيفية نمذجة نظم التحكم.
٢. أن يحدد المتدرب أنواع الحاكمات الصناعية
٣. أن يصف المتدرب قاعدة التحكم لكل نوع من أنواع الحاكمات.
٤. أن يصف المتدرب كيف تعالج الحاكمات إشارة الخطأ.
٥. أن يصف المتدرب عناصر التحكم النهائية ودورها في عملية التحكم.
٦. أن يحدد المتدرب أهمية صمامات التحكم في أنظمة التحكم.
٧. أن يحدد المتدرب دور الحساسات والمبدلات في نظم التحكم.
٨. أن يحدد المتدرب دور المحرك الكهربائي في نظم التحكم.





## 1.2 مقدمة

في أنظمة التحكم الأوتوماتيكي يتم مقارنة القيمة الحقيقية للخرج مع إشارة المرجع والفرق بينهما يسمى إشارة الخطأ Error Signal أو الانحراف. وتكون إشارة الخطأ بمثابة إشارة الدخل إلى المتحكم الذي يقوم بمعالجتها ثم بعد ذلك يتم تضخيمها أو تكبيرها عن طريق مكبر لتصل إلى المشغل الذي يقوم بتفعيلها ليعمل نظام التحكم ككل على تقليل الخطأ بين الدخل والخرج أو يجعل هذا الخطأ صفراً ويصبح الخرج مساوياً للدخل. والطريقة التي يستخدمها الحاكم لإنتاج إشارة التحكم تسمى فعل الحاكم ونظراً لأن إشارة الخطأ تكون عادة ذات قدرة صغيرة فإنه في كثير من الحالات تستخدم مكبرات القدرة لتكبير قدرة هذه الإشارة حتى تصبح ذات تأثير على النظام المراد التحكم فيه.

وفي معظم أنظمة التحكم الآلي الصناعية تستخدم الكهرباء أو الموائع المضغوطة مثل الزيت أو الماء للحصول على القدرة اللازمة لتشغيل عناصر التحكم. ويمكن تقسيم أنظمة التحكم طبقاً لنوع مصدر القدرة المستخدم في التشغيل مثل:

١- أنظمة التحكم التي تعمل بالهواء المضغوط.

٢- أنظمة التحكم الهيدروليكية.

٣- أنظمة التحكم الكهربائية.

٤- أنظمة التحكم الإلكترونية الحديثة.

٥- التحكم باستخدام الكمبيوتر.

ويتوقف استخدام نوع معين من أنظمة التحكم على طبيعة الموقع وظروف التشغيل بالإضافة إلى اعتبارات الأمن والتكاليف والدقة والوزن والحجم وخلافه. وهناك أنواع مختلفة من أنظمة التحكم مثل الأنظمة الكهربائية والميكانيكية والأنظمة الكهربائية الهيدروليكية وكذلك الأنظمة الإلكترونية والهوائية وخلافه. وفي هذه الأنظمة نستخدم مكونات وأجهزة عديدة متنوعة للحصول على مواصفات أداء عالية وتكلفة مناسبة لأنظمة التحكم. وفي الوقت الحاضر يستخدم الكمبيوتر للتحكم في العديد من الصناعات الحديثة وشبكات ومحطات الكهرباء وخلافه نظراً لدقته الفائقة وإمكاناته الكبيرة لتنفيذ متطلبات التحكم المتطورة.



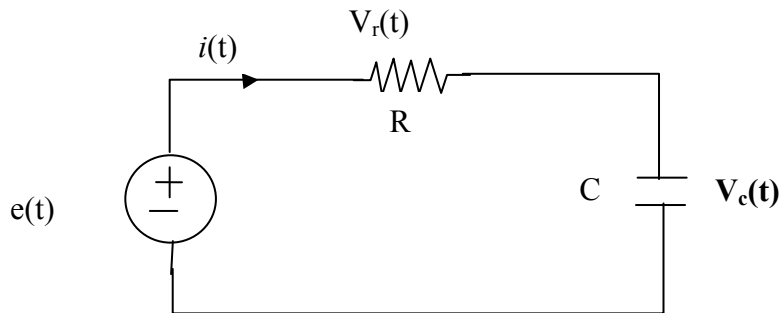
## 2.2 النمذجة الرياضية لنظم التحكم Mathematical Modeling

في الوحدة الأولى قمنا بدراسة كيفية تمثيل نظم التحكم باستخدام الرسم التخطيطي للمراحل المختلفة للنظام والمعروف بالمخطط الصندوقي حيث تم تمثيل كل مرحلة من مراحل النظام بدالة التحويل والتي تربط بين دخل المرحلة وخرجها. وللحصول على دالة التحويل نبدأ أولاً بتمثيل المراحل المختلفة للنظام بمعادلات تفاضلية في نطاق الزمن ثم نحول هذه المعادلات التفاضلية إلى معادلات جبرية بسيطة باستخدام تحويلات لابلاس و مع اعتبار أن الظروف الابتدائية مساوية للصفر نحصل على دالة التحويل أو النقل.

في هذا الجزء سوف يكون هدفنا الأساسي هو الحصول على النموذج الرياضي ومن ثم دالة التحويل لبعض الدوائر الكهربائية البسيطة والتي يمكن اعتبارها أحد عناصر نظم التحكم.

### مثال 1-2

الدائرة التالية هي دائرة RC حيث أن إشارة الدخل ممثلة في مصدر الجهد المستمر وإشارة الخرج عبارة عن الجهد على طرفي المكثف. اكتب المعادلة التفاضلية التي تربط بين إشارتي الدخل والخرج ثم أوجد دالة التحويل:



شكل (1-2) دائرة مقاومه ومكثف توالي RC series circuit

**الحل:**

أولاً: إيجاد النموذج الرياضي :

بتطبيق قانون كيرشوف للجهد على الدائرة نحصل على:

$$e(t) = v_r(t) + v_c(t) \quad (1-2)$$

من قانون أوم نوجد فرق الجهد بين طرفي المقاومة بدلالة التيار المار فيها كما يلي:



$$v_r(t) = Ri(t)$$

أما علاقة التيار المار في المكثف بفرق الجهد بين طرفيه فتكتب كما يلي.

$$i(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt}$$

وبالتعويض عن قيمة التيار في علاقة جهد المقاومة نحصل على:

$$v_r(t) = RC \frac{dv_c(t)}{dt}$$

وبالتالي تصبح معادلة جهود الدائرة (١-٢) كما يلي

$$RC \frac{dv_c(t)}{dt} + v_c(t) = e(t) \quad (2-2)$$

و المعادلة السابقة تعبر عن النموذج الرياضي لدائرة مقاومة ومكثف على التوالي (R. C. Series Circuit) و الموضحة في الشكل (1-2) و هي عبارة عن معادلة تفاضلية من الدرجة الأولى.

ثانياً : إيجاد دالة التحويل:

للحصول على دالة التحويل ( النقل) للدائرة، نوجد التحويل اللابلاسي للمعادلة التفاضلية السابقة مع اعتبار أن جميع الظروف الابتدائية منعدمة فنحصل على:

$$L \left[ RC \frac{dv_c(t)}{dt} + v_c(t) \right] = L[e(t)]$$

$$RC(SV_c(s) - v_c(0)) + V_c(s) = E(s)$$

وحيث أننا لكي نوجد دالة التحويل نفترض أن الظروف الابتدائية منعدمة وبالتالي فإن:

$$v_c(0) = 0$$

وبالتالي

$$RC(SV_c(s) + V_c(s)) = E(s)$$

$$(SRC + 1)V_c(s) = E(s)$$

وحيث أن دالة النقل هي نسبة التحويل اللابلاسي لإشارة الخرج بالنسبة لإشارة الدخل فإن دالة نقل الدائرة هي:

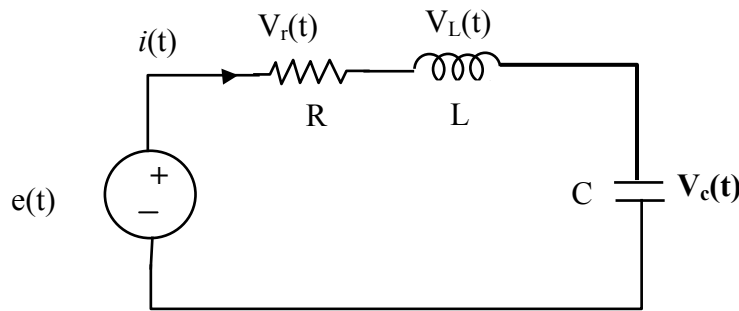
$$G(s) = \frac{V_c(s)}{E(s)} = \frac{1}{SRC + 1} \quad (3-2)$$



لاحظ العلاقة بين عدد عناصر التخزين ودرجة المعادلة التفاضلية: فالدائرة تحتوي على عنصر تخزين واحد للطاقة وهو المكثف، والمعادلة التفاضلية من الدرجة الأولى وبالتالي فإن الدائرة تمثل نظام من الرتبة الأولى. لاحظ كذلك أن مقام دالة النقل كثير الحدود في  $s$  من الدرجة الأولى

## مثال 2-2

الدائرة التالية هي دائرة توالي مكونة من مقاومة وملف ومكثف RLC حيث أن إشارة الدخل ممثلة في مصدر الجهد المستمر وإشارة الخرج عبارة عن الجهد على طرفي المكثف. اكتب المعادلة التفاضلية التي تربط بين إشارتي الدخل والخرج ثم اوجد دالة التحويل:



شكل (2-2) دائرة RLC توالي

## الحل

أولاً: إيجاد النموذج الرياضي:

بتطبيق قانون كيرشوف للجهد على الدائرة نحصل على معادلة الجهود التالية:

$$e(t) = v_r(t) + v_L(t) + v_c(t) \quad (4-2)$$

وحيث أن:

$$v_r(t) = Ri(t)$$

$$v_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

$$i(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt}$$





وبالتعويض في معادلة الجهود (4-2) نحصل على:

$$RC \frac{dv_c(t)}{dt} + L \frac{di(t)}{dt} + v_c(t) = e(t)$$

$$RC \frac{dv_c(t)}{dt} + LC \frac{d^2v_c(t)}{dt^2} + v_c(t) = e(t)$$

أعد ترتيب المعادلة السابقة

$$LC \frac{d^2v_c(t)}{dt^2} + RC \frac{dv_c(t)}{dt} + v_c(t) = e(t) \quad (5-2)$$

وتعبر المعادلة السابقة عن النموذج الرياضي لدائرة RLC الموضحة في الشكل (2-2) وهي عبارة عن معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية.

ثانياً : إيجاد دالة التحويل:

للحصول على دالة التحويل ( النقل ) للدائرة، نوجد التحويل اللابلاسي للمعادلة التفاضلية السابقة مع اعتبار أن جميع الظروف الابتدائية منعدمة نحصل على:

$$L \left[ LC \frac{d^2v_c(t)}{dt^2} + RC \frac{dv_c(t)}{dt} + v_c(t) \right] = L[e(t)]$$

$$LCS^2V_c(s) + RCSV_c(s) + V_c(s) = E(s)$$

$$[LCS^2 + RCs + 1]V_c(s) = E(s)$$

وحيث أن دالة النقل هي نسبة التحويل اللابلاسي الشارة الخرج بالنسبة لإشارة الدخل فإن دالة نقل الدائرة هي:

$$G(s) = \frac{V_c(s)}{E(s)} = \frac{1}{LCS^2 + RCs + 1} \quad (6-2)$$

لاحظ العلاقة بين عدد عناصر التخزين ودرجة المعادلة التفاضلية: فالدائرة تحتوي على عنصري تخزين للطاقة وهما الملف و المكثف، والمعادلة التفاضلية من الدرجة الثانية وبالتالي فإن الدائرة تمثل نظام من الرتبة الثانية. لاحظ كذلك أن مقام دالة النقل كثير الحدود في  $s$  من الدرجة الثانية.



### 3-2 أنواع الحاكمات الصناعية Types of Industrial Controller

كما سبق أن ذكرنا أن الحاكم هو أهم عناصر أي نظام تحكم حيث أنه يمثل العقل المفكر و عنصر الذكاء في النظام. ويجب أن يتضمن الحاكم مجموعة من العناصر التي تعمل علي مراقبة وضبط الكمية المراد التحكم فيها لتكون أقرب ما يكون للقيمة المرغوبة لها بأعلى دقة ممكنة وفي أسرع وقت ممكن. ولما كانت أهمية استخدام الحاكمات في الصناعة غير محدودة فإن هناك أنواعاً عديدة من هذه الحاكمات يمكن تصنيفها حسب فعل المتحكم وهي كالتالي:

- ١- الحاكمات المتقطعة Discontinuous controllers
- ٢- الحاكم التناسبي (Proportional Controller (P-Controller)
- ٣- الحاكم التكاملي (Integral Controller (I-Controller)
- ٤- الحاكم التفاضلي (Differential Controller (D-Controller)
- ٥- الحاكم التناسبي التكاملي PI-Controller
- ٦- الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي PID-Controller

وفيما يلي سوف ندرس كل نوع من هذه الأنواع من حيث نظرية عمله والمعادلات التي تصف عمله ودالة التحويل الخاصة به بالإضافة إلى رسم المخطط الصندوقي وكذلك علاقة إشارة دخل المتحكم بإشارة خرجه.

#### 1.3.2 الحاكمات المتقطعة Discontinuous controllers

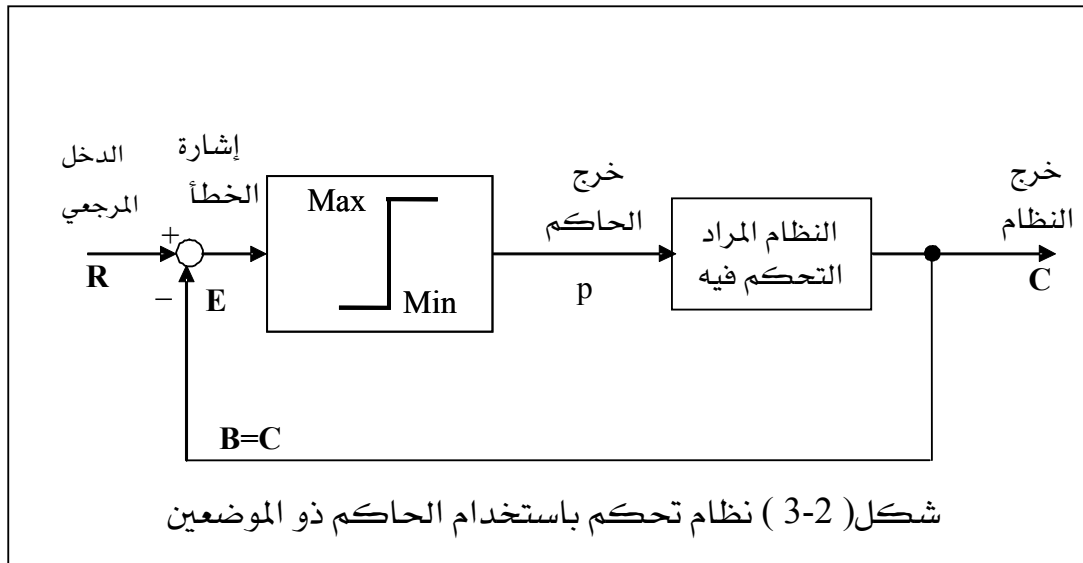
في هذا النوع من الحاكمات تتغير إشارة التحكم بشكل متقطع حيث تأخذ قيماً متعددة تعتمد على عدد الأوضاع الممكنة. وقد يكون عدد الأوضاع المسموح بها اثنين أو ثلاثة أو أكثر حسب نوع الحاكم وطبيعة النظام المحكوم. ويستخدم هذا النوع من الحاكمات بكثرة في نظم التحكم البسيطة كالتحكم في درجة الحرارة كما في المكيفات والسخانات والثلاجات. ومن أمثلة الحاكمات المتقطعة ما يلي:

##### 1.1.3.2 الحاكم ذو الموضعين Two-position Controller

تعتمد نظرية عمل هذا النوع من الحاكمات على أن تتغير إشارة التحكم بين أحد موضعين ثابتين أحدهما ذو قيمة عظمى والآخر ذو قيمة صغرى كما هو مبين بالشكل التالي (2-3).

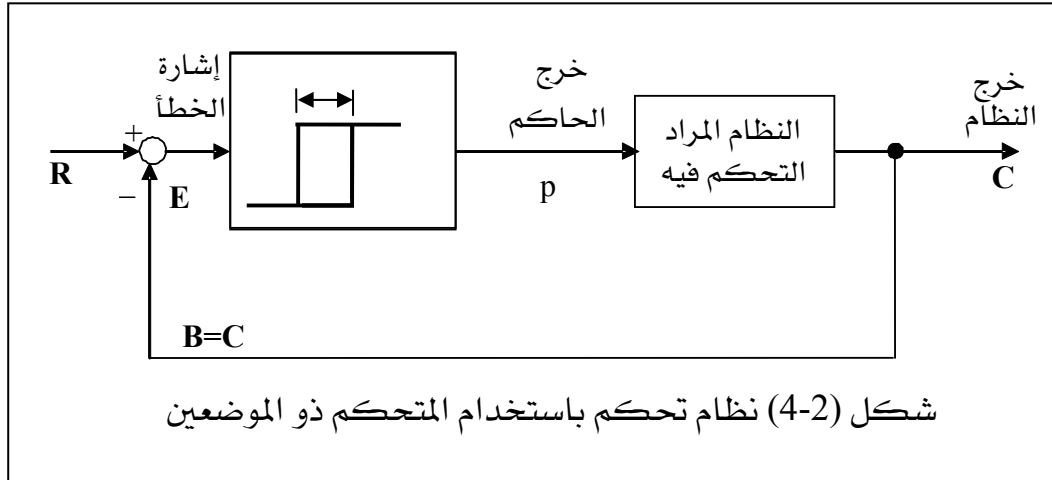


وهذا يعني أن قيمة خرج المتحكم  $p$  تكون عظمى (الوضع الأعلى) في حالة ما إذا كانت إشارة الخطأ موجبة أي أن الكمية المراد التحكم فيها قلت عن القيمة المرجعية، وتكون قيمته صغرى في حالة ما إذا كانت إشارة الخطأ سالبة أي أن الكمية المراد التحكم فيها زادت عن القيمة المرجعية .



### 2.1.3.2 الحاكم ذو الموضعين مع فرق تخلفي Two-position Controller with Hysteresis

نظراً لطبيعة عمل الحاكم ذو الموضعين حيث تتم عمليتي الفصل و الوصل عندما تتخطى الكمية المحكومة لقيمتها المرغوبة (نقطة الضبط) مباشرة فإن معدل عمليتي الفصل و الوصل يكون سريعاً في بعض الحالات مما يؤدي إلى الاهتزازات. و للحد من معدل تشغيل وضعي الفصل و الوصل حول نقطة الضبط للحاكم ذو الموضعين فانه يتم إضافة عنصر فرق تخلفي Hysteresis Element حيث تتم عمليتي الفصل والوصل في نطاق محدد حول نقطة الضبط مما يؤدي إلى وجود وقت تأخير محسوب بعد ما تتخطى القيمة الفعلية لإشارة الخرج قيمة إشارة المرجع (نقطة الضبط) كما هو مبين بالشكل (4-2).

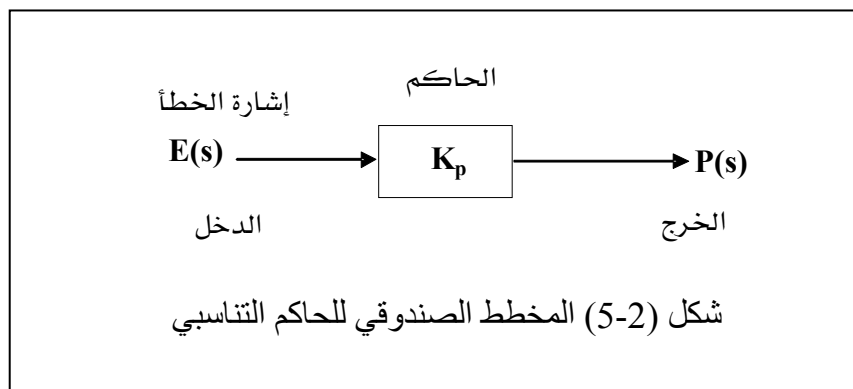


### 2.3.2 الحاكمات المستمرة Continuous Controllers

في الحاكمات المستمرة تأخذ إشارة خرج الحاكم قيماً مستمرة بين مدى تصحيحي محدد وتستخدم هذه الحاكمات في أنظمة التحكم الصناعية الدقيقة مثل التحكم في السرعة. ومن أمثلة الحاكمات المستمرة: الحاكم التناسبي P-Controller و الحاكم التكاملي I-Controller و الحاكم التفاضلي D-Controller و الحاكم التناسبي التكاملي PI-Controller و الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي PID-Controller

#### 1.2.3.2 الحاكم التناسبي (P-Controller)

وتعتمد نظرية عمل هذا النوع كما هو مبين بالشكل (5-2) على قيام الحاكم بضرب إشارة الخطأ في مقدار ثابت  $K_p$  يسمى الكسب التناسبي.

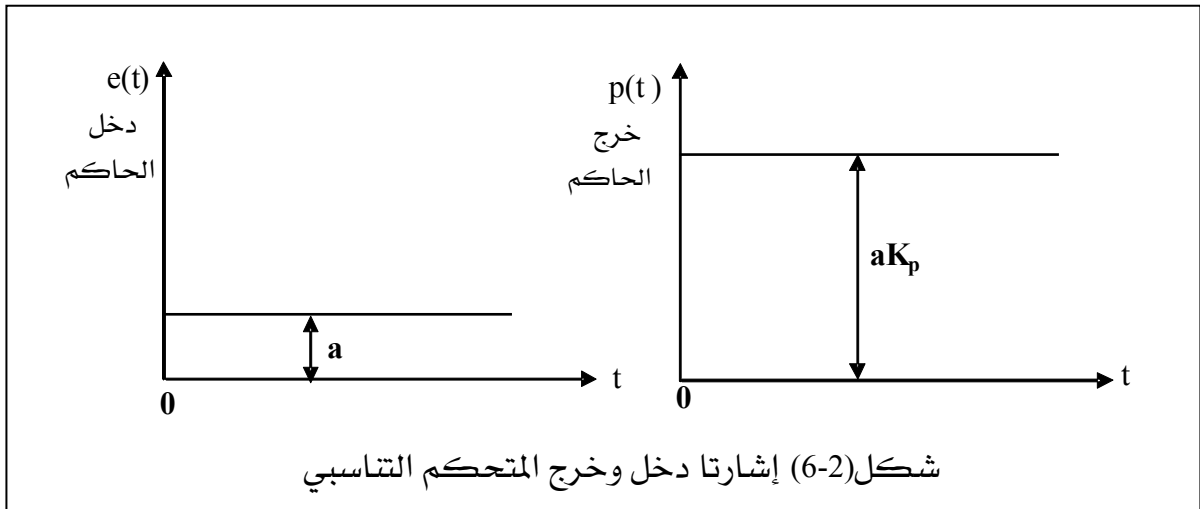




ومن خصائص هذا الحاكم أنه كلما زادت قيمة الكسب  $K_p$  تقل قيمة الخطأ أي أن التناسب بينهما عكسياً. ولكن نجد أن زيادة  $K_p$  يمكن أن تسبب زيادة في عدد ترددات خرج النظام أو عدم استقرار النظام. لذا يجب اختيار قيمة  $K_p$  لتوائم متطلبات تقليل الخطأ (أي زيادة الدقة) ومتطلبات الاستقرار في نفس الوقت. والمعادلات التالية تبين العلاقة بين دخل المتحكم وخرجه كما يلي:

$$\begin{aligned} p(t) &= K_p e(t) \\ P(s) &= K_p E(s) \\ G_c(s) &= \frac{P(s)}{E(s)} = K_p \end{aligned} \quad (6-2)$$

ويبين الشكل (6-2) العلاقة بين إشارتي الدخل والخرج للحاكم التناسبي. فإذا كانت قيمة إشارة دخل الحاكم إشارة الخطأ (a) فولت مثلا فإن قيمة إشارة خرج الحاكم هي حاصل ضرب الكسب  $K_p$  في قيمة الخطأ a.

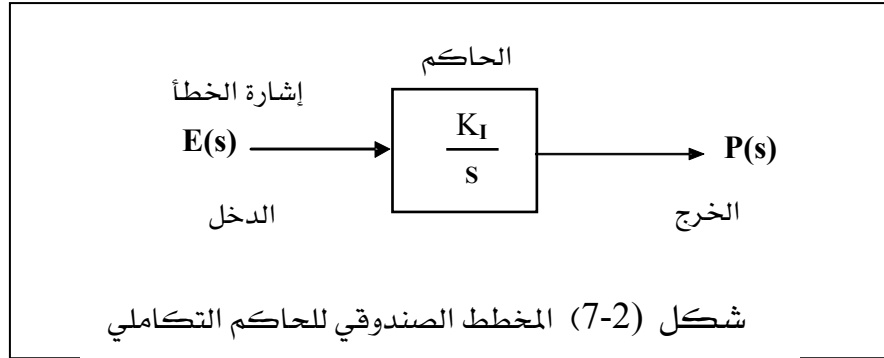


ويتضح من هذا أن عمل الحاكم التناسبي أساسا هو كمكبر وهناك أنواع كثيرة في الحياة العملية لهذا النوع من التحكم منها التي تعمل بالهواء المضغوط والتي تعمل بالزيت أو بالماء المضغوط بالإضافة إلى المكبرات الإلكترونية والمكبرات المغناطيسية والمكبرات الكهربائية.



### 2.2.3.2 I-Controller التحكم التكاملي

تعتمد نظرية عمل الحاكم التكاملي على إجراء عملية تكامل لإشارة الخطأ كما هو مبين بالشكل (7-2). ويتميز هذا النوع من التحكم بأنه يقوم بإلغاء إشارة الخطأ عند الاستقرار أي أنه قادر على جعل الخرج مساوياً للدخل أي أن  $(R=C)$  وبذلك تكون إشارة الخطأ تساوي صفراً.



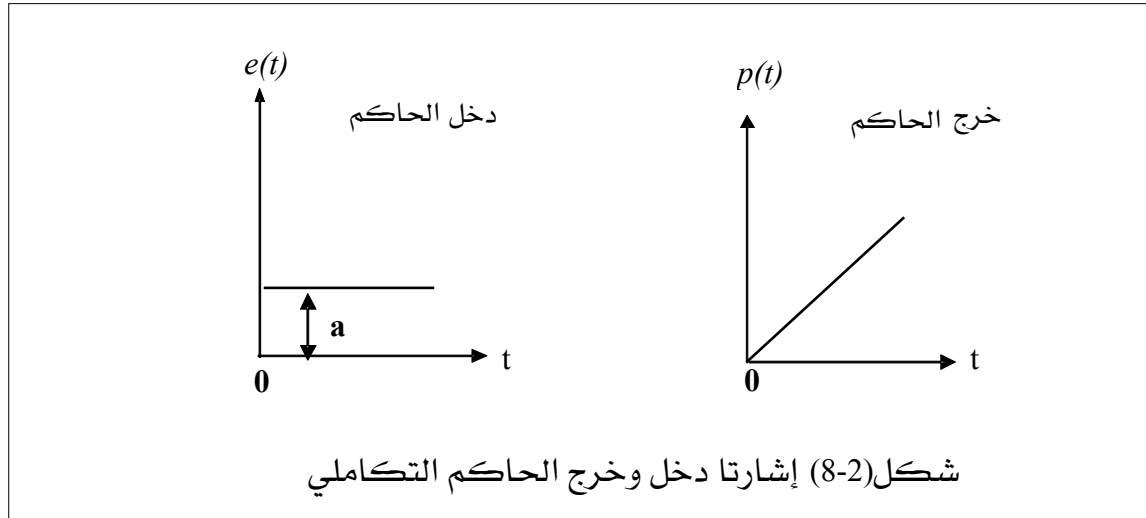
أما المعادلات الرياضية التي تربط خرج الحاكم بدخله فهي كالتالي:

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

$$P(s) = K_I \frac{1}{s} E(s)$$

$$G_C(s) = \frac{P(s)}{E(s)} = \frac{K_I}{s} \quad (7-2)$$

الشكل (8-2) يوضح العلاقة بين دخل وخرج الحاكم التكاملي في حالة حدوث تغيير مفاجئ في خرج النظام يؤدي إلى وجود فرق بين الدخل والخرج بمقدار ثابت قيمته  $a$  (أي أن الخطأ يصبح  $e(t) = a$ ) عند استخدامه في نظام تحكم ذو حلقة مغلقة



فيصبح خرج الحاكم طبقاً للمعادلة (7-2) كالتالي:

$$p(t) = K_I \int_0^t a dt$$

$$p(t) = K_I a t + C \quad (8 - 2)$$

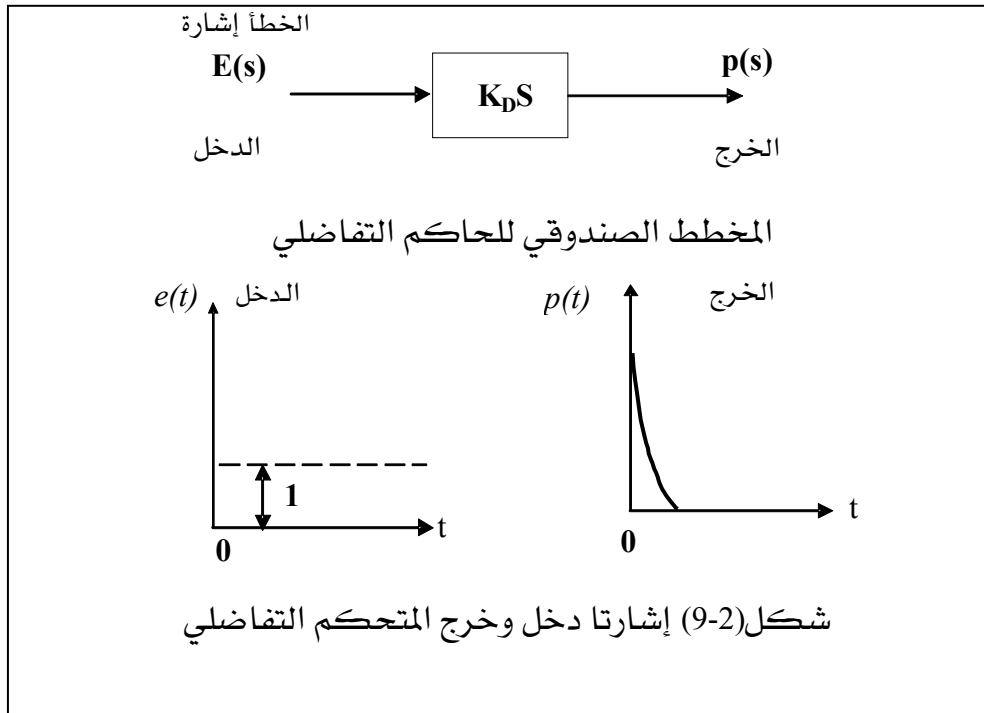
من هذا يتضح أنه بزيادة الزمن  $t$  فإن خرج الحاكم  $p(t)$  يستمر في التزايد كما هو مبين في الشكل (8-2) وهذا التزايد يؤثر على النظام المراد التحكم فيه حتى يزداد الخرج ويتساوى مع الدخل وتصبح إشارة الخطأ مساوية للصفر. وبذلك فإن الحاكم التكاملية يلاشي الخطأ بين الدخل والخرج بتعديل قيمة الخرج حتى تتساوى تماماً مع قيمة الدخل. وهذا النوع من التحكم بالرغم من أنه يحقق الدقة المطلوبة إلا أنه قد يؤدي إلى عدم استقرار النظام إذا كانت قيمة  $K_I$  عالية.

ويسمى الثابت  $K_I$  معدل إعادة الضبط reset rate أي المعدل الذي يعمل به الحاكم لإعادة ضبط الخرج  $C$  لتتساوى مع قيمة الدخل  $R$ . وكلما زادت قيمة هذا المعدل  $K_I$  كلما كانت عملية إعادة الضبط أسرع، ولكن هذا قد يؤدي إلى وجود ترددات كثيرة في الخرج أو عدم الاستقرار لذا يجب اختيار القيمة المناسبة لهذا المعدل  $K_I$ . وكما هو الحال في الحاكمتان التناسبية فإن الحاكمتان التكاملية الصناعية تكون مزودة عادة بوسيلة لضبط  $K_I$ .



### 3.2.3.2 الحاكم التفاضلي D-Controller

تعتمد نظرية عمل الحاكم التفاضلي على إجراء عملية تفاضل لإشارة الخطأ كما هو مبين بالشكل (9-2). والحاكم التفاضلي يسمى في بعض الأحيان (rate controller) حيث إن نظرية عمله بنيت على أساس معدل تغير إشارة الخطأ بالنسبة للزمن.



ويلاحظ أنه في حالة ثبات قيمة دخل الحاكم التفاضلي (ثبات إشارة الخطأ) فإن خرج الحاكم التفاضلي يساوي صفراً وذلك لأن تفاضل المقدار الثابت يساوي صفراً. ولذا فإن الحاكم التفاضلي يعمل فقط في الحالات العابرة أي أثناء تغير إشارة الخطأ ولهذا السبب فهو لا يستخدم بمفرده في التطبيقات العملية. ويبين شكل (9-2) العلاقة بين دخل وخرج الحاكم في حالة كون إشارة دخل المتحكم عبارة دالة خطوة الوحدة Unit Step Function.

ومن الملاحظ أن خرج الحاكم التفاضلي يساوي صفراً عند ثبات قيمة إشارة الدخل أما في لحظة ( $t = 0$ ) وأثناء تغيير إشارة دخل الحاكم من صفر إلى واحد فإن خرجة يكون عبارة عن نبضة لها قيمة مرتفعة وسرعان ما تصل إلى الصفر عند ثبات قيمة الدخل هذا من الناحية النظرية (حاكم تفاضلي مثالي). وعملياً فإن خرج الحاكم التفاضلي يأخذ بعض الوقت (زمن قليل جداً) للوصول إلى الصفر. والعيب الرئيس في الحاكم التفاضلي أنه يكبر إشارة الضوضاء فإذا كانت إشارة الدخل للحاكم التفاضلي محملة ببعض الضوضاء فإنه سوف

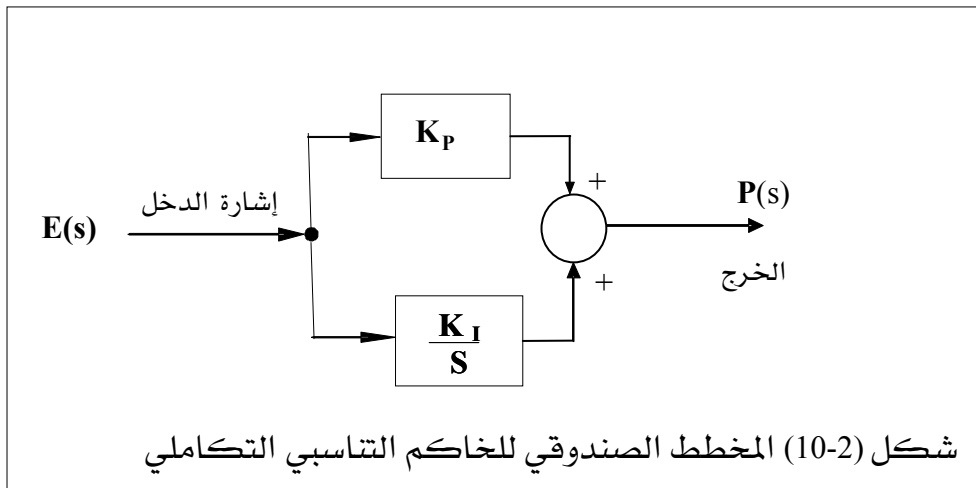




يضخم هذه الضوضاء وهذا قد يؤدي إلى مشاكل من الناحية العملية حيث إن معظم الإشارات في التطبيقات العملية تكون محملة بنسبة من الضوضاء.

### 4.2.3.2 الحاكم التناسبي التكاملي PI-Controller

وتعتمد نظرية عمل هذا النوع على كل من فعل الحاكم التناسبي بالإضافة إلى فعل الحاكم التكاملي أي أنه يقوم بضرب إشارة الخطأ في رقم ثابت  $K_p$  بالإضافة إلى تكاملها كما هو موضح في المخطط الصندوقي المبين في الشكل (10-2) للحاكم التناسبي التكاملي حيث إن المقدار الثابت  $K_p$  هو كسب الجزء التناسبي من الحاكم أما  $K_I$  فهو كسب الجزء التكاملي. وبعض الشركات الصناعية تستخدم معاملاً آخر للجزء التكاملي هو  $T_I = 1/K_I$  وفي هذه الحالة يتم تمثيل الجزء التكاملي بالمقدار  $(1/T_I S)$ . و الحاكمات الصناعية من هذا النوع تزود عادة بوسيلة لضبط كل من  $T_I$  أو  $K_I$ ،  $K_p$ ، للتمكن من اختيار القيم المناسبة حسب الاستخدامات والتطبيقات في الحياة العملية.



ويتضح العمل الأساسي لهذا النوع من الحاكمات من المعادلات الآتية:

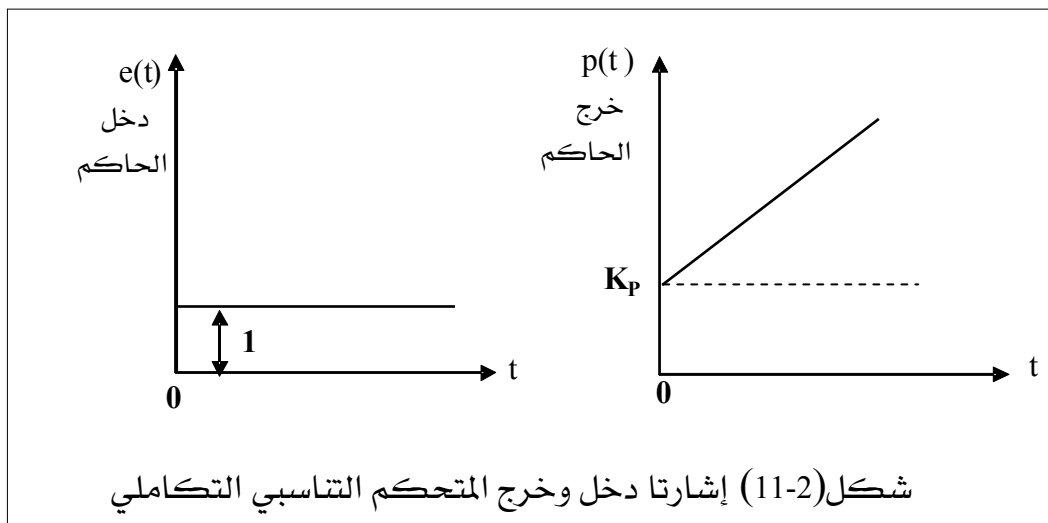
$$p(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \quad (9-2)$$

$$\begin{aligned} P(s) &= K_p E(s) + \frac{K_I}{s} E(s) \\ &= (K_p + \frac{K_I}{s}) E(s) \end{aligned}$$



$$G_C(S) = \frac{P(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (10-2)$$

ويبين شكل (11-2) العلاقة بين دخل وخرج الحاكم. فإذا كانت قيمة إشارة الخطأ تساوي واحد فإن الخرج يكون كما هو موضح بالشكل. أما إذا كان الحاكم متناسبياً فقط فيكون خرج الحاكم قيمة ثابتة  $K_p$  كما هو موضح بالخط الأفقي. أما في حالة الحاكم التناسبي التكاملي فتتزايد قيمة الخرج كما هو موضح بالخط المائل العلوي.



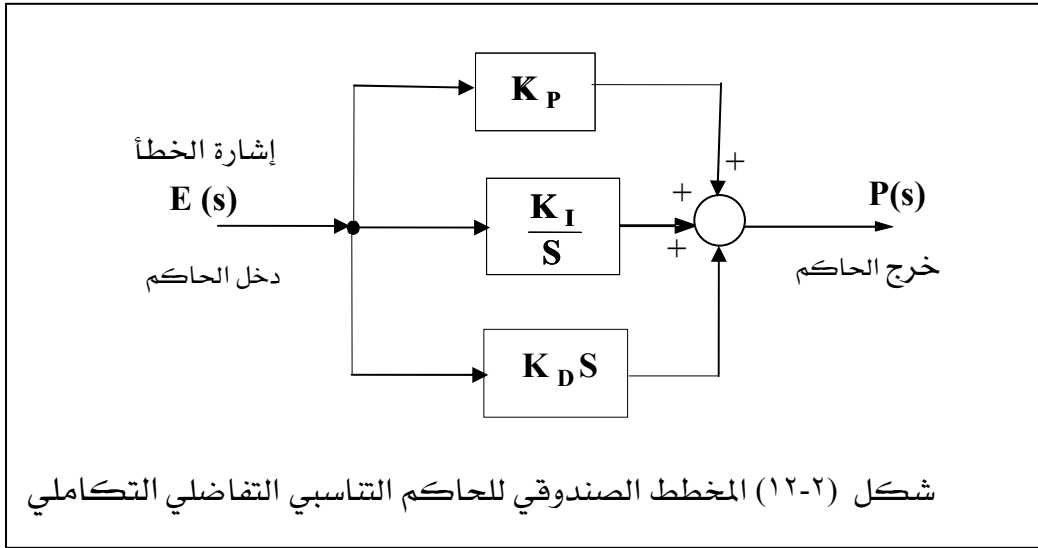
وتزود هذه الحاكم أيضا في الحياة العملية بوسيلة لضبط قيم كل من  $K_p$  و  $K_I$  ، ويتضح من شكل (11-2) أن تغيير  $K_p$  يؤثر على الجزء التناسبي والجزء التكاملي في نفس الوقت أما تغيير  $K_I$  فيؤثر على الجزء التكاملي فقط.

