به‌نام خدا

کنترل تطبیقی (آشنایی کلی)

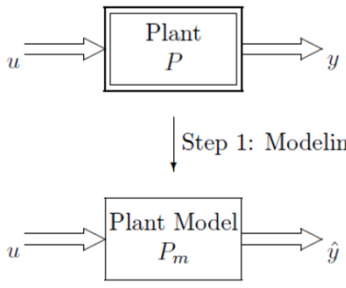
پیمان باقری کلجاهی

گروه کنترل دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- بهمن ۱۴۰۳

آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

❑ اهداف اصلی طراحی سیستم‌های کنترلی:

- ✓ پایداری
- ✓ عملکرد مطلوب ماندگار
- ✓ عملکرد مطلوب گذرا



❑ مشکلات اساسی در دستیابی به این اهداف:

- ✓ پیچیدگی سیستم‌های واقعی (مدل‌سازی دقیق؟)
- ✓ تغییرپذیری پارامترهای سیستم با زمان
- ✓ غیرخطی بودن رفتار سیستم‌ها
- ✓ نامعینی و عدم قطعیت در مدل سیستم
- ✓ وجود اغتشاش‌ها و نویزهای نامعلوم

روش‌های متداول کنترل خطی پاسخ‌گو نیستند

آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

- راه حل؟
  - کنترل مقاوم (Robust Control)
    - مبانی ریاضی قوی
    - ساختار ثابت کنترل‌کننده
    - کنترل‌کننده پیچیده و طراحی سخت
    - محافظه‌کاری بالا
    - نیاز به دانستن حدود نامعینی‌ها
  - کنترل تصادفی (Stochastic Control)
  - کنترل تطبیقی (Adaptive Control)
    - کنترل‌کننده ساده و طراحی آسان
    - عملکرد در محدوده وسیع
    - مبانی ریاضی متوسط
    - ساختار تغییرپذیر با زمان کنترل‌کننده

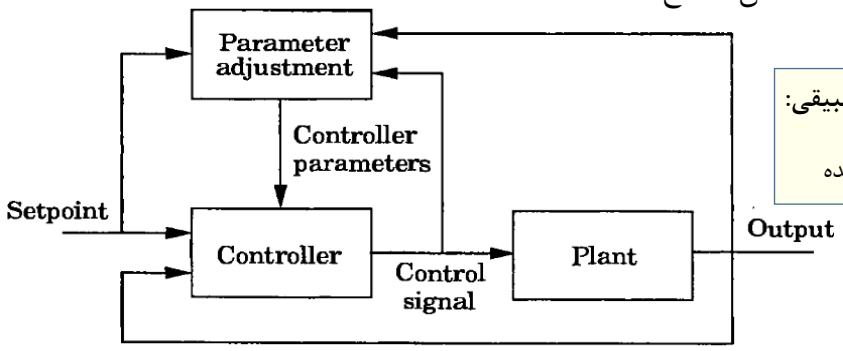
آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

- To Adapt

تغییر رفتار برای تطابق یا وفق پیدا کردن با شرایط جدید.

- Adaptive Controller

کنترل‌کننده‌ای با پارامترهای قابل تنظیم که بتواند رفتار خود را در جهت پاسخ دادن به تغییرات ایجاد شده در دینامیک سیستم و یا اغتشاش اصلاح کند.



دو حلقه در ساختار کنترل کننده های تطبیقی:
- حلقه فیدبک کنترلی
- حلقه تنظیم پارامترهای کنترل کننده

تاثیر تغییرات پارامترهای سیستم

EXAMPLE 1.1 Different open-loop responses

Consider systems with the open-loop transfer functions

$$G_0(s) = \frac{1}{(s+1)(s+a)}$$

where $a = -0.01$, 0, and 0.01. The dynamics of these processes are quite different, as is illustrated in Fig. 1.4(a). Notice that the responses are significantly different. The system with $a = 0.01$ is stable; the others are unstable. The initial parts of the step responses, however, are very similar for all systems. The closed-loop systems obtained by introducing the proportional feedback with unit gain, that is, $u = u_c - y$, give the step responses shown in Fig. 1.4(b). Notice that the responses of the closed-loop systems are virtually identical.

