

هدف پروژه

در این پروژه، یک فرایند حرارتی با تأخیر انتقال را مدل، تحلیل و کنترل می‌کنید. هدف نهایی روشن است: طراحی یک کنترلر PID که پاسخ پله حلقه‌بسته سیستم، هر چهار مشخصه زیر را همزمان برآورده کند:

- (۱) خطای حالت ماندگار نسبت به ورودی پله: صفر.
- (۲) فراجشش ماکزیمم: $M_p \leq 10\%$.
- (۳) زمان نشست (معیار 2%): $t_s \leq 15 \text{ s}$.
- (۴) اثر حالت ماندگار یک اغتشاش واحد در ورودی عملگر روی خروجی: صفر.

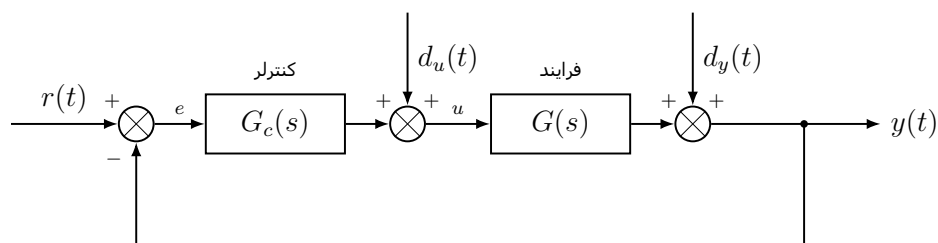
تمام مراحل باید در MATLAB/Simulink انجام شود و نتایج در قالب یک گزارش PDF ارائه گردد.

(۱) تعریف فرایند

شکل (۱) ساختار حلقه کنترل را نشان می‌دهد. $G(s)$ مدل یک کوره الکتریکی است که ورودی آن ولتاژ گرمکن (بر حسب ولت) و خروجی آن دمای اندازه‌گیری‌شده محفظه (بر حسب درجه سلسیوس) است. فاصله سنسور از گرمکن باعث یک تأخیر انتقال در مدل می‌شود:

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)} \quad K = 2 \frac{^\circ\text{C}}{\text{V}}, \quad L = 0.5 \text{ s},$$

$$T_1 = 2 \text{ s}, \quad T_2 = 1 \text{ s}, \quad T_3 = 0.5 \text{ s}$$



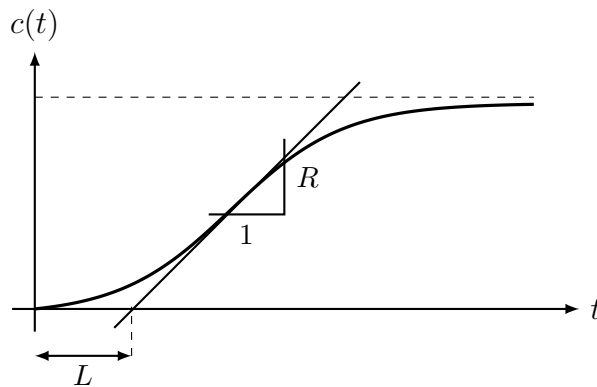
شکل (۱) — ساختار حلقه کنترل؛ d_u اغتشاش در ورودی عملگر و d_y اغتشاش در خروجی است.

(۲) بخش‌های پروژه

(الف) مدل‌سازی و پاسخ حلقه‌باز. فرایند را در Simulink بسازید (بلوک Transfer Fcn به همراه بلوک Transport Delay). پاسخ آن را به ورودی پله واحد در حلقه باز رسم کنید. سپس مطابق شکل (۲)، خط مماس بر منحنی در نقطه عطف را رسم کرده و دو کمیت زیر را اندازه‌گیری نمایید:

- R : شیب ماکزیمم منحنی (شیب خط مماس)،
- L : فاصله زمانی تا نقطه‌ای که خط مماس محور زمان را قطع می‌کند.

مقادیر عددی R و L و بهره حالت ماندگار حلقه‌باز را گزارش کنید.



