



کنترل تطبیقی

علی خاکی صدیق
گروه کنترل - بهمن ۱۳۹۰

1

۱- آشنائی با کنترل تطبیقی

▪ طراحی سیستم های کنترل برای دستیابی به :

۱- پایداری

۲- عملکرد مطلوب (ماندگار+گذرا)

▪ کنترل حلقه باز یا کنترل حلقه بسته؟

2

■ چند واقعیت :

- ✓ سیستم های واقعی و صنعتی پیچیده اند.
- ✓ مدلسازی دقیق؟
- ✓ پارامترهای سیستم با زمان تغییر میکنند.
- ✓ ساختار ناکافی مدل: نامعینی.
- ✓ اغتشاشات و نویزهای نامعلوم.

3

■ مساله فیدبک :

طراحی سیستم کنترل برای به دست آوردن سیستم حلقه بسته پایدار با عملکردهای مطلوب در حضور

نامعینی های مدل

پارامترهای متغیر با زمان

اغتشاشات و نویزهای نامعلوم

4

■ راه حل ها:

✓ کنترل مقاوم :

ساختار LTI - عملکرد محدود - مبانی محکم ریاضی

✓ کنترل تطبیقی:

ساختار NLTV - عملکرد تقریبا نامحدود - مبانی ریاضی

✓ کنترل هوشمند:

ساختار NLTV - عملکرد تقریبا نامحدود

مبانی ریاضی soft computing

5

■ تعریف:

To Adapt :

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

Adaptive Controller :

کنترل کننده ای است که می تواند رفتار خود را برای پاسخ دادن به تغییرات حاصل شده در دینامیک سیستم و اغتشاشات اصلاح کند.

6

■ تاریخچه کوتاه

✓ شروع در دهه ۱۹۵۰ : طراحی اتوپایلوت برای کنترل پرواز

تغییرات سریع دینامیکی

رفتار عملکرد بالا

روشهای سعی و خطا بدون مبانی نظری قوی

حادثه سقوط هواپیما

اولین سمپوزیوم تا ۱۹۸۱

Kalman Self-tuning Controller(1958), Honeywell +
General Electric

7

● دهه رکود:

✓ دهه ۱۹۶۰ : مبانی نظری تحلیل پایداری سیستم های تطبیقی

تحلیل پایداری لیاپونف

تحلیل فضای حالت

کنترل تصادفی

سیستم های زمان گسسته

شناسایی سیستم: تحقیقات بنیادی و فهم کلی

8

✓ دهه ۱۹۷۰ : تحلیل پایداری و همگرایی سیستم های تطبیقی

اثبات پایداری لیاپونف

اثبات پایداری I/P-O/P



کنترل تطبیقی پایدار

9

اثبات قضایای همگرایی تحت شرایط سخت

9

دهه ۱۹۸۰: کنترل تطبیقی مقاوم

مثال نقض Rohrs(1980)

کنترل تطبیقی مقاوم: شروع ایده ها

ساخت کنترل کننده های تطبیقی صنعتی

10

دهه ۱۹۹۰: تا کنون

اثبات دقیق تر نظریه ها: پایداری-همگرایی-مقاومت
Artificial Intelligence, Neural Networks,
and Fuzzy logic

تلفیق ایده ها و روش ها
سیستم های کنترل مدل چندگانه
سیستم های کنترل کلید زن

11

▪ اثر تغییرات پارامترها در سیستم: آیا کنترل کننده تطبیقی لازم است؟

- تقریبا همه سیستم ها به نوعی درگیر نامعینی و یا تغییر پارامترها هستند.

- معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم:

روش های پاسخ فرکانسی

روش های پاسخ زمانی

بررسی موقعیت قطب ها و صفرها

- به چند مثال از [1] توجه کنید:

12

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. Some insight is obtained from the frequency responses. Bode diagrams for the

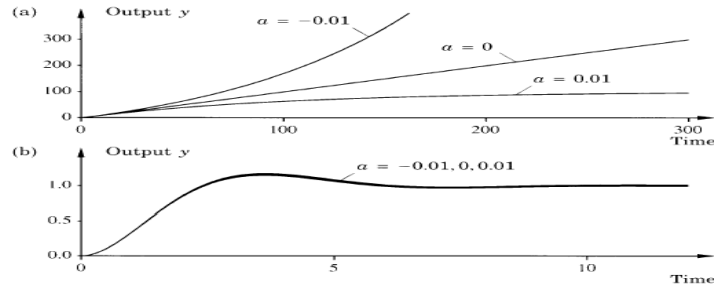


Figure 1.4 (a) Open-loop unit step responses for the process in Example 1.1 with $a = -0.01, 0$, and 0.01 . (b) Closed-loop step responses for the same system, with the feedback $u = u_c - y$. Notice the difference in time scales.