تاثیر تغییرات پارامترهای سیستم

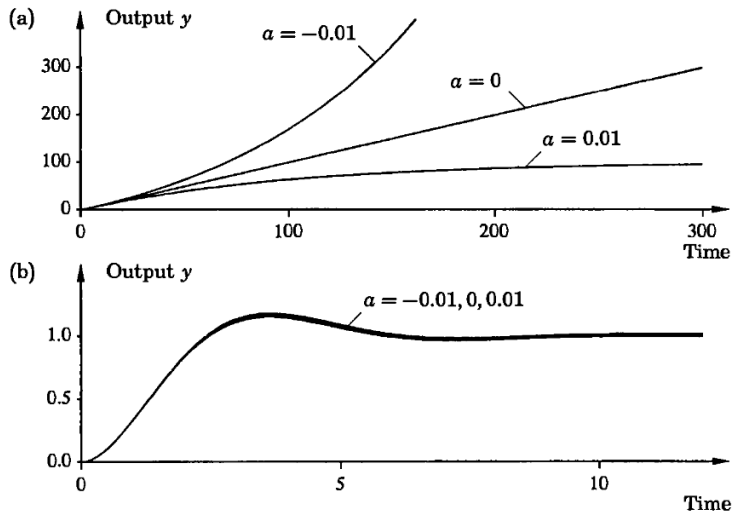


Figure 1.4 (a) Open-loop unit step responses for the process in Example 1.1 with $a = -0.01$, 0, and 0.01. (b) Closed-loop step responses for the same system, with the feedback $u = u_c - y$. Notice the difference in time scales.

تاثیر تغییرات پارامترهای سیستم

EXAMPLE 1.2 Similar open-loop responses

Consider systems with the open-loop transfer functions

$$G_0(s) = \frac{400(1 - sT)}{(s + 1)(s + 20)(1 + Ts)}$$

with $T = 0$, 0.015, and 0.03. The open-loop step responses are shown in Fig. 1.6(a). Figure 1.6(b) shows the step responses for the closed-loop systems obtained with the feedback $u = u_c - y$. Notice that the open-loop responses are very similar but that the closed-loop responses differ considerably. The frequency responses give some insight.

تاثیر تغییرات پارامترهای سیستم

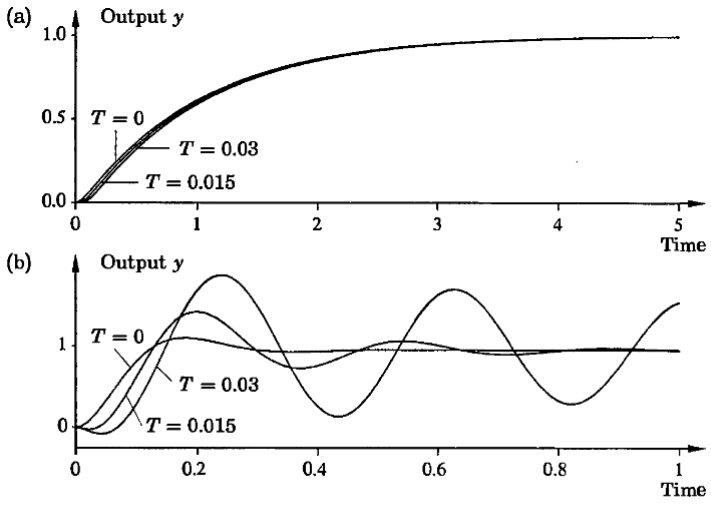


Figure 1.6 (a) Open-loop unit step responses for the process in Example 1.2 with $T = 0$, 0.015, and 0.03. (b) Closed-loop step responses for the same system, with the feedback $u = u_c - y$. Notice the difference in time scales.