شکل (۲) — نحوه استخراج L و R از منحنی عکس‌العمل

ب) تحلیل پایداری. تأخیر e^{-Ls} را با تقریب پاده مرتبه دوم یا بالاتر جایگزین کنید (دستور pade) و سپس:

- مکان هندسی ریشه‌ها را برای تغییرات بهره تناسبی رسم کنید؛
- نمودارهای بود و نایکوئیست سیستم حلقه‌باز را رسم و حاشیه بهره و حاشیه فاز را استخراج کنید (دستور margin)؛
- **بهره بحرانی** K_u (بهره‌ای که سیستم حلقه‌بسته را به مرز پایداری و نوسان با دامنه ثابت می‌رساند) و **پریود نوسان بحرانی** P_u را به دست آورید.

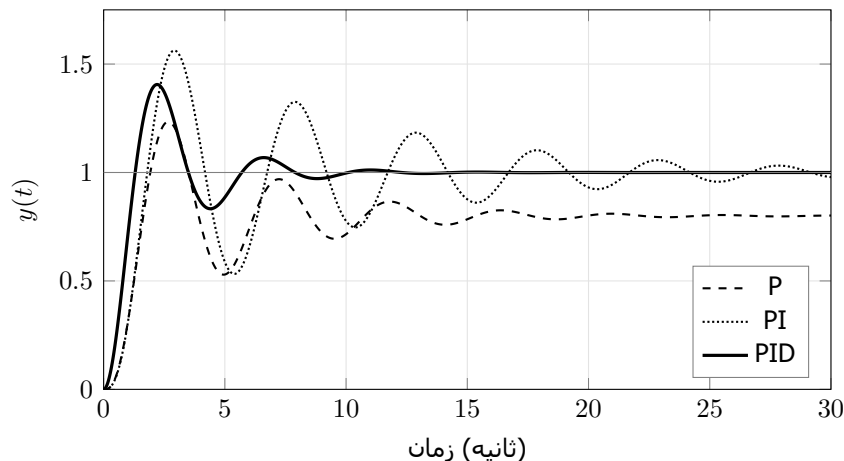
مقدار K_u را هم از تحلیل فرکانسی و هم با یک شبیه‌سازی مستقیم در Simulink (افزایش تدریجی بهره تناسبی تا مشاهده نوسان پایدار) به دست آورده و دو نتیجه را با هم مقایسه کنید.

ج) طراحی کنترلر PID با قواعد زیگلر-نیکولز. با استفاده از قواعد زیر، دو مجموعه ضریب برای کنترلر PID محاسبه کنید:

روش اول (منحنی عکس‌العمل): $K_c = \frac{1.2}{RL}, \quad T_i = 2L, \quad T_d = 0.5L$

روش دوم (نوسان پایدار): $K_c = 0.6 K_u, \quad T_i = 0.5 P_u, \quad T_d = 0.125 P_u$

در هر دو حالت، پاسخ پله حلقه‌بسته را رسم و مشخصه‌های M_p, t_p, t_s و e_{ss} را گزارش و با یکدیگر مقایسه کنید (دستور stepinfo). شکل (۳) نمونه‌ای از شکل خروجی مورد انتظار است.



شکل (۳) — نمونه از نحوه ارائه مقایسه پاسخ پله. این شکل متعلق به یک سیستم نمونه دیگر است و اعداد آن به این پروژه ربطی ندارد.

(د) شاخص عملکرد و تنظیم دستی. برای هر یک از کنترلرهای بند (ج) شاخص زیر را محاسبه کنید:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$

(در Simulink با بلوک‌های Abs و Integrator، یا در MATLAB با trapz). سپس ضرایب T_d و T_i ، K_c را به صورت دستی چنان تنظیم کنید که ضمن کاهش IAE، هر چهار مشخصه هدف صفحه اول برآورده شوند. روند تنظیم (اینکه افزایش یا کاهش هر ضریب چه اثری داشت) را توضیح دهید و جدول نهایی ضرایب را بیاورید. **(ه) بررسی دفع اغتشاش.** با کنترلر نهایی بند (د) و ورودی مرجع ثابت، دو سناریوی زیر را شبیه‌سازی کنید:

• اعمال یک اغتشاش پله واحد d_u در لحظه $t = 40$ s در ورودی عملگر؛

• اعمال یک اغتشاش پله واحد d_y در لحظه $t = 40$ s در خروجی.