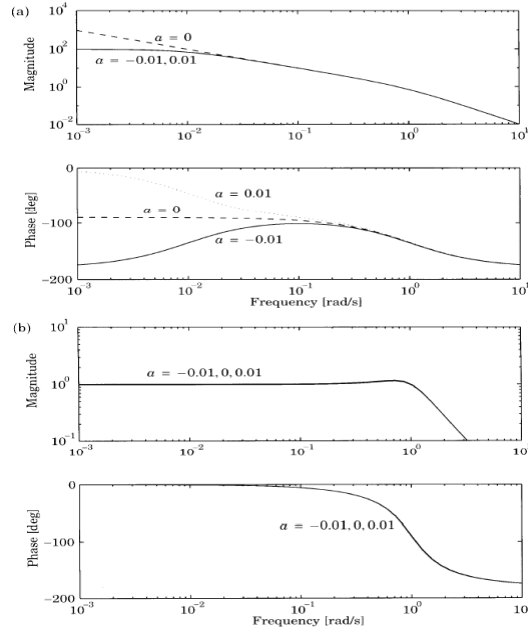


Figure 1.5 (a) Open-loop and (b) closed-loop Bode diagrams for the process in Example 1.1.

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

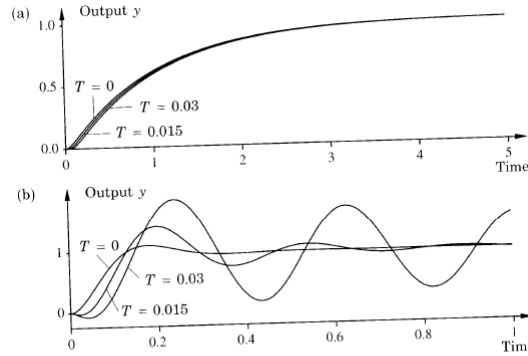


Figure 1.6 (a) Open-loop unit step responses for the process in Example 1.2 with $T = 0, 0.015$, and 0.03 . (b) Closed-loop step responses for the same system, with the feedback $u = u_c - y$. Notice the difference in time scales.

15

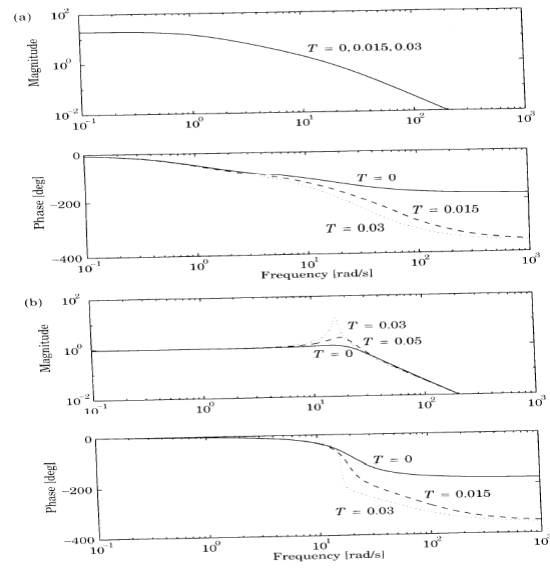


Figure 1.7 Bode diagrams for the process in Example 1.2. (a) The open-loop system; (b) The closed-loop system.

16

Nonlinear Actuators

A very common source of variations is that actuators, like valves, have a nonlinear characteristic. This may create difficulties, which are illustrated by the following example.

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

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

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 higher values of the operating level the closed-loop system even becomes unstable. One way to handle this type of problem is to feed the control signal u through an inverse of the nonlinearity of the valve. It is often sufficient to use a fairly crude approximation (see Example 9.1). This can be interpreted as a special case of gain scheduling, which is treated in detail in Chapter 9. \square

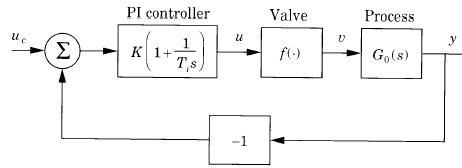


Figure 1.8 Block diagram of a flow control loop with a PI controller and a nonlinear valve.

17

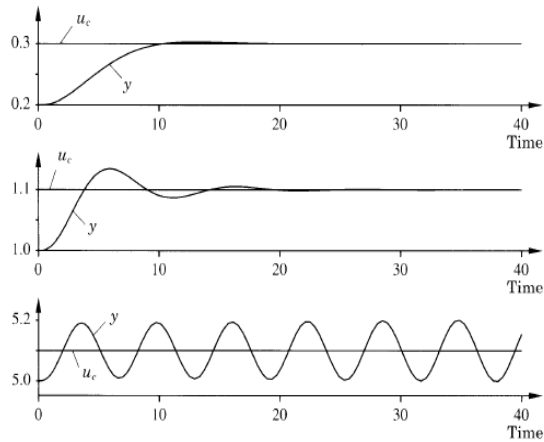


Figure 1.9 Step responses for PI control of the simple flow loop in Example 1.4 at different operating levels. The parameters of the PI controller are $K = 0.15$, $T_i = 1$. The process characteristics are $f(u) = u^4$ and $G_0(s) = 1/(s + 1)^3$.

18

Flow and Speed Variations

Systems with flows through pipes and tanks are common in process control. The flows are often closely related to the production rate. Process dynamics thus change when the production rate changes, and a controller that is well tuned for one production rate will not necessarily work well for other rates. A simple example illustrates what may happen.

EXAMPLE 1.5 Concentration control

Consider concentration control for a fluid that flows through a pipe, with no mixing, and through a tank, with perfect mixing. A schematic diagram of the process is shown in Fig. 1.10. The concentration at the inlet of the pipe is c_{in} . Let the pipe volume be V_d and let the tank volume be V_m . Furthermore, let the flow be q and let the concentration in the tank and at the outlet be c . A mass balance gives

$$V_m \frac{dc(t)}{dt} = q(t) (c_{in}(t - \tau) - c(t)) \quad (1.3)$$

where

$$\tau = V_d/q(t)$$

19

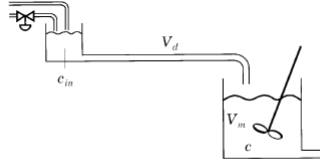


Figure 1.10 Schematic diagram of a concentration control system.

Introduce

$$T = V_m/q(t) \quad (1.4)$$

For a fixed flow, that is, when $q(t)$ is constant, the process has the transfer function

$$G_0(s) = \frac{e^{-s\tau}}{1 + sT} \quad (1.5)$$

The dynamics are characterized by a time delay and first-order dynamics. The time constant T and the time delay τ are inversely proportional to the flow q .

The closed-loop system is as in Fig. 1.8 with $f(\cdot) = 1$ and $G_0(s)$ given by Eq. (1.5). A controller will first be designed for the nominal case, which corresponds to $q = 1$, $T = 1$, and $\tau = 1$. A PI controller with gain $K = 0.5$ and integration time $T_i = 1.1$ gives a closed-loop system with good performance in this case. Figure 1.11 shows the step responses of the closed-loop system for different flows and the corresponding control actions. The overshoot will increase with decreasing flows, and the system will become sluggish when the flow increases. For safe operation it is thus good practice to tune the controller at the lowest flow. Figure 1.11 shows that the system can easily cope with a flow change of $\pm 10\%$ but that the performance deteriorates severely when the flow changes by a factor of 2. \square

Variations in speed give rise to similar problems. This happens for example in rolling mills and paper machines.

20

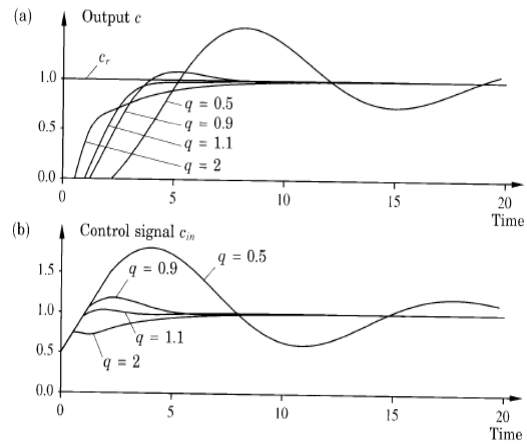


Figure 1.11 Change in reference value for different flows for the system in Example 1.5. (a) Output c and reference c_r concentration, (b) control signal.

21

• یک مثال دیگر از [4] :

$\dot{x} = ax + u$ Scalar Plant with **unknown** parameter

If an upper bound is known, $\bar{a} \geq |a|$

$\Rightarrow u = -kx$ satbilizes the plant with $k > \bar{a}$

If $a > k > 0$ the closed loop plant will be **unstable**

If an upper is not known, then **NO** linear controller can stabilize the plant: A practical solution is **gain adaptation**

$u = -kx$, $\dot{k} = x^2$ is the **Stabilizing Controller**

22

■ راهکارهای اصلی کنترل تطبیقی کلاسیک

دو راهکار کلی در طراحی سیستم های تطبیقی کلاسیک:

- Identifier-Based Adaptive Control
- Non-Identifier-Based Adaptive Control

23

- Non-Identifier-Based Adaptive Control Strategies:

✓ زمان بندی بهره (Gain Scheduling)

✓ سیستم های کلید زن (Switching Control)

✓ سیستم های کنترل مدل چندگانه

(Multiple Model Control)

✓ سیستم های تطبیقی خودنوسان ساز (SOAS)

24

- Identifier-Based Adaptive Control

✓ سیستم های تطبیقی مدل مرجع (MRAS)

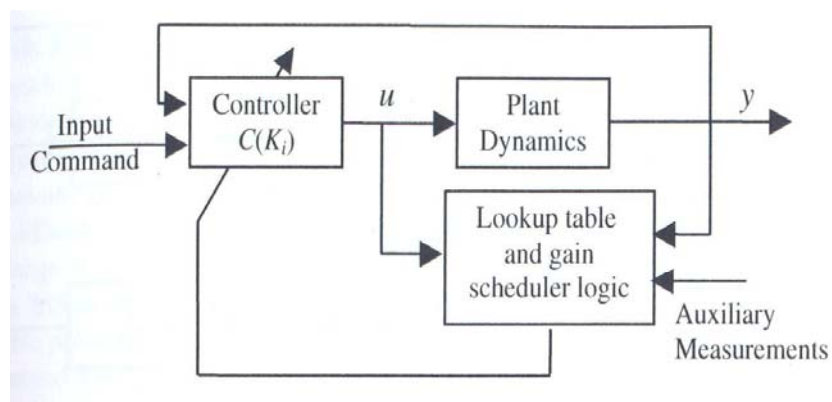
✓ رگلاتورهای خود تنظیم (STR)

✓ برخی روش های PID خود تنظیم

25

■ زمان بندی بهره

تغییر پارامترها با بکارگیری متغیرهایی از مشخصه های دینامیکی فرایند



26

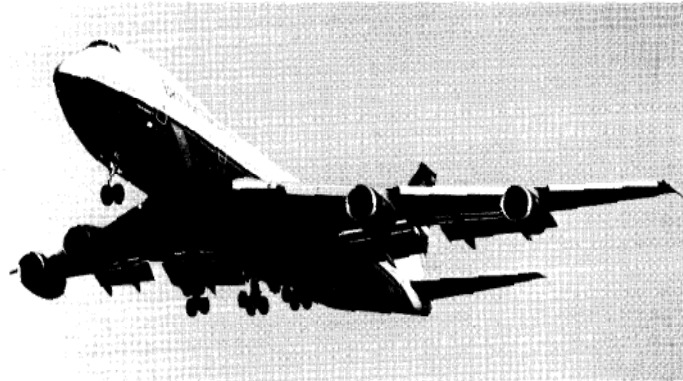


Figure 1.21 Gain scheduling is an important ingredient in modern flight control systems. (By courtesy of Nawrocki Stock Photo, Inc., Neil Hargreave.)