تاثیر تغییرات پارامترهای سیستم

EXAMPLE 1.3 Integrator with unknown sign

Consider a process whose dynamics is described by

$$G_0(s) = \frac{k_p}{s} \qquad (1.2)$$

where the gain k_p can assume both positive and negative values. This is a very severe variation because the phase of the system can change by 180°. This process cannot be controlled by a linear controller with a rational transfer function.

تاثیر پارامترهای غیرخطی در سیستم

EXAMPLE 1.4 Nonlinear valve

A simple feedback loop with a Proportional and Integrating (PI) controller, a nonlinear valve, and a process is shown in Fig. 1.8. Let the static valve characteristic be

$$v = f(u) = u^4 \qquad u \geq 0$$

Linearizing the system around a steady-state operating point shows that the incremental gain of the valve is $f'(u)$, and hence the loop gain is proportional to $f'(u)$. The system can perform well at one operating level and poorly at another. This is illustrated by the step responses in Fig. 1.9. The controller is tuned to give a good response at low values of the operating level. For higer values of the operating level the closed-loop system even becomes unstable.

آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

تاثیر پارامترهای غیرخطی در سیستم

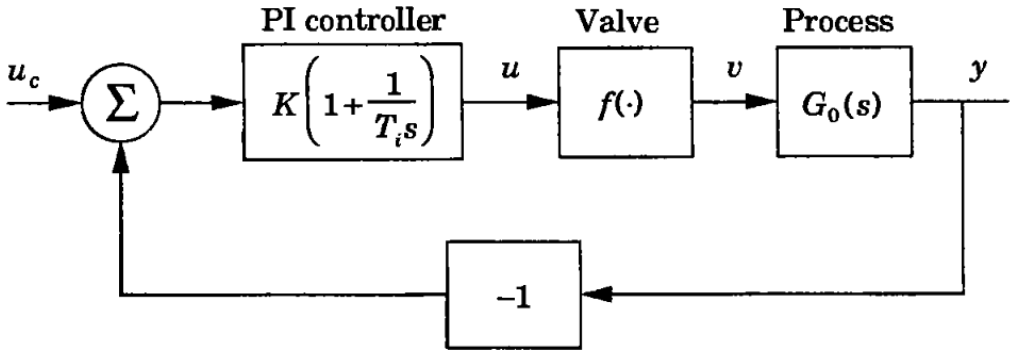


Figure 1.8 Block diagram of a flow control loop with a PI controller and a nonlinear valve.

آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

تاثیر پارامترهای غیرخطی در سیستم

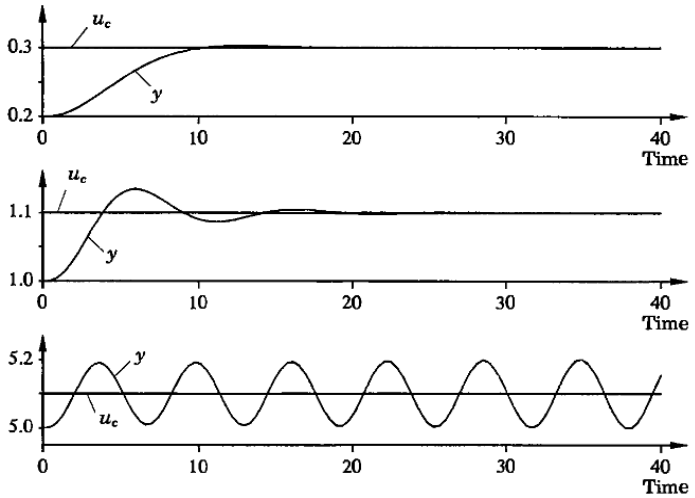


Figure 1.9 Step responses for PI control of the simple flow loop in Example 1.4 at different operating levels. The parameters of the PI controller are $K = 0.15$, $T_i = 1$. The process characteristics are $f(u) = u^4$ and $G_0(s) = 1/(s+1)^3$.

آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

- راه کارهای اساسی کنترل تطبیقی:
  - جدول‌بندی بهره (Gain Scheduling)
  - رگولاتورهای خودتنظیم (Self Tuning Regulators (STR))
  - سیستم‌های تطبیقی مدل مرجع (Model Reference Adaptive Systems (MRAS))

آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

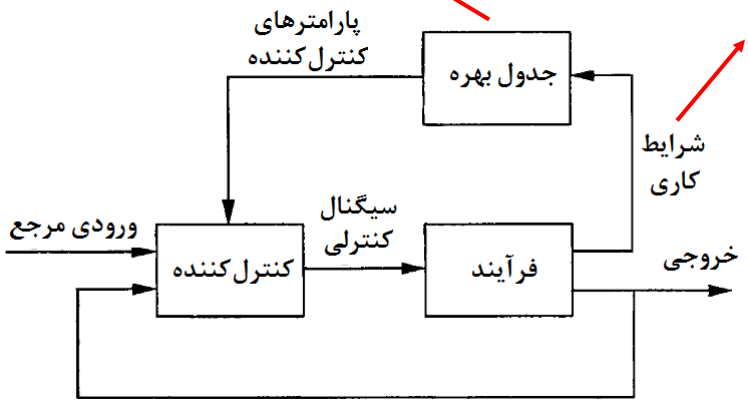
جدول بندی بهره

نگاشتی از متغیرهای قابل اندازه‌گیری به پارامترهای کنترل‌کننده

یافتن متغیرهای قابل اندازه‌گیری در سیستم که به خوبی مرتبط با تغییرات دینامیک فرآیند باشند

استفاده از متغیرهای قابل اندازه‌گیری برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده

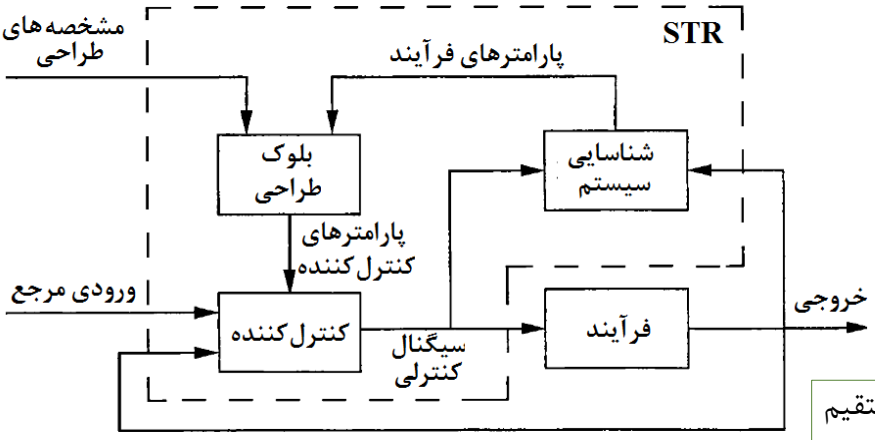
اغلب جدول بهره به صورت خارج از خط (off line) طراحی می‌شود



آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

15

رگولاتورهای خودتنظیم



دو رویکرد:
- روش‌های مستقیم
- روش‌های غیرمستقیم

دو حلقه کنترلی:
- حلقه داخلی
- حلقه خارجی

حذف بلوک طراحی در روش مستقیم و تغییر بلوک شناسایی سیستم

اغلب گسسته در زمان

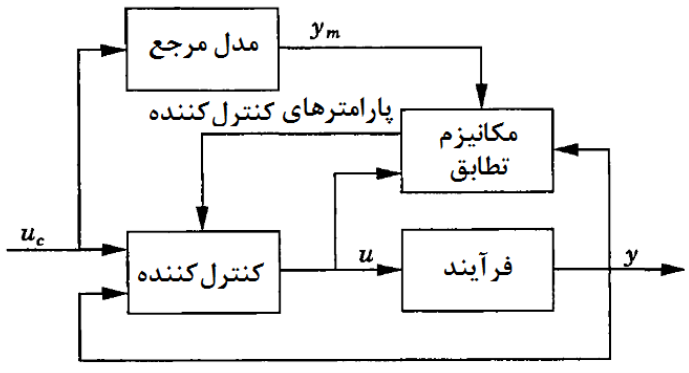
Certainty Equivalence Principle
اصل هم ارزی قطعیت

آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

16

سیستم‌های تطبیقی مدل مرجع

رفتار ایده‌آل و مطلوب فرآیند



مساله اساسی:
- مکانیزم تطابق (Adaptation Mechanism)

دو حلقه کنترلی:
- حلقه داخلی
- حلقه خارجی

اغلب پیوسته در زمان

- ✓ پایداری سیستم حلقه بسته
- ✓ میل به صفر خطای بین خروجی سیستم و خروجی مطلوب

آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

گام‌های دستیابی به یک کنترل‌کننده تطبیقی

- ☆ مشخص کردن رفتار مطلوب سیستم حلقه بسته
- ☆ انتخاب ساختار کنترل‌کننده‌ای با قابلیت تطابق و پارامترهای قابل تنظیم
- ☆ مکانیزمی برای تنظیم پارامترها
- ☆ اعمال قانون کنترل

آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

فهرست مطالب درس

- ❑ آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی
- ❑ شناسایی برخط سیستم‌های دینامیکی
  - ✓ آشنایی با بحث شناسایی سیستم
  - ✓ شناسایی سیستم برخط (on-line)
  - ✓ تخمین حداقل مربعات بازگشتی (RLS) و مباحث مربوط به آن
- ❑ رگولاتورهای خودتنظیم جایاب قطب
  - ✓ نکاتی در مورد فیدبک حالت و فیدبک خروجی
  - ✓ طراحی جایاب قطب با فیدبک خروجی
  - ✓ STRهای مستقیم و غیر مستقیم جایاب قطب
  - ✓ مساله اغتشاش

آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

19

فهرست مطالب درس

- ❑ رگولاتورهای خودتنظیم حداقل واریانس
  - ✓ اصول کنترل‌کننده‌های تطبیقی تصادفی بر اساس مینیمم واریانس (MV) و میانگین متحرک (MA)
  - ✓ روش‌های مستقیم و غیرمستقیم
- ❑ رگولاتورهای خودتنظیم پیش‌بین
  - ✓ آشنایی با کنترل پیش بین
  - ✓ کنترل پیش‌بین یک گام به جلو
  - ✓ کنترل ماتریس دینامیکی (DMC) و کنترل پیش‌بین تعمیم‌یافته (GPC)
  - ✓ کنترل پیش‌بین تطبیقی
- ❑ سیستم‌های کنترل تطبیقی مدل مرجع (MRAS)
  - ✓ طراحی MRAS بر اساس روش گرادیان یا MIT Rule
  - ✓ طراحی MRAS پایدار بر اساس تئوری لیاپانف

آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

20

فهرست مطالب درس

- ❑ کنترل‌کننده‌های خودتنظیم PID
- ❑ آشنایی با کنترل‌کننده‌های غیرخطی تطبیقی

بارم نمره برای ارزیابی

- تمرین و پروژه‌های شبیه‌سازی: ٪۴۰
- پروژه درس (بازتولید مقاله): ٪۲۰ در صورت ارائه مقاله جدید قابل قبول تا ۲ نمره اضافی در نظر گرفته می‌شود
- امتحان پایان‌ترم: ٪۴۰

آشنایی کلی با سیستم‌های کنترل تطبیقی

مراجع درس

- ✓ K. J. Astrom, B Wittenmark, Adaptive Control, 2th Edition, Wessly, 2008.
- ✓ G. C. Goodwin and K. S. Sin, Adaptive Filtering, Prediction and Control, Prentice-Hall, 2014.
- ✓ P. Ioannou, B. Fidan, Adaptive Control Tutorial, SIAM Advances in Design and Control, 2006.
- ✓ E. F. Camacho, C. Bordons, Model Predictive Control, Springer, 2013.