



دانشکده فنی - گروه کنترل

# کنترل صنعتی

این یک متن راهنماست مطالب تکمیلی در کلاس درس ارائه می شود

سعید سید طبایی

پاییز ۸۸

۷.	مدل تقریبی سیستمهای ریاضی - تمرین ۲
۸.	مدلسازی با LS-آشنایی با ident برنامه MATLAB :
۹.	کنترلر PID -
۱۰.	روشهای زیگلر نیکولز و مشابه
۱۱.	پیاده سازی الکترونیکی - پیاده سازی دیجیتالی و مشکلات
۱۲.	آشنایی با سیمولینک
۱۳.	کنترل کننده ۲ وضعیتی - روش فیدبک رله ای- تمرین ۳
۱۴.	مرور درس ۱ -
۱۵.	مرور درس ۲:
۱۶.	امتحان میان ترم
۱۷.	هالمن IMC-SP-آزمایش ۱
۱۸.	-inverse control-cascade control
۱۹.	Feedforward ratio control و دیگران:
۲۰.	PLC سنسورها
۲۱.	RLL-تمرین ۴-آزمایش ۲
۲۲.	سخت افزار-FBD-
۲۳.	SFC و آشنایی با نرم افزار PLC
۲۴.	آشنایی با سیستمهای بادی - تمرین ۵ - کامپیوتری ۱
۲۵.	شیرهای کنترل -تمرین ۵
۲۶.	سیستمهای هیدرولیکی-آزمایش ۳
۲۷.	real time system
۲۸.	(CNC) Machines-تمرین ۶- کامپیوتری ۲
۲۹.	فیلد باس
۳۰.	مرور درس تحویل تمرین شماره ۷

۱-کنترل و اتوماسیون صنعتی: تعاریف	
۲-مدلسازی ریاضی: کنترل ارتفاع و دبی مایع -کنترل فشار -کنترل غلظت -کنترل درجه حرارت - فرایندهای تولید نفت-تقطیر - آسیاب- سیستم نورد	
۳-مدلسازی تجربی: تاخیر- مدل های درجه ۱ و تاخیر دار- تقریب سیستمها با مدل تاخیر دار- مدل دیجیتالی سیستمها	
۴-تنظیم PID: ساختار و عملکرد PID- تنظیم پارامترهای PID- پیاده سازی فعال PID- پیاده سازی دیجیتالی PID	
۵-کنترلرهای ویژه: کنترلر ON_OFF- روش رله فیدبکی- طراحی مستقیم- تنظیم $\lambda$ - روش Haalman	
روش مدل داخلی- Predictive control- کنترل سیستم با رفتار معکوس-کنترل زنجیرهای- کنترل فیدفورارد- کنترل نسبت- کنترل override- کنترل split range	
۶-کنترل ترتیبی-منطقی	
PLC، سنسورها و محرکها- برنامه نویسی Ladder- سخت افزار PLC- ساختار برنامه نویسی	
زبانهای برنامه نویسی	
۷-اجزا غیر الکتریکی سیستم کنترل: PID بادی- محرکها- اجزا هیدرولیکی- مدارهای هیدرولیکی	
۸-Real Time embeded systems	
۹-CNC	
۱۰-۱۰-Real Time embeded systems	
مراجع	
1- Kharagpour university process control course	
2- کنترل صنعتی دکتر محمود تارخ دانشگاه صنعتی شریف	
3- Karl J. Astrom and Tore, Hagglund PID Controllers: Theory, Design and Tuning ,1995	
4- Thomas E. Marlin , PROCESS CONTROL: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance, 2000	
5- John R. Hackworth and Frederick D. Hackworth, Jr. ,Programmable Logic Controllers: Programming Methods and Applications	

## زمانبندی درس

۱.	مقدمه در باره اتوماسیون و کنترل صنعتی
۲.	کنترل ارتفاع و دبی توسط شیر و پمپ ،
۳.	کنترل فشار، کنترل غلظت، مثال از صنعت نفت
۴.	-روشهای انتقال گرما و کنترل حرارت:
۵.	پروسس نورد:کنترل ضخامت-کنترل کشش کنترل موتور- تمرین ۱
۶.	مدلسازی تجربی

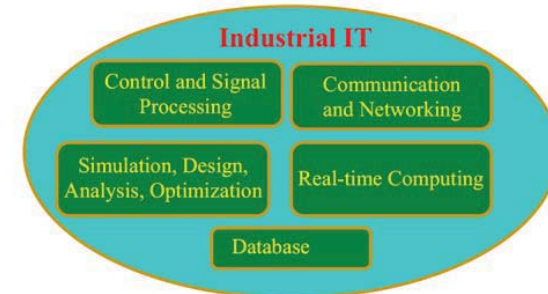
## کنترل و اتوماسیون صنعتی

**صنعت:** فعالیت سیستماتیک تولیدی، خدماتی یا تجاری است که به ارزش افزوده منجر شود. مراد از صنعت در اینجا، فعالیت تولیدی است. اتوماسیون امکانی است که بهره‌وری بهتر صنعت را بدنبال دارد.

### ۱-۱ اتوماسیون صنعتی

**اتوماسیون:** automation از لغت‌های یونانی "auto"(self) و "matos"(moving) گرفته شده است که به معنی move by itself یعنی خودکار است. ولی منظور علمی از اتوماسیون؛ بکارگیری مجموعه فناوریها با حداقل استفاده از نیروی انسانی برای بکار اندازی ماشینها و سیستمها با بهترین عملکرد از نظر سرعت، دقت و تعداد تولید است.

اتوماسیون در بستر فناوری اطلاعات IT پیاده می‌شود. منظور از IT مجموعه



- کنترل و پردازش سیگنال
- شبکه و مخابرات برای انتقال اطلاعات
- پایگاه داده Data Base

۱- محاسبات بلا درنگ Real time: سیستمهای صنعتی نیاز به محاسبات بلا درنگ real time دارند. در این رابطه خروجی تقریبی فوری به خروجی دقیق که زمان زیادی تولید آن نیاز دارد ارجح است.

۲- امکانات شبیه سازی، طراحی بهینه و تحلیل. سیستمهای صنعتی زیادی mission-critical هستند یعنی در صورت ایراد در عملکرد آنها خسارتهای غیر قابل جبران انسانی و مالی اتفاق می‌افتد. در طراحی این سیستمها

باید دقت مضاعف بکار گرفته شود. صمنا ترتیبیاتی برای مقابله با حوادث پیش بینی نشده باید لحاظ گردد. از این رو طراحی بهینه، شبیه سازی قبل از پیاده سازی و شبکه ارتباطی برای اعلام خطر نیاز دارد.

**کنترل:** یکی از لایه های اتوماسیون است که وظیفه تبعیت ماشینها و سیستمها از ورودی را انجام می دهد. **مکانیزاسیون در مقابل اتوماسیون:** مکانیزاسیون اغلب به جایگزینی ساده نیروی کار با ماشین اشاره دارد در حالیکه منظور از اتوماسیون تجمیع ماشینها برای عملکرد خودکار است.

### A. لایه های اتوماسیون صنعتی

لایه های اتوماسیون از این قرار هستند.

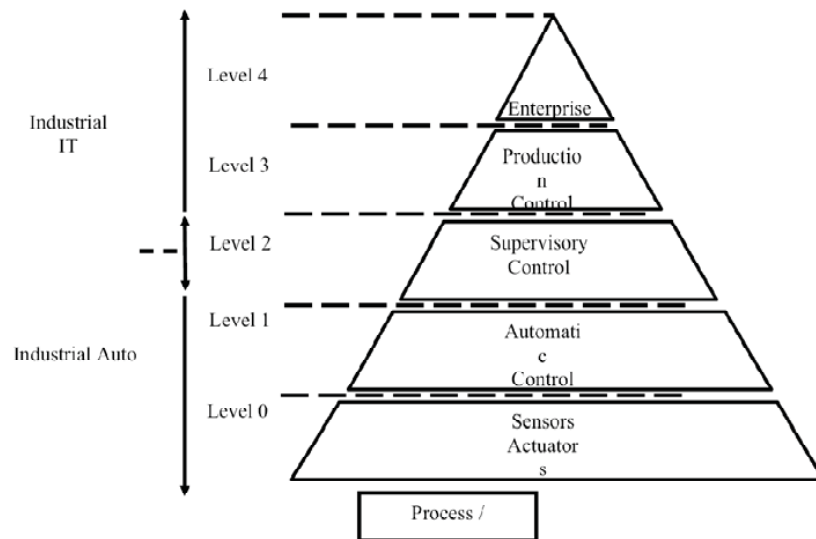


Fig. 2.4 Automation pyramid

۱: لایه صفر: در این لایه اندازه گیرها و محرکها قرار دارند.

۲: لایه ۱: در این لایه سیستمهای کنترل پیوسته و گسسته وجود دارد.

۳: لایه ۲: در این لایه کنترل نظارتی وجود دارد که مرجع برای حلقه های کنترل، برنامه توالی عملیات، مانیتورینگ سیستم، اجرای عملیات start up و shutdown و برنامه ریزی فعالیت ماشینها و سیستمها است.

۴: لایه کنترل تولید Production Control: این لایه امور تخصیص امکانات و تجهیزات برای تولید، مدیریت تعمیر و نگهداری، تغذیه مواد اولیه، کنترل کیفیت انبارداری را کنترل می کند.



۵: لایه کنترل موسسه Enterprise control: این لایه بیشتر تجاری است و شامل ارزیابی تقاضا برای محصول، بازاریابی، تامین منابع مالی را در بر می گیرد. در لایه های ۳ تا ۵، فناوری اطلاعات بطور گسترده استفاده می شود.

### B. افزایش بهره‌وری

صنعت به معنی فعالیتی است که تولید ارزش افزوده کند. اتوماسیون با بالابردن تیراژ تولید، افزایش کیفیت و کاهش هزینه تولید اندمان صنعت را افزایش می دهد.

۲: افزایش تعداد - Economy of scale: با اتوماسیون تیراژ تولید بالا رفته و در نهایت هزینه یک واحد-تولید کاهش می یابد که به معنی افزایش راندمان است.

۳: تنوع در تولید - Economy of scope: با اتوماسیون امکان ایجاد تنوع سریع در تولید محصول فرا می آید. در جایگاه افزایش تولید بازار ندارد به راندمان صنعت کمک می کند.

۴: افزایش سرعت: وسایل خودکار مانند ماشین (CNC) Computer Numerically Controlled که ابزار (مته و غیره) مورد نیاز ماشین کاری را خود کار تعویض می کند، سرعت انجام کار را بالا میبرد. به همین ترتیب رباتهای صنعتی، تسمه نقاله ها صرفه جویی در زمان ایجاد می کنند. دیگر نمونه ها عبارتند از:

- a. Automated Welding Robots for Cars
- b. Automated PCB Assembly Machines
- c. Distributed Control Systems for Petroleum Refineries

۴: صرفه‌جویی اقتصادی: سیستم اتومات با صرفه جویی در نیروی کار، استفاده با راندمان از انرژی و مواد راندمان تولید را بالا می برد.

۵: کیفیت تولید: با اتوماسیون کیفیت تولید و یکنواختی در تولید افزایش پیدا می کند.

### C. انعطاف پذیری سیستم اتومات

اتوماسیون دارای تنوع است تا به نیاز بطور اقتصادی پاسخ دهد.

۱- Fixed Automation: در تولید پیوسته استفاده می شود. در خط تولید پیوسته continuous flow مانند پالایشگاه، فولاد و کارخانجات شیمیایی، فرایند تقطیر، سیستم رنگزنی-تیراژ بالا و تنوع کم است.

۲- Programmable Automation: در خطوط تولید گسسته استفاده می شود. در تولید گسسته مانند خط تولید خودرو، وسایل برقی و مشابه آن- تیراژ بالا و تنوع محدود است. در این خطوط امکان اعمال تغییرات محدود در برنامه کار وجود دارد. مثال آن به خطوط نورد می توان اشاره کرد که امکان تنظیم ضخامت محصول وجود دارد.

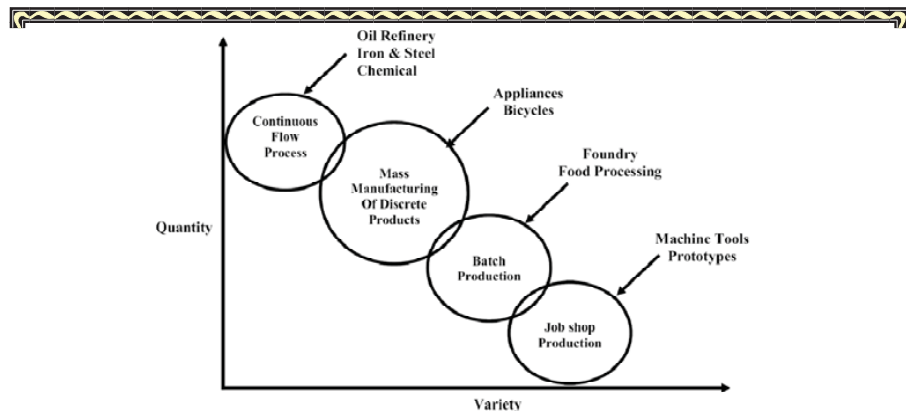


Fig. 1.6 Types of Production Systems

۳- Flexible Automation: در خطوط تولید Batch که در آن محصول می تواند گسسته یا پیوسته باشد استفاده می شود. به همین منظور برای هر تولید یک دستورالعمل recipe خاص باید تنظیم شود که کامپیوتر اتوماسیون آنرا پیاده می کند. در اینجا اپراتور نقش بالاسری دارد. حجم تولید این سیستمها کم تا متوسط است. برای مثال به ماشین CNC و Automated Guided Vehicles (AGV) می توان اشاره کرد.

۴- Integrated Automation: در خطوط تولید سفارشی استفاده می شود. در این خطوط محصولات گسسته در تیراژ محدود مطابق سفارش مشتری تولید می شود. مانند کارگاه تولید نمونه صنعتی. در این سیستمها تمام مراحل طراحی محصول، برنامه تولید و خط تولید تحت کنترل برنامه قابل انعطاف کامپیوتری است. در این سیستمها CNC، روباتها و تسمه نقاله های قابل برنامه ریزی وجود دارند. حتی برنامه فروش و بازاریابی نیز ممکن است در سیستم اتوماسیون جا داده شود.

### ۲-۱ سنسورها و محرکها

دستگاههای اندازه گیری: سنسورها و ابزار دقیق که در صنعت استفاده می شوند از نظر اندازه، دقت، قیمت و تکنولوژی های متفاوت هستند معذالک دارای اشتراک ساختار می باشند.

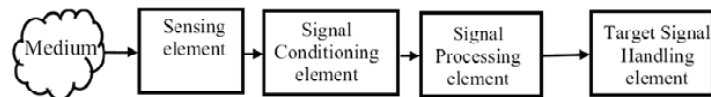


Fig. 2.1 Functional configuration of a typical sensor system

۱- The physical medium: به محیط کمیت فیزیکی شیمیایی اطلاق می گردد که قرار است اندازه گیری گردد. برای مثال کوره‌ای که قرار است درجه حرارت آن اندازه گیری شود.



## ۳-۱ سیستم کنترل

سیستم کنترل صنعتی به ۲ دسته پیوسته و گسسته تقسیم می شوند.

## A. سیستم کنترل پیوسته

کنترل پیوسته به نامهای کنترل اتوماتیک، کنترل فیدبکی، کنترل پیروسی نیز خوانده می شود. هدف از کنترل پیوسته که بلوک دیاگرام آن در شکل آمده است، این است که کنترل  $u_a$  به نحوی تولید شود که خروجی  $y(t)$  از ورودی  $r(t)$  تبعیت کند. علاوه بر ورودی، فرایند تحت تاثیر عوامل ناخواسته خارجی (اختلال) مانند تغییر بار و نویز اندازه گیری نیز است. علاوه بر این خروجی از تغییر پارامترهای سیستم و اشباع محرک نیز متاثر است. اینها مشکلاتی هستند که سیستم کنترل با آنها مواجه است.

در بعضی از سیستمهای کنترل سیگنال فرمان مقدار ثابتی است. مثال آن کنترل درجه حرارت و دبی است. در سیستمهای دیگر سیگنال فرمان ممکن است خود تابع زمان باشد و تغییر کند، مانند حرکت ابزار در سیستمهای ماشینکاری. به منظور تطبیق خروجی با فرمان، از کنترلر در حلقه کنترل استفاده می گردد. ساختار کنترلر این کاربردهای صنعتی معمولاً مشخص است، فقط پارامترهای آن باید به نحو مناسبی تنظیم شود.

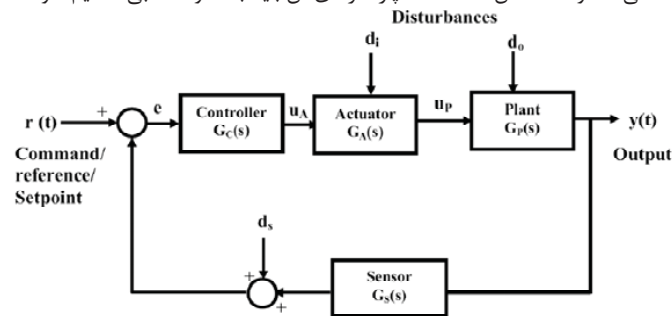


Fig. 2.3 Typical control loop

از قابلیت‌های دیگری که از سیستم کنترل خواسته می شود امکان ارتباط با سطوح کنترل بالا سری مانند supervisory control است. امکان قرار گرفتن سیستم کنترل در شبکه (Field bus)، امکان کار دستی manual در صورت نیاز از موارد دیگر می باشد. در حالیکه بیشتر کنترلرهای پیشرفته امروزی الکترونیکی هستند، کنترلرهای بادی همچنان استفاده می شوند. استفاده از این کنترلرها ساده، تعمیر و نگهداری آنها سهل و تقریباً خراب نشدنی هستند.

## B. سیستم کنترل ترتیبی/منطقی

در سیستمهای زیادی خروجی پیوسته نیست و فقط می تواند عضوی از یک مجموعه با تعداد عضو محدود باشد. مثال ساده آن سیستم با خروجی باینری (روشن-خاموش) است. در این سیستمها موتور خاموش یا روشن، تسمه نقاله ساکن یا در حال حرکت است. در اینگونه سیستمها خروجی محرکها نیز گسسته است. مثلاً در کنترل موتور محرک یا قطع است که موتور حرکت نمی کند و یا وصل است که موتور حرکت می کند. بطور مشابه سنسور این

۲- The sensing element: حسگری که خروجی آن تحت تاثیر کمیت مورد نظر تغییر می کند. مثال آن ترموکوپلی است که درجه حرارت کوره‌ای را اندازه گیری می کند. اندازه گیری ممکن است تماسی یا بدون تماس باشد. اندازه گیری بدون تماس درجه حرارت با پیرومتر صورت می گیرد.

۳- The signal-conditioning element: مدار الکترونیکی که سیگنال الکتریکی خروجی حسگر را از نظر نویز، خطی سازی و مقدار دامنه اصلاح می کند تا برای طبقه بعد قابل استفاده باشد. مثال آن می تواند پل وستون در اندازه گیری درجه حرارت با Resistance Temperature Detector (RTD) باشد. پل در اینجا تغییر مقاومت RTD در نتیجه گرما را به تغییر ولتاژ تبدیل می کند.

۴- The signal processing element: در این واحد عملیات پیشرفته پردازش روی سیگنال ممکن است انجام شود. نوع پردازش به نوع اطلاعات مورد نظر بستگی دارد. مانیتورینگ خطا در عملکرد نیز در این واحد قرار دارد.

۵- The target signal-handling element: در این واحد اطلاعات اندازه گیری شده ارائه می شوند. این واحد ممکن است نمایشگر، رکورد، ذخیره ساز و غیره باشد.

## محركهای صنعتی Actuators

محرکها سیگنال (عموماً) الکتریکی خروجی کنترلر را با ورودی فرایند تطبیق می دهند. در این تبدیل هم تغییر دیمانسینون، در صورت نیاز، و هم تقویت توان صورت می گیرد.

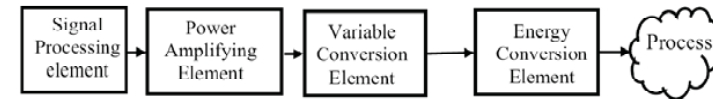


Fig. 2.2 Functional configuration of a typical actuator system

۱- The electronic signal-processing element: این واحد سیگنال را از کنترلر دریافت و در صورت نیاز نویز آنرا حذف می کند. معمولاً محرکها برای خود دارای سیستم کنترل حلقه بسته برای اعمال دقیق سیگنال کنترل هستند که کنترلر آن در این قسمت جای داده می شود.

۲- The electronic power amplification element: در این قسمت تقویت کننده توان الکتریکی وجود دارد.

۳- The variable conversion element: مبدل سیگنال الکتریکی به (در صورت نیاز) غیر الکتریکی مناسب برای اعمال به فرایند است. نمونه آن محرکهای هیدروالکتریکی برای کنترل شیرهای عبور مایع یا گاز است.

۴- The non-electrical power conversion elements: تقویت کننده سیگنال غیر الکتریکی که مثال آن می تواند تقویت کننده هیدرولیکی باشد.

۵- The non-electrical variable conversion elements: این کار ممکن است در چند طبقه صورت گیرد. مثال آن تبدیل حرکت مکانیکی به جریان مایع است که شیرها انجام می دهند.

## اجزا دیگر

به غیر از حسگرها و محرکها اجزا دیگری نیز در سیستم کنترل فرایند وجود دارند که عبارتند از سیستم روغنکاری، مخازن روغن و باد، امکانات کنترل از راه دور و مشابه آن.

سیستمها نیز گسسته عمل می کنند مثال آن Limit Switch / Pressure Switch/ Photo Switch هستند. برای مثال Photo Switch که یک حسگر بدون تماس است وجود یا عدم وجود قطعه یا وضعیتی را می تواند اعلام کند.

در سیستمهای کنترل گسسته امروزی از سیستم کامپیوتری به نام Programmable Logic Controller (PLC) استفاده می شود

#### ۴-۱ کنترل نظارتی supervisory

- ۱- تعیین سیگنال مرجع: تعیین نقطه کار برای متغیرهای مهم سیستم مانند سرعت حرکت تسمه نقاله، سطح مجاز ارتفاع در مخزن در این لایه انجام می شود. مقدار برای نقطه کار به عواملی نظیر حجم تولید و مشابه آن بستگی دارد.
- ۲- عیب یابی و مانیتورینگ عملکرد: در این لایه رفتار سیستم برای شناسایی به موقع fault و انجام اقدام مناسب برای جلوگیری از خسارت صورت می گیرد
- ۳- عملیات شروع، توقف و حالت اضطراری: در سیستمها راه اندازی و توقف کار طبق پروتکل مشخصی باید انجام شود. لایه کنترل نظارتی این پروتکلها را اجرا میکند.
- ۴- تنظیم و تغییر مشخصات سیستمهای کنترل: منظور از این فعالیتها، تغییر پارامترهای کنترل در نتیجه خواست اپراتور یا تغییر در نقطه کار و یا مواجهه با fault است. نوع دیگر تغییرات ممکن است به تغییر در تغذیه سیستم مثلا از گاز به مازوت و یا دیگر مواد احتراقی باشد.
- ۵- ارائه اطلاعات و گرفتن فرمان: این بخش از طریق مدارهای واسط نظیر صفحه کلید اطلاعات کار را از اپراتور دریافت می کند این امر وقتی دخالت اپراتور ضرورت داشته باشد را میسر می سازد.

#### ۵-۱ لایه کنترل تولید Production control

- process scheduling: برنامه ریزی تولید به منظور استفاده بهینه از منابع
- Maintenance Management: مدیریت تعمیر و نگهداری برای کنترل وقفه در تولید
- Inventory Management: مدیریت انبار: کنترل مقدار مواد خام ، محصولات تولیدی
- Quality management: مدیریت کیفیت

#### ۶-۱ لایه کنترل کارخانه Enterprise control

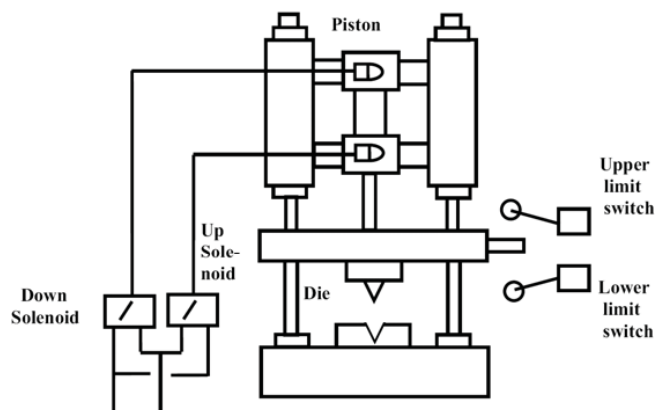
اتوماسیون در تمام مراحل تولید صنعتی نقش دارد

- ۱- در ارزیابی بازار و تحقیق ساخت محصول
- ۲- در ساخت نمونه تولیدی
- ۳- در تجهیز کارخانه و منابع تولید
- ۴- در تولید محصول و کنترل کیفیت
- ۵- در تبلیغات و بازار یابی

۶- در مدیریت کلی ۵ مرحله فوق از ارزیابی بازار گرفته تا بازاریابی

#### مثال صنعتی

شکل یک دستگاه مهر زن روی فلز را نمایش می دهد.



The control computer for the process has 3 inputs (2 from the limit sensors and 1 from the master switch) and controls 2 outputs (1 to each actuator solenoid).

در این دستگاه پیستون بالا می رود و قطعه زیر آن در محل مربوطه قرار می گیرد. سپس پیستون پایین می آید و علامتی که در انتهای پیستون قرار دارد را روی قطعه با فشار ثبت می کند. پیستون بالا برده می شود تا قطعه بر داشته شده و قطعه دیگر برای مهر شدن در محل قرار گیرد. بالا و پایین رفتن پیستون با ۲ شیر الکتریکی انجام می گیرد که مسیر برای روغن تحت فشار را باز یا بسته می کنند. این سیستم هیدرولیکی است که فشار روغن توسط پمپ تامین می شود. ۲ سنسور بالا یا پایین بودن پیستون را حس مس کنند.

#### سوالات

- ۱- دلیل برتری سیستم اتومات و خودکار در صنعت چیست؟
- ۲- مثالی از سیستم اتومات زده و بخش سیستم کنترلی آنرا مشخص کنید.
- ۳- تفاوت اتوماسیون و کنترل چیست؟
- رباتی که کار رنگ زدن خودروها را در خط تولید کارخانه انجام می دهد. سیستمی کنترلی آن مربوط به بخشی است که موقعیت سر رنگ باش ربات را کنترل و آنرا به نقاط مختلف جهت رنگ پاشی هدایت می کند.
- ۴- اجزا سیستم IT صنعتی را بنویسید.
- الف) کنترل و پردازش سیگنال ب) شبکه ارتباطاتی ج) محاسبات بلا درنگ د) بانک اطلاعاتی ه) طراحی، تحلیل، شبیه سازی و بهینه سازی
- ۵- مثال از سیستمی بنزید که در آن IT (استفاده از اینترنت) تعبیه شده است.

سیستمهای Distributed Control Systems (DCS) که در پالایشگاهها و کارخانجات فولاد سازی استفاده می

شوند تمام اجزا IT صنعتی را در بر دارند.

۶- مثال از سیستم mission-critical بنویسید.

سیستم تولید برق هسته‌ای

۷- صنعتی را مثال بنویسید که در آن economy of scope اهمیت دارد.

صنعتی که محصولات را طبق سفارش تولید می کنند.

۸- صنعتی را مثال بنویسید که در آن economy of scale با اهمیت تر است.

کارخانه تولید ورقهای آهنی

۹- چه نوع اتوماسیونی برای ساخت مصنوعات زیر پیشنهاد می کنید.

a. Light bulbs      d. Cement      e. Printing      f. Pharmaceuticals      g. Toys

ans:

a. Light bulbs: Fixed      d. Cement: Programmable      e. Printing: Flexible

f. Pharmaceuticals: Flexible      g. Toys: Flexible

۱۰- بلوک دیاگرام سیستم سنسور و محرک را رسم کنید.

۱۱- ۳ تا از عملیات اصلی کنترل نظارتی را بنویسید.

Ans: A. Set point generation,      B. Process Monitoring      C. Operator Interface

۱۲- ۳ تا از عملیات اصلی لایه کنترل تولید را بنویسید.

Ans: 1. Process Scheduling      2. Maintenance Management,      3. Inventory

(فهرست اموال و مواد انبار) Management

۱۳- \*لایه های هرم اتوماسیون را بنویسید.

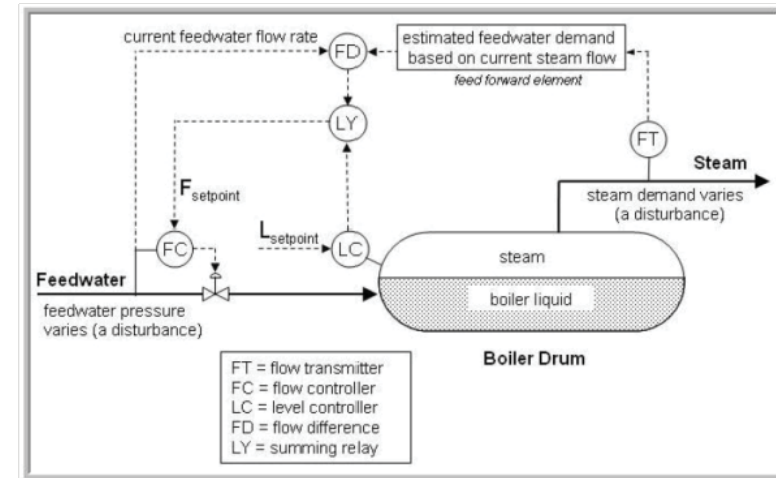
۱۴- \*برای یک ماشین فروش نوشابه، سیستمی تعبیه کنید که وقتی حرکت مشتری را حس کرد از حالت stand

by خارج شود. برای این سیستم سنسور و محرک مناسب را در نظر بگیرید.

## مدلسازی ریاضی فرایندهای صنعتی

### ۱-۲ مقدمه

فرایندهای بزرگ صنعتی: فرایندهای بزرگ صنعتی عبارتند از نیروگاه، پالایشگاه، کارخانجات تولید خودرو، کارخانه سیمان و دهها نمونه مشابه آن است. این فرایندهای بزرگ شامل مجموعه ای از فرایندها هستند. یکی از فرایندها، کنترل دیگ بخار است که در شکل نشان داده شده است



کنترل این فرایند شامل (۱) کنترل دبی آب ورودی و (۲) ارتفاع آب در دیگ بخار است. مثالهای دیگر کنترل صنعتی نیز اینگونه هستند و بنا بر نیاز دارای حلقه های کنترل مانند کنترل فشار مخزن، کنترل سرعت، کنترل موقعیت، انواع کنترل درجه حرارت، سیستم نورد و کنترل ضخامت، تبادل حرارت، احتراق و مشابه آنها هستند.

طراحی حلقه های کنترل بر اساس مدل ریاضی فرایند انجام می شود بنا براین اولین گام مدلسازی فرایندهای جزئی و به تبع آن کلی است.

### A. مشخصات مدل یک فرایند

در رابطه با بررسی عملکرد یک فرایند به موارد زیر می توان اشاره کرد.

۱. مدل ریاضی فرایند که طبیعتاً غیر خطی است و می تواند شامل تاخیر نیز باشد.
۲. تاثیر اختلال بر فرایند
۳. چگونگی تبعیت فرایند از دستور در حالت ماندگار.
۴. مقاوم بودن رفتار فرایند در مقابل تغییرات پارامتر فرایند.

فرایند تحت تاثیر محیط است و بر آن اثر نیز می گذارد. به آن دسته از عوامل محیطی که برای کنترل فرایند استفاده می شوند "ورودی" گفته می شود، بقیه اختلال یا disturbances هستند. از بین توابعی که اثر سیستم بر محیط را نشان می دهند، خروجی تابعی است که برای مقایسه با سیگنال مرجع در نظر گرفته می شود. شکل ۱ بلوک دیاگرام یک سیستم کنترل را نشان می دهد.

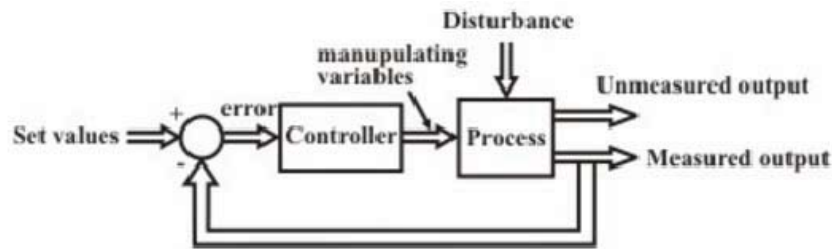


Fig. 1 General Description of a Closed loop process

### B. مدلسازی سیستمها

در استخراج مدل اجزا سیستم از قواعد زیر استفاده می گردد.

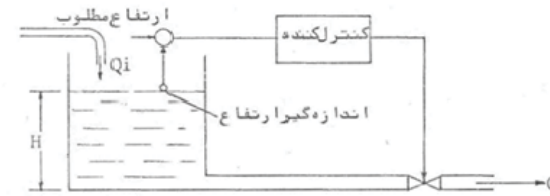
۱. بقا جرم  $\text{rate of mass [accumulation = in-out]}$
  ۲. بقا یک ماده  $\text{rate of component I [accumulation = in-out + produced]}$
  ۳. بقا انرژی  $\text{rate of [energy accum. = energy in - energy out + heat added + work applied on]}$
- روابط برای محاسبه اجزا قوانین بقا تعدادی محدود به تعداد شاخه های علم مانند مکانیک سیالات، ترمو دینامیک و غیره است. این موضوع را با مثالی از مکانیک سیالات آغاز می کنیم.

### ۲-۲ کنترل ارتفاع مخزن مایعات *Level control*

رتفاع مایع در مخزن را با شیر الکتریکی یا پمپ می توان تنظیم کرد.

## A کنترل ارتفاع توسط شیر خروجی

برای کنترل ارتفاع می توان شیر کنترل را در مسیر خروجی یا ورودی قرار داد. شکل این سیستم را نشان می دهد. اجزا سیستم عبارتند از مخزن، شیر، کنترلر و اندازه گیر ارتفاع.



شکل ۵- کنترل ارتفاع توسط شیر کنترل در مسیر خروجی

الف) مقایسه کننده: این واحد الکتریکی تفاوت مقدار مرجع ارتفاع و ارتفاع اندازه گیری شده را تعیین می کند.

$$e = h_i - h_m$$

ب) روشهای زیادی برای اندازه گیری ارتفاع وجود دارد. در نتیجه اندازه گیری کمیت الکتریکی  $h_m$  متناسب با ارتفاع مایع در مخزن تولید می شود. بهره آن می تواند  $k_m v/m$  باشد.

$$v = k \cdot e$$

ج) کنترلر می تواند متناسب، با بهره  $k$  باشد.  
د) مخزن المان دینامیکی طرح است. اگر مایعی با دبی  $Q_i$  به آن وارد و با دبی  $Q_o$  از آن خارج می شود. طبق قانون بقا جرم مدل کلی بدست می آید

$$Q_i - Q_o = \dot{V}$$

که در آن  $V$  حجم مایع داخل مخزن است. از خطی سازی این رابطه بدست می آید

$$A \dot{h} = q_i - q_o \quad A = \left. \frac{dV}{dh} \right|_*$$

که در آن  $A$  سطح مقطع مخزن در نقطه کار و  $h$  تغییرات ارتفاع مایع در مخزن است.  $A$  بر اساس اطلاعات داده شده ابعاد مخزن قابل محاسبه است.

ه) شیر: یکی دیگر از اجزا سیستم کنترل مایعات است. دبی خروجی شیر تابع غیر خطی از مقاومت شیر  $R$  (متناسب با عکس روزه شیر) روزه شیر و تفاوت ارتفاع مایع دو سر آن است.

$$Q_o = f(H, R)$$

مقدار  $R$  تابعی از موقعیت ساقه شیر  $x$  است. به این ترتیب از خطی سازی بدست می آید.

$$q_o = \gamma \cdot h + \beta \alpha \cdot x$$

$$\gamma = \left( \frac{\partial Q}{\partial H} \right)_0 \quad \beta \alpha = \left( \frac{\partial Q}{\partial R} \right)_0 \left( \frac{\partial R}{\partial X} \right)_0$$

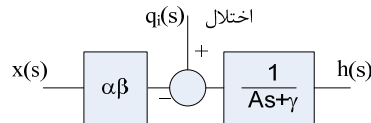
مدل مشترک مخزن و شیر برابر است با:

$$A \dot{h} = q_i - q_o = q_i - \gamma h - \beta \alpha x$$

با تبدیل لاپلاس از این رابطه می توان نوشت

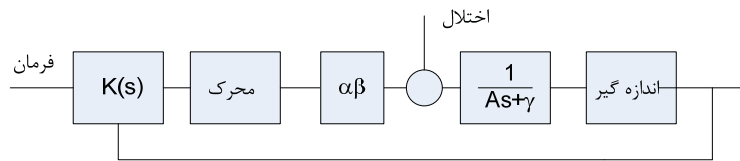
$$A s h(s) = q_i(s) - \gamma h(s) - \beta \alpha x(s) \Rightarrow h(s) = \frac{1}{A s + \gamma} [q_i(s) - \beta \alpha x(s)]$$

بلوک دیاگرام فرایند برابر است با



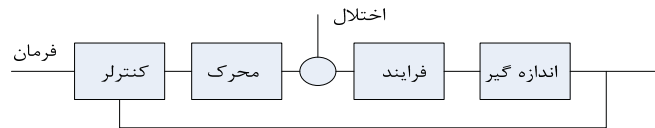
شکل ۷: بلوک دیاگرام حلقه باز مخزن با شیر کنترل

این روابط مربوط به حلقه باز است. برای کنترل خودکار باید اندازه گیری ارتفاع مایع و کنترلر به آن اضافه شود. به این ترتیب نمودار حلقه بسته کنترل ارتفاع مایع مطابق شکل می گردد.



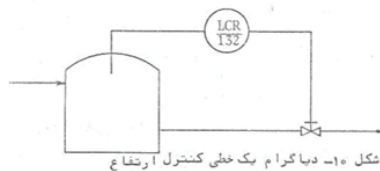
شکل ۸- مدار بسته مخزن با شیر کنترل

دبی ورودی  $q_i$  بدلیل نبودن کنترل روی آن حکم اغتشاش پیدا می کند. هدف سیستم کنترل این می تواند باشد که علیرغم اغتشاش  $q_i$  ارتفاع تثبیت شود. در عمل ثابت زمانی محرک و اندازه گیر نسبت به ثابت زمانی فرایند بسیار کوچکتر هستند. لذا دینامیک سیستم درجه ۱ می گردد.



شکل ۹- مدار بسته سیستم کنترل

این نحو نمایش سیستم کنترل در سیستمهای بزرگ مفصل و غیر ضرور است لذا از نمایش شکل زیر استفاده می شود. در این نمایش LCR مخفف Level controller Recorder است و شماره ۱۳۲ شماره شناسایی حلقه کنترل است

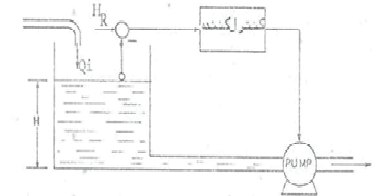


شکل ۱۰- دیاگرام یک خطی کنترل ارتفاع

همچنانکه L برای ارتفاع استفاده شد، واژه های خاص برای دیگر کمیها استاندارد شده که در پایان این فصل معرفی می گردند.

### B. کنترل ارتفاع توسط پمپ

تنها فرق بین مدل این سیستم و سیستم قبلی جایگزینی شیر با پمپ است. در فرایندهای مایع، پمپ گریز از مرکز بیشتر از انواع دیگر پمپ استفاده می شود.



شکل ۱۲- سیستم کنترل ارتفاع مایع در مخزن توسط پمپ

الف) مدل پمپ: رابطه بین دبی پمپ با اختلاف فشار دو طرف و سرعت گردش پمپ N از این قرار است.

$$Q = Q(P, N)$$

این رابطه غیر خطی است که خطی می شود.

$$q_o = \Delta Q = \beta \cdot p + \gamma \cdot n \quad \left(\frac{\partial Q}{\partial P}\right)_0 = \beta \quad \left(\frac{\partial Q}{\partial N}\right)_0 = \gamma$$

اگر اختلاف فشار متناسب با ارتفاع مایع باشد  $P = \alpha h$  می توان نوشت  $q_o = \beta \alpha h + \gamma n$

ب) معادله دینامیکی مخزن عبارت است از:

$$A \frac{dH}{dt} = Q_i - Q$$

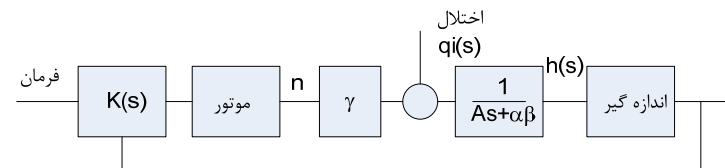
مدل مشترک پمپ و مخزن حالا برابر است با:

$$A \frac{dh}{dt} = q_i - \alpha \beta h - \gamma n$$

بعد از گرفتن تبدیل لاپلاس خواهیم داشت

$$(As + \alpha \beta)h(s) = qi(s) \gamma n(s)$$

که در آن سیگنال کنترل کننده n سرعت گردش پمپ و  $q_i$  اختلال است. شکل بلوک دیاگرام سیستم را نشان می دهد.



شکل ۱۳- سیستم کنترل ارتفاع مخزن با پمپ

### C. پارامترهای مدل اجزا

برای تعیین پارامترهای مدل خطی شده شیر یعنی  $\alpha$ ،  $\gamma$  و  $\beta$  یا پمپ از دو روش ریاضی یا گرافیکی ممکن است استفاده شود. نمودارهای گرافیکی را کارخانه های سازنده ارائه می دهند.

#### روش ریاضی تعیین پارامترهای شیر

**جریان تراکم ناپذیر Incompressible:** در بسیاری از مایعات و گازها در **Mach number** پایین، علیرغم تغییر فشار چگالی سیال تغییر نمی کند. به این سیالات تراکم ناپذیر می گویند. جریان این سیالات در امتداد مسیر حرکت، طبق قانون برنولی اینگونه نوشته می شود.

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{constant}$$

در این رابطه، v سرعت سیال، g شتاب ثقل، h ارتفاع نسبت به سطح مرجع، p فشار سیال و  $\rho$  چگالی آن است. دبی خروجی از روزنه v2 شیر را طبق قانون برنولی اینگونه می نویسیم

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho gh_2$$

که در آن  $P_1, v_1, h_1$  به ترتیب ارتفاع، سرعت مایع و فشار در طرف ورودی روزنه و  $P_2, v_2, h_2$  ارتفاع، سرعت و فشار در طرف خروجی روزنه است.  $\gamma$  وزن مخصوص مایع و g شتاب ثقل است. اگر دوطرف روزنه اختلاف ارتفاع نباشد ( $Z_1 = Z_2$ ) و مایع تراکم ناپذیر باشد ( $v_1 A_1 = v_2 A_2$ ) می توان نوشت.

$$Q_0 = v_2 A_2 = \frac{C_d A_2 A_1}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\gamma}}$$

در این رابطه  $A_1$ ،  $A_2$  سطح مقطع دوطرف روزنه و  $C_d$  (که کمتر از یک است) - Discharge Factor - است. این ضریب تصحیح برای حالت واقعی است (برای جبران اصطکاک که در رابطه منظور نشده است). اگر مخزن باز باشد  $P_1 = \rho g H$  است و در صورتیکه خروجی آتمسفر باشد،  $p_2 = 0$  منظور می شود. در نتیجه دبی خروجی تابعی از موقعیت ساقه شیر -x- و ارتفاع H می شود.

$$Q(t) = \frac{1}{R(x)} \sqrt{2gH(t)}$$

برای محاسبه پارامترهای شیر از روابط زیر استفاده می شود.

$$q_o = \gamma \cdot h + \beta \alpha \cdot x$$

$$\gamma = \left(\frac{\partial Q}{\partial H}\right)_0 = \frac{1}{R(X_0)} \frac{\sqrt{2g}}{2\sqrt{H_0}} \quad \beta \alpha = \left(\frac{\partial Q}{\partial R}\right)_0 = -\frac{\sqrt{2gH_0}}{R^2(X_0)} \quad \beta \alpha = \left(\frac{\partial Q}{\partial R}\right)_0 \left(\frac{\partial R}{\partial X}\right)_0$$

$R(x)$  مقاومت شیر دارای واحد  $m^{-2}$  است و مقدار آن به موقعیت ساقه شیربستگی دارد.

در شیرهای الکتریکی که محرک ولتاژ است مدل ریاضی شیر اینگونه تعیین می شود.

$$Q_0 = Q_0(v, P_1, P_2)$$

که در آن v ولتاژ اعمالی به شیر است. از خطی سازی این رابطه حول نقطه کار بدست می آید.

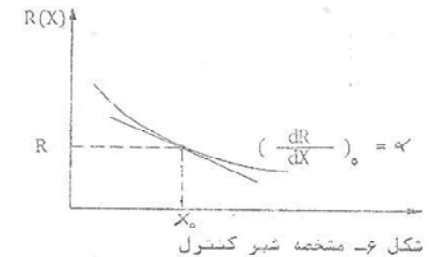
$$q_0 = \frac{\partial Q_0}{\partial R} \Big|_0 \frac{\partial R}{\partial x} \Big|_0 v + \frac{\partial Q_0}{\partial P_1} \Big|_0 P_1 + \frac{\partial Q_0}{\partial P_2} \Big|_0 P_2$$

$$q_0 = \alpha_R \alpha_x \alpha_v v + \alpha_{P_1} P_1 + \alpha_{P_2} P_2$$

تجزیه پارامتر شیر به ۳ پارامتر به این دلیل است که ۳ فرایند الکتریکی (اعمال ولتاژ به سیم پیچ شیر) مکانیکی (حرکت ساقه شیر) و هیدرولیکی (اثر تغییر سطح مقطع شیر بر دبی) سری قرار گرفته اند که هر یک مدل خاص خود را دارند.

### روش گرافیکی تعیین پارامتر

بعضی از پارامترها را کارخانه های سازنده بصورت نمودار ارائه می دهند. مثلا رابطه R با x معمولا غیر خطی که با نمودار ارائه می شود. بر این اساس پارامتر  $\alpha$  از شیب نمودار در نقطه کار بدست می آید.

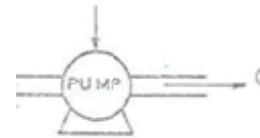


شکل ۶- مشخصه شیر کنترل

### فرمول ریاضی دبی پمپ

بر اساس رابطه برنولی فرمول ریاضی پمپ را اینگونه می توان نوشت:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 + \alpha W(n) = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$



که در آن W کاری است که پمپ انجام می دهد و تابع دور آن n است.

دبی خروجی پمپ،  $Q = v_2 A_2$  است که مدل خطی شده آن برای پمپ الکتریکی اینگونه نوشته می شود.

$$Q_0 = Q_0(v, P_1, P_2, H_1, H_2)$$

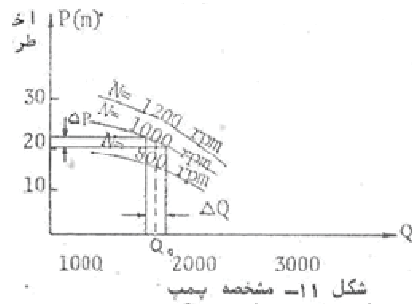
که با خطی سازی رابطه بدست می آید.

$$q_0 = \frac{\partial Q_0}{\partial n} \Big|_0 \frac{\partial n}{\partial v} \Big|_0 v + \frac{\partial Q_0}{\partial P_1} \Big|_0 P_1 + \frac{\partial Q_0}{\partial P_2} \Big|_0 P_2 + \frac{\partial Q_0}{\partial (H_1 - H_2)} \Big|_0 (h_1 - h_2)$$

$$q_0 = \alpha_n \alpha_v v + \alpha_{P_1} P_1 + \alpha_{P_2} P_2 + \alpha_{\Delta H} \delta (h_1 - h_2)$$

### نمودار پارامترهای پمپ

کارخانه سازنده نمودارهای پارامترهای پمپ را عرضه می کند. بر اساس نمودار اینگونه می توان پارامترها را بدست آورد.



شکل ۱۱- مشخصه پمپ

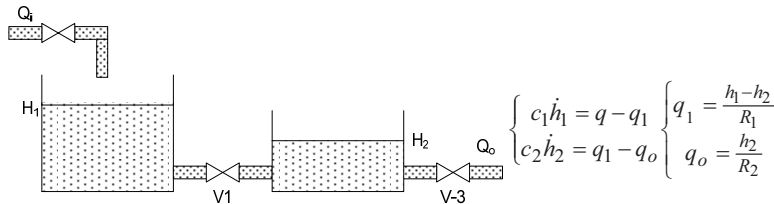
برای بدست آوردن  $\beta$ ، روی منحنی مربوط به سرعت کار پمپ، نسبت تغییر دبی خروجی به تغییر فشار از شیب خط مماس به منحنی سرعت در نقطه کار بدست می آید. برای تعیین  $\gamma$  نسبت تغییرات دبی به تغییرات سرعت پمپ در فشار ثابت (خط افقی که از فشار در نقطه کار می گذرد) از منحنی استخراج می شود. **دینامیک سیالات تراکم پذیر:** رابطه برای سیالات تراکم پذیر اینگونه نوشته می شود.

$$\frac{v^2}{2} + \int_{P_1}^P \frac{d\bar{p}}{\rho(\bar{p})} + \Psi = \text{constant}$$

(constant along a streamline)

در این رابطه p فشار،  $\rho$  چگالی، v سرعت و  $\Psi$  نماینده نیروی پتانسیل که معمولا نیروی جاذبه است می باشد.

**مثال سیستم مایع چند مخزنه:** اگر ۲ مخزن در سیستم موجود باشند، معادله دینامیکی درجه ۲ است. روابط خطی شده این سیستم عبارتند از:



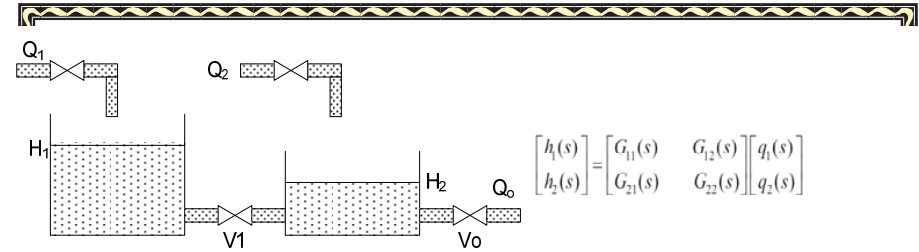
به این ترتیب تابع تبدیل بین  $h_2$  و  $q$  اینگونه نتیجه خواهد شد.

$$\frac{h_2}{q} = \frac{R_2}{R_1 R_2 c_1 c_2 s^2 + (R_2 c_2 + R_1 c_1 + R_2 c_1) s + 1}$$

ثابت های این سیستم با توجه به مشخصات دو مخزن و شیرها تعیین می گردد.

**مثال سیستم چند ورودی چند خروجی Multiple Input Multiple Output:** این سیستم را می توان چند ورودی چند خروجی تلقی کرد. شکل این موضوع را نشان می دهد. حالا تاثیر محیط از ۲ مسیر  $Q_1$  و  $Q_2$  صورت می گیرد. خروجی نیز می توانند دو تابع  $h_1$  و  $h_2$  باشند. در این شرایط تابع تبدیل سیستم بصورت ماتریسی نوشته می شود.





شکل ۷: سیستم تانک با دو ورودی

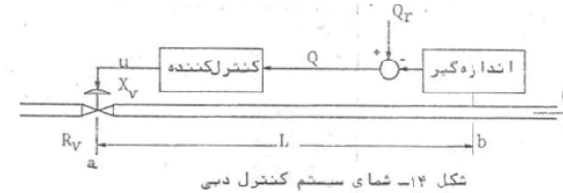
اگر تعداد ورودیها بیش از تعداد خروجیها باشد سیستم *overactuated system* است و اگر تعداد خروجیها بیش از تعداد ورودیها باشد *underactuated system* و اگر برابر باشند *square* است.

۱-۲-۲ کنترل دبی Flow control

کنترل دبی فقط دارای یک المان است که می تواند پمپ یا شیر باشد. اختلال در دبی در اثر تغییر ارتفاع مایع در مخازن سر باز و تغییر فشار در مخازن سر بسته است. در صورت وجود پمپ در مسیر مایع، تغییر سرعت پمپ نیز دبی را تغییر می دهد. تثبیت دبی به ۲ روش استفاده از شیر یا استفاده از پمپ صورت می گیرد.

A کنترل دبی توسط شیر

شمای این سیستم مطابق شکل است



شکل ۱۴- شمای ستم کنترل دبی

اجزا سیستم عبارتند از:

الف) شیر: در اثر تغییر وضعیت ساقه شیر، مقاومت در مقابل عبور مایع R تغییر می کند. قانون برنولی دبی عبوری را در حالت کلی اینگونه بیان می کند:

$$Q = \frac{1}{R_v(X)_v} \sqrt{2g \Delta H - \frac{2P}{\rho}}$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی،  $\Delta H = H_a - H_b$  اختلاف ارتفاع و  $\Delta P = P_a - P_b$  اختلاف فشار (منهای اثر ارتفاع) در دو سر شیر است. با خطی کردن رابطه خواهیم داشت

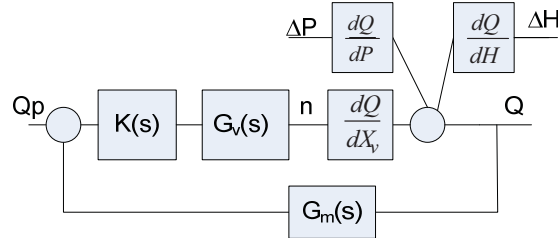
$$\Delta Q = \left(\frac{\partial Q}{\partial H}\right) \Delta H + \left(\frac{\partial Q}{\partial P}\right) \Delta P + \left(\frac{\partial Q}{\partial X}\right) \Delta X$$

اگر ساقه شیر توسط ولتاژ تنظیم شود،  $G_v(s)$  تابع تبدیل آن می تواند باشد.

ب) کنترلر: کنترلر می تواند تابع تبدیل  $K(s)$  باشد.

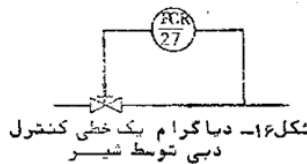
چ) اندازه گیر:  $G_m(s)$  تابع تبدیل اندازه گیر است که دیمانسیون آن  $v/Kg/s$  است. اگر بهر دلیلی موقعیت آن از محل شیر فاصله داشته باشد، مدل آن دارای تاخیر است. اگر فاصله  $d$  و سرعت مایع  $v$  باشد، تاخیر  $L=d/v$  در تابع تبدیل بوجود می آید.

بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته در شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۵- سیستم کنترل دبی با شیر

تغییر فشار و تغییر ارتفاع بصورت اختلال در این فرایند عمل می کنند. برای سهولت این سیستم کنترل را با دیاگرام یک خطی زیر نشان می دهند.



شکل ۱۶- دیاگرام یک خطی کنترل دبی توسط شیر

B کنترل دبی توسط پمپ

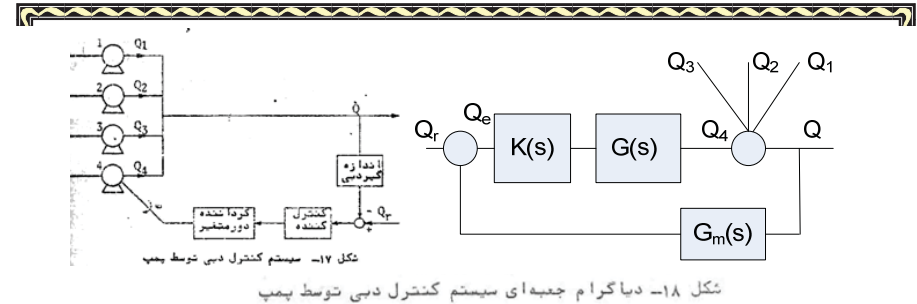
در مواردیکه در یک خط لوله و یا پروسس، دبی مایع و جریان آن بوسیله پمپ تامین می شود برای کنترل دبی می توان سرعت گردش پمپ و در نتیجه دبی مایع پمپ شده را تغییر داد. برای این منظور از پمپهای سرعت متغیر باید استفاده کرد که گران هستند. برای اقتصادی کردن طرح از چند پمپ با دور ثابت که قیمت مناسب دارند برای تامین حداقل دبی استفاده می گردد و پمپ سرعت متغیر با ظرفیت کم برای تنظیم دبی استفاده می شود. شکل نمونه ای از این سیستم را نشان می دهد.

در شکل، ۳ پمپ با سرعت ثابت دبی های  $Q_1, Q_2, Q_3$  را تامین می کنند. پمپ چهارم در سرعتهای مختلف کار می کند و دبی متغیر  $Q$  را می سازد. هدف در این طرح ثابت نگه داشتن دبی مجموع  $Q$  است. اگر پمپ نشت نداشته باشد و از نوع جابجایی مثبت باشد، دبی آن

$$Q_4 = K\omega$$

است. اختلال در این سیستم تغییر دبی پمپهای ۱، ۲ و ۳ یا تغییر در دبی مصرفی است.





شکل ۱۸- دیاگرام جعبه‌ای سیستم کنترل دبی توسط پمپ

۳-۲ کنترل فشار Pressure control

۱-۳-۲ اجزا سیستم

یکی از عواملی که در مخازن باید کنترل شود، فشار است. اجزا یک سیستم کنترل فشار شامل مخزن و شیر است.

الف) مدل مخزن تحت فشار

در رابطه با مخازن رابطه زیر صادق است

Equation of state  $PV = nRT$

که در آن P فشار، V حجم مخزن، T درجه حرارت به کلوین، R ثابت بولتزمان و n تعداد mole ماده در مخزن است. وقتی درجه حرارت و حجم ثابت باشد، از تقسیم دو طرف رابطه به  $\Delta T$  بدست می آید

$$Q_1 - Q_2 = C\dot{P}_1$$



شکل ۲۱: کنترل فشار مخزن با شیر خروجی

در این رابطه  $Q_1$  و  $Q_2$  مقدار مول ورودی و خروجی به مخزن است که تغییر فشار را بدنبال دارد. مدل مخزن به ازای تغییرات کمیتها از این قرار است.

$$q_1 - q_2 = C\dot{p}_1$$

ب) مدل شیر: دبی خروجی شیر،  $Q_2$  تابعی از فشار ورودی، فشار خروجی و وضعیت ساقه شیر است.

$$Q_2 = f(P_1, P_2, X)$$

دبی خروجی را قانون برنولی اینگونه بیان می کند.

$$Q_2 = \frac{K}{R(X)} \sqrt{P_1 - P_2}$$

از خطی سازی رابطه برنولی بدست می آید

$$q_2 = \Delta Q_2 = \left(\frac{\partial Q_2}{\partial P_1}\right)_0 P_1 + \left(\frac{\partial Q_2}{\partial P_2}\right)_0 P_2 + \left(\frac{\partial Q_2}{\partial R}\right)_0 \left(\frac{\partial R}{\partial X}\right)_0 x \quad (34)$$

$$q_2 = \Delta Q_2 = \alpha p_1 - \alpha p_2 + \beta \gamma \cdot x$$

$\beta$  از رابطه برنولی تعیین می شود.

$$\left(\frac{\partial Q_2}{\partial R}\right)_0 = \frac{K}{R^2(X)} \sqrt{(P_1) - (P_2)} = \frac{K}{R^2(X)_0} \sqrt{(P_1)_0 - (P_2)_0} = \beta$$

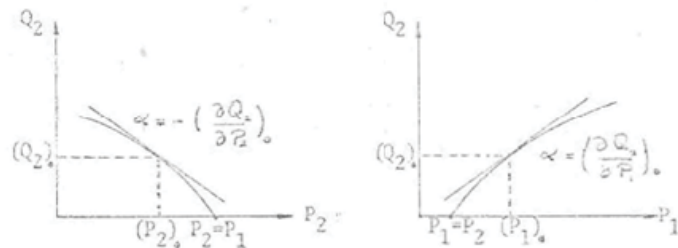
$\gamma$  را سازنده شیر ارائه می دهد.

$$\Delta R = \left(-\frac{dR}{dX}\right)_0 \Delta X = \gamma \Delta X = \gamma x \quad (37)$$

$\alpha$  را می توان از رابطه برنولی

$$\alpha = \frac{\partial Q_2}{\partial P_1} = \frac{k}{2R(x)\sqrt{P_1 - P_2}} = -\frac{\partial Q_2}{\partial P_2}$$

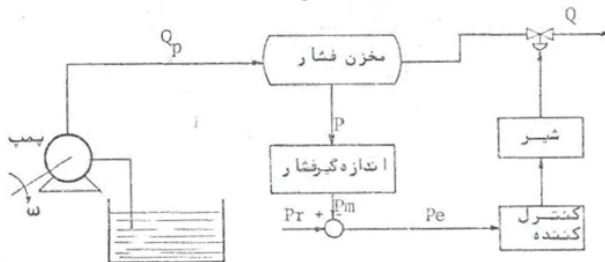
یا منحنی رفتار شیر در شکل زیر بدست آورد.



شکل ۲۲- منحنی دبی بر حسب فشار ورودی و خروجی

۲-۳-۲ کنترل فشار با شیر سر راه

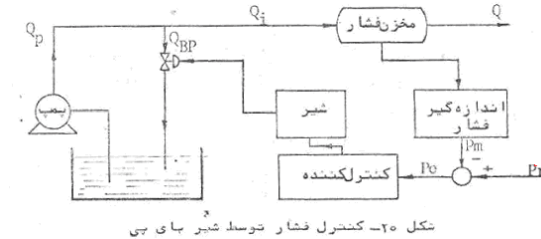
در سیستم کنترل انتظار می رود که فشار علیرغم تغییر دبی، درجه حرارت و غیره ثابت بماند.



شکل ۱۹- کنترل فشار توسط شیر سر راه

فشار را می توان بوسیله شیر سر راه یا شیر بای پس تثبیت کرد. اگر تغییر دبی خروجی مجاز باشد، از شیر سر راه برای کنترل فشار استفاده می شود. در این موارد، پمپ سرعت متغیر، برای تغییر دبی خروجی مورد استفاده قرار می گیرد.

در مواردیکه از شیر بای پس استفاده می شود، کنترلی روی دبی خروجی مخزن وجود ندارد و مقدار دبی را مصرف تعیین می کند. در این شرایط از پمپی با دور ثابت می توان استفاده کرد که با تعبیه شیر بای پس، اضافه دبی به مخزن اصلی برگشت داده می شود.



شکل ۲۰- کنترل فشار توسط شیر بای پس

#### A. کنترل فشار مخزن توسط شیر سر راه

معادله خطی شده مخزن برابر است با

$$q_1 - q_2 = C\dot{p}_1$$

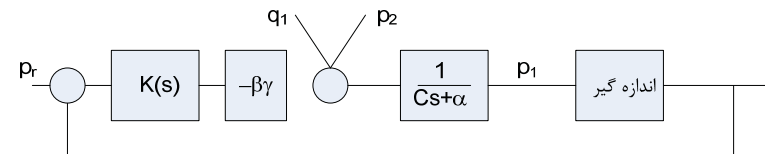
با در نظر گرفتن رابطه شیر بدست می آید.

$$q_1(s) - [\alpha p_1(s) + \alpha p_2(s) - \beta \gamma x(s)] = C\dot{p}_1$$

بدین ترتیب تابع تبدیل فرایند بدست می آید.

$$(Cs + \alpha)P_1(s) = q_1(s) + \alpha P_2(s) - \beta \gamma x(s)$$

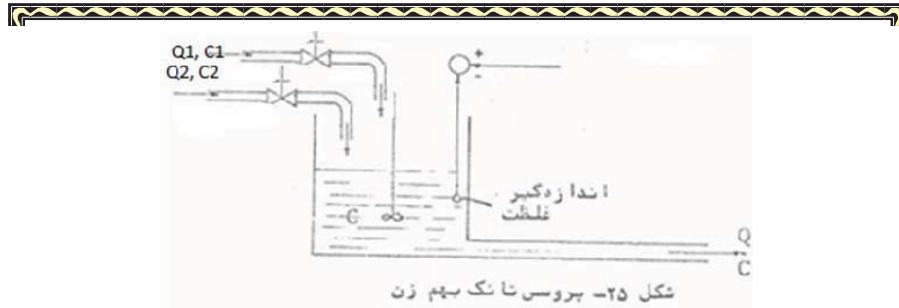
با لحاظ کردن اندازه گیر و کنترلر، بلوک دیاگرام حلقه بسته مطابقت شکل می شود.



شکل ۲۳: بلوک دیاگرام سیستم کنترل فشار با شیر سر راه

#### ۴-۲ کنترل غلظت Concentration control

غلظت مایع یکی دیگر از فرایندهایی است که مورد کنترل قرار می گیرد. اجزای این فرایند شامل مخزن، و ۲ یا بیشتر منبع ماده است.



الف) مخزن: مخزن حاوی مایعی با غلظت C است. در مخزن بهم زنی وجود دارد که کار مخلوط کردن را انجام می دهد. در این فرایند فرض می شود که هیچ واکنش شیمیایی صورت نمی میگیرد. بعلاوه فرض می شود که:

۱- غلظت داخل مخزن یکنواخت و غلظت مایع خروجی برابر غلظت مایع مخزن است.

۲- مقدار حجم محلول داخل مخزن ثابت است. این کار توسط کنترل ارتفاع مایع و خارج کردن مایع به روش سر ریز صورت می گیرد. به این ترتیب مدل مخزن برابر است با

$$\frac{\partial(MC)}{\partial t} = Q_1 C_1 + Q_2 C_2 - Q_o C \Rightarrow$$

$$\frac{\partial(Mc + Cm)}{\partial t} = Q_1 c_1 + C_1 q_1 + Q_2 c_2 + C_2 q_2 - Q_o c - C q_o \Rightarrow \quad \overset{M=const.}{Q} = Q_1 + Q_2$$

$$\frac{M}{Q_o} \dot{c} + c = \frac{Q_1 c_1 + C_1 q_1 + Q_2 c_2 + C_2 q_2 - C q_o}{Q_o}$$

کنترل غلظت با دبی ورودی: با فرض ثابت بودن غلظتها، کنترل غلظت خروجی توسط کنترل دبی مایع ورودی انجام می شود. در این حالت مدل برابر است با:

$$\frac{M}{Q_o} \dot{c} + c = \frac{C_1 q_1 + C_2 q_2 - C q_o}{Q_o}$$

که نتیجه می شود ثابت زمانی فرایند  $\tau = M/Q$  است.

تغییر غلظت ناشی از فعالیت شیمیایی: اگر در نتیجه واکنش شیمیایی ماده با نرخ r (Kg/hr) کاهش یابد (Arrhenius equation).

$$rM = kMC = k_0 e^{-E_a/RT} MC$$

که  $k_0$  ثابت رابطه،  $E_a$  حداقل انرژی برای انجام واکنش، T درجه حرارت به کلوین و R ثابت بولتزمن  $8.3144 \times 10^{-3}$  kJ mol<sup>-1</sup> یا ثابت گازی است. معادله خطی شده آن برابر است با

$$Q_1 c_1 + C_1 q_1 + Q_2 c_2 + C_2 q_2 - C q_o - Q_o c - kMC = M\dot{c}$$

## ۵-۲ کنترل درجه حرارت Temperature control

## ۱: تبادل حرارت

در فرایندهای حرارتی، تبادل گرما صورت می گیرد که همواره در مقابل آن مقاومت در برابرانتقال گرما وجود دارد. مقاومت حرارتی با R نشان داده می شود و بصورت زیر تعریف می گردد.

$$\Delta\theta = \text{تغییر در نیروی محرکه برای انتقال حرارت } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta H = \text{تغییر در تبادل حرارت cal/hr}$$

تبادل حرارت به ۳ صورت صورت می گیرد:

۱-هدایت: این تبادل حرارتی بین جامدات و اجسام صورت می گیرد و مقاومت حرارتی آن برابر است با:

$$R = \frac{X}{kA}$$

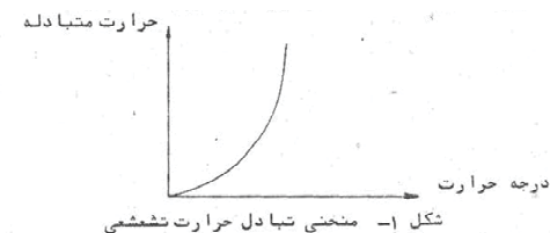
که در آن X ضخامت جسم (در جهت انتقال حرارت)، k ضریب حرارتی با واحد  $^\circ\text{C}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot \text{m}^2/\text{cal}$  و A سطح هدایت حرارتی است.

۲-جابجایی: این نوع تبادل حرارتی در سیالات انجام می شود و مقاومت تبادل برابر است با

$$R = \frac{1}{hA}$$

است که در آن h ضریب تبادل حرارتی و A سطح تماس جسم با سیال است.

۳-تشعشع: تبادل حرارتی تشعشعی با توان ۴ دمای مطلق بستگی دارد و در گازها انجام می شود. به علت اینکه منحنی تبادل حرارت تشعشعی بر حسب درجه حرارت غیر خطی است، مقاومت حرارتی در دماهای مختلف را باید از شیب نمودار تبادل حرارتی بدست آورد. چون نمودار درجه ۴ است، خطی سازی برای محدودههای کوچک معتبر است.



## ۲: انواع فرایندهای حرارتی

فرایندهای حرارتی عبارتند از:

الف-مخلوط شدن مایعات (یا گازهای) سرد و گرم

ب-تبادل حرارت بین اجسام، مایعات و گازها

ج-تولید حرارت توسط احتراق یا واکنشهای شیمیایی

د-تولید حرارت در اثر تشعشع

ه-تولید حرارت توسط الکتریسیته

هدف از کنترل در فرایندهای تبادل گرمایی، تثبیت درجه حرارت یا تبادل آن بین اجسام، مایعات و گازها است.

## الف- مخلوط شدن Composition control

نمونه ای از این فرایند در شکل ۱۰ نشان داده شده است که در آن جریانهای مایع (یا گاز) های سرد و گرم در یک مخزن مخلوط می شوند و مخلوط دارای درجه حرارت متوسطی است. انتقال حرارت به روش جابجایی انجام می شود. انرژی حرارتی مبادله شده برابر است با

$$H = \rho \cdot C_p \cdot T \cdot Q$$

که در آن H نرخ حرارت مبادله با واحد Cal/Sec و  $\rho$  چگالی مایع یا گاز با واحد  $\text{kg}/\text{m}^3$  و  $C_p$  گرمای ویژه آن با واحد  $^\circ\text{C}/\text{kg} \cdot \text{Cal}$  و T دمای آن با واحد  $^\circ\text{C}$  و Q دبی با واحد  $\text{m}^3/\text{Sec}$  است.

در این فرایند هدف کنترل درجه حرارت است. برای کنترل درجه حرارت باید نرخ انتقال حرارت H را کنترل کرد که رابطه (۳) نشان می دهد که آنرا به ۲ طریق می توان انجام داد:

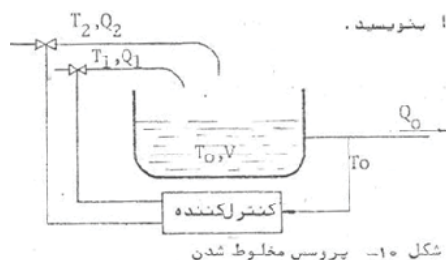
الف-کنترل توسط تغییر دبی مایع یا گاز گرم (یا سرد). این سیستم کنترل وقتی مناسب است که تغییر دبی خروجی مهم نباشد. در غیر اینصورت از روش دیگر باید استفاده کرد.

ب-کنترل نسبت مایع (یا گاز) گرم به سرد و ثابت نگهداشتن دبی مجموع. در این حالت دبی خروجی ثابت است و با تغییر نسبت مایع (یا گاز) سرد و گرم مقدار حرارت متبادله و در نتیجه درجه حرارت فرایند کنترل می شود.

شمای سیستم کنترل در شکل زیر نشان داده شده است. در حالتی که کنترل به روش الف انجام شود کنترلر یک کنترلر دبی است و در صورتیکه کنترل به روش ب انجام شود از کنترلر نسبت دبی استفاده می شود.

## مثال ۱-مخلوط شدن:

در فرایند حرارتی شکل ۱۰، ۲ جریان مایع وارد مخزنی به حجم V می شوند. مایعات دارای دبی های Q1 و Q2 و دماهای T1 و T2 هستند. در مخزن ۲ مایع با هم مخلوط شده بطوریکه دمای مخلوط داخل مخزن بصورت یکنواخت T0 شود. دمای مایع خروجی نیز T0 است. تابع تبدیل فرایند را بنویسید.



مدل مخزن: مقدار خالص حرارت که در مخزن ذخیره می شود و درجه حرارت را بالا می برد عبارت است از

$$H=H_1+H_2-H_0$$

$H_1$  و  $H_2$  به ترتیب حرارت‌های ورودی به مخزن از دو مجرا با دماهای  $T_1$  و  $T_2$  هستند و  $H_0$  مقدار حرارت خروجی از مخزن است. با توجه به رابطه (۳) معادله (۶) را می توان بصورت زیر نوشت.

$$\rho_0 C_{p0} V \frac{dT_0}{dt} = \rho_1 C_{p1} T_1 Q_1 + \rho_2 C_{p2} T_2 Q_2 - \rho_0 C_{p0} T_0 Q_0 \quad (7)$$

رابطه (۷) را میتوان بصورت زیر نوشت :

$$\frac{V}{Q_0} \frac{dT_0}{dt} + T_0 = \frac{\rho_1 C_{p1}}{\rho_0 C_{p0}} \frac{Q_1}{Q_0} T_1 + \frac{\rho_2 C_{p2}}{\rho_0 C_{p0}} \frac{Q_2}{Q_0} T_2 \quad (8)$$

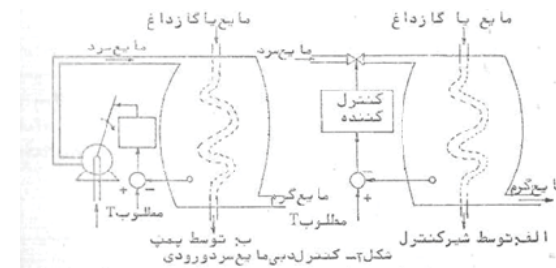
از رابطه (۹) ملاحظه می شود که تابع تبدیل ربط دهنده درجه حرارت خروجی به مقدار حرارت‌های ورودی دارای ثابت زمانی  $\tau=V/Q_0$  است یعنی ثابت زمانی نسبت مستقیم با حجم مخزن و نسبت معکوس با دبی خروجی دارد.

### ب-تبادل حرارت

در این فرایندها، گازها یا مایعات برای تبادل حرارت با هم مخلوط نمی شوند بلکه حرارت از طریق جداره فلزی لوله‌هایی که یک مایع یا گاز در آن جریان دارد به گاز یا مایع دیگر منتقل می شود. در شکل ۳، مایع یا گاز داغ از داخل لوله عبور می کند و مایع یا گاز سردی که در مجاورت بیرونی لوله قرار دارد را گرم می کند. مقدار حرارت انتقال یافته برابر است با:

$$H=k.A.\Delta T$$

که در آن  $k$  قابلیت هدایت جداره لوله و  $A$  سطح تماس لوله با مایع یا گاز،  $\Delta T$  اختلاف دمای دو طرف آن است. برای کنترل مقدار حرارت متبادله و در نتیجه کنترل درجه حرارت می توان ۳ عامل موثر در انتقال حرارت را تنظیم نمود. که از بین آنها اختلاف درجه حرارت برای تنظیم دما می توان استفاده کرد.



### ب-۱-کنترل دبی مایع سرد ورودی

این کار می تواند از دو طریق شیر (شکل ۳-الف) و یا پمپ (شکل ۳-ب) انجام شود. در حالت استفاده از شیر، با افزایش درجه حرارت شیر بازتر شده و دبی سرد را افزایش می دهد و در صورت کاهش دما، شیر سرد مقداری

بسته می شود تا دبی مایع سرد کم شده و درجه حرارت افزایش یابد. در صورت استفاده از پمپ، وقتی درجه حرارت افزایش می یابد دبی مایع سرد با افزایش دور پمپ زیادتر شده و در صورت کاهش دما سرعت پمپ کاهش یافته تا دبی مایع سرد کم شده و درجه حرارت افزایش یابد.

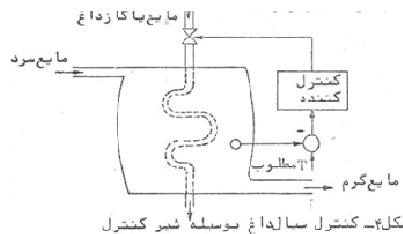
### ب-۲-کنترل مایع یا گاز داغ

کنترل مایع یا گاز داغ به ۲ روش امکان پذیر است:

الف) تنظیم دبی ورودی با شیر کنترلی

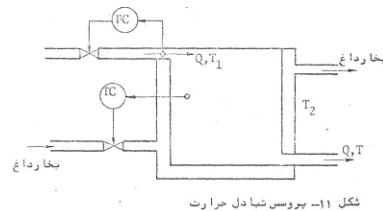
ب) تنظیم درجه حرارت گاز یا مایع داغ

کنترل دبی مایع یا گاز داغ مشابه کنترل دبی مایع سرد است. تنظیم درجه حرارت گاز یا مایع داغ به علت آنکه باید روی سیستم تولید مایع داغ (مثلا دیگ بخار) عمل کنترل انجام شود معمولاً دشوارتر است.



### مثال ۲-تبادل حرارت Heat exchange control

در فرایند حرارتی شکل ۱۱ از بخار داغ برای گرم کردن مایعی که با دبی  $Q$  در جریان است استفاده می شود.



مدل محفظه: در مدل محفظه بقا انرژی حاکم است یعنی نرخ انرژی ورودی برابر است با نرخ انرژی ذخیره شده (صرف افزایش درجه حرارت) به اضافه نرخ انرژی خروجی:

$$Mc\dot{T} = q_i - q_o$$

مدل ورود گرما: گرما دهی توسط بخار داغ انجام می شود که برابر است با:

$$Q_i = \lambda W$$

در این رابطه  $\lambda$  (Cal/kg) ارزش حرارتی بخار و  $W$  دبی وزنی بخار داغ و واحد آن kg/Sec است.

مدل خروج گرما: رابطه خروج گرما از محفظه اینگونه است:

$$q_o = c\rho Q(T - T_1)$$

که در آن  $\rho$  چگالی مایع در حال عبور در مخزن با واحد  $\text{kg/m}^3$  است.

مدل مشترک مخزن و گرمای ورودی و خروجی اینگونه بدست می آید.

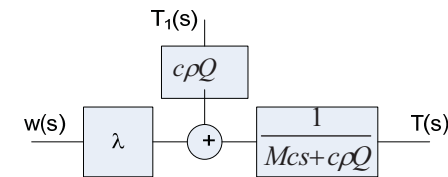
$$Mc\dot{T} = q_i - q_o = \lambda W - c\rho Q(T - T_1) \Rightarrow$$

$$Mc\dot{T} + c\rho QT = q_i - q_o = \lambda W + c\rho QT_1$$

از تبدیل لاپلاس معادله دینامیکی نتیجه می شود:

$$McsT(s) + c\rho QT(s) = \lambda W(s) + c\rho QT_1(s)$$

بلوک دیاگرام حلقه باز فرایند از این قرار است.



شکل ۱۲: بلوک دیاگرام مدار باز فرایند تبادل حرارت

از مقایسه با فرم استاندارد فرایند درجه ۱ ثابت زمانی فرایند بدست می آید.

$$\frac{T(s)}{T_1(s)} = \frac{1}{\frac{Mc}{c\rho Q}s + 1} = \frac{1}{\tau s + 1} \Rightarrow \tau = \frac{Mc}{c\rho Q}$$

برای کنترل درجه حرارت مایع خروجی  $T$  دبی بخار داغ ورودی با شیر کنترلی که در مسیر آن قرار دارد تنظیم می شود. با فرض قابل اغماض بودن دینامیک اندازه گیر در مقابل دینامیک سیستم، بلوک دیاگرام مطابق شکل ۱۳ می گردد.

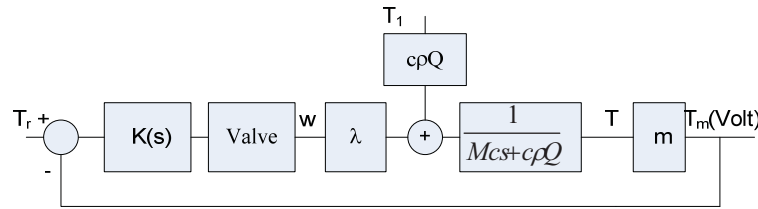
معادله دینامیک و تابع تبدیل فرایند به فرض کاملاً عایق بودن جداره مبدل حرارتی بدست آمد. اگر جداره کاملاً عایق نباشد خواهیم داشت:

$$\lambda W = c\rho Q(T - T_1) + Mc\dot{T}$$

حرارت خارج شده از جداره به اختلاف دمای محیط و داخل مخزن و نیز مقاومت حرارتی (عایق) جداره بستگی دارد زیرا:

$$R = \frac{d}{kA} \quad \text{مقاومت حرارتی} \quad \text{جریان حرارتی جداره} = \frac{T_1 - T_2}{R}$$

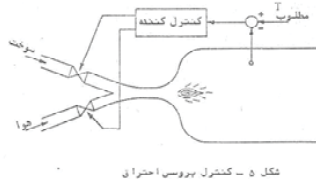
که  $k$  ضریبی است که به جنس جداره بستگی دارد و  $d$  ضخامت جداره و  $A$  سطح مقطع جداره است.



شکل ۱۳: بلوک دیاگرام مدار بسته فرایند تبادل حرارت

### ج) احتراق و واکنش شیمیایی Combustion control

سوختن مواد قابل احتراق و نیز بعضی فعل و انفعالات شیمیایی تولید حرارت می کند که از آن برای گرم کردن گازها یا مایعات می توان استفاده کرد. شکل ۵ یک فرایند احتراقی را نشان می دهد.



شکل ۵ - کنترل پروسس احتراق

در این فرایند انتقال حرارت به ۲ صورت جابجایی و تشعشع انجام می شود اما به علت آنکه طبق قانون استفان بولتزمن میزان تشعشع حرارتی برابر است با:

$$H = \epsilon \cdot \delta \cdot A \cdot T^4$$

که در آن  $\epsilon$  ضریب صدور ماده تشعشع کننده و  $\sigma$  ضریب ثابت تشعشع بولتزمن برای اجسام سیاه و  $A$  سطح تشعشع است. به دلیل آنکه تبادل حرارت تشعشعی با توان ۴ دما متناسب است و در احتراق دم بالاست، قسمت عمده حرارت بصورت تشعشع انجام می شود.

برای کنترل حرارت در این فرایند می توان مقدار سوخت را تنظیم نمود. از آنجا که برای احتراق کامل نسبت سوخت به هوا باید مناسب باشد، تنظیم صرف سوخت کافی نیست و باید نسبت بین آنها نیز کنترل گردد.

### د) تشعشع

علاوه بر آنچه در قسمت قبل دیدیم، تشعشع مستقیم نیز برای گرم کردن و خشک کردن موادی که روی نقاله قرار دارند نیز بکار می رود. (شکل ۶). مقدار حرارتی که منبع تشعشعی به مواد روی نقاله می دهد به درجه حرارت منبع و قابلیت تشعشعی گازه‌های اطراف دارد. مقدار حرارت دریافتی مواد به سرعت حرکت نقاله نیز بستگی دارد. بنا براین با کنترل سرعت نقاله می توان مقدار گرمای دریافتی مواد روی نقاله را کنترل نمود.

$$\tau_{\theta} \frac{dc_{\theta}}{dt} + c_{\theta}(t) = K_{\theta} \theta(t)$$

و هم به گرمای گرمکن وابسته است

$$\tau_v \frac{dc_v}{dt} + c_v(t) = K_v v(t)$$

در نتیجه درجه حرارت کل مجموع این دودرجه حرارت است.

$$c(t) = c_{\theta}(t) + c_v(t)$$

تبدیل لاپلاس کل سیستم برابر است با:

$$\begin{bmatrix} h(s) \\ c(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_h}{s\tau_{\theta} + 1} & 0 \\ \frac{k_{\theta}}{s\tau_{\theta} + 1} & \frac{k_v}{s\tau_v + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(s) \\ v(s) \end{bmatrix}$$

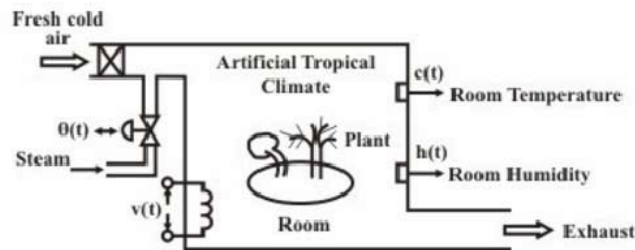


Fig. 8 Temperature and humidity control for maintaining artificial tropical climate

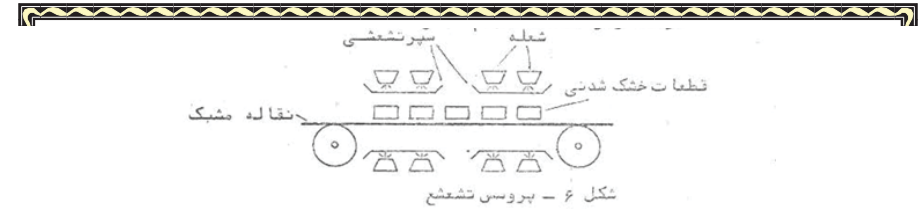
### B. واحد تولید نفت

واحد تولید نفت به تاسیساتی گفته می شود که طی عملیاتی گاز طبیعی و نفت خام که بصورت مخلوط از چاهها استخراج می شوند را جدا می کنند. این جدا سازی برای ذخیره کردن، حمل و نقل و جلوگیری از احتراق در مخازن و نفت کشها ضروری است.

نفتی که از چاهها استخراج می شود شباهت زیادی با مایعات گاز دار دارد. نسبت گاز به نفت برای چاههای مختلف متفاوت است. تعیین این نسبت بعد از نمونه گیری در آزمایشگاه تعیین می شود.

برای طرح تاسیسات واحد تولید نفت، باید نسبت گاز به نفت، فشار، درجه حرارت، چگالی نفت و گاز و حداکثر دبی چاه معلوم باشد. قسمتهای اصلی یک واحد تولید نفت عبارت است از مخازن جدا کننده، شیرها و لوله های رابط، اندازه گیرها و کنترلرها هستند. کنترلرها ممکن است بادی یا الکتریکی یا ترکیبی از این دو باشند.

جدا سازی گاز از نفت به کمک کاهش فشار طی مراحل مختلف انجام می گردد. در این فرایند، فشار نفت از فشار چاه (به طور متوسط از حدود 900psi) به فشار اتمسفر تنزل داده می شود. قراردادن سری مراحل، که معمولاً ۳ مرحله است، از آنروست که انبساط از فشار چاه به فشار اتمسفر در یک مرحله موجب یخ زدگی و انسداد



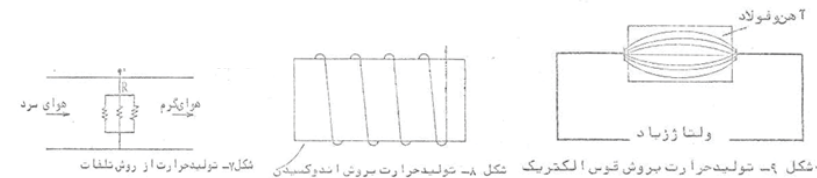
### ه) تولید الکتریکی گرما

تولید گرما توسط الکتریسیته به ۳ روش می تواند انجام شود.

۱) تلفات حرارتی: در این روش با اعمال ولتاژ  $V$  به یک مقاومت  $R$  تولید گرما می شود. مقدار توان تلفاتی  $P=V^2/R$  است. سیالی که در مجاورت این مقاومت قرار گیرد از آن گرما دریافت کرده و درجه حرارت آن افزایش می یابد. شکل ۷

۲) القا مغناطیسی: در این روش که برای حرارت دادن فلزات استفاده می شود سیم پیچی که جریان با فرکانس زیادی از آن عبور می کند دور محفظه ای که فلزات در آن قرار دارند پیچیده می شود. تلفات هیستریزس و جریان فوکو سبب گرم شدن فلزات می گردد. شکل ۸

۳) قوس الکتریکی: در این روش ولتاژ زیادی بین ۲ الکترود ایجاد می شود. موادی که در مسیر این قوس الکتریکی قرار دارند داغ می شوند. میزان حرارت بقدری است که مواد ذوب می گردند. شکل ۹



### ۲-۶ مثالهایی از کنترل فرایند

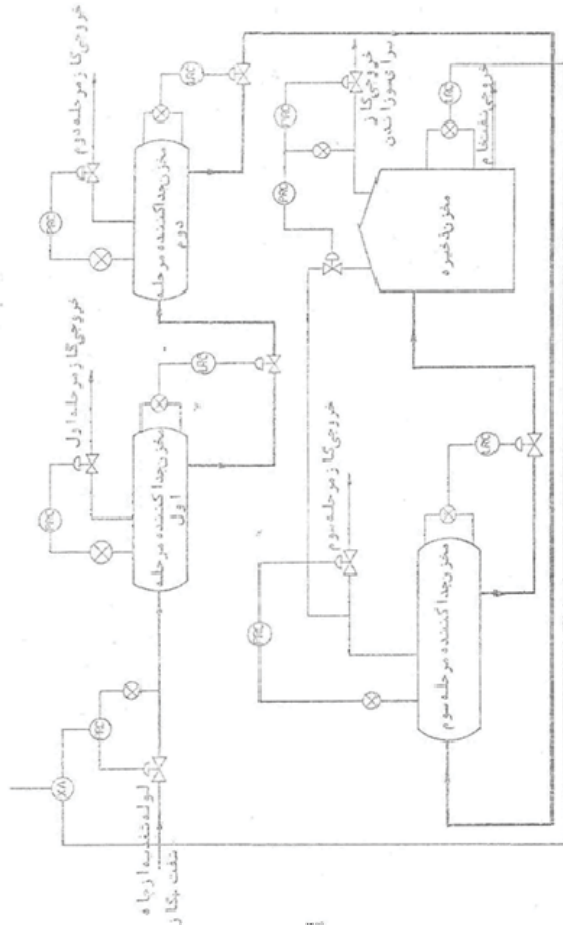
#### A. مثال از سیستم MIMO

شکل مثالی از سیستم چند ورودی چند خروجی را نشان می دهد. در این سیستم با تنظیم رطوبت و درجه حرارت، گلخانه با آب و هوای استوایی ایجاد می شود. هوای سرد توسط فن به داخل محفظه رانده می شود و برای تامین رطوبت بخار به آن اضافه می شود. یک گرمکن الکتریکی درجه حرارت گلخانه را بالا می برد. موقعیت شیر بخار  $\theta(t)$  و ولتاژ اعمالی به گرمکن ورودیهای سیستم هستند. خروجی سیستم رطوبت و درجه حرارت گلخانه است. شکل ۸ این سیستم را نشان می دهد. دینامیک رطوبت گلخانه را اینگونه می توان نوشت.

$$\tau_{\theta} \frac{dh}{dt} + h(t) = K_{\theta} \theta(t)$$

از طرفی درجه حرارت گلخانه هم به دبی بخار





شکل ۲۴- سیستم های کنترل در پروسه تولید نفت

در واحدها تولید نفت، کنترلرها و اندازه‌گیرها از نوع بادی انتخاب می‌شوند. این از آن‌است که بدلیل قابل اشتعال بودن تاسیسات، استفاده از دستگاههای الکتریکی و الکترونیکی که احتمال تولید جرقه دارند دور از احتیاط به نظر می‌رسد.

چون واحدهای تولید دارای چندین خط تولید نفت هستند و خروجی همه آنها به یک مخزن وارد می‌شوند، برای کنترل سطح نفت مخزن ذخیره باید فرمان لازم به تمام خطوط تولید ارسال گردد تا بتوان سطح نفت مخزن ذخیره را کنترل کرد. برای این منظور کنترلر سطح نفت مخزن ذخیره، به وسیله دستگاهی که در شکل ۲۶ به نام XA مشخص شده است، مقدار سطح مخزن ذخیره را برای هر خط تولید در عدد معینی ضرب کرده و سهم هر خط تولید در تولید کلی را مشخص می‌کند.

کامل مجرای حامل نفت در محل انبساط می‌شود. اخیراً شیرهای مخصوصی که با بخار نفت گرم می‌شوند به بازار عرضه شده‌اند که میتوان انبساط با اختلاف فشار زیادتر از شیرهای معمولی را انجام داد.

نفتی که از ۳ مرحله عبور کرده است وارد مخزنی که تحت فشار نزدیک یک اتمسفر است می‌شود. این مسیر یک خط تولید نفت است. یک واحد تولید نفت می‌تواند شامل چندین خط تولید نفت باشد که خروجی آنها توسط لوله مشترکی به مخزن ذخیره یا نفتکش و یا پالایشگاه هدایت می‌شود.

با توجه به شکل ۲۶ که یک خط تولید نفت را نشان می‌دهد، روشن می‌شود که یکی از کمیت‌هایی که باید کنترل شود، دبی نفت به جدا کننده مرحله اول است. حلقه کنترل جریان (دبی) FRC شامل اجزا زیر است:

۱- اندازه گیر دبی که معمولاً یک اریفیس است

۲- انتقال سیگنال متناسب با دبی (متناسب با اختلاف فشار ۲ سر اریفیس) که با علامت  $\otimes$  نشان داده شده است.

۳- کنترلر که معمولاً PID است به همراه رکورد

۴- شیر کنترل که با دریافت سیگنال از کنترلر دبی را تغییر می‌دهد. به نحویکه دبی در مقدار مناسب تثبیت شود. اولین مرحله افت فشار با انبساط در این شیر انجام می‌شود، زیرا فشار داخل اولین جدا کننده که توسط حلقه کنترل PRC/1 کنترل می‌شود به مراتب کمتر از فشار در ورودی شیر است. کمیت‌هایی که در جداکننده‌ها کنترل می‌شوند عبارتند از: فشار و سطح مایع. کنترل فشار در جدا کننده‌ها تغییر مقدار گاز خروجی و کنترل سطح مایع با تغییر جریان نفت خروجی از جدا کننده انجام می‌شود.

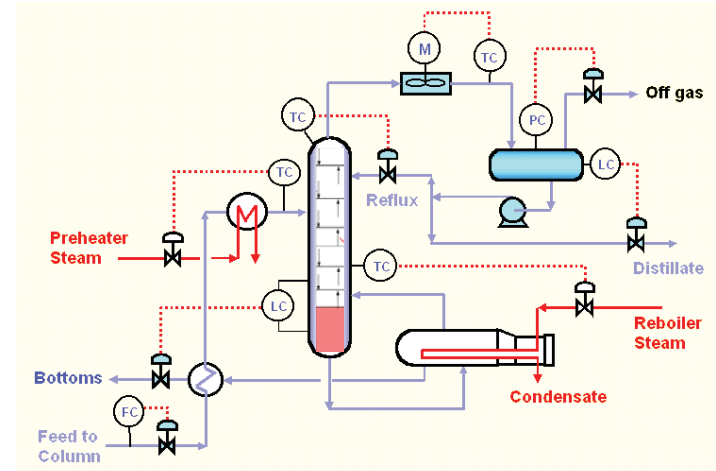
برای دبی ورودی ثابت و افت فشار معین در شرایط یکنواخت، مقدار معین و ثابت نفت و گاز از جدا کننده مرحله اول خارج می‌شود. همانطور که شکل ۲۶ نشان می‌دهد هر یک از حلقه‌های کنترل فشار و سطح مایع مشابه حلقه کنترل دبی دارای اندازه‌گیر، انتقال لطلاعات، کنترلر و شیر مربوط به خود هستند.

گاز خروجی مراحل مختلف به محل‌های فروش و یا پالایش منتقل می‌شوند و نفت خروجی از مرحله اول که در آنجا مقداری از گاز خود را از دست داده است وارد جدا کننده مرحله ۲ شده و از آنجا به جدا کننده مرحله ۳ انتقال یافته و در مخزن تحت فشار اندکی بالاتر از اتمسفر ذخیره می‌شود. در مخزن سطح مایع و فشار باید کنترل شود. سطح مایع توسط اندازه‌گیری که معمولاً از نوع شناور و یا اختلاف فشار سنخ است اندازه‌گیری می‌گردد و به کنترلر LRC ارسال می‌شود. کنترلر سطح مایع، فرمان‌های لازم را مستقیماً به کنترلر دبی ورودی به خط تولید می‌فرستد و نقطه تنظیم آنرا بر حسب احتیاج تغییر می‌دهد.

فشار گاز خروجی مخزن اندکی بالاتر از اتمسفر است لذا کاربرد اقتصادی ندارد و سوزانده می‌شود. انتقال گاز به محل سوختن با لوله‌های قطور صورت می‌گیرد. از آنجا که در صورت افت فشار در مخزن شعله ممکن است به درون مخزن نفوذ کرده و احتراق ایجاد کند، از ۲ حلقه کنترل فشار که بطور همزمان عمل می‌کنند استفاده می‌شود. در صورت افت فشار در مخزن، حلقه اول PRC شیر خروجی گاز برای سوختن را می‌بندد و مانع ورود شعله و هوا به مخزن می‌شود. در این حال حلقه دوم PRC شیر کنترل لوله حامل گاز خروجی مرحله سوم را باز می‌نماید و مقداری گاز به داخل مخزن ذخیره تزریق می‌کند تا فشار داخل مخزن بالا رود. بعد از این و به دنبال بالا رفتن فشار وضع به حالت عادی می‌رسد و شیر خروج گاز از مخزن ذخیره باز می‌شود.

## C. برج تقطیر Column distillation

در برج تقطیر دو گانه، دو مایع با درجات تبخیر متفاوت از یکدیگر جدا می شوند. برای مثال می توان مخلوط اتانول با درجه جوش  $83^{\circ}\text{C}$  را از آب با درجه جوش  $100^{\circ}\text{C}$  از هم جدا کرد. در درجه حرارت مثلاً  $92^{\circ}\text{C}$  اتانول بخار است در حالیکه آب مایع است. در برج تقطیر بخار از مایع جدا می گردد.



مخلوط از نقطه ای نزدیک وسط برج به آن وارد می شود. مخلوط به سمت پایین برج حرکت می کند. در قسمت پایین برج reboiler قرار دارد که به مخلوط گرما می دهد. بخار ناشی از گرم شدن وارد برج شده و به طرف بالا حرکت می کند. در داخل برج سینی هایی برای تسهیل جداسازی تعبیه شده است. بخار از بالای برج خارج شده و وارد کندانسوری میشود که آنرا مایع می کند و در مخزنی ذخیره می شود. بخشی از مایع از کندانسور به داخل برج reflux می شود. این مایع بخاراتی که به بالا میروند را خنک می کند. این امر فرایند جداسازی را موثرتر می نماید. هرچه مقدار reflux بیشتر باشد به تعداد سینی های کمتری نیاز است و بر عکس.

## D. آسیاب مواد خام

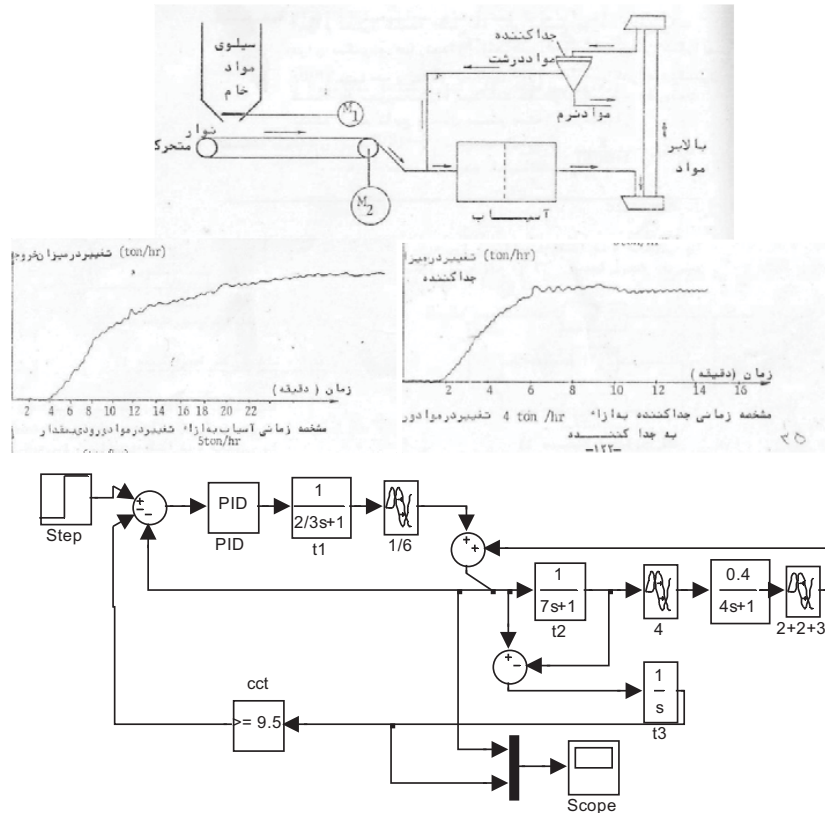
شکل دیاگرام ساده کار آسیاب مواد خام در یک کارخانه سیمان را نشان می دهد. مواد خام از سیلو و از طریق دریچه که توسط موتور M1 کنترل می شود روی تسمه نقاله می ریزند. سرعت تسمه را موتور M2 تنظیم می کند. مواد پس از آسیاب و از طریق بالابر وارد جدا کننده می شوند. در اینجا مواد درشت از ریز جدا می گردد. مواد درشت بار دیگر به آسیاب بر می گردد. برای کار رضایت بخش آسیاب لازم است:

الف: میزان وزن مواد ورودی به آسیاب در حدود  $1\text{ ton/min}$  ثابت نگه داشته شود.

ب: وزن مواد در آسیاب از  $10\text{ ton}$  تجاوز نکند.

فاصله سیلو تا آسیاب  $10\text{ m}$ ، سرعت عادی تسمه نقاله  $1\text{ m/s}$ ، ثابت زمانی دریچه M1 برابر  $40\text{ s}$  مدت زمان لازم که مواد از خروجی آسیاب به ورودی جدا کننده برسد  $2\text{ min}$ ، مدت زمان لازم برای رسیدن مواد درشت از جدا کننده

به ورودی آسیاب  $3\text{ min}$  و نسبت وزنی مواد درشت به کل مواد ورودی به جدا کننده بطور متوسط  $40\%$  است. مشخصه زمانی تجربی آسیاب سیمان و جدا کننده در شکلهای زیر آمده است

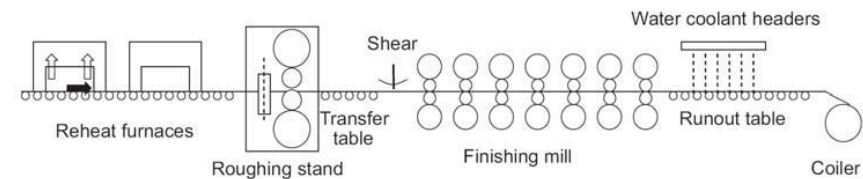




## ۷-۲ سیستم نورد Rolling Mill

این فرایندها در صنایع فولاد، آلومینیوم، نساجی، کاغذ و پلاستیک سازی دیده می شود. نورد توسط غلطک‌هایی که ماده نورد شونده بین آنها قرار می گیرد انجام می شود. در هر فرایند نورد غلطک‌های متعددی وجود دارد که دو زوج از آنها اهمیت دارند. یک زوج بنام غلطک‌های گیرنده و زوج دیگر به نام غلطک‌های راننده. غلطک‌های راننده نقش به جلو راندن ماده نورد شونده و غلطک‌های گیرنده وظیفه نگهداشتن ماده را به عهده دارند که در نتیجه منجر به کش یافتن ورق می گردد.

در نورد دو عامل ضخامت و کشش ورقه‌ها ی نورد شونده مطرح هستند که کنترل آنها مسئله اساسی نورد است.



## ۱-۷-۲ کنترل ضخامت در نورد فلزات

در نورد فلزات کنترل ضخامت مد نظر است. نورد ممکن است بصورت گرم یا سرد انجام شود. در نورد گرم فلز بر حسب نوع در کوره تا دمای 600-1200°C حرارت دیده و گرم می شوند سپس تحت نورد قرار می گیرند. در نورد سرد فلز بدون گرم شدن تحت نورد قرار داده می شود.

ضخامت ورق خروجی تابع ضخامت اولیه  $H_1$ ، سختی فلز  $\eta$  و فاصله بی باری بین دو غلطک  $S$  است. وقتی رابطه خطی شود فرمول زیر بدست می آید.

$$H_2 = f(s, \eta, H_1) \Rightarrow h_2 = \alpha_s s + \alpha_\eta \eta + \alpha_{h1} h_1 \quad (10)$$

برای کنترل ضخامت  $S$  فاصله بی باری تنظیم می شود. از آنجا که ورق تولیدی دور استوانه ای پیچیده می شود، کشش ورق نیز باید کنترل شود.

در فرایند نورد نیروی ناشی از تغییر ضخامت وجود دارد که

$$F = C\eta\sqrt{H_1 - H_2}$$

که در آن  $C$  مقدار ثابت، و  $\eta$  سختی فلز است. سختی فلز به جنس و درجه حرارت آن بستگی دارد. هر چه درجه حرارت بیشتر باشد سختی کمتر است. از طرف دیگر نیروی اعمالی از دستگاه نورد وجود دارد که

$$F = M(H_2 - S)$$

است در این رابطه  $M$  مدول دستگاه نورد است. هر چه مدول بزرگتر و یا به عبارتی دستگاه نورد سخت تر باشد، نیروی نورد بیشتر خواهد بود. از تعادل این دو رابطه ضخامت خروجی بدست می آید.

$$F = M(H_2 - S) = C\eta\sqrt{H_1 - H_2}$$

پارامترهای مدل خطی از این رابطه بدست می آید.

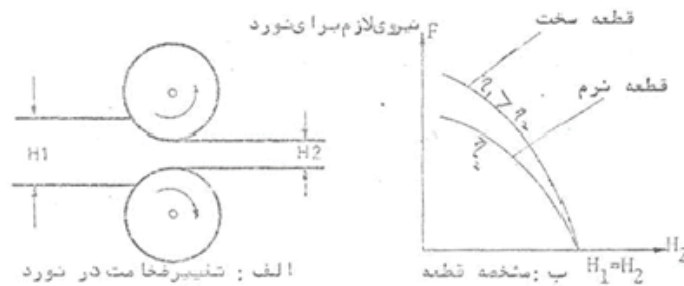
$$\beta = \frac{c\eta}{2\sqrt{H_1 - H_2}} \Rightarrow \alpha_s = \frac{M}{M + \beta}$$

$$\alpha_\eta = \frac{c\sqrt{H_1 - H_2}}{M + \beta} \quad \alpha_{h1} = \frac{\beta}{M + \beta}$$

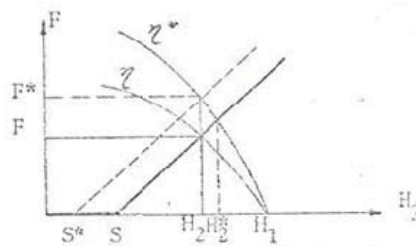
از رابطه (۱۰) ملاحظه می شود که فرایند نورد بدون دینامیک است و چون  $S$  به وسیله سیستم کنترل مکان قابل تنظیم است فاصله غلطکها سیگنال کنترل و سختی قطعه و ضخامت ورودی اختلالهای موثر بر فرایند هستند.

## الف) پارامتر اثر سختی فلز

در صورتیکه سختی قطعه  $\eta$  و فاصله بی باری غلطکها  $S$  باشد، ضخامت خروجی  $H_2$  است. حال اگر سختی قطعه به  $\eta^*$  تغییر یابد به ازای همان فاصله بی باری  $S$ ، مقدار ضخامت  $H_2^*$  می شود. برای تثبیت ضخامت فاصله بی باری را باید به  $S^*$  کاهش داد. نتیجه اینکه جبران تغییر سختی با تغییر  $S$  امکان پذیر است



شکل ۲ - نیروی نورد

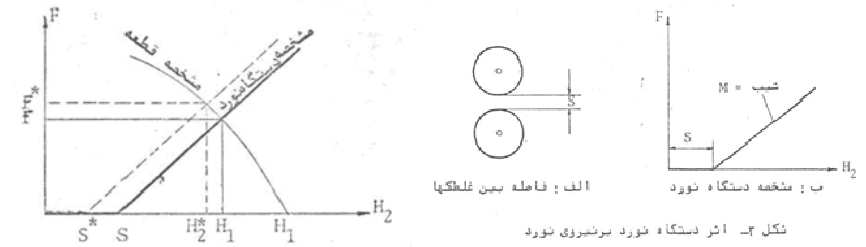


شکل ۵ - اثر تغییر سختی فلز بر ضخامت خروجی

## ب) پارامتر اثر فاصله بی باری

فاصله بین دو غلطک در اثر فرا رگرفتن قطعه بین آنها زیاد می شود. این افزایش فاصله به نیروی نورد بستگی دارد. ضخامت خروجی قطعه نورد شونده  $H_2$  طبق رابطه (۱) با ضخامت ورودی قطعه  $H_1$  و نیروی نورد بستگی دارد و

نیروی نورد طبق رابطه (۲) به مدول دستگاه نورد بستگی دارد. در نتیجه ضخامت خروجی قطعه از تلاقی مشخصه های قطعه و دستگاه نورد بدست می آید. شکل ۴ اثر فاصله بی باری را بر غلظکهای خروجی قطعه نشان می دهد.



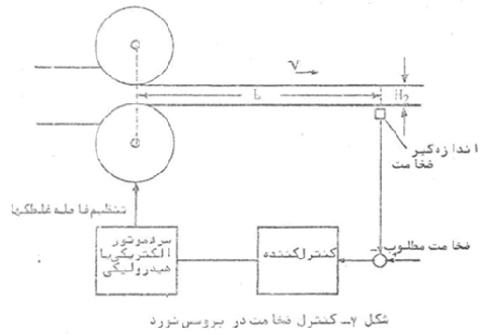
شکل ۴- اثر فاصله بی باری بر ضخامت خروجی

از شکل ۴ ملاحظه می شود برای قطعه ای با ضخامت ورودی  $H_1$  در صورتیکه فاصله بی باری غلظکها  $S$  باشد ضخامت قطعه خروجی  $H_2$  است و اگر فاصله بی باری غلظکها به  $S^*$  کاهش یابد ضخامت قطعه خروجی به  $H_2^*$  تقلیل می یابد. البته نیروی نورد  $F$  به  $F^*$  افزایش می یابد. بنابر این میتوان نتیجه گرفت برای کنترل ضخامت خروجی قطعه باید فاصله غلظکها را تنظیم کرد.

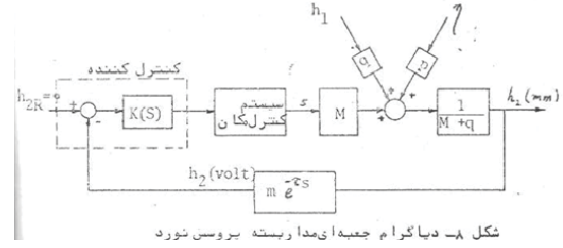
**ج) اثر ضخامت ورودی:** با فرض سختی  $\eta$  و فاصله بی باری  $S$ ، اگر ضخامت ورودی به  $H_1^*$  تغییر یابد، ضخامت خروجی به  $H_2^*$  می رسد. برای تثبیت ضخامت خروجی،  $S$  به  $S^*$  تغییر داده می شود تا ضخامت تثبیت گردد. غلظکها که فلز را نورد می کنند، داغ می شوند و اگر خنک نگردند اصطلاحاً می سوزند. بدین جهت روی آنها آب پاشیده می شود تا خنک شوند. بنابراین در محل، بخار داغ و درجه حرارت بالا وجود دارد که اجازه نصب اندازه گیر ضخامت را نمیدهد. به اجبار عمل اندازه گیری ۲ تا ۳ متری دورتر از غلظکها انجام می شود که تاخیر  $\tau=L/V$  در اندازه گیری ایجاد می کند (شکل ۷).



شکل ۷- اثر تغییر ضخامت ورودی بر ضخامت خروجی



شکل ۵- کنترل ضخامت در بروس نورد



شکل ۶- دیانگرام جعبه ای مداد رسته بروس نورد

**۲-۷-۲ سیستم کنترل مکان برای تثبیت S Position control**

در قسمت نورد اشاره شد که برای تثبیت ضخامت خروجی، فاصله بین غلظکها باید تنظیم شود. بنابراین به سیستم کنترل مکان نیاز است. یکی از سیستمهای متداول کنترل مکان سیستم وارد-لئونارد Ward Leonard است که در شکل نشان داده شده است. در این سیستم ژنراتور با سرعت ثابت توسط موتوری می چرخد. جریان تحریک ژنراتور برابر است با

$$\frac{I_f(s)}{V_f(s)} = \frac{1}{R_f + L_f s}$$

از طرفی ولتاژ القایی ژنراتور متناسب با جریان تحریک و سرعت شفت ژنراتور (ثابت) است

$$V_g(s) = K_g I_f(s)$$

جریان آرمیچر برابر است با

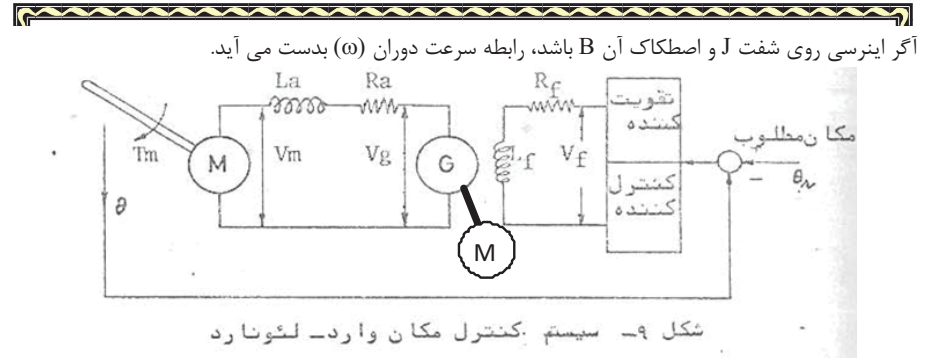
$$V_g(s) - V_m(s) = i(s)[R_a + L_a s]$$

از طرفی ولتاژ ضد محرکه متناسب با سرعت گردش موتور است در نتیجه می توان نوشت

$$V_m(s) = K_m \omega(s)$$

چون گشتاور محرک متناسب با جریان آرمیچر است می توان نوشت

$$T_m(s) = K_a I(s)$$

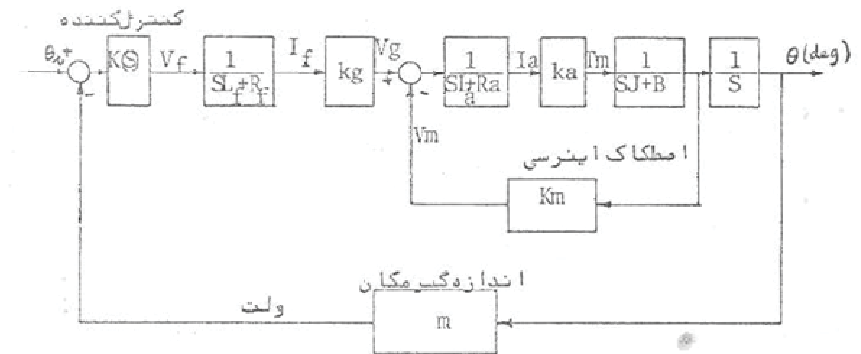


شکل ۹- سیستم کنترل مکان وارد- لئونارد

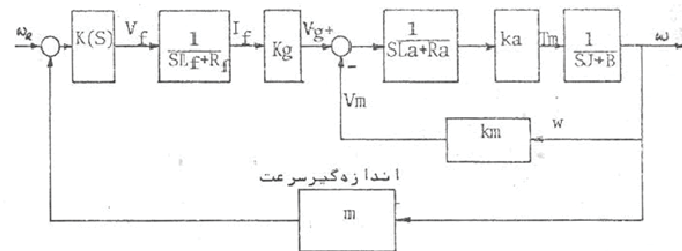
$$\frac{\omega_f(s)}{T_m(s)} = \frac{1}{B + Js}$$

شکل بلوک دیاگرام این سیستم را نشان می دهد. از این سیستم برای کنترل سرعت مطابق شکل ۱۱ نیز می توان استفاده کرد.

توان خروجی کنترلر به حد کافی بزرگ نیست، از این رو در این سیستم روی آن تقویت الکترونیکی صورت می گیرد تا ولتاژ بر توان  $V_g$  بدست آید. ثابتهای زمانی الکتریکی  $L_f/R_f$  و  $L_a/R_a$  نسبت به ثابت زمانی مکانیکی  $J/B$  کوچک و قابل اغماض هستند. در نتیجه سیستم کنترل مکان عملاً درجه ۲ و سیستم کنترل سرعت درجه ۱ است.



شکل ۱۰- دیاگرام جعبه ای سیستم کنترل مکان وارد- لئونارد



شکل ۱۱- دیاگرام جعبه ای سیستم کنترل سرعت وارد- لئونارد

### ۲-۷-۳ کنترل کشش در نورد Tension control

کنترل کشش در فرایند نورد اهمیت زیادی دارد. عدم تثبیت کشش موجب می شود:

- ۱: در مورد پلاستیک، پارچه، کاغذ و امثال آن سبب شل شدن یا کشیده شدن ورقه ها می گردد و این موضوع چاپ روی ورق و رنگ زدن آنرا مشکل می سازد.
- ۲: در مورد فلزات سبب اعوجاج و نا مسطح شدن آن می گردد.

#### الف) کشش در ورقه ها

برای شل یا پاره نشدن ورقه های خروجی نورد، کشش باید تثبیت شود. اگر غلطکها با سرعت ثابت و سنکرون گردش کنند، کشش یکنواخت بدست می آید.

وقتی روی ورقه ها عملیات شیمیایی یا مکانیکی انجام گیرد، نیروی اعمالی سبب تغییر سرعت و متعاقب آن تغییر کشش می گردد. ورقه ها را می توان مواد الاستیک ایده آل در نظر گرفت. قسمتی از ورقه که بین دو غلطک قرار دارد جرمی نسبتاً کم در مقایسه با جرم و اینرسی غلطکها دارد. وقتی ورقه بین دو جفت غلطک کشیده می شود طبق قانون هوک  $Hooke$  ورقه متناسب با نیروی وارده ازدیاد طول می یابد. رابطه هوک از این قرار است.

$$dT = \frac{E \cdot A}{l} dl$$

که در آن  $l$  فاصله بین دو غلطک،  $dl$  تغییر طول،  $A$  سطح مقطع ورقه و  $E$  مدول الاستیسیته است. با توجه به شکل ۱۳ وقتی  $d\theta_1$  کوچک است، طول ناشی از زوج غلطک اول برابر است با:

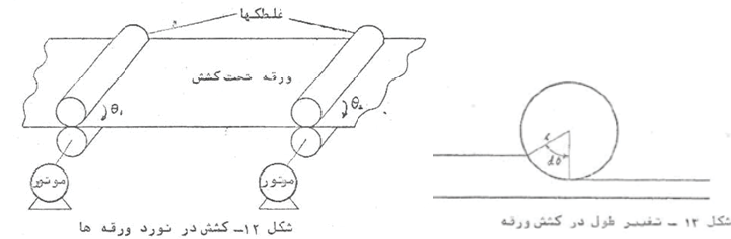
$$dl_1 = rd\theta_1$$

به طریق مشابه تغییر طول ناشی از زوج غلطک دوم با فرض مساوی بودن قطر غلطکها برابر است با:

$$dl_2 = rd\theta_2$$

و چون تغییر طول دوم از محدوده غلطکها خارج می شود، تغییر طول خالص برابر است با:

$$dl = dl_1 - dl_2 = r(d\theta_1 - d\theta_2)$$



از قرار دان رابطه (۱۸) در (۱۷) نتیجه می شود:

$$dT = AE/l r(d\theta_1 - d\theta_2)$$

از این رابطه نتیجه می گیریم

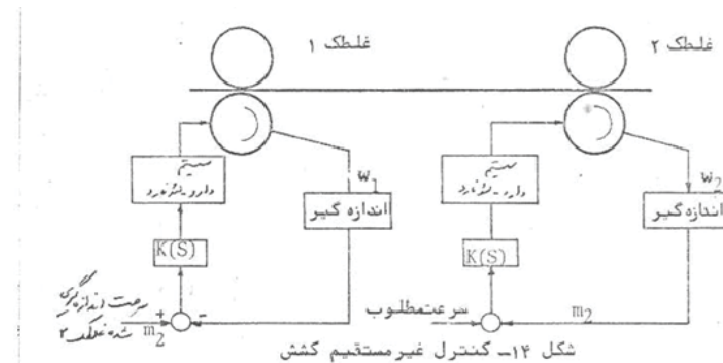
$$\dot{T} = AE/l r(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)$$

با تعریف  $k = (AEr)/l$  رابطه (۱۹) بصورت زیر در می آید.

$$\dot{T} = k(\omega_1 - \omega_2)$$

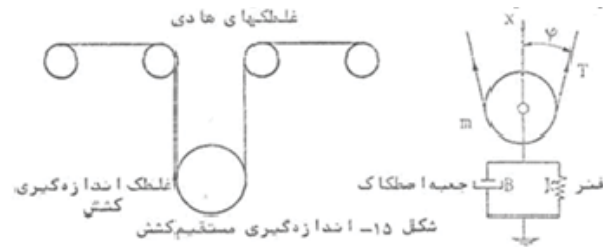
از رابطه (۲۰) نتیجه می شود که برای کشش یکنواخت (T ثابت) مقدار  $dT/dt=0$  باید شود. در این وضعیت سرعت دو زوج غلطک برابر است.  $\omega_1 = \omega_2$  رابطه (۲۰) با فرض صرفنظر کردن از اینرسی و اصطکاک بدست آمده است. در حالت کلی  $dT/dt$  تابعی غیر خطی از T و  $\omega$  است. ولی در اساس که کنترل کشش را باید با تنظیم سرعت دوران غلطکها بدست آورد خلی ایجاد نمی کند.

کنترل کشش توسط تنظیم سرعت نسبی غلطکها، روشی غیر مستقیم است که در آن یکی از غلطکها در سرعت مطلوب کنترل می شود و سرعت غلطک دوم برای ایجاد کشش یکنواخت برابر سرعت غلطک اول کنترل می گردد. (شکل ۱۴)



### اندازه گیری کشش

در روش غیر مستقیم نثبت کشش که توضیح داده شد، نیازی به اندازه گیری کشش نیست. معذالک در کنترل مستقیم کشش، مقدار آن باید اندازه گیری شود. این کار در صنایع نساجی انجام می شود. برای اندازه گیری کشش، از یک غلطک که در شکل ۱۵ نشان داده شده است استفاده می شود. در اثر تغییر کشش، غلطک تغییر مکان عمودی می یابد. فنر برای ایجاد نیروی مقاوم در برابر حرکت و اصطکاک برای میرایی نوسانات احتمالی آن است.



مدل اندازه گیر را اینگونه می توان نوشت

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = 2T \cos \varphi \Rightarrow x(s) = \frac{2 \cos \varphi T(s)}{ms^2 + bs + k}$$

یعنی کشش توسط اندازه گیری تغییر مکان غلطک بدست می آید. چون زاویه  $\varphi$  با تغییر مکان غلطک تغییر می کند، نیروی عمودی به صورت  $2T \cos(\varphi)$  نوشته شده است.

### ۸-۲ علائم اختصاری برای فرایندها

بعضی از علائم اختصاری که در شکلها استفاده می شوند از این قرارند.

- FC Flow control calculation
- PIC Pressure measurement indicated (displayed) for the operating personnel and used in control calculation
- LAH Level measurement used for signalling an alarm when the level exceeds a high limit
- TS Temperature measurement used to open/close a switch that could shut down plant operation on a dangerous condition
- AC Analyzer control calculation; the specific analysis is usually indicated just outside the bubble (e.g.,  $\rho$  for density)

First letter	Succeeding letters
A	Analyzer
F	Flow
H	Hand (manual operation)
L	Level
P	Pressure
S	Speed
T	Temperature
Y	Temperature
	Alarm
	Ratio (fraction)
	High
	Low
	Switch
	Transmitter
	General computation

سوالات بخش ۱

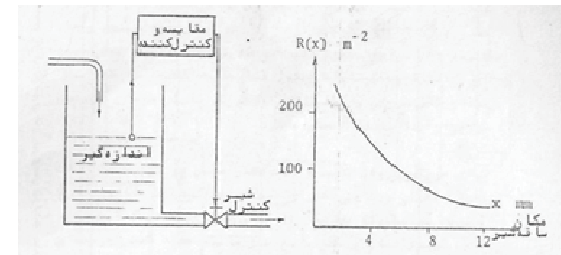
سیستم کنترل ارتفاع شکل دارای مخزنی با سطح مقطع  $4m^2$  در نقطه کار - \* شیر می که توسط ولتاژ کنترل می شود. ارتفاع آب در پشت شیر  $1.8m$ ، دبی خروجی  $0.06m^3/sec$ ،  $g=10m/sec^2$ ، رابطه دبی  $Q = \frac{1}{R(x)}\sqrt{2gH}$ ، رابطه بین ولتاژ تحریک و موقعیت ساقه  $x=V$  و رابطه بین مقاومت شیر  $R$  و موقعیت ساقه را نمودار نشان می دهد. \* بهره کنترلر 10 است.

الف: بلوک دیاگرام و تابع تبدیل ارتفاع به ولتاژ تحریک شیر  $h/v$  را تعیین کنید.

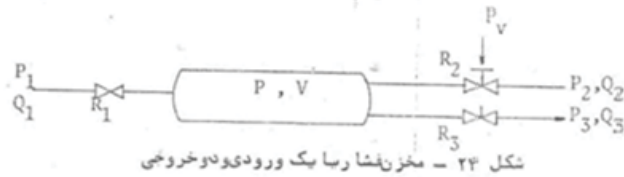
ب: اگر دینامیک شیر را درجه ۱ با بهره ۱ و ثابت زمانی ۲۰ میلی ثانیه باشد، مدل چگونه تغییر می کند.

ج: اگر شیر از نوع سولونوئیدی باشد که در آن از جرم و اصطکاک صرف نظر شود و ضریب فنری  $k$  باشد، مدل  $x/v$  را بدست آورید. حالا مدل چگونه تغییر می کند؟

د: اگر شیر پیچشی باشد و عمل پیچش را موتوری انجام دهد که ممان اینرسی آن  $J$  و اصطکاک آن  $b$  است مدل  $x/v$  آن چگونه است و چگونه مدل سیستم را تغییر می دهد.



۴. معادله فرایند یک مخزن فشار با یک ورودی و دو خروجی (شکل زیر) که تغییرات  $P$  را به تغییرات  $P_2$  و  $P_3$  و  $p_v$  ارتباط دهد را بدست آورید.



شکل ۲۴ - مخزن فشار با یک ورودی و دو خروجی

۵. دینامیک غلظت مخزنی که مایعی با دبی  $Q(m^3/sec)$  و غلظت  $C_1(Kg/m^3)$  وارد آن می شود را بنویسید. حجم مایع درون مخزن ثابت و برابر  $V$  است و مایع درون مخزن به خوبی مخلوط می شود. آیا غلظت قابل کنترل است؟ چه روشی برای کنترل غلظت پیشنهاد می کنید

یک سیستم کنترل ارتفاع مایع شامل \* مخزنی استوانه ای با قطر  $10m$  - \* شیر بادی با رفتار خطی در خروجی مخزن که ارتفاع مایع پشت آن  $7m$ ، دبی خروجی  $56m^3/min$  به ازای فشار هوا روی ساقه  $9ps$  و شیر بسته به ازای فشار هوای  $15psi$  است. \* اندازه گیر با مشخصات 3 تا  $15psi$  به ازای تغییر ارتفاع صفر تا  $15m$  \* کنترلر متناسب بادی با بهره  $5psi/psi$ .

الف: بلوک دیاگرام سیستم و تابع تبدیل  $h/q_i$  را بدست آورید.

ب: اگر دبی ورودی به  $53m^3/min$  تغییر یابد ارتفاع نهایی مایع چقدر می شود.

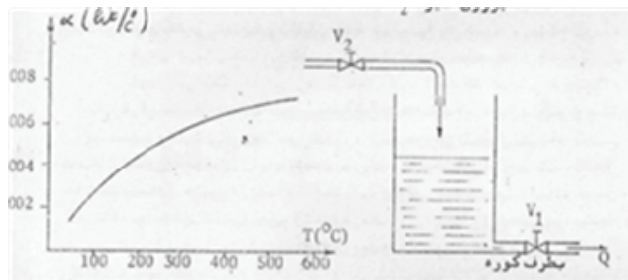
ج: ثابت زمانی پروسس را در دو حالت دبی خروجی  $53m^3/min$  و  $75m^3/min$  در حالیکه ارتفاع  $7m$  است را تعیین کرده نتیجه گیری کنید.

سوالات بخش ۲

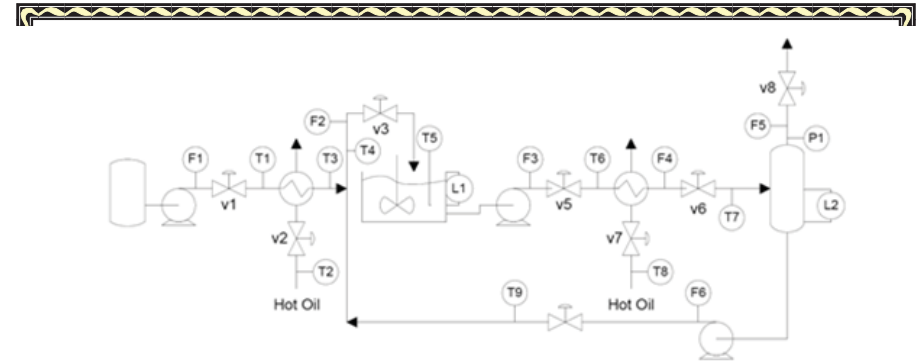
کوره ای که در اثر سوختن مازوت گرم می شود دارای اجزا زیر است: \* مخزن سوخت با سطح مقطع  $2m^2$  \* شیر الکتریکی کنترل سوخت با رابطه  $Q=kH+1.2v$  که در آن  $H$  ارتفاع سوخت مخزن  $1.2m$ ،  $v$  ولتاژ تحریک شیر، دبی عبوری  $lit/min$  است. \* بین مخزن و کوره لوله ای است که  $120$  ثانیه طول می کشد تا سوخت به کوره برسد. د) کوره ای که رابطه بین درجه حرارت آن و دبی سوخت  $\alpha(T)dT/dt=Q$  است. درجه حرارت کار کوره  $400^\circ C$  است. \* و اندازه گیری با بهره  $0.01v/^\circ C$ .

الف: بلوک دیاگرام کامل را رسم و تابع تبدیل  $T/H$  را بدست آورید.

ب: برای کنترل کوره بهتر است کنترل روی شیر  $V_1$  باشد یا  $V_2$



۶. شکل یک راکتور شیمیایی را نشان می دهد. (شکل شبیه سینوس مبدل گرما است)



الف) عملکرد آنرا توضیح دهید

ب) آیا متغیرهای زیر با فیدبک قابل کنترل هستند؟ سنسور مربوطه برای کنترل را مشخص کنید. برای هر یک کلیه موارد را بنویسید سپس روش مرجح را بیان کنید.

- a. T4, reactor feed temperature      b.. T1, feed temperature  
c.. F3, reactor effluent flow      d. L1, reactor liquid level

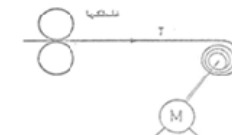
یک سیستم انتقال گرما با مخلوط کردن دارای اجزا زیر است: \* مخزنی با حجم مایع  $V$  دارای مخلوطی یکنواخت با درجه حرارت  $T$  گرمای ویژه  $C$  و وزن مخصوص  $\rho$  \* دو ورودی با مایعاتی با دبی های  $Q1$  و  $Q2$  و درجه حرارت های  $T1$  و  $T2$  و گرمای ویژه های  $C1$  و  $C2$  و وزن مخصوص های  $\rho1$  و  $\rho2$ .  
الف: اگر جداره محفظه کاملاً عایق شده باشد معادله دیفرانسیل فرایند را بنویسید

ب: چگونه می توان درجه حرارت  $T$  را کنترل کرد

ج: اگر جداره خوب عایق نشده باشد و مخلوط مقداری از حرارت خود را به محیط خارج به درجه حرارت  $T3$  بدهد معادله دیفرانسیل جدید را بنویسید. سطح مشترک محفظه با محیط  $A$  و ضریب هدایت جداره  $K$  است. رابطه ثابت زمانی این حالت با حالت قبلی چگونه است؟

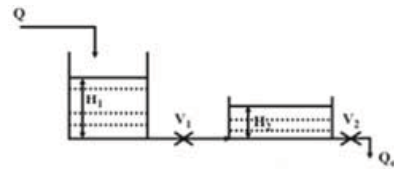
۷. سیستم مکانیکی برای اندازه گیری کشش پیشنهاد و مدل آنرا بدست آورید.

۸. در سیستم شکل زیر موتور  $M$  ورق را پس از نورد شدن به دور قرقره  $D$  می پیچد. توضیح دهید چگونه می توان کشش ورق  $T$  را در هنگام پیچیده شدن به دور قرقره با تنظیم جریان آرمیچر موتور کنترل نمود. معادلات مربوطه را نوشته و بلوک دیاگرام سیستم کنترل را رسم کنید. برای سهولت تغییر شعاع قرقره را در نظر بگیرید.



sim1-1: یک سیستم مایع متشکل از ۲ تانک در شکل نشان داده شده است. در تانک اول سطح مقطع  $5m^2$ ، ارتفاع مایع  $10m$  و دبی خروجی مایع  $0.5m^3/min$  است. در تانک دوم سطح مقطع  $2m^2$ ، ارتفاع مایع  $3m$  و دبی

خروجی مایع  $0.5m^3/min$  است. خروج مایع از هر دو تانک laminar است. اگر دبی مایع ورودی  $0.1m^3/min$  تغییر کند، ارتفاع مایع در تانک ۲ را رسم کنید. (از برنامه زیر می توانید استفاده کنید)



```
function sim1_1
close all; clear all
tspan=[0:1:80]; a1=4; a2=1;
init=[0 0];
[T,Y]=ode45(@dynamic,tspan,init);
function dhdt=dynamic(t,x)
dhdt=[(1/c1)*(1-x(1)-x(2))/R1];...
(1/c2)*((x(1)-x(2))/R1-x(2)/R2)];
end
plot(T,Y(:,2))
hold on
plot(T,Y(:,1),'r.')
legend('Tank 2 A=1','Tank 1 A=4'); xlabel('Time'); ylabel('Height');
end
```



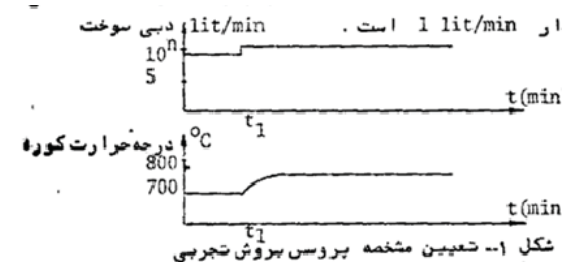
## مدلسازی تجربی

برای کنترل فرایندها در اختیار داشتن مدل آنها لازم است. ولی همیشه نمی توان ( و یا مشکل است که) برای آن مدل تحلیلی بدست آورد. از اینرو از روش تجربی پارامترهای مدل تخمین زده می شود و یا حتی اینکه برای آنها مدل عمومی تقریب و پارامترهای آن تخمین زده می شود. مدل تقریبی که برای سیستمها در کنترل صنعتی در نظر گرفته می شود مدلهای درجه ۱ یا ۲ با تاخیر یا بدون تاخیر است.

$$G(s) = \frac{K}{(1+T_1s)(1+T_2s)} e^{-sL}$$

این مدلها می توانند رفتار بیشتر سیستمهای صنعتی را مدل کنند. برای تخمین پارامترهای این مدل، ورودی فرایند اندکی تغییر داده شده و خروجی بدست می آید. از نوع واکنش سیستم به ورودی مدل تقریب زده می شود.

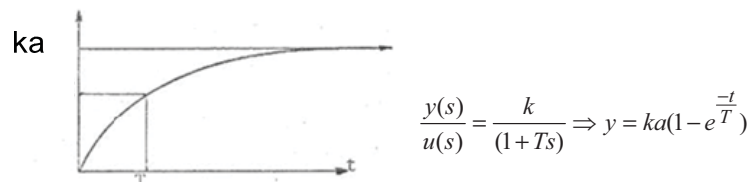
مثال: کوره ای در شرایط عادی 10lit/min سوخت ورودی دریافت می کند و درجه حرارت آن 700°C است. مشخصه این فرایند را بدست آورید.



برای تعیین مشخصه، دبی سوخت در لحظه  $t_1$  بصورت پله از 10lit/min به 11lit/min تغییر داده می شود. در نتیجه دمای کوره بعد از تغییر به 800°C می رسد. شکل تغییر ورودی و تغییر در خروجی را نشان می دهد.

## ۱-۳ تقریب فرایند با مدل درجه ۱

پاسخ پله سیستم درجه ۱ اکیپونانسیلی است که در شکل نشان داده شده است



که در آن  $K$  بهره سیستم،  $T$  ثابت زمانی و  $a$  دامنه ورودی است.

در تقریب فرایندها ۲ حالت ممکن است وجود آید که مورد بررسی قرار می گیرند.

## A. پاسخ پله سیستم درجه ۱ بدون محدودیت زمانی

در این حالت از طریق اعمال ورودی پله به فرایند می توان مشخصه فرایند را بدون محدودیت زمانی بدست آورد

**تعیین بهره:** برای تعیین بهره، مقدار ماندگار نهایی خروجی به دامنه ورودی تقسیم می شود.

$$K = \frac{y_{\infty}}{a} = \frac{aK}{a}$$

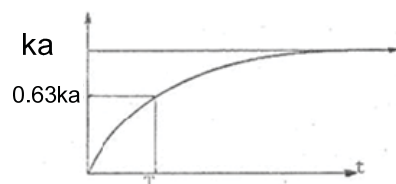
**تعیین ثابت زمانی:** برای تعیین ثابت زمانی از روشهای زیر می توان سود برد.

## (۱) روش نقطه ای ۰.۶۳ مقدار نهایی

و برای تعیین ثابت زمانی فرایند با توجه به رابطه مقدار خروجی در  $t=T$  می توان اقدام کرد.

$$y = ka(1 - e^{-\frac{t}{T}}) = 0.63ak$$

بنابر این،  $T$  برابر مدت زمانی است که خروجی به به ۰.۶۳ مقدار نهایی خود برسد. شکل این موضوع را نشان می دهد



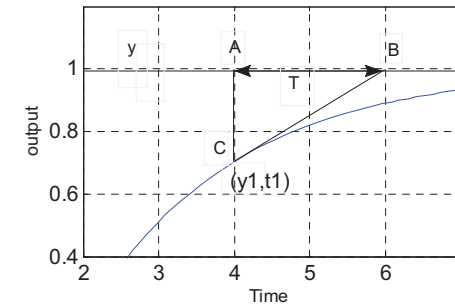
## (۲) روش خط مماس بر نمودار

اگر از هر نقطه‌ای از منحنی، مثل  $C$  در زمان  $t_1$  خطی بر آن مماس گردد، این خط، خط مقدار نهایی را در نقطه ای مثل  $B$  قطع می کند. همچنین اگر از  $C$  خطی عمود بر خط مقدار نهایی کشیده شود آنرا در نقطه‌ای مانند  $A$  قطع می کند،  $AB$  برابر ثابت زمانی است. برای اثبات، مقدار خروجی و مشتق آن در  $t=t_1$  را می نویسیم.

$$\begin{cases} y_1 = y_{\infty}(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}) \\ \dot{y}_1 = \frac{y_{\infty}}{T} e^{-\frac{t_1}{T}} \end{cases} \Rightarrow \dot{y}_1 = \frac{y_{\infty}}{T} \frac{y_{\infty} - y_1}{y_{\infty}} = \frac{y_{\infty} - y_1}{T}$$

از طرفی از شکل، رابطه شیب خط را نیز می توانیم بنویسیم

$$\dot{y}_1 = \frac{y_{\infty} - y_1}{T} = \frac{AC}{AB} = \frac{y_{\infty} - y_1}{AB} \Rightarrow T = AB$$



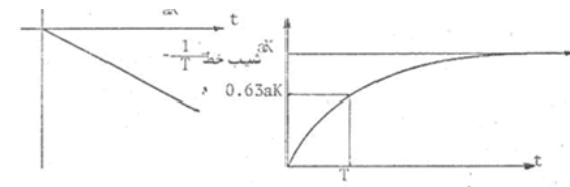
تعیین ثابت زمانی با خط مماس بر پاسخ سیستم درجه ۱

### ۳) روش تقریب با خط

در روشهای قبلی مقدار  $T$  بر اساس مقادیر نقاطی از منحنی بدست آمد، که در صورت نویزی بودن خروجی، تقریب ثابت زمانی مخدوش می گردد. برای رفع این مشکل، در حالت سیگنال غیر تمییز، از روش زیر می توان استفاده کرد. در این روش از رابطه به نحو زیر لگاریتم گرفته می شود تا رابطه اکسپونانسیلی به رابطه خط تبدیل شود.

$$y(t) = ak(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \Rightarrow \ln\left(\frac{ak - y(t)}{ak}\right) = -\frac{t}{T}$$

نقاطی که به این ترتیب از خروجی بدست می آیند روی صفحه مختصات علامت گذاری شده و بر آنها خطی عبور داده می شود. اگر سیگنال خروجی تمییز و سیستم واقعا درجه ۱ باشد، خط از همه نقاط عبور می کند، در غیر اینصورت خط را باید به نحو مناسب از بین آنها عبور داد.

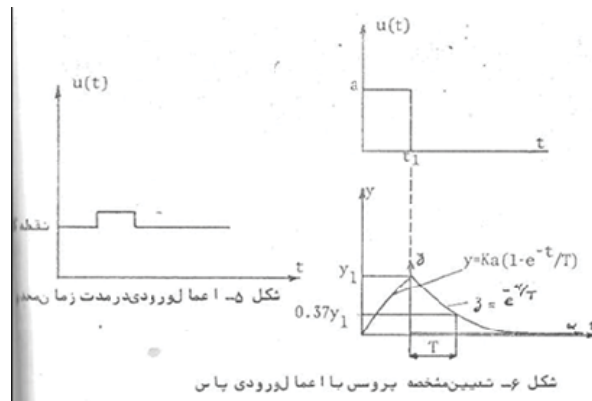


شکل ۳- معیار درجه یک بودن پروسس

شکل ۴- پروسس درجه یک

### B. سیستم درجه ۱ در زمان محدود: ورودی پالسی

اکثر فرایندهای صنعتی کند هستند. بنابر این مدت زیادی طول می کشد تا بعد از اعمال پله به مقدار نهایی خود برسند. خارج کردن فرایند از نقطه کار خود برای این مدت زمان طولانی ممکن است مجاز نباشد. برای رفع این مشکل به جای اعمال پله به فرایند، به آن پالسی با طول محدود اعمال می گردد. در این موارد مناسب است کمیتهها بصورت انحراف از نقطه کار تعریف شوند. با اعمال پالس، سیستم پاسخ معمولی خود را می دهد تا اینکه در زمان  $t_1$  به مقدار  $y_1$  رسیده و در این زمان جهت تغییرات خود را به سمت صفر عوض می کند.



شکل ۵- تعیین منحنی پروسس با اعمال ورودی پالس

اگر فرایند درجه ۱ باشد، خروجی سیستم در زمان  $t=t_1$  برابر است با

$$y = ka(1 - e^{-\frac{t_1}{T}})$$

و در زمان  $t=t_1+T$  برابر است با:

$$y = ak(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}) e^{-\frac{-(t-t_1)}{T}} \Big|_{t=t_1+T} = ak(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}) e^{-1} = e^{-1} y_1 = 0.37 y_1$$

بهره فرایند نیز برابر است با



$$k = \frac{y_1}{a(1 - e^{-t_1/T})}$$

شکل ۶ رفتار سیستم در زمانهای مختلف را نشان می دهد.

### ۲-۳ مدل سیستمهای تاخیردار

#### ۱-۲-۳ تاخیر در فرایندها

تأخیر یکی از مشخصات مهم فرایندهاست که از آن به نام "transportation lag" نامبرده می شود. این از آنرو است که تأخیر در انتقال ورودی به خروجی اندازه گیری شده خود را نشان می دهد. در اکثر فرایندهای صنعتی تأخیر بین اعمال ورودی و شروع تغییرات خروجی وجود دارد. تأخیر می تواند به دلیل محل نصب اندازه گیر دورتر از محل اصلی خود، و یا اینکه ناشی از طبیعت خود فرایند باشد

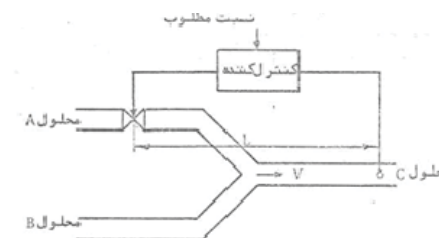
#### A. علل تأخیر: به دلیل موقعیت نصب اندازه گیر:

در بسیاری از فرایندها نمیتوان اندازه گیر را در محل اصلی آن قرار داد. این امر سبب ایجاد تأخیر می شود.

**مثال ۱:** در فرایند نورد فلزات، که قبلاً بحث شدف هدف تنظیم ضخامت ورق است. بعلت کار مکانیکی زیادی که غلطکها برای تغییر ضخامت ورق انجام می دهند و به دلیل درجه حرارت ورق و غلطکها در نورد گرم، برای خنک کردن روی غلطکها آب ریخته می شود که منجر به تولید بخار می گردد. به دلیل گرما و بخار، نصب اندازه گیر ضخامت در دهانه غلطک امکانپذیر نیست، از اینرو اندازه گیری چند متر دورتر از دهانه غلطک انجام می شود. اگر فاصله نصب اندازه گیر تا دهانه غلطک  $L$  و سرعت حرکت ورق  $V$  باشد، ضخامت ورق  $\tau = L/V$  ثانیه دیر تر اندازه گیری می شود. شکل بلوک دیاگرام فرایند نورد را نشان می دهد که تأخیر در آن منظور شده است.

**مثال ۲: کنترل نسبت محلولها در فرایند شیمیایی:** شکل ۹ مثال دیگری از تأخیر به لحاظ موقعیت نصب

اندازه گیر را نشان می دهد.



شکل ۹- تاخیر در اثر اندازه گیری در پروس شیمیایی

در این فرایند دو محلول A و B با یکدیگر مخلوط می شوند. غلظت محلول و یا به عبارتی C در فاصله ای از شیر کنترل اندازه گیری می گردد. مقدار اندازه گیری شده معیاری برای تنظیم دبی محلول A می شود. اندازه گیر را نمیتوان دقیقاً پشت شیر قرار داد، زیرا در آن موقعیت دو محلول فرصت اختلاط کافی را نیافته اند. به ناچار اندازه گیر دورتر نصب می گردد تا دو محلول فرصت کافی برای مخلوط شدن داشته باشند. اگر سرعت محلول  $V$  و فاصله تا اندازه گیر  $L$  باشد، تأخیر  $\tau = L/V$  در سیستم کنترل پدید می آید.

**مثال ۳: تبادل حرارت:** در سیستم تبادل حرارت شکل نیز تأخیر وجود دارد اگر سنسور دقیقاً داخل مخزن به دلایل فیزیکی جای داده نشود.

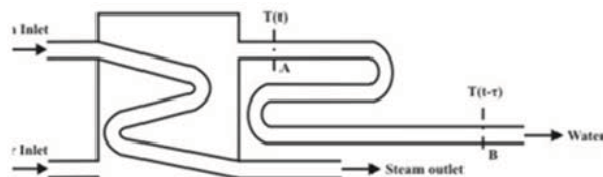


Fig. 5 Example of a time-delay system: a heat exchanger

تأخیر در این سیستم

$$\delta = L / v$$

است که در آن  $L$  فاصله بین نقطه A و B در لوله و  $v$  سرعت عبور مایع درون لوله است. لاپلاس تأخیر

$$e^{-\delta s} F(s)$$

است. تابع تبدیل سیستم تأخیر دار درجه ۱ اینگونه است.

$$G(s) = \frac{K}{(1 + \tau s)} e^{-\delta s}$$

پاسخ پله واحد آنرا شکل نشان می دهد.

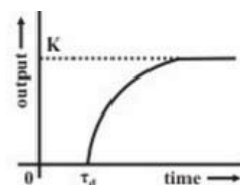


Fig. 6 Unit step response of a 1st order system with time delay

#### B. علل تأخیر: تأخیر زمانی به دلیل ماهیت فرایند

برای مثال در فرایندی که شامل سری تعدادی سیستم درجه ۱ باشد تأخیر وجود دارد.

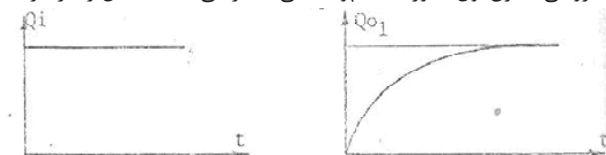
مثال - شکل ۱۰ فرایند مایعی که در آن چندین مخزن به صورت سری قرار گرفته اند بطوریکه دبی خروجی یک مخزن دبی ورودی مخزن بعدی است. مدل هر مخزن درجه ۱ است.

$$\frac{Q_{o1}(s)}{Q_1(s)} = \frac{1}{(1+RCs)} = \frac{1}{(1+Ts)}$$



شکل ۱۰ - تاخیر زمانی بسطت طبیعت پروسس

که در آن C ظرفیت مخزن و R مقاومت شیر کنترلی در مسیر خروجی است. وقتی دبی ورودی بصورت پله ای تغییر کند دبی خروجی مخزن اول بصورت اکسپونانسیلی تغییر می نماید. شکل رفتار آنرا نشان می دهد.



شکل ۱۱ - تغییر دبی Qo1 در اثر تغییر ناگهانی Qi

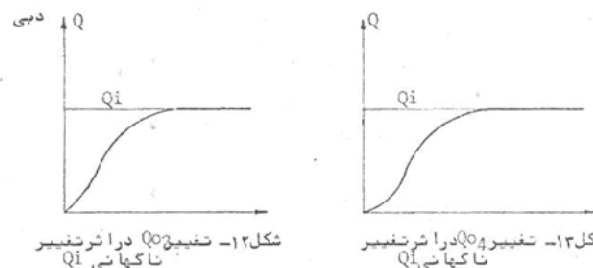
تابع تبدیل خروجی مخزن ۲ به ورودی مخزن ۱ برابر است با

$$\frac{Q_{o2}(s)}{Q_1(s)} = \frac{1}{(1+Ts)^2}$$

و به همین ترتیب خروجی مخزن ۴ به ورودی مخزن ۱ از این قرار می گردد.

$$\frac{Q_{o4}(s)}{Q_1(s)} = \frac{1}{(1+Ts)^4}$$

شکل ۱۳ خروجی مخزن ۴ و مخزن ۲ را نشان می دهد. پیدا شدن تاخیر در نتیجه افزایش تعداد مخازن واضح است.



شکل ۱۲ - تغییر Qo1 در اثر تغییر ناگهانی Qi

شکل ۱۳ - تغییر Qo2 در اثر تغییر ناگهانی Qi

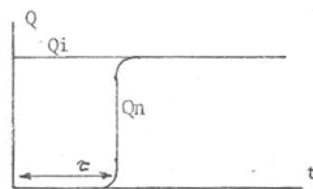
به این ترتیب اگر تعداد مخازن n باشد تابع تبدیل Qon(s) به Qi(s) برابر فرمول زیر می شود.

$$\frac{Q_{on}(s)}{Q_1(s)} = \frac{1}{(1+Ts)^n}$$

وقتی  $n \rightarrow \infty$  رود با تعریف  $T = \tau/n$  تابع تبدیل را اینگونه می توان نوشت

$$G(s) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{Q_{on}(s)}{Q_1(s)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(1+Ts)^n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(1 + \frac{\tau}{n}s)^n} = e^{-\tau s} \quad (22)$$

یعنی اگر تعداد زیادی سیستم درجه ۱ با ثابت زمانی T بطور سری قرار گیرند، اگر ورودی پله در زمان صفر  $t=0$  به سیستم اول اعمال گردد، مدت زمان  $\tau = nT$  طول می کشد تا اثر ورودی در خروجی ظاهر شود این موضوع در شکل ۱۴ نشان داده شده است. بسیاری از فرایندهای صنعتی بخصوص فرایندهای با پارامترهای گسسته اینگونه هستند.



شکل ۱۴ - تغییر دبی Qn در اثر تغییر ناگهانی دبی Qi

۱-۳ تقریب با مدل درجه ۱ با تاخیر

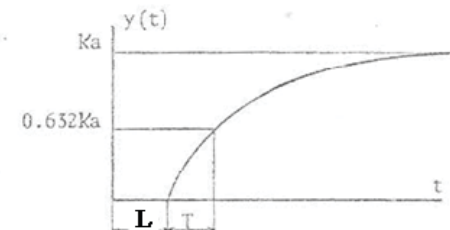
### First Order Plus Time Delay (FOPTD)

روش کار مشابه حالت قبل است با این تفاوت که علاوه بر بهره و ثابت زمانی تاخیر نیز باید بدست آورده شود.

در این قسمت برای تعیین پارامترها ۲ حالت در نظر گرفته می شود

A. پاسخ پله فرایند بطور کامل در دسترس است

سیستم با تاخیر خالص: اگر سیستم دارای تاخیر خالص باشد، بهره  $K$ ، ثابت زمانی  $T$  و تاخیر  $L$  را به سادگی آنگونه که در شکل نشان داده شده است می توان تعیین کرد.



شکل ۱۵-۱ با سیستم درجه یک تاخیر به ورودی پله با دامنه  $a$

تقریب با تاخیر: ولی وقتی درجه سیستم با تاخیر تقریب زده می شود نحوه عمل به اینگونه است

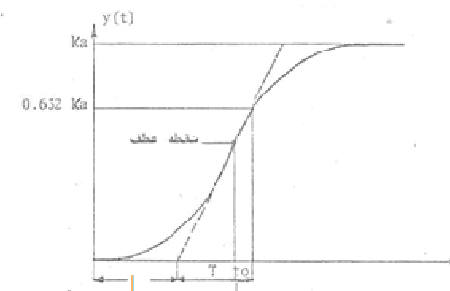
۱- نقطه عطف (تغییر شیب) روی پاسخ پله تعیین شود.

۲- در این نقطه خطی به منحنی مماس می کشند.

۳- محل برخورد خط با محور زمان مقدار تاخیر  $L$  را می دهد.

۴- ثابت زمانی را رسیدن خروجی به ۶۳٪ مقدار نهایی نشان می دهد. اگر تاخیر خالص باشد این زمان با زمانی که خط مماس مقدار نهایی را قطع می کند برابر است

۵- بهره از حاصل تقسیم خروجی نهایی به دامنه پله ورودی قابل تعیین است.



می توان نشان داد که این تقریب معیار

$$Q = \int_0^{\infty} [y(t) - \hat{y}(t)]^2 dt$$

را حداقل می کند که در آن  $y(t)$  خروجی واقعی و  $\hat{y}(t)$  خروجی سیستم تقریبی است. برای رفع مشکل رسم خط مماس بر نقطه عطف از فرمولهای زیر می توان استفاده کرد

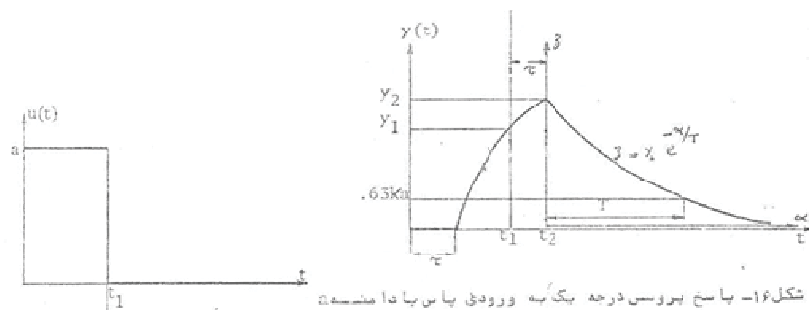
$$K = \frac{y_{\infty}}{A} \quad T = 1.5(t_{0.63} - t_{0.28}) \quad L = t_{0.63} - T$$

در این روابط به جای رسم خط مماس زمانهای مزبوط به 0.63 و 0.28 مقدار نهایی تعیین می گردد و سپس  $L$  و  $T$  بدست می آید.

مدل پارامتری درجه ۱ (FOPTD) که صحبت شد علیرغم اینکه بطور دقیق رفتار سیستم را منعکس نمی کند بطور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد.

### B. مدت انجام آزمایش محدود: تحریک پالسی

در این موارد به جای اعمال پله به فرایند به آن پالس با عرض  $t_1$  اعمال می شود و خروجی ثبت می گردد. به دلیل تاخیر، فرایند بعد از مدتی به ورودی پاسخ می دهد که از آن تاخیر قابل تعیین است. به دلیل تاخیر، بعد از زمان  $t_1$  همچنان خروجی به حرکت خود ادامه می دهد تا اینکه در زمان  $t_1 + L$  به مقدار  $y_2$  میرسد و از این زمان است که جهت حرکت آن معکوس می شود. نحوه تعیین ثابت زمانی  $T$  در شکل نشان داده شده است. مقدار  $T$  برابر با زمانی است که خروجی  $y_2$  را ترک و به  $0.37y_2$  می شد.



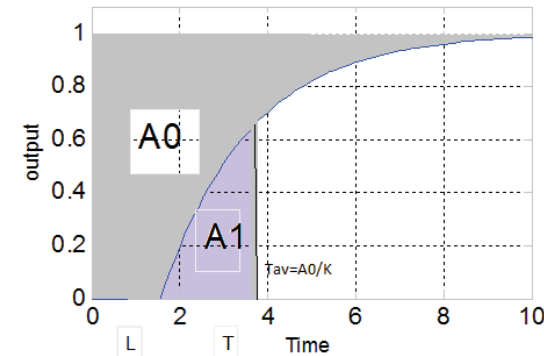
شکل ۱۶-۱ پاسخ پالس درجه یک به ورودی پالس با دامنه  $a$

### C. محاسبه پارامتر بر اساس سطح زیر منحنی

در روشهای توضیح داده شده، مقادیر پارامترها بر اساس مقدار نقطه ای رفتار خروجی محاسبه می شد که بسیار حساس به نویز است. روش مبتنی بر سطح زیر منحنی فاقد این مشکل است.

۱) ابتدا بهره  $K$  از مقدار نهایی نمودار تعیین می گردد.

۲) سپس  $A_0$  (مساحت بالای منحنی بین مقدار نهایی و نمودار پاسخ پله) تعیین و  $T_{ar} = A_0/K$  محاسبه می گردد. در این رابطه  $T_{ar}$  زمان Average residence نامیده می شود.



**Figure 2.10** Step responses and Nyquist curves of the process  $G(s) = 1/(s+1)^8$  (solid line) and the three-parameter model  $G_{3c}(s)$  (dashed line).

۱: بهره  $K=1$  از تقسیم مقدار نهایی نمودار بر دامنه ورودی بدست می آید.

۲: مقدار تاخیر  $L=4.3$  از تقاطع خط مماس در نقطه عطف به منحنی با محور افقی نتیجه می شود.

۳: مقدار ثابت زمانی  $T=2$  از عدد گذاری روی منحنی یا پاسخ پله  $s(t)$  بدست می آید. برای این منظور نقطه  $s(8.6)=0.63$  در رابطه قرار داده شده است. شکل پاسخ پله و نمودار نایکوئیست سیستم اصلی و تقریبی را نشان می دهد

$$G_{3c}(s) = \frac{1}{(1+2.0s)^2} e^{-4.3s}$$

### ۳-۳ مدل ۴ پارامتری

تقریب بهتر پاسخ S shape را با مدل زیر می توان بدست آورد

$$G(s) = \frac{K}{(1+sT_1)(1+sT_2)} e^{-sL}$$

مدل دارای ۴ پارامتر  $K$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  و  $L$  است. پارامترهای سیستم اینگونه بدست می آیند.

۱- بهره  $K$  از تقسیم مقدار نهایی خروجی به مقدار نهایی ورودی مانند حالت قبل بدست می آید.

۲- پارامتر  $L$  مانند حالت FOPTD بدست می آید.

۳- بدست آوردن ۲ ثابت زمانی مدل با عدد گذاری در رابطه پاسخ پله بدست می آید.

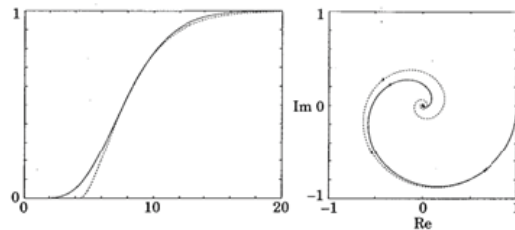
$$s(t) = K \left( 1 + \frac{T_2 e^{-(t-L)/T_2} - T_1 e^{-(t-L)/T_1}}{T_1 - T_2} \right) \quad T_1 \neq T_2$$

$$s(t) = K \left( 1 - \left( 1 + \frac{t-L}{T} \right) e^{-(t-L)/T} \right)$$

مثال: سیستم زیر را در نظر بگیرید

$$\frac{1}{(s+1)^8}$$

که نمودار پاسخ پله آن در شکل نشان داده شده است را با SOPTD تقریب بزنید



از طرفی مساحت  $A_1$  که سطح زیر منحنی تا  $T_{ar}$  است تعیین می شود. برای سیستم

$$G(s) = \frac{K}{(1+Ts)} e^{-sL}$$

مقدار  $A_1$  برابر است با

$$A_1 = \int_0^{T_{ar}} s(t) dt = \int_0^T K(1 - e^{-t/T}) dt = KTe^{-1}$$

ثابت زمانی و تاخیر برابرند با:

$$L = T_{ar} - T = \frac{A_0}{K} - \frac{eA_1}{K} \quad T = \frac{eA_1}{K}$$

محاسبه پارامتر بر اساس روش Moment، روش دیگری است که برای محاسبه بهتر پارامترهای مدل ممکن است استفاده گردد. در روش اخیر، ورودی می تواند اختیاری باشد.

### ۲-۳ مدل ۳ پارامتری درجه ۲

#### Second Order Plus Time Delay(SOPTD)

مدل ۳ پارامتری درجه ۲ Second Order Plus Time Delay(SOPTD) زیر را در نظر بگیرید

$$G(s) = \frac{K}{(1+Ts)^2} e^{-sL}$$

۱: بهره  $K$  از تقسیم مقدار نهایی نمودار بر دامنه ورودی بدست می آید.

۲: مقدار تاخیر  $L$  از تقاطع خط مماس به نقطه عطف نمودار پاسخ پله با محور افقی نتیجه می شود.

۳: مقدار ثابت زمانی  $T$  از عدد گذاری روی منحنی یا پاسخ پله  $s(t)$  بدست می آید. پاسخ پله سیستم برابر است با:

حل این مسئله ۲ معادله ۲ مجهول بصورت عددی امکان پذیر است.

مثال ۴.۳: برای سیستم

$$\frac{1}{(s+1)^8}$$

که پاسخ پله آن در شکل داده شده است مدل ۴ پارامتری تقریب بزیند.

۱- بهره  $K=1$  از تقسیم مقدار نهایی خروجی به مقدار نهایی ورودی مانند حالت قبل بدست می آید.

۲- پارامتر  $L=4.3$  مانند حالت FOPTD بدست می آید.

۳- ثابت زمانهای  $T_1$  و  $T_2$  را از عدد گذاری در نمودار می توان بدست آورد. برای مثال  $s(6.5) = 0.33$  و

$s(8.9) = 0.67$  دو نقطه از نمودار هستند که در پاسخ پله مدل

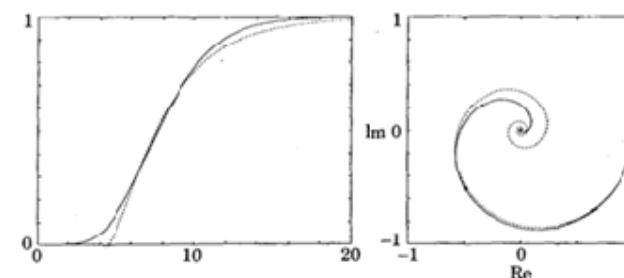
$$s(t) = K \left( 1 + \frac{T_2 e^{-(t-L)/T_2} - T_1 e^{-(t-L)/T_1}}{T_1 - T_2} \right) \quad T_1 \neq T_2$$

قرار داده می شوند. حل مسئله فقط با روش عددی یا گرافیکی امکانپذیر است که تا  $T_1=0.93$  و  $T_2=3.2$  را

نتیجه می دهد.

$$G_{4a}(s) = \frac{1}{(1+0.93s)(1+3.2s)} e^{-4.3s}$$

شکل 2.11 پاسخ پله سیستم را نشان می دهد.



**Figure 2.11** Step responses and Nyquist curves of the process  $G(s) = 1/(s+1)^8$  (solid line) and the four-parameter model  $G_{4a}(s)$  (dashed line).

روشهای گرافیکی تعیین پارامترها وقتی کامپیوتر وجود ندارد مفید است. در صورت دسترسی به کامپیوتر امکان تقریب بهتر برای مدل وجود دارد. مثال زیر نمونه ای از آن است.

مثال ۵.۳

۴ پارامتر مدل سیستم مثال قبل با استفاده از روش بهینه سازی حداقل مربعات (Least Squares (LS محاسبه شد. هدف برنامه آن بود که تطبیق بین سیستم اصلی با مدل تقریبی در محدوده ای که پاسخ

فرکانسی فاز بین  $90^\circ$  تا  $180^\circ$  دارد بیشتر باشد (تا پایداری رفتار حلقه بسته آنها بیشتر مشابه باشد). مدل زیر بدست آمد.

$$G_{4b}(s) = \frac{1.05}{(1+2.39s)^2} e^{-3.75s}$$

۴-۳ مدل برای سیستمهای ترم انتگرال دار

در سیستمها با مد انتگرالی، روشهای قبلی قابل استفاده نیست و باید روش مناسب پیدا کرد.

الف) اعمال پالس

پاسخ ضربه سیستم انتگرال دار زیر

$$G(s) = \frac{K}{s(1+Ts)} e^{-sL}$$

S shape و مشابه پاسخ پله سیستم FOPTD است. از اینرو اگر به این سیستم پالس با دامنه واحد و زمان

کوتاه  $(S.G(s)=G_1(s))$  اعمال گردد پاسخ S shape بدست می آید که مشخصات سیستم زیر را ارائه می کند.

$$G_1(s) = \frac{K}{(1+Ts)} e^{-sL}$$

برای داشتن مدل اصلی،  $G_1(s)$  را در  $1/s$  ضرب و جهت تصحیح بهره، به مدت زمان عرض پالس تقسیم کنید.

$$G(s) = \frac{1}{s\tau} G_1(s) = \frac{K}{s\tau(1+Ts)} e^{-sL}$$

سیستمی که اینگونه بدست می آید به خوبی سیستم اصلی را تقریب می زند. ضروری است که عرض پالس  $\tau$

خیلی کوچکتر از تاخیر و کوچکترین ثابت زمانی سیستم باشد.

ب) پاسخ پله

تقریب بهتر را اینگونه می توان بدست آورد.

$$G(s) = \frac{K}{s(1+Ts)} e^{-sL}$$

پاسخ پله مدل برابر است با:

$$s(t) = K \left( t - L - T \left( 1 - e^{-(t-L)/T} \right) \right)$$

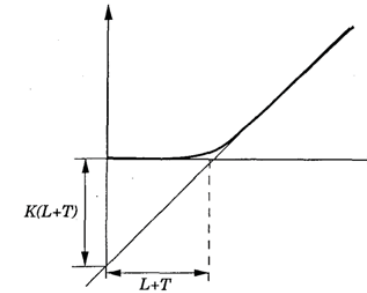


Figure 2.13 Graphical determination of a three-parameter model for an integrating process.

الف) خطی به نمودار مماس می گردد. محل تقاطع آن با محور حقیقی  $T_{ar} = L + T$  و محل تقاطع آن با محور عمودی،  $k = -s(0)/T_{ar}$  است. در نتیجه  $s(0) = -k(L+T)$  است. در نتیجه  $s(L+T)$  در رابطه پاسخ پله صدق داده می شود.

$$s(L+T) = KTe^{-1}$$

در نتیجه T

$$T = \frac{s(L+T)}{K} e^1$$

و متعاقبا  $L = T_{ar} - T$  بدست می آید.

### ۵-۳ مدل برای سیستمهای نوسانی

سیستمهای نوسانی با تابع تبدیل ۳ پارامتری زیر مدل می شوند

$$G(s) = \frac{K\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$$

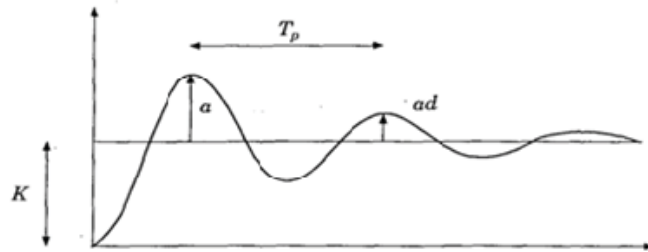


Figure 2.14 Graphical determination of mathematical models for systems with an oscillatory step response.

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi/\log d)^2}} \quad \omega = \frac{2\pi}{T_p \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

مدل دارای ۳ پارامتر  $K$ ،  $\omega$  و  $\zeta$  است. این پارامترها را از پاسخ پله و با استفاده از روابط زیر می توان بدست آورد.

$$d = e^{-2\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}} \quad T_p = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\zeta^2}}$$

$d$  و  $T_p$  از نمودار پاسخ پله بدست می آیند. روشهای دیگری نیز برای تعیین پارامترها وجود دارد. اگر سیستم نوسانی تاخیر  $L$  داشته باشد. مانند مدل‌های قبلی با رسم خط مماس در نقطه عطف و اندازه گیری زمان بین شروع و چند درصد مانده به مقدار نهایی، می توان مقدار تاخیر را بدست آورد.

### ۶-۳ تقریب ریاضی سیستمها

برای تقریب سیستم باید پارامترهای زیر تعیین شوند.

- بهره  $K$
- ثابت زمانی غالب  $\tau_1$
- تاخیر موثر  $L$
- ثابت زمانی دوم  $\tau_2$  برای سیستمهای درجه ۲ که در آنها  $\tau_2 \gg \theta$

حال سیستم زیر را در نظر بگیرید

$$\frac{K \prod_j (1 - T_{j0}^{inv} s) \prod_k (1 + T_{k0}^i s)}{\prod_i (1 + \tau_{i0} s)} e^{-Ls}$$

این سیستم دارای  $I$  قطب ساده و  $z$  صفر ساده سمت راست است و  $k$  صفر ساده سمت چپ است. تقریب این سیستم طبق قواعد زیر اینگونه است.

فرمول ۱: تقریب خطی تاخیر با بسط تیلور

$$e^{-\theta s} \approx 1 - \theta s \text{ and } e^{-\theta s} = \frac{1}{e^{\theta s}} \approx \frac{1}{1 + \theta s}$$

این فرمول نتایج زیر را نیز در پی دارد. در مورد صفر سمت راست اینگونه تقریب زده می شود.

$$(-T_0^{inv} s + 1) \approx e^{-T_0^{inv} s}$$

مثال

$$\frac{-T_0^{inv} s + 1}{\tau_0 s + 1} e^{-\theta s} \approx e^{-\theta_0 s} \cdot e^{-T_0^{inv} s} \cdot e^{-\tau_0 s} = e^{-(\theta_0 + T_0^{inv} + \tau_0) s} = e^{-\theta s}$$

فرمول ۲: تقریب درجه ۱ تاخیر به روش Pade

$$e^{-Ls} \approx \frac{1 - \frac{L}{2}s}{1 + \frac{L}{2}s}$$

فرمول ۳: اغماض از تاخیر

اگر  $\tau > 8L$  باشد می نویسیم

$$\frac{K}{1 + \tau s} e^{-Ls} \approx \frac{K}{1 + \tau s}$$

فرمول ۴: Half rule

فرض کنید سیستم

$$\frac{K}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)(1 + \tau_3 s) \dots} e^{-\theta_0 s}$$

را بخواهیم با فرمول Skogestad به سیستم درجه پائین تری تقریب بزنیم. برای این منظور ثابت زمانهای (تقریب زده شده) از بزرگ به کوچک مرتب می شوند یعنی  $\tau_1 > \tau_2 > \tau_3$  باشد. آنگاه تقریب با سیستم درجه ۱ تاخیر دار FOPTD اینگونه بدست می آید.

- ثابت زمانی مدل تقریبی = اولین ثابت زمانی + نصف ثابت زمانی دوم است.
- تاخیر = نصف ثابت زمانی دوم + بقیه ثابت زمانی هاست

$$e^{-\theta s} / (\tau_1 s + 1)$$

$$\tau_1 = \tau_{10} + \frac{\tau_{20}}{2}; \quad \theta = \theta_0 + \frac{\tau_{20}}{2} + \sum_{i \geq 3} \tau_{i0} + \sum_i T_{j0}^{inv} + \frac{h}{2}$$

(در صورتیکه تقریب دیجیتالی زده شود  $h$ ، پرورد نمونه برداری نیز در رابطه لحاظ می شود). جمله  $T^{inv}$  مربوط به صفرهای سمت راست است.

اگر فرایند را با سیستم درجه ۲ با تاخیر بخواهیم تقریب بزنیم، از روابط زیر باید استفاده کرد.

$$\frac{k}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} e^{-\theta s}$$

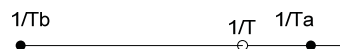
$$\tau_1 = \tau_{10}; \quad \tau_2 = \tau_{20} + \frac{\tau_{30}}{2};$$

$$\theta = \theta_0 + \frac{\tau_{30}}{2} + \sum_{i \geq 4} \tau_{i0} + \sum_j T_{j0}^{inv} + \frac{h}{2}$$

فرمول ۵: تقریب یک جفت صفر و قطب سمت چپ

ابتدا ثابت زمانی قطبها را از بزرگ به کوچک از راست به چپ به ترتیب بنویسید. در صورتیکه فرایند خود دارای تاخیر است برای آن قطب معادل تاخیر با ثابت زمانی  $\theta_0$  در نظر گرفته در موقعیت مناسب بین قطبها جای دهید. سپس صفر با بزرگترین ثابت زمانی  $T$  را در موقعیت مربوطه خود جای دهید.

حالت ۱: عموماً صفر با قطب نزدیک سمت راست تقریب زده می شود مانند شکل زیر که در آن صفر  $T$  و قطب  $Ta$  ترکیب می شوند



روابط تقریب از این قرارند.

$$\frac{T_0 s + 1}{\tau_0 s + 1} \approx \begin{cases} T_0 / \tau_0 & \text{for } \tau_0 \geq T_0 \geq 5\theta \quad (\text{Rule T2}) \\ \frac{(\bar{\tau}_0 / \tau_0)}{(\bar{\tau}_0 - \tau_0)s + 1} & \text{for } \bar{\tau}_0 \stackrel{\text{def}}{=} \min(\tau_0, 5\theta) \geq T_0 \quad (\text{Rule T3}) \end{cases}$$

در این رابطه  $\theta$  مقدار تاخیری است که در نهایت به روش half rule برای مدل بدون در نظر گرفتن قطب  $Ta$  بدست می آید. اگر بیش از یک صفر سمت چپ وجود دارد از صفر با بزرگترین ثابت زمانی شروع و به ترتیب یکی یکی برای دیگر صفرها تقریب زده شود.

حالت ۲: در مواردی که دو رابطه زیر همزمان صادق باشند ممکن است صفر  $T$  با قطب  $Tb$  تقریب زده شود

$$T_0^2 < \tau_{0A} \tau_{0B} \quad T_0 < 1.6 \tau_{0B}$$



از روابط زیر استفاده گردد

$$\frac{T_0 s + 1}{\tau_0 s + 1} \approx \begin{cases} T_0 / \tau_0 & \text{for } T_0 \geq \tau_0 \geq \theta \quad (\text{Rule T1}) \\ T_0 / \theta & \text{for } T_0 \geq \theta \geq \tau_0 \quad (\text{Rule T1a}) \\ 1 & \text{for } \theta \geq T_0 \geq \tau_0 \quad (\text{Rule T1b}) \end{cases}$$

(ج) بقیه قطبها، ثابت زمانی مدل و تاخیر جدید  $\theta$  بر اساس half rule را می سازند.

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)(0.2s+1)}$$

با  $K=1$ ,  $\theta=0.2/2=0.1$  و  $\tau=1+0.2/2=1.1$  بصورت زیر تقریب زده می شود

$$\tilde{G}(s) = \frac{1}{1.1s+1} e^{-0.1s}$$

مثال: سیستم زیر را در نظر بگیرید

$$G(s) = \frac{K(-0.1s+1)}{(5s+1)(3s+1)(0.5s+1)}$$

تقریب این سیستم بر اساس بسط تیلور.

$$-0.1s+1 \approx e^{-0.1s} \quad \frac{1}{3s+1} \approx e^{-3s} \quad \frac{1}{0.5s+1} \approx e^{-0.5s}$$

برابر تابع تبدیل زیر می گردد.

$$\tilde{G}_{TS}(s) = \frac{K e^{-0.1s} e^{-3s} e^{-0.5s}}{5s+1} = \frac{K e^{-3.6s}}{5s+1}$$

اما تقریب این سیستم بر اساس فرمول Skogestad اینگونه محاسبه خواهد شد.

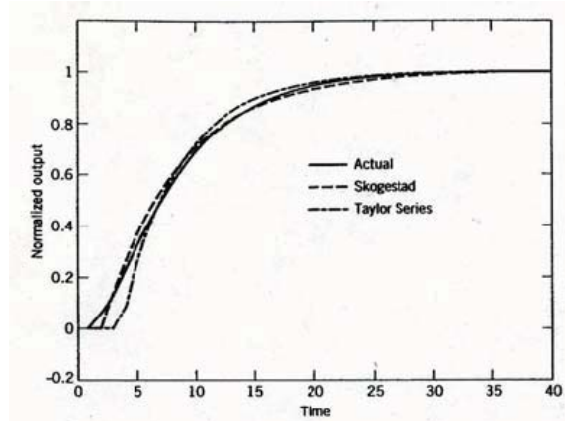
$$\tau = 5 + 0.5(3) = 6.5.$$

$$\theta = 1.5 + 0.1 + 0.5 = 2.1$$

که به فرمول زیر می رسد

$$\tilde{G}_{Sk}(s) = \frac{K e^{-2.1s}}{6.5s+1}$$

شکل پاسخ پله ۳ سیستم را نشان می دهد.



مثال: سیستم زیر را در نظر بگیرید

$$G(s) = \frac{2(15s+1)}{(20s+1)(s+1)(0.1s+1)^2}$$

ابتدا صفر سمت چپ را با قانون T2 تقریب می زنیم.

$$\frac{2(15s+1)}{20s+1} = 2 * 0.75 = 1.5$$

سپس مقدار ثابت زمانی و تاخیر را بدست می آوریم.

$$\theta = \frac{0.1}{2} + 0.1 = 0.15; \quad \tau_1 = 1 + \frac{0.1}{2} = 1.05$$

$$G(s) = \frac{2(15s+1)}{(20s+1)(s+1)(0.1s+1)^2} \approx \frac{1.5}{(1.05s+1)} e^{-0.15s}$$

یا تقریب با مدل درجه ۲ تاخیر دار

$$k = 1.5; \theta = \frac{0.1}{2} = 0.05; \tau_1 = 1; \tau_2 = 0.1 + \frac{0.1}{2} = 0.15$$

$$G(s) = \frac{2(15s+1)}{(20s+1)(s+1)(0.1s+1)^2} \approx \frac{1.5}{(1s+1)(0.15s+1)} e^{-0.05s}$$

مثال تقریب سیستم

$$G(s) = \frac{K(1-s)e^{-s}}{(12s+1)(3s+1)(0.2s+1)(0.05s+1)}$$

با سیستم FOPTD اینگونه است



$$G(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)} e^{-\theta s}$$

$$\theta = 1 + \frac{3.0}{2} + 0.2 + 0.05 + 1 = 3.75$$

$$\tau = 12 + \frac{3.0}{2} = 13.5$$

و تقریب با سیستم ۴ پارامتری با تاخیر اینگونه می گردد.

$$\tilde{G}(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$$

$$\theta = 1 + \frac{0.2}{2} + 0.05 + 1 = 2.15$$

$$\tau_1 = 12, \quad \tau_2 = 3 + 0.1 = 3.1$$

### ۷-۳ مدل گسسته سیستم پیوسته

از آنجائیکه سیگنال کنترل  $u$  و خروجی  $y$  توسط دستگاههای دیجیتالی ذخیره می شوند و برای محاسبات در دسترس هستند، می توان از روش ذیل که **تثبیت پاسخ پله است** برای تقریب مدل سیستم استفاده کرد. فرض کنید  $h$  پریود نمونه برداری و تاخیر  $L = L_0 < h$  باشد. سیستم FOPTD را در نظر بگیرید

$$G(s) = \frac{K}{1 + sT} e^{-sL}$$

پریود نمونه برداری مناسب برای این سیستمها

$$h \leq 0.05(T + L)$$

می باشد. پاسخ پله این سیستم برابر است با:

$$Y(s) = \frac{1}{s} G(s) \Rightarrow y(t) = K(1 - e^{-\frac{t-L_0}{T}}) \quad t \geq L_0$$

معادل گسسته این پاسخ پیوسته را اینگونه می توان نوشت که  $k=0$  را در بر نمی گیرد.

$$y(kh) = K(1 - e^{-\frac{kh-L_0}{T}}) \quad k \geq 1$$

تبدیل  $z$  تابع  $y(k) = a^{-k}$  برای  $k \geq 1$  برابر است با:

$$Y(z) = \sum_{k=1}^{\infty} (az)^{-k} = \sum_{k=0}^{\infty} (az)^{-k} - 1 = \frac{1}{1 - az^{-1}} - 1$$

تبدیل  $z$  پاسخ پله گسسته برای  $a=1$  برای جمله اول و  $a=e^{h/T}$  برای جمله دوم برابر است با:

$$Y(z) = K \left( \frac{1}{1 - z^{-1}} - 1 \right) - K e^{L_0/T} \left( \frac{1}{1 - e^{-h/T} z^{-1}} - 1 \right)$$

تبدیل  $z$  سیگنال پله برابر است با

$$U(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}}$$

حال اگر پاسخ گسسته فرایند به پله به تابع تبدیل گسسته پله تقسیم شود، تبدیل  $z$  معادل سیستم FOPTD بدست می آید. به این روش معادل سازی، روش **step invariance** می گویند.

$$G(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = Y(z) * 1 - z^{-1} =$$

$$\frac{K(1 - e^{-(h-L_0)/T})z^{-1} + K e^{-h/T} (e^{L_0/T} - 1)z^{-2}}{1 - e^{-h/T} z^{-1}}$$

در نتیجه می نویسیم

$$y(k) = ay(k-1) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2)$$

که در آن روابط زیر برقرار است.

$$a = e^{-h/T} \quad b_1 = K(1 - e^{-(h-L_0)/T}) \quad b_2 = Ke^{-h/T}(e^{L_0/T} - 1)$$

حال محدودیت  $L < h$  را که اعمال کرده بودیم بر می داریم تا برای  $L$  اختیاری رابطه بدست آید.

$$y(k) = ay(k-1) + b_1u(k-n) + b_2u(k-n-1)$$

که در آن  $n$  قسمت صحیح و  $L_0$  باقیمانده حاصل تقسیم  $L/h$  است.

$$n = \text{integer}\left(\frac{L}{h}\right) \quad L_0 = \text{residue}\left(\frac{L}{h}\right)$$

این رابطه را با اپراتور شیفت  $q$  اینگونه می توان نوشت. (اپراتور شیفت در میدان زمان است و مشابه مشتق است. لذا با اپراتور  $z$  تفاوت دارد)

$$q^n(q-a)y(kh) = (b_1q + b_2)u(kh)$$

مثال: معادل دیجیتالی برای سیستم زیر بدست آورید. اگر  $h=2$  باشد.

$$G(s) = \frac{1.5}{(4s+1)} e^{-5s}$$

مدل گسسته برابر است با

$$y(kh) = ay((k-1)h) + b_1u((k-n)h) + b_2u((k-n-1)h)$$

که در آن

$$n = \text{integer}\left(\frac{5}{2}\right) = 2 \quad L_0 = \text{residue}\left(\frac{5}{2}\right) = 1$$

$$a = e^{-h/T} = e^{-2/4} \quad b_1 = K(1 - e^{-(h-L_0)/T}) = 1.5(1 - e^{-(2-1)/4})$$

$$b_2 = Ke^{-h/T}(e^{L_0/T} - 1) = 1.5e^{-2/4}(e^{1/4} - 1)$$

معادل گسسته سیستمهای درجه بالا

اگر درجه سیستم بالاتر باشد بازهم رابطه را می توان نوشت

$$y(kh) + a_1y(kh-h) + \dots + a_ny(kh-nh)$$

$$= b_1u(kh-h) + \dots + b_nu(kh-nh)$$

نمایش فشرده رابطه برابر است با:

$$A(q)y(kh) = B(q)u(kh)$$

که در آن  $A$  و  $B$  برابرند با:

$$A(q) = q^n + a_1q^{n-1} + \dots + a_n$$

$$B(q) = b_1q^{n-1} + b_2q^{n-2} + \dots + b_n$$

تابع تبدیل سیستم برابر است با:

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1z^{n-1} + b_2z^{n-2} + \dots + b_n}{z^n + a_1z^{n-1} + \dots + a_n}$$

در این حالت فرمول ضرایب را مشابه آنچه انجام شد باید بدست آورد.

راه دیگر تقریب گسسته رفتار سیستم بر اساس روش Least Squares است. در این روش مدلی گسسته برای سیستم در نظر گرفته می شود که پارامترهای آن مشخص نیستند.

$$A(q)y(kh) = B(q)u(kh)$$

به سیستم اصلی ورودی  $u(kh)$  اعمال گشته و خروجی  $y(kh)$  بدست می آید. هر جفت نمونه ورودی-خروجی در مدل وارد می شود. در نهایت تعدادی معادل خواهیم داشت که پارامترهای مدل مجهولات آن هستند. در الگوریتم LS معیار مجموع مربعات خطا نوشته می شود که باید حداقل شود. معیار خطا بصورت زیر تعریف می گردد.

$$V(\theta) = \sum_{k=n+1}^N e^2(kh)$$

در این رابطه خطا برابر است با

$$e(kh + nh) = A(q)y(kh) - B(q)u(kh), \quad k = 1, \dots, N-n$$

با تعریف  $\theta$  و  $\varphi$

$$\theta = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n)^T$$

$$\varphi_{k-1} = (-y(kh-h) \ \dots \ -y(kh-nh) \ u(kh-h) \ \dots \ u(kh-nh))^T$$

رابطه خطا را اینگونه می توان نوشت

$$e_k = y(kh) - \varphi_{k-1}^T \theta_{k-1}$$

همانطور که دیده می شود، خطا تابع خطی بردار پارامترها  $\theta$  است. در این رابطه بردار  $y(kh)$  و  $\varphi_{k-1}^T$  معلوم هستند. مجهول بردار  $\theta$  است که محاسبه می شود.

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(h) \\ y(2h) \\ \vdots \\ y(Nh) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varphi_0^T \\ \varphi_1^T \\ \vdots \\ \varphi_{N-1}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_{N-1} \end{bmatrix} \Rightarrow E = Y - \Phi\Theta$$

تابع معیار که حداقل می شود برابر است با:

$$V(\Theta) = E^T E = (Y - \Phi\Theta)^T (Y - \Phi\Theta)$$

$$\frac{dV(\Theta)}{d\Theta} = 0 \Rightarrow \Theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y$$

$\Theta$  بردار مقدار بهینه ای است که برای پارامترها بدست می آید.

حل این مسئله به روش بازگشتی نیز امکان پذیر است. برای این امر روابط زیر نوشته می شود.

$$e_k = y(kh) - \phi_{k-1}^T \theta_{k-1}$$

$$P_k = P_{k-1} - \frac{P_{k-1} \phi_{k-1} \phi_{k-1}^T P_{k-1}}{1 + \phi_{k-1}^T P_{k-1} \phi_{k-1}}$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} + P_k \phi_{k-1} e_k$$

برنامه MATLAB برای نوشتن این روابط اینگونه است.

```
teta=zeros(2*n,1); l=length(y); P=100*eye(2*n);
for k=n+1:l
    phi=[-y(k-1),.....,-y(k-n),u(k-1),.....,u(k-n)];
%estimation error
e=y(k)-phi**teta;
%estimate of P
P=P-(P*phi*phi**P)/(1+phi**P*phi)
%parameter update
teta=teta+P*phi*e;
end
```

### ۸-۳ توابع شناسایی سیستم در MATLAB

در سیستمی که دارای تاخیر است و مقدار n معلوم نیست، الگوریتم قبلی خوب جواب نمی دهد. برای بهبود تخمین سیستم، MATLAB برنامه مشابهی به نام pem دارد که تقریب بهتری برای سیستمهای تاخیر دار ارائه می کند.

#### الف) تعریف سیستم

دو سیستم زیر را در نظر بگیرید

$$G1 = \frac{1}{(s+1)^8} \quad G2 = \frac{2e^{-3s}}{1.5s+1}$$

روش معمول تعریف سیستم در MATLAB استفاده از دستورات zpk، tf و مشابه آن است.

```
G1=zpk([],-ones(1,8),1);
```

برای معرفی سیستم تاخیر دار روش ساده تری وجود دارد که از آن می توان استفاده کرد. این دستور برای سیستمهای به شکل زیر است

$$\% \quad 1 + Tz*s$$

$$\% \quad P(s) = Kp * \exp(-Td*s) * \frac{1}{s(1 + Tp1*s)(1 + Tp2*s)}$$

که در آن بهره K، تاخیر Td، یک صفر، ۲ قطب و یک قطب در مبدأ لحاظ شده است. مدل انتخابی توسط زنجیره حروف انجام می شود. مثلا "PID" مدلی است شامل بهره K یک قطب همراه با تاخیر. در حالت کلی مدل "P2DIZ" است که در بر گیرنده بهره، ۲ قطب، تاخیر، انترگرال و صفر است. دستوری که این سیستم را می سازد اینگونه است.

```
G2 = idproc('p1d','Kp',2,'Tp1',1.5,'Td',3);
```

#### ب) تحریک سیستم

برای بدست آوردن خروجی سیستم می توان از دستورات step، impulse و مشابه آن استفاده کرد. برای ورودی خاص از دستورات sim و lsim استفاده می شود. استفاده از این دستورات اینگونه است.

پاسخ به **G2** برای ورودیهای خاص، ابتدا ورودی باید تعریف شود. نحوه تعریف بستگی به نوع سیگنال دارد. مثلا برای ورودی پله نویزی می توان نوشت.

```
t=0:0.4:60;
in=1+0.1*randn(1,length(t));
```

اضافه کردن نویز به ورودی کار شناسایی سیستم را بهبود می بخشد.

خروجی سیستم برای سیستمی که مانند G1 تعریف شده است با دستور lsim بدست می آید.

```
out=lsim(G1,in,t,[],'foh');
```

منظور از "foh" واسط تبدیل آنالوک به دیجیتال First Order Hold است. به جای آن از "zoh" Zero Order Hold نیز می توان استفاده کرد.

برای تمام سیستمها از جمله آنهاهایی که مانند G2 تعریف شده اند از دستور sim می توان استفاده کرد. این دستور ورودی ماتریسی نمی پذیرد لذا با استفاده از دستور iddata ورودی به فرمت مناسب بر گردانده می شود.

```
Ts=0.4; in2=iddata([],in,Ts); out2=sim(G2,in2);
```

#### ج) شناسایی سیستم

سیستم با دستورات زیر بر اساس ورودی و خروجی شناسایی می گردد.

```
out1 = iddata(out,in,Ts);
G3 = pem(out1,'p1d','Td',{'max',10});
```

pem قابلیت زیادی دارد. در اینجا خواسته شده است که مدل "PID" برای اطلاعات ورودی و خروجی شناسایی کند. برای کار کرد بهتر الگوریتم باید سقف تاخیر انتظاری به الگوریتم داده شود که در اینجا عدد ۱۰ در نظر گرفته شده است.

برای شناسایی سیستم G1 کافی است برنامه زیر را اجرا کنید.

```
clear all
```

./سیگنال ورودی

```
Ts=0.4; t=0:Ts:60; in=1+0.1*randn(1,length(t));
```

./سیگنال خروجی

```
G1=zpk([],-ones(1,8),1); out=lsim(G1,in,t,[],'foh');
```

./شناسایی

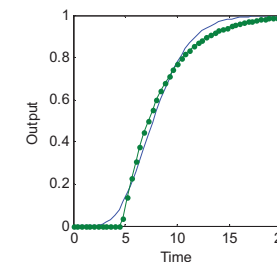
```
inout = iddata(out,in,Ts); G3 = pem(inout,'p1d','Td',{'max',10});
```

./مقایسه عملکرد بین سیستم اصلی G1 و شناسایی شده G3 که برای آن مدل PID لحاظ شده است.

```
in0=iddata([],in,Ts); out3=sim(G3,in0);
plot(t,[out,out3.outputdata]); step(G1,G3)
```

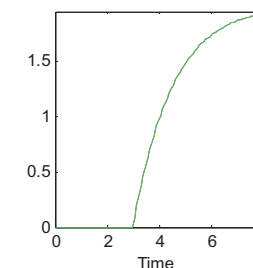


شکل نتیجه شبیه سازی را نشان می دهد.



```
clear all
Ts=0.4;
in0=iddata([],in,Ts);
out=sim(G2,in0);
G3 = pem(inout,'p1d','Td',{max',10});
out3=sim(G3,in0);
plot(t,[out.outputdata,out3.outputdata])
step(G2,G3)
```

شکل نتیجه شبیه سازی را نشان می دهد.



برای آشنایی بیشتر نسخه PDF برنامه **iddemopr** از MATLAB System identification Toolbox را مشاهده و آنرا اجرا کنید. MATLAB دارای برنامه‌ای با قابلیت GUI است که امکان شناسایی سیستم بصورت گرافیکی را فراهم می آورد. این برنامه را با دستور

**ident**

اجرا می شود. نحوه کار با آن از این قرار است.

(۱) ورودی و خروجی مورد نظر را تولید کنید. برای این منظور می توانید از سیگنالهای آزمایشگاهی که بصورت عملی بدست می آورید استفاده کنید و یا اینکه ورودی و خروجی را با شبیه سازی بدست آورید، برای مثال:

```
Ts=0.4;
G1=zpk([],-ones(1,8),1);
in=1+0.1*randn(1,length(t));
out=lsim(G1,in,t,[],'foh')
```

(۲) برنامه را اجرا و **import** را به آن **import** کنید.

**import data>time domain data>{input=in, output=out, sampling time=Ts, data name=mydata}>import**

اگر ورودی و خروجی با **iddata** ساخته شده باشند، برای **import** از **import>data object** استفاده کنید.



۳) my data را از data views به working data و validation data بصورت drag منتقل کنید. این کار بار اول بصورت خود کار انجام می شود.

۴) Time plot را کلیک کنید تا ورودی و خروجی را ببینید.

۵) مدل برای شناسایی را انتخاب و تخمین را انجام دهید. در اینجا مدل PID انتخاب شده است.

**estimate>process model>{click delay, 1 pole, Td bound=10}>estimate**

۶) model output را کلیک کنید تا خروجی اصلی و تخمین زده شده را ببینید.

۷) برای مشاهده رفتار مدل آنرا با drag به LTI viewer منتقل کنید. با کلیک راست روی آن مشخصات مدل را ببینید.

۸) برای پاک کردن می توانید آنها را با drag به trash منتقل کنید.

مثال: برای سیستم  $G(s) = \frac{1}{(s/10+1)^{10}}$  با دستور pem مدل ۴ پارامتری تقریب بزنید.

برای تقریب برنامه زیر را اجرا کنید.

```
clear all
Ts=0.05;%0.05(L+T)=0.05*(0.15+0.85)=0.05
t=0:Ts:4;
in=1+0.4*randn(1,length(t));
```

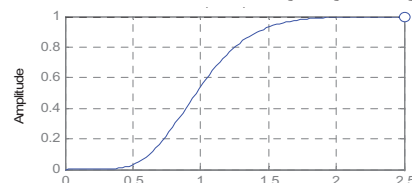
افزودن نویز برای بهبود تقریب ضروری است.

```
in0=iddata([],in,Ts);
G1=zpk([],-ones(1,10)*10,10e9);
out=lsim(G1,in,t,[],'zoh');
out1 = iddata(out,in,Ts);
G3 = pem(out1,'p2d','Td',{max',1});
out3=sim(G3,in0);
figure(1);plot(t,[out,out3.outputdata])
figure(2);step(G1,G3)
```

### سوالات

۱. شکل پاسخ پله سیستم  $G(s) = \frac{1}{(s/10+1)^{10}}$  را نشان می دهد. برای آن مدل‌های تاخیر دار ۳ پارامتری

درجه ۱، ۳ پارامتری درجه ۲ تقریب بزنید



**Sim3-1**: پاسخ پله سیستم اصلی و تقریبهای ۳ پارامتری درجه ۱، ۳ پارامتری درجه ۲ که بدست آورده‌اید و

۴ پارامتری که با **ident** یا دستور pem بدست می آورید را روی یک شکل رسم کنید.

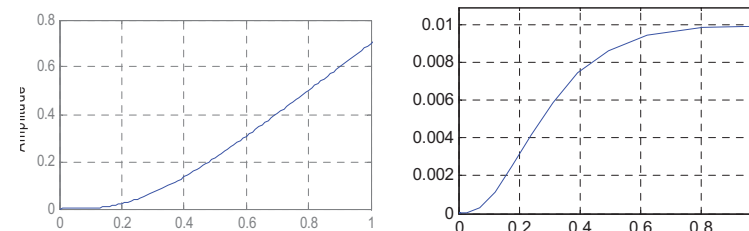
برای نمایش از دستورات زیر می توانید استفاده کنید.

```
G0=zpk([],-ones(1,10)*10,10e9);% main system
G1 = idproc('p1d','Kp',?,'Tp1',?,'Td',?);%FOPTD
G2 = idproc('p2d','Kp',?,'Tp2',?,'Td',?);%SOPTD
G3 = idproc('p2d','Kp',?,'Tp1',?,'Tp2',?,'Td',?);%4 parameter model
step(G0,G1,G2,G3)
```

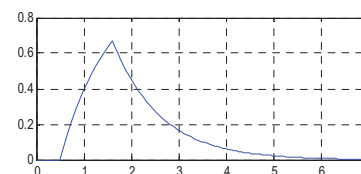
هر دو ثابت زمانی برابرند

۲. یک دماسنج جیوه ای در درجه حرارت 75F اتاق قرار دارد که به مدت ۱ ثانیه در ظرف روغن 350F قرار میگیرد و سپس مجدداً در دمای محیط قرار می گیرد. بعد از ۵ ثانیه از خارج شدن از ظرف روغن درجه حرارت آن 100F است. ضریب انتقال گرما در هوا 1/4 روغن است. ثابت زمانی انتقال گرما در روغن به ترمومتر را تعیین کنید.

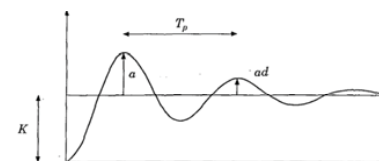
۳. شکلها پاسخ پله واحد و پاسخ پالسی ۰.۰۱ ثانیه سیستم  $G(s) = \frac{1}{s(\frac{s}{10}+1)^3}$  را نشان می دهد، برای آن مدل ۳ پارامتری درجه ۱ تقریب بزنید.



۴. دلیل محدودیتها به سیستم تاخیردار درجه ۱ پالسی با دامنه واحد اعمال گردیده است. شکل پاسخ خروجی را نشان می دهد. مدل سیستم و عرض پالس اعمالی را تعیین کنید.



۵. پاسخ پله واحد سیستمی در شکل نشان داده شده است. مقدار  $d=0.5$  و  $a=1$ ,  $T_p=1$  sec,  $K=2.5$  است. برای این سیستم تابع تبدیل تقریب بزنید.



۶. برای سیستمهای زیر

$$G(s) = \frac{5(7s+1)e^{-2s}}{(50s+1)(10s+1)(s+1)}$$

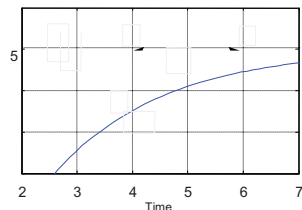
$$g_0(s) = \frac{2(15s+1)}{(20s+1)(s+1)(0.1s+1)^2} \quad G(s) = \frac{5(1.5s+1)e^{-2s}}{(50s+1)(10s+1)(s+1)}$$

مدل FOPTD تقریب بزنید

۷. برای سیستم زیر قرکانس نمونه برداری را تعیین و برای آن معادل دیجیتالی بنویسید.

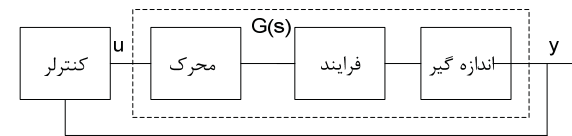
$$G(s) = \frac{5e^{-2s}}{(5s+1)}$$

۸. تابع تبدیل سیستم درجه ۱ با مقدار نهایی ۵ که بخشی از پاسخ پله واحد آن نشان داده شده است را تعیین کنید.



## کنترل پیوسته PID

کنترل به دو حالت دستی و اتوماتیک می تواند صورت گیرد. شکل سیستم کنترل اتوماتیک را نشان می دهد.

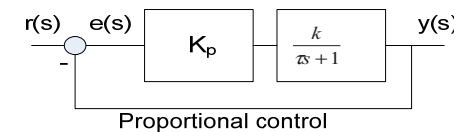


در این طرح کنترلر می تواند هر تابع تبدیل مناسب باشد اما در اکثر موارد ترجیح داده می شود از کنترلرهای کلاسیک استفاده شود این کنترلرها عبارتند از کنترلر P, PI, PD و PID که به شرح آنها می پردازیم.

### ۱-۴ اجزا کنترلر PID

#### A. کنترلر متناسب P Proportional control

تابع تبدیل کنترلر متناسب  $G_c(s) = K$  است. شکل حلقه بسته سیستمی با کنترلر متناسب را نشان می دهد.



تابع تبدیل حلقه بسته عبارت است از:

$$\frac{c(s)}{r(s)} = \frac{KK_p}{1 + \tau s} = \frac{KK_p}{1 + KK_p + \tau s} = \frac{KK_p}{1 + KK_p} \frac{1}{1 + \tau s} \quad \tau' = \frac{\tau}{1 + KK_p}$$

در نتیجه اعمال کنترلر

۱. ثابت زمانی با افزایش k کم می شود

۲. خطای ماندگار نیز با افزایش k کاهش می یابد

$$e(s) = \frac{1}{1 + \frac{KK_p}{1 + \tau s}} \frac{A}{s} = \frac{1 + \tau s}{1 + KK_p + \tau s} \frac{A}{s}$$

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s e(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1 + \tau s}{1 + KK_p + \tau s} \frac{A}{s} = \frac{A}{1 + KK_p}$$

۳. افزایش k در سیستم های درجه بالا ممکن است منجر به نوسان شود.

۴. کنترلر متناسب معمولاً با بهره و حد بالا و پایین خروجی کنترلر تعریف می گردد. اغلب بهره آن نیز با ترم proportional band (Pb) بیان می شود. در صدی از محدوده ورودی مجاز است که در آن رفتار کنترلر خطی است. مقادیر کنترلر متناسب اینگونه با یکدیگر ارتباط دارند.

$$u_{max} - u_{min} = KP_b$$

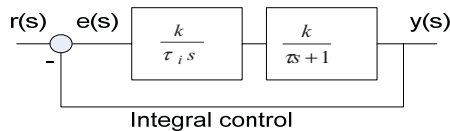
عموماً  $u_{max} - u_{min} = 100\%$  فرض می شود، لذا

$$K = 100/P_b$$

برای مثال اگر بهره ۲ باشد،  $PB = 50\%$  است. کنترلر متناسب بطور لحظه ای عمل می کند یعنی سیگنال کنترل متناسب با سیگنال خطا در همان لحظه است. کنترلر متناسب برای خطاهای بزرگ مانند کنترل on-off عمل می کند.

#### B. کنترلر انتگرالی I Integral control

شکل سیستم با کنترلر انتگرالی را نشان می دهد.



۱. مقدار خطای ماندگار این سیستم با ورودی پله صفر است

$$e(s) = \frac{1}{1 + \frac{K}{\tau_i(1 + \tau s)}} \frac{A}{s} = \frac{\tau_i s(1 + \tau s)}{\tau_i s(1 + \tau s) + K} \frac{A}{s}$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s e(s) = 0$$

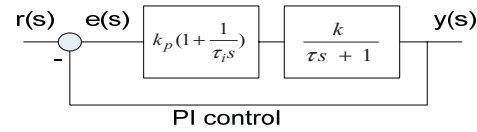
۲. درجه سیستم را بالا می برد، یعنی می تواند سیستم حلقه بسته را ناپایدار کند.

۳. رفتار سیستم را عموماً کند، نوسانی و حتی ناپایدار می کند مگر آنکه طراحی مناسبی انجام شده باشد.

شکل رفتار این سیستم را نشان می دهد.

#### C. کنترلر PI Proportional plus Integral (PI) control

تابع تبدیل این کنترلر در شکل نشان داده شده است.



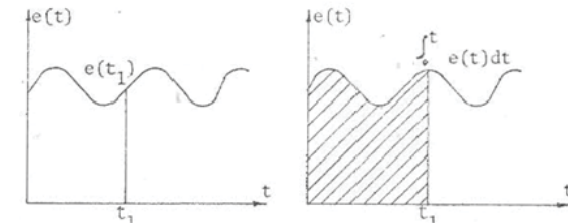
۱. خطای ماندگار پاسخ پله حلقه بسته صفر است

$$\frac{e(s)}{r(s)} = \frac{1}{1 + \frac{KK_p(1 + \tau_i s)}{\tau_i s(1 + \tau s)}} = \frac{\tau_i s(1 + \tau s)}{s^2 \tau \tau_i + (1 + KK_p)\tau_i s + KK_p}$$

۲. با افزایش  $k_p$  مقدار  $k_p$  زیاد می شود و رفتار گذرا بهبود می یابد

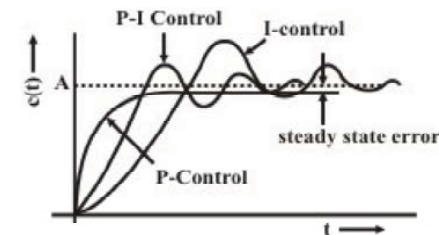
$$s^2 \tau \tau_i + (1 + KK_p)\tau_i s + KK_p = 0; \quad \xi = \left( \frac{1 + KK_p}{2} \right) \sqrt{\frac{\tau_i}{KK_p \tau}} \quad \zeta = \left( \frac{1}{2} \right) \sqrt{\frac{\tau_i}{K \tau}}$$

۳. کنترلر I زمانی استفاده می شود که خطا تغییرات دارد ولی مقدار متوسط آن حدود صفر است. انتگرال گیر سبب صفر کردن خطای خروجی در حال تحریک پله یا بی اثر کردن اختلال پله ای است.
۴. بر خلاف کنترلر متناسب که بصورت لحظه ای عمل می کند، کنترلر انتگرالی از گذشته تا حال خطا انتگرال گرفته و بر اساس آن عمل می کند.



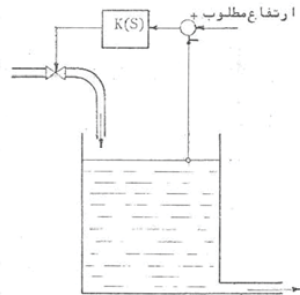
الف: کنترل کننده متناسب ب: کنترل کننده انتگرالی

شکل رفتار سیستم در حالت کنترلر P، کنترلر I و کنترلر PI را نشان می دهد.



Comparison among the transient responses with P, I and P-I control

مثال: در پروسس مایع شکل، هدف کنترل ارتفاع مایع در مخزن است.



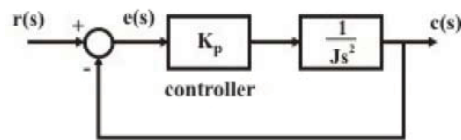
به علت ریزش مایع از لوله ورودی، سطح مایع داخل مخزن متلاطم است. اگر کنترل کننده متناسب باشد، به علت تلاطم مایع، H ارتفاع مایع، e خطای حلقه بسته و در نهایت سیگنال کنترل دچار تغییر می گردند. نتیجه اینکه شیر کنترل مرتب باز و بسته می شود. باز و بسته شدن مداوم شیر سبب فرسودگی آن و علاوه بر آن تغییر دبی مایع ورودی می گردد که این خود به تغییرات ارتفاع مایع داخل تانک دامن می زند. کنترلر PI، از خطا انتگرال می گیرد لذا مقدار متوسط ارتفاع که بسیار کوچک است از کنترلر خارج شده و به شیر اعمال می شود. این تدبیر به آرامش در عملکرد فرایند کمک می کند.

**D. کنترلر PD Proportional plus Derivative (PD) control**

تابع تبدیل کنترلر PD

$$C(s) = K_p(1 + \tau_d s)$$

این کنترلر برای سیستم  $P(s) = \frac{K}{1 + \tau s}$  ظاهراً کار مهمی نمی تواند انجام دهد. اما برای سیستمهای درجه بالا کنترلر PD رفتار گذرا را عموماً بهبود می بخشد. برای مثال به سیستم  $P(s) = \frac{1}{Js^2}$  توجه کنید. تابع تبدیل حلقه بسته این سیستم با کنترلر متناسب



$$\frac{c(s)}{r(s)} = \frac{\frac{K_p}{Js^2}}{1 + \frac{K_p}{Js^2}} = \frac{K_p}{Js^2 + K_p}$$

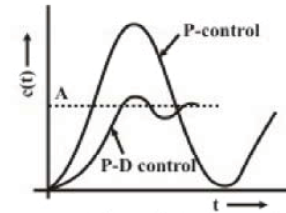
است که معادله مشخصه آن  $Js^2 + K_p = 0$  نشان می دهد که سیستم نوسانی است. با کنترلر PD تابع تبدیل آن

$$\frac{c(s)}{r(s)} = \frac{\frac{K_p(1 + \tau_d s)}{Js^2}}{1 + \frac{K_p(1 + \tau_d s)}{Js^2}} = \frac{K_p(1 + \tau_d s)}{Js^2 + K_p(1 + \tau_d s)}$$

است که معادله مشخصه آن  $Js^2 + K_p \tau_d s + K_p = 0$  نشان می دهد که سیستم پایدار است.

پاسخ پله این سیستم با کنترلر P و PD در شکل نشان داده شده است.





Improvement of transient response with P-D control

کنترلر PID

۱. در مواقعی استفاده می شود که سیستم کند است. در این حالت کنترلر متناسب با تغییرات در خطا عمل می کند. در غیر اینصورت رفتار سیستم مطلوب نخواهد بود. با این تعریف کنترلر مشتقی به رفتار پروسس در آینده پاسخ می دهد.

E. کنترلر PID - Proportional-Integral - Derivative (PID) control

فرمول کنترلر PID و تابع تبدیل آن از اینقرار هستند

$$C(s) = K_p \left( 1 + \tau_d s + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad u(t) = K_p \left[ e(t) + \tau_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right]$$

که در آن

- $K_p$ : بهره
- $T_i$ : reset time
- $T_d$ : Derivative time

هستند. کنترلر PID علیرغم درجه پایین آن کاربرد گسترده ای دارد. در سیستمهای SISO خطی، غیر خطی، تاخیر دار و غیره می تواند استفاده شود. حتی سیستمهای MIMO به سیستمهای SISO تجزیه شده و برای هر حلقه آنها کنترلر PID طرح می شود. کنترلر PID عملکرد robust دارد و از همین رو مقبولیت زیادی پیدا کرده و در کاربردهای صنعتی استفاده می شود.

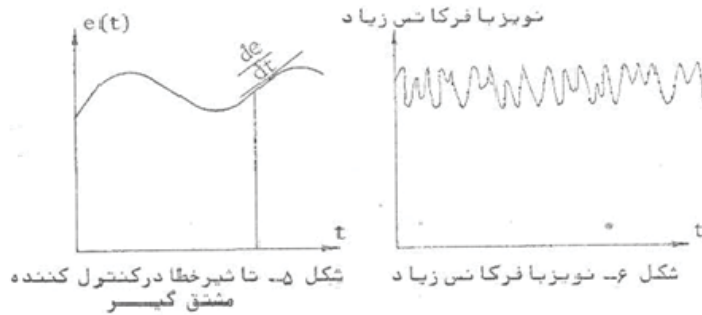
کنترلر PID برای اینکه خوب کار کند باید پارامترهای آن در رابطه با فرایند مورد نظر به مقدار مناسبی تنظیم شوند. به این کار PID tuning می گویند

همیشه لزومی ندارد که هر ۳ پارامتر PID مقدار داشته باشد. مثلا میتواند  $T_d=0$  باشد تا PID عملکرد PI پیدا کند. وجود جمله مشتق گیر در کنترل کننده PID موجب اضافه شدن صفر به حلقه بسته می گردد که پایداری نسبی را بهبود می دهد.

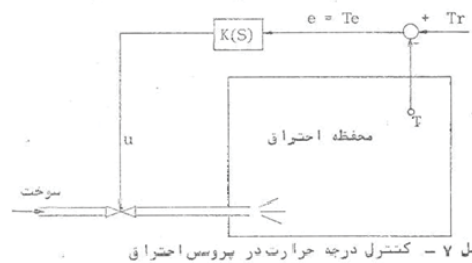
$$C(s) = K_p \left( 1 + \tau_d s + \frac{1}{\tau_i s} \right)$$

برای تشریح بیشتر عملکرد کنترلر PID مثال محفظه احتراق شکل را در نظر بگیرید.

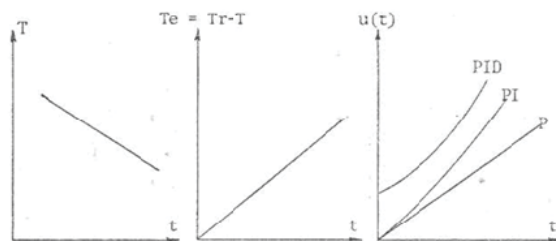
هدف کنترلر درجه حرارت محفظه احتراق است. تغییر مقدار سوخت بعد از مدت زیادی منجر به تغییر درجه حرارت محفظه می گردد. اگر درجه حرارت به هر دلیلی در حال کم شدن باشد، خطا رو به افزایش می گذارد. اگر کنترلر P یا PI استفاده شود، چون در ابتدا خطا کم است مقدار سوخت چندان افزایش پیدا نمی کند و درجه حرارت کوره همچنان کاهش می یابد. ولی اگر در همان ابتدا سیگنال متناسب با تغییرات درجه حرارت به شیر داده می شد از سردتر شدن محفظه جلوگیری می کرد.



شکل ۶-۵ تا شیر خطا در کنترلر مشتق کیبرد  
شکل ۶-۶ نویز با فرکانس زیاد



شکل ۷ - کنترلر درجه حرارت در پروسس احتراق



شکل ۸ - مقایسه کنترلر کننده ها در کنترل درجه حرارت کوره

## ۲-۴ انواع ساختار کنترلر PID

## A. مدل ریاضی کنترلر PID

۱- مدل استاندارد noninteracting که به نامهای الگوریتم ISA یا الگوریتم ایده آل خوانده می شود. در این مدل پارامترهای انتگرال و مشتق تحت تاثیر یکدیگر نیستند.

$$G(s) = K \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right)$$

این مدل می تواند صفر کمپلکس داشته باشد.

۲- مدل کلاسیک، سری یا interacting: کنترلر PID با ساختار ذیل در کنترلرهای تجاری عمومی است

$$G(s) = K \left( 1 + \frac{1}{sT_i} \right) (1 + sT_d)$$

از آنرو این مدل interacting است که پارامترهای نهایی مشتق و انتگرال از پارامترهای مشتق و انتگرال موجود در فرمول تاثیر می گیرند. این کنترل را گفته می شود که ساده تر تنظیم می شود. این کنترلر کپی برداری از کنترلرهای PID نیوماتیکی قبلی است.

۳- مدل موازی: مدل زیر از کنترلر PID نیز وجود دارد

$$G''(s) = k + \frac{k_i}{s} + sk_d$$

این فرم می تواند صفر کمپلکس داشته باشد.

## B. مدل عملیاتی و تجاری کنترلر PID

در کنترلرهای تجاری اطلاعات دقیقی از ساختار کنترلر داده نمی شود تا بتوان بر اساس آن استنتاج کرده و عمل نمود. برای تنظیم کنترلر اطلاعات ساختاری آن ضروری است. اطلاعاتی درباره نحوه فیلتر کردن نویز فرکانس بالا و نحوه اعمال سیگنال مرجع مورد نیاز است. در اینجا به نحوه تنظیم ساختاری که در بعضی از کنترلرهای تجاری استفاده شده است می پردازیم.

۳ فرم عملیاتی کنترلر PID از اینقرارند

$$\begin{aligned} \text{I. } U &= K \left( bY_{sp} - Y + \frac{1}{sT_i} E + \frac{sT_d}{1 + sT_d/N} (cY_{sp} - Y) \right) \\ \text{II. } U &= K' \left( \left( b + \frac{1}{sT_i'} \right) \frac{1 + scT_d'}{1 + sT_d'/N} Y_{sp} - \left( 1 + \frac{1}{sT_i'} \right) \frac{1 + sT_d'}{1 + sT_d'/N} Y \right) \\ \text{III. } U &= K'' (bY_{sp} - Y) + \frac{K_i''}{s} E + \frac{K_d'' s}{1 + sK_d''/(NK'')} (cY_{sp} - Y) \end{aligned}$$

این ساختار با طرح ریاضی PID دارای تفاوتی زیر است.

## محدودیت در بهره جمله مشتقی

برای جلوگیری از تقویت نویز فرکانس بالا درحلقه به ترم مشتق گیر قطبی اضافه شده است. که فرمول ترم D را تغییر داده است.

$$D = -\frac{sKT_d}{1 + sT_d/N} e$$

به این ترتیب بهره در فرکانس بالا به KN محدود می گردد مقدار N بین ۸ تا ۲۰ انتخاب می گردد.

برای بررسی اثر نویز فرکانس بالا به مثال نویز

$$n = a \sin \omega t$$

دقت کنید که مقدار آن بعد از ترم مشتقی برابر می گردد با

$$u_n = KT_d \frac{dn}{dt} = aKT_d \omega \cos \omega t$$

که نشان می دهد دامنه سیگنال کنترل در فرکانسهای بالا بسیار بزرگ می گردد. برای رفع این مشکل، جمله مشتقی بصورت زیر نوشته می شود.

$$D = -\frac{T_d}{N} \frac{dD}{dt} - KT_d \frac{de}{dt}$$

که به معنی اضافه کردن قطب برای محدود کردن بهره در فرکانس بالا است.

## وزندار کردن سیگنال مرجع

تغییر دیگر وجود پارامترهای b و c است که ضریب سیگنال مرجع در ترم P و D هستند.

$$u(t) = K \left( e_p + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(s) ds + T_d \frac{de_d}{dt} \right)$$

خطا برای ترم متناسب

$$e_p = bY_{sp} - y$$

و برای ترم مشتقی

$$e_d = cY_{sp} - y$$

است. خطا برای ترم انتگرال واقعی تعریف می شود تا منجر به خطای ماندگار نشود

$$e = y_{sp} - y$$

کنترلرهایی که به ازای مقادیر متفاوت b و c بدست می آیند، رفتار مشابهی در برابر نویز اندازه گیری و اغتشاش ناشی از بار دارند. ولی رفتار گذرای آنها متفاوت است. برای مثال در b=0 ترم مشتق سری وجود ندارد و فراخیز کم است ولی. با افزایش b مقدار آن زیاد می شود.

پارامتر  $c$  معمولاً صفر در نظر گرفته میشود تا پرش گذرا در خروجی ناشی از تغییر سیگنال مرجع بوجود نیاید. در کنترل زنجیره‌ای استتلا وجود دارد زیرا در این سیستمها سیگنال مرجع را حلقه خارجی کنترل تولید می کند که عموماً دارای پرش نیست. لذا لزومی ندارد که  $c=0$  باشد.

کنترلی که در آن  $b=c=0$  است را IPD می خوانند. و به کنترلی که در آن  $b=1$  و  $c=0$  است، PI-D می گویند. در حالت کلی سیستم کنترل باید شرایط خاصی را تامین کند. پاسخ گذرای خوب، عدم پاسخ به اغتشاش و نویز. در حلقه کنترلی که تمام اینها بر اساس خطای فیدبک می خواهد حل شود، سیستم با یک درجه آزادی می گویند. با وزندار کردن خروجی و سیگنال مرجع سیستمهای با چند درجه آزادی شکل می گیرد که برای انجام ماموریتهای سیستم کنترل انعطاف پذیرتر است.

### C. مدل‌های velocity

به الگوریتمهایی PID که تا به حال صحبت شدند positional algorithm می گویند که در آنها، خروجی سیگنال کنترل کننده است.

در دوران اولیه کنترل که مدارهای الکترونیکی وجود نداشتند انتگرال گیری (1/s) کنترل را موتور می که مستقیماً به شیر کنترل متصل بود انجام می داد. از اینرو مشتق سیگنال کنترل تولید و به موتور اعمال می شد (ترم انتگرال بر عهده محرک که موتور است گذاشته می شد).

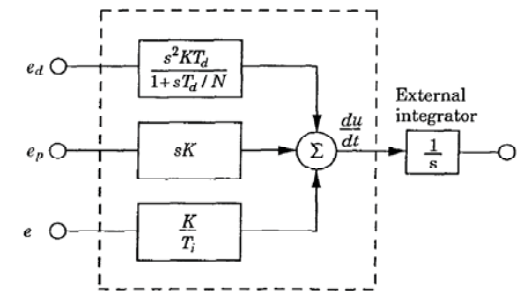


Figure 3.16 Block diagram of a PID algorithm in velocity form.

بعد از این که کنترلرها، الکترونیکی و کامپیوتری شدند، بعضی از سازندگان همچنان ساختار قبلی را حفظ کردند. ساختاری که در آن ابتدا  $du/dt$  تولید و سپس انتگرال گیری صورت می گرفت و از همین رو به نام velocity PID شناخته می شد. در بعضی موارد، انتگرال گیری مانند قبل توسط موتور و در بعضی دیگر توسط مدار الکترونیکی کنترلر صورت می گرفت. این طرح امکان ساده تری برای مقابله با انتگرال وینداپ Integrator wind up و اعمال سوچ نرم پارامترها Bumpless فراهم می آورد. دقت کنید که در حالت ماندگار خروجی  $du/dt=0$  است و تغییر پارامترها یا سوچ به حالت دستی پرشی در سیگنال کنترل ایجاد نمی کند. سیگنال کنترل را خروجی انتگرال گیر (غیر صفر) اعمال می نماید.

پیاده سازی طرح velocity برای کنترلرهایی که ترم انتگرالی ندارند (مانند کنترلر P) به لحاظ کردن ترتیب خاص نیاز دارد که در حالت ماندگار خروجی نهایی کنترلر (انتگرال گیر) صفر نشود.

### ۳-۴ انتخاب مناسبترین کنترلر

#### کنترلر PI

۱. اگر رفتار حلقه باز سیستم مشابه درجه ۱ باشد کنترلر PI کفایت می کند و نیازی به ترم D نیست.
۲. برای سیستمهای درجه بالا اگر کنترلر دقیق مطرح نباشد باز هم PI کفایت می کند تا I خطای ماندگار پله را صفر و P سرعت پاسخ را تنظیم کند.

#### کنترلر PID

در عملکرد سیستم کنترل، مدل فرایند، اشباع محرکها و اغتشاش اثر می گذارند. این ممکن است عجیب به نظر برسد که کنترلی به سادگی PID قادر باشد در این اوضاع حواسته ها را تامین کند. سیستم های صنعتی به خوبی با PID کنترل می شوند مگر آنکه عملکرد فوق العاده‌ای از آنها خواسته شود.

۱. کنترلر PID بیش از ۹۰٪ مسائل کنترل صنعتی را حل می کند.
۲. به مدل ریاضی نیاز ندارد ولی برای تنظیم به آزمایشات گسترده نیازمند است
۳. ساختمان ساده دارد که به راحتی قابل ساخت و تنظیم است
۴. برای فرایندهای زیادی می تواند استفاده شود.
۵. جمله مشتقی مفید است وقتی:
  - مقدار ثابت زمانیهای فرایند اختلاف زیاد با هم دارند
  - کنترلر دقیق سیستمهای درجه بالا (در سیستمهای درجه بالا افزایش بهره موجب کاهش پایداری نسبی می شود ولی D ضمن تامین میرایی مناسب سرعت پاسخ گذرا را افزایش می دهد)

#### در کجا سیستم کنترل پیچیده نیاز است

۱. کنترلر دقیق سیستم درجه ۳ و بالاتر
۲. سیستم با نسبت  $L/T$  بزرگ
۳. سیستم با مد غالب نوسانی
۴. سیستم با ترانس زیاد در پارامترها
۵. حذف دقیق اختلال
۶. سیستمهای MIMO با ارتباط قوی بین حلقه ها

7.

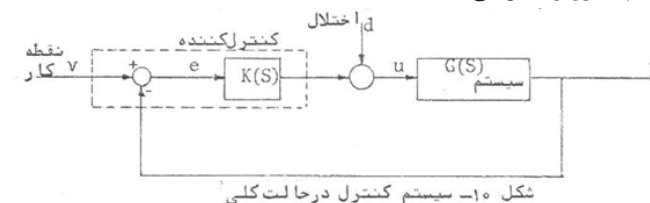
## ۴-۴ تنظیم کنترلر PID

در فصل قبل گفته شد که:

۱. کنترلر PID به سادگی به فرایند اضافه می شود، خواه فرایند خطی، غیر خطی، یا با تاخیر و غیره باشد.
۲. پارامترهای کنترلر شدیداً بر رفتار حلقه بسته تاثیر می گذارند. انتخاب نامناسب پارامترها ممکن است منجر به ناپایداری سیستم گردد.
۳. پارامترهای PID به مدل فرایند وابسته است، از طرفی تعیین دقیق مدل ریاضی فرایند پیچیده است، لذا برای داشتن کنترل خوب از روش تجربی برای پیدا کردن مقدار بهینه برای پارامترهای کنترلر استفاده می شود.
۴. به استفاده از روش تجربی برای تعیین مقدار بهینه پارامترهای کنترلر tuning می گویند. به عبارت واضحتر منظور بدست آوردن پارامترهای  $K_p$ ,  $T_d$  و  $T_i$ ، پارامترهای کنترلر PID است.
۵. در سال ۱۹۴۲ دو مهندس به نامهای J.G. Ziegler و N.B. Nichols روشی برای تنظیم پارامترهای PID ارائه کردند که همچنان مورد استفاده است.
۶. در سال ۱۹۵۳ دو محقق دیگر G.A. Coon و G.H. Cohen بهبود در تنظیم پارامترها ارائه کردند.
۷. روشهایی که بر اساس مدل معلوم کار می کنند نیز مورد توجه بوده است. این روشها عملکردی بهتر از ZN دارند.
۸. ZN نیازی به مدل ریاضی سیستم ندارد و برای آنها مدل تاخیر دار درجه ۱ فرض می کند.

## معیارهای تنظیم کنترل کننده

شکل زیر یک سیستم کنترل را نشان می دهد.



شکل ۱۰-۱ سیستم کنترل در حالت کلی

که در آن ۴ مسئله

۱. تبعیت ورودی از خروجی،
۲. پاسخ گذرای مطلوب،
۳. جلوگیری از تاثیر اغتشاش
۴. ثبات در مقابل تغییرات داخلی سیستم

بدون سیگنال کنترل اضافی مد نظر است. اهداف سیستم کنترل متناقض هستند.

- مثلاً حذف اغتشاش Load disturbance در مقابل قدرت دنبال کردن ورودی Tracking قرار می گیرد
- یا robustness معمولاً همراه با کاهش کارایی و قدرت مانور سیستم Performance است.

اینکه به کدام یک از معیارها اهمیت بیشتری در یک طرح داده شود، در سیستمهای مختلف اندکی متفاوت است. مثلاً ممکن است در سیستمی حذف Load disturbance مهم باشد و در سیستم دیگر Tracking مهم باشد. این تفاوت نگاه را در کنترل سیستمهای زیر می توان دید.

۱- سیستم کنترلر دبی و فشار مایع: پاسخ سیستم سریع و بدون تاخیر است و معمولاً همراه با نویز فرکانس بالای کوچک است لذا: کنترلر PI با بهره متوسط برای آن مناسب است

۲- سیستم کنترلر ارتفاع مایع: بدلیل تلاطم مایع، ارتفاع اندازه گیری شده نویزی است لذا: کنترلر PI با بهره زیاد و مقدار مناسب برای  $T_i$  تا اثر تلاطم مایع بر حلقه بسته تاثیر نا مطلوب نگذارد انتخاب می شود.

۳- سیستم کنترلر فشار گاز: فرایند معمولاً سریع و تنظیم آن راحت است لذا: کنترلر PI با اندکی جمله انتگرالی ( $T_i$  بزرگ) کافی است

۴- سیستم کنترلر درجه حرارت: انواع مختلف فرایند حرارتی وجود دارد، این فرایندها معمولاً کند و همراه با تاخیر هستند لذا: کنترلر PID برای افزایش سرعت پاسخ و کنترل مورد نیاز است

۵- Composition control: مانند فرایندهای حرارتی است همراه با نویز و تاخیر بیشتر. عملکرد جمله D در آن محدود است از اینرو کاندید استفاده از کنترلرهای پیشرفته هستند

در اغلب سیستمهای صنعتی ورودی ثابت است لذا دنبال کردن ورودی هدف نیست آنچه اهمیت دارد تثبیت عملکرد علیرغم وجود اغتشاش است. بنابر این هدف از طراحی کنترلر، تنظیم پارامترهای آن به نحوی است که خطا در اثر اغتشاش به سرعت و با حداقل جهش از بین برود. سرعت از بین رفتن خطا و حداقل بودن جهش را باید با معیاری سنجید. معیاری که برای آن در نظر گرفته می شود باید تابعی از خطا و زمان باشد. معیارها و روشهای متعددی برای تنظیم رفتار کنترلر مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۴-۱ روش سعی و خطا

## A. تنظیم مد P

- $K_c$  را از مقدار کم افزایش دهید تا حلقه بسته نوسانی گردد. در فرکانس نوسان به بهره  $K_c$  نهایت بهره  $K_{cu}$  می گویند.
- بهره را کاهش داده و به مقدار  $0.5K_{cu}$  برسانید

## B. تنظیم مد I

- $T_i$  را از مقدار بزرگ شروع کرده کاهش دهید تا سیستم نوسانی شود.  $T_{icu}$
- $T_i$  را افزایش داده و به  $T_i = 3T_{icu}$  برسانید.
- برای بهبود رفتار جمله D را نیز به کنترلر اضافه کنید.

## C. تنظیم مد D

- $T_d$  را افزایش دهید تا سیستم نوسانی شود  $T_{dcu}$

که صورت کسر شیب خط مماس به پاسخ پله و مخرج کسر دامنه ورودی پله است. در نتیجه  $RR = \frac{K}{T}$  بدست می آید.

برای تعیین پارامترهای کنترلر برای سیستم تاخیر دار درجه ۱ روشهای متعددی بکار گرفته شده است که نتایج آنها در جدول زیر جای داده شده است. در این جدول

$$D = \frac{L}{T}$$

و ساختار کنترلر PID مدل استاندارد زیر است

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

مقدار  $PB=100/K_c$  است. جدول زیر پارامترهای کنترلر برای بهترین تعقیب ورودی را می دهند.

Set point change		P		PI		PID	
	معیار	KcK	KcK	Ti	KcK	Ti	Td
ZN	1/4 decay	1/D	0.9/D	3.33L	1.2/D	2L	0.5L
IAE		$0.90/D^{0.98}$	$0.98/D^{0.98}$	$1.65T/D^{0.72}$	$1.43/D^{0.92}$	$1.14T^*/D^{0.75}$	$0.48^*/LD^{1.14}$
ISE		$1.40/D^{0.92}$	$1.30/D^{0.96}$	$2.03T/D^{0.74}$	$1.50/D^{0.95}$	$0.92T^*/D^{0.77}$	0.56L
ITAE		$0.50/D^{1.08}$	$0.86/D^{0.98}$	$1.48T/D^{0.68}$	$1.36/D^{0.95}$	$1.18T^*/D^{0.74}$	0.38L
CHR	no overshoot & fast response	0.3/D	0.35/D	1.2L	0.6/D	L	0.5L
CHR	20% overshoot & fast response	0.7/D	0.6/D	L	0.952/D	1.35L	0.47L

بهترین مقدار پارامترها برای حذف اختلال اعداد دیگری هستند که در جدول زیر نشان داده شده اند

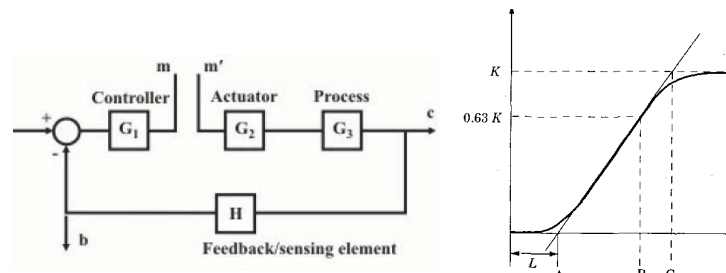
Disturbance		P		PI		PID	
	معیار	KcK	KcK	Ti	KcK	Ti	Td
Takashi	min. control area	0.9/D	0.9/D	3.3L	1.3/D	2.2L	0.45L
CHR	no overshoot & fast response	0.3/D	0.6/D	4L	0.952/D	2.4L	0.4L
CHR	20% overshoot & fast response	0.7/D	0.7/D	2.3L	1.2/D	2L	0.42L
Cohen-Coon	1/4 decay	$1/D+1/3$	$1/D+1/11$	$\frac{11+D}{5+11D}$ $*1.51L$	$1.35^*$ $(1/D+1/5)$	$\frac{5+D}{5+3D}$ $*2.5L$	$\frac{5}{5+D}$ $*0.37L$

•  $T_d = T_{dcu}/3$  تنظیم کنید

• دقت کنيد که نوسان ناشی از اشباع کنترلر نباشد)

### ۲-۴-۴ روشهای بر اساس پاسخ پله Reaction curve method

اگر حلقه سیستم باز و به آن در نقطه  $m'$  پله اعمال شود و خروجی آن مطابق شکل باشد از آن برای تنظیم کنترلر استفاده کرد.



تابع تبدیل اینچنینی سیستمی

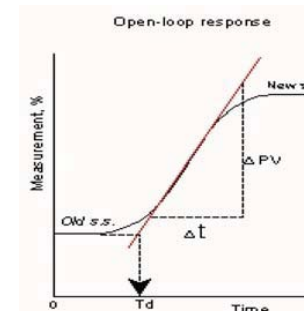
$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1}, \quad K = \frac{\delta y}{\delta u}$$

است که در آن  $L$  تاخیر،  $T$  ثابت زمانی،  $y$  خروجی و  $u$  ورودی اعمالی به فرایند است. برای بدست آوردن پارامترهای مدل از روی پاسخ پله، خطی در نقطه عطف به نمودار مماس می گردد. مقدار  $L$  تاخیر است و  $T=AC$  ثابت زمانی است. اگر سیستم دقیقاً مدل درجه ۱ با تاخیر باشد، مقدار  $AB=AC$  می گردد. نتایج مطالعات در مورد سیستمهای صنعتی نشان می دهد که اغلب  $T=AB$  نتایج بهتری را تولید می کند.

نوع دیگر ارائه پارامترها

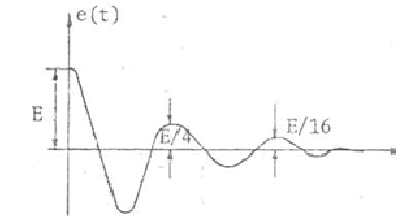
در بعضی از متون پارامتر  $RR$  (response rate per change) تعریف می گردد.

$$RR = \frac{\Delta y / \Delta t}{\Delta u} = \frac{y_{\infty}}{u_{\infty} T}$$



**A. روش زیگلر نیکولز ZN**

روش کلاسیک برای تعیین پارامترهای کنترلر PID توسط زیگلر نیکولز در سال ۱۹۴۲ ارائه شد. این معیارها و بهبود یافته آن بطور گسترده مورد استفاده قرار گرفته اند. این روش ابتدا ابداع شد تا سیستم بتواند به نحو مناسبی اغتشاش بار را کنترل کند. معیار طراحی ۰.۲۵ میرایی نسبی دامنه است که در شکل نشان داده شده است. برای  $d=0.25$ ، مقدار  $\zeta=0.22$  بدست می آید که خیلی کوچک است. از اینرو طراحی به روش زیگلر نیکولز نیازمند تنظیم مجدد است. این روش یکی بر اساس پاسخ پله سیستم حلقه باز و دیگری بر اساس رفتار فرکانسی سیستم حلقه بسته است.



شکل ۱۴- تغییرات خطا در معیار ZN

**B. روشهای بهینه ISE, IAE & ITAE**

در این روشها معیاری برای رفتار سیستم تعریف و مقدار پارامترهای کنترلر برای بهینه شدن معیار محاسبه می گردد.

$$j = f(e, t)$$

که  $j$  تابع معیار نامیده می شود و هدف از طراحی کنترل کننده حداقل کردن آن است. خطا به پارامترهای کنترلر و فرایند بستگی دارد. اگر کنترل کننده PID و فرایند

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

باشد، تابع خطا اینگونه نوشته می شود.

$$e = f(K, T, \tau, Kc, Ti, Td)$$

مشقتهای جزئی تابع معیار نسبت به پارامترهای کنترلر مساوی صفر قرار داده شده و پارامترهای کنترلر،  $Kc$ ،  $Ti$  و  $Td$  از دستگاه معادلات زیر بدست می آید.

$$\frac{\partial j}{\partial Kc} = 0, \quad \frac{\partial j}{\partial Ti} = 0, \quad \frac{\partial j}{\partial Td} = 0$$

برای طرح کنترل کنندها توابع معیار متفاوتی ارائه می شود که در هریک از آنها خصوصیت متفاوتی مورد توجه قرار می گیرد. در اینجا به معرفی ۴ تابع می پردازیم:

IAE: Integral of the absolute error

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

۲. انتگرال مربع خطا ISE: Integral of the square error

$$ISE = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt$$

- خطاهای بزرگ بیشتر و خطاهای کوچک کمتر در نظر گرفته می شوند
- فراخیز بزرگ خیلی بزرگ منظور می شود
- نوسانات کوچک دائمی مورد توجه قرار نمی گیرد.

۳. انتگرال زمان قدرمطلق خطا ITAE: Integral time absolute error

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

- تاثیر نوسانات ماندگار بزرگ در نظر گرفته می شود
- اثر خطای در حالت گذرا محدود لحاظ می گردد.

**C. روش Chien, Hrones and Reswick**

در روش CHR ۲ طرح وجود دارد. یکی "سریعترین پاسخ بدون فراخیز" و دیگری "پاسخ با ۲۰٪ فراخیز" است. آنها همچنین نکته مهمی را بیان کردند که پارامترها برای "تنظیم خروجی نسبت به ورودی" و حالت تنظیم پارامترها برای "حذف اختلال بار در خروجی" متفاوت است.

**D. روش Takahashi**

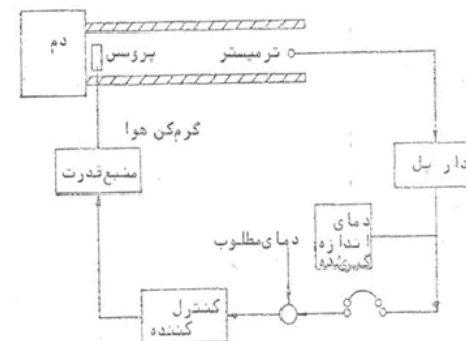
پارامترهای این روش برای حذف تداخل بهینه شده اند

**E. روش Cohen-Coon**

۱. در این طراحی هدف اصلی حذف load disturbances است.
۲. مانند ZN معیار 1/4 برای نسبت میرایی دامنه پاسخ پله است.
۳. در طرح P و PD تلاش می کند بالاترین بهره را داشته باشد در حالیکه معیار 1/4 را رعایت می کند تا خطای ماندگار کاهش یابد.
۴. در طرح PI و PID تلاش می کند K/Ti ماکزیمم بدست آید در حالیکه معیار 1/4 به قوت خود باقی است. این به معنی حداقل کردن خطا در مواجهه با load disturbance پله ای است.

**F. مقایسه عملکرد معیارهای چهار گانه**

در این قسمت عملکرد روشهای پیشنهادی مورد بحث قرار می گیرد. در این مثال هوا به داخل لوله ای فرستاده می شود. در ابتدای لوله رشته سیمی قرار دارد که با جریان الکتریکی گرم می شود. هوا با عبور از کنار سیم گرم شده و درجه حرارت آن توسط ترمیستور (اندازه گیر درجه حرارت) اندازه گیری می شود.

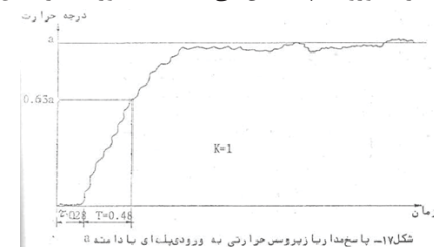


شکل ۱۵- شمای بروس حرارتی

بعلت اندازه گیری درجه حرارت در محلی دورتر، تاخیر زمانی در حلقه ظاهر می شود. فرایند حرارتی از درجه ۱ با بهره  $K=1$  و ثابت زمانی  $T=0.48s$  و تاخیر  $L=0.28s$  است. تابع تبدیل این سیستم از این قرار است.

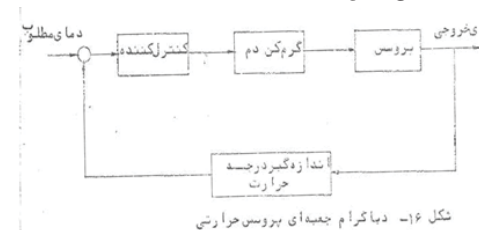
$$G(s) = \frac{e^{-0.28s}}{0.48s + 1}$$

شکل ۱۷ پاسخ مدار باز این فرایند را به ورودی پله نشان می دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است،



شکل ۱۷- پاسخ مدار باز بروس حرارتی به ورودی پله ای با دامنه ۱

بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته مطابق شکل است.



شکل ۱۶- دیاگرام جمعی بروس حرارتی

برای کنترل متناسب، بهره در معیارهای ۴ گانه اینگونه است.

معیار	ISE	ZN	IAE	ITAE
بهره کنترل کننده Kc	2.3	1.7	1.5	0.89

جدول ۱ - بهره کنترل کننده متناسب در معیارهای چهارگانه

پاسخ سیستم حلقه بسته با کنترلر P در معیارهای ۴ گانه در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

شکل ۱۹ پاسخ مدار حلقه بسته با کنترلر PI را نشان می دهد. جدول مشخصات کنترل کننده را در بر دارد.

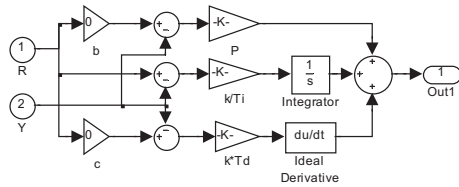
معیار	ISE	ZN	IAE	ITAE
Kc	2.18	1.54	1.66	1.46
Ti	0.97	0.93	0.54	0.49

جدول ۲ - مشخصات کنترل کننده PI در معیارهای چهارگانه

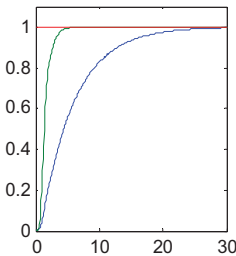
بطوریکه ملاحظه می شود به علت زیاد بودن بهره کنترلر در معیار ISE، پاسخ سریع و نوسانات نسبت به معیارهای دیگر زیاد است. در معیار ZN که بهره کنترلر کمتر است سرعت پاسخ و دامنه نوسانات نیز کمتر می باشد. در این معیار دامنه خطا در هر پریود به یک چهارم خطا در پریود قبل کاهش می یابد. در معیار IAE سرعت پاسخ بسیار کم است و به دلیل یکسان در نظر گرفتن خطاهای مثبت و منفی، خطای خالص کم است. در معیار ITAE به دلیل آن که زمان وزن مقدار خطاست، خطا به سرعت از بین می رود. البته ذکر این نکته ضروری است که در کنترل متناسب P در تمام حالات خطای ماندگار وجود دارد. در حالیکه با کنترلر PI خطای ماندگار صفر است و در تمام حالات خروجی به مقدار نهایی مطلوب می رسد.



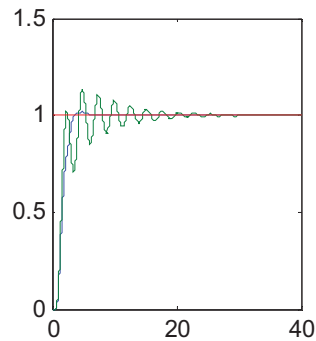
کنترلر وزندار PID را اینگونه می توان پیاده سازی کرد



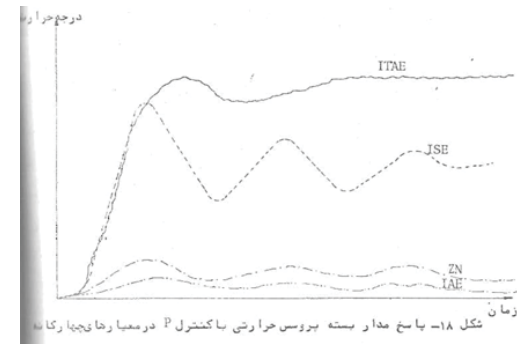
کنترلر ZN که بدست می آید  $Gc(s) = 0.277(1 + \frac{1}{1.3s} + 0.325s)$  است. کنترلر CC رابطه  $Gc(s) = 0.58(1 + \frac{1}{0.57s} + 0.129s)$  را داراست. پاسخ کند تر مربوط به ZN است. در این جواب  $b=c=0$  در نظر گرفته شده است.



نکته ای که دیده می شود این است که پاسخ فراخیز ندارد. برای روشن شدن موضوع مثال دیگری را بررسی می کنیم که در آن  $L=0.65$  و  $T=1.5$ ,  $k=1$  است. پاسخ اسن سیستم اینگونه است



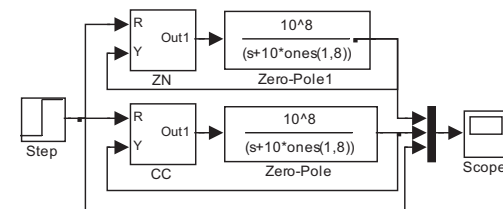
نتیجه اینکه وقتی  $D=L/T$  بزرگ است ZN و بقیه روشهای تنظیم کنترلر پاسخ محافظه کارانه می دهند. پاسخ با نوسان کم مربوط به ZN است.



**مثال:** برای سیستم  $G(s) = \frac{1}{(s/10+1)^8}$  کنترلر PID با ضرایب ZN و CC طرح کرده پاسخها را مقایسه کنید. بار

دیگر وزنه‌های کنترلر  $b=c=0$  قرار داده نتایج را مقایسه کنید.

شکل زیر پیاده سازی مسئله در محیط سیمولینک است



## ۳-۴-۴ روش زیگلر نیکولز بر اساس پاسخ فرکانسی

زیگلر نیکولز برای طراحی کنترلر روشی در میدان فرکانس ارائه می کنند. در این روش بهره یک کنترلر متناسب تعبیه شده در حلقه افزایش داده می شود تا سیستم حلقه بسته نوسانی گردد. در این وضعیت سیگنال کنترل و خروجی هر دو سینوسی با ۱۸۰ درجه اختلاف فاز هستند. به دلیل کنترلر متناسب می توان نوشت  $u = -Ky$  برای سادگی فرض می شود که سیگنال مرجع سیستم حلقه بسته صفر باشد. شرط نوسانی شدن سیستم از اینقرار است.

$$K_u G(i\omega_u) = -1$$

به بهره ای که سیستم را به پایداری مرزی می رساند نهایت بهره (Ku) ultimate gain می گویند. از فرمول فوق می نویسیم

$$G(i\omega_u) = -\frac{1}{K_u}$$

برای سهولت پارامتر زیر تعریف می گردد.

$$\kappa = \left| \frac{G(i\omega_u)}{G(0)} \right|$$

سیستم با  $\kappa$  کوچک به راحتی کنترل می شود. بین  $\kappa$  و نسبت  $L/(L+T)$  در سیستم FOPTD ارتباط تقریباً خطی وجود دارد به نحویکه  $\kappa=0$  و  $\kappa=1$  نظیر  $L/(L+T)$  برابر صفر و ۱ است.

زیگلر نیکولز براساس نهایت بهره (Kcu) ultimate gain و نهایت پریود نوسانات (Pcu) ultimate period پارامترهای کنترلر مطابق جدول زیر را ارائه می دهد

Disturbance	P		PI		PID		
	معیار	Kc	Kc	Ti	Kc	Ti	Td
ZN	¼ decay	0.5K <sub>cu</sub>	0.45K <sub>cu</sub>	P <sub>cu</sub> /1.2	0.6K <sub>cu</sub>	P <sub>cu</sub> /2	P <sub>cu</sub> /8
Modified ZN	Some overshoot				0.33K <sub>cu</sub>	P <sub>cu</sub> /2	P <sub>cu</sub> /3
Modified ZN	No overshoot				0.2K <sub>cu</sub>	P <sub>cu</sub> /2	P <sub>cu</sub> /3
Tyreus-Luybent (1997)			0.31K <sub>cu</sub>	2.2P <sub>cu</sub>	0.45K <sub>cu</sub>	2.2P <sub>cu</sub>	P <sub>cu</sub> /6.3
F.G.Shinsky		0.5K <sub>cu</sub>	0.5K <sub>cu</sub>	0.43P <sub>cu</sub>	0.25K <sub>cu</sub>	0.5P <sub>cu</sub>	0.125P <sub>cu</sub>

از مزایای این روش آن است که

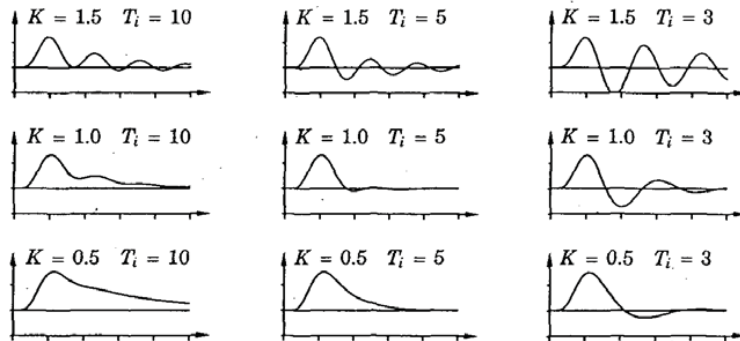
۱. به مدل فرایند نیاز نیست
۲. و به تمام فرایندهای حلقه باز پایدار قابل اعمال است

از معایب آن این است که

۱. زمانبر است
  ۲. به هنگام بدست آوردن پارامترها سیستم نمی تواند به کار عادی خود ادامه دهد
  ۳. نوسانات ممکن است برای سیستم مضر باشد.
  ۴. برای سیستمهایی که حلقه باز ناپایدارند قابل استفاده نیست
  ۵. سیستمهای درجه ۱ و ۲ با تاخیر زیاد حتی با بهره بزرگ نیز ممکن است نوسان نکنند.
- این مشکلات به ایده روش فیدبک رله ای Astrom & Wittenmark انجامیده است.

## ارزیابی روش زیگلر نیکولز

این روش از نظر حذف اغتشاش بار خوب عمل می کند ولی میرایی رفتار حلقه بسته آن مناسب نیست. از بین ۲ روشی که ارائه می شود، روش ۲ قابل اطمینان تر است. ضمن اینکه طرح PID آنها بهتر از PI آنهاست. برای تنظیم بهتر عملکرد کنترلر زیگلر نیکولز از شکلهای راهنمای زیر می توان استفاده کرد. شکلها خروجی سیستم در نتیجه تغییر پارامترها را نشان می دهند.



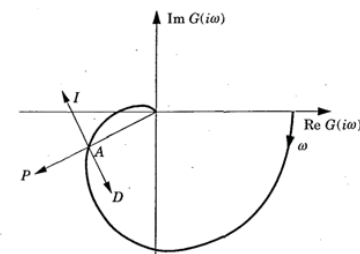
**Figure 4.13** Tuning map for PID control of a process with the transfer function  $G(s) = (s + 1)^{-8}$ . The figure shows the responses to a unit step disturbance at the process input. Parameter  $T_d$  has the value 1.9.

## تحلیل روش زیگلر نیکولز در میدان فرکانس

در روش فرکانسی زیگلر نیکولز سیستم به حالت نوسانی می رود و بهره و پریود نهایتی بدست می آید. در این حالت نمودار نایکوئیست از نقطه  $(-1,0)$  عبور می کند. دادن بهره نمودار را شعاعی بزرگ می کند. اضافه کردن انتگرال و مشتق نقطه کار را عمود بر خط شعاعی جابجا می سازد. شکل نحوه تغییرات را نشان می دهد. حالا باید با تنظیم مناسب بهره، مشتق و انتگرال نقطه کار روی نمودار نایکوئیست را به جای دلخواه منتقل کرد. با PI یا PD می توان یک ربع صفحه و با PID نصف صفحه را پوشش داد (نقطه کار را به آن منتقل کرد)

## نتیجه گیری

۱. بهره کنترلر در رابطه عکس با بهره حلقه تعیین می شود.
۲. بهره کنترلر با افزایش نسبت تاخیر L به ثابت زمانی T (L/T) کاهش داده می شود.
۳. هرچه نسبت L/T بزرگتر باشد کنترل سیستم مشکلتر می گردد.
۴. ضریب انتگرال گیر  $T_i$  و ضریب مشتق گیر  $T_d$  با افزایش L/T باید افزایش یابند.
۵. نسبت بین  $T_d/T_i$  بین 0.1 تا 0.3 انتخاب می شود.
۶. نسبت میرایی 1/4 برای کنترل فرایند زیاد نوسانی است. اگر پاسخ میرا تری نیاز است، بهره باید کاهش و  $T_i$  آن افزایش یابد.
۷. در بین IAE, ITAE و ITAE محتاط تر و روش ISE کم احتیاط تر است.



**Figure 4.9** A given point on the Nyquist curve may be moved to another position in the  $G$ -plane by PI, PD, or PID control. Point A may be moved in the directions  $G(i\omega)$ ,  $-iG(i\omega)$ , and  $iG(i\omega)$  by changing the proportional, integral, and derivative gain, respectively.

## ۵-۱ پیاده سازی کنترلر

کنترلر های PID اولیه بادی بودند. زیگلر نیکولز نیز آزمایشات خود را با این کنترلرها انجام دادند. بعد از توسعه مدارهای الکترونیکی، کنترلرهای بادی جای خود را به کنترلرهای الکترونیکی دادند. با توسعه روزافزون مدارهای دیجیتال، امروزه کنترلر PID بصورت دیجیتال در حلقه های کنترل قرار می گیرد. با این وجود در صنایعی که در صورت جرقه احتمالی امکان انفجار وجود دارد همچنان از کنترلرهای بادی استفاده می شود.

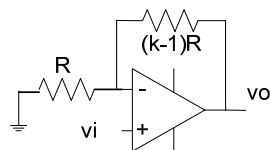
## ۵-۱-۱ کنترلر الکترونیکی

در ساختمان کنترلر کننده های الکترونیکی تقویت کننده و المانهای R و C وجود دارند. طرحی که برای ساخت کنترلر استفاده می شود برگرفته از بلوک دیاگرامهای بخش قبل است.

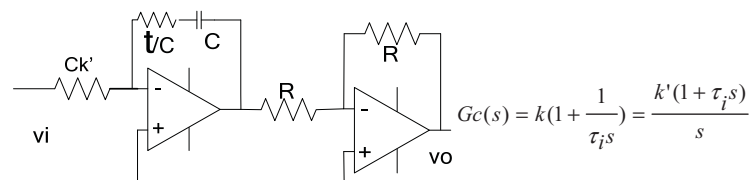
## ساخت الکترونیکی کنترلر

برای ساخت کنترلر الکترونیکی به تقویت کننده، مقاومت و خازن نیاز است. در انتخاب مقاومت و خازن مدار باید دقت شود. استفاده از خازن الکتrolیت که تلرانس و وابستگی زیاد به درجه حرارت دارد مناسب نیست. همچنین استفاده از مقاومت خیلی بزرگ بدلیل تولید نویز و مقاومت کوچک به دلیل مصرف جریان غیر ضرور خوب نیست.

۱) کنترلر P (Proportional): تابع تبدیل این کنترلر  $G_c(s) = k$  است

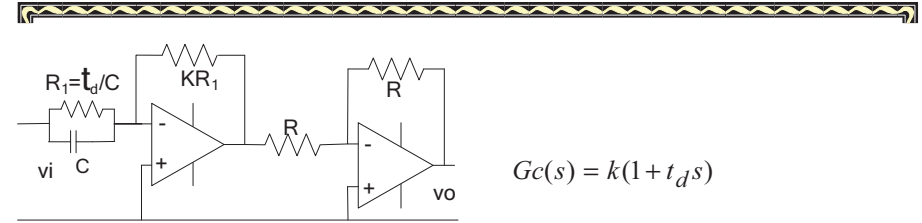


۲) کنترلر PI (Proportional + Integral): تابع تبدیل این کنترلر و مدار آن از اینقرار است



۳) کنترلر PD (Proportional + Derivative): تابع تبدیل این کنترلر

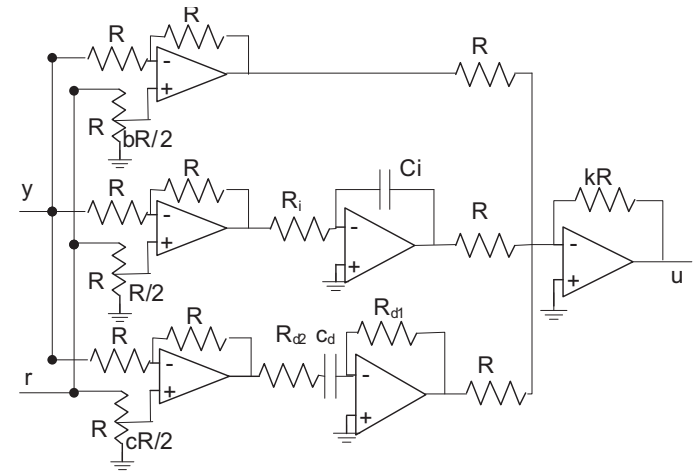
است. المانهایی که در مدار استفاده می شوند از اینقرارند



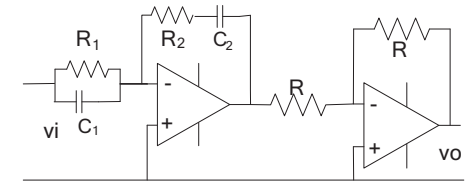
۴ کنترلر PID

برای کنترلر عملیاتی PID از مدار زیر میتوان استفاده کرد

$$U = K \left( bY_{sp} - Y + \frac{1}{sT_i} E + \frac{sT_d}{1 + sT_d/N} (eY_{sp} - Y) \right)$$



اگر صفرهای PID ساده و از طرح ریاضی استفاده شود مدار ساده تری بدست می آید.



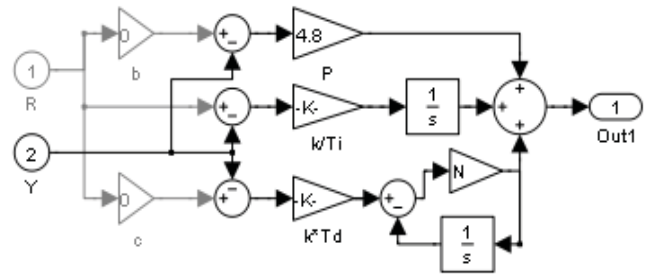
$$Gc(s) = k \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) = \frac{k\tau_d s^2 + ks + \frac{k}{\tau_i}}{s}$$

تایید تبدیل مدار PID از اینقرار است:

$$G_c(s) = \frac{R_2 C_1 s^2 + \frac{R_1 C_1 + R_2 C_2}{R_1 C_2} s + \frac{1}{R_1 C_2}}{s}$$

این مدار که دو تقویت کننده دارد وقتی مناسب است که صفرهای کنترلر ساده باشند در این مدار  $\tau_i = R_1 C_1$  و  $\tau_d = R_2 C_2$  است.

شکل پیاده سازی کنترلر PID آنالوگ در محیط سیمولینک را نشان می دهد.



۲-۵ پیاده سازی دیجیتالی کنترلر PID

در ساخت مدل دیجیتالی معمولاً از ۲ تبدیل استفاده می شود که عبارتند از:

Backward differences  $\Rightarrow s = \frac{1-z^{-1}}{h}$

Tustin's approximations  $\Rightarrow s = \frac{2}{h} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$

برای این منظور کافی است در رابطه کنترلر آنالوگ به جای s یکی از دو رابطه فوق قرار گیرد. البته قبلاً باید فرکانس نمونه برداری مناسب از رابطه  $T_s < 0.05(T+L)$  انتخاب شود. به این ترتیب

معادل دیجیتالی کنترلر P: معادل دیجیتالی کنترلر متناسب از اینقرار است

$$P = K(bR(t) - y(t)) \Rightarrow P(t_k) = K(bR(t_k) - y(t_k))$$

که  $t_k$  اندکس زمانی است که کامپیوتر مقادیر ورودی را قرائت و خروجی را تولید می کند.

معادل دیجیتالی کنترلر I: روش تعیین معادل دیجیتالی کنترلر I از این قرارند

Backward differences

$$I(s) = \frac{K}{T_i s} e(s) \Rightarrow I(z) = \frac{K}{T_i} \frac{h}{1-z^{-1}} e(z) \Rightarrow I(t_k) = I(t_{k-1}) + \frac{Kh}{T_i} e(t_k)$$

Tustin's approximations  $\Rightarrow I(t_{k+1}) = I(t_k) + \frac{Kh}{T_i} \frac{e(t_{k+1}) + e(t_k)}{2}$

هر دو روش فرم زیر ولی با پارامترهای متفاوت را دارند.

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + b_{i1}e(t_{k+1}) + b_{i2}e(t_k)$$

معادل دیجیتالی کنترلر D: روش تعیین معادل دیجیتالی کنترلر D از این قرارند

$$D(s) = \frac{KT_D s}{1 + \frac{T_D}{N} s} e(s)$$

به جای  $e(s)$  ممکن است  $-y(s)$  قرار گیرد.

$$\frac{T_d}{N} \frac{dD}{dt} + D = -KT_d \frac{dy}{dt}$$

Backward differences  $\Rightarrow D(t_k) = \frac{T_d}{T_d + Nh} D(t_{k-1}) - \frac{KT_d N}{T_d + Nh} (y(t_k) - y(t_{k-1}))$

Tustin's approximations  $\Rightarrow D(t_k) = \frac{2T_d - Nh}{2T_d + Nh} D(t_{k-1}) - \frac{2KT_d N}{2T_d + Nh} (y(t_k) - y(t_{k-1}))$

هر دو روش فرم زیر ولی با پارامترهای متفاوت را دارند.

$$D(t_k) = a_d D(t_{k-1}) - b_d (y(t_k) - y(t_{k-1}))$$

معادل دیجیتالی جمله D پایدار است اگر  $|a_d| < 1$  باشد. روش تفاضل پسینی برای تمام مقادیر Td نتیجه خوب می دهد ضمن اینکه محاسبه آن نیز ساده تر است. در روش توستین از طرف دیگر برای Td های کوچک مقدار  $a_d$  منفی است که موجب می شود رفتار نامطلوب نوسان کم دامنه در خروجی دیده شود.

### معادل دیجیتالی کنترلر PID

برای کنترلر PID به فرمول

$$G_c = P + I + D + M_0$$

می توان ترکیب مناسبی از کنترلرهای معادل را استفاده کرد. برای مثال از تفاضل پسینی استفاده کرده و نوشت

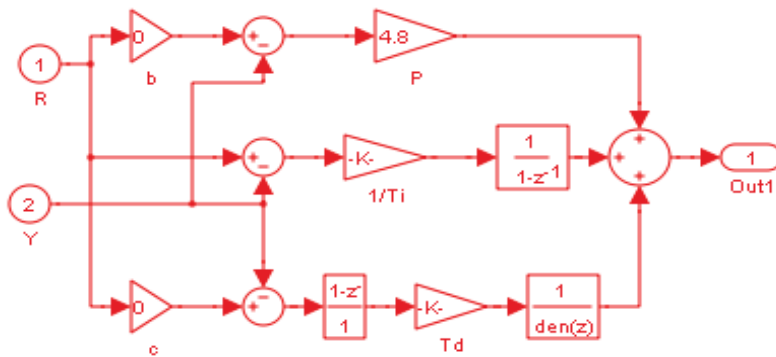
$$u(t_k) = P(t_k) + I(t_k) + D(t_k) =$$

$$u(t_k) = K(bR(t_k) - y(t_k)) + I(t_{k-1}) + \frac{Kh}{T_i} e(t_k)$$

$$+ \frac{T_d}{T_d + Nh} D(t_{k-1}) + \frac{KT_d N}{T_d + Nh} (cR(t_k) - cR(t_{k-1}) - y(t_k) + y(t_{k-1})) + M_0$$

در مواردی مناسب است که کنترلر به فرم incremental نوشته شود.

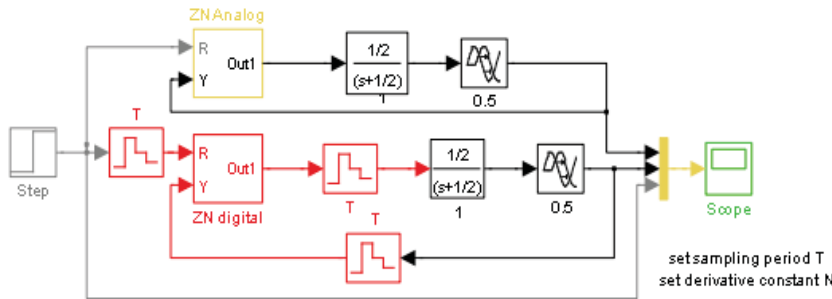
پیاده سازی کنترلر PID دیجیتال در شکل نشان داده شده است.



مثال: برای سیستم  $G(s) = \frac{1}{2s+1} e^{-0.5s}$  کنترلر PID از نوع ZN طرح کنید. عملکرد این کنترلر و معادل

دیجیتالی آنرا مقایسه کنید.

با پیاده سازی سیستم زیر امکان مقایسه عملکرد دو کنترلر فراهم می آید.



### Incremental Form

این شکل کنترلر مشابه PID velocity در حالت پیوسته است که در فرم دیجیتالی به آن فرم اضافه شونده incremental می گویند. ساختار این کنترلر از اینقرار است.

$$\Delta u(t_k) = u(t_k) - u(t_{k-1}) = \Delta P(t_k) + \Delta I(t_k) + \Delta D(t_k)$$

$$\Delta P(t_k) = P(t_k) - P(t_{k-1}) = K (by_{sp}(t_k) - y(t_k) - by_{sp}(t_{k-1}) + y(t_{k-1}))$$

$$\Delta I(t_k) = I(t_k) - I(t_{k-1}) = b_{i1}e(t_k) + b_{i2}e(t_{k-1})$$

$$\Delta D(t_k) = D(t_k) - D(t_{k-1}) = a_d \Delta D(t_{k-1}) - b_d (y(t_k) - 2y(t_{k-1}) + y(t_{k-2}))$$

از مزایای آن این است که محاسبه خروجی در هر گام صورت می گیرد لذا مقداری که هر بار اضافه می شود کوچک است. این کوچکی اجازه میدهد که word-length کوتاه برای آن انتخاب گردد. البته فقط در خط پایانی محاسبه باید طول word-length را افزایش داد.

از مزیت دیگر آن این است که به سادگی می توان windup and mode switches را به آن اضافه کرد. از مشکلات آن این است که نمیتوان با کنترلرهای P و PD استفاده کرد. در این حالات که جمله انتگرالی وجود ندارد،  $\Delta P$  اینگونه می تواند محاسبه شود.

$$\Delta P(t_k) = K (b y_{sp}(t_k) - y(t_k)) + u_b - u(t_{k-1})$$

### Protection against Computer Failure

وقتی به خاطر ایراد کنترلر خاموش شود، در طرح incremental، خروجی کنترلر ثابت میماند و زیاد و کم نمیشود. این سبب می شود که سیستم به کار خود ادامه دهد. اما وقتی از این طرح استفاده نشود، خاموش شدن کنترلر به معنی صفر شدن خروجی آن است که باعث می شود سیستم از کار بیفتد. البته روش incremental به نوبت حساس است که از معایب آن به حساب می آید. با این حال چون انتگرال گیر در حلقه وجود دارد نوبت فیلتر می شود.

### ۴-۶ مشکلات عملی جمله انتگرال

#### الف) Integrator Windup

اگرچه با تئوری خطی رفتار سیستم کنترل به خوبی تحلیل می شود، ولی اثر عوامل غیر خطی مانند اشباع تقویت کننده، محدودیت در افزایش سرعت موتور، و حد در باز شدن شیرهای کنترلی باید لحاظ شوند.

• وقتی یکی از اجزا سیستم کنترل مانند محرک اشباع شود عملاً حلقه کنترل باز (قطع) می گردد. در این حالت اگر انتگرال گیر خود اشباع نشود، خروجی آن افزایش می یابد بدون آنکه کار خاصی را انجام دهد. حال وقتی جهت خطا عوض شود، مدتی طول می کشد تا انتگرال گیر به نقطه کاری برسد که بتواند وضعیت محرک را تغییر دهد.

• این امر باعث ایجاد گذرای طولانی در رفتار سیستم می گردد.

عوامل wind up عبارتند از

- تغییر شدید سیگنال مرجع یا اغتشاش
- ایراد در عملکرد سیستم حلقه بسته
- تغییر نحوه کار مثلاً تبدیل از خودکار به دستی می باشند

در سیستم شکل فرض کنید، کنترلر PI و پیش فیلتر ۱ باشد. در این حالت پرش در سیگنال مرجع موجب wind up می گردد. خروجی جمله I آنقدر بزرگ می شود که اجازه نمیدهد u به موقع وقتی خروجی بزرگتر از سیگنال مرجع می شود تغییر علامت دهد. این امر موجب نوساناتی شده است که بعد از مدتی میرا می شود.

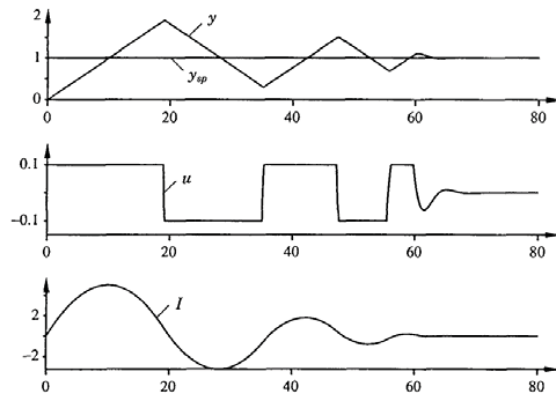
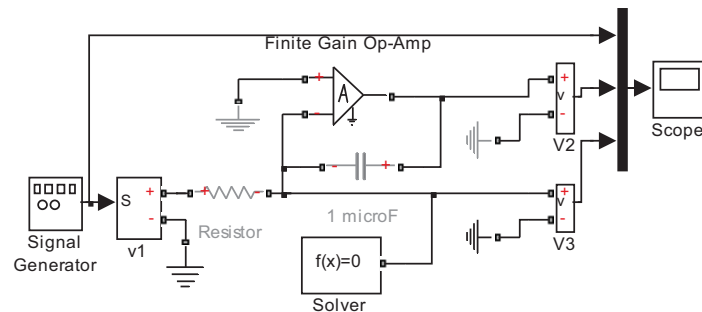
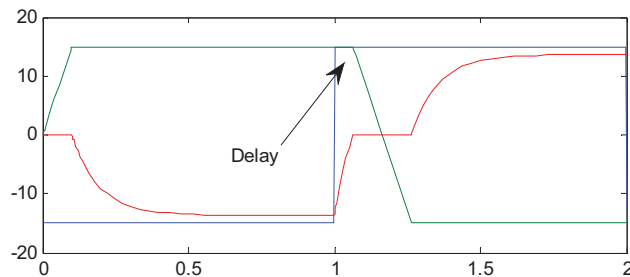


Figure 3.18 Illustration of integrator windup. The diagrams show process output  $y$ , setpoint  $y_{sp}$ , control signal  $u$ , and integral part  $I$ .

مثال دیگر انتگرال گیر شکل است



پاسخ انتگرال گیر به ورودی مربعی که آنرا اشباع می کند در شکل نشان داده شده است.



در شکل ورودی مربعی، خروجی انتگرال گیر و ولتاژ  $V^-$  تقویت کننده نشان داده شده است. وقتی تقویت کننده اشباع می شود ورودی منفی آن دیگر صفر نیست (virtual ground) بلکه اسیونانسیلی تغییر می کند تا برابر

ورودی شود. وقتی ورودی سوئیچ می شود مدتی طول می کشد تا ورودی منفی تقویت کننده صفر شود، این مدت تاخیری ایجاد می کند که ناخواسته است و ناشی از ویندآپ انتگرال گیر است.

برای رفع این مشکل راه حلهایی پیشنهاد شده است.  
۱: محدود کردن شیب تغییرات لحظه ای سیگنال مرجع

۲: velocity algorithm: در این حالت تغییرات سیگنال کنترل محاسبه و سپس به انتگرال گیر اعمال می گردد.  
۳: conditional integration: توقف انتگرال گیری وقتی اشباع در حلقه اتفاق می افتد. این کار را می توان وقتی محرک اشباع است یا خطا خیلی بزرگ است انجام داد. برای اینکه خطای ماندگار باقی نماند مناسب است: قطع انتگرال گیری زمانی اتفاق افتد که محرک اشباع است و ورودی انتگرال گیر به نحوی است که اشباع بیشتر را در پی دارد.

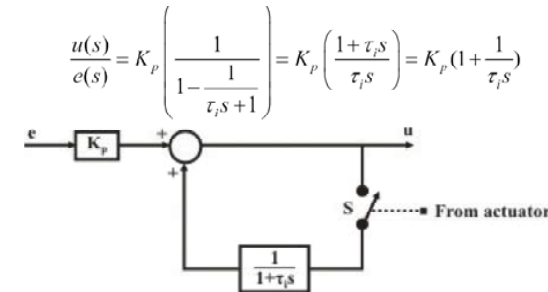


Fig. 2 Scheme for Anti integration windup

در این طرح وقتی محرک اشباع می شود، کلید باز و کنترلر فقط P است. مگر آنکه محرک اشباع نباشد تا کلید بسته و کنترلر PI گردد.

**Back-Calculation : ۴**

reset کردن یکباره انتگرال گیر ویندآپ شده صحیح نیست. خروجی آنرا باید به روش دینامیکی کاهش داد. شکل کنترلر PID را نشان می دهد که دور انتگرال گیر آن حلقه فیدبکی تعبیه شده است. وقتی محرک اشباع شود، اختلاف مقدار دو سر آن  $e_s$ ، اندازه گیری شده و با بهره  $1/T_i$  به انتگرال گیر اعمال می شود. به این ترتیب خروجی انتگرال گیر در مرز اشباع محرک قرار می گیرد. ورودی انتگرال گیر از هر دو مسیر:

$$\frac{1}{T_i} e_s + \frac{K}{T_i} e$$

است. در نتیجه

$$e_s = -\frac{KT_i}{T_i} e$$

بدرست می آید. ضرائب به نحوی تنظیم می شوند که  $e_s$  منفی نشود. در حالت عدم اشباع،  $e_s=0$  است و مدار تعبیه شده غیر فعال است.

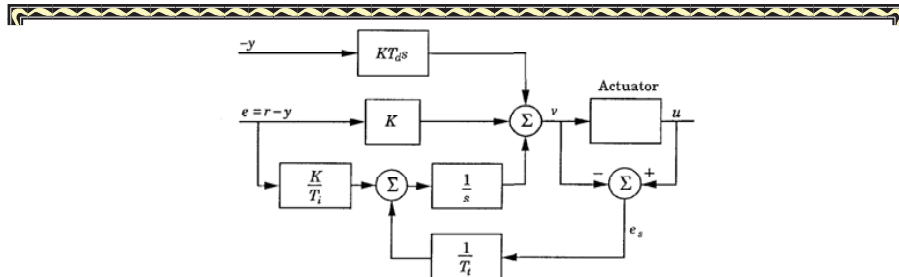


Figure 3.19 Controller with anti-windup. A system where the actuator output is measured is shown in A and a system where the

**ب) تغییر Bumpless وضعیت کار**

- در تبدیل وضعیت سیستم از دستی به خودکار باید دقت شود که خروجی دچار پرش نشود.
- وقتی کنترلر از نوع الگوریتم velocity یا incremental است، ایجاد این شرایط مشکل نیست.
- شکل زیر تعویض نرم بین دستی و خودکار را در حالت کنترلرهای معمولی را نشان می دهد.
- این موضوع وقتی پارامترهای کنترلر نیز دچار تغییر می شود باید به نحوی لحاظ گردد.

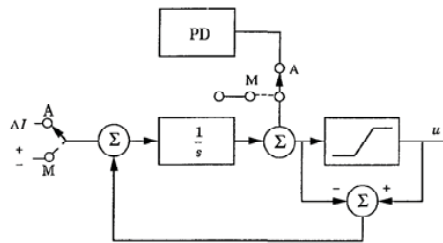


Figure 3.36 A PID controller where one integrator is used both to obtain integral action in automatic mode and to sum the incremental commands in manual mode.

**۷-۱ مثال از سیستمهایی که PID برای آنها کافی نیست**

**۱-سیستمهای درجه بالا**

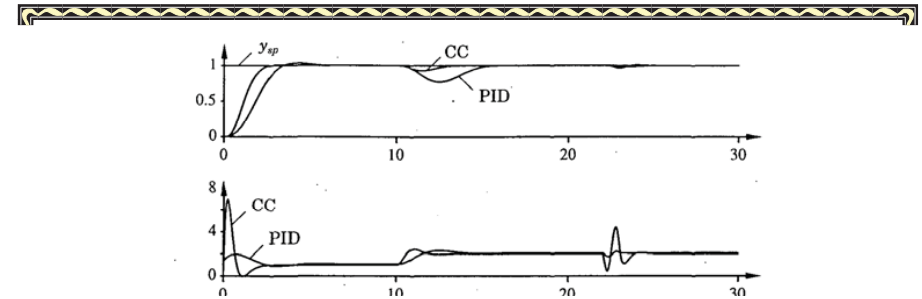
وقتی درجه سیستم بیشتر از ۲ است بک کنترلر پیچیده تر از PID می تواند نتایج بهتری نتیجه دهد برای مثال سیستم درجه ۳ زیر را در نظر بگیرید

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

برای آن کنترلر PID

$$u(s) = \frac{3.4(0.6s^2 + s + 0.5)(y_{sp}(s) - y(s))}{s}$$





**Figure 3.40** Control of the third-order system in Example 3.3 using a PID controller (PID) and a more complex controller (CC). The figure shows responses to a setpoint change, a load disturbance, and finally a measurement disturbance. The upper diagram shows setpoint  $y_{sp}$  and measurement signal  $y$ , and the lower diagram shows control signal  $u$ .

و کنترلر درجه بالاتر

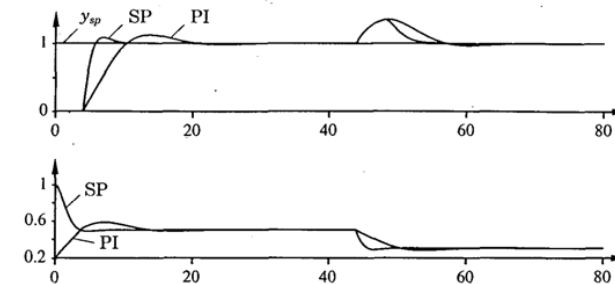
$$u(s) = \frac{(8s^3 + 77s^2 + 309s + 512)y_{sp}(s) - (144s^3 + 575s^2 + 870s + 512)y(s)}{s(s^2 + 11.5s + 57.5)}$$

طراحی می شود. مزیت استفاده از کنترلر درجه بالاتر در شکل نشان داده می شود.

## ۲- فرایند با تاخیر زیاد

کنترل سیستمهایی که تاخیر زیاد دارند مشکل است. در این سیستمها ترم D کمک زیادی نمی کند. از اینرو کاندید استفاده از کنترلرهای مفصل تر هستند. برای مثال فرایند زیر را در نظر بگیرید.

$$G(s) = \frac{1}{2s+1} e^{-4s}$$



**Figure 3.41** Control of the system in Example 3.4 with PI control (PI) and with a Smith predictor (SP). The upper diagram shows setpoint  $y_{sp}$  and measurement signal  $y$ , and the lower diagram shows control signal  $u$ .

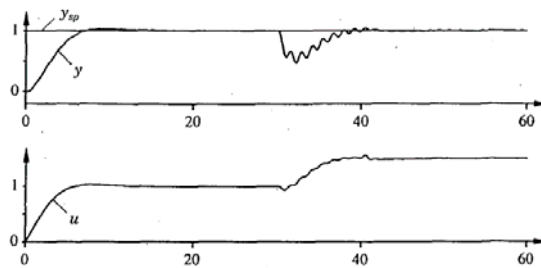
این سیستم ابتدا با کنترلر  $PI: 0.2 + \frac{1}{2.5s}$  و سپس با کنترلی بر اساس smith predictor کنترل گردید که بخش PI آن  $1 + \frac{1}{s}$  است. شکل تفاوت در عملکرد را نشان می دهد.

## ۳- فرایند با مد غالب نوسانی

برای این سیستمها عموماً کنترلر PID کفایت نمی کند. عملکرد کنترلر PI روی سیستم زیر که دارای مد نوسانی است را بررسی می کنیم.

$$G(s) = \frac{25}{(s+1)(s^2+25)}$$

اگر این سیستم را بخواهیم با PI کنترل کنیم، هم  $K$  و هم  $T_i$  منفی بدست می آیند. مقادیر معقول برای آنها  $K = -0.25$  و  $T_i = -1$  است. رفتار سیستم با این کنترلر در شکل ۳.۴۲ برای حالت تغییر سیگنال مرجع و load disturbance نشان داده شده است. شکل نشان می دهد که سیگنال مرجع در حالت  $b=0$  (وزن سیگنال مرجع در PID) مد نوسانی را تحریک نکرده است ولی تغییر بار آن را به وضوح فعال کرده است. وقتی  $b=1$  قرار گیرد، سیگنال مرجع نیز مد نوسانی را تحریک می نماید شکل ۳-۴۳.



**Figure 3.42** Response of the closed-loop system to setpoint and load disturbances. The graphs show setpoint  $y_{sp}$ , process output  $y$ , and control signal  $u$ . The controller parameters are  $K = -0.25$ ,  $T_i = -1$ , and  $b = 0$ .

## راه حل

برای کاهش نوسان به جای میرا کردن نوسانات، از فیلتر notch استفاده می شود تا سیگنال را در فرکانس نوسانات شدیداً تضعیف کند.

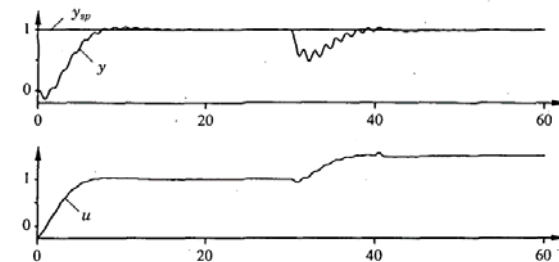
۲. فرکانس نمونه برداری: 40mS / 1 second
۳. ورودیها: ترموکوپل نوع J, K, R, S, B, C و D، RTD(Pt-100) ۲ و ۳ سیمه، ولتاژ DC، ورودی جریانی (4 -20)mA
۴. خروجیها
- خروجی سویچی: 0 to 10VDC، سیگنال کنترل Forward / Reverse برای موتورها
  - خروجی آنالوگ: 4-20mA یا 0-5VDC یا 0-10VDC به انتخاب کاربر
۵. صحت در اندازه گیری ورودی: Better than  $\pm 0.1\%$  of the specified range.
۶. صحت نمایش:  $\pm 1^\circ\text{C}$  for Thermocouple  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  for Pt-100 and for other inputs
۷. تنظیم کنترلر: Auto Tune /Manual
۸. مشخصات کنترلر PID یا ON/OFF (قابل انتخاب).
۹. اتصال ارتباطی: ورودی 4-20mA برای تنظیم راه دور سیگنال مرجع - ارتباط RS 485 - ارتباط FIELD BUS و مشابه

### سوالات مروری

- کنترلر PI با  $PB=50\%$  و  $reset\ time=2s$  بنویسید.
- اگر سیستم  $G(s)=\frac{2}{(1+2s)}$  و کنترلر P با  $PB=100\%$  باشد، خطای ماندگار پله واحد چقدر است؟
- اگر سیستم  $G_c(s)=2(1+\frac{1}{2s})$  و کنترلر P با  $PB=100\%$  باشد، خطای ماندگار پله واحد چقدر است؟
- چرا PI می تواند سیستم را ناپایدار کند.
- چرا D برای کنترلر دبی توصیه نمی شود؟

### سوالات

- عملکرد کنترلرهای P, PI, PD, PID را لیست کنید. موارد استفاده هریک را بنویسید.
- در کجا PID استفاده می شود و در چه شرایطی کنترلرهای دیگر ترجیح دارد.
- برای سیستم  $G(s)=\frac{1}{(s/10+1)^8}$  ابتدا مدل FOPTD استخراج کرده سپس برای آن کنترلر ZN و ITAE طرح کنید.
- Sim 4-1: پاسخهای حلقه بسته برای PID با طرحهای ZN, ITAE، هر دو نوع CHR و CC را روی یک نمودار رسم کرده اختلاف را توضیح دهید. پارامترهای c و b کنترلر را صفر بگیرید.
- Sim4-2: پاسخهای حلقه بسته برای PID با طرحهای ZN, ITAE را روی یک نمودار رسم کرده اختلاف را توضیح دهید. پارامترهای c و b کنترلر را یک بگیرید.
- برای سیستم  $G(s)=\frac{1}{s(s/10+1)^3}$  به روش راث نهایت بهره و پیروند آنرا بدست آورده کنترلر بر اساس روش پاسخ فرکانسی زیگلر نیکولز اصلی و بهبود یافته بدون فراخیز طرح کنید.



**Figure 3.43** Response of the closed-loop system to setpoint and load disturbances. The graphs show setpoint  $y_{sp}$ , process output  $y$ , and control signal  $u$ . The controller parameters are  $K = -0.25$ ,  $T_i = -1$ , and  $b = 1$ .

اگر سیستم فقط یک مد غالب نوسانی داشته باشد، از کنترلر PID با صفرهای کمپلکس می توان استفاده کرد تا عمل فیلتر notch را انجام دهد. این کار را با تنظیم مناسب پارامترهای  $T_i$  و  $T_d$  می توان انجام داد. رابطه بین پارامترهای PID و فیلتر ناچ را اینگونه می توان برقرار کرد.

$$1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d = \frac{T_d}{s} \left( s^2 + \frac{1}{T_d}s + \frac{1}{T_iT_d} \right) = \frac{T_d}{s} (s^2 + 2\zeta\omega \cdot s + \omega^2)$$

که در نتیجه

$$\omega T_i = 2\zeta \quad \omega T_d = \frac{1}{2\zeta} \quad \frac{T_i}{T_d} = 4\zeta^2$$

بدست می آیند. برای رابطه  $\omega$  نزدیک فرکانس نوسانی سیستم و  $\zeta$  کوچک مثل  $\zeta=0.2$  در نظر گرفته می شود.

### ۸-۴ کنترلر تک حلقه صنعتی Single loop PID controller

شکل یک کنترلر صنعتی PID با قابلیت auto tune و موقعیت آن در تابلو کنترل را نشان می دهد.



کلیدهای mode و up-down و دیگر کلیدها امکان تنظیم سیگنال مرجع، تنظیم پارامترهای کنترلر، نمایش مقادیر اندازه گیری شده و سیگنال کنترل را فراهم می آورد. ۲ نمایشگر امکان مشاهده هم زمان مقدار مرجع و خروجی فرایند را فراهم می سازد. دیگر مشخصات مهم اینگونه کنترلرها از این قرار است:

۱. رزولوشن در تبدیل آنالوگ به دیجیتال: 12bit ADC/DAC

**Sim4-3**: دو پاسخ پله طراحی را در یک شکل رسم کنید

۵. مدار کنترلر PID الکترونیکی

$$u(s) = K \left[ br(s) - y(s) + \frac{1}{T_i s} (r(s) - y(s)) + \frac{T_d s}{1 + T_d / N s} (cr(s) - y(s)) \right]$$

که در آن  $b=c=0.2$ ,  $K=10$ ,  $T_i=0.2s$ ,  $T_d=0.5s$  و  $N=10$  است را با تقویت کننده LM324 رسم کنید. شماره پایه های المان را در مدار بنویسید. نوع خازن و مقاومتی را که استفاده می کنید مشخص کنید مقاومتها و خازنها چند درصد تolerانس دارند. این تolerانسها چه تاثیری بر مشخصات کنترلر دارند.

۶. برای سیستم  $G(s) = \frac{1}{2s+1} e^{-0.5s}$  کنترلر PID زیگلر نیکولز طرح کنید. سپس کنترلر را به روش معمول

دیجیتالی کنید.

**Sim4.4** پاسخ پله سیستم با کنترلر آنالوگ و دیجیتال را روی یک شکل نشان دهید

۷. دلیل wind up را توضیح داده، عواقب و روشهای جلوگیری از آنرا توضیح دهید.

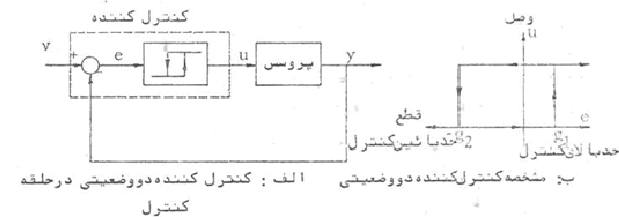
۸. معایب و محاسن پیاده سازی کنترلر به روش incremental یا velocity را توضیح دهید.

## کنترل‌های خاص

## ۱-۵ کنترل ON-OFF

کنترل‌های ۲ وضعیتی به دلایل سادگی ساخت، ارزانی و سهولت نگهداری، در کاربردهایی که دقت کنترل خیلی مهم نیست مورد استفاده قرار می‌گیرند. این کنترل‌ها به جای تثبیت دقیق خروجی آنرا بین دو حد  $y_1$  و  $y_2$  نگه می‌دارند. به فاصله بین این دو سطح، **حوزه کنترل** می‌گویند.

خروجی کنترلر دو حالت است، یا در وضعیت قطع یا در وضعیت وصل است. وقتی خروجی سیستم به حد بالایی خود برسد خروجی کنترلر به حالت قطع می‌رود و با رسیدن خروجی سیستم به حد پایین خود، خروجی کنترلر به حالت وصل یا روشن می‌رود. شکل نحوه کار کنترلر را نشان می‌دهد.

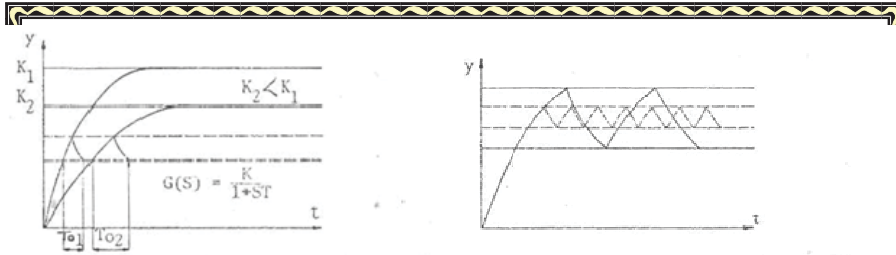


شکل ۲۰ - کنترل کننده دو وضعیتی

از آنجا که این کنترل‌ها فقط عمل قطع و وصل را انجام می‌دهند، عمر آنها به تعداد قطع و وصلها در واحد زمان بستگی دارد. تعداد قطع و وصلها در واحد زمان به عوامل زیر وابسته است:

۱: بهره فرایند: هر قدر بهره فرایند بیشتر باشد، فرکانس قطع و وصل بیشتر است. شکل ۲۱ این موضوع را نشان می‌دهد.

۲: حوزه کنترل: حوزه کنترل محدودهای است که برای تغییرات خروجی مجاز در نظر گرفته می‌شود. هرچه این محدوده کمتر باشد، فرکانس قطع و وصل افزایش می‌یابد. شکل ۲۲ این موضوع را نشان می‌دهد.



شکل ۲۲ - تاثیر حوزه کنترل بر تعداد قطع و وصل شکل ۲۱ - تاثیر بهره در تعداد قطع و وصل

۳: ثابت زمانی: هر قدر ثابت زمانی فرایند کمتر باشد، فرکانس عمل کنترلر زیاد تر است.

از ۳ عامل یاد شده، عامل اول یعنی حوزه کنترل برای تنظیم تعداد قطع و وصلها استفاده می‌شود زیرا ۲ دیگر به مشخصات فرایند بستگی دارند و قابل تنظیم نیستند. مشخصه سیستم کنترل On-Off پر بود قطع و وصل آن  $T_0$  است. توجه کنید که نوسان در ذات سیستم کنترل ۲ وضعیتی قرار دارد. هرچه حوزه کنترل کوچکتر باشد، پر بود نوسانات کمتر و کنترل دقیقتر است. البته بالا رفتن تعداد قطع و وصلها موجب فرسودگی سریعتر محرک و دیگر عوامل سیستم است.

## ۱: کنترل ۲ وضعیتی فرایند درجه ۱

فرایند درجه ۱ با تابع تبدیل زیر را در نظر بگیرید.

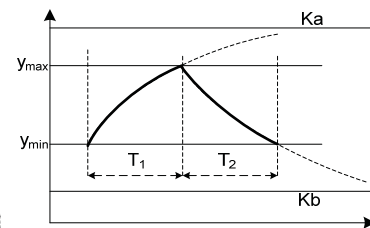
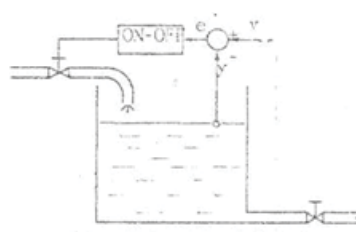
$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

فرض کنید در مدتی که کنترلر وصل است دامنه ورودی  $a$  و در حالت قطع دامنه ورودی  $b < a$  باشد. حد بالایی خروجی را  $y_{max}$  (در زمان  $t_2$ ) و حد پایینی آنرا  $y_{min}$  (در زمان  $t_1$ ) تعیین می‌کند. در زمان  $t_1$  اکسپونانسیل خروجی از  $y_{min}$  شروع و به سمت  $Ka$  می‌رود. خروجی بعد از گذشت  $T_1$  به  $y_{max}$  می‌رسد لذا می‌نویسیم

$$y_{max} = y_{min} + (Ka - y_{min})(1 - e^{-T_1/T}) \Rightarrow T_1 = T \ln \left( \frac{Ka - y_{max}}{Ka - y_{min}} \right)$$

در زمان  $t_2$  اکسپونانسیل از  $y_{max}$  شروع و به سمت  $Kb$  می‌رود که  $b$  معمولاً صفر است. مقدار خروجی بعد از زمان  $T_2$  در زمان  $t_3$  به  $y_{min}$  می‌رسد لذا می‌نویسیم

$$y_{min} = y_{max} + (Kb - y_{max})(1 - e^{-T_2/T}) \Rightarrow T_2 = T \ln \left( \frac{y_{min} - Kb}{y_{max} - Kb} \right)$$



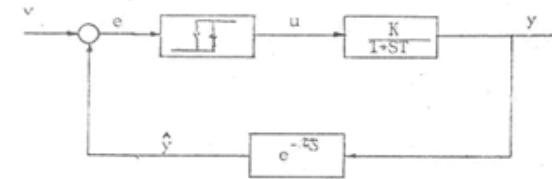
حال پریود کلید زنی برابر است با

$T_{on-off} = T_1 + T_2$   
و عرض هیستریزس رله برای سویچ زنی طبق فرمول زیر تعیین می گردد.

$$\pm \left( \frac{y_{max} - y_{min}}{2} \right)$$

## ۲: کنترل وضعیت فرایند درجه ۱ تاخیر دار

یکی از تاخیرهای متداول در سیستم کنترل تاخیر در اندازه گیری است. شکل نمونه ای از این سیستمها را نشان می دهد که تاخیر  $\tau$  در آن وجود دارد. خروجی واقعی  $y$  و مقدار اندازه گیری شده آن  $\hat{y}$  برابر، فقط دارای تاخیر زمانی  $\tau$  بین یکدیگر هستند.



شکل ۲۵ - کنترل دود وضعیت پروسس با تاخیر زمانی در اندازه گیری

در این مسائل تنظیم حوزه کنترل به نحوی است که خروجی از محدوده معینی ( $y_{min}$  و  $y_{max}$ ) خارج نگردد. وقتی ورودی on است، خروجی با رابطه زیر بیان می شود.

$$y_{max} = y_{min} + (Ka - y_{min})(1 - e^{-t_2/T}) \Rightarrow t_2 = T \ln \left( \frac{Ka - y_{max}}{Ka - y_{min}} \right)$$

با در نظر گرفتن  $t_1 = t_2 - \tau$  حال مقدار  $y_2$  از رابطه زیر بدست می آید

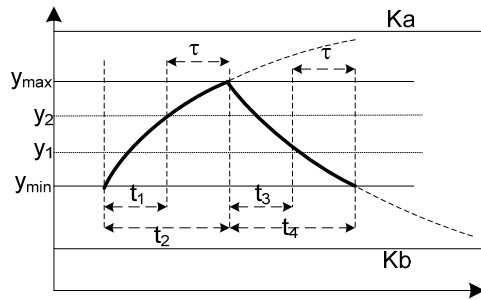
$$y_2 = y_{min} + (Ka - y_{min})(1 - e^{-t_1/T})$$

برای محاسبه  $y_1$  رفتار زمانی قطع را بررسی می کنیم

$$y_{min} = y_{max} + (Kb - y_{max})(1 - e^{-t_4/T}) \Rightarrow t_4 = T \ln \left( \frac{y_{min} - Kb}{y_{max} - Kb} \right)$$

با در نظر گرفتن  $t_3 = t_4 - \tau$  بدست می آید.

$$y_1 = y_{max} + (Kb - y_{max})(1 - e^{-t_3/T})$$



شکل ۲۶ - پروسس درجه یک همراه با تاخیر در اندازه گیری با کنترل دو وضعیتی

با این محاسبات پریود وصل  $T_1 = t_2 + \tau$  و پریود قطع برابر است با  $T_2 = t_3 + \tau$  در نتیجه

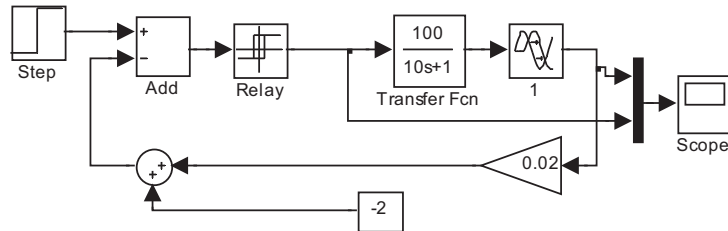
$$T = t_2 + \tau + t_3 + \tau =$$

$$T_o = t + \tau = T \ln \frac{y_{max}}{y_{min}} \cdot \frac{Ka - y_{min}}{Ka - y_{max}} \quad (13)$$

از این رابطه نتیجه می شود که در اثر تاخیر پریود وصل و افزایش می یابد.

**مثال:** ۱ دقیقه طول می کشد تا سوخت به کوره برسد. بهره کوره  $100^\circ\text{C}/\text{lit/s}$  و ثابت زمانی آن ۱۰ دقیقه است. مشخصات رله را تعیین کنید که ترانس درجه حرارت کوره بیش از  $1000 \pm 10\%$  نشود. خروجی اندازه گیر -  $2 + 0.02\theta$  ولت است.

جواب: یکی از جوابها-دامنه سویچ رله ۷ و ۱۵ و عرض آن  $\pm 1.36$  ولت سیگنال مرجع - ۱۷.۷۷



شبه سازی را با fixed point و پریود نمونه برداری کمتر از 0.1s اجرا کنید.

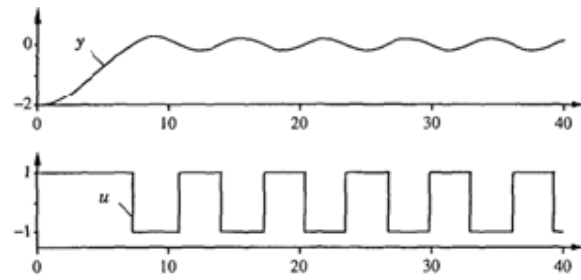
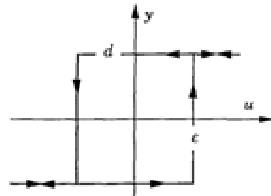


Figure 2.20 Relay output  $u$  and process output  $y$  for a system under relay feedback

### رله با هیستریزیس

رله‌ای که در مدار فیدبک رله‌ای استفاده می‌شود باید دارای اندکی هیستریزیس باشد در غیر اینصورت با اندک نویزی ریتم سوئیچ بهم می‌خورد. باید دقت شود که دامنه نویز کمتر از عرض هیستریزیس باشد.



با انتخاب مقادیر مناسب برای  $\epsilon$  و  $d$  می‌توان حلقه را با دامنه مطلوب به نوسان در آورد. در صورت استفاده از رله هیستریزیس دار اگر  $\epsilon \ll a$  باشد روابط قبلی صادق است.

### استفاده های دیگر از روش رله فیدبکی

آزمایش قبلی مشخصات فرکانسی سیستم (دامنه و فرکانس نوسانات) در نقطه ۱- نمودار نایکوئیست (فاز  $-180^\circ$ ) را می‌داد. شکل زیر کاربرد دیگری است که مشخصات فرکانسی سیستم در فاز  $-90^\circ$  را می‌دهد.

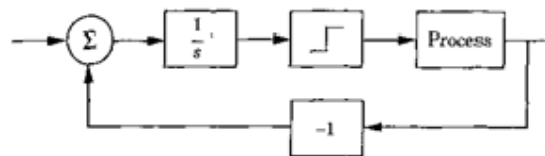
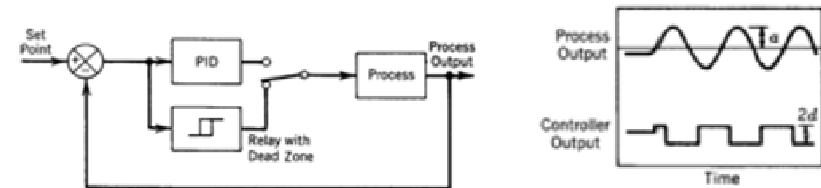


Figure 2.24 Using relay feedback to determine the frequency  $\omega_{90}$ .

مثال: برای سیستم  $G(s) = \frac{1}{(s/10+1)^{10}}$  کنترلر ZN به روش رله فیدبکی طرح کنید.

### ۲-۵ روش رله فیدبکی Relay Feedback

یکی از روشهای طراحی کنترلر، روش فرکانسی زیگلر نیکولز است که به پارامترهای نهایت بهره و نهایت پریود نیاز دارد. بدست آوردن عملی این پارامترها ممکن است منجر به ناپایداری سیستم گردد از اینرو روشی بر اساس استفاده از رله در سیستم حلقه بسته پیشنهاد شده است. شکل روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.



۱. برای تعیین نهایت بهره و نهایت پریود، همان حلقه کنترل موجود کفایت می‌کند ولی رله‌ای موازی کنترلر تعبیه می‌شود آنگونه که در شکل نشان داده شده است.
۲. رله در حلقه قرار گرفته و کنترلر از مدار خارج می‌شود.
۳. با بستن حلقه، خروجی به نوسان در می‌آید. ممکن است برای این منظور دامنه سوئیچ رله  $d$  نیاز به تنظیم داشته باشد.
۴. حد تغییرات  $d$  را آنگونه در نظر بگیرید که عملکرد سیستم را مختل نکند. صمنا مدار به نوسان درآید و سیگنال کنترلر مربعی  $50\%$  شود
۵. بین سیگنال مربعی کنترلر و سینوسی خروجی  $180^\circ$  درجه اختلاف فاز وجود دارد. در این حالت بهره حلقه در فرکانس نوسانات ۱ است.
۶. پریود نوسانات خروجی، همان پریود موج مربعی و برابر نهایت پریود سیستم است.  $P_{cu}$
۷. با فرض اینکه فرایند، هارمونیکهای فرکانس بالای ورودی مربعی را تضعیف می‌کند، بهره فرایند در فرکانس نهایت فرکانس برابر حاصل تقسیم دامنه خروجی به دامنه هارمونیک اول موج مربعی کنترلر است.

$$G(\omega_{cu}) = -\frac{a}{4/\pi d}$$

که در آن  $2a$  قله به قله خروجی و  $2d$  قله به قله ورودی است.

۸. حاصلضرب بهره حد در دامنه فرایند در فرکانس حد برابر  $-1$  باید شود. لذا

$$G(\omega_{cu}) * Kcu = -1 \Rightarrow Kcu = \frac{4d}{\pi a}$$

است که در آن  $a$  دامنه سینوس و  $d$  دامنه موج مربعی است. از این مقدار برای تنظیم کنترلر PID طبق جدول زیگلر نیکولز استفاده کنید. نمونه‌ای از سیگنال کنترلر و خروجی در شکل نشان داده شده است.

۳-۵ روش مدل داخلی (IMC)

۱-۳-۵ طراحی مستقیم

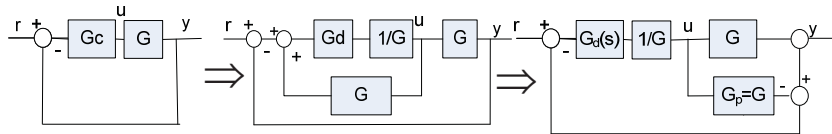
در روش های قبلی طراحی کنترلر از جدول استفاده شد. در اینجا روش دیگری برای طراحی کنترلر معرفی می شود. در این روش

۱. پاسخ مطلوب حلقه بسته داده می شود  $T_d$  (درجه ۱ با بهره ۱)
۲. سپس کنترلر از رابطه زیر بدست می آید

$$G_d = T_d = \frac{G_c G_0}{1 + G_c G_0} \Rightarrow G_c = \frac{T_d}{G_0(1 - T_d)}$$

۳. این طرح برای سیستم تاخیر دار و غیر حداقل فاز قابل اعمال نیست چون کنترلر ناپایدار تولید می کند. طرح IMC مشابه طرح مستقیم است که این مشکل در آن حل شده است.

شکل ۳ ساختار معادل برای این طراحی را نشان می دهد

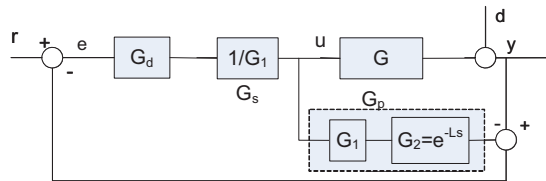


حال اگر پاسخ مطلوب  $T_d(s)=1$  خواسته شود، کنترل ایده آل بدست می آید که بهره آن  $\infty$  است. این کنترلر قابل پیاده سازی نیست.

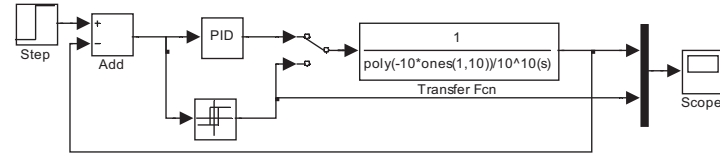
$$G_c = \frac{T}{G_0(1-T)} = \infty \quad \text{Infinitgain, unrealizable}$$

۲-۳-۵ روش IMC

روش IMC برای کنترل سیستمها با نسبت  $L/T$  بزرگ مطابق شکل زیر مورد استفاده قرار می گیرد. برای رفع مشکل تاخیر و صفر سمت راست، در این طرح  $T_d = G_1 * G_2$  و  $G = G_1 * G_2$  می شود که  $G_2$  تاخیر و یا بخش معکوس ناپذیر (صفر سمت راست) سیستم است



در این سیستم





۱. مدل تقریبی فرایند  $G_p$  (که به صورت تجربی و طی آزمایش بدست آمده است) در کنترلر موازی فرایند جای داده می شود.

۲. به دلیل قرار گرفتن مدل فرایند در کنترلر به آن Internal model controller می گویند.

۳. اغتشاش در سیستم، با اغتشاشی در خروجی معرفی می شود.

۴. مدل تقریبی فرایند به ۲ قسمت معکوس شونده  $G_1(s)$  و غیر قابل معکوس شدن  $G_2(s)$  تقسیم می شود. تاخیر و جملات صفر سمت راست در دسته اخیر جای می گیرند  $G_1 G_2 \approx G_p$

۵. جمله  $G_2$  دارای بهره واحد و در برگزیده صفر سمت راست و تاخیر است که تقریب آن  $e^{-Ls}$  است.

۶. جمله  $1/G_1$  بصورت سری در کنترلر جای داده می شود.

۷.  $G_d$  یک فیلتر پایین گذر است که رفتار مطلوب (بدون تاخیر) را مشخص می کند

$$G_d = \frac{1}{(\tau_c s + 1)^r}$$

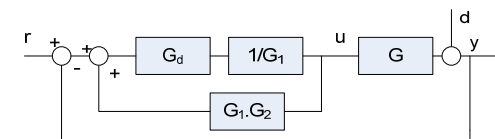
در این رابطه  $\tau_c$  ثابت زمانی مطلوب برای سیستم حلقه بسته است. پارامتر  $r$  یک عدد صحیح مثبت است و به نحوی انتخاب می گردد که  $G_d/G_1$  کسر proper گردد (درجه صورت برابر یا کمتر از درجه مخرج گردد). تابع تبدیل مورد نظر در این طرح

$$T_d(s) = G_d(s)G_2(s) = \frac{1}{\tau_c s + 1} e^{-Ls}$$

به این ترتیب فرمول کنترلر به قرار زیر می گردد.

$$G_c = \frac{G_d}{G_1(1 - G_d G_2)}$$

که در شکل نیز همین گونه است.



مثال سیستم درجه ۱: اگر برای سیستم درجه ۱ پاسخ مطلوب درجه ۱ در نظر گرفته شود، کنترلر PI بدست می آید:

$$G(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)} \quad \text{and} \quad (Y/R)_d = \frac{1}{\tau_c s + 1}$$

$$G_c(s) = \frac{1}{G(s)} \left( \frac{1/(\tau_c s + 1)}{1 - 1/(\tau_c s + 1)} \right) = \frac{\tau s + 1}{K \tau_c s} = \frac{\tau}{\tau_c K} \left( 1 + \frac{1}{\tau s} \right) \quad (\text{PI})$$

مثال سیستم درجه ۲: برای فرایند درجه ۲ و رفتار مطلوب درجه ۱، کنترلر PID نتیجه می شود.

$$G(s) = \frac{K}{(\tau_c s + 1)(\tau s + 1)} \quad \text{and} \quad (Y/R)_d = \frac{1}{\tau_c s + 1}$$

$$G_c(s) = \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{\tau_c K} \left( 1 + \frac{1}{(\tau_1 + \tau_2)s} + \frac{\tau_1 \tau_2}{(\tau_1 + \tau_2)} s \right) \quad (\text{PID})$$

مثال سیستم درجه بالا: در سیستمهای دیگر، فرایند با مدل تاخیر دار می تواند تقریب زده می شود

$$G_0(s) \approx G(s) = \frac{K_p}{T_s + 1} e^{-Ls}$$

که در آن  $G$  مدل سیستم واقعی و  $G_0$  تقریب تاخیر دار آن است. کنترلری که در حالت کلی به این روش بدست می آید معمولاً درجه بالاست ولی با تمهیداتی می توان PI یا PID بدست آورد.

الف- بخشی از  $G$  که صفر سمت راست و تاخیر را شامل نشود، معکوس می گردد.

$$1/G_1(s) = \frac{1 + sT}{K_p}$$

ب) حال فیلتر را مشخص می کنیم. این فیلتر رفتار سیستم حلقه بسته را بطور تقریبی تعیین می کند که  $T_f$  ثابت زمانی آن است.

$$G_d = \frac{1}{(T_f s + 1)}$$

ج) کنترلر برابر است با

$$G_c = \frac{\frac{1}{1 + T_f s} * \frac{1 + T_s}{K_p}}{1 - \frac{1}{1 + T_f s} * \frac{1 + T_s}{K_p} * \frac{K_p}{1 + T_s} e^{-Ls}} = \frac{1 + T_s}{K_p(1 + T_f s - e^{-Ls})}$$

۱. کنترلر از خود رفتار انتگرالی نشان می دهد زیرا  $G_c(0) = \infty$  است پس خطای ماندگار صفر است.

۲. این کنترلر قابل ساخت است اگر چه ساختار آن PID نیست.

۳. با نوشتن رابطه سیگنال کنترل و خطا بدست می آید

$$(1 + T_f s - e^{-Ls})U(s) = \frac{1 + T_s}{K_p} E(s)$$

با تقسیم طرفین رابطه بر  $1 + T_f s$  و مرتب کردن آن بدست می آید

$$U(s) = \frac{1 + T_s}{K_p(1 + T_f s)} E(s) + \frac{1}{(1 + T_f s)} e^{-Ls} U(s)$$

که جمله دوم سمت راست (قبل از تاخیر) را می توان بعنوان پیش بینی خروجی در زمان  $t$  تلقی کرد. از اینرو به این کنترلر predictive PI (PPI) می گویند. با  $T_f = T$  این موضوع واضحتر دیده می شود.

۴. برای سیستمهای با تاخیر زیاد، این کنترلر به دلیل پیش بینی خروجی، بهتر از مشتق گیر است.

۵. وقتی تاخیر زیاد است، جمع خطای گذرا کمتر از جایی است که کنترلر PID استفاده شود.

تقریب با PI و PID

اگر

$$e^{-sL} \approx 1 - sL$$

تقریب زده شود فرمول کنترلر اینگونه بدست می آید.

$$G_c(s) = \frac{1 + sT}{K_p s(L + T_f)}$$

که کنترلر PI است. اگر تاخیر با روش Pade تقریب زده شود.

$$e^{-sL} \approx \frac{1 - sL/2}{1 + sL/2}$$

انوقت کنترلر تقریباً PID بدست می آید.

$$G_c(s) = \frac{(1 + sL/2)(1 + sT)}{K_p s(L + T_f + sT_f L/2)} \approx \frac{(1 + sL/2)(1 + sT)}{K_p s(L + T_f)}$$

Table 12.1 IMC-Based PID Controller Settings for  $G_c(s)$  [4]\*

Case	Model	$K_c K$	$\tau_f$	$\tau_D$
A	$\frac{K}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{\tau_c}$	$\tau$	—
B	$\frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_c}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$
C	$\frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}$	$\frac{2\zeta \tau}{\tau_c}$	$2\zeta \tau$	$\frac{\tau}{2\zeta}$
D	$\frac{K(-\beta s + 1)}{\tau^2 s^2 + 2\zeta \tau s + 1}, \beta > 0$	$\frac{2\zeta \tau}{\tau_c + \beta}$	$2\zeta \tau$	$\frac{\tau}{2\zeta}$
E	$\frac{K}{s}$	$\frac{1}{\tau_c}$	—	—
F	$\frac{K}{s(\tau s + 1)}$	$\frac{1}{\tau_c}$	—	$\tau$

برای سیستم SOPTD با بسط تاخیر با روش تیلور درجه انیز کنترلر PID بدست می آید.

$$G_c(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \frac{1}{(\tau_c + \theta)s} = \frac{(\tau_1 + \tau_2)}{K(\tau_c + \theta)} \left( 1 + \frac{1}{(\tau_1 + \tau_2)s} + \frac{\tau_1 \tau_2}{(\tau_1 + \tau_2)} s \right) \quad (\text{PID})$$

## نکات

- در روش IMC مقاوم بودن سیستم در مقابل اغتشاش و نویز بطور واضح تعبیه شده است. پارامتر فیلتر پایین گذر  $T_f$  وظیفه تنظیم بین مقاوم بودن سیستم و قابلیت مانور را بر عهده دارد.
- از این روش سیستمی با عملکرد عالی نسبت به سیگنال ورودی بدست می آید.
- در طراحی کنترلر، قطب با صفر حذف شود.

$$G_c G = \frac{1 + sT}{K_p(L + T_f)} \frac{K_p}{1 + sT} e^{-sL} = \frac{1}{(L + T_f)} e^{-sL}$$

در نتیجه

- عملکرد سیستم در مقابل اغتشاش ناشی از بار در مقایسه با سیستمهای دارای قطب غالب خوب نیست.
- موجب پدید آمدن مدهای غیر قابل کنترل در حلقه بسته می شود که اگر مد کند و یا ناپایدار باشد. (قطب نزدیک محور  $j\omega$  یا سمت راست این محور باشد) مشکل سیستم اساسی است.
- در این حالت عمل مشابه روش IMC است.
- در حالت ساده  $T_d(s)$  می تواند سیستم درجه ۱ با ثابت زمانی  $\tau_c$  باشد. اگر ثابت زمانی  $\tau_c$  کوچک در نظر گرفته شود، سیستم عملکرد تهاجمی دارد (KC بزرگ). اگر  $\tau_c$  بزرگ منظور شود، عملکرد سیستم محافظه کارانه است (KC کوچک).

مثال: برای سیستم

$$G(s) = \frac{10}{2s + 1} e^{-5s}$$

به روش IMC کنترلی طرح کنید که  $t_f=1$  ثانیه شود.

$$PI \Rightarrow G_c(s) = \frac{2}{60} \left( 1 + \frac{1}{2s} \right)$$

۳-۳-۵ تنظیم  $\lambda$  tuningاین نیز یک حالت IMC است که در آن پاسخ مطلوب  $\tau_c = \lambda T$  در نظر گرفته می شود.

$$T_d(s) = \frac{e^{-Ls}}{1 + \lambda Ts} \quad G_d(s) = \frac{1}{1 + \lambda Ts}$$

در اینجا  $\lambda$  پارامتر تنظیم رفتار حلقه بسته است. در عمل  $\lambda$  بین ۰.۵ تا ۵ انتخاب می گردد.  $\lambda=1$  ساده ترین حالت است که رفتار گذرای حلقه بسته مانند حلقه باز است. اگر  $\lambda < 1$  باشد رفتار حلقه بسته سریعتر از رفتار حلقه باز و اگر  $\lambda > 1$  باشد بر عکس است.

۵. با کاهش  $\lambda$  این موضوع بیشتر افزایش می یابد.

مثال: برای سیستم

$$G(s) = \frac{10}{2s + 1} e^{-5s}$$

به روش تنظیم  $\lambda$  کنترلی طرح کنید که  $\lambda=1$  باشد.

$$PI \Rightarrow G_c(s) = \frac{2}{70} \left( 1 + \frac{1}{2s} \right)$$

## ۴-۳-۵ تنظیم Haalman

این روش نیز IMC است که در آن رفتار مطلوب حلقه بسته ثابت و بر اساس حداقل کردن مجموع مربعات خطا منجر به

$$G_c G = \frac{2}{3Ls} e^{-sL}$$

می گردد این نتیجه به معنی

$$T_d(s) = \frac{e^{-sL}}{1.5Ls + e^{-Ls}} \Rightarrow G_d(s) = \frac{1}{1.5Ls + e^{-Ls}} \approx \frac{1}{0.5Ls + 1}$$

مثال: اعمال روش هالمن به سیستم ۳ پارامتری درجه ۱ زیر

$$G(s) = \frac{e^{-sL}}{1 + Ts}$$

کنترلر

$$G_c(s) = \frac{2(1 + sT)}{3Ls} = \frac{2T}{3L} \left( 1 + \frac{1}{sT} \right)$$

را نتیجه می دهد که کنترلر PI با مقادیر  $T_i = T$  و  $K = \frac{2T}{3L}$  است. این ضرایب را می توان با ضرایب  $K = 0.9T/L$

و  $T_i = 3L$  که جدول زیگلر نیکولز در مورد این مسئله می دهد مقایسه کرد.

اگر این روش به سیستم ۴ پارامتری زیر اعمال گردد

$$G_p(s) = \frac{1}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} e^{-sL}$$

پارامترهای کنترلر  $T_d = \frac{T_1 T_2 T}{T_1 + T_2}$  بدست می آید. و  $T_i = T_1 + T_2$ ،  $K = \frac{2(T_1 + T_2)}{3L}$

برای سیستمهای پیچیده تر فرایند باید با مدلی تقریب زده شود که بتوان به سادگی این روش را پیاده کرد.

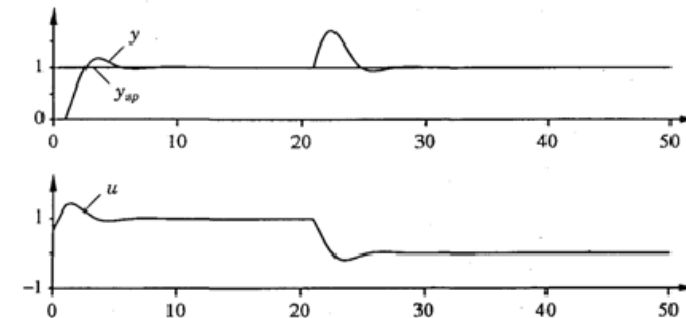


Figure 4.19 Simulation of a closed-loop system obtained by Haalman's method. The plant transfer function is  $G(s) = e^{-s}/(s+1)$ . The diagrams show setpoint  $y_{ap}$ , process output  $y$ , and control signal  $u$ .

مثال: برای سیستم

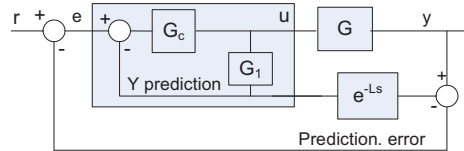
$$G(s) = \frac{10}{2s+1} e^{-5s}$$

به روش Haalman کنترلی طرح کنید..

$$PI \Rightarrow G_c(s) = \frac{4}{150} \left( 1 + \frac{1}{2s} \right) \text{ جواب:}$$

### ۵-۳-۵ Smith predictor

برای حل مشکل تاخیرهای بزرگ، O.J.M. Smith در سال ۱۹۵۷ طرحی که به نام *Smith Predictor* شناخته می شود را معرفی کرد.



در این طرح زنجیره ای حلقه کنترل داخلی پیش بینی خروجی  $y_p$  و حلقه خارجی خطا در پیش بینی  $e_p$  را کنترل می کنند. برای مثال اگر سیستمی

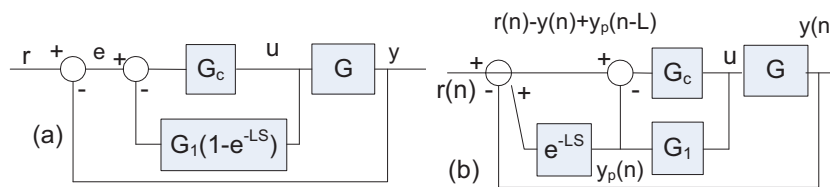
$$G_p(s) = e^{-Ls} G_1(s)$$

باشد، خروجی بخش  $G_1(s)$  پیش بینی خروجی در  $L$  ثانیه قبل از وقوع است که با فیدبک داخلی تثبیت می گردد. اگر مدل دقیق باشد،  $G_1(s)$  پیش بینی دقیقی از خروجی را فراهم می آورد و خطای پیش بینی که در حلقه خارجی تعیین می شود صفر می شود.

مشکل این است که  $y_p$  واقعی قابل اندازه گیری نیست برای مواجهه با مسئله دو راه ممکن است در پیش گرفته شود

### ۱- مدل سازی ریاضی $G_1$

در این حالت روش مشابه IMC است که در شکل نشان داده شده است.



### ۲- اندازه گیری غیر مستقیم خروجی $G_1$

در این روش سیگنال دیگری اندازه گیری می شود که بطور غیر مستقیم تقریبی از  $y_p$  را ارائه کند. مثلاً در سیستم نورد که تثبیت ضخامت مورد نظر است، ضخامت ورق توسط اندازه گیر اتمی Nucleonic ممکن است اندازه گیری شود. ضخامت با ضخامت مطلوب مقایسه و خطا به کنترلر P اعمال می گردد. خروجی کنترلر توسط محرک هیدرولیکی فاصله بی باری غلطکهای نورد، s را تنظیم می کند. از آنجا که بدلائل عملیاتی، اندازه گیر در فاصله

### ب) SP بر اساس بقا جریان جرم

اگر ضخامت و سرعت ورق ورودی به نورد و خروجی از آن به ترتیب  $h_1$  و  $v_1$  و  $h_2$  و  $v_2$  باشد، از قانون بقا جرم می توان نوشت:

$$\text{Rate of mass flow in} = \text{Rate of mass flow out}$$

حال اگر عرض ورق ورودی و خروجی برابر باشد می توان نوشت،

$$h_1 v_1 = h_2 v_2 \Rightarrow h_2 = \frac{h_1 v_1}{v_2}$$

سرعت حرکت ورق را با سرعت سنج لیزری یا سرعت دوران غلطکهای پشت سرهم می توان اندازه گرفت. ضخامت ورق ورودی نیز در دسترس است، در نتیجه ضخامت ورق خروجی را می توان تخمین زد.

### طراحی کنترلر

برای طراحی کنترلر  $G_c$  طرح می شود تا رفتار  $G_1$  مطلوب گردد.

روش ۱:  $G_c = K$  در نظر گرفته شده،  $K$  به نحوی تعیین می شود که رفتار

$$\frac{KG_1}{1+KG_1} = G_d$$

مطلوب گردد.

روش ۲: به روش مستقیم نیز می توان عمل کرد. در اینصورت از

$$G_c = \frac{G_d}{G_1(1-G_d)}$$

استفاده می شود که با  $e^{-Ls} \approx 1 - Ls$  یا  $e^{-Ls/2} \approx \frac{1-Ls/2}{1+Ls/2}$  کنترلر PI بدست می آید. در پیاده سازی دیجیتالی امکان لحاظ کردن تاخیر وجود دارد و نیازی به تقریب نیست.

در هر دو حالت حلقه بسته از اینقرار است.

$$T_d = G_d e^{-Ls}$$

مثال: برای سیستم  $G_d(s) = \frac{1}{(s+1)^{10}}$  به روش SP کنترلر P طرح کنید که ثابت زمانی حلقه بسته 0.15 شود.

برای تعیین  $G_1$ ، ابتدا مدل تاخیر دار  $\frac{1}{(1.5s+1)} e^{-8.5s}$  برای آن تقریب زده می شود که  $G_1(s) = \frac{1}{(1.5s+1)}$  را نتیجه

می دهد.

روش ۲: در روش مستقیم طراحی

$$G_c = \frac{T}{G_1(1-T)} = \frac{\frac{1}{1.5s+1}}{\frac{1}{1.5s+1} \left(1 - \frac{1}{1.5s+1}\right)} = \frac{1.5s+1}{0.15s} \Rightarrow G_{CT} = \frac{G_c}{1+G_c G_1(1-e^{-Ls})} = \frac{(1.5s+1)}{8.65s}$$

روش ۱: اگر  $G_c = K$  استفاده شود محاسبات اینگونه می شود.

$$T(s) = \frac{k}{(1.5s+1+k)} = \frac{k'}{0.15s+1} \Rightarrow k = 9$$

قابل ملاحظه های دورتر از غلطکها نصب می گردد، در حلقه تاخیر ایجاد می شود که منجر به رفتار نوسانی نا مطلوب می گردد.

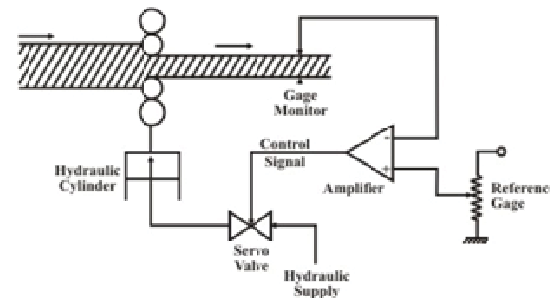


Fig. 4 Basic feedback loop for gage control.

اگر برای رفع مشکل از SP استفاده شود تقریبی از ضخامت قبل از تاخیر باید بدست آید که همانطور که اشاره شد اندازه گیری مستقیم آن عملاً امکان ندارد. در نتیجه اندازه گیری کمیت های دیگر که بطور غیر مستقیم ضخامت قبل از تاخیر را می دهند استفاده می شود. در اینجا دو روش بیان می شود

### الف) SP بر اساس تخمین ضخامت از فاصله غلطکها

در این روش ضخامت ورق با توجه به فاصله بی باری قبل از آنکه توسط اندازه گیر ثبت شود، تخمین زده می شود. برای تخمین از رابطه زیر استفاده می گردد.

$$h = C_0 + \frac{P}{K_s}$$

در این رابطه  $h$  ضخامت ورق،  $C_0$  فاصله بی باری غلطکها،  $P$  نیروی اعمالی محرک هیدرولیکی و  $K_s$  ضریب سفتی  $stiffness$  سیستم نورد است. شکل این سیستم را نشان می دهد.

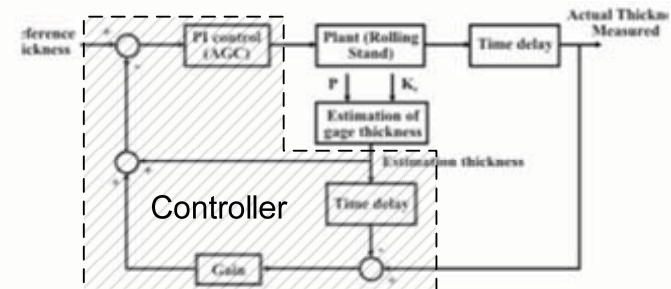


Fig. 5 Smith Predictor by estimating the roll gap.

$$G_{CT}(s) = \frac{G_c(s)}{1 + G_1(1 - e^{-Ls})G_c(s)} = \frac{k}{1 + \frac{1}{1.5s+1}(1 - 1 + 8.5s)k} = \frac{9(1.5s+1)}{78s+1} \approx \frac{9}{78} \frac{(1.5s+1)}{s}$$

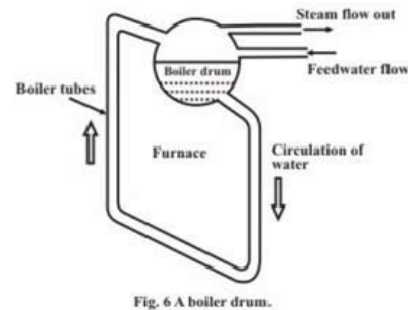
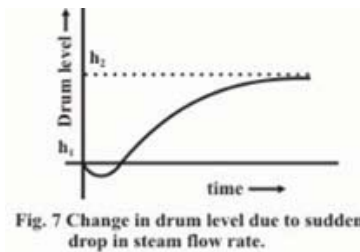
بدست می آید.

### ۵-۳-۶ کنترل سیستم با رفتار معکوس

بعضی از سیستمها رفتار خاصی از خود نشان می دهند. مثلا وقتی به آنها پله اعمال می گردد ابتدا در جهت معکوس حرکت کرده و سپس به مسیر اصلی بر می گردند. سیستمهای غیر حداقل فاز (دارای صفر سمت راست) اینگونه رفتار را نشان می دهند.

#### مثالی از سیستم با رفتار معکوس

برای مثال به سیستم دیگ بخار شکل دقت کنید. آب پر فشار از طریق پمپ وارد دیگ وی شود و با جریان در لوله هایی که از مشعل می گذرند به بخار آب تبدیل شده و وارد دیگ می گردد. بخار از قسمت فوقانی دیگ متعاقبا خارج می گردد. بنابر این دیگ شامل مخلوط آب و بخار پر فشار است. سطح مایع داخل دیگ بر اساس مقدار بخار مورد نیاز و توسط دبی آب ورودی کنترل می گردد.



وقتی دبی آب ورودی و دبی بخار برابر باشد، ارتفاع مایع در حالت ماندگار خود است. حال اگر بطور ناگهانی دبی بخار خروجی کم شود و دبی آب ورودی ثابت باشد، فشار داخل دیگ افزایش پیدا کرده و متعاقبا ارتفاع مایع کم می شود تا اینکه بعد از مدتی به حالت ماندگار خود افزایش پیدا می کند. این امر در نتیجه افزایش ناگهانی دبی بخار به حالت معکوس نیز اتفاق می افتد که ابتدا ارتفاع زیاد شده و سپس به حالت ماندگار خود کاهش می یابد. این رفتار در شکل نشان داده شده است.

#### تابع تبدیل سیستم با رفتار معکوس

سیستم با رفتار معکوس صفر سمت راست دارد

$$G(s) = \frac{K_0(\alpha s - 1)}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)}$$

به این سیستمها، سیستمهای حداقل فاز می گویند. از تجزیه سیستم به جملات درجه ۱ بدست می آید که سیستم تفاضل دو سیستم درجه ۱ است

$$G(s) = \frac{K1}{(1 + \tau_1 s)} - \frac{K2}{(1 + \tau_2 s)}$$

اگر فرض کنید که

$$\frac{\tau_1 > K_1}{\tau_2 > K_2} > 1$$

از اینرو پاسخ پله شکل را می توان به صورت ترکیب ۲ پاسخ معکوس یکدیگر دید.

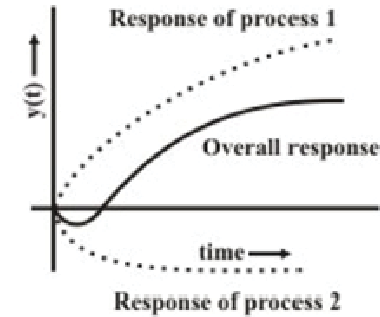
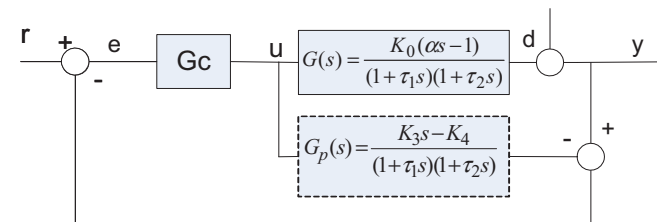


Fig. 8 Inverse response resulting from two first order opposing systems.

### کنترل سیستم با رفتار معکوس

کنترل این سیستمها مانند سیستمهای تاخیر دار مشکل است. برای کنترل این سیستمها نیز باید از تکنیک مشابه IMC استفاده شود. برای این منظور سیستمی مشابه سیستم اصلی از آن کم می شود تا سیستم منتهج صفری نداشته یا اینکه صفر سمت چپ باشد.



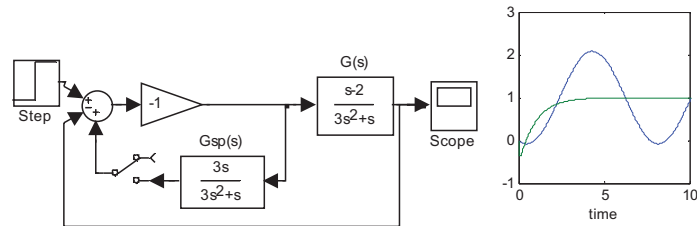
$$G_T(s) = \frac{K_0(\alpha s - 1)}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} - \frac{K_3 s - K_4}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} = \frac{K_0(\lambda s + 1)}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)}$$

که  $\lambda$  می تواند خیلی کوچک یا صفر باشد. حال برای  $G_T$  به روشهای قبل کنترلر طرح می گردد.

$$G_C(s) = \frac{T}{G_T(s)(1 - T)}$$

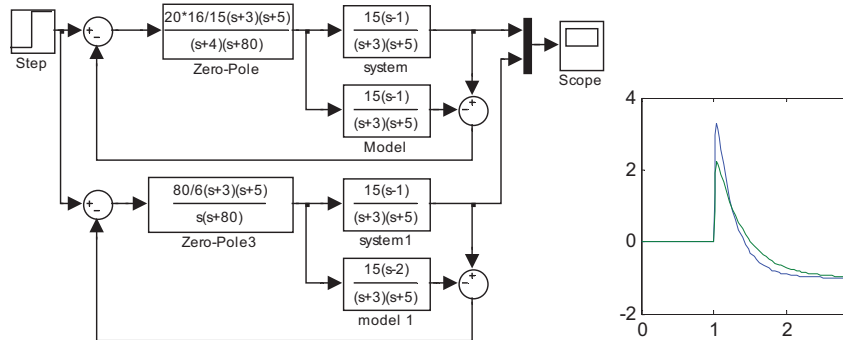
کنترلی که در اینجا انتخاب می شود معمولا PI است.

مثال: برای سیستم  $G(s) = \frac{s-2}{3s^2+s}$  به روش SP کنترلر طرح کنید.



سیستم اصلی با بهره ۱- نوسانی می شود. در حالیکه کنترلر SP در بهره ۴۰- بدون اینکه ناپایدار شود زمان نشست ۳ تا ۴ ثانیه می دهد.  $G_{sp}(s)$  آنگونه تعیین شده است که مجموع آن با  $G(s)$  صفر سمت راست نداشته باشد.

مثال: در مثال زیر سیستم حداقل فاز یک بار دنبال کردن طرح IMC کنترل شده است و در باردیگر مدلی که موازی قرار می گیرد دقیقا همان مدل سیستم نیست بلکه مدلی است که اثر صفر سمت راست را خنثی می کند. در ادامه به روش مستقیم برای سیستم مجموع کنترلر PI طرح شده است. شکل نشان می دهد که رفتار اولیه طرح دوم بهتر است.



## ۴-۵ ساختارهای دیگر حلقه کنترل

## ۱-۴-۵ کنترل زنجیره ای Cascade Control

سیستم تبادل حرارت شکل ۱ را در نظر بگیرید.

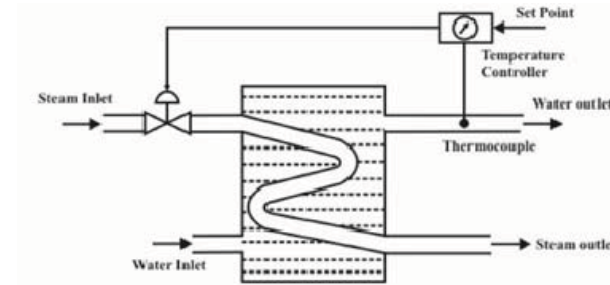


Fig. 1 Feedback temperature control of a heat exchanger

در این سیستم با تبادل حرارت بین بخار و آب، آب گرم تولید می گردد. برای تنظیم درجه حرارت آب، درجه حرارت آن اندازه گیری شده و با مقدار درجه حرارت مطلوب مقایسه می گردد و با کنترل شیر موجود در مسیر بخار گرمای مطلوب بدست می آید.

اگر اختلال تغییر فشار بخار گرم وجود داشته باشد، بدلیل دینامیک حرارتی دیگ مدتی طول می کشد تا در خروجی ظاهر شده و اندازه گیری و تثبیت شود. در کنترل زنجیره ای این اختلال در تامین گرما توسط یک حلقه فیدبکی که دبی ورودی را کنترل می کند تنظیم می شود. به این ترتیب اثر تغییر فشار به عنوان اختلال کاهش می یابد. شکل این سیستم کنترل زنجیره ای را نشان می دهد.

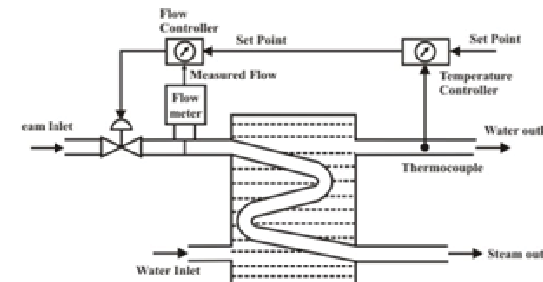


Fig. 2 Cascade Control

بلوک دیاگرام سیستم نشان می دهد که حلقه کنترلی داخل حلقه اصلی ایجاد شده است. سیگنال مرجع حلقه داخلی را حلقه خارجی تعیین می کند.

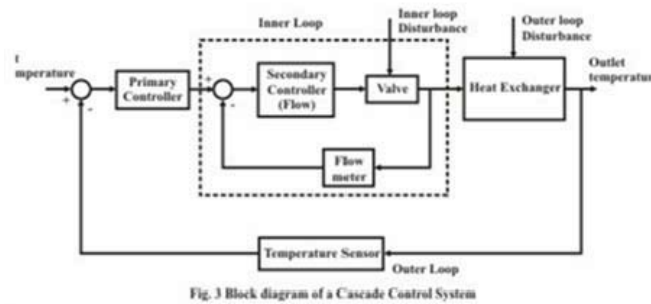


Fig. 3 Block diagram of a Cascade Control System

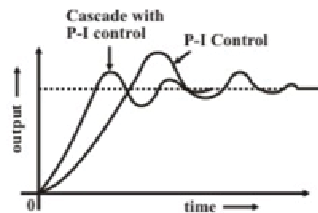


Fig. 4 Comparison of responses between cascade and simple feedback control.

نقطه قوت کنترل زنجیره ای از این قرار است:

۱. حلقه داخلی اثر اختلالات داخلی و رفتارهای غیر خطی خود را مهار می کند به این ترتیب بخشی از حلقه بدون اختلال و اثرات غیر خطی می شود. نتیجه اینکه طراحی کنترلر حلقه خارجی ساده تر می شود.
  ۲. کنترلر اولیه ساده تری برای بهبود رفتار نیاز دارد. شکل ۴ این موضوع را وقتی از کنترلر PI استفاده شود نشان می دهد. البته همزمان تعداد پارامترها به دلیل وجود کنترلر حلقه داخلی افزایش می یابد.
- از معایب این روش افزایش تعداد کنترلرها و تعداد سنسورهای مورد نیاز است.

## طراحی کنترلرها

۱. دینامیک مطلوب کلی  $T_d = G_d e^{-Ls}$  داده می شود.
۲. سیستم داخلی: برای حلقه داخلی  $T_{f2}$  که معمولاً ۳ تا ۴ برابر سریعتر از  $G_d$  است در نظر گرفته و کنترلر طرح می شود.

$$G_{c2} = \frac{T_{f2}}{G_{p2}(1 - T_{f2})}$$

۳. سیستم کلی: برای کنترلر حلقه اصلی حالا می نویسیم

$$G_{c1} = \frac{G_d}{G_{p1} T_{f2} (1 - G_d)}$$





### ۳-۴-۵ ساختار feedforward

مواردی وجود دارند که به غیر از فیدبک نیاز به استفاده از فیدفوروارد وجود دارد. وقتی اختلال قابل اندازه گیری باشد، فیدفوروارد روش موثری برای حذف اثر آن از خروجی است. مزیت فید فوروارد نسبت به فیدبک از آنجا ناشی می شود که در حالت فیدبک، بعد از اثر گذاشتن اختلال در خروجی سیستم کنترل وارد مرحله کاهش دادن آن می گردد ولی در حالت فید فوروارد اختلال اندازه گیری شده فوراً عمل تصحیح را آغاز می کند. در نتیجه با بکارگیری فیدفوروارد در کنار سیستم فیدبک، سرعت عمل و کارایی سیستم در مهار اثر اختلال بهبود می یابد.

#### تبادل حرارت

برای روشن شدن مطلب به سیستم تبادل حرارتی شکل ۱ دقت کنید.

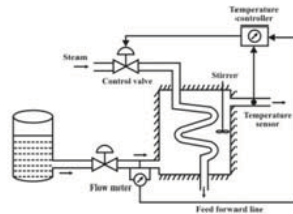


Fig. 1 Feed forward control action in a heat exchange.

تغییر دبی آب سرد مخزن که به مبدل حرارتی وارد می شود می تواند نقش اختلال را داشته باشد. این تغییر می تواند ناشی از تغییر ارتفاع مایع در تانک باشد. فرض کنید ارتباط فیدفوروارد وجود نداشته باشد و فقط سیستم با فیدبک کنترل شود. وقتی دبی کاهش یابد، دمای آب خروجی بالا می رود. افزایش دما توسط سنسور اندازه گیری شده و به حلقه فیدبک اعمال می شود. فیدبک با کاهش دبی بخار از طریق بستن شیر تلاش می کند دما را تثبیت کند.

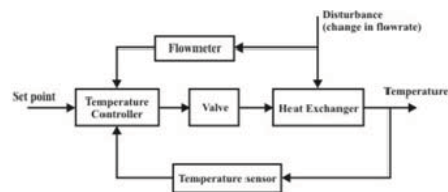


Fig. 2 Block diagram representation of the control action shown in Fig. 1

این عملیات در کل وقت گیر است و برای از بین رفتن اثر اختلال مدتی طول می کشد. حال اگر دبی اندازه گیری شود و تغییرات آن به سیستم کنترل اعمال گردد، زمان کمتری طول می کشد تا سیستم اثر اختلال را از بین ببرد. در نتیجه سرعت پاسخ سیستم به اختلال افزایش می یابد. این کار اما زمانی امکان پذیر است که اختلال قابل اندازه گیری باشد. بلوک دیاگرام سیستم فیدفوروارد-فیدبک شکل ۱ در شکل ۲ نشان داده شده است.

هدف تثبیت ارتفاع تانک ۱ است که توسط شیر f1 صورت می گیرد. برای بهبود کنترل، تانک ۲ با دینامیک سریعتر که آن نیز تحت تاثیر اختلال و ورودی است تعبیه می گردد (یا وجود دارد). ارتفاع تانک سریعتر ۲ در حلقه داخلی کنترل می گردد. این امر بهبود رفتار حلقه خارجی که تثبیت ارتفاع تانک ۱ است را به دنبال دارد.

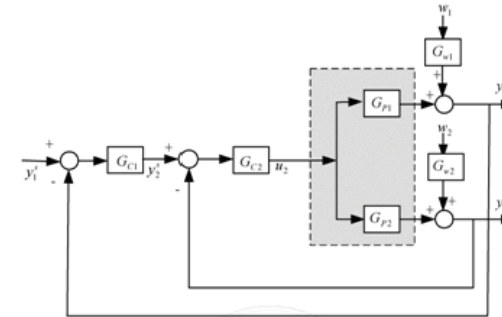


Fig. 1: A parallel cascade control system

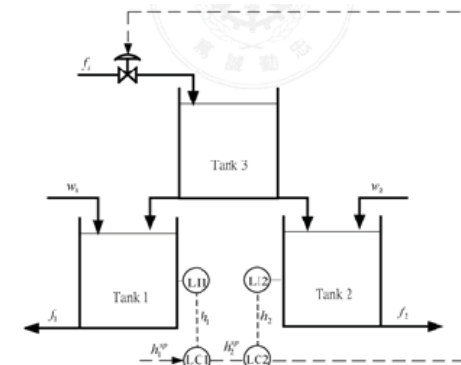


Fig. 2: Level tank control system with PCC structure

## کنترل نسبت مخلوط Ratio control

کنترل نسبت نوعی کنترل فید فوروارد است که در آن اختلال (ورودی کنترل نشده) اندازه گیری می شود و نسبت آن به نسبت خروجی سیستم کنترل (دبی ورودی تحت کنترل) ثابت نگه داشته می شود. کاربردهای آن عبارتند از: تنظیم نسبت سوخت به هوا، کنترل نسبت ۲ محلول در تنظیم غلظت، کنترل نسبت دو مایع در مخلوط.

کنترل نسبت را به هریک از دو طرح زیر می توان پیاده کرد.

**طرح ۱: مقایسه با نسبت مرجع:** در این روش دبی مایع A و B اندازه گیری شده و نسبت بین آن دو برای کنترل دبی B استفاده می شود مانند آنچه در شکل آمده است.

**طرح ۲: مقایسه با دبی مرجع:** در این روش نیز دبی هر دو مایع اندازه گیری می شود ولی از دبی A و نسبت مطلوب، دبی B تعیین و کنترل صورت می گیرد. شکل ۶

کنترلر در کنترل نسبت، معمولاً PI است تا خطای ماندگار صفر شود. عدم استفاده از جمله مشتقی به دلیلی نویزی بودن جریان مایع است.

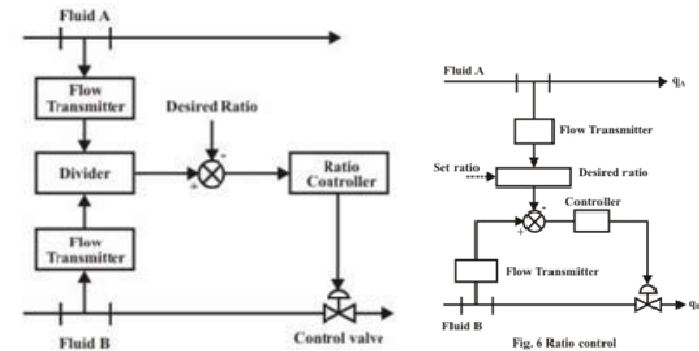


Fig. 6 Ratio control

## کنترل نسبت سوخت به هوا در موتور

برای کنترل نسبت سوخت به هوا دبی سوخت و دبی هوا اندازه گیری می شود. از آنجا که در احتراق خوب نسبت سوخت به هوا به درجه حرارت هوا بستگی دارد، درجه حرارت هوا اندازه گیری و بر اساس آن نسبت سوخت به هوا تعیین می گردد.

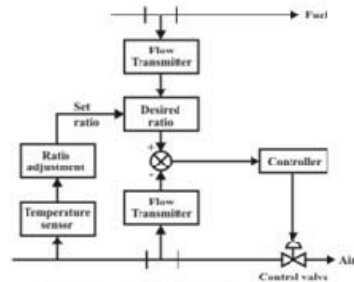


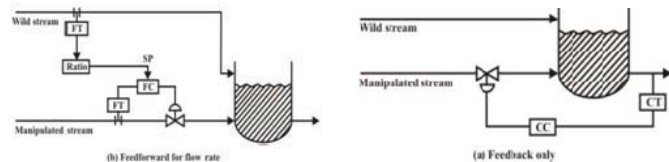
Fig 7 Ratio control with ratio adjustment mechanism

## ترکیب فیدبک فیدفوروارد

سیستم کنترل غلظت را در نظر بگیرید که ۲ محلول با هم مخلوط می شوند. یکی از محلولها بدون کنترل و دیگری دارای کنترل است. برای کنترل غلظت ترکیب فیدبک فیدفوروارد مورد استفاده قرار می گیرد.

۱- **روش فیدبک از غلظت:** در شکل 8(a)، غلظت خروجی اندازه گیری شده و از طریق فیدبک، دبی محلول قابل کنترل، تنظیم می شود. عملکرد این سیستم می تواند رضایت بخش نباشد، زیرا تغییر در دبی اختلال خروجی را تحت تاثیر قرار می دهد که تصحیح آن زمان می برد.

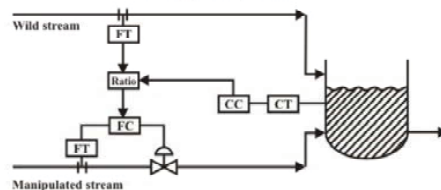
۲- **کنترل نسبت:** در طرح 8(b) کنترل نسبت به کار گرفته شده است که عملکرد سیستم را بهبود می بخشد زیرا به محض وقوع اختلال، مقدار اندازه گیری شده وارد حلقه می شود و رفتار فرایند را تصحیح می کند. چون در اینجا غلظت خروجی اندازه گیری نمی شود، طرح فقط فیدفوروارد است.



(b) Feedforward for flow rate

(a) Feedback only

۳- **کنترل نسبت و فیدبک:** در طرح فوق اثر عوامل احتمالی اختلالی اندازه گیری نشده در نظر گرفته نشده است. بنا بر این با اضافه کردن حلقه فیدبک به آن سیستم کنترل قابل اطمینان تری شکل مییابد (8(c)). در اینجا غلظت داخل مخزن نیز اندازه گیری می شود و از آن برای تنظیم نسبت استفاده می گردد.



(c) Feedforward/feedback

FC - Flow Controller FT - Flow Transmitter  
CC - Composition Controller CT - Composition Transmitter

## 8 Comparison among Feedback, Feedforward and Feedforward-feedback Control

## محاسبه تابع تبدیل فیدفوروارد

برای محاسبه تابع تبدیل فیدفوروارد، بر اساس بلوک دیاگرام شکل ۳ می توان عمل کرد که در آن:  $G(s)$  تابع تبدیل فرایند،  $G_n(s)$  تابع تبدیل اثر گذاری اختلال و  $G_c(s)$  تابع تبدیل کنترلر است.

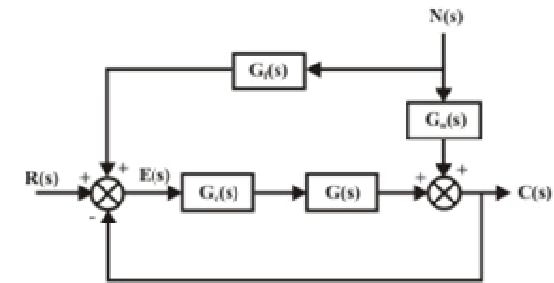


Fig. 3 Transfer function representation of the feedforward-feedback control action

در این طرح ۲ کنترلر وجود دارد. کنترلر فیدبکی  $G_c(s)$  و کنترلر فیدفوروارد که برای خنثی کردن اثر اغتشاش تعبیه شده است. بر این اساس خروجی کلی برابر است با:

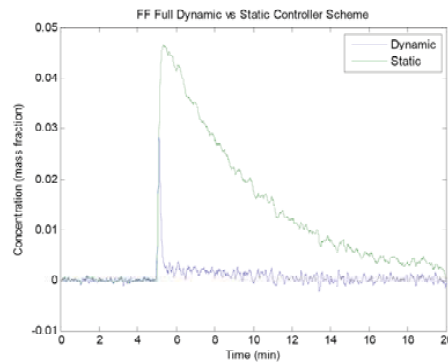
$$\begin{aligned} C(s) &= G_c(s)G(s)E(s) + G_n(s)N(s) \\ &= G_c(s)G(s)[R(s) - C(s) + G_f(s)N(s)] + G_n(s)N(s) \\ &= G_c(s)G(s)[R(s) - C(s)] + [G_c(s)G(s)G_f(s) + G_n(s)]N(s) \end{aligned}$$

اگر بخواهیم با فیدفوروارد اثر اغتشاش صفر شود می نویسیم:

$$G_c(s)G(s)G_f(s) + G_n(s) = 0$$

$$G_f(s) = -\frac{G_n(s)}{G_c(s)G(s)}$$

حذف کامل اختلال وقتی میسر است که مدل فرایند و اختلال  $G_p(s)$  و  $G_n(s)$  دقیقاً مشخص باشند که در حالت واقعی اینطور نیست. در نتیجه عملکرد FF مانند حالت ایده آل نیست. معذک وجود فیدبک کاستی های عدم تطبیق مدل را به مقدار قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. درموردی فقط از بهره  $G_f(s)$  برای استفاده می شود که اثر ماندگار اختلال را کاهش می دهد و در رفتار گذرای آن تاثیر ندارد. شکل این مسئله را نشان می دهد.



## مثال

سیستم کنترل فیدفوروارد-فیدبکی اختلاط دو محلول نشان داده در شکل زیر را در نظر بگیرید

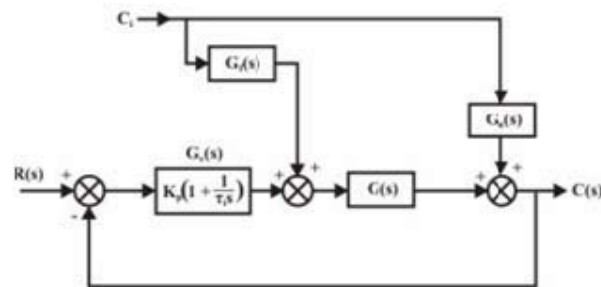


Fig. 4 Block diagram of a feedforward-feedback control of a composition control system

در این سیستم کنترلر PI است و  $C_i$  نقش اختلال را دارد. در اینجا سیگنال فیدفوروارد به خروجی کنترلر اضافه شده است. حال بر اساس توابع تبدیل بلوکهای شکل:

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

$$G_n(s) = \frac{1}{(5s+1)(s+1)^3}$$

تابع تبدیل بلوک فیدفوروارد به عبارت زیر بدست می آید.

$$G_c(s) = \frac{-1}{(5s+1)}$$

ویژگیهای کنترلر فیدفوروارد:

۱. به خطا در مدل فرایند و اختلال بسیار حساس است.
۲. اگر اختلال قابل اندازه گیری نباشد قابل استفاده نیست.
۳. به تغییر در مدل به دلیل تغییر نقطه کار حساس است.
۴. بر پایداری سیستم تاثیری ندارد.

۵. ممکن است تابع آن به دلیلی قطب سمت راست قابل ساخت نباشد. در این حالت آنرا ممکن است با Lag-Lead یا بهره خالص تقریب زد.

**مثال:** پیاده سازی فیدفورارد در عمل با مشکلاتی همراه است مثال زیر نمونه ای از این مشکلات را نشان می دهد که در آن درجه صورت تابع فیدفورارد کمتر از مخرج آن است. این چنین تابعی عملاً قابل ساخت نیست، مگر آنکه تقریب زده شود.

اگر تابع تبدیل فرایند و اختلال به قرار زیر باشند:

$$G_p(s) = \frac{1}{(s+1)^3} \quad G_n(s) = \frac{1}{(s+1)^2}$$

تابع FF برابر است با:

$$G_f(s) = -(s+1)$$

که بصورت فیزیکی قابل ساخت نیست. ساخت عملی این تابع تبدیل می تواند اینگونه باشد

$$G_f(s) = -\frac{K_f(1+T_1s)}{(1+T_2s)}, \text{ with } T_2 \ll T_1 \text{ and } K_f \text{ is a constant.}$$

که آن با Lag-Lead تقریب زده شود. تابع تبدیل قابل ساخت معادل آن برابر است با:

$$G_f(s) = -\frac{s+1}{0.1s+1}$$

مثال دیگر در این رابطه، فرایند و اختلال زیر هستند.

$$G_p(s) = \frac{10}{(10s+1)(5s+1)(s+1)} \quad G_D(s) = \frac{1}{(2.5s+1)(s+1)}$$

تقریب این توابع تبدیل برابرند با:

$$G_{pm}(s) = \frac{10e^{-6s}}{10s+1} \quad G_{Dm}(s) = \frac{e^{-s}}{2.5s+1}$$

تابع فیدفوراردی که برای این سیستم بدست می آید برابر است با:

$$G_f(s) = -\frac{e^{5s}(10s+1)}{10(2.5s+1)} \rightarrow \text{Not realizable}$$

که قابل ساخت نیست (علی نیست). از این رو باید تلاش کرد تا تقریب زده شود.

$$G_f(s) = \frac{-0.1(10s+1)}{25s+1}$$

یا اینکه صرفاً بهره آن برای FF منظور شود.

$$K_f = -0.1$$

**مثال:** در یک سیستم کنترل ماده‌ای با دبی Qa و غلظت Ca با ماده دیگری با دبی Qb و غلظت Cb مخلوط می شوند. شیر کنترل روی مسیر Qa قرار دارد. برای این سیستم مقادیر زیر تعیین می شود.

$$Q_a=800\text{L/min} \quad C_{a0}=1\text{Kmol/L} \quad Q_b=200\text{L/min} \quad C_{b0}=2\text{Kmol/L} \quad V=5000\text{L}$$

که V حجم تانک است. معادلات دینامیکی این تانک عبارتند از:

$$V\dot{C} = Q_a C_{a0} + Q_b C_{b0} - QC$$

$$V\dot{C}_a = Q_a C_{a0} - QC_a$$

$$V\dot{C}_b = Q_b C_{b0} - QC_b$$

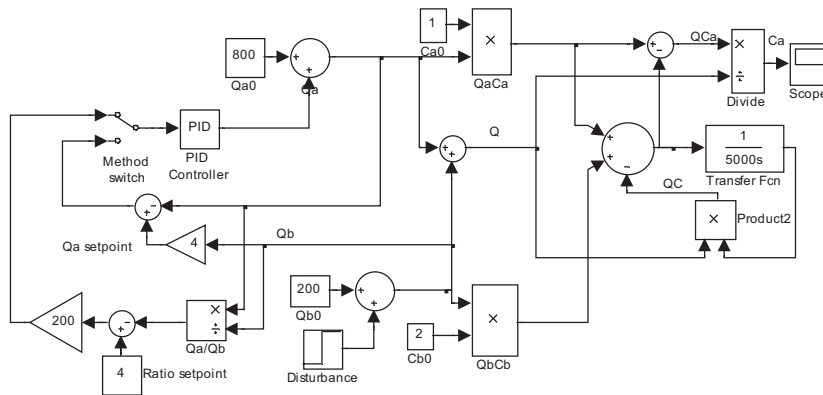
که در آن  $Q=Q_a+Q_b$  است. در حالت تعادل با توجه به مقادیر داده شده مقادیر غلظت هر یک در ماده کل عبارتند از:

$$C'_A = 0.8 \text{ Kmol/L} \quad C'_B = 0.4 \text{ Kmol/L}$$

که به معنی  $C=1.2$  است. در نتیجه هدف کنترل نامین نسبت زیر بین دبی ورودیهاست

$$\frac{Q_a}{Q_b} = \frac{800}{200} = 4$$

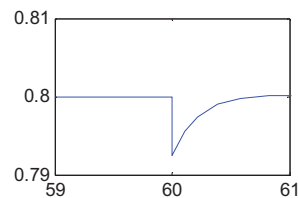
شکل نمودار سیمولینک هر دو روش را نشان می دهد که امکان سویچ بین آنها تعبیه شده است.



در این نمایش دبی Qb در ثانیه ۶۰ از ۲۰۰ به ۳۰۰ تغییر می یابد. کنترلر استفاده شده کنترلر PI با فرمول

$$20\left(1 + \frac{1}{0.2s}\right)$$

است انتظار می رود که سیستم کنترل دبی Qa را افزایش داده تا غلظت محلول تغییر نکند شکل رفتار سیستم کنترل را نشان میدهد.



ابتدا غلظت کاهش می یابد ولی مجدداً به حالت مطلوب 0.8 خود بر می گردد. عملکرد هر دو روش یکسان است. تنها تفاوت در این است که در روش مرجع-دبی خطای کنترل بدنبال اختلال هز صفر به ۱۰۰ می رسد و سیگنال

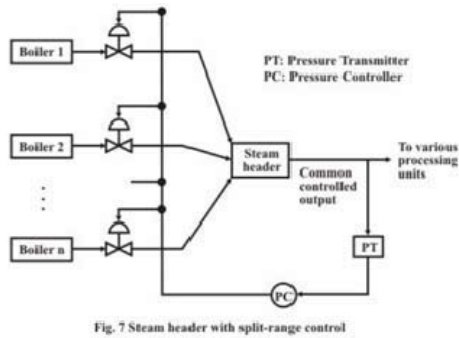


Fig. 7 Steam header with split-range control

## سوالات

1. For proper operation of a Smith predictor, the model of the process must be known with sufficient accuracy- justify.
2. Explain a Smith predictor scheme used for automatic gage control in rolling mill.
3. A transfer function of a process with inverse response will have a zero on the right half plane – justify the statement.
4. Draw and explain the operation of a compensator for compensating the inverse response of a process in a feedback control scheme.

Fermentation (تخمیر) is a chemical process where sugar, in presence of micro organism breaks down into alcohol and carbon dioxide. Control of fermentation finds wide applications in several industries, e.g. (a) brewing, (b) dairy (c) bakery (d) wine. Fig. Q1 shows a typical control scheme for controlling the dissolved oxygen content in a fermentation process.

- (a) Explain the operation of the control scheme. What type of control is it?
- (b) Identify the inner and outer loops in the control system.
- (c) What types of control would you recommend for the inner and outer loops?

قویی به کنترلر اعمال می کند اما در روش مرجع نسبت مقدار خطا فقط 4-800/300 است. برای اینکه هر دو روش منصفانه مقایسه شوند بهره ۲۰۰ در مسیر خطای مرجع-نسبت قرار داده شده است. به این ترتیب عملکرد هر دو مشابه است.

## Override Control ۴-۴-۵

در بعضی از سیستمهای کنترل در مقابل چندین سیگنال خروجی که باید کنترل شوند فقط یک سیگنال کنترل کننده وجود دارد. این سیستمها نوع خاص سیستمهای چند متغیره هستند. در سیستمهای چند متغیره چند خروجی و چند ورودی وجود دارند ولی در اینجا تعداد ورودی کمتر از تعداد خروجیها است. در این سیستمها یکی از خروجیها (حساستر) توسط ورودی کنترل می شود و در حین حال دیگر خروجیها مانیتور می گردند بدون آنکه مستقیما کنترل شوند. اگر یکی از دیگر خروجیها که مستقیما کنترل نمی شوند از محدوده مجاز خود خارج شود، مدار کنترل خروجی اول قطع، و مدار کنترل خروجی از حد خارج شده فعال می شود. از همین روست که این روش به نام Override یا Selective کنترل خوانده می شود.

این کار با تعبیه "High Selector Switch" (HSS) و "Low Selector Switch" (LSS) امکان پذیر است تا خارج شدن خروجی از محدوده مجاز را گزارش کند. شکل نمونه ساده ای از این سیستم را نشان می دهد. در حالت عادی فشار بخار در دیگ بخار با اندازه گیری سرعت جریان بخار در مسیر خروجی و کنترل روی شیر صورت می گیرد. ولی همینکه سطح کایع در دیگ بخار از سطح حد اقل آن کمتر شود کلید LSS فعال شده و حلقه کنترل ۱ از مدار خارج شده و حلقه کنترل ۲ فعال می گردد. حلقه کنترل ۲ فعال است تا سطح مایع در دیگ از مقدار حداقل خود بالاتر رود.

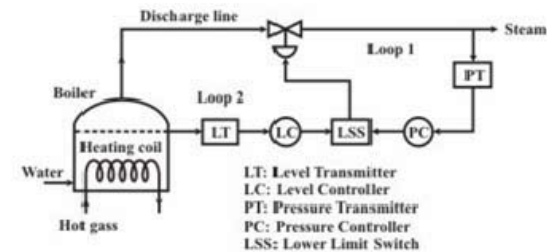


Fig. 6 Override control to protect a boiler system

## Split Range Control ۵-۴-۵

در این سیستمها در مقابل چندین سیگنال کنترل کننده ورودی فقط یک خروجی وجود دارد. تقسیم کار بین سیگنالهای کنترل کننده توسط سیستم کنترل Split Range انجام می شود. شکل مثالی از این سیستم را نشان می دهد که هدف تثبیت فشار header است که برای تنظیم آن چندین شیر وجود دارد.



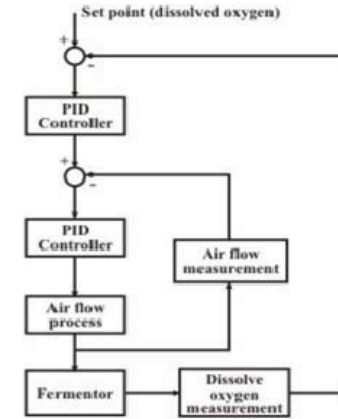


Fig. Q1 Control of a fermentation process

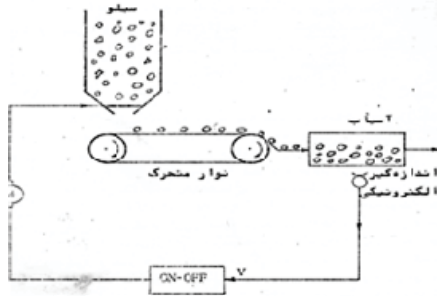
- When would you recommend the use of feedforward controller? What is the advantage of using this control?
- Draw the general block diagram of a feedforward-feedback control scheme and develop the transfer function of the feedback controller.
- What modification of the transfer function of the feedforward controller is suggested when the obtained transfer function of the controller is not proper?
- Explain with an example the principle of ratio control. Elaborate with a block diagram any one scheme for achieving ratio control.
- Why the controller used for ratio control is normally P-I type?
- Discuss the advantages and disadvantages of using cascade control.
- Write down the conditions for maintaining stability of a cascade control system.
- What do you mean by override control? Explain with an example.
- What do you mean by split range control. Show a schematic arrangement of this type of control.

مسائل:

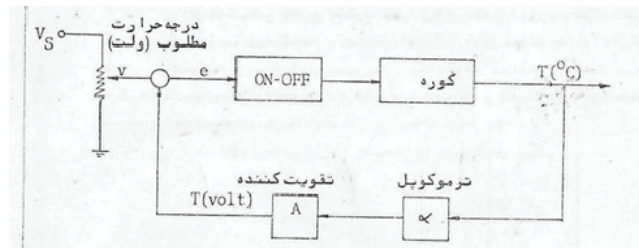
۱. شکل زیر سیستم ساده کنترل وزن مواد در یک آسیاب را نشان می دهد.

تابع تبدیل آسیاب عبارت است از:  $\frac{W(s)}{Q(s)} = \frac{0.5}{1+500s}$  که در آن  $W$  وزن مواد در آسیاب به تن،  $Q$  (ton/hr) میزان مواد ورودی به آسیاب و ثابت زمانی به ثانیه است. وزن مواد در آسیاب با اندازه گیری با بهره  $2v/ton$  اندازه گیری و به یک کنترلر on-off اعمال می شود. بستگی به وزن مواد در آسیاب درجه سیلو باز یا بسته می شود. وقتی درجه باز است  $50ton/hr$  ماده روی تسمه نقاله می ریزد که بعد از یک دقیقه به آسیاب می رسد. سرعت نوار ثابت و نوار همیشه در حال حرکت است

می خواهیم وزن مواد داخل آسیاب هیچگاه از  $12$  تن بیشتر و از  $8$  تن کمتر نشود. تعیین کنید به ازای چه ولتاژ  $V$  در ورودی کنترل کننده درجه باید باز و به ازای چه ولتاژی درجه باید بسته شود.



۲. شکل زیر بلوک دیاگرام کنترل درجه حرارت یک کوره را نشان می دهد. کوره در اثر سوختن گاز داغ می شود. در این فرایند درجه حرارت مطلوب توسط پتانسیومتری تنظیم می شود بطوریکه وقتی ولتاژ آن از  $Vs/2$  تا  $Vs$  تغییر می کند درجه حرارت کوره بطور خطی از  $500C$  تا  $1000c$  تغییر کند. ضریب ترموکوپل برابر  $\alpha=0.05mv/^\circ C$  است. درجه حرارت مطلوب کوره و تفرانس آن  $TR+20^\circ C$  است. برای وصل جریان سوخت  $e \geq 0.5v$  و برای قطع آن  $e \leq -0.5v$  گردد. بهره مدل کوره  $1200$  و ثابت زمانی آن وقتی کوره روشن است  $30s$  و در حالت خاموش کوره  $20s$  است



الف: بهره  $A$  و مقدار منبع ولتاژ  $Vs$  را تعیین کنید.

ب: اگر  $Tr=800^\circ C$  باشد تعداد قطع و وصل در دقیقه را حساب کنید.

ج: چگونه می توان تعداد قطع و وصل ها را کم کرد و اثر آن بر رفتار سیستم چیست

۳. سیستمی با تابع تبدیل  $\frac{1}{(0.2s+1)(0.9s+1)(0.5s+1)}$  داده شده است. آنرا با کنترلر on-off به نحوی کنترل کنید که خروجی  $5 \pm 10\%$  بدست آید. خروجی محرک این سیستم به هنگام روشن بودن  $8$  است. (برای این سیستم ابتدا مدل تاخیر دار تقریب بزیند). آیا این تفرانس قابل دسترسی است؟ برای آن راه حلی پیدا کرده مسئله را حل کنید.

۴. مدل FOPTD سیستم  $G(s) = \frac{1}{(s+1)^{10}}$  با  $G(s) = \frac{1}{s+1} e^{-9s}$  تقریب زده شده است. به روشها زیر کنترلر

PID طرح کنید.

الف: روش IMC با  $\tau_f=0.9$  کنترلر طرح کنید.



ب) به روش تنظیم  $\lambda$  با  $\lambda=0.9$  کنترلر طرح کنید.

ب: به روش Haalman برای آن کنترلر طرح کنید

ه) روش SP با کنترلر PI که رفتار مطلوب (بدون تاخیر) درجه ۲ با زمان نشست ۴ ثانیه و  $PO=4.7\%$

**S5-1-2** پاسخ های پله هر ۵ روش طراحی را در یک شکل رسم کنید

۵. سطح مایع H در reboiler یک برج تقطیر با تنظیم فشار در بالای برج،  $P_s$  کنترل می شود. تنظیم فشار را شیر کنترلی که در مسیر بخار قرار دارد انجام می دهد. تابع تبدیل فرایند:

$$\frac{H(s)}{P_s(s)} = \frac{-1.6(1-0.5s)}{s(3s+1)}$$

است. اگر مدل اندازه گیر  $K_m=0.5 \text{ psi/in}$  و مدل شیر  $K_v=2.5$  باشد. با انتخاب مدل مناسب کنترلر

الف) به روش ZN کنترلر طرح کنید. (از جدول راث برای پیدا کردن نهایت بهره و فرکانس استفاده کنید)

ب) به روش رله فیدبکی (با شبیه سازی سیمولینکی) و Tyreus-Luyben برای این سیستم کنترلر طرح کنید.

ج) به روش مستقیم کنترلی طرح کنید که قابل ساخت باشد.  $T_d(s)$  را درجه ۱ با صورت مناسب در نظر بگیرید.

د) کنترلی به روش SP برای این فرایند طرح کنید.

sim 6-3: پاسخهای پله الف، ب و ج را رسم و نتایج را مقایسه کنید.

## کنترل ترتیبی - منطقی

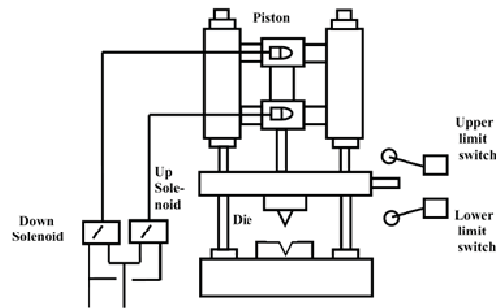


Fig. 18.2 An Industrial Logic Control Example

S1.2:

- A. Define what is Logic Control system in your own language. Give an example  
B. In the context of your example show typical objectives in Logic Control

### B. مقایسه کنترل ترتیبی و کنترل پیوسته

کنترلر ترتیبی مانند کنترلر پیوسته دارای قسمتهای زیر است:

۱. ورودی که شامل گرفتن اطلاعات سنسورها و کلیدهای فرمان است.
  ۲. خروجی که محرکها را تحریک می کند
  ۳. عملگر که عملیات پردازش را انجام می دهد. سخت افزار استاندارد شدهی این بخش PLC نام دارد، اگر چه از هر پردازشگری می توان استفاده کرد.
- جدول زیر تفاوتهای اساسی بین کنترل پیوسته و ترتیبی را نشان میدهد.

Issue	Logic/Sequence Control	Analog Control
Model	Logical	Numerical
	State-Transition	Differential/Difference Eqn
	Simple Model/Easy to build	Complex Model/Hard to build
Signal	Infrequent	Liable to change
	Signal range/status	Signal value
Temporal Property	(Timed) sequence	(Timed)Function/Trajectory
	Control	On-off/logical
Redesign/Tuning	Supervisory	automatic
	Open/Closed Loop	Open/Closed Loop
	Infrequent	Tuning needed

Table 18.3 A Comparison of Continuous Variable (Analog) and Discrete Event (Logic/Sequence) Control

S1.3

- A. Of Logic Control and Analog Control which one appears simpler and why ?  
B. Can you cite an example system, which requires both Analog and Logic Control?

### C. کاربردها

از جمله کاربردهای کنترل ترتیبی عبارتند از:

### ۱-۶ کنترل ترتیبی-منطقی

در بسیاری از کاربردها خروجی نهایی فرایند پیوسته نیست و تنها مقادیر محدودی از یک مجموعه کوچک را به خود می گیرد. ساده ترین مثال آن روشن یا خاموش کردن موتور، باز یا بسته شدن شیر است که مقادیر خروجی باینری است (صفر یا یک). در این سیستمهای با روشن یا خاموش کردن کلید، موتورها، شیرها و هواکشها در زمانهای مربوطه به کار افتاده یا خاموش می شوند. به این سیستمها، سیستم کنترل خروجی گسسته می گویند. وقتی در مجموعه ای تعدادی از این فرایندها وجود داشته باشد، عموماً توالی منطقی و مشروط آنها مد نظر است، از این رو به سیستم کنترل این مجموعه ها، سیستم کنترل ترتیبی-منطقی گفته می شود. برای مثال در سیستم پرکردن و بسته بندی نوشابه اینگونه عمل می گردد که ترتیب مشخصی از عملیات متوالیا انجام می شود. از این دست مسائل به وفور در صنعت دیده می شود.

بعضی از فعالیتها را بصورت پیوسته نیز می توان انجام داد ولی در کاربردهای مشخصی به دلایل زیر گسسته انجام می گیرند.

- وقتی ورودی مقادیر محدود به خود بگیرد: در کنترل موتور تسمه نقاله، که تسمه یا حرکت می کند و یا متوقف است، نیاز به کنترل پیوسته نیست.
- در لایه کنترل نظارتی: که در آن دستور به سیستمهای کنترل پیوسته داده می شود.

### A. ماشین مارک زن

شکل ماشین مارک زن را نشان می دهد که در انتهای پیستون آن مارک فلزی قرار دارد. پیستون پایین می آید و بر روی قطعه با فشار علامت را ثبت می کند. سپس پیستون بالا رفته تا قطعه گذاری جدید انجام شود. این ماشین ۲ سولونوئید، یکی برای پایین آوردن و دیگری برای بالا بردن پیستون دارد. ماشین هم چنین دارای ۲ سنسور میکرو سوئیچی است که رسیدن پیستون به حداقل پایین و حداکثر بالا را مشخص می کند. سیستم مجهز به کلید قطع و وصل اصلی نیز هست. به این ترتیب سیستم دارای ۳ ورودی و ۲ خروجی است. وقتی کلید اصلی قطع شود، پیستون باید در موقعیت بالا توقف کند.

- Logic/Sequence control
- PID control and computing
- Coordination and communication
- Operator control and monitoring
- Plant start-up, shut-down

هر خط تولیدی که محصول تکراری گسسته تولید می کند، کاندید به کار گیری PLC است. خطوط تولیدی مانند دستگاههای ماشینکاری، قالب ریزی، نساجی، محصولات پلاستیکی از آن جمله اند. جدول زیر تعدادی دیگر از آنها را ارائه می دهد.

Chemical/ Petrochemical	Metals	Manufacturing/Machining
Batch process	Blast Furnace	Material Conveyors, Cranes
Pipeline Control	Continuous Casting	Assembly
Weighing, Mixing	Rolling Mills	Milling, Grinding, Boring
Finished Product Handling	Soaking Pit	Plating, Welding, Painting
Water/ Waste Treatment	Steel Melting Shop	Molding/ casting/forming

#### D. تاریخچه PLC: تابلوهای رله ای

قبل از اختراع میکروپروسسور ها، کنترل سیستمهای صنعتی با وسایل الکترومکانیکی، رله ها، لامپ وضعیت، تایمرهای الکترونیکی یا مکانیکی انجام می شد. این وسایل در تابلو رله ای Relay Panel جای داده می شدند. برای سهولت در نگهداری و تعمیرات، ساختار خاصی برای آنها در نظر گرفته می شده است که به نام ساختار نردبانی Ladder شناخته می شود. در ساختار نردبانی به پله ها rung گفته می شود. هر پله با یک یا چند ورودی شروع و به فقط یک خروجی ختم می شود. ساختار نردبانی مطابق شکل است.

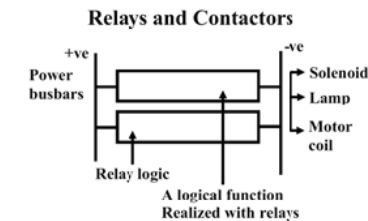


Fig. 18.3 The structure of Relay Logic Circuits

با اختراع میکروپروسسور، کنترل سیستمهای صنعتی به دستگاههایی که Programmable Logic Control (PLC) خوانده می شود واگذار شد.

#### E. کنترلر منطقی برنامه پذیر (PLC) Programmable Logic Controller

کنترلر مدرنی که امروزه در رباتیک، کنترل فرایند و بسیاری دیگر از فرایندهای خودکار استفاده می شود، PLC است. PLC در واقع یک میکروپروسسور خاص برای محاسبات بلادرنگ کنترل صنعتی است که عملیات زیر را انجام می دهد.

۱. مانیتور ورودیها و سنسورها

۲. اجرای عملیات لاجیکی، زمانبندی عملیات، شمارش برای کنترل و عیب یابی
۳. تحریک محرکها و روشن کردن چراغها/Drives Actuators/Indicators
۴. ارتباط با دیگر کامپیوترها Communicates with other computers

#### F. مزایای PLC

بعضی از مزایای PLC، ناشی از سخت افزار مطابق با استاندارد، مدولار بودن، قابلیت ارتباطی و محیط برنامه نویسی آن، از این قرار است

۱. برای تغییر عملیات به جای تغییر سیم بندی، برنامه تغییر داده می شود که بسیار ساده تر است.. تنها سیم بندی که تغییر می کند اتصالات ورودیها و خروجیهاست.
۲. امکانات برنامه نویسی PLC ها برای کاربر بسیار مطلوب است. کتابخانه گسترده برای انواع عملیات وجود دارد. امکانات قوی شبیه سازی و debugging موجود است.
۳. کنترل با PLC فضای کمتری اشغال می کند.
۴. نصب و نگهداری PLC ها راحت تر، و قابلیت اطمینان آنها بالاتر است.
۵. امکان توسعه مدولار تعداد ورودیها، خروجیها و حافظه ساده است.
۶. PLC را می توان در مجموعه سیستم اتوماسیون توزیع شده قرار داد و بر آن نظارت کرد.
۷. وقتی پیچیدگی و سایز کنترل از حدی بیشتر شود، بر تابلوهای کنترل ترجیح دارد.
۸. توانایی PLC در دریافت سری، موازی و شبکه ای اطلاعات، حجم سیم بندی را کاهش می دهد، زیرا با تک کابل می توان با وسایل زیادی ارتباط حاصل کرد.
۹. وجود امکانات عیب یابی، امکان رفع عیب بدون متوقف کردن فعالیت سیستم را ممکن می سازد.
۱۰. از آنجا که PLC نتیجه تکامل تابلو های رله ای است، میراث آنها را حفظ کرده است و در توسعه PLC این ساختار نردبانی حفظ شده است.

#### S1.4

E. Name three of the most prominent advantages of the PLCs over hardwired Relay Contactor Logic

F. Can you name a single disadvantage in any situation?

G. Do you think the idea of developing programs that look like Relay Ladders is very efficient? If so, why? If not, why was it pursued?

#### G. برنامه نویسی PLC

برنامه های استاندارد را می توان روی محصولات سازنده های متفاوت بدون تغییر پیاده کرد. ولی استفاده از روشهای استاندارد نشده ممکن است در عمل نیاز به اعمال تغییرات داشته باشد. از اینرو استفاده از سبکهای استاندارد شده مرجع است.

International Electrotechnical Commission (IEC) طی استاندارد IEC 1131 روش گرافیکی نمایش الگوریتم: Sequential Function Charts (SFC) و مشخصات زیانهای برنامه نویسی:

۱. Ladder diagram (LD)
۲. Function Block Diagram (FBD)

را در سال ۱۹۹۳ تکمیل کرده است. از بین این زبانها RLL و FBD گرافیکی هستند. هدف استاندارد:

- ارائه روش استاندارد برای کاهش هزینه آموزش و قابلیت انعطاف برای مشتریان
- ساختار قابل درک، تمیز و مدولار برای برنامه

مشخصات استاندارد IEC 1131-3

۱. *Multiple Language Support* استفاده همزمان از چند زبان برنامه نویسی. کاربر می تواند هر قسمت از برنامه را با ساده ترین زبان بنویسد.
  ۲. *Code Reusability* امکان نوشتن کد اختصاصی برای توابع و قراردادن در کتابخانه برای دسترسی به هنگام نیاز است.
  ۳. *Library Support* استاندارد دارای کتابخانه ای از توابع و بلوکهای از قبل نوشته شده است. این برنامه ها بصورت کد اجرایی شده هستند. سازندگان نیز ممکن است توابع خاصی را به آن اضافه کنند.
- Execution Models* ساختار عمومی کنترل برنامه به گونه ای است که برنامه بتواند سیکلی، اینترپتی و یا سنکرون اجرا شود.

#### H. واژه های مصطلح کنترل ترتیبی

واژه های زیر مفاهیم تعریف شده دارند و برای ایمنی تفسیر دیگری از آنها نمیتوان داشت

۱. **ON** حالتی است که برق به ماشین و مدار کنترل اعمال شده است و ماشین آماده **RUN** است. به این حالت **STANDBY** نیز می گویند.
۲. **OFF** عکس **ON** است که نشان می دهد برق ماشین و مدار کنترل قطع شده است. در این حالت فشردن کلیدهای تابلو به اثر است.
۳. **RUN** حالت گردش کار یا انجام کار محوله به ماشین است. **RUN** را با **ON** اشتباه نکنید. سیستم می تواند **ON** باشد ولی **RUN** نباشد.
۴. **STOP** حالتی است که ماشین **ON** است ولی **RUN** نیست. فشردن **STOP** عمل **RUN** را متوقف می کند.
۵. **JOG** حالتی است که ماشین می توان اندکی عمل کند تا قطعه در حالیکه در دست کاربر است سر جای خود قرار گیرد. دستگاه نباید بطور خودکار از **JOG** به **RUN** برود.
۶. **INCH** مشابه **JOG** است.
۷. **CYCLE** نوع عملیات است که ماشین یک چرخه کامل عملیات انجام می دهد و متوقف می شود. نگه داشتن **CYCLE** نباید منجر به انجام بیش از یک چرخه شود. برای انجام چرخه دیگر **CYCLE** باید رها و مجدداً فشرده شود. به این وضعیت **SINGLE CYCLE** نیز گفته می شود.
۸. **HAND OPERATION**: عملیات دو دستی حالتی است که دستگاه **RUN** یا **CYCLE** را شروع نمی کند مگر آنکه دو کلید مجزا همزمان (با دو دست) فشرده شود. دو کلید با فاصله از هم نصب می شوند. این حالت در ماشینهایی که تغذیه آن با دست خطرناک است تعبیه می شود.

#### ۶-۲ طراحی و نمایش الگوریتم

به طراحی بدون برنامه کنترلر ماشین مارکزن دقت کنید.

#### بیان زبانی اهداف طرح

سیستم دارای یک پیستون است که باید بالا و پایین رود. برای بالا و پایین رفتن به ۲ سلونوئید نیاز است. برای تشخیص موقعیت رسیدن به بالا و پایین نیز ۲ میکروسویچ نیاز است. داشتن یک کلید اصلی برای کار ماشین نیز ضروری به نظر می رسد. در نتیجه ۳ کلید ورودی و ۲ سنسور برای کار سیستم کفایت می کند.

عملکرد سیستم می تواند اینگونه باشد که با فشردن کلید اصلی پیستون پایین رفته و بر قطعه مارک می زند و با قطع کلید اصلی پیستون بالا آمده و متوقف می شود.

اگر با استفاده از رله این طرح بدون دقت و سریع بسته شود ممکن است مطابق طرح زیر درآید. که خواسته های کنترل را تامین کند. وقتی پیستون **TOP** است با فعال کردن کلید اصلی پیستون به پایین می رود و با رسیدن به **Bottom** متوقف می شود. در این وضعیت پله پایینی غیر فعال و پله بالایی فعال می شود که پیستون را به طرف بالا می برد. با این طرح تا زمانی که کلید اصلی فعال است، پیستون بالا و پایین رفته و قطعه را مارک می زند.

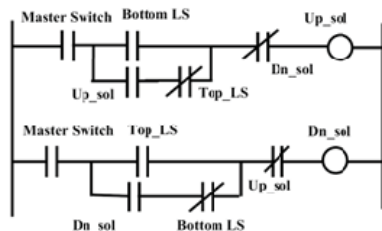


Fig. 20.2 An RLL program for the industrial stamping process

بعد از بررسی دقیق معایب زیر در آن یافت می شود

- اگر دربین راه کلید اصلی قطع شود، دستگاه دیگر با فعال کردن کلید اصلی حرکت نمی کند و سر جای خود می ماند.
- طرح فاقد **part detector** است که جدای از تلف انرژی می تواند برای کاربر قطعه گذار خطرناک نیز باشد.

#### A. گامهای طراحی کنترل ترتیبی

برای کاهش مواجه با مشکلات، روش سیستماتیک برای طراحی کنترلر نیاز است. اجزا این روش عبارتند از:

- جمع آوری و نگارش اطلاعات ورودیها، خروجیها و توالی توابع
- روشی برای ارائه الگوریتم، ترجیحا گرافیکی
- برنامه نویسی طرح
- اجرا و عیب یابی نهایی

- قدم اول طراحی بسیار مهم است و هر گونه نقصان در آن منجر به اتلاف وقت می شود زیرا ایراد خیلی دیر کشف می گردد. از آنجاکه مهندسان کنترل متخصص مخصوص برای عملیات فرایند نیستند، مناسب است که قدم اول با همکاری نزدیک با مهندسین فرایند کارخانه دنبال شود. در این قدم ابعاد مختلف رفتار سیستم مورد بحث قرار می گیرد

### B. جمع آوری اطلاعات

#### ورودیها:

یادداشت ورودیها مانند: سنسورها، کلیدهای فرمان و Man Machine Interface (MMI)، که مورد نیاز برای طرح است. ورودیهای ماشین مارکزن عبارتند از:

- **Part sensor:** A position switch that detects when a part has been placed. In cases where proper positioning of the part can take time. One may also consider using manual switch to be operated by the operator once he is satisfied that the part is properly placed and ready to be stamped. Here an automated part detect sensor has been assumed.
- **Auto PB :** A push button that indicates that machine is ready to stamp parts one after the other in the 'automatic mode'
- **Stop PB:** A push button that the operator can use to stop the machine any time during the time that the piston is moving down. This is needed to avoid stamping a part if any last second error is discovered by the operator regarding, say, the placement of the part.
- **Reset PB:** In case the piston has been stopped due to some error condition, it is desired that the operator explicitly presses this push button to indicate that the error has been taken care of, and the machine is ready to return to stamping in the auto mode.
- **Bottom LS:** This sensor indicates when the piston has reached the bottom position.
- **Top LS:** This sensor indicates when the piston has reached the top position.

#### خروجیها

یادداشت خروجی به محرکها، نمایشگرها و MMI که مورد نیاز طرح است. خروجی در ماشین مارکزن عبارتند از:

- **Up Solenoid:** Control output that drives the Up solenoid of the electro-hydraulic direction control valve which in turn drives the piston up.
- **Down Solenoid:** Control output that drives the Up solenoid of the electro-hydraulic direction control valve which in turn drives the piston up.
- **Auto Mode Indicator:** An indicator lamp that indicates that the machine is in 'Auto' mode.
- **Part Hold:** A gripping actuator that holds the part firmly to avoid movements during stamping

**S3.2** A. Can we use corresponding toggle switches, instead for the Auto, Stop and Reset PBs?

What difficulties may be encountered?

B. For the limit switches, and the part detect sensor, would you prefer mechanical switches over photo switches for this application? Justify.

C. Propose at least one additional each of sensors, indicators and actuators for the above application and mention their benefits.

#### توالی عملیات

نگارش توالی عملیاتی که باید برای کار عادی، اضطراری، راهاندازی اولیه و خاموش کردن دستگاه انجام شود. برای ماشین مارکزن توالی عملیات از اینقرار است:

- The "Auto" PB turns the Auto Indicator Lamp on
- When a part is detected, the press ram advances down to the bottom limit switch
- The press then retracts up to top limit switch and stops
- A "Stop" PB, if pressed, stops the press only when it is going down
- If the "Stop" PB is pressed, the "Reset" PB must be pressed before the "Auto" PB can be pressed
- After retracting, the press waits till the part is removed and the next part is detected

**S3.3** A. Note that in step F above, it is important to detect that the part is removed. What would happen, if this is not detected?

B. What would happen if after Stop PB is pressed, Reset PB and Auto PB are pressed in that sequence, even if the piston has not been taken to the top position manually?

#### بررسی اثر ایراد احتمالی اجزا بر عملکرد

بررسی اثرات احتمالی ایرادهایی که به ندرت ممکن است اتفاق بیفتند ولی محال نیستند، مانند خراب شدن سنسورها، قطع کابلهای ارتباطی، افت فشار روغن و غیره و یافتن راهکاری برای جلوگیری از خسارتهای احتمالی.

در سیستم ماشین مارکزن ایرادها می توانند افت فشار روغن پمپ هیدرولیک- باز یا بسته ماندن LS ها

**S3.4** A. What would happen in the process controlled by the program shown in Fig. 20.2 if top/bottom Limit switch is stuck closed/open?

B. What would happen in the process controlled by the program shown in Fig. 20.2 if the hydraulic pump pressure becomes too low to move the RAM?

#### نیاز به ورودیها و خروجیهای جدید برای ایمنی و تعمیر نگهداری

بررسی استفاده از سنسورها، نمایشگرها و آلارمهای بیشتر برای بالا بردن ایمنی بیشتر کار با ماشین.

## C. مدلسازی الگوریتم Finite State Machine(FSM)

برای کشف و حذف تناقضات و ایرادها، الگوریتم نگارش شده، با ساختار Finite State Machine (FSM) مدل می شود. قواعد FSM از اینقرانند:

۱. FSM را به صورت گرافیکی با state diagram نشان داده می شود. در دیاگرام وضعیتها شماره های منحصر به فرد دارند. مانند دیاگرام شکل که در آن ۶ وضعیت نشان داده شده است.
  ۲. در هر لحظه زمانی سیستم فقط در یک وضعیت (پله) از معدود وضعیتهای ممکن است.
  ۳. در هر وضعیت به متغیرهای سیستم مقدار داده می شود. برای مثال روشن-خاموش شدن یک چراغ وضعیت. state table مقدار هر یک از متغیرها در وضعیتهای مختلف را ارائه می کند.
  ۴. متغیرهای فرایند باید به نحوی باشند که مقدار وضعیت بعدی آنها منحصر بر اساس مقادیر متغیرها در زمان فعلی تعیین شود. مثلا در ماشین مارکزن تنها وضعیت TOP و BOTTOM برای تعیین وضعیت پیستون کافی نیست بلکه متغیرهای دیگر مانند "بالارفتن"، "توقف" و "پایین آمدن" نیز باید لحاظ شوند. همچنین متغیر دیگری به نام part detector نیز نیاز است تا نشان دهد کی امکان شروع سیکل بعد وجود دارد.
  ۵. بعضی از متغیرها ممکن است قابل اندازه گیری و بعضی دیگر نباشند.
  ۶. انتخاب متغیرهایی که تعریف می شوند مفهومی است و به طراح بستگی دارد. ضمنا نوع متغیر به نحوه کار ماشین نیز وابسته است.
  ۷. ماشین در عمر عادی کاری خود از یک به وضعیت به وضعیت دیگر می رود و این کار را متوالیا انجام می دهد. بعضی اوقات اتفاق می افتد که سیستم به وضعیتهایی غیر از وضعیت عادی کار خود برود. برای این منظور سیگنال گذارهای مر بوطه محقق شده اند مانند دستور از کاربر یا "اتمام فرصت" و غیره. رفتن از یک وضعیت به وضعیت دیگر منحصر به تحقق شرایط گذار وابسته است.
  ۸. سیستم فقط می تواند بعضی از وضعیتهایی که ترکیب متغیرها می سازند را به خود بگیرد. به این وضعیتها reachable می گویند.
  ۹. یکی از وضعیتها به نام initial state شناخته می شود که ماشین کار خود را از آنجا شروع می کند.
  ۱۰. در هر وضعیت تعدادی خروجی تولید می گردند که در جدولی مشخص می شوند.
- مثال:** برای ماشین مارکزن State diagram و state table رسم کنید.
- جدول خروجی و نمودار وضعیتها مانند جدول و شکل زیر هستند.

State No.	-	۱	۲	۳	۴	۵
O/P	-	۱	۱	۱	۰	۱
Auto Indicator	۰	۱	۱	۱	۰	۱
Part Hold	۰	۰	۱	۱	۰	۰
Up Sol	۰	۰	۰	۱	۰	۰
Down Sol	۰	۰	۱	۰	۰	۰

Figure 20.4 The Output Table for the industrial stamping press

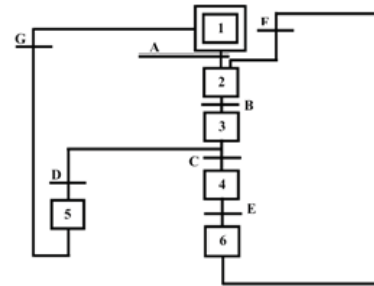


Figure 20.3 The State Diagram for the industrial stamping press

از نمودار وضعیتها به موارد زیر می توان رسید.

۱. وضعیتها از شماره ۱ تا ۶ شماره گذاری شده اند.
۲. در هر وضعیت یک مجموعه منحصر به فرد متغیرها محقق هستند. مثلا در وضعیت ۳، هر دو limit switch غیر فعال هستند، part detect فعال است و متغیر حرکت پیستون "به پایین" است.
۳. وضعیت ۱ وضعیت initial است که سمبل آن با دیگر وضعیتها متفاوت است.
۴. گذارها با حروف الفبا A-G شماره گذاری شده اند. هر گذاری متناظر با یک رخداد است. برای مثال گذار B به معنی فعال شدن part detect است.
۵. خروجی هر وضعیت در جدول وضعیت آورده می شود.

## D. نمودار گرافیکی استاندارد SFC Sequential Function Chart

SFC مانند state diagram یک نمایش گرافیکی است که توالی عملیات را به صورت توالی گامها و گذارها نشان می دهد. SFC برای طراحی الگوریتم PLC استاندارد شده است. SFC مشابه فلوچارت در برنامه نویسی کامپیوتری است که بر اساس آن برنامه های عملیاتی مانند RLL, FBD, و دیگر روشهای برنامه نویسی پیاده می شود. سمبولهای استاندارد SFC از این قرارند.

## ۱. پله ها

در هر پله یا وضعیت عملیات بلوک آن انجام می شود. پله وقتی فعال می شود که پله قبلی آن فعال بوده و شرایط گذار به آن پله مهیا شده باشد. شکل سمبل پله شروع و سمبل بقیه پله ها را نشان می دهد. پله اولیه در آغاز شروع برنامه و یا بعد از reset اجرا می شود



Fig. 21.4 An initial step (a) and a regular step (b) in an SFC

در هر برنامه فقط یک پله اولیه وجود دارد که می تواند هر جایی باشد. پله اولیه نمی تواند جزئی بلوکهای اجرا-همزمان simultaneous branch باشد

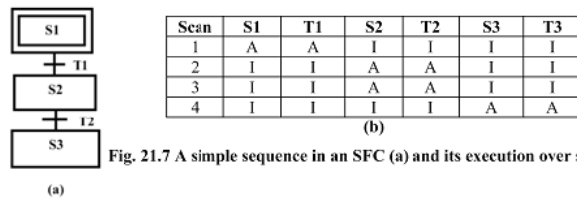


Fig. 21.7 A simple sequence in an SFC (a) and its execution over scans (b)

**Divergence of a Selective Sequence:** بعد از یک پله فعال امکان انتخاب چندین پله بعدی وجود دارد که فقط یکی از آنها می شود. پله بعدی پله ای است که گذار آن فعال باشد. اگر بیش از یک گذار فعال باشد، اولویت از چپ به راست است.

**Convergence of a Selective Sequence:** چندین پله فعال وجود دارند که در صورت تحقق گذار مربوطه به یک پله می روند. البته پله ها همزمان فعال نیستند.

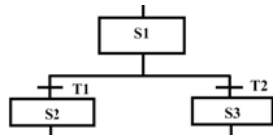


Fig. 21.8 Divergence of a selective sequence

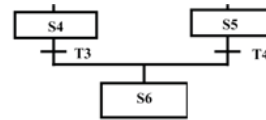


Fig. 21.9 Convergence of a selective sequence

**Divergence of a Simultaneous Sequence:** در این حالت یک پله ممکن است به دو یا چند پله برود که همگی فعال خواهند بود. در شکل وقتی T1 فعال شود از پله S1 هم به پله S2 و هم به پله S3 می رود. اینکه ابتدا S2 اجرا می شود یا S3 در استاندارد مشخص نشده است.

**Convergence of a Simultaneous Sequence:** چند پله که همزمان فعال هستند در صورت تحقق گذار T2 به یک پله می روند.

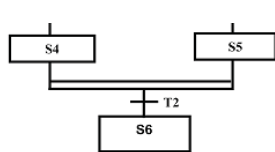


Fig. 21.11 Convergence of a simultaneous sequence

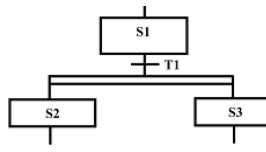


Fig. 21.10 Divergence of a simultaneous sequence

### پرش و حلقه

SFC دارای سمبل کانکتور است که برای نمایش jump و cycle استفاده می شود. کانکتور مبدا فوراً بعد از یک گذار و کانکتور مقصد فوراً قبل از یک پله قرار دارد. jump پرش از یک پله به پله ای جلوتر غیر از پله بعدی است. اگر S2 فعال، T2 غیر فعال و T3 محقق شود، برنامه به S4 می رود. cycle پرش به پله های قبلی است. اگر S4 فعال و T5 محقق گردد، S1 فعال می شود.

پله های معمولی زیادی می توانند در برنامه باشند و حتی بیش از یکی از آنها فعال باشند (متفاوت با FSM). در جریان scan فقط پله های فعال بررسی می شوند. در هر پله ممکن است بلوک عملیاتی وجود داشته باشد که خود با یک RLL یا دیگر زبانها نوشته شود. وقتی پله غیر فعال شود متغیرهای آن به حالت initial می روند. مجموعه ای از پله ها ممکن است در یک macro step جای گیرند. از اینرو پله در FSM ساده ترین نوع پله SFC است.

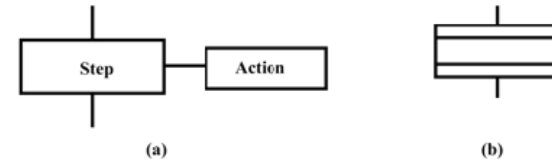


Fig. 21.5 A step with action logic (a) and a macro-step (b) in an SFC

### ۲. توابع

هر تابع ممکن است توسط مجموعه ای از پله ها و گذارها تعریف شوند.

### ۳. گذارها

وقتی برنامه در یک پله فعال است، اگر گذار بعد از آن محقق شود، پله فعلی غیر فعال و پله بعدی فعال می گردد. گذار ممکن است یک کلید و یا خروجی یک سنسور باشد. در شکل پله S1 فعال است. وقتی گذار T1 محقق شود، S1 غیر فعال و S2 فعال می گردد.

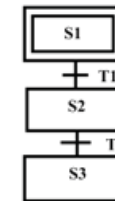


Fig. 21.6 Transitions connect steps in an SFC

S4.2 A. What is the difference between a step of an SFC and a state of an FSM?

B. Why action logic is separately indicated from step logic, although both occur in the same step?

C. How is the computation for step logic different from that of transition logic?

B. یک عیب دنبال کردن روش استاندارد طراحی را بنویسید.

C. یک مزیت دیگر روش استاندارد برنامه نویسی جای از کاهش ریسک خطا در برنامه نویسی را نام ببرید.

### انواع گذارها

۶ نوع گذار وجود دارد.

۱- گذار ساده: گذار از S2 به S3 اتفاق می افتد وقتی در S2 فعال، T2 شود. نتیجه غیر فعال شدن S2 و فعال شدن S3 است. شکل 21.7 این گذار را نشان می دهد. (A : active; I:inactive)



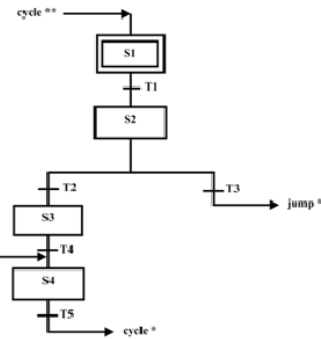
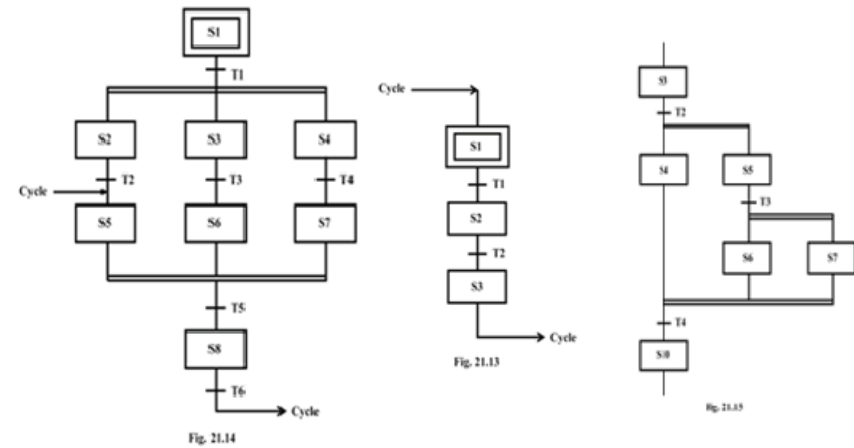


Fig. 21.12 Source and Destination Connectors

S 4.3 A. Identify whether the SFC segments indicated in Figure valid. If not, justify your answer.



۴. ساختار نمایش برنامه در SFC

شکل ساختار الگوریتم در SFC را نشان می دهد. برنامه main به عنوان یک بلوک نوشته می شود. بلوک اصلی ممکن است بلوکهای دیگری را در جریان اجرا صدا کند. در هر بلوک ۳ قسمت وجود دارد:

الف) Preprocessing

در شروع هر چرخه عملیاتی scan عواملی که کنترل ترتیبی را تحت تاثیر قرار می دهند بررسی می گردند این عوامل عبارتند از:

- Initialization;
- دستور از کاربر



Resetting the SFC to the initial state. •

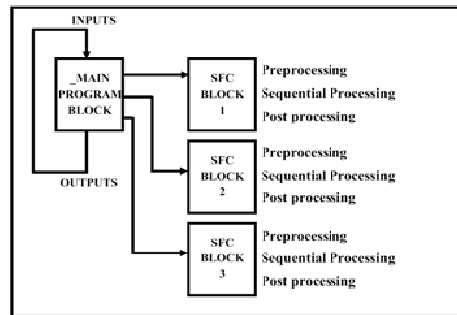


Fig 21.16 Architecture of Control Software organized with SFCs

ب) Sequential Processing

در این بخش PLC فقط پله های فعال و شرایط گذار آنها را چک می کند در نتیجه زمان انجام یک چرخه عملیاتی کاهش می یابد. در صورت تحقق گذار پله فعلی غیر فعال و پله بعدی فعال می شود.

ج) Post processing

بعد از تکمیل SFC در یک سیکل این بخش انجام می شود که ممکن است برنامه safety interlocks و غیره را انجام دهد.

مثال: طراحی مجدد ماشین مارک زن

ضروریات طرح عبارتند از:

Part sensor , Auto PB , Stop PB: , Reset PB , Bottom LS. Top LS

ورودیها و خروجیها عبارتند از:

Up Solenoid ,Down Solenoid , Auto Mode Indicator , Part Hold:

ترتیب عملیات

- A. The "Auto" PB turns the Auto Indicator Lamp on
- B. When a part is detected, the press ram advances down to the bottom limit switch
- C. The press then retracts up to top limit switch and stops
- D. A "Stop" PB, if pressed, stops the press only when it is going down
- E. If the "Stop" PB is pressed, the "Reset" PB must be pressed before the "Auto" PB can be pressed
- F. After retracting, the press waits till the part is removed and the next part is detected

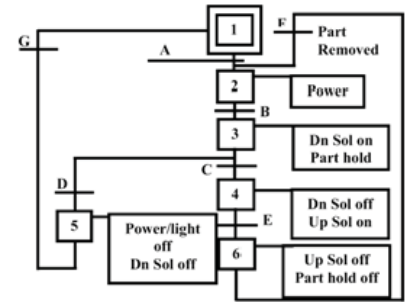
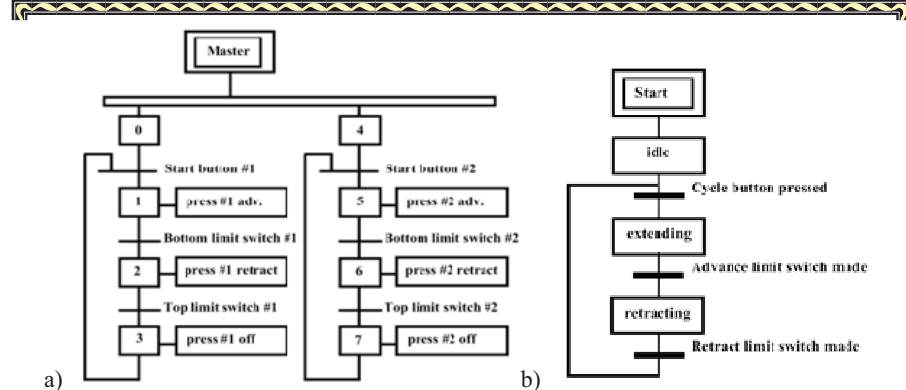


Fig. 21.18 The State Diagram for the industrial stamping press

State No.	1	2	3	4	5	6
O/P	-	1	1	1	0	1
Auto Indicator	0	1	1	1	0	1
Part Hold	0	0	1	1	0	0
Up Sol	0	0	0	1	0	0
Down Sol	0	0	1	0	0	0

Fig. 21.19 The Output Table for the industrial stamping press

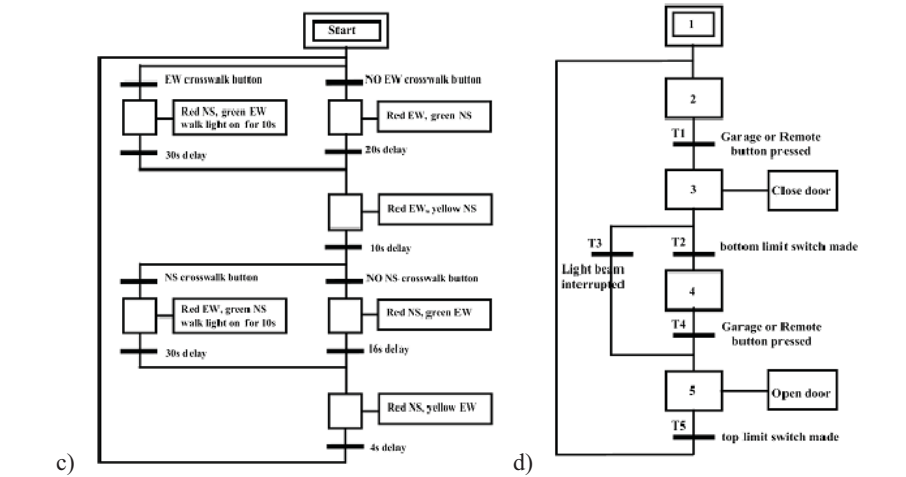
state diagram شکل 21.18 مشابه SFC شکل 21.20 است، تنها ممکن است بعضی از سمبلها متفاوت باشند. برای برنامه نویسی می توان از زبان RLL که قبلا شرح شد استفاده کرد.

**مثالها:**

مثال ۱: برای دو سیستم پرس که همزمان کار می کنند SFC رسم کنید. با فشردن start سیکل شروع و سیلندر پایین می رود تا limit switch پایین فعال شود سپس سیلندر بالا می رود تا limit switch بالایی فعال گردد و متوقف می شود. شکل (a)

مثال ۲: SFC برای ماشین مارکن رسم کنید که با فشردن start سیلندر پایین رفته و بالا می آید و متوقف می گردد تا start مجددا فشرده شود. شکل (b)

مثال ۳: SFC برای چراغ راهنما بکشید. در حالت عادی چراغ هر دو مسیر ۲۰ ثانیه سبز و ۱۰ ثانیه زرد است. هر دو طرف دکمه عبور پیاده دارند. اگر دکمه پیاده فشرده شود، ۱۰ ثانیه اجازه عبور به پیاده داده می شود و چراغ سبز از ۲۰ به ۳۰ ثانیه اضافه می شود. شکل (c)



مثال ۴: SFC کنترل درب گاراژ را رسم کنید. کارکرد درب گاراژ از این قرار است. شکل (d)

- a. There is one button inside the garage, and one button remote control.
- b. When either of the buttons are pushed the door will move up or down.
- c. If the button is pressed once while moving, the door will stop, a second press will start motion again in the opposite direction.
- d. There are top/bottom limit switches to stop the motion of the door when it reaches either of the two ends.
- e. There is an infrared beam across the bottom of the door. If the beam is interrupted while the door is closing the door will stop and reverse.
- f. There is a garage light that will be on for 5 minutes after the door opens or closes.

A. سنسورها

سنسورها و ورودیهای PLC را تشکیل می دهند. جدول تعدادی از سنسورها را معرفی می کند.

Type	Signal	Remark
Switch	Binary Command	External Input Device
Limit switch	Position	Feedback Sensor Device
Thumbwheel switch	Set valued Command	External Input Device
Thermostat	Temperature Level	Feedback Sensor Device
Photo cell	Position of objects	Feedback Sensor Device
Proximity detector	Position of objects	Feedback Sensor Device
Push button	Command (unlatched)	External Input Device

Table 3.1 Discrete Sensors

برای ورودیها در حافظه بیت اختصاص داده می شود. این بیتها به هنگام جاروب ورودیها، مقدار ورودی را به خود می گیرند. و در انجام محاسبات این بیتها بعنوان ورودی تلقی می شوند. این کار برای افزایش سرعت محاسبات صورت می گیرد.

Limit Switch

این سویچها توسط کاربر قابل دسترسی نیستند، بلکه توسط قطعات متحرک ماشین تحریک می گردند. این سویچها ممکن است مکانیکی، نوری یا مغناطیسی باشند.



Figure 1-11 - Limit Switch

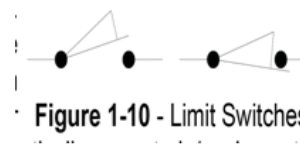


Figure 1-10 - Limit Switches

Cam operated limit switch

این المان برای پالس دادن در پایان یک دور استفاده می شود.

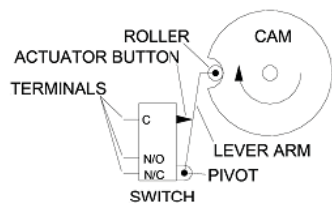


Figure 1-33 - Cam-operated Limit Switch

B. سویچها: ورودیهای فرمان

سویچهای فرمان، کلید برای کاربر جهت اعمال دستور به PLC هستند.

NC and NO switches

بعضی از سویچها در حالت عادی باز (NO) و بعضی دیگر در حالت عادی بسته (Normally Closed (NC) هستند. منظور از عادی، بدون اعمال تحریک است.

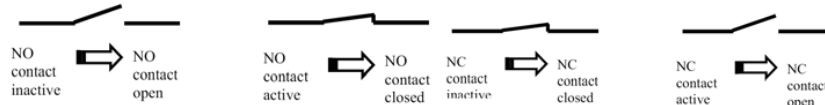


Fig. 19.3 (a) NO Contact interpretation

Fig. 19.3 (b) NC Contact interpretation

سویچهای Pushbutton

دو نوع سویچ فشاری وجود دارد.

سویچ فشاری لحظه‌ای: این سویچها تا زمانی که فشرده هستند فعال بوده و با برداشتن دست قطع می شوند. شکل سویچهای NC و NO فشاری را نشان می دهد.



Figure 1-4 - Momentary Pushbutton Switches

سویچ فشاری قفلی (maintained): با فشردن این سویچها، سویچ فعال می گردد و علیرغم آزاد ساختن آن فعال باقی می ماند. برای غیر فعال کردن آن یک بار دیگر باید فشرده شوند.

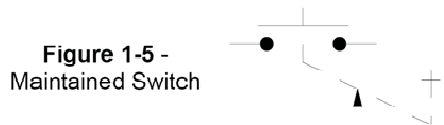


Figure 1-5 - Maintained Switch

سویچهای صنعتی بیشتر از یک کنتاکت دارند.

دکمه سویچ

دکمه سویچها بستگی به نوع کاربرد شکلهای متفاوتی دارند.

**سوئیچ سمت چپ** دکمه حفاظ دار guarded دارد. دکمه حدود نیم تا ربع اینچ داخل غلاف قرار دارد تا در نتیجه برخورد تصادفی تحریک نشود. برای فشردن این کلید به وسیله ای مانند انگشت نیاز است. این سوئیچ برای عملیات START, RUN, CYCLE, JOG یا RESET استفاده می شود.



Figure 1-5 - Switch Actuators

در **سوئیچ وسطی** دکمه هم سطح غلاف است. به این دکمه flush می گویند. این نوع دکمه حفاظت ضعیف تری در مقابل تحریک اتفاقی ایجاد می کند. در کاربردهایی که دکمه باید دارای چراغ باشد استفاده می شود. در **سوئیچ سمت راست** دکمه کاملا بیرون غلاف است. این نوع دکمه برای عملیاتی نظیر STOP, PAUSE مناسب است.

۳ دکمه فوق در سوئیچهای اضطراری و سوئیچ کارهایی که صدها بار در روز انجام می شوند استفاده نمی شود. برای این دو کاربرد دکمه هایی که به سهولت قابل دسترس باشند نیاز است. شکل دو نوع از این دکمه ها را نشان می دهد که به نامهای کله قارچی mushroom head یا palm head خوانده می شوند.

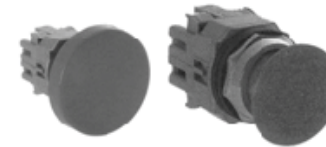


Figure 1-7 - Mushroom Head Pushbuttons

**سوئیچ سمت چپ** یک سوئیچ لحظه ای است که برای CYCLE استفاده می شود. این سوئیچها معمولا دوپل با فاصله ۲۴ اینچ هستند تا برای 2 handed CYCLE استفاده شوند.

**سوئیچ سمت راست** یک سوئیچ قفلی است که وقتی فشرده شود، فعال باقی می ماند. برای غیر فعال کردن آن دکمه باید بیرون کشیده شود. این دکمه برای **Emergency Stop** استفاده می شود. این دکمه معمولا قرمز رنگ است.

### سلکتورها

سمبل سوئیچهای سلکتوری مانند سوئیچهای لحظه ای است با این تفاوت که یک دسته برای آن رسم می شود.

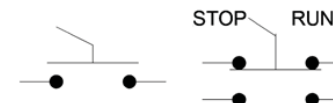


Figure 1-9 - Selectors

سلکتور سمت چپ وقتی دسته سمت چپ است باز و وقتی دسته سمت راست رود بسته است. سوئیچ سمت راست دارای دو کنتاکت است. وقتی دسته سمت چپ است، کنتاکت بالایی وصل و پایینی قطع است. با چرخاندن دسته به سمت راست، کنتاکت بالایی قطع و پایینی وصل می شود.

### Master Control Relays (MCR)

وقتی MCR تحریک گردد، برق برای کارکرد rung ها اعمال می شود. در حالت غیر فعال بودن MCR هیچ یک از rung ها کار نخواهد کرد.

### S 1.1 A. Categorise the following sensor systems as Discrete or Continuous

a) thermostat b) clinical thermometer c) the infrared sensor in TV sets

B. Categorise the following actuator systems as Discrete or Continuous

a) the trigger of a gun b) the steering wheel of the car c) a step motor

### ۴-۶ خروجیها

جدول زیر تعدادی از محرکها را معرفی می کند که از PLC فرمان دریافت می کنند.

Type	Output Quantity	Energy Source
Relay, Contactor	voltage	electrical
Motor Starter	motion	electrical
Lamp	indication	electrical
Solenoid	motion	electrical
On-off Flow Control valve	Flow	pneumatic, hydraulic
Directional Valves	Hydraulic Pressure	pneumatic, hydraulic

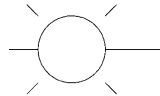
Table 18.2 Example Industrial Discrete Output and Actuation Devices

به هنگام محاسبات بیت حافظه به عنوان خروجی مقدار می گیرد. سپس به هنگام ارسال خروجیها، این بیتها به برد I/O منتقل می شوند.

### چراغهای وضعیت

تمام تابلوها دارای چراغ وضعیت هستند.

- چراغها حالت فعلی کاری ماشین را اعلام می کند.
- سمبل چراغها دایره ای است که در خارج آن خطوط شعاعی رسم می شود.



- چراغ قرمز برای نمایش وضعیتهای بحرانی و ایمنی اختصاص داده شده است. وضعیتهایی مانند ON, RUN یا درب باز است یا سیستم ایراد دارد از آن جمله اند.

- چراغ سبز وضعیت ایمن را اعلام می کند. وضعیتهایی مانند موتور خاموش است یا ترمزها فعال هستند.
- چراغ زرد وضعیتهای مهم ولی غیر خطرناک را نشان می دهند. وضعیتهایی مانند سطح مایع در حال کاهش است، ماشین در حال گرم شدن است یا ماشین متوقف است.
- رنگهای دیگر اطلاعات غیر بحرانی و غیر مربوط با ایمنی را ارائه می دهند.
- برای جلب توجه کاربر چراغ حالت چشمک زن به خود می گیرد.

### ۵-۶ The Relay Ladder Logic (RLL) Diagram

در بین زبانهای برنامه نویسی PLC، RLL میراث تابلوهای رله‌ای قدیم است که قبل از PLC در کنترل ترتیبی استفاده می شده است. نحوه برنامه نویسی RLL به شرح زیر است.

#### A. قوانین اصلی RLL

۱. در نمایش RLL دو خط عمودی وجود دارد که تغذیه مدار هستند. خط سمت چپ تغذیه، و سمت راستی زمین است. تغذیه از چپ به راست است و نمی تواند از راست به چپ جریان یابد.
۲. خطوط افقی به نام پله یا rung بین خطوط عمودی رسم می گردد.

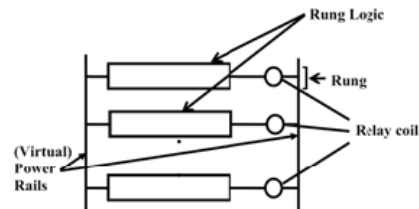


Fig. 19.1(a) The structure of Relay Ladder Logic Programs for PLCs

۳. هر پله دارای تعدادی ورودی در سمت چپ و فقط یک خروجی در سمت راست است.

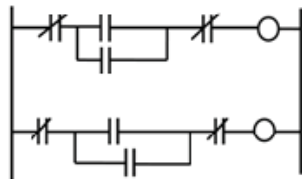
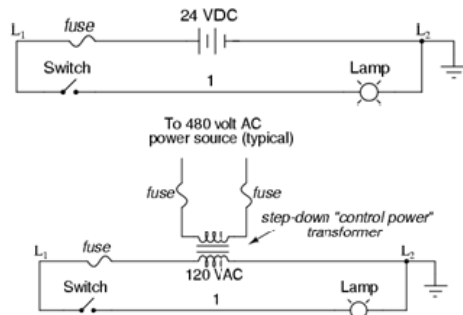


Fig. 19.1(b) The internal structure of a simple Rung

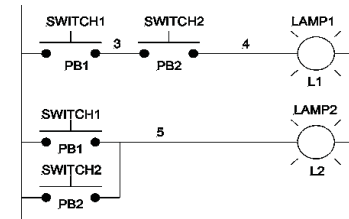
۴. شکل نحوه تغذیه و محل فیوز در RLL را نشان می دهد.



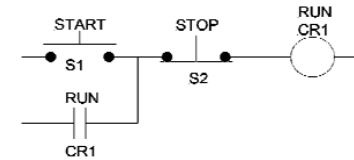
۵. RLL از بالا به پایین و از چپ به راست اجرا می شود.

۶. حالت کنتاکت مربوط به وضعیت غیر فعال در RLL رسم می شود.

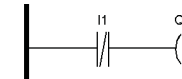
۷. شماره سویچ هر رله، شمارنده و غیره همان شماره رله یا شمارنده است.
۸. خروجی هر پله برای پله های بعدی فوراً قابل استفاده است.
۹. خروجی پله های بعدی می تواند روی پله های قبلی اثر گذارد. این تاثیر فیدبکی می تواند اجرای موفقیت آمیز چرخه عملیات را تضمین کند.
۱۰. پله های AND و OR



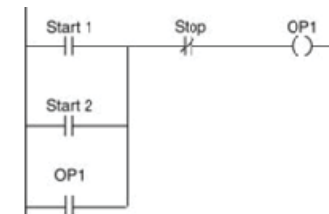
۱۱. پله Latch: عملیات قفل کردن latching جایی که سویچ لحظه ای فشرده می شود استفاده می شود. با فشردن کلید یک تابع میانی ON شده و بعد از رها کردن سویچ ON باقی می ماند.



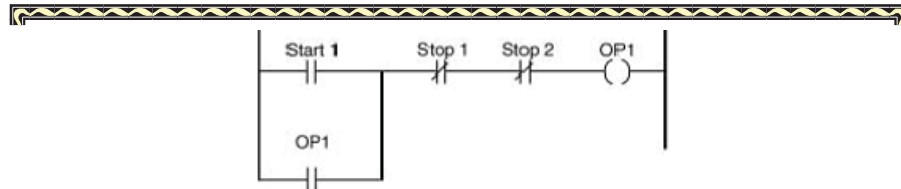
۱۲. پله NOT



۱۳. سویچهای که شروع چرخه را فعال می کنند معمولاً بصورت موازی بسته می شوند تا هریک از آنها بتوانند چرخه را شروع کنند.



۱۴. سویچهایی که توقف چرخه را فعال می کنند معمولاً بصورت سری بسته می شوند تا هریک از آنها بتوانند عملیات را متوقف کنند.



۱۵. توابع داخلی یا Flagها: علاوه بر ورودیها و خروجیها، توابع داخلی نیز نیاز است تا حالت های میانی را ذخیره کند. به این توابع Flag و در سیستم تابلو رله ای به نام توابع کمکی خوانده می شوند. تعداد این توابع ممکن است محدود گردد.

### S2.2 A. What is the basic difference between Input and Auxiliary Contacts?

C. Design an RLL Program for the following Industrial Problem

۱۶. دستورالعملهای RLL در گروه های زیر جای می گیرند.

- Standard relay logic type
- Timer and counters
- Arithmetic
- Logical
- Move
- Comparison
- File manipulation
- Sequencer instructions
- Specialized analog (PID)
- Communication instructions
- Diagnostic
- Miscellaneous (sub routines, etc.)

### B. برنامه نویسی استاندارد RLL

برنامه نویسی به زبان RLL دارای گامهای زیر است:

- رفتن به وضعیت صفر
  - نمودار نردبانی برای گذر از یک وضعیت به وضعیت دیگر
  - نمودار نردبانی برای ورود و ماندن در هر وضعیت
  - نمودار نردبانی خروجیها
- این موارد در مثال زیر تشریح می شوند.

#### ۱- رفتن به وضعیت صفر

ترتیبی باید اتخاذ کرد که سیستم بتواند به وضعیت صفر initial state برود. Master Reset در حالت اضطراری سیستم را به وضعیت صفر می برد.

## ۲- نمودار نردبانی گذارها

رله هر گذار سری با کلید NO وضعیت مبدا و کلید عامل گذر قرار می گیرد. در اینجا مثلا رله گذر A سری با کلید وضعیت ۱ و کلید عامل گذر Auto PB قرار دارد.

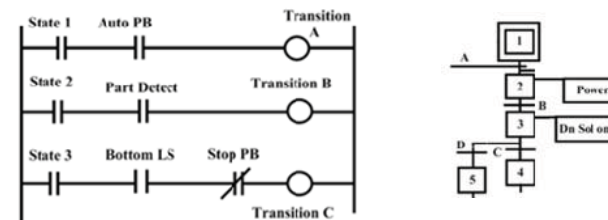


Fig. 20.5 State Transition Logic

## ۳- نمودار نردبان وضعیتها

۱. وقتی گذر A فعال شود سیستم باید از وضعیت 1 به وضعیت 2 برود. برای پیاده سازی آن، یک کنتاکت NO (رله گذر A) سری با رله وضعیت ۲ و یک کنتاکت NC (رله گذر A) سری با رله وضعیت ۱ قرار داده می شود.

۲. اگر در وضعیتی بیش از یک مسیر وجود دارد، کنتاکتهای NO رله های گذر مربوطه باید موازی قرار داده شوند.

۳. اگر از یک وضعیت ۲ مسیر گذر وجود دارد کنتاکتهای NC رله های گذر مربوطه باید سری قرار گیرند.

شکل نحوه پیاده سازی این دستورالعملها را نشان می دهد.

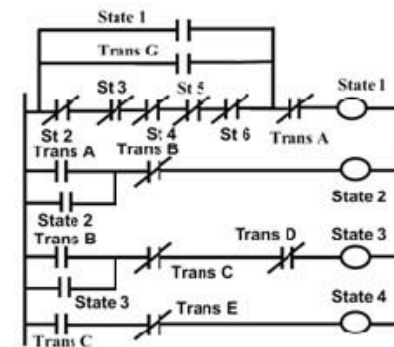


Fig. 20.6 State Logic

## ۴- نمودار نردبانی خروجیها

پله هر خروجی دارای کلید NO مربوط به وضعیتی است که خروجی را فعال می کند. اگر خروجی در چند وضعیت فعال می شود کلید NO تمام آنها موازی قرار داده می شوند.

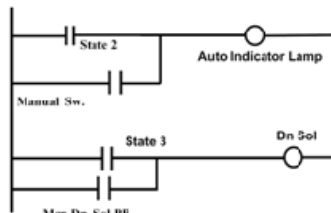


Fig. 20.7 Output Logic

S3.5 A. What would happen if the order of the transition, state and output logic blocks is changed in an RLL program?

## C. محدودیتهای برنامه نویسی RLL

در برنامه نویسی RLL در PLC مشکلات زیر ممکن است پدید آید.

- در هر پله فقط اجازه یک کویل داده می شود. تعداد شاخه های موازی هر پله محدود است (مثلا ۷). تعداد کنتاکت سری در هر شاخه نیز محدود است. برای کنتاکت اضافی باید کویل میانی تعریف کرد و بقیه کنتاکتها را در پله آن منظور کرد.
- کنتاکت عمودی (بین دو پله) مجاز نیست.
- کنتاکتهای تو در تو nested فقط تا حدی در برنامه نویسی PLC مجاز است.
- در RLL برق از چپ به راست حرکت می کند.
- در PLC ها مقدار اولیه تایمرها و شمارندهها متغیر است. ۹۹۹۹ مقدار معمولی است. در PLC های کوچک ممکن است ۹۹۹ باشد.
- در برنامه نویسی PLC های کوچک، RLL بهترین انتخاب برای برنامه نویسی است زیرا ارتباط بین کویل و کنتاکت واضح است. علاوه بر این مهندس تعمیرات از روی نقشه گرافیکی می تواند سیر عملیات را دنبال کند زیرا PLC اکثرا سازندگان دارای صفحه نمایشی است که وضعیت کویلها و کنتاکتها را تعیین می کند. اگر چه RLL یکی از زبانهای مهم برنامه نویسی طبق استاندارد IEC 1131-3 است، اما فاقد ساختار برنامه نویسی تمیز و مرتب است: ساختار سلسله مراتبی ساده ندارد.

مثال ۳: کنترل چپ راست موتور:

مثال زیر امکان حرکت عقب-جلو موتور را فراهم می آورد. جهت حرکت موتور به علامت تغذیه آن وابسته است. این تغییر تغذیه را RLL زیر فراهم می آورد.

پله مربوط به حرکت به جلو شامل عوامل زیر است.

- 1- A normally closed stop push-button (IN001),
2. A normally opened forward run push-button (IN002) in parallel with a normally opened auxillary contact(OP001),
3. A normally closed auxillary contact(OP002) and
4. The contactor for coil(OP001).

بطور مشابه پله مربوط به حرکت عقب نیز عوامل زیر را خواهد داشت.

- 1- A normally closed stop push-button (IN001),



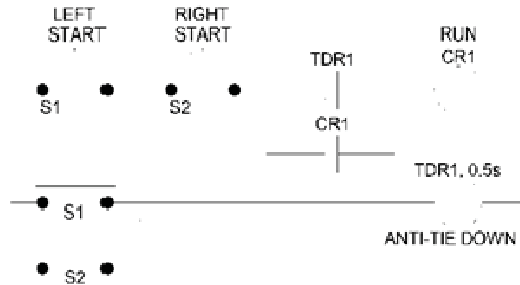
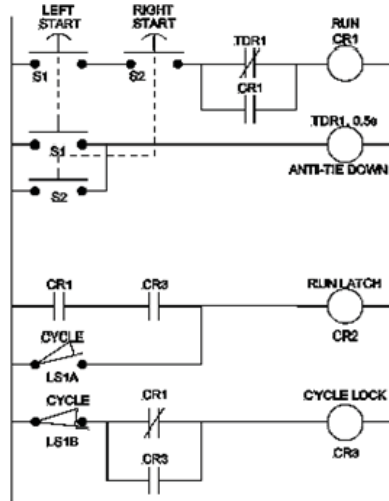


Figure 1-32 - 2-Handed Operation with Anti-Tie Down and Anti-Repeat

2-Handed, Anti-Tie Down, Anti-Repeat, Single-Cycle Circuit



- 2- A normally opened forward run push-button (IN003) in parallel with a normally opened auxillary contact(OP002),
- 3- A normally closed auxillary contact(OP001) and
- 4- The contactor for coil(OP002).

نحوه کار

- در حالت اولیه موتور ساکن است و حرکت نمی کند.
- برای حرکت forward دکمه forward فشرده و رها می شود (IN002). در نتیجه رله کمکی OP001 فعال شده و فعال باقی می ماند. کنتاکت OP001 در پله دوم باز شده و اجازه فعال شدن حرکت reverse حتی در صورت فشرده شدن کلید reverse را نمی دهد.
- برای انجام حرکت معکوس ابتدا باید دکمه stop فشرده شود IN001. در نتیجه OP001 غیر فعال شده و امکان کار با دکمه reverse بدست می آید IN003. به این همبستگی بین کلیدها Interlocking می گویند که یک پله عملیات پله دیگر را متوقف می کند.

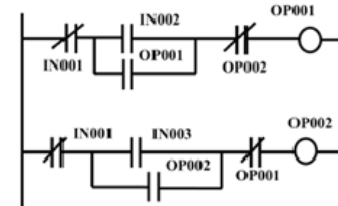


Fig. 19.2 RLL Diagram for the Forward Reverse Control Problem

2-Handed Anti-Tie Down, Anti-Repeat

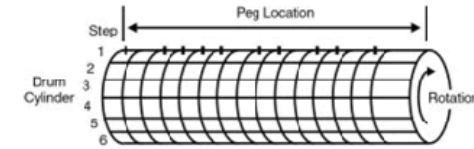
طبق استاندارد ماشینهای cyclic باید کلید راه اندازی 2-Handed Anti-Tie Down, Anti-Repeat داشته باشند. در ماشینهای برش، پرس و غیره برای صدمه نرسیدن به کارگر این روش را پیاده سازی می کنند تا هر دو دست کارگر به کار گرفته شود و نتواند قطعه را بگیرد که ممکن است دست وی پرس شده یا بریده شود. برای اینکه کارگر نتواند یکی از کلیدها را سