

یادداشت کاربردی اصلی به نام AVR221: Discrete PID controller توسط شرکت ATMEL منتشر شده و برنامه آن روی میکروکنترلرهای ۸ بیتی avr قابل اجرا است. ترجمه توسط سایت karakit.ir انجام شده است و استفاده از آن با ذکر نام karakit.ir بلامانع است.

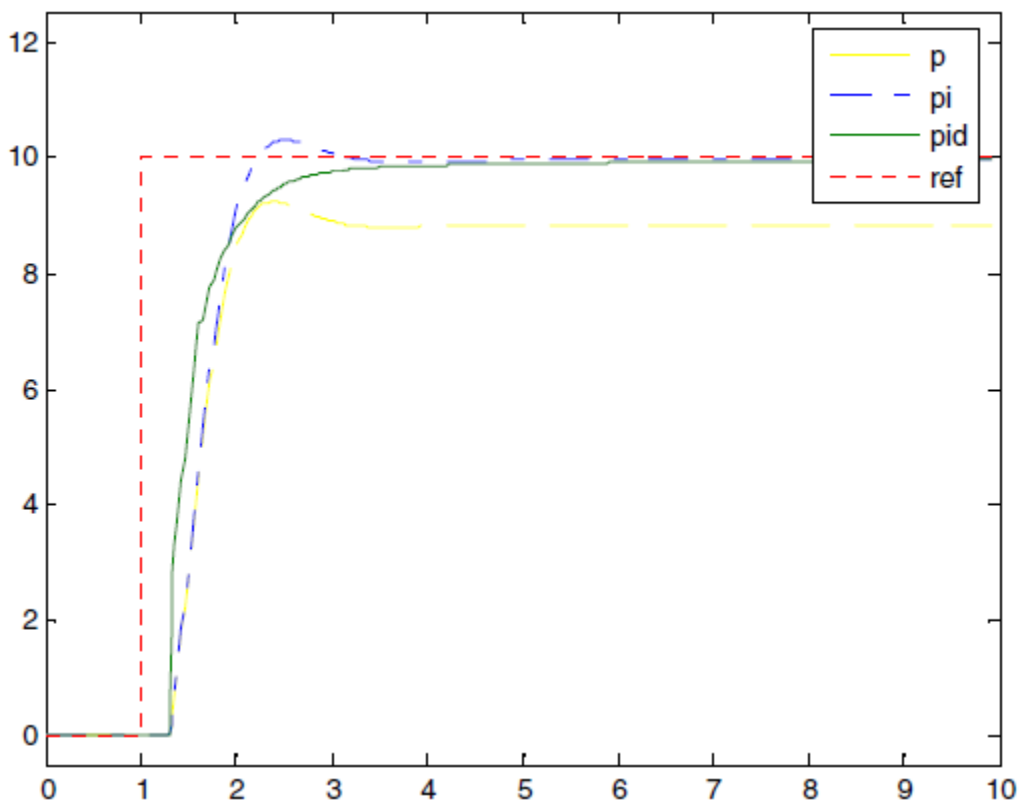
کنترل کننده PID گسسته

۱- مقدمه

این یادداشت کاربردی یک پیاده سازی ساده از یک کنترل کننده PID گسسته را تشریح می کند. وقتی که با کاربردهایی کار می کنیم که خروجی سیستم ناشی از تغییرات در مقدار مرجع یا حالت مرجع مورد نیاز است، پیاده سازی یک الگوریتم کنترلی الزامی است. نمونه این کاربردها کنترل موتور، کنترل دما، فشار، دبی، سرعت، نیرو یا هر متغیر دیگری می تواند باشد. کنترلر PID می تواند برای کنترل هر متغیر قابل اندازه گیری به کار رود، تا زمانی که این متغیر بتواند با دستکاری سایر متغیرهای فرایند دستخوش تغییر شود.

راه حل های کنترلی زیادی در طول زمان به کار رفته اند، اما PID به علت سادگی و عملکرد خوب به استاندارد صنعتی تبدیل شده است.