### 5.2.3.2 الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي PID-Controller

وتعتمد نظرية عمل هذا النوع من الحاكمات على تأثير كل من الحاكم التناسبي و الحاكم التكاملي و الحاكم التفاضلي وبالتالي فهو يجمع مزايا الثلاثة أنواع كما هو مبين بالشكل (2-12). ويتضح أساس عمله من المعادلة (11-2) التالية:

$$p(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (11-2)$$

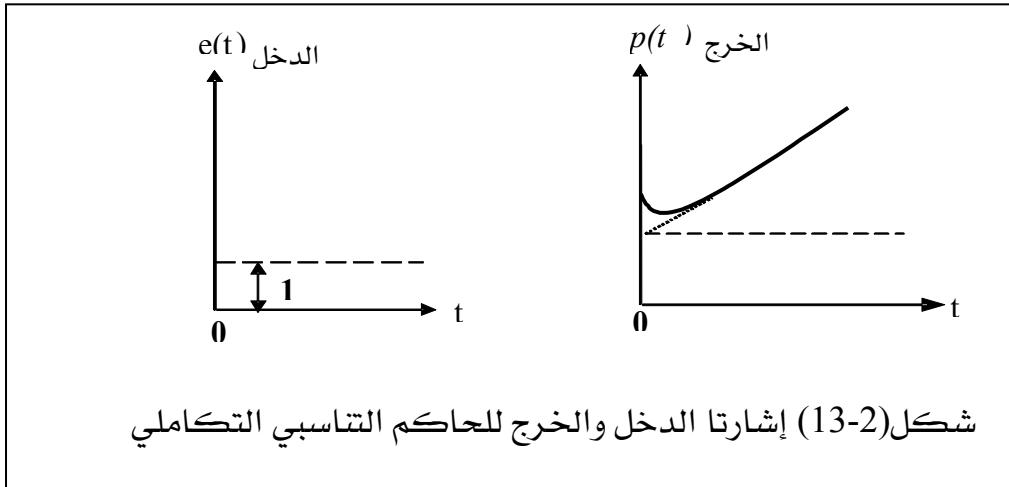
حيث إن  $p(t)$  هي إشارة الخرج الحاكم ،  $e(t)$  هي إشارة دخل الحاكم (إشارة الخطأ).



ويلاحظ أن  $K_P$  هو كسب الحاكم التناسبي و  $K_I$  هو كسب الحاكم التكاملي و  $K_D$  هو كسب الحاكم التفاضلي ولإيجاد دالة التحويل لهذا الحاكم نجري التحويل اللابلاسي للمعادلة السابقة (11-2) مع فرض أن جميع القيم الابتدائية تساوي الصفر فنحصل على:

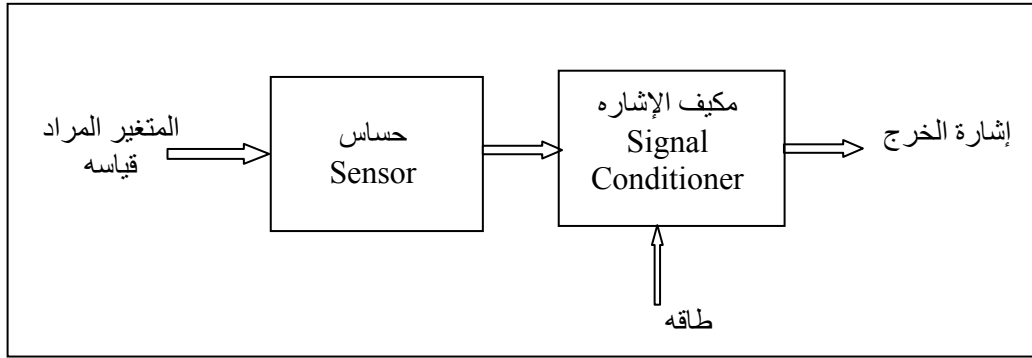
$$G_C(s) = \frac{P(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D S \quad (12-2)$$

وفي الحياة العملية تزود الحاكمت بوسيلة لضبط كل من  $K_P, K_D, K_I$  ويلاحظ أن قيم  $K_P$  في هذا النوع من التركيب تؤثر على كل من الحاكم التناسبي والحاكم التكاملي والحاكم التفاضلي. أما قيمة  $K_I$  فإنها تؤثر فقط على الحاكم التكاملي وقيمة  $K_D$  تؤثر فقط على الحاكم التفاضلي. ويبين الشكل (13-2) إشارات الدخل والخرج للحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي في حالة ما تكون إشارة الدخل عبارة عن دالة خطوة الوحدة. و يعتبر الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي من أكثر الحاكمت استخداما في أنظمة التحكم نظرا لجمعه لمزايا الأنواع الثلاثة السابقة حيث إنه يعطي أداء أكثر استقرارا.



#### 4.2 الحساسات والمبدلات Sensors and Transducers

تعتبر عملية قياس الكميات الفيزيائية مثل درجات الحرارة والسرعة و الوضع والضغط وغيرها من أهم متطلبات عمليات التحكم الآلي حيث تتطلب تحويل الكميات الفيزيائية الى إشارات يمكن قياسها ومقارنتها مع إشارات مماثلة. لذا فإن الحساسات والمبدلات من العناصر الهامة التي توجد في أنظمة التحكم المختلفة حيث أنها الأجهزة التي تأخذ على عاتقها مسؤولية تحويل الكميات الفيزيائية المختلفة إلى إشارات كهربائية قابلة للتكبير والقياس حتى يسهل التعامل معها عن طريق أجهزة التحكم. وبالتالي فإنها تعتبر بمثابة عناصر المراقبة والملاحظة وجمع المعلومات في نظم التحكم. والحساس هو أي جهاز يمكن أن يقوم بتحويل الظواهر الفيزيائية إلى كميات قابلة للقياس بواسطة أجهزة جمع البيانات. أما المبدلات فتعمل على الإحساس بالكمية المقاسة ثم يخرج إشارة كهربائية تتناسب مع الكمية المقاسة أو بعبارة أخرى فإن مبدلات الإشارة هي عناصر تقوم بتحويل نوع الإشارة الداخلة إليها إلى نوع آخر للطاقة عند المخرج. وبطبيعة الحال فإن كثيراً من عناصر الحس يمكن أن تقوم بهذه الوظيفة بجانب وظيفتها الأساسية.



و يجب مراعاة الدقة عند اختيار الحساسات والمبدلات بحيث تناسب التطبيق أو الوظيفة المنوط القيام بها مع مراعاة ما يلي:

- ١- يجب أن يعمل في نطاق مدى القياس المطلوب.
- ٢- يجب أن يكون ذا درجة عالية من الحساسية للكمية المراد قياسها.
- ٣- يجب أن يكون اختيار الحساس أو المبدل مناسباً للظروف المحيطة به من حرارة ورطوبة وخلافه حيث أن بعضها مصمم ليعمل تحت حرارة ورطوبة مقننه.
- ٤- يجب مراعاة الحجم والوزن عند اختيار الحساس.

## 5.2 عناصر التحكم النهائية Final Control Elements

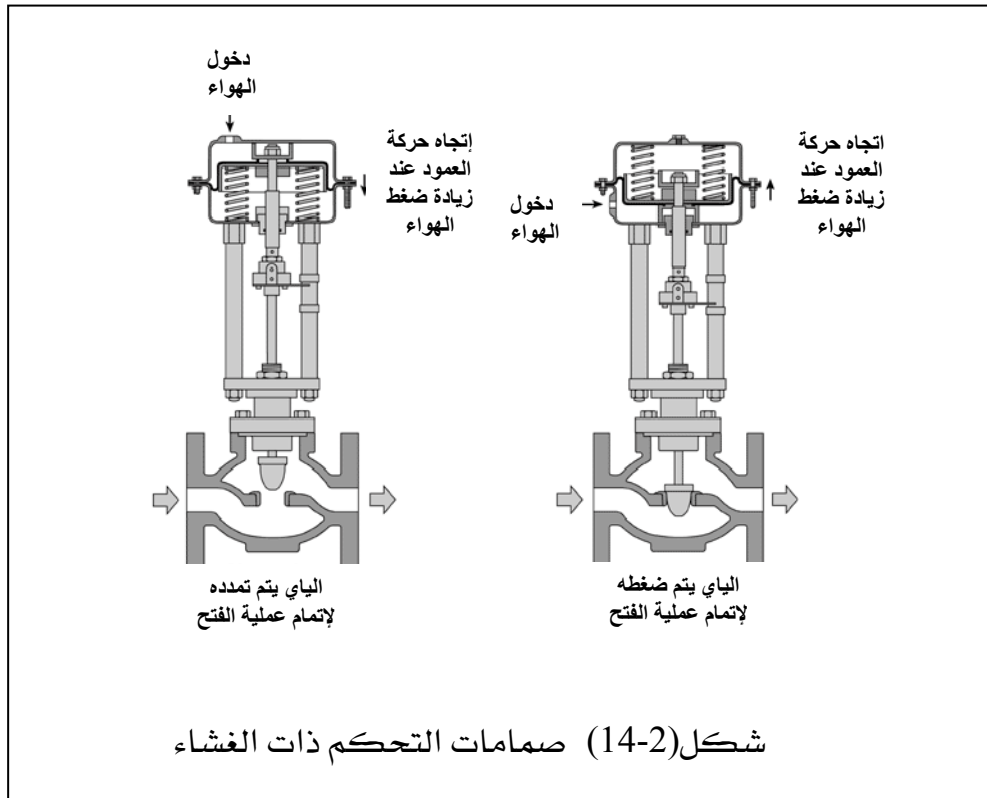
يعتبر عنصر التحكم النهائي هو العنصر الذي يتعامل مباشرة مع النظام المحكوم إذ أنه يتلقى إشارة من مسار التحكم يقوم بتفعيلها وبالتالي يستطيع أن يسطر على الكمية المراد التحكم بها. تتم عملية التحكم النهائي على عدة مراحل حيث تبدأ بإشارة التحكم (إشارة خرج الحاكم) والتي تنتج من إشارة الخطأ بناءً على قاعدة تحكم محددة تعتمد على نوع الحاكم والتي هي بمثابة إشارة الدخل للمشغل Actuator الذي يقوم بإجراء يتناسب مع الأمر الصادر من الحاكم وذلك بالتأثير المباشر على عنصر التحكم النهائي والذي يكون غالباً على شكل صمام تحكم Control Valve. والمشغلات هي العناصر التي تعمل على تحويل إشارة التحكم إلى فعل يتناسب مع عملية التحكم وتنقسم المشغلات إلى ثلاثة أنواع رئيسية هي:

- ١- المشغلات الهوائية Pneumatic Actuators
- ٢- المشغلات الكهربائية Electrical Actuators
- ٣- المشغلات الهيدروليكية Hydraulic Actuators



## 1.5.2 صمامات التحكم Control Valves

كما سبق وأن ذكرنا سابقاً أن الحساسات والمبدلات هي عناصر التحكم المنوط بها تجميع المعلومات اللازمة عن الكمية المراد التحكم فيها وكيفية تغييرها وإلى أي مدى تتطابق مع المواصفات المقننة لها وإرسالها إلى الحاكم لاتخاذ القرارات المناسبة. وفي حالة وجود عدم تطابق بين القيمة الفعلية والقيمة المرغوبة للكمية المراد التحكم فيها يقوم الحاكم بإرسال أوامره لعنصر التحكم النهائي لكي يعيد الكمية المراد التحكم فيها لتصبح أقرب ما يكون إلى قيمتها المرغوبة. لذا فإن عنصر التحكم النهائي يعتبر من العناصر الهامة لإتمام عملية التحكم الذي يقوم بتنفيذ قرارات الحاكم. إن أكثر عناصر التحكم النهائي استخداماً في عمليات التحكم الصناعية هي صمامات التحكم حيث تقوم بالتحكم في سريان الموائع مثل الغازات والبخار و الماء أو مركبات كيميائية أو غيرها من الموائع للتعويض أي تغييرات طارئة للمحافظة على الكمية المراد التحكم فيها أقرب ما يمكن إلى الكمية المرغوبة لها (نقطة الضبط). ويتكون صمام التحكم من جسم الصمام و أجزاء تهيئة و المشغل الذي يقوم بفتح وفتح الصمام و العديد من الأجزاء التكميلية مثل الحساسات Sensors و محددات الوضع Positioners أو مفاتيح نهاية الشوط Limit Switches.





شكل (2-14) يوضح أحد أنواع صمامات التحكم ذات الغشاء وفيها يتم استخدام الهواء المضغوط للضغط على الغشاء والذي بدوره يقوم بضغط الياي أو تمديده ليحرك عمود الصمام لإتمام عملية فتح الصمام أو غلقه.

## 2.5.2 المحركات الكهربائية Electric motors

المحرك الكهربائي أو المشغل الكهربائي هو الآلة التي تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية أي أنها تعمل على تحويل الإشارة الكهربائية إلى حركة. فيما يلي بعض أنواع المحركات الكهربائية التي تستخدم بكثرة في نظم التحكم :

### • محركات التيار المستمر DC Motors

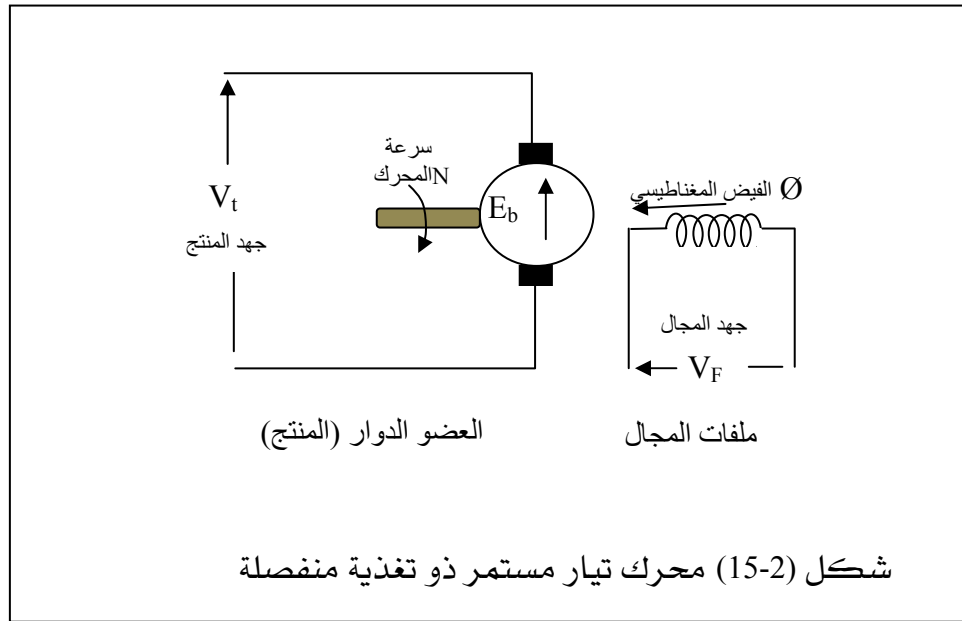
محركات التيار المستمر هي إحدى المحركات الرئيسة الأكثر استعمالاً في الصناعة. و لمحركات التيار المستمر أهمية بالغة في تطبيقات التحكم الآلي نظراً لسهولة التحكم في حركتها قيمةً و اتجاهاً أي أنه يمكن التحكم في سرعتها بقيم تبدأ من الصفر والى قيم كبيرة وفي الاتجاهين. و تتوفر هذه المحركات في الصناعة بعدة أنواع وأحجام وتتميز بسهولة السيطرة عليها والتحكم فيها. ويمكن تصنيف محركات التيار المستمر حسب الطريقة التي يتم بها توصيل ملفات المجال المغناطيسي مع ملفات المنتج (العضو الدوار) فمنها محركات التوالي Series Motors ومنها محركات التوازي Shunt Motors ومنها المحركات ذات التغذية المنفصلة Separately excited Motors. وحيث أن النوعين الأول والثاني لهم منحنيات خصائص غير خطية فان المحركات ذات التغذية المنفصلة (انظر شكل 2-15) هي الأكثر استخداماً في تطبيقات أنظمة التحكم حيث أنها تتمتع بخصائص خطية كما يسهل التحكم في سرعتها بطريقتين هما:

### ○ التحكم في المجال المغناطيسي Field control

في هذه الطريقة يتم تغيير المجال المغناطيسي مع ثبات جهد المنتج (العضو الدوار).

### ○ التحكم في جهد المنتج Armature Voltage Control

في هذه الحالة يتم تغيير جهد المنتج (العضو الدوار) مع ثبات المجال المغناطيسي .



### ○ محركات التيار المتردد AC Motors

وهي المحركات التي تعمل بالتيار المتردد ويوجد منها أنواع متعددة منها المحركات الاستثنائية Induction Motors ومنها أحادية الأطوار أو ثلاثية الأطوار. والنوع الأخرى محركات التيار المتردد التزامنية Synchronous Motors. وهذا النوع من المحركات يمكن التحكم في سرعتها ولكنها تحتاج إلى دوائر تحكم أكثر تعقيداً من تلك التي تستخدم للتحكم في محركات التيار المستمر.

### ○ محركات الخطوة Stepper Motors

محرك الخطوة هو أحد المشغلات الكهربائية التي تقوم بتحويل الإشارات نبضية أو متقطعة إلى حركة تناظرية. ولقد أصبحت محركات الخطوة من أهم المشغلات الكهربائية المستخدمة في السنوات الأخيرة وذلك بسبب حاجة أنظمة التحكم الحديثة لهذا النوع من الحركة التدريجية Incremental Motions في كثير من عمليات التحكم الصناعية. و لمحركات الخطوة الكثير من التطبيقات في مجال التحكم في الروبوت والأجهزة الطبية و العلمية بالإضافة إلى الطابعات و الرواسم والكثير من ملحقات الحاسب الآلي. و من أهم مميزات محركات الخطوة أنها توفر دوائر تحكم ذات دائرة مفتوحة عالية الدقة للتحكم في وضع أو إزاحة الحمل والتي يتم التحكم فيها بالحاسوب أو الميكروبروسيسور أو الحاكومات القابلة للبرمجة. أما التحكم في محركات الخطوة فيكون عن طريق نبضات يمكن





الحصول عليها من حاكم مبرمج أو جهاز كومبيوتر يتم تغذيتها إلى وحدة دوائر الدفع Drive Circuits التي بدورها تقوم بتحويل كل نبضة تحكم إلى تحريك عمود دوران المحرك لخطوة واحدة.

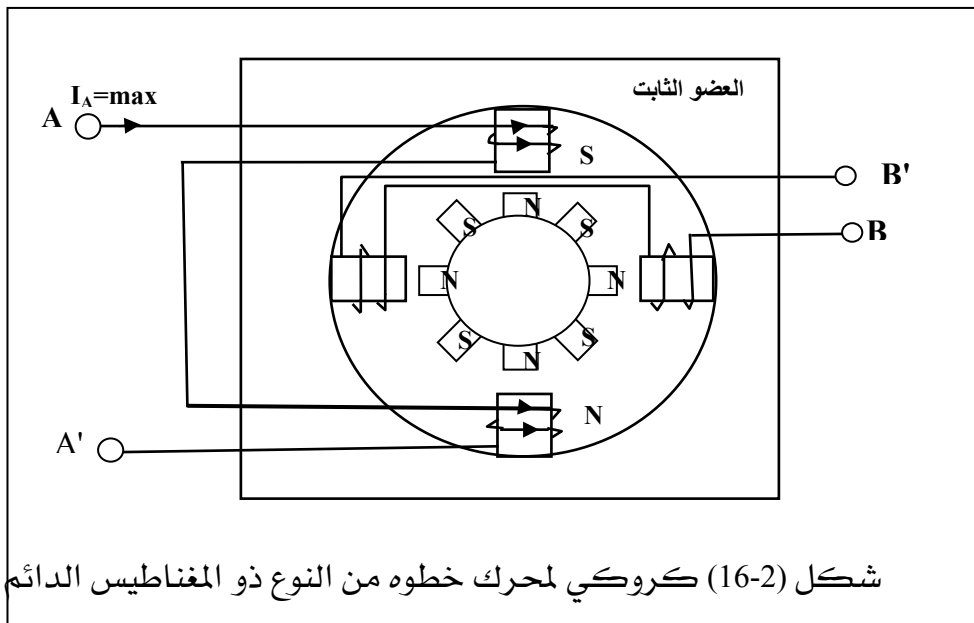
مثل جميع أنواع المحركات الكهربائية يتكون محرك الخطوة من جزأين أساسيين هما العضو الثابت والعضو الدوار. و للعضو الثابت عدد زوجي من الأقطاب بينها مسافات متساوية وكل قطب يحمل ملف كهربائي. و كل زوجين متقابلين من ملفات الأقطاب متصلين على التوالي بحيث إذا كان أحد الأقطاب شمالي يصبح القطب المقابل جنوبي. أما العضو الدوار يمكن أن يحمل اثنين أو ثلاث أو أربع دوائر منفصلة أو أطوار Phases. أما العضو الدوار فله عدد من السنون Teeth بينها وبين أقطاب العضو الثابت ثغره هوائية صغيرة. ويتم تحديد زاوية الخطوة لمحرك الخطوة بالقاعدة التالية.

$$360^{\circ}$$

= زاوية الخطوة

عدد الأطوار x عدد سنون العضو الدوار

أي أن محرك الخطوة الذي له سنتان فقط في العضو الدوار والعضو الثابت له وجهان فإنه يتحرك بخطوة مقدارها 90 درجة. يمكن تصنيف محركات الخطوة كأحادية أو ثنائية أو ثلاثية أو رباعية الأطوار نسبةً إلى عدد ملفات العضو الثابت أو أنها تصنف حسب نوع العضو الدوار فتسمى محركات خطوة ذات مغناطيس دائم أو ذات ممانعة مغناطيسية متغيرة. الشكل التالي يوضح الرسم التخطيطي لمحرك خطوة من النوع ذو المغناطيس الدائم.





## تمارين

١- اذكر دور كل من العناصر التالية في عمليات التحكم الصناعي:

- (أ) المشغل.
- (ب) عنصر التحكم النهائي.
- (ج) الحساسات والمبدلات.
- (د) صمامات التحكم.
- (هـ) المحركات الكهربائية.

٢- اذكر مبدأ عمل كل من :

- (أ) الحاكم التناسبي.
- (ب) الحاكم التفاضلي.
- (ج) الحاكم التكاملي.

٣- يتكون الحاكم التناسبي التكاملي من جزأين حاكم تناسبي بالإضافة إلى حاكم تكاملي.

١- اشرح فكرة عمل هذا الحاكم مع ذكر مميزاتة وعيوبه إن وجدت.

ب - اكتب المعادلات التفاضلية التي تصف هذا المتحكم مع توضيح المخطط الصندوقي له.

ج- اشرح مع الرسم العلاقة بين دخل وخرج الحاكم في حالة ما يكون الدخل دالة خطوة الوحدة

٤ - يتكون الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي من ثلاثة أجزاء حاكم تناسبي بالإضافة إلى حاكم تكاملي وكذلك حاكم تفاضلي.

١- اشرح فكرة عمل هذا الحاكم مع ذكر مميزاتة وعيوبه ان وجدت.

ب - اكتب المعادلات التفاضلية التي توصف هذا الحاكم مع توضيح المخطط الصندوقي .

ج- اشرح مع الرسم العلاقة بين دخل وخرج الحاكم في حالة ما يكون الدخل دالة القفزة قدرها الوحدة.



## الوحدة الثالثة

### الاستجابة الزمنية لنظم التحكم

**الهدف العام للوحدة :**

معرفة رتبة نظم التحكم الآلي والاستجابة الزمنية لها و معرفة كيفية استخدام منحني الاستجابة الزمنية لتحديد خصائص النظام.

**الأهداف التفصيلية :**

١. أن يحدد المتدرب الدوال القياسية للدخل.
٢. أن يحدد المتدرب الاستجابة الزمنية لنظم الرتبة الأولى.
٣. أن يحدد المتدرب خصائص نظم الرتبة الأولى.
٤. أن يحدد المتدرب الاستجابة الزمنية لنظم الرتبة الثانية.
٥. أن يحدد المتدرب خصائص نظم الرتبة الثانية.
٦. أن يعرف المتدرب الاستجابة الدائمة والعابرة لنظم الرتبة الأولى والثانية.



## مقدمة

في الوحدات السابقة تعرفنا على العناصر الأساسية في نظم التحكم الصناعية وكيفية تمثيلها رياضياً بالإضافة إلى استبدال النموذج الرياضي للنظام باستخدام المخططات الصندوقية. بعد ذلك تعرضنا إلى كيفية تبسيط المخططات الصندوقية أو استخدام مخططات تدفق الإشارات للحصول على دالة التحويل الشاملة للنظام والتي تعبر عن العلاقة التي تربط بين التحويل اللابلاسي لكل من إشارتي الدخل والخرج. بعد معرفة دالة التحويل لنظم التحكم فإنه يكون من السهل دراسة وتحليل كل من أداء و خصائص النظام وتحديد استجابته الزمنية لبعض إشارات الدخل القياسية. وحيث أنه من الصعب التنبؤ بالصورة التي سوف يكون عليها الدخل أو بما سوف يتعرض إليه النظام من إشارات تشويش بشكل قاطع إلا في القليل من أنظمة التحكم لأن الدخل مرتبط بالظروف الطبيعية التي يعمل فيها النظام ويتغير مع الزمن وفقاً لما هو مطلوب على خرج النظام وكذلك قد يكون دخل النظام ذو طابع عشوائي لا نعلم عنه الكثير من المعلومات سوى الحدود التي يتغير فيها.

وفي تحليل وتصميم أنظمة التحكم يكون من الضروري معرفة استجابة نظام التحكم وذلك للمقارنة وتحسين الأداء وتقليل الخطأ سواء الخطأ الديناميكي أو الخطأ عند حالة الاستقرار بعد مرور التغيرات العابرة على النظام. و لمعرفة الاستجابة الزمنية لأي نظام تحكم فإنه ليس أمامنا من سبيل إلا باختبار دوال اختبار معينة واعتبارها دخل لنظام التحكم ثم دراسة وتحليل الاستجابة العابرة الخارجة من النظام والتي على أساسها يتم تصميم وتحسين أداء هذا النظام. ويجب أن يتم اختيار دالة الاختبار بحيث تعبر ولو جزئياً عن الدخل المحتمل عند تشغيل النظام في الطبيعة مع مراعاة أن تكون دوال الاختبار هذه ممكنة التنفيذ عملياً داخل المختبر

في هذه الوحدة سوف نتناول دراسة الدوال القياسية والتي غالباً ما تستخدم كإشارات دخل لنظم التحكم عند دراسة الاستجابة الزمنية لها. وكذلك تحليل الاستجابة الزمنية لنظم الرتبة الأولى والثانية لدالة الخطوة كما أننا سوف نتعرف على خصائصها وكل من الاستجابة العابرة والدائمة لها.



### 1-3 الدوال القياسية للدخل:

من الدوال شائعة الاستعمال في دراسة الاستجابة الزمنية لنظم التحكم:

- دالة الخطوة Step Function
- دالة الانحدار Ramp Function.
- دالة التسارع (أو العجلة) Acceleration Function.
- دالة النبضة Impulse Function
- الدالة الجيبية Sinusoidal Function.

وسوف نتطرق بالتفصيل لكلاً من هذه الأنواع على النحو التالي:

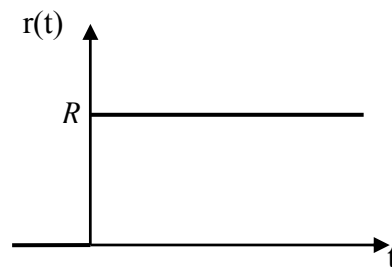
#### ١) دالة الخطوة Step Function:

دالة الخطوة هي إشارة تتغير قيمتها من مقدار معين ثابت (الصفير عادةً) إلى مقدار ثابت آخر  $R$  بشكل لحظي (أي خلال زمن يساوي صفير) كما هو مبين بالشكل (١-٣)، وتكتب دالة الخطوة رياضياً على الصورة التالية:

$$r(t) = Ru(t) \quad (1-3)$$

حيث تعبر  $R$  عن اتساع الخطوة وتعبر  $u(t)$  عن دالة خطوة الوحدة وقيمتها تساوي:

$$u(t) = \begin{cases} 1 & \text{for } t \geq 0 \\ 0 & \text{for } t < 0 \end{cases} \quad (٢-٣)$$



شكل (١-٣) دالة الخطوة.

أما التحويل اللابلاسي لدالة الخطوة فهو:

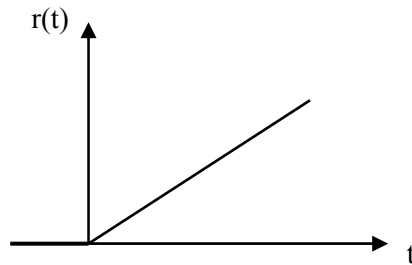
$$R(s) = \frac{R}{s} \quad (٣-٣)$$



## ٢) دالة الانحدار Ramp Function:

دالة الانحدار هي إشارة تبدأ قيمتها عادةً من الصفر وتتزايد خطياً مع الزمن، أي أن هذه الدالة يمكن تمثيلها بيانياً بخط مستقيم يمر بنقطة الأصل كما بالشكل (٢-٣) و يمكن توليدها عملياً من تكامل دالة الخطوة باستخدام مكبر العمليات أما الصيغة الرياضية لها فتكتب على الصورة التالية:

$$r(t) = \begin{cases} Rt & \text{for } t \geq 0 \\ 0 & \text{for } t < 0 \end{cases} \quad (٤-٣)$$



شكل (٢-٣) دالة الانحدار.

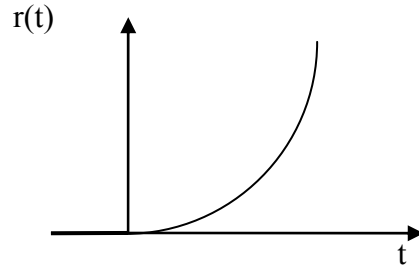
أما التحويل اللابلاسي للانحدار لدالة فهو:

$$R(s) = \frac{R}{s^2} \quad (٥-٣)$$

## ٣) دالة التسارع Acceleration Function:

دالة التسارع هي إشارة تبدأ قيمتها من الصفر وتتزايد بشكل غير خطي مع الزمن كما بالشكل (٣-٣)، ويحب ملاحظة أن دالة التسارع يمكن توليدها عملياً من تكامل دالة الانحدار باستخدام مكبر العمليات. أما الصيغة الرياضية لها فتكتب على الصورة التالية:

$$r(t) = \begin{cases} Rt^2 & \text{for } t \geq 0 \\ 0 & \text{for } t < 0 \end{cases} \quad (٦-٣)$$



شكل (٣-٣)، دالة التسارع.

أما التحويل اللابلاسي لدالة التسارع فهو:

$$R(s) = \frac{2R}{s^3} \quad (٧-٣)$$

#### ٤) الدالة الجيبية:

الدالة الجيبية هي أكثر الإشارات الكهربائية المعروفة لدى المتدربين (أو القارئ) وهي من الإشارات الدورية التي تتبع جيب الزاوية في كيفية تغييرها مع الزمن و صيغتها الرياضية تكتب على النحو التالي:

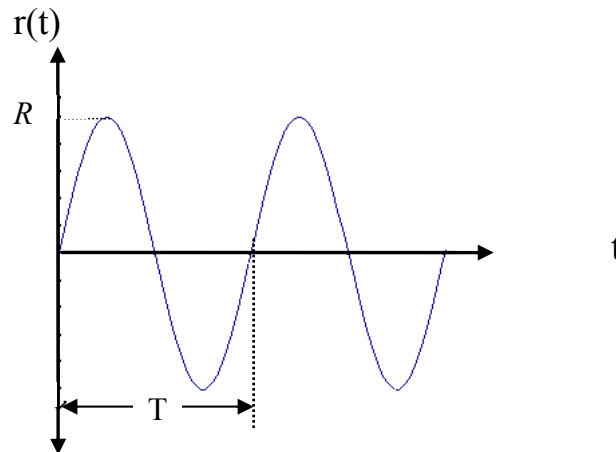
$$r(t) = R \sin(\omega t) \quad (٨-٣)$$

حيث أن

$R$  = هي القيمة العظمى للدالة.

$\omega$  = هي التردد الزاوي وتقاس بـ (rad/s).

و الشكل (٤-٣) يبين التمثيل البياني لهذه الدالة علماً بأن  $T$  هي الزمن الدوري ويقاس الثانية.



شكل (٤-٣)، الدالة الجيبية.





أما التحويل اللابلاسي للدالة الجيبية فهو:

$$R(s) = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (9-3)$$

### 3-3 الاستجابة الزمنية لدالة الخطوة Step Response:

لإيجاد الاستجابة الزمنية لأي نظام يجب علينا معرفة إما المعادلة التفاضلية أو دالة التحويل لهذا النظام والتي تعطي العلاقة بين التحويل اللابلاسي لكل من إشارة الخرج  $C(s)$  وإشارة الدخل  $R(s)$  والتي عادة ما تكون على شكل كثيرة حدود بعدها نتبع الخطوات التالية:

- ١- حول المعادلة التفاضلية من نطاق الزمن إلى نطاق لابلاس.
  - ٢- أوجد التحويل اللابلاسي لإشارة الخرج بدلالة التحويل اللابلاسي لإشارة الدخل والتي تكون عبارة عن كثيرة حدود.
  - ٣- استخدم الكسور الجزئية لتجزئة كثيرة الحدود إلى أبسط صورها.
  - ٤- أوجد تحويلات لابلاس العكسية للحصول على الاستجابة الزمنية للنظام.
- و حيث أن الكسور الجزئية في معظم الأنظمة من الرتبة الأولى والرتبة الثانية وفي القليل من الأنظمة قد تكون هذه الكسور ذات رتب أعلى من الرتبة الثانية وذلك عندما تحتوي دالة التحويل على أقطاب متكررة. لذلك فإننا سوف نهتم بدراسة الاستجابة الزمنية لدالة الخطوة للأنظمة ذات الرتبة الأولى و الرتبة الثانية على اعتبار أن الاستجابة الزمنية لأي نظام تحكم ما هي إلا تجميع لمثل هذه الاستجابات.

### 1-3-3 رتبة النظام System's Order

تعرف رتبة النظام بأنها أعلى درجة للمتغير  $S$  في مقام دالة التحويل الكلية. و بوضع دالة مقام دالة التحويل مساوياً للصفر فإننا نحصل على ما تسمى بالمعادلة المميزة Characteristic equation للنظام والتي تلعب دوراً كبيراً في تحديد ودراسة استقرارية النظام.

### 2-3-3 الاستجابة الزمنية لنظم الرتبة الأولى لدالة الخطوة Step Response.

يمكن إيجاد الاستجابة الزمنية لنظام من الرتبة الأولى عندما يكون الدخل عبارة عن دالة الخطوة بإتباع الخطوات التالية:



١. اكتب المعادلة التفاضلية للنظام على الصورة القياسية التالية. لاحظ أن معامل  $c(t)$  في الصورة القياسية مساوياً للواحد الصحيح.

$$\tau \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = Kr(t) \quad (١٠-٣)$$

علماً بأن:

$\tau$ : الثابت الزمني للنظام.

$K$ : كسب النظام عند الاستقرار.

$r(t)$ : دخل النظام.

$c(t)$ : خرج النظام (أو استجابة النظام).

٢. أوجد التحويل اللابلاسي للمعادلة السابقة (١٠-٣) تحصل على:

$$\tau(sC(s) - c(0)) + C(s) = KR(s)$$

أعد ترتيبها على النحو التالي:

$$(\tau s + 1)C(s) = \tau c(0) + KR(s)$$

أوجد التحويل اللابلاسي لإشارة الخرج بقسمة طرفي المعادلة على المقدار  $\tau s + 1$ :

$$C(s) = c(0) \frac{\tau}{\tau s + 1} + \frac{K}{\tau s + 1} R(s) \quad (١٠-٣)$$

٣. عوض بالتحويل اللابلاسي لإشارة الخطوة أي أن:

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

نحصل على

$$C(s) = c(0) \frac{\tau}{\tau s + 1} + KR \frac{1}{s(\tau s + 1)} \quad (١١-٣)$$

٤. أوجد تحويلات لابلاس العكسية للمعادلة السابقة:

لاحظ أن التحويل العكسي للمقدار الأول:  $c(0) \frac{\tau}{\tau s + 1}$  يمكن الحصول عليه مباشرةً من

جداول تحويلات لابلاس العكسية وهو كالتالي:



$$L^{-1}\left(c(0)\frac{\tau}{\tau s + 1}\right) = L^{-1}\left(c(0)\frac{\tau}{\tau\left(s + \frac{1}{\tau}\right)}\right) = c(0)e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (12-3)$$

وللحصول على تحويل لابلاس العكسي للمقدار  $KR\frac{1}{s(\tau s + 1)}$  فإننا نستخدم طريقة الكسور الجزئية كما يلي:

$$KR\frac{1}{s(\tau s + 1)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{\tau s + 1}$$

حيث يتم الحصول على قيم  $A$  و  $B$  بالطريقة التالية:

$$A = s\frac{KR}{s(\tau s + 1)}\Bigg|_{s=0} = KR$$

$$B = (\tau s + 1)\frac{KR}{s(\tau s + 1)}\Bigg|_{s=-\frac{1}{\tau}} = -\tau KR$$

وبالتعويض في المعادلة عن قيم كل من  $A$  و  $B$  نحصل على:

$$\begin{aligned} \frac{KR}{s(\tau s + 1)} &= \frac{KR}{s} - \frac{\tau KR}{\tau s + 1} \\ &= KR\left(\frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1}\right) \end{aligned}$$

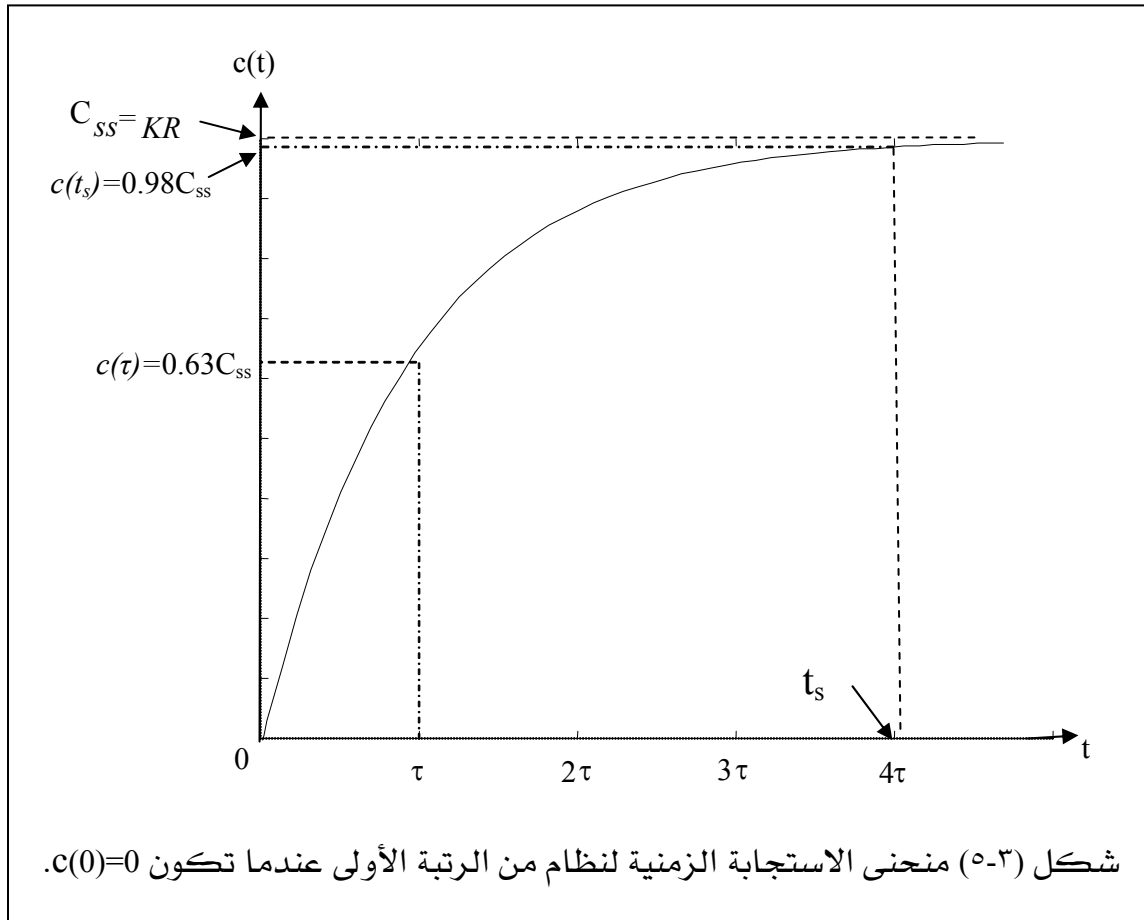
ومن ثم يكون تحويل لابلاس العكسي هو:

$$L^{-1}\left(\frac{KR}{s(\tau s + 1)}\right) = KR(1 - e^{-t/\tau}) \quad (13-3)$$

وبالتالي تكون استجابة نظام الرتبة الأولى لإشارة الخطوة التي سعتها  $R$  هي:

$$C(t) = c(0)e^{-t/\tau} + KR(1 - e^{-t/\tau}) \quad (14-3)$$

عند رسم قيمة الخرج  $c(t)$  كعلاقة مع الزمن نحصل على ما يسمى بمنحنى الاستجابة والذي يعبر عن كيفية تغير استجابة النظام بالنسبة للزمن. الشكل (٥-٣) يوضح منحنى الاستجابة لدالة الخطوة لنظام تحكم من الرتبة الأولى عندما تكون القيمة الابتدائية للاستجابة مساوية للصفر أي أن  $c(0)=0$ .



لاحظ أن الاستجابة تصل إلى حوالي ٩٨,٢٪ في زمن قدره  $4\tau$ ، وهو عبارته عن أربعة أمثال الثابت الزمني  $\tau$ . أي أن الفرق بين الدخل والخرج يكون اقل من ٢٪ (وهو ما يسمى بالخطأ) والذي يتناقص مع الزمن.

### 1-2-3-3 خصائص نظم الرتبة الأولى.

تعتبر القيم التالية من أهم خصائص نظم الرتبة الأولى:

١- الثابت الزمني  $\tau$ :

وهو يستخدم لقياس سرعة استجابة النظام حيث أنه يعطي الانطباع عن سرعة انتقال الاستجابة لكي تصل إلى قيمتها النهائية. وهو معامل  $\frac{dc(t)}{dt}$  أو  $c'(t)$  في الصورة القياسية للمعادلة التفاضلية

٢- زمن الاستقرار  $t_s$ .

وهو الزمن اللازم لبلوغ استجابة النظام إلى ٩٨٪ من قيمتها النهائية، ويُحسب كالتالي:



$$t_s \cong 4\tau \quad (١٥-٣)$$

٣- قيمة الخرج عند الاستقرار  $C_{ss}$ .

وهي القيمة النهائية للاستجابة، ويمكن حسابها كالتالي:

$$C_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} c(t) \quad (١٦-٣)$$

$$C_{ss} = KR$$

٤- معامل الكسب  $K$ .

وهو خارج قسمة قيمة الخرج عند حالة الاستقرار على قيمة الدخل وهو أيضاً معامل  $r(t)$  في الصورة القياسية لمعادلة النظام.

$$K = \frac{C_{ss}}{R} \quad (١٧-٣)$$

### 2-2-3-3 الاستجابة العابرة والاستجابة الدائمة.

بالرجوع إلى معادلة الاستجابة الزمنية لدالة الخطوة لنظم الرتبة الأولى (١٤-٣) نجد أنها تتكون من جزأين هما:

١- الاستجابة العابرة transient response

٢- الاستجابة الدائمة steady state response

بالتالي تكتب الصيغة الرياضية للاستجابة الزمنية كما يلي:

$$C(t) = C_{tr}(t) + C_{ss}(t)$$

حيث إن:

$$C_{tr}(t) = \text{الاستجابة العابرة (transient response)}$$

$$C_{ss}(t) = \text{الاستجابة الدائمة (steady state response)}$$

**الجزء الأول وهو الاستجابة الدائمة Steady-state Response**

والاستجابة الدائمة هي جزء الاستجابة الذي لا يتأثر بعامل الزمن وتعرف أيضاً بالقيمة النهائية والتي يستقر عندها النظام بعد الاستقرار وتعطى بالعلاقة التالية



$$C_{ss} = KR \quad (١٨-٣)$$

### الجزء الثاني وهو الاستجابة العابرة Transient Response

و الاستجابة العابرة هي جزء الاستجابة الذي يتضاءل بمرور الزمن أي انه يتلاشى بعد فترة زمنية معينة وتعطى بالعلاقة التالية

$$C_{tr}(t) = c(0)e^{-\frac{t}{\tau}} - KR e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (١٩-٣)$$

### مثال 1-3

أوجد الاستجابة الزمنية لدالة خطوة الوحدة للنظام التالي:

$$2c'(t) + 4c(t) = 20r(t)$$

$$c(0) = 0$$

ثم حدد كلاً من الاستجابة الدائمة والاستجابة العابرة.

### الحل.

١. المعادلة التفاضلية ليست في الصورة القياسية ولجعلها في الصورة القياسية نقسم طرفيها على 4 لجعل معامل  $c(t)$  مساوياً للواحد فتصبح المعادلة كالتالي:

$$0.5c'(t) + c(t) = 5r(t)$$

وبمقارنة المعادلة السابقة مع الصورة القياسية نجد أن:

$$\tau = 0.5 \quad \text{الثابت الزمني}$$

$$K = 5 \quad \text{كسب النظام}$$

٢. نعوض بالقيم السابقة في معادلة الاستجابة، علماً بأن قيمة  $R=1$  لإشارة خطوة الوحدة وأيضاً القيمة الابتدائية للاستجابة مساوية للصفر ( $c(0)=0$ )، فنحصل على:

$$c(t) = 5(1 - e^{-\frac{t}{0.5}})$$

$$c(t) = 5 - 5e^{-2t}$$

٣. و من معادلة الاستجابة نجد أن:

$$C_{ss} = 5 \quad \bullet \text{ الاستجابة الدائمة:}$$

$$C_{tr}(t) = -5e^{-2t} \quad \bullet \text{ والاستجابة العابرة:}$$



### 3-3-3 الاستجابة الزمنية لنظم الرتبة الثانية:

لإيجاد الاستجابة الزمنية لنظم الرتبة الثانية نتبع الخطوات التالية:

١. اكتب المعادلة التفاضلية للنظام في الصورة القياسية التالية والتي فيها معامل  $\frac{d^2c(t)}{dt^2}$  أو  $c''(t)$  مساوياً للوحدة كما يلي.

$$c''(t) + 2\zeta\omega_n c'(t) + \omega_n^2 c(t) = K\omega_n^2 r(t)$$

أو

$$c''(t) + 2\alpha c'(t) + \omega_n^2 c(t) = K\omega_n^2 r(t) \quad (٢٠-٣)$$

بحيث يعرف كلاً من:

$$\omega_n = \text{تردد الرنين أو التردد الطبيعي الغير مخمد}$$

$$\zeta = \text{نسبة الإخماد.}$$

$$\alpha = \text{معامل الإخماد } (\alpha = \zeta\omega_n).$$

$$K = \text{كسب النظام عند الاستقرار.}$$

ولتسهيل عملية تحليل الاستجابة الزمنية للنظام سوف نفترض أن القيم الابتدائية للنظام تساوي صفر.

٢. أوجد تحويلات لابلاس للمعادلة التفاضلية السابقة (٢٠-٣) تحصل على:

$$S^2 C(s) + 2\alpha S C(s) + \omega_n^2 C(s) = K\omega_n^2 R(s)$$

والتي يمكن إعادة كتابتها كما يلي:

$$(S^2 + 2\alpha S + \omega_n^2) C(s) = K\omega_n^2 R(s)$$

وبقسمة طرفي المعادلة على المقدار  $s^2 + 2\alpha s + \omega_n^2$  نحصل على التالي:

$$C(s) = \frac{k\omega_n^2}{S^2 + 2\alpha S + \omega_n^2} R(s) \quad (٢١-٣)$$

٣. وبالتعويض عن  $R(s) = \frac{R}{s}$  في المعادلة السابقة للاستجابة (٢١-٣) فإننا نحصل على:

$$C(s) = \frac{k\omega_n^2 R}{S(S^2 + 2\alpha S + \omega_n^2)} \quad (٢٢-٣)$$

كما ذكرنا سابقاً يسمى المقدار  $s^2 + 2\alpha s + \omega_n^2$  بالمعادلة المميزة للنظام، وهي معادلة من الدرجة الثانية وكما هو معروف فإن لهذه المعادلة جذران هما:

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_n^2}$$



وتعتمد استجابة نظم الرتبة الثانية بشكل أساسي على قيمة الجذرين  $p_1$  و  $p_2$  و التي تعتمد بصورة أساسية على المميز أي قيمة  $\alpha$  بالنسبة لقيمة  $\omega_n$  والتي تؤدي إلى ثلاث حالات هي:

### 1-3-3-3 الحالة الأولى: حالة الإخماد الزائد ( $\zeta > 1$ ) Over Damping

في هذه الحالة تكون  $\alpha > \omega_n$  أو بمعنى آخر تكون  $\zeta > 1$  وفي هذه الحالة يكون الجذران حقيقيين وغير متساويين.

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_n^2}$$

باستخدام الكسور الجزئية وتحويلات لابلاس العكسية نحصل معادلة الاستجابة الزمنية لنظم الرتبة الثانية لدالة الخطوة التي سعتها R في حالة الإخماد الزائد وهي:

$$C(t) = kR \left( 1 + \frac{P_2}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} - \frac{P_1}{p_1 - p_2} e^{p_2 t} \right) \quad (23-3)$$

### 2-3-3-3 الحالة الثانية: حالة الإخماد الحرج ( $\zeta = 1$ ) Critical Damping

في هذه الحالة تكون قيمة  $\alpha = \omega_n$  أو بمعنى آخر تكون  $\zeta = 1$  وفي هذه الحالة يكون الجذران حقيقيين وسالبان ومتساويان أي أن.

$$p_{1,2} = -\omega_n \quad \text{أو} \quad p_{1,2} = -\alpha$$

وباستخدام الكسور الجزئية وتحويلات لابلاس العكسية تكون الاستجابة الزمنية لنظم الرتبة الثانية لدالة الخطوة التي سعتها R في حالة الإخماد الحرج على النحو التالي:

$$C(t) = KR \left( 1 - (1 + \omega_n t) e^{-\omega_n t} \right) \quad (24-3)$$

### 3-3-3-3 الحالة الثالثة: حالة الإخماد الناقص ( $\zeta < 1$ ) Under Damping

في هذه الحالة تكون قيمة  $\alpha < \omega_n$  أو بمعنى آخر تكون  $\zeta < 1$  ويكون الجذران عددان مركبان مترافقان

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\sqrt{\omega_n^2 - \alpha^2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_d$$





حيث يطلق على  $\omega_d$  التردد الطبيعي المخمد ويمكن حسابه باستخدام العلاقة التالية:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \alpha^2} = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

وباستخدام الكسور الجزئية و تحويلات لابلاس العكسية تكون الاستجابة الزمنية لنظم الرتبة الثانية لدالة الخطوة التي سعتها R في حالة الإخماد الناقص على النحو التالي:

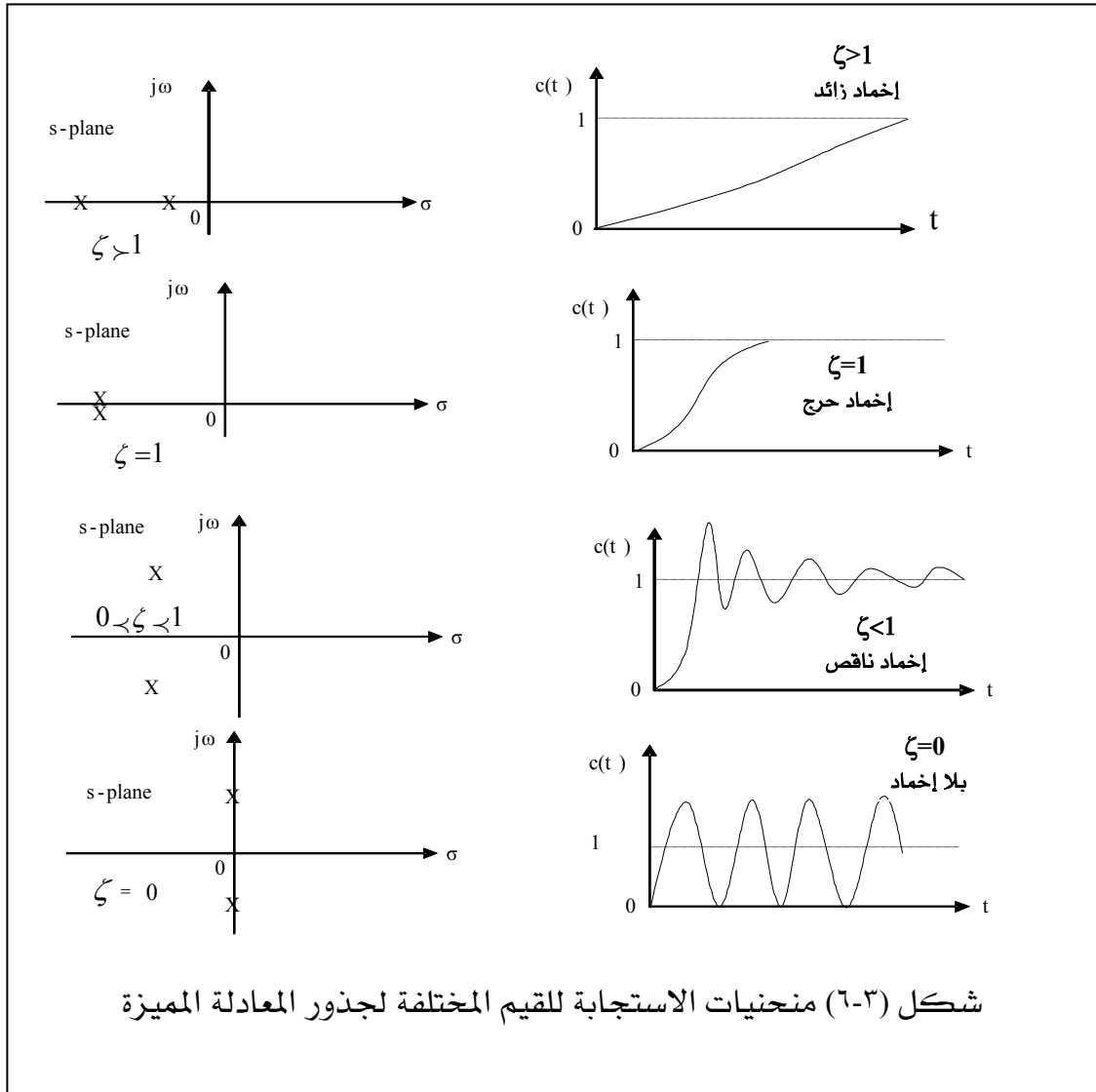
$$C(t) = KR \left( 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_d t + \phi) \right) \quad (٢٥-٣)$$

حيث أن:

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \right) = \cos^{-1} \zeta$$

الشكل (٦-٣) يعطي استجابة نظم الرتبة الثانية لإشارة الخطوة لأنواع الإخماد الثلاثة، بالإضافة إلى حالة عدم الإخماد (Un-damped) والتي يمكن تلخيصها كما يلي:

- ١- الإخماد الزائد: منحنى الاستجابة لا يحتوي على اهتزازات ولا يتعدى القيمة النهائية للخروج.
- ٢- الإخماد الحرج: هذه الحالة تعتبر وسطية بين حالتى الإخماد الزائد و الإخماد الناقص، ومنحنى الاستجابة لا يحتوي على اهتزازات ولا يتعدى القيمة النهائية.
- ٣- الإخماد الناقص: منحنى الاستجابة يحتوي على اهتزازات ويتعدى القيمة النهائية ولكنه بعد فترة زمنية تتلاشى الاهتزازات ويعود النظام إلى حالة الاستقرار.



### مثال 2-3

إذا كانت العلاقة بين إشارة الدخل وإشارة الخرج لنظام تحكم من الرتبة الثانية تعطى

بالمعادلة التفاضلية التالية

$$c''(t) + 4c'(t) + 4c(t) = 2r(t)$$

$$c(0) = c'(0) = 0,$$

وإشارة الدخل هي دالة الخطوة التالية

$$r(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$



أوجد كلاً مما يلي:

- (أ) تردد الرنين  
 (ب) معامل الإخماد، و نوع الإخماد.  
 (ج) كسب النظام.  
 (د) الاستجابة الزمنية للنظام.

**الحل:**

(أ) لاحظ أن معادلة النظام لها نفس شكل المعادلة القياسية لنظم الرتبة الثانية ولإيجاد قيمة كلاً من تردد الرنين ومعامل الإخماد نقوم بمقارنة معادلة النظام مع المعادلة القياسية لنظم الرتبة الثانية ومنها نستنتج أن:

$$\omega_n^2 = 4 \Rightarrow \omega_n = \sqrt{4} \Rightarrow \omega_n = 2$$

$$2\alpha = 4 \Rightarrow \alpha = 2 \Rightarrow \zeta = 1$$

من معامل  $c(t)$  نجد أن تردد الرنين هو  
 (ب) من معامل  $c'(t)$  نجد أن معامل الإخماد هو  
 وبما أن قيمة  $\alpha$  تساوي قيمة  $\omega_n$  ( $\zeta = 1$ ) إذاً نوع الإخماد حرج.  
 ومن إشارة الخطوة نجد أن سعتها  $R=1$

(ج) مرة أخرى بمقارنة معادلة النظام مع المعادلة القياسية لنظم الرتبة الثانية ومنها نجد أن:

$$K\omega_n^2 = 2 \Rightarrow K = \frac{2}{\omega_n^2} \Rightarrow K = \frac{2}{4} \Rightarrow K = 0.5$$

(د) في حالة الإخماد الحرج تكون معادلة الاستجابة كالتالي:

$$C(t) = KR \left( 1 - (1 + \omega_n t) e^{-\omega_n t} \right)$$

لإيجاد استجابة النظام نعوض في المعادلة السابقة.

$$C(t) = 0.5 \left( 1 - (1 + 2t) e^{-2t} \right)$$

### مثال 3-3

إذا كانت العلاقة بين إشارة الدخل وإشارة الخرج لنظام تحكم من الرتبة الثانية تعطى

$$\frac{d^2 c(t)}{dt^2} + 34.5 \frac{dc(t)}{dt} + 1000c(t) = 1000r(t)$$

$$c'(0) = 0, \quad c(0) = 0$$

حيث أن

وإشارة الدخل هي دالة الخطوة التالية

$$r(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$



أوجد كلاً مما يلي:

- (أ) تردد الرنين  
 (ب) معامل الإخماد، و نوع الإخماد.  
 (ج) كسب النظام.  
 (د) الاستجابة الزمنية للنظام.

**الحل:**

(أ) لاحظ أن معادلة النظام لها نفس شكل المعادلة القياسية لنظم الرتبة الثانية ولإيجاد قيمة كلاً من تردد الرنين ومعامل الإخماد نقوم بمقارنة معادلة النظام مع المعادلة القياسية لنظم الرتبة الثانية ومنها نستنتج أن:

من معامل  $c(t)$  نجد أن تردد الرنين هو

$$\omega_n^2 = 1000 \Rightarrow \omega_n = \sqrt{1000} \Rightarrow \omega_n = 31.62$$

(ب) من معامل  $c'(t)$  نجد أن معامل الإخماد هو

$$2\alpha = 34.5 \Rightarrow \alpha = 17.25 \Rightarrow \xi = 0.545$$

وبما أن قيمة  $\alpha$  أقل من قيمة  $\omega_n$  (أو  $\xi < 1$ ) إذاً نوع الإخماد ناقص.

ومن إشارة الخطوة نجد أن سعتها  $R=1$

(ج) مرة أخرى بمقارنة معادلة النظام مع المعادلة القياسية لنظم الرتبة الثانية ومنها نجد أن:

$$K\omega_n^2 = 1000 \Rightarrow K = \frac{1000}{\omega_n^2} \Rightarrow K = 1$$

(د) في حالة الإخماد الناقص تكون معادلة الاستجابة كالتالي:

$$C(t) = KR \left( 1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_d t + \phi) \right)$$

$$\phi = \cos^{-1} \xi = \cos^{-1}(0.545) = 56.9^\circ = 0.994 \text{ rad.} \quad \text{حيث}$$

$$\omega_d = \sqrt{1-\xi^2} = \sqrt{1-(0.546)^2} = 26.5. \text{ rad.} \quad \text{و}$$

لإيجاد استجابة النظام نعوض في المعادلة السابقة فنحصل على.

$$C(t) = (1 - 1.193 e^{-17.25 t} \sin(26.5 t + 0.994))$$



وحيث أن الاستجابة الزمنية تنقسم الى جزأين هما:

$$C(t) = C_{tr}(t) + C_{ss}(t)$$

حيث إن:  $C_{tr}(t)$  = الاستجابة العابرة (transient response)

$C_{ss}(t)$  = الاستجابة الدائمة (steadystate response)

ففي نظم الرتبة الثانية تختلف صيغة الاستجابة العابرة باختلاف نوع الإخماد، ولكن كما ذكرنا سابقاً فإن الاستجابة العابرة هي جزء الاستجابة الذي سوف يتلاشى بعد مرور زمن معين يعتمد على سرعة استجابة النظام.

### 4-3-3-3 خصائص نظم الرتبة الثانية:

غالباً ما تستخدم استجابة نظم التحكم للإشارات القياسية مثل إشارة الخطوة للتحكم على أداء النظم وذلك من خلال النظر إلى منحنى الاستجابة. وتعتبر الاستجابة أساساً للمقارنة بين أداء النظم وتحديد ما إذا كان أداء النظام مقبولاً أم لا ومن ثم عمل التطوير اللازم لتحسين الأداء. والشكل التالي يبين استجابة نموذجية لنظام من الرتبة الثانية لإشارة الخطوة عندما يكون الإخماد ناقصاً.

وعند عمل المقارنة يتم توحيد الشروط الابتدائية واعتبارها جميعاً مساوية للصفر وتكون المواصفات التالية هي الأساس المتفق عليه عند مقارنة استجابات النظم.

١. زمن التأخير  $t_d$ :

الزمن اللازم لبلوغ الاستجابة ٥٠٪ من قيمتها النهائية للمرة الأولى.

٢. زمن الصعود  $t_r$ :

الزمن اللازم لكي تنتقل الاستجابة من ١٠٪ الى ٩٠٪ من قيمتها النهائية.

$$t_r = \frac{\pi - \varphi}{\omega_d} \quad (٢٦-٣)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \zeta$$

حيث أن

٣. أقصى ذروة  $C_p$ :

أعلى قيمة تبلغها الاستجابة.



٤. زمن الذروة  $t_p$ :

هو الزمن الذي تصل عنده الاستجابة لأقصى قيمة، ويمكن حسابه أيضا من العلاقة

التالية:

$$t_p = \frac{\pi}{\sqrt{\omega_n^2 - \alpha^2}} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (٢٧-٣)$$

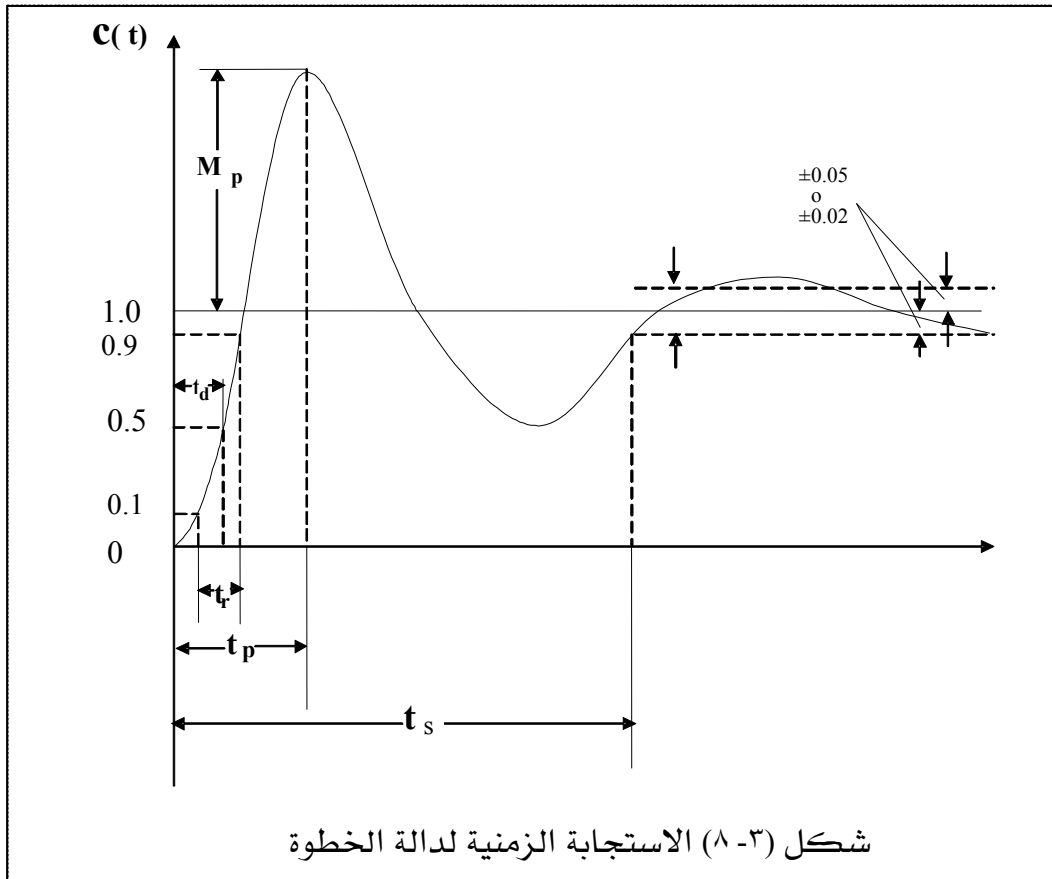
٥. زمن الاستقرار  $t_s$ :

الزمن اللازم لبقاء الاستجابة في حدود نسبة مئوية من قيمتها النهائية (مثل  $\pm 2\%$  أو  $\pm 0.5\%$ )

٦. أقصى تجاوز  $M_p$ :

$$M_p = c_p - c_{ss} = e^{-\zeta\pi / \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (٢٨-٣)$$

حيث  $c_p$  يمثل أقصى قيمة للاستجابة و  $c_{ss}$  يمثل القيمة النهائية للاستجابة.





٧. التردد الزاوي للاهتزازات المخمدة:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \alpha^2} = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (٢٩-٣)$$

٨. زمن الاستقرار Settling time

$$t_s = 4\tau \quad (٢٩-٣)$$

### مثال 4-3

إذا علمت أن نسبة الإخماد  $\zeta = 0.6$  وتردد الرنين  $\omega_n = 5 \text{ rad/sec}$  للاستجابة الزمنية لدالة الخطوة لنظام تحكم من الرتبة الثانية فأوجد كلاً من:

أ - زمن الارتفاع ( $t_r$ )

ب - زمن الذروة ( $t_p$ )

ج - زمن الاستقرار ( $t_s$ )

د - أقصى تجاوز ( $M_p$ )

### الحل:

نقوم أولاً بحساب التردد الزاوي المخمد ومعامل الإخماد وكذلك الزاوية  $\varphi$  كالتالي:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} = 5 \sqrt{1 - 0.6^2} = 4 \text{ rad/sec}$$

$$\varphi = \cos^{-1}(\zeta) = \cos^{-1}(0.6) = 53.13^\circ$$

$$\varphi = 53.13^\circ \times \frac{\pi}{180} = 0.93 \text{ rad}$$

أ - زمن الارتفاع rise time

$$t_r = \frac{\pi - \varphi}{\omega_d} = \frac{3.14 - 0.93}{4} = 0.55 \text{ sec}$$

ب - زمن القمة peak time

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{3.14}{4} = 0.785 \text{ sec}$$



ج- زمن الاستقرار settling time

$$t_s = \frac{4}{\alpha} = \frac{4}{3} = 1.33 \text{ sec}$$

د- أقصى تجاوز maximum overshoot

$$M_p = e^{\left(-\frac{\sigma}{\omega_d}\right)\pi} = e^{-\left(\frac{3}{4}\right)3.14} = 0.095$$

وتكون النسبة المئوية لأقصى تجاوز هي:

$$M_p = 0.095 \times 100 = 9.5\%$$





## تمارين

١. نظام تحكم له المعادلة التفاضلية وإشارة الخطوة التالية:

$$c'(t) + 10c(t) = 10r(t)$$

$$c(0) = 0$$

$$r(t) = \begin{cases} 5 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

أوجد ما يلي:

- (أ) الثابت الزمني.
- (ب) كسب النظام.
- (ج) الاستجابة الزمنية.
- (د) الاستجابة الدائمة والعابرة.

٢. نظام تحكم من الرتبة الأولى له المعادلة التفاضلية وإشارة الخطوة التالية:

$$10c'(t) + c(t) = r(t)$$

$$c(0) = 0$$

$$r(t) = \begin{cases} 10 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

أوجد ما يلي:

- (أ) الثابت الزمني.
- (ب) كسب النظام.
- (ج) الاستجابة الزمنية.
- (د) الاستجابة الدائمة والعابرة.

٣. نظام تحكم له المعادلة التفاضلية وإشارة الخطوة التالية:

$$c''(t) + 4c'(t) + c(t) = 16r(t)$$

$$c(0) = c'(0) = 0$$

$$r(t) = \begin{cases} 5 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

أوجد ما يلي:

- (أ) تردد الرنين ومعامل الإخماد، ثم حدد نوع الإخماد.



- (ب) كسب النظام.  
 (ج) الاستجابة الزمنية.  
 (د) حدد الاستجابة الدائمة والعبارة

٤. نظام تحكم من الدرجة الثانية ممثل بالمعادلة التفاضلية وإشارة الخطوة التالية:

$$c''(t) + 2c'(t) + c(t) = 10r(t)$$

$$c(0) = c'(0) = 0,$$

$$r(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

أوجد ما يلي:

- (أ) تردد الرنين ومعامل الإخماد، ثم حدد نوع الإخماد.  
 (ب) كسب النظام.  
 (ج) الاستجابة الزمنية.

٥. نظام تحكم له المعادلة التفاضلية وإشارة الخطوة التالية:

$$c''(t) + 4c'(t) + 8c(t) = 16r(t)$$

$$c(0) = c'(0) = 0$$

$$c(t) = \begin{cases} 5 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

أوجد :

- (أ) تردد الرنين ومعامل الإخماد، و ما هو نوع الإخماد.  
 (ب) كسب النظام.  
 (ج) الاستجابة الزمنية.  
 (د) ارسم منحنى الاستجابة.

٦- نظام تحكم من الدرجة الثانية له نسبة الإخماد  $\zeta = 0.8$  وتردد الرنين  $\omega_n = 6 \text{ rad/sec}$

لاستجابته الزمنية لدالة الخطوة فأوجد كلاً من:

أ- زمن الارتفاع ( $t_r$ )

ب- زمن القمة ( $t_p$ )



ج - زمن الاستقرار ( $t_s$ )

د - أقصى تجاوز ( $M_p$ ):

٧- ليكن النظام التالي

$$c''(t) + 3c'(t) + 2c(t) = 2r(t)$$

$$c(0) = c'(0) = 0,$$

$$r(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

أوجد ما يلي

أ. تردد الرنين ومعامل الإخماد ونوع الإخماد

ب. كسب النظام

ج. الاستجابة لدالة خطوة الوحدة

د. ارسم منحنى الاستجابة

٩- ليكن النظام التالي

$$2c''(t) + 4c'(t) + 2c(t) = 20r(t)$$

$$c(0) = c'(0) = 0,$$

$$r(t) = \begin{cases} 4 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

أوجد ما يلي

أ. تردد الرنين ومعامل الإخماد ونوع الإخماد

ب. كسب النظام

ج. الاستجابة لاشارة الخطوة .

د. ارسم منحنى الاستجابة



## الوحدة الرابعة

### منظومة التحكم ذات الحلقة المغلقة

**الهدف العام للوحدة :**

تحديد إشارة الخطأ و معرفة تأثير الحاكمت المختلفة على قيمتها عند الاستقرار.

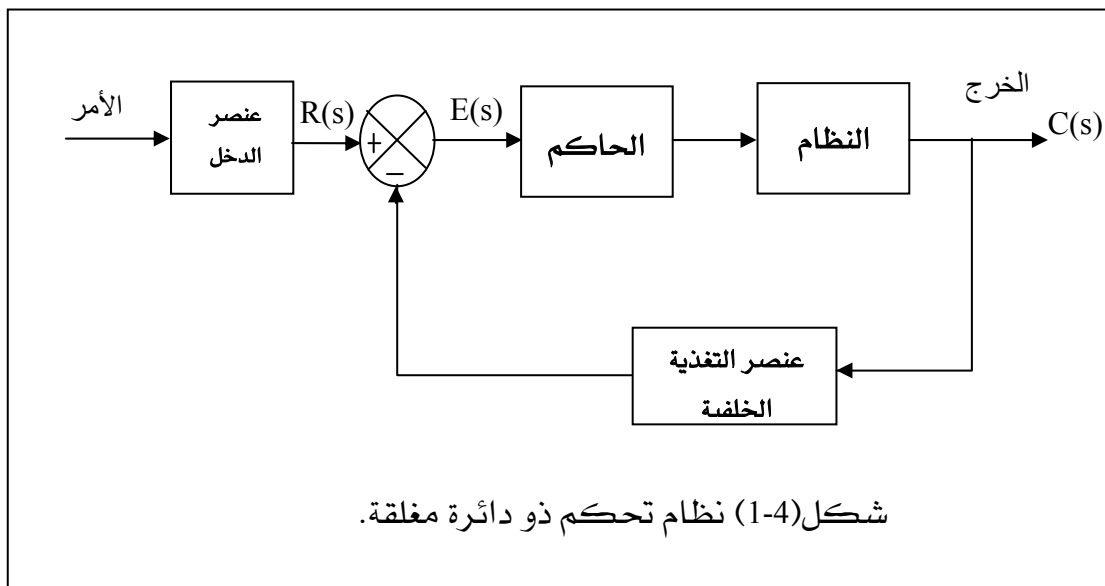
**الأهداف التفصيلية :**

١. أن يعرف المتدرب التحكم ذو الحلقة المغلقة.
٢. أن يعرف المتدرب مزايا و خواص نظم التحكم ذات الحلقة المغلقة.
٣. أن يعرف المتدرب إشارة الخطأ في حلقة تحكم مغلقة
٤. أن يعرف المتدرب تأثير الحاكم التناسبي على إشارة الخطأ
٥. أن يعرف المتدرب تأثير الحاكم التفاضلي على إشارة الخطأ
٦. أن يعرف المتدرب تأثير الحاكم التكاملي على إشارة الخطأ
٧. أن يعرف المتدرب تأثير الحاكم التناسبي التكاملي على إشارة الخطأ
٨. أن يعرف المتدرب تأثير الحاكم التناسبي التفاضلي على إشارة الخطأ



#### 1-4 التحكم ذو الحلقة المغلقة Closed-loop Control

نظام التحكم ذو الحلقة المغلقة هو نظام فيه يتم توليد إشارة التحكم بعد مقارنة القيمة الفعلية لإشارة الخرج مع إشارة المرجع والتي تمثل القيمة المرغوب فيها لإشارة الخرج وبالتالي فإنه في نظم التحكم ذات الحلقة المغلقة يكون لإشارة الخرج تأثير مباشر على عملية التحكم. وغالباً ما يطلق على أنظمة التحكم ذات الحلقة المغلقة بأنظمة التحكم ذات التغذية الخلفية Feedback Control Systems.



الشكل (1-4) يوضح المخطط الصندوقي block diagram الذي يمثل نظام تحكم ذي حلقة مغلقة، وفيه يكون الفرق بين إشارة الدخل المرجعي وإشارة التغذية الخلفية والذي يسمى بإشارة الخطأ (E) والتي تقوم بتشغيل الحاكم controller الذي يقوم بتفعيل عنصر التحكم النهائي ليؤثر بدوره على الوحدة أو النظام المراد التحكم فيه plant للعمل على تقليل أو إلغاء الخطأ وبالتالي ضبط الخرج عند القيمة المرغوبة. ويجب ملاحظة أن عنصر التغذية الخلفية (عادة ما يكون جهاز القياس أو حساس) يقوم بقياس الخرج وتحويله إلى إشارة تماثل إشارة الدخل المرجعي من حيث النوع ووحدة القياس حتى يمكن مقارنتهما في عنصر المقارنة. ويسمى الدخل هنا عادة الدخل المقارن وذلك لأنه تتم مقارنته مع إشارة التغذية الخلفية التي هي الخرج بعد قياسه وتحويله إلى إشارة ممكن مقارنتها بالدخل. ومن أمثلة عناصر المقارنة المكبر الإلكتروني operational amplifier وهناك عناصر مقارنة ميكانيكية وأجهزة الهواء المضغوط وخلافه.



وغالباً ما تكون إشارة التحكم الخارجة من الحاكم قيمتها صغيرة لذا فإننا نستخدم مكبر قدرة (كهربائي أو ميكانيكي) لتكبيرها لتصبح قادرة علي التأثير في عنصر التحكم النهائي والذي بدوره يؤثر في النظام المراد التحكم فيه plant . وتتميز أنظمة التحكم ذات الحلقة المغلقة باستخدام التغذية الخلفية التي تجعل النظام المتحكم فيه قليل الحساسية للاضطرابات الخارجية والتي قد تحدث في محيطه أو التغيرات الداخلية والتي قد تحدث في معاملاته وهذا مالا يمكن تحقيقه في نظم التحكم ذات الحلقة المفتوحة. لكن أنظمة التحكم ذات الحلقة المغلقة أكثر تعقيداً وأعلى تكلفة من نظم التحكم ذات الحلقة المفتوحة كما أنها معرضة أيضاً للتذبذب وعدم الاستقرار.

#### 2-4 الخواص المرغوبة في نظم التحكم ذات الحلقة المغلقة

مما سبق يمكننا القول بأنه في منظومة التحكم ذات الحلقة المغلقة يقوم الحاكم باستقبال إشارات من أجهزة القياس التي تقوم بدور المراقب للنظام ثم بعد ذلك يقوم الحاكم باتخاذ القرار المناسب وذلك بإرسال إشارة التحكم إلى باقي عناصره للتنفيذ. ومن الخواص التي يجب أن تتوفر في نظم التحكم ذات الحلقة المغلقة من أهمها:

- **الاستقرار.**

يجب أن تظل الكميات المحكومة محدودة بحيث لا تنمو بلا حدود.

- **الدقة.**

يجب أن تكون القيمة الفعلية للكمية المراد التحكم فيها أقرب ما يمكن أو مساوية تماماً للقيمة المرغوبة للكمية المراد التحكم فيها.

- **سرعة الاستجابة.**

يجب أن تصل القيمة الفعلية للكمية المراد التحكم فيها إلى القيمة المطلوبة في وقت مناسب.

- **التكلفة.**

يجب أن تكون تكلفة إنجاز عملية التحكم مناسبة لعملية التحكم ولا تكون باهظة جداً.



### 3-4 دور الحاكمت في ضبط الدائرة المغلقة

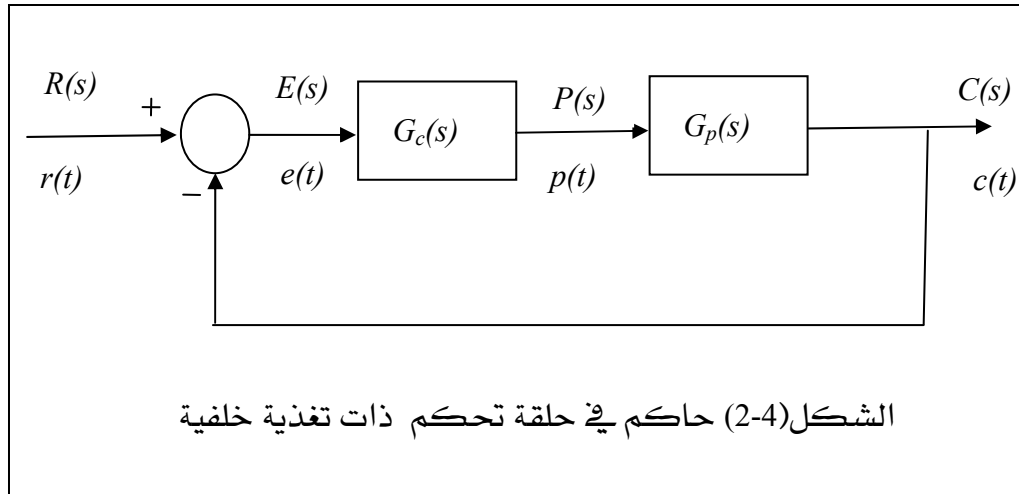
يعتبر الحاكم من أهم العناصر الموجودة في منظومة التحكم الآلي إذ أنه يعتبر بمثابة العقل المدبر والمفكر بالنسبة للنظام ككل. فكما ذكرنا سلفاً فإن الحاكم يقوم باتخاذ القرارات المناسبة تبعاً لقاعدة تحكم خاصة بنوعه وإرسال إشارات التحكم عند حدوث أي تغييرات طارئة في محيطه أو أية تغييرات داخلية في معاملاته. كما يتلقى المعلومات المختلفة من الحساسات وأجهزة القياس التي تراقب النظام ومتغيرات التحكم فيها ويقوم بإرسال إشارات محسوبة ومقننه إلى عناصر التحكم لتقوم هي الأخرى لتنفيذ تلك الإشارات والقرارات وتستمر هذه العملية في الحدوث إلى أن تعود المتغيرات المحكومة إلى قيمتها المرغوبة.

وهذا يعني أن الحاكم في منظومة التحكم يعمل بشكل مستمر طوال فترة التشغيل لتقليل قيمة الخطأ بين كل من القيمة المرغوبة والقيمة الفعلية للمتغير المحكوم. في هذه الوحدة سوف نقوم بتوضيح كيفية الحصول على التحويل اللابلاسي لإشارة الخطأ التي تنشأ في حلقات التحكم المغلقة وبعد ذلك سنقوم بدراسة تأثير كل من الحاكم التناسبي والحاكم التكاملي والحاكم التفاضلي والحاكم التناسبي التكاملي والحاكم التفاضلي التفاضلي على إشارة الخطأ. كما أننا سنقوم بدراسة و توضيح تأثير معاملات كل من إشارة الخطأ و استجابة نظم التحكم ذات الحلقات المغلقة.

### 4-4 التحويل اللابلاسي لإشارة الخطأ

سبق لنا وأن عرفنا إشارة الخطأ في الوحدة الأولى على أنها الإشارة التي تعبر عن الفرق بين إشارة الدخل المرجعي وإشارة الخرج. وتنتج هذه الإشارة من عنصر المقارنة (المقارن) حيث يقوم بمقارنة الإشارتين السابقتين. في الشكل التالي تظهر إشارة الخطأ كفرق بين الإشارتين  $r(t)$  و  $b(t)$  حيث  $r(t)$  هي الدخل المرجعي و  $b(t)$  هي قياس للقيمة الفعلية للمتغير المراد التحكم فيه  $c(t)$ .





علماً بأن :  $G_p(s)$  هي دالة تحويل النظام المراد التحكم فيه  
 $G_c(s)$  هي دالة تحويل الحاكم

وحيث أنه في حالة التغذية الخلفية الأحادية ( $H(s)=1$ ) فإن إشارة الخطأ في مجال الزمن تكتب كما يلي:

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (1-4)$$

أما في مجال المتغير المركب  $s$  والذي نطلق عليه التحويل اللابلاسي لإشارة الخطأ فتكتب كما يلي

$$E(s) = R(s) - C(s) \quad (2-4)$$

وحيث أن المسار الأمامي يتكون من عنصرين موصلين على التوالي هما  $G_p(s)$  و  $G_c(s)$  ومن ثم فإن

$$C(s) = G_c(s) \cdot G_p(s) \cdot E(s)$$

بالتعويض بقيمة  $G(s)$  في المعادلة (2-4) نصل على

$$E(s) = R(s) - G_c(s)G_p(s)E(s)$$

$$E(s)(1 + G_c(s)G_p(s)) = R(s) \quad (3-4) \quad \text{أو}$$

ومن ثم يصبح تحويل لابلاس لإشارة الخطأ على النحو التالي:



$$E(s) = \left( \frac{1}{1 + G_c(s)G_p(s)} \right) R(s) \quad (4-4)$$

#### 5-4 تأثير الحاكم التناسبي على إشارة الخطأ

في هذا الجزء سوف نقوم بدراسة تأثير الحاكم التناسبي على استجابة الحلقة المغلقة لنظام تحكم من الرتبة الأولى عندما يكون الدخل المرجعي عبارة عن إشارة خطوة ارتفاعها  $R_0$

المعادلة الزمنية للحاكم التناسبي على النحو التالي:

$$p(t) = K_p e(t)$$

بإدخال تحويلات لابلاس على طرفي المعادلة الزمنية للحاكم نحصل على

$$P(s) = K_p E(s)$$

ومن ثم تكون دالة تحويل الحاكم التناسبي هي:

$$G_c(s) = K_p \quad (5-4)$$

وإشارة الدخل المرجعي هي

$$r(t) = \begin{cases} R_0 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

ومن ثم يكون تحويل لابلاس لإشارة الدخل المرجعي كما يلي

$$R(s) = \frac{R_0}{s}$$

أما الصيغة العامة لدالة تحويل نظم الرتبة الأولى فتكتب على النحو التالي:

$$G_p(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

بالتعويض عن  $G_c(s)$  و  $G_p(s)$  و  $R(s)$  في المعادلة (3-4) نحصل على تحويل لابلاس

لإشارة الخطأ على النحو التالي:

$$E(s) = \frac{1}{1 + K_p \frac{1}{\tau s + 1}} \left( \frac{R_0}{s} \right) \quad (6-4)$$

بتوحيد المقام في مقام المعادلة 6-4 نحصل على

$$E(s) = \frac{R_0 (\tau s + 1)}{s (\tau s + 1 + K_p)} \quad (7-4)$$



باستخدام قانون القيمة النهائية نحصل على القيمة النهائية لإشارة الخطأ كما يلي

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} (sR_0) \left( \frac{\tau s + 1}{s(\tau s + 1 + K_p)} \right) = \frac{R_0}{1 + K_p} \quad (8-4)$$

واضح من المعادلة (8-4) أن القيمة النهائية لإشارة الخطأ ليست منعدمة، ومن ثم يتضح أن الحاكم التناسبي لا يلغي إشارة الخطأ، غير أنه يمكن التقليل من إشارة الخطأ بزيادة معامل الحاكم التناسبي  $K_p$ . ولكن الزيادة المفرطة قد تؤدي إلى عدم الاستقرار.

الشكل (3-4) يوضح تأثير الحاكم التناسبي على قيمة الخطأ عند الاستقرار لنظام تحكم

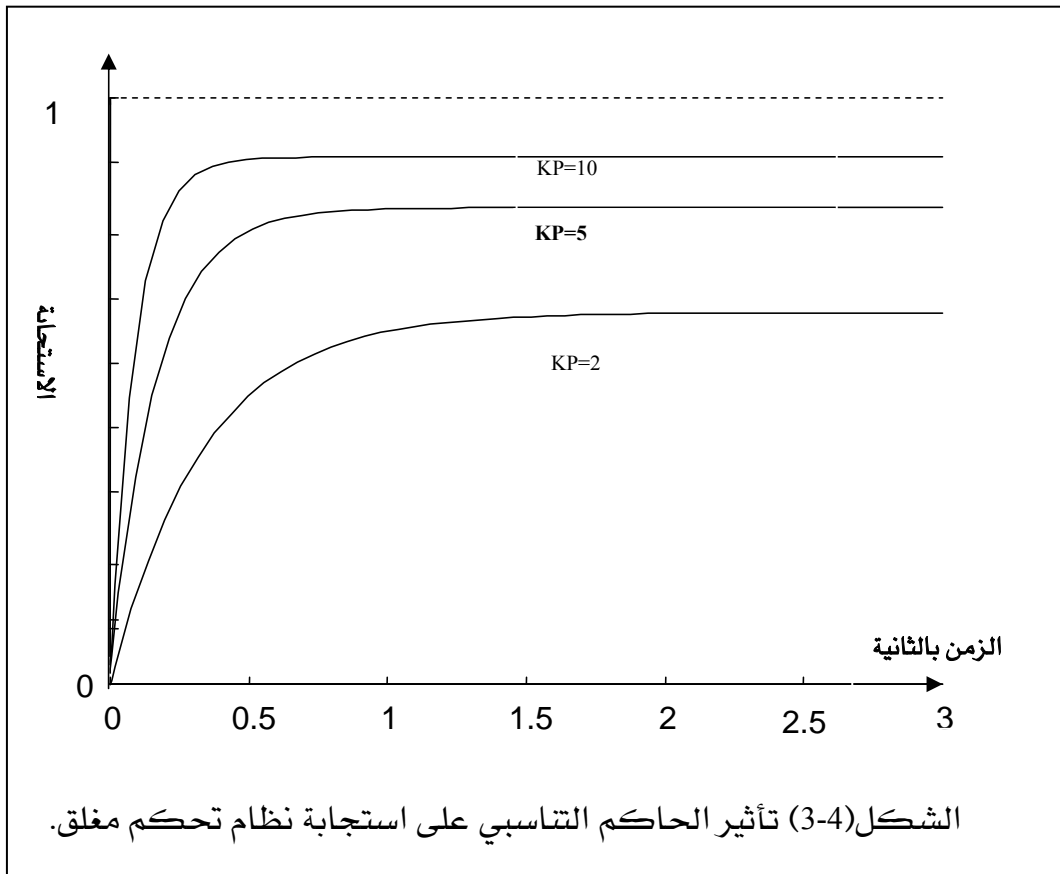
ذو حلقة تغذية خلفية من الرتبة الأولى باستخدام برنامج Matlab Simulink

$$G_p(s) = \frac{1}{s+1} \quad \text{حيث أن: دالة تحويل النظام هي}$$

$$r(t) = 1 \quad \text{والدخل المرجعي هو دالة خطوة الوحدة}$$

ولقد تم اختيار قيم معاملات الحاكم كما يلي:

$$K_p = 2, \quad K_p = 5, \quad K_p = 10$$





#### 6-4 تأثير الحاكم التكاملي على إشارة الخطأ

في هذا الجزء سوف نقوم بدراسة تأثير الحاكم التكاملي على استجابة الحلقة المغلقة لنظام تحكم من الرتبة الأولى عندما يكون الدخل المرجعي عبارة عن إشارة خطوة ارتفاعها  $R_0$

المعادلة الزمنية للحاكم التكاملي على النحو التالي:

$$p(t) = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau$$

و دالة تحويل الحاكم التكاملي هي:

$$G_c(s) = \frac{K_I}{s} \quad (9-4)$$

أما إشارة الدخل المرجعي هي

$$r(t) = \begin{cases} R_0 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

ومن ثم يكون تحويل لابلاس لإشارة الدخل المرجعي

$$R(s) = \frac{R_0}{s}$$

و الصيغة العامة لدالة تحويل نظم الرتبة الأولى تكتب على النحو التالي:

$$G_p(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

بالتعويض عن  $G_c(s)$  و  $G_p(s)$  و  $R(s)$  في المعادلة (4-4) نحصل على تحويل لابلاس

لإشارة الخطأ على النحو التالي:

$$E(s) = \frac{1}{1 + \left(\frac{K_I}{s}\right)\left(\frac{1}{\tau s + 1}\right)} \left(\frac{R_0}{s}\right) \quad (10-4)$$

و بتوحيد المقام لمقام المعادلة 10-4 نحصل على

$$E(s) = \frac{s(\tau s + 1)}{(\tau s^2 + s + K_I)} \left(\frac{R_0}{s}\right) \quad (11-4)$$

ولإيجاد قيمة إشارة الخطأ عند الاستقرار نستخدم نظرية القيمة النهائية كما يلي:



$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \left( s \left( \frac{R_0}{s} \right) \frac{s(\tau s + 1)}{(\tau s^2 + s + K_I)} \right) = 0 \quad (12-4)$$

يتضح من المعادلة (12-4) أن القيمة النهائية لإشارة الخطأ في حالة استخدام الحاكم التكاملي منعدمة، وهذا يعني أن القيمة النهائية للمتغير المراد التحكم فيه تصل إلى نفس القيمة المرغوب لها وهي الدخل المرجعي.

الشكل (4-4) يوضح تأثير الحاكم التناسبي على قيمة الخطأ عند الاستقرار

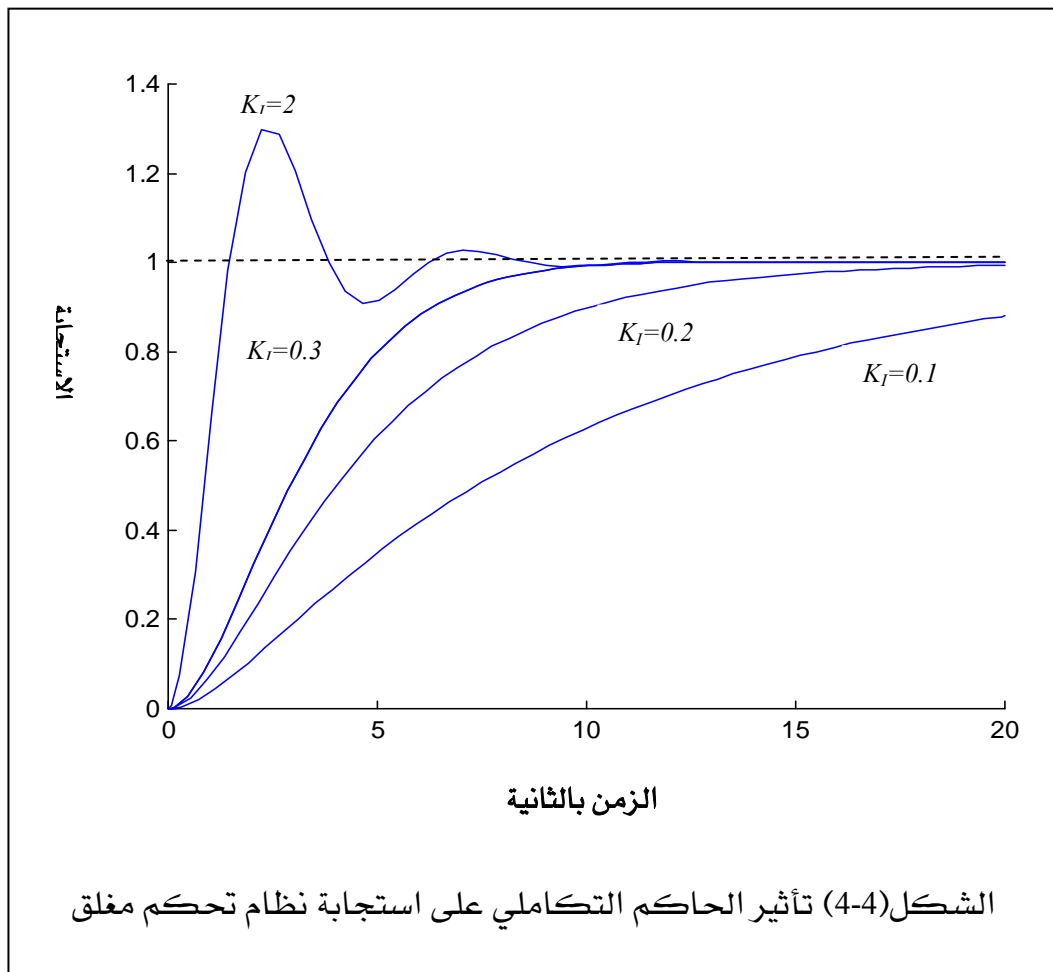
لنظام تحكم ذو حلقة تغذية خلفية من الرتبة الأولى باستخدام برنامج Matlab Simulink

$$G_p(s) = \frac{1}{s+1} \quad \text{حيث أن: دالة تحويل النظام هي}$$

والدخل المرجعي هو دالة خطوة الوحدة  $r(t)=1$

ولقد تم اختيار قيم معاملات الحاكم كما يلي

$$K_I = 0.1 \quad K_I = 0.2 \quad K_I = 0.3 \quad K_I = 2$$





#### 7-4 تأثير الحاكم التناسبي التكاملي على إشارة الخطأ

في هذا الجزء سوف نقوم بدراسة تأثير الحاكم التناسبي التكاملي على استجابة الحلقة المغلقة لنظام تحكم من الرتبة الأولى عندما يكون الدخل المرجعي عبارة عن إشارة خطوة ارتفاعها  $R_0$

المعادلة الزمنية للحاكم التناسبي التكاملي على النحو التالي:

$$p(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau$$

و دالة تحويل الحاكم التناسبي التكاملي هي:

$$G_c(s) = \frac{K_p s + K_I}{s} \quad (13-4)$$

ويكون الدخل المرجعي هو إشارة خطوة ارتفاعها  $R_0$

$$r(t) = \begin{cases} R_0 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

ومن ثم فإن تحويل لابلاس لإشارة الدخل المرجعي هو

$$R(s) = \frac{R_0}{s}$$

وحيث أن النظام المراد التحكم فيه هو نظام من الدرجة الأولى فإن الصيغة

العامة لدالة تحويله تكتب على النحو التالي:

$$G_p(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

وبالتعويض عن  $G_c(s)$  و  $G_p(s)$  و  $R(s)$  في المعادلة 7-4 نحصل على تحويل لابلاس

لإشارة الخطأ على النحو التالي:

$$E(s) = \frac{1}{1 + \left( \frac{K_p s + K_I}{s} \right) \left( \frac{1}{\tau s + 1} \right)} \left( \frac{R_0}{s} \right) \quad (14-4)$$

و بتوحيد المقام في المعادلة (14-4) نحصل على

$$E(s) = \left( \frac{s(\tau s + 1)}{\tau s^2 + s(K_p + 1) + K_I} \right) \left( \frac{R_0}{s} \right) \quad (15-4)$$

باستخدام قانون القيمة النهائية نحصل على القيمة النهائية للخطأ عند الاستقرار

وهي:



$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \left( s \left( \frac{R_0}{s} \right) \left( \frac{s(\tau s + 1)}{(\tau s^2 + s(1 + K_p) + K_I)} \right) \right) = 0 \quad (16-4)$$

يتضح من المعادلة (16-4) أن الحاكم التناسبي التكاملي يلغي إشارة الخطأ، وهذا يعني أن القيمة النهائية للمتغير المراد التحكم فيه تساوي القيمة المرغوبة له وهي الدخل المرجعي.

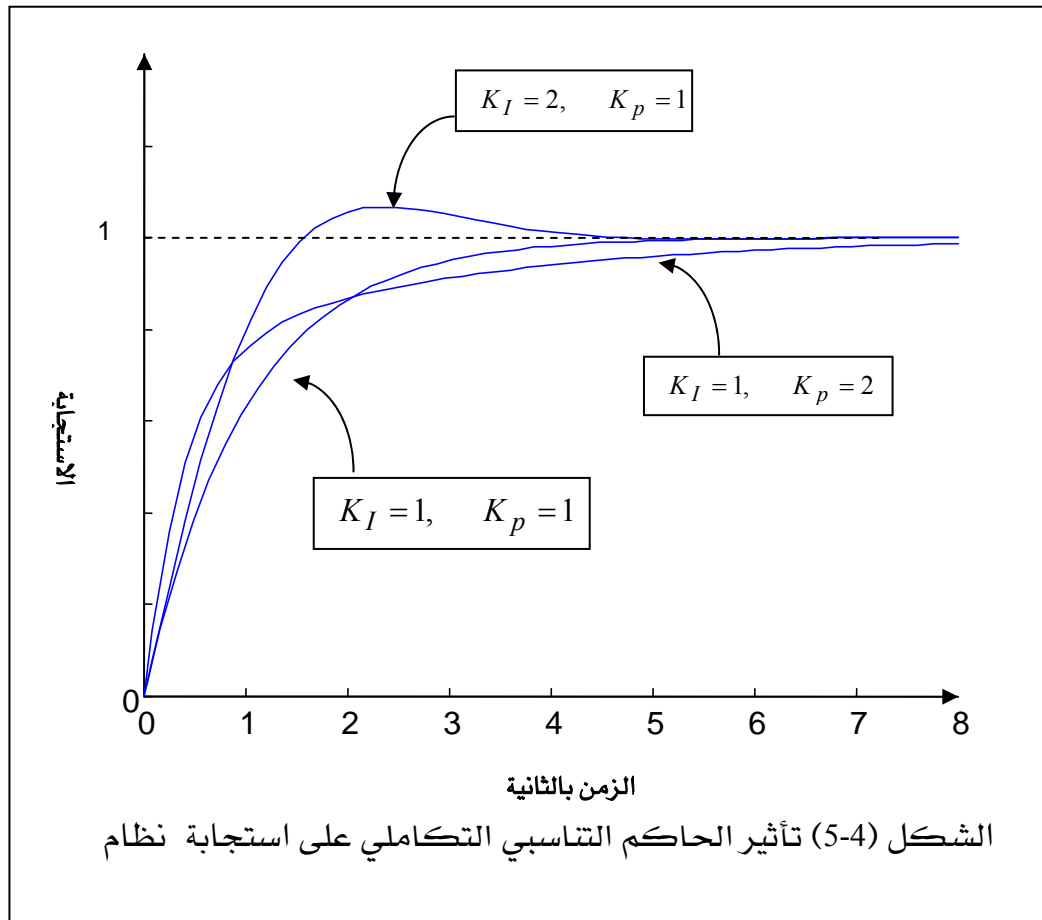
الشكل (5-4) يوضح تأثير الحاكم التناسبي التكاملي على قيمة الخطأ عند الاستقرار لنظام تحكم ذو حلقة تغذية خلفية من الرتبة الأولى باستخدام برنامج Matlab Simulink

$$G_p(s) = \frac{1}{s+1} \quad \text{حيث أن: دالة تحويل النظام هي}$$

$$r(t) = 1 \quad \text{والدخل المرجعي هو دالة خطوة الوحدة}$$

ولقد تم اختيار معاملات كل من الحاكم التناسبي والتكامل والتناسبي كما يلي:

$$K_I = 2, \quad K_p = 1 \qquad K_I = 1, \quad K_p = 1 \qquad K_I = 1, \quad K_p = 2$$





#### 8-4 تأثير الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي على إشارة الخطأ

في هذا الجزء سوف نقوم بدراسة تأثير الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي على استجابة الحلقة المغلقة لنظام تحكم من الرتبة الأولى عندما يكون الدخل المرجعي عبارة عن إشارة خطوة ارتفاعها  $R_0$ :

$$p(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

و دالة تحويله هي:

$$G_c(s) = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \quad (17-4)$$

نستخدم دخلاً مرجعياً على هيئة إشارة خطوة ارتفاعها  $R_0$ ,

$$r(t) = \begin{cases} R_0 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

ومن ثم تحويل لابلاس لإشارة الدخل المرجعي هو

$$R(s) = \frac{R_0}{s}$$

وحيث أن النظام المراد التحكم فيه هو نظام مغلق من الرتبة الأولى، فإن

الصيغة العامة لدالة تحويله تعطى على النحو التالي:

$$G_p(s) = \frac{1}{\tau s + 1}$$

وبالتعويض عن  $G_c(s)$  و  $G_p(s)$  و  $R(s)$  في المعادلة 7-4 نحصل على تحويل لابلاس

لإشارة الخطأ على النحو التالي:

$$E(s) = \frac{1}{1 + \left( \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \right) \left( \frac{1}{\tau s + 1} \right)} \left( \frac{R_0}{s} \right) \quad (18-4)$$

بتوحيد المقام في مقام المعادلة (18-4) نحصل على

$$E(s) = \left( \frac{s(\tau s + 1)}{(\tau + K_D)s^2 + (K_p + 1)s + K_I} \right) \left( \frac{R_0}{s} \right) \quad (19-4)$$

باستخدام قانون القيمة النهائية نحصل على

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \left( s \frac{R_0}{s} \right) \left( \frac{s(\tau s + 1)}{(\tau + K_D)s^2 + (K_p + 1)s + K_I} \right) = 0 \quad (20-4)$$





يتضح من المعادلة (20-4) أن الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي يلغي إشارة الخطأ، وهذا يعني أن القيمة النهائية للمتغير المراد التحكم فيه تساوي القيمة المرغوبة له وهي الدخل المرجعي.

الشكل (6-4) يوضح تأثير الحاكم التناسبي التكاملي التفاضلي على قيمة الخطأ عند الاستقرار لنظام تحكم ذو حلقة تغذية خلفية من الرتبة الأولى باستخدام برنامج Matlab Simulink

$$G_p(s) = \frac{1}{s+1} \quad \text{حيث أن: دالة تحويل النظام هي}$$

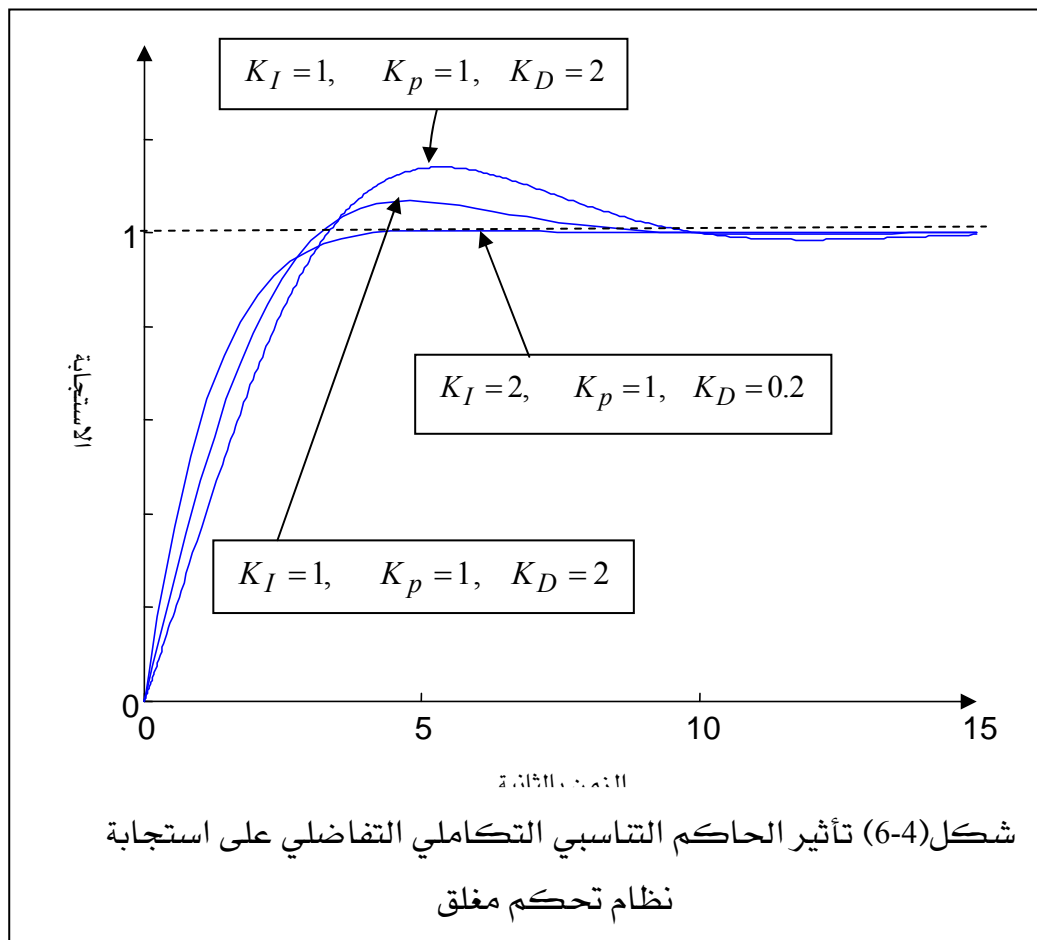
$$r(t) = 1 \quad \text{والدخول المرجعي هو دالة خطوة الوحدة}$$

ولقد تم اختيار معاملات كل من الحاكم التكاملي والحاكم التناسبي والحاكم التفاضلي كما يلي:

$$\text{الحالة الأولى: } K_I = 1, \quad K_p = 1, \quad K_D = 2$$

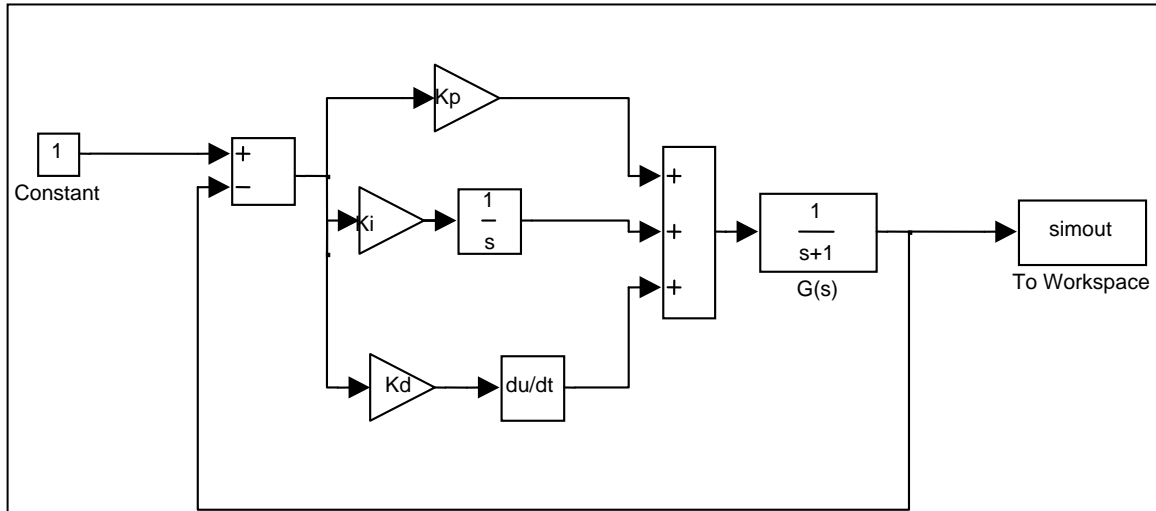
$$\text{الحالة الثانية: } K_I = 1, \quad K_p = 1, \quad K_D = 1$$

$$\text{الحالة الثالثة: } K_I = 2, \quad K_p = 1, \quad K_D = 0.2$$





أما الشكل (7-4) فيوضح مخطط لبرنامج Matlab Simulink الذي استخدم في محاكاة تأثير الحاكم التناسبي التفاضلي على قيمة الخطأ عند الاستقرار لنظام تحكم ذو حلقة مغلقة من الرتبة الأولى



شكل (7-4) مخطط محاكاة Simulink لحاكم PID في حلقة مغلقة



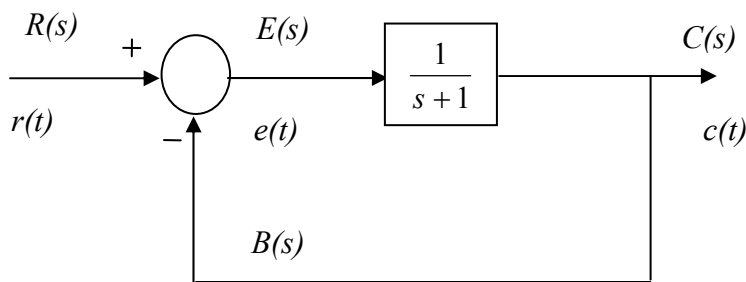
## تمارين

١- لدينا حلقة تغذية خلفية أحادية كما هو موضح في الشكل التالي  
أوجد ما يلي:

أ) دالة تحويل النظام المغلق

ب) تحويل لابلاس لإشارة الخطأ

ج) القيمة النهائية لإشارة الخطأ

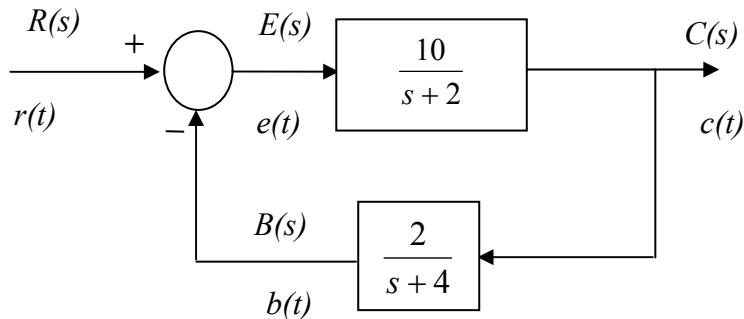


٢- لدينا حلقة تغذية خلفية موضحة بالشكل التالي  
أوجد ما يلي:

أ) دالة تحويل النظام المغلق

ب) تحويل لابلاس لإشارة الخطأ

ج) القيمة النهائية لإشارة الخطأ

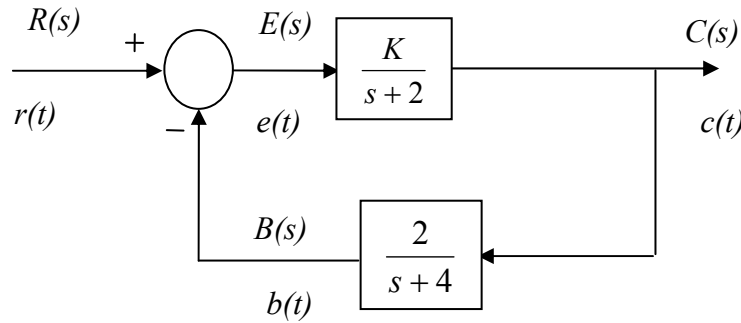


٣- أثبت أن الحاكم التناسبي في حلقة تغذية خلفية لا يلغي إشارة الخطأ

٤- أثبت أن الحاكم التكاملي في حلقة تغذية خلفية يلغي إشارة الخطأ



٥- أوجد معامل الكسب  $K$  المناسب الذي سيلغي إشارة خطأ حالة الاستقرار عند استعمال دخل على هيئة خطوة الوحدة في النظام الموضح أدناه.



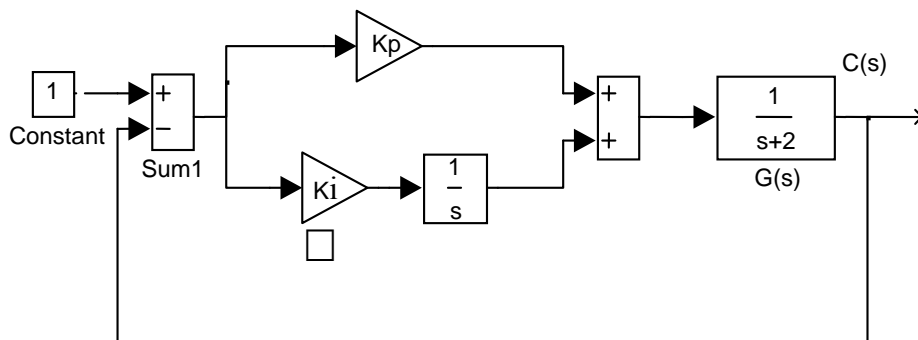
٦- في نظام التحكم الموضح أدناه حدد نوع الحاكم وأوجد الآتي:

أ) دالة تحويل الحاكم

ب) دالة تحويل النظام المغلق

ج) تحويل لابلاس لإشارة الخطأ

د) إشارة الخطأ عند حالة الاستقرار  $e_{ss}$



٧- في نظام التحكم الموضح أدناه حدد نوع الحاكم وأوجد الآتي:

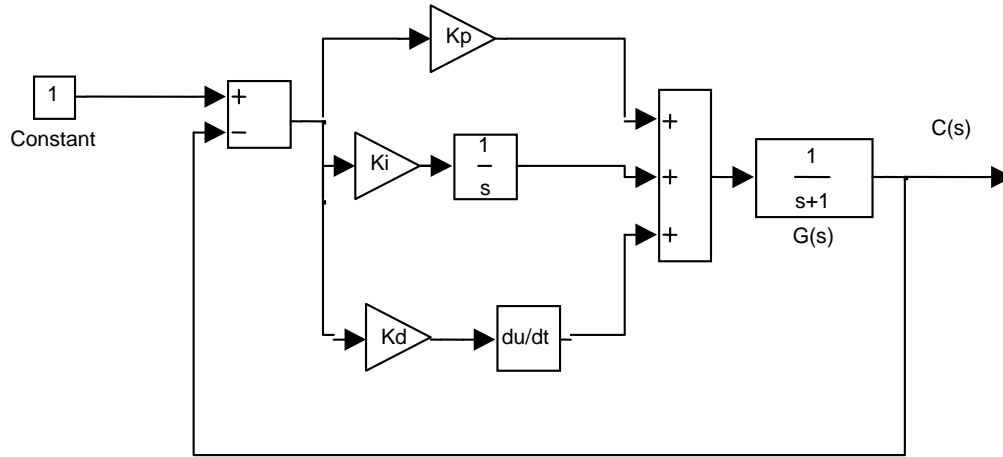
أ) دالة تحويل الحاكم

ب) دالة تحويل النظام المغلق

ج) تحويل لابلاس لإشارة الخطأ



د) إشارة الخطأ عند حالة الاستقرار  $e_{ss}$





---

## مصطلحات

---



AC Motor	محرك تيار متردد
Actuator	مشغل
Analog	تمائلي
Armature	عضو دوار
Automation	الآلية
Block Diagram	مخطط صندوقي
Bode Diagram	مخطط بودي
Cascade	تعاقب
Characteristic Equation	المعادلة المميزة
Characteristics	خصائص
Chart Recorder	مسجل
Closed Loop	حلقة مغلقة
Compensator	معوّض
Control system	نظام تحكم
Control Valve	صمام تحكم
Controlled Variable	المتغير المراد التحكم فيه
Controller	حاكم
Critical Damping	إخماد حرج
Cutoff Frequency	تردد الانكسار
Damping	إخماد
DC Motor	محرك تيار مستمر
Delay Time	زمن التأخير
Derivative	تفاضلي
Derivative Controller	حاكم تفاضلي
Design	تصميم
Digital	رقمي
Disturbance	اضطراب أو تشويش



Dynamic	حركي، ديناميكي
Error	خطأ
Feedback	تغذية خلفية
Feedback Path	مسار خلفي
Final Control Element	عنصر التحكم النهائي
Flow Meter	مقياس معدل تدفق
Flow rate	معدل تدفق
Forward Path	مسار أمامي
Frequency Response	استجابة ترددية
Gain	كسب
Gain Crossover Frequency	تردد عبور الكسب
Gain Margin	هامش الكسب
Hydraulic	هايدرولوكي
Input	دخل
Integral	تكاملي
Integral Controller	حاكم تكاملي
Lag Compensator	معوض تأخير
Laplace Transform	تحويل لابلاس
Lead Compensator	معوض تقديم
Level	مستوى
Magnitude	قيمة
Manual Control	تحكم يدوي
Matrix	مصفوفة
Motor	محرك
Open Loop	حلقة مفتوحة
Oscilloscope	راسم ذبذبات
Output	خرج
Over Damping	إخماد زائد





Overshoot	تجاوز
Parallel	توازي
Peak Time	زمن الذروة
Performance	أداء
Permanent Response	استجابة دائمة
Phase Crossover Frequency	تردد عبور الطور
Phase Margin	هامش الطور
Phase Shift	إزاحة الطور
Pneumatic	هوائي، نوماتي
polynomial	كثير الحدود
Potentiometer	مجزئ الجهد
Process	عملية
Programmable Logic Control	الحاكمات القابلة للبرمجة
Proportional	تناسبي
Proportional Controller	حاكم تناسبي
Reference Input	دخل مرجعي
Resonance Frequency	تردد الرنين
Response	استجابة
Response Curve	منحنى الاستجابة
Rise Time	زمن الصعود
Root	جذر
Sensor	حساس
Series	توالي
Set Point	نقطة الضبط، نقطة التشغيل
Settling Time	زمن الاستقرار
Signal Conditioning	معالج الإشارة
Signal Conversion	محول الإشارة
Simulation	محاكاة



Specification	مواصفات
Stability	استقرار
Stability Criteria	معييار الاستقرار
Step Input	دخل الخطوة
Stepper Motor	محرك الخطوة
Summing Junction	وصلة تجميع
System	نظام
Tachometer	مقياس دوران، تاكوميتر
Take off Point	نقطة تفريع
Time Constant	الثابت الزمني
Time Domain Response	استجابة زمنية
Transducer	محول طاقة
Transfer Function	دالة نقل
Transient response	استجابة عابرة
Two Position Control	حاكم ذو الوضعين
Underdamping	إخماد ناقص
Unit step	خطوة الوحدة
Unity Feedback	تغذية خلفية أحادية



## المراجع

المؤلف	اسم المرجع
R. C. Dorf	Modern Control System, Edison Wesley, 1990
C. T. Chen	Control System Design, Saunders College Publishing, 1993.
John Van De Vegta	Feedback Control System, Prentice Hall, 1990.
B. Kuo	Automatic Control Systems, Prentice Hall
Johnson, C. D	<i>Process Control Instrumentation Technology</i> , Prentice Hall, 2002
Bateson, R. N.	<i>Introduction to Control Systems Technology</i> , Prentice Hall, 2002
Ogata, K.	<i>Modern control Engineering</i> , Prentice Hall, 1997
Dorf, R. C. and Bishop, R. H.	<i>Modern Control Systems</i> , Addison Wesley, 1998
Robert N. Bateson	<i>Introduction to control system technology; 7<sup>th</sup> edition</i> 1993
أحمد فؤاد محمد عامر	الأكاديمية العربية ، هندسة التحكم الآلي، مطبوعات للعلوم والتكنولوجيا والنقل البحري، ١٩٩١



المؤلف	اسم المرجع
بنجامين سى كو ترجمة د. مظفر النعمه - السيد محسن - السيد بطرس	انظمة التحكم الذاتية - الطبعة الثالثة
د. ابراهيم العرياوي	موسوعة سلاح الدفاع الجوي - ١ - النظرية التقليدية - دار الراتب الجامعية - بيروت - ١٩٨٧