در هر حالت پاسخ $y(t)$ را رسم کنید و توضیح دهید که آیا اثر اغتشاش در حالت ماندگار به طور کامل حذف می‌شود یا نه و چرا. (راهنمایی: به نوع سیستم و وجود عمل انتگرالی در مسیر مستقیم توجه کنید). **(و) جمع بندی.** در یک بند کوتاه بنویسید کدام روش تنظیم به مشخصات هدف نزدیک‌تر بود و چرا تأخیر انتقال، طراحی کنترلر را دشوارتر می‌کند.

سؤال چندگزینه‌ای — برای ثبت در فرم پاسخ

علاوه بر گزارش کامل، پاسخ سؤال زیر را به صورت شماره گزینه (عددی بین ۱ تا ۱۰) در فرم پاسخ ثبت نمایید. این سؤال مستقیماً از بند (ب) پروژه به دست می‌آید.

بهره بحرانی K_u این فرایند — یعنی بهره تناسبی‌ای که سیستم حلقه بسته را به مرز پایداری می‌رساند — با دو رقم اعشار، نزدیک‌ترین مقدار به کدام گزینه است؟

2.26 (۵	2.05 (۴	1.84 (۳	1.62 (۲	1.41 (۱
3.42 (۱۰	3.18 (۹	2.95 (۸	2.71 (۷	2.48 (۶

راهنمای MATLAB و Simulink

ساخت مدل در: MATLAB:

```
s = tf('s');  
Gp = 2/((2*s+1)*(s+1)*(0.5*s+1));  
[np,dp] = pade(0.5,4); Gd = tf(np,dp); G = Gp*Gd;
```

دستورهای مفید: step, stepinfo, rlocus, bode, margin, nyquist, feedback, pid, trapz, sisotool

بلوک‌های Simulink: Step, Sum, PID Controller, Transfer Fcn, Transport Delay, Abs, Integrator, Scope, To Workspace

نکات:

- در Simulink تأخیر را با بلوک Transport Delay (بدون تقریب پاده) مدل کنید؛ تقریب پاده فقط برای تحلیل‌های حوزه فرکانس و رسم مکان ریشه‌ها در MATLAB لازم است.
- زمان شبیه‌سازی را دست‌کم 80 ثانیه بگیرید تا حالت ماندگار و اثر اغتشاش به‌وضوح دیده شود.
- حداکثر گام زمانی حل‌کننده را به‌اندازه کافی کوچک انتخاب کنید (مثلاً Max step size حدود 0.01) تا نوسان‌های مرز پایداری درست دیده شوند.
- کنترلر PID را در فرم استاندارد زیر بنویسید:

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

و برای بلوک PID Controller معادله‌های $K_p = K_c$ و $K_i = K_c/T_i$ و $K_d = K_c T_d$ را محاسبه کنید.

ساختار گزارش و بارمبندی (مجموع 4 نمره از نمره نهایی درس)

گزارش را به صورت یک فایل PDF واحد با فونت‌های embed شده ارائه کنید. ارزیابی صرفاً بر اساس همین فایل انجام می‌شود؛ از ارسال فایل‌های پراکنده (کد، تصویر، فایل مدل و ...) خودداری فرمایید. کدهای MATLAB و تصویر مدل Simulink را در پیوست همین PDF قرار دهید.

بند الف — مدل‌سازی در Simulink، پاسخ حلقه باز و استخراج R و L 0.5 نمره

بند ب — مکان ریشه‌ها، بود و ناپکوئیست، حاشیه‌ها، P_u و K_u 1.0 نمره

بند ج — طراحی PID با دو روش زیگلر-نیکولز و مقایسه پاسخ‌ها 1.0 نمره

بند د — محاسبه IAE و تنظیم دستی تا برآورده شدن مشخصات هدف 0.75 نمره

بند ه — بررسی و تحلیل دفع اغتشاش d_u و d_y 0.5 نمره

کیفیت گزارش — وضوح نمودارها، درج واحدها، تفسیر نتایج و جمع‌بندی 0.25 نمره

توجه: هر نمودار باید عنوان، برچسب محورها به همراه واحد و در صورت نیاز راهنما (legend) داشته باشد. صرف آوردن شکل بدون تفسیر، نمره کامل آن بند را به همراه نخواهد داشت. پاسخ سؤال چندگزینه‌ای نیز باید با نتیجه گزارش شما سازگار باشد.

موفق باشید