شکل ۱-۱ پاسخ پله یک تنظیم کننده PID نوعی

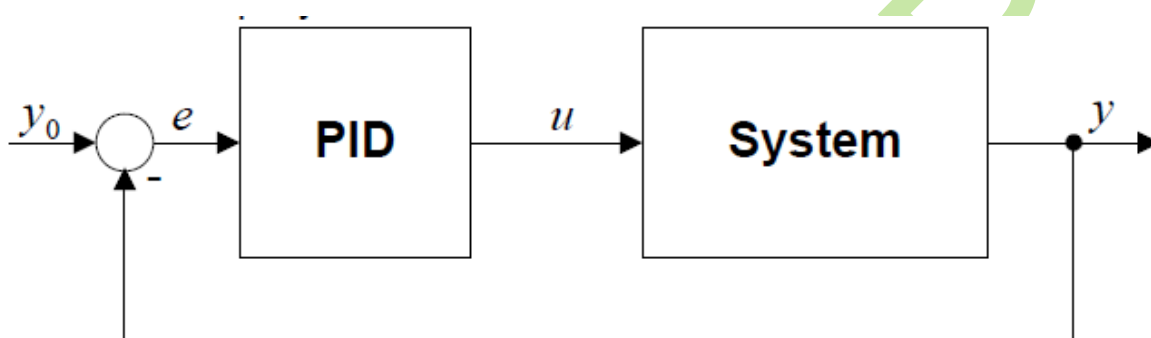


۲- کنترل کننده PID

در شکل ۱-۲ نمودار یک سیستم با یک کنترل کننده PID نشان داده شده است. کنترل کننده PID مقدار اندازه گیری شده فرایند y را با مقدار نقطه تنظیم مرجع y_0 مقایسه می کند. سپس تفاضل یا خطا، e ، پردازش می شود تا یک ورودی جدید u تولید گردد. این ورودی تلاش می کند که مقدار اندازه گیری شده فرایند را به نقطه تنظیم دلخواه برگرداند.

جایگزین یک نقشه حلقه بسته ماند PID کنترل حلقه باز (بدون فیدبک) است که در بسیاری موارد راضی کننده نیست و با توجه به خصوصیات سیستم عملی نیست. با اضافه کردن فیدبک از خروجی عملکرد ارتقا می یابد.

شکل ۱-۲ سیستم حلقه بسته با کنترل کننده PID

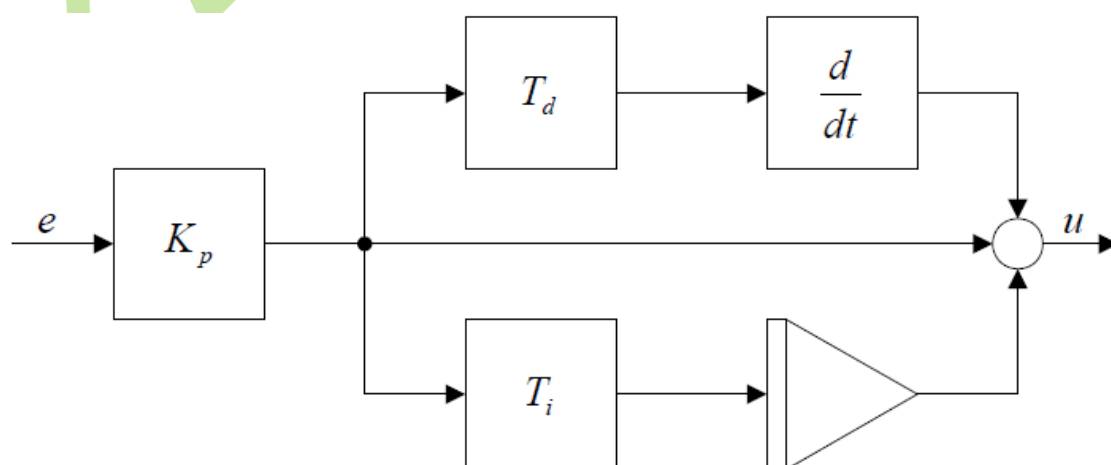


برعکس الگوریتمهای کنترل ساده، PID می تواند ورودیهای فرایند را بر اساس گذشته و نرخ تغییر سیگنال دستکاری کند که این یک شیوه کنترل دقیقتر و پایدارتر به دست می دهد.

ایده پایه ای این است که حالت سیستم را با یک سنسور می خواند و سپس آن را از یک مرجع دلخواه کم می کند تا مقدار خطا را تولید نماید. خطا از سه طریق مدیریت می شود، با مولفه نسبت P برای اداره حال حاضر، با مولفه انتگرال گیر I برای بازیابی از گذشته، و مولفه مشتق گیر D برای پیش بینی آینده.

شکل ۲-۲ نمودار کنترل کننده PID را نشان می دهد که T_d و T_i ، T_p به ترتیب ثابت زمانی مولفه های نسبت، انتگرال گیر و مشتق گیر هستند.