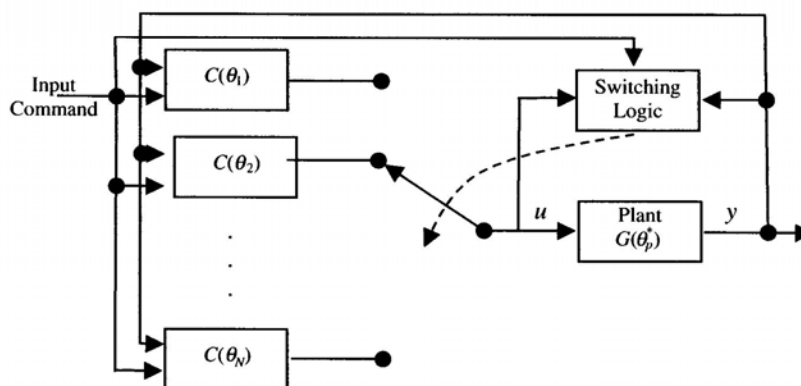
27

• ویژگی های کنترل کننده زمان بند بهره

- ✓ کنترل پرواز و طراحی اتوپایلوت (عدد ماخ - اندازه گیری فشار دینامیکی توسط سنسورهای نوک موشک)
- ✓ جبرانسازی حلقه باز (تغییر پارامترها)
- ✓ تطبیقی بودن کنترل کننده زمان بند بهره؟
- ✓ کاربردهای فراوان در صنعت
- ✓ سرعت بسیار سریع تغییر پارامترهای کنترل کننده (اندازه گیری کمکی)
- ✓ تا چند صد نقطه کار در هواپیما و ۹۰ نقطه کار در هلیکوپتر CH-47

28

■ سیستم های کنترل تطبیقی مدل چندگانه با کنترل کلید زن



29

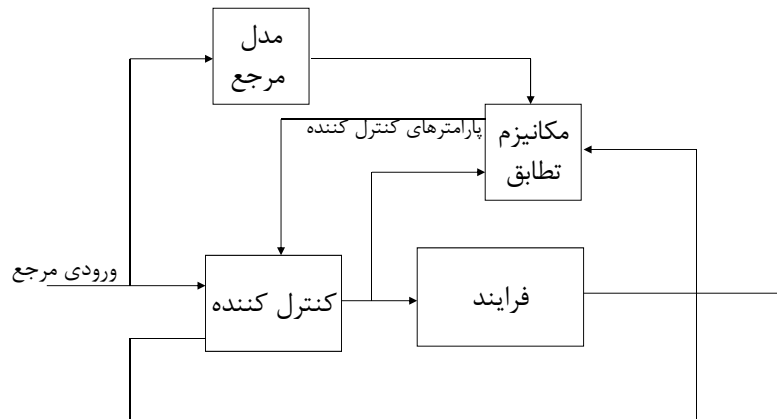
■ تنظیم کننده های خودکار

- ✓ روش های مبتنی بر پاسخ گذرا
- ✓ روش های مبتنی بر فیدبک رله ای
- ✓ روش حلقه بسته زیگلر- نیکولز

30

■ سیستم های تطبیقی مدل مرجع

مدل مرجع: رفتار ایده ال فرایند



31

✓ ۲ حلقه کنترلی:

- حلقه داخلی
- حلقه خارجی

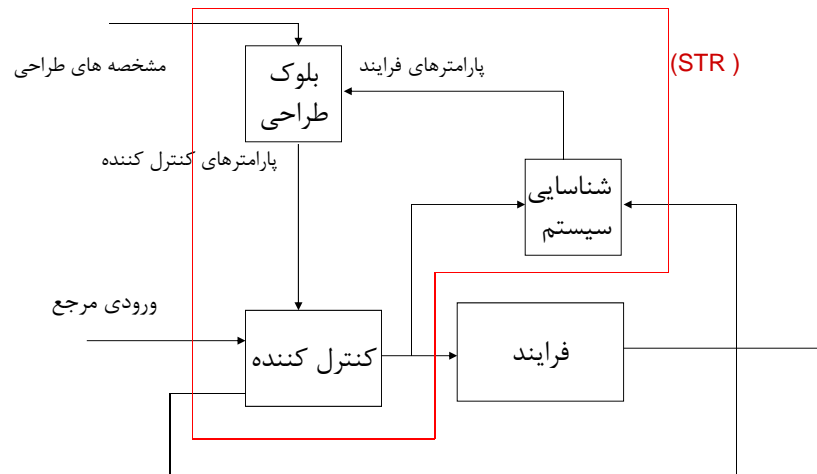
✓ مساله اصلی: مکانیزم تطابق یا Adaptation Mechanism

Stable MRAS

Robust MRAS

32

■ رگلاتورهای خود تنظیم (Self-Tuning Regulators) (STR)



33

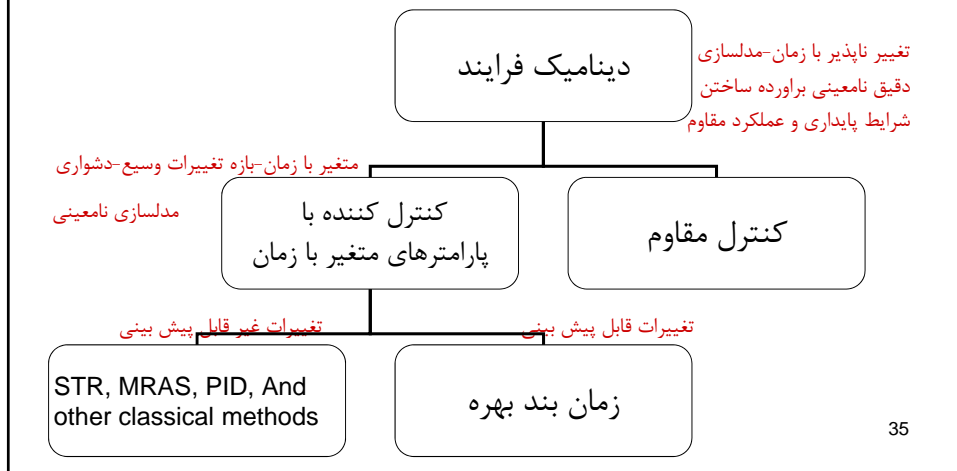
• نکات کلیدی

- ✓ روشهای مستقیم و غیر مستقیم طراحی
- ✓ ۲ حلقه کنترلی: حلقه داخلی و حلقه خارجی
- ✓ بلوک طراحی
- ✓ کاربردهای فراوان در صنعت
- ✓ حذف بلوک طراحی
- ✓ Certainty Equivalence Principle

34

■ کنترل تطبیقی یا کنترل مقاوم؟

✓ مرز به کار گیری کنترل تطبیقی: ناکارآمدی کنترل مقاوم



35

■ مساله کنترل تطبیقی:

- ✓ توصیف رفتار مطلوب سیستم حلقه بسته.
- ✓ انتخاب کنترل کننده ای با قابلیت تطابق و پارامترهای قابل تنظیم.
- ✓ مکانیزمی برای تنظیم پارامترها.
- ✓ اعمال قانون کنترل.
- ✓ راه اندازی کنترل تطبیقی.

36

فهرست مطالب

1. آشنایی با کنترل تطبیقی

- جایگاه تعاریف و روشهای کنترل تطبیقی
- تاریخچه کنترل تطبیقی
- کاربردهای عملی
- کنترل مقاوم، هوشمند و تطبیقی

2. شناسایی روی خط سیستم های دینامیکی

- معرفی شناسایی روی خط سیستم ها (روش حداقل مربعات خطا)
- RLS و مباحث مربوط به آن
- شناسایی در فضای حالت و رویگرهای تطبیقی

37

3. رگلاتورهای خود تنظیم جاییاب قطب

- طراحی جاییاب قطب با فیدبک خروجی
- STR های مستقیم و غیر مستقیم جاییاب قطب
- مساله اغتشاش

4. رگلاتورهای خود تنظیم حداقل واریانس

- اصول کنترل کننده های تطبیقی تصادفی بر اساس MV-MA
- روشهای مستقیم و غیر مستقیم
- آشنایی با روش های پایش عملکرد

5. رگلاتورهای خود تنظیم پیش بین

- آشنایی با کنترل کننده های پیش بین
- طراحی کنترل کننده های تطبیقی پیش بین

38

6. سیستم های کنترل تطبیقی مدل مرجع

- طراحی MRAS و تحلیل پایداری
- طراحی MRAS پایدار بر اساس تئوری لیاپانف
- طراحی MRAS پایدار بر اساس تئوری ورودی-خروجی

7. کنترل کننده های خود تنظیم PID

- اصول طراحی
- کاربردهای عملی

8. کاربردهای عملی سیستم های کنترل تطبیقی

- کاربردها و ملاحظات عملی در پیاده سازی کنترل کنندهای تطبیقی

39

• ارزیابی دوره

- پروژه های شبیه سازی (۱۰ نمره)
- امتحان پایان ترم (۱۰ نمره)

مراجع اصلی

1. *Adaptive Control*, K. J. Astrom, Wesley, 1995.
2. *Adaptive Filtering, Prediction and Control*, G. C. Goodwin and K. S. Sin, Prentice-Hall, 1984.
3. *Adaptive Control Tutorial*, P. Ioannou, B. Fidan, SIAM Advances in Design and Control, 2006
4. *Model Predictive Control*, E. F. Camacho, C. Bordons, Springer, 2006.

40

- وب سایت درس:

<http://saba.kntu.ac.ir/eecd/khakisedigh/Courses/Adaptive/>

با امید آرزوی موفقیت