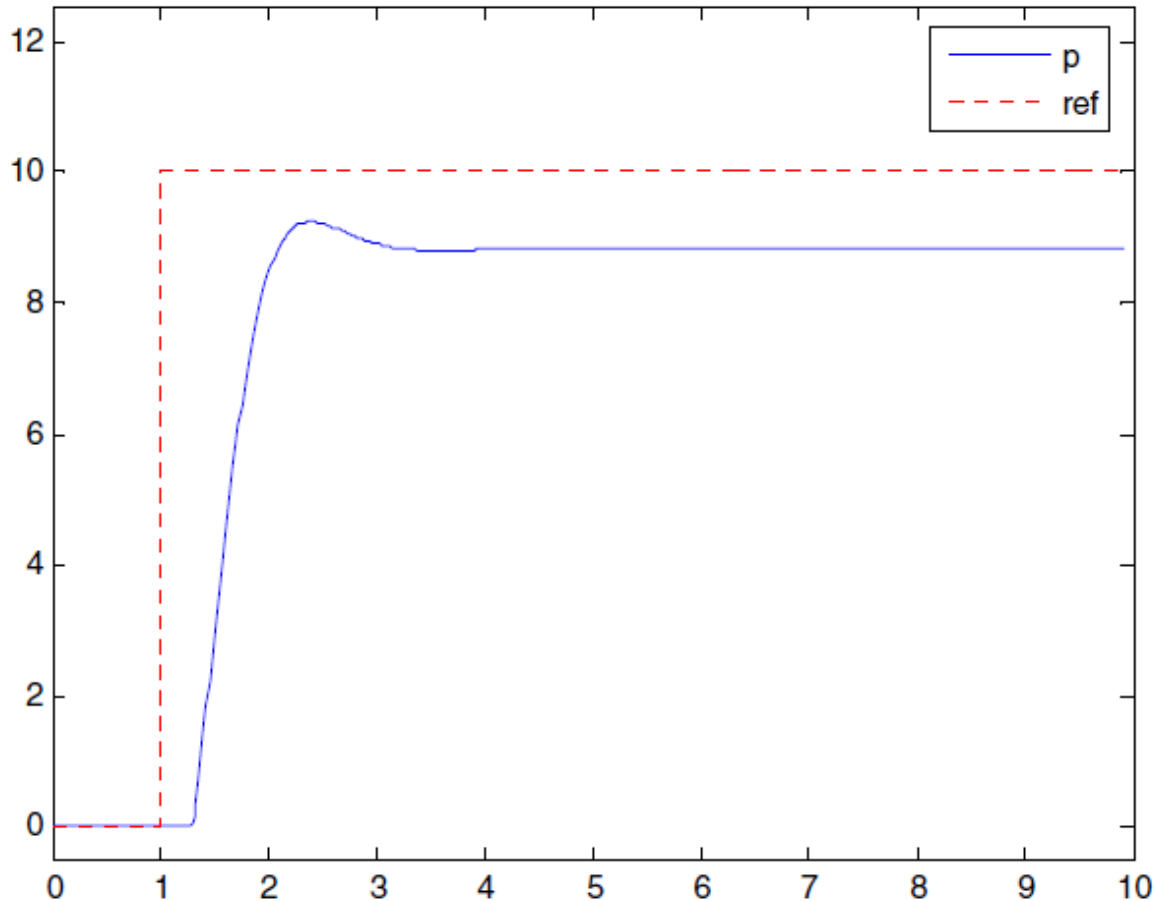
شکل ۲-۲ نمودار کنترل کننده PID



۲-۱- مولفه نسبت

مولفه نسبت P یک ورودی کنترل سیستم متناسب با خطا می دهد. فقط با استفاده از P کنترل همیشه یک خطای ثابت می دهد مگر زمانی که ورودی صفر است و مقدار فرایند سیستم برابر مقدار دلخواه است. در شکل ۲-۳ خطای ثابت در مقدار فرایند سیستم پس از اعمال تغییر در ورودی (ref) ظاهر شده است. استفاده از یک مولفه P بزرگ باعث می شود یک سیستم ناپایدار داشته باشیم.

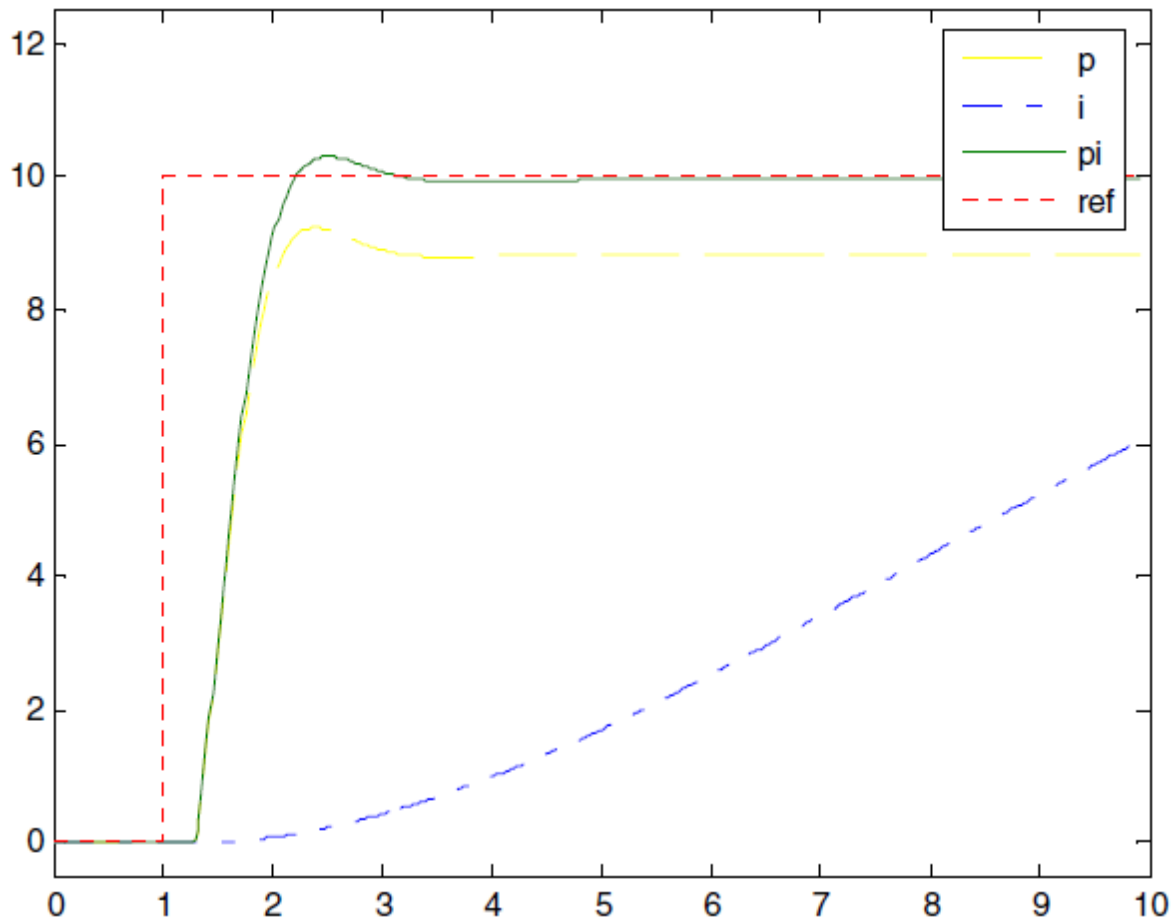
شکل ۲-۳ پاسخ پله کنترل کننده P



۲-۲ مولفه انتگرال گیر

مولفه انتگرال گیر یک انباره از جمع خطاهای قبلی به ورودی کنترل سیستم به دست می دهد. جمع کردن خطا ادامه می یابد تا زمانی که مقدار فرایند سیستم با مقدار دلخواه برابر شود و زمانی که مرجع پایدار باشد خطا صفر خواهد شد. رایج ترین استفاده از مولفه I به طور طبیعی همراه با مولفه P است که به آن کنترل کننده PI گفته می شود. اگر فقط از مولفه I استفاده شود پاسخ کند خواهد بود و معمولاً یک سیستم نوسانی خواهیم داشت. شکل ۲-۴ پاسخ پله های کنترل کننده های I و PI را نشان می دهند. همان طور که دیده می شود پاسخ کنترل کننده PI خطای ثابت ندارد و پاسخ کنترل کننده I بسیار کند است.

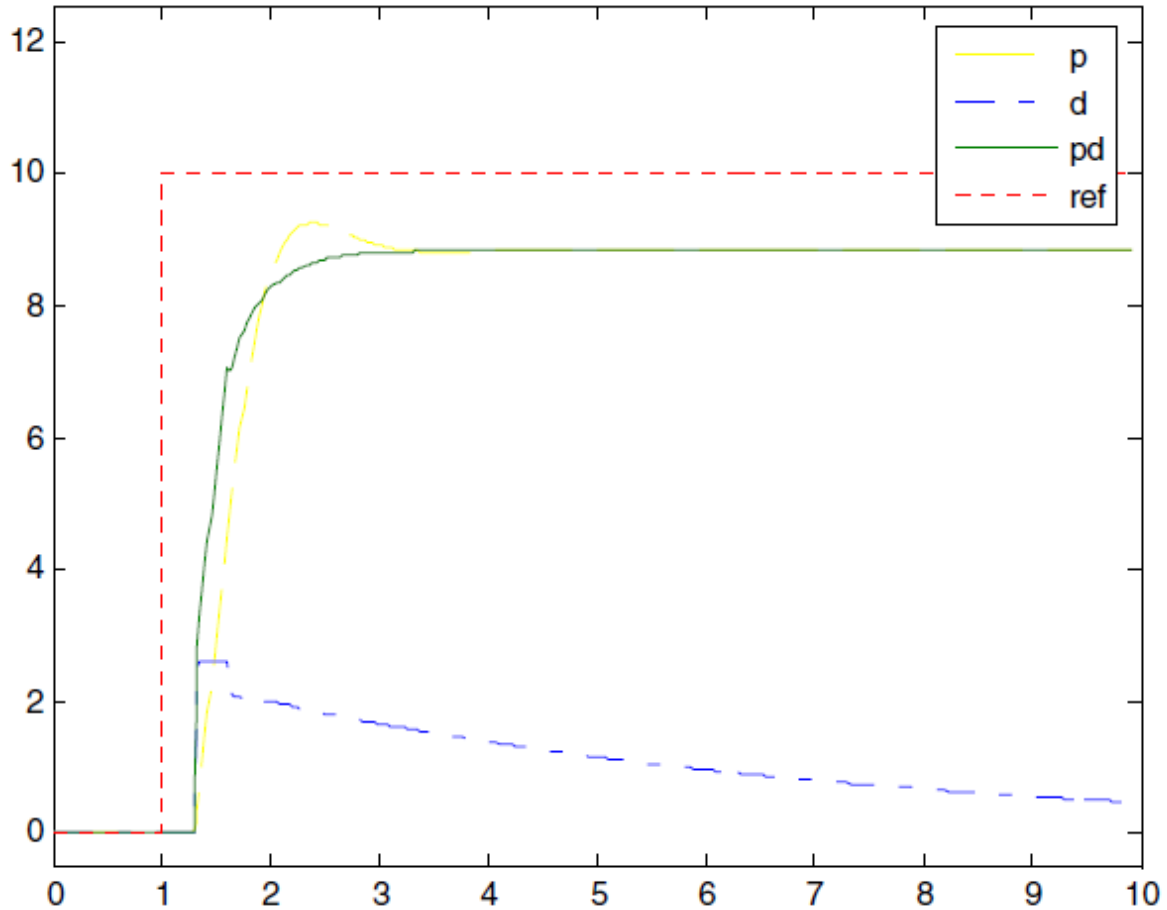
شکل ۲-۴ پاسخ پله کنترل کننده PI و I



۲-۳- مولفه مشتق گیر

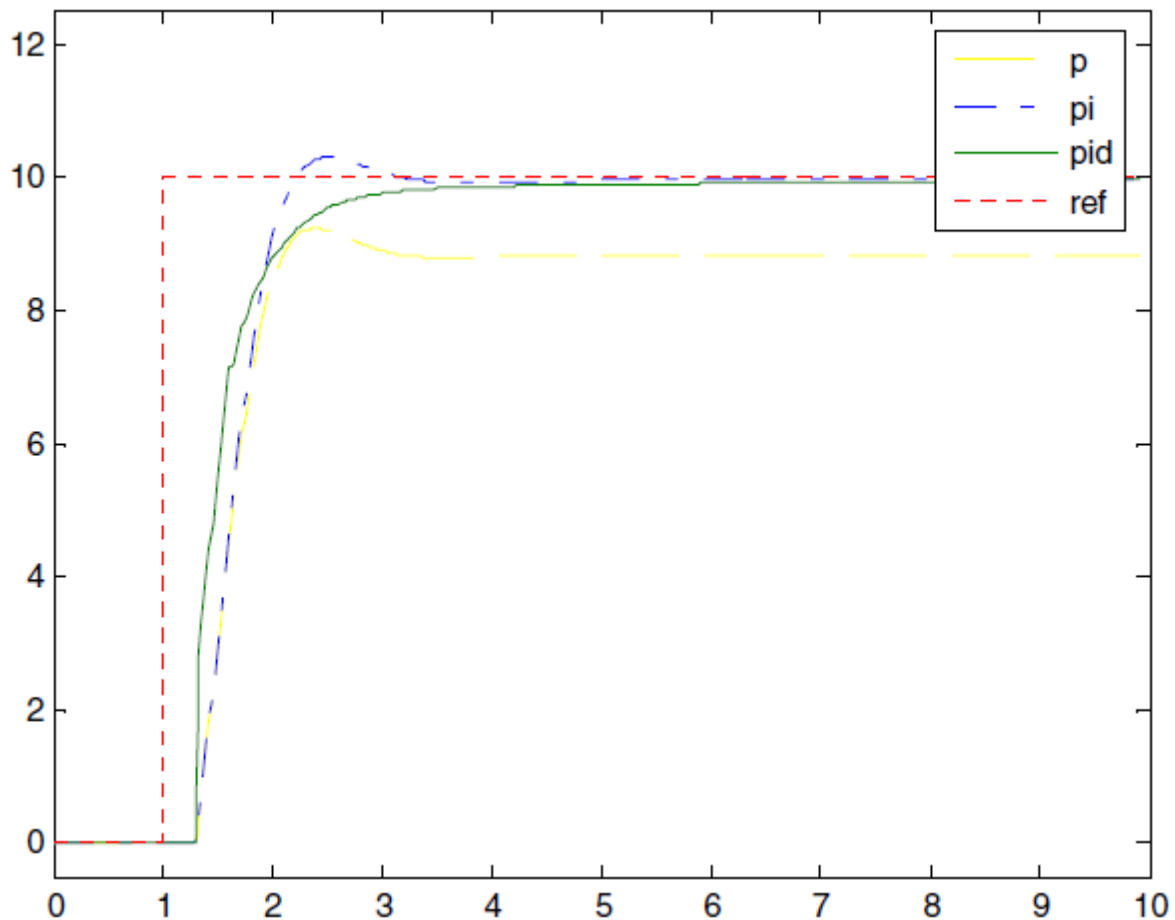
مولفه مشتق گیر D یک انباره از نرخ تغییر خطا در ورودی کنترل سیستم به دست می دهد. یک تغییر سریع در خطا یک افزایش به ورودی کنترل سیستم می دهد. مولفه D معمولا همراه با کنترل کننده P به عنوان کنترل کننده PD یا PI به عنوان کنترل کننده PID به کار می رود. یک مولفه D خیلی بزرگ معمولا یک سیستم ناپایدار بوجود می آورد. شکل ۲-۵ پاسخهای کنترل کننده های D و PD را نشان می دهد. پاسخ کنترل کننده PD نسبت به کنترل کننده P یک افزایش سریعتر در مقدار فرایند سیستم می دهد. توجه کنید که مولفه D اساسا مانند یک فیلتر بالاگذر بر روی سیگنال خطا عمل می کند و بنابراین در یک سیستم ناپایداری را راحت تر بروز می دهد و آن را نسبت به نوسان حساس تر می کند.

شکل ۵-۲ پاسخ پله کنترل کننده D و PD



استفاده همه مولفه ها با هم به عنوان کنترل کننده PID معمولا بهترین عملکرد را دارد. شکل ۶-۲ کنترل کننده های P و PI و PID را مقایسه می کند. P PI را با حذف خطای ثابت و PID را با پاسخ سریعتر و بدون جهش ارتقا می دهد.

شکل ۲-۶ پاسخ پله P و PI و PID



۲-۴- تنظیم پارامترها

بهترین راه برای تنظیم پارامترها مورد نیاز PID استفاده از مدل ریاضی سیستم است. اغلب یک توصیف ریاضی دقیق از سیستم در دسترس نیست، بنابراین تنظیم تجربی پارامترهای PID انجام می شود. پیدا کردن مولفه های کنترل کننده PID می تواند امری چالش برانگیز باشد. اطلاعات مناسب درباره خصوصیات سیستمها و چگونگی عملکرد مولفه های مختلف الزامی است. رفتار بهینه درباره تغییر فرایند یا تغییر نقطه تنظیم به کاربرد در دست اجرا بستگی دارد. در بعضی فرایندها متغیر فرایند نباید از نقطه تنظیم فرآیند داشته باشند. در بعضی فرایندها مصرف انرژی در مسیر رسیدن به نقطه تنظیم باید حداقل باشد. به طور کلی پایداری مهمترین شرط محسوب می شود. فرایند برای هیچ ترکیب یا نقطه تنظیمی نباید نوسان داشته باشد. بعلاوه تاثیر پایداری باید در محدوده های زمانی خاصی ظاهر شود.

روشهای مختلفی برای تنظیم حلقه PID وجود دارد. انتخاب روش کاملاً به این مرتبط است که آیا تنظیم فرایند می تواند به صورت آفلاین انجام شود یا نه. روش زیگلر - نیکولز یک راهکار آنلاین شناخته شده است. گام اول در این روش برابر صفر قرار دادن بهره های I و D و بالا بردن بهره P تا جایی است که یک نوسان قابل تحمل و پایدار (تا

حد ممکن نزدیک) در خروجی حاصل شود. سپس بهره بحرانی K_c و دوره نوسان P_c ثبت می شوند و مقادیر P و I و D طبق جدول ۱-۲ تنظیم می گردند.

جدول ۱-۲ پارامترهای زیگلر – نیکولز

Table 2-1. Ziegler-Nichols parameters

Controller	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 * K_c$		
PD	$0.65 * K_c$		$0.12 * P_c$
PI	$0.45 * K_c$	$0.85 * P_c$	
PID	$0.65 * K_c$	$0.5 * P_c$	$0.12 * P_c$

تنظیم مجدد پارامترها برای بهینه سازی عملکرد کنترل کننده PID لازم است.

باید توجه شود که سیستمهایی وجود دارد که کنترل کننده PID خوب روی آنها عمل نمی کند یا تنها روی یک بخش کوچک حول یک حالت سیستم عمل می کند. سیستمهای غیرخطی می توانند اینگونه باشند، اما به طور کلی غالباً مشکلات زمانی با کنترل کننده PID رخ می دهند که سیستمها ناپایدار باشند و تاثیر ورودی به حالت سیستم وابسته باشد.

۲-۵- کنترل کننده PID گسسته

یک کنترل کننده PID گسسته خطا را می خواند ، و ورودی کنترل را در فاصله زمانی داده شده دوره نمونه برداری T محاسبه می کند و بیرون می دهد. زمان نمونه برداری باید از کمترین ثابت زمانی موجود در سیستم کوچکتر باشد.

۲-۵-۱- پس زمینه الگوریتم

برعکس الگوریتمهای کنترلی ساده، کنترل کننده PID می تواند ورودی های فرایند را بر اساس گذشته و نرخ تغییرات سیگنال دستکاری کند. این مساله یک روش کنترلی پایدارتر و دقیقتر ارائه می دهد.

شکل ۲-۲ نمودارهای کنترل کننده PID را نشان می دهد که T_p و T_i و T_d به ترتیب نشان دهنده ثابت زمانی مولفه های نسبت، انتگرالگیر و مشتق گیر هستند. تابع تبدیل سیستم شکل ۲-۲ به این صورت است:

$$\frac{u}{e}(s) = H(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

که می توان u را بر حسب e در حوزه زمان نمایش داد:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\sigma) d\sigma + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

با استفاده از رابطه زیر مولفه های انتگرالگیر و مشتق گیر را تخمین می زنیم تا به صورت گسسته درآیند:

$$\int_0^t e(\sigma) d\sigma \approx T \sum_{k=0}^n e(k) \quad \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(n) - e(n-1)}{T} \quad t = nT$$

که n گام گسسته در زمان t است.

بنابراین کنترل کننده به این صورت نوشته می شود:

$$u(n) = K_p e(n) + K_i \sum_{k=0}^n e(k) + K_d (e(n) - e(n-1))$$

که:

$$K_i = \frac{K_p T}{T_i} \quad K_d = \frac{K_p T_d}{T}$$

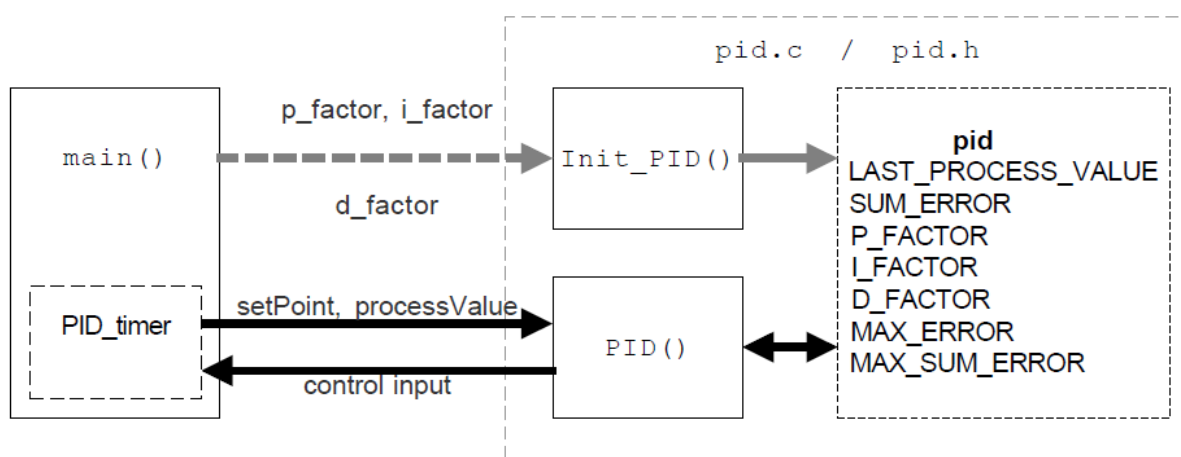
برای پرهیز از اینکه تغییرات در مقدار فرایند دلخواه هر گونه تغییرات ناخواسته ناگهانی را در ورودی کنترل بوجود بیاورند، کنترل کننده با تعریف مولفه مشتقگیر تنها بر اساس مقدار فرایند بهبود می یابد:

$$u(n) = K_p e(n) + K_i \sum_{k=0}^n e(k) + K_d (y(n) - y(n-1))$$

۳- پیاده سازی

یک برنامه عملی به زبان C همراه با سند اصلی این یادداشت ضمیمه شده است. مستندات کامل کد برنامه و اطلاعات کامپایل در فایل `readme.html` که با کد برنامه ضمیمه شده است.

شکل ۱-۳ نمودار بلوکی برنامه نمونه



در شکل ۱-۳ یک نمودار ساده شده از برنامه نمونه نشان داده شده است. کنترل کننده PID از یک ساختار برای ذخیره حالتها و متغیرها استفاده می کند. این ساختار در main مقداردهی اولیه می شود و از آن تنها یک اشاره گر به توابع Init_PID() و PID() فرستاده می شود.

تابع PID() در هر فاصله زمانی T فراخوانی می شود و این به وسیله یک تایمر انجام می شود که در هر فاصله زمانی پرچم PID_TIMER را فعال می کند. وقتی که این پرچم فعال می شود روئین main مقدار فرایند دلخواه (نقطه تنظیم) و مقدار فرایند را می خواند، PID() را فراخوانی می کند و نتیجه را به ورودی کنترل می دهد.

برای افزایش دقت P_factor و I_factor و D_factor با یک نسبت 1/128 مقیاس بندی شده اند. مقیاس نتیجه الگوریتم PID بعدا با تقسیم بر ۱۲۸ مجددا اصلاح خواهد شد. مقدار ۱۲۸ به منظور محاسبه بهینه در کامپایلر بهکار رفته است.

$$PFactor = 128K_p$$

تأثیر IFactor و DFactor به زمان نمونه برداری T بستگی خواهد داشت:

$$IFactor = 128K_p \frac{T}{T_i}$$

$$DFactor = 128K_p \frac{T_d}{T}$$

۱-۳-۱ پایان انتگرال گیری

ورودی فرایند u به یک مقدار به اندازه کافی بالا می رسد به طریقی محدود می شود. یا با بازه عددی به صورت داخلی در کنترل کننده PID یا با بازه خروجی کنترل کننده یا قیود تقویت کننده یا خود فرایند. این زمانی رخ خواهد داد که بین مقدار فرایند اندازه گیری شده و نقطه تنظیم مرجع تفاوت زیادی وجود داشته باشد و این خود عمدتا به این علت اتفاق می افتد که فرایند یک اختلال یا بار بزرگتر از حدی دارد که سیستم بتواند آن را اداره کند.

اگر کنترل کننده از یک مولفه انتگرالگیر استفاده کند، این مساله می تواند مشکل ساز باشد. مولفه انتگرال گیر تا زمانی که این وضعیت باقی بماند به جمع کردن ادامه می دهد و زمانی که تداخل یا بار بزرگ برداشته شود کنترل کننده ورودی فرایند را بیش از حد جبران سازی می کند تا زمانی که مجموع انتگرال به حالت عادی بازگردد.

می توان به روشهای مختلف از این مشکل پرهیز کرد. در این پیاده سازی حداکثر جمع انتگرال توسط MAX_I_TERM محدود شده است. مقدار مناسب MAX_I_TERM به سیستم و زمان نمونه برداری به کار رفته بستگی دارد.

۴- پیشرفتهای بعدی

کنترل کننده PID که در اینجا معرفی شد یک نمونه ساده است. کنترل کننده خوب کار می کند اما شاید لازم باشد در برخی کاربردها مقاوم تر شود (با محدود کردن رانش و فراجش). افزودن اصلاح اشباع به مولفه انتگرالگیر و تعریف مولفه نسبت تنها بر اساس مقدار فرایند سیستم می تواند الزامی باشد.

در محاسبه I Factor و D Factor زمان نمونه برداری T بخشی از معادله بود. اگر T خیلی کوچکتر یا بزرگتر از ۱ ثانیه باشد دقت I Factor و D Factor نامناسب خواهد بود. بازنویسی الگوریتم PID و مقیاس دهی باعث حفظ دقت مولفه انتگرالگیر و مشتقگیر خواهد شد.

۵- منبع:

K. J. Astrom & T. Hagglund, 1995: *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*.
International Society for Measurement and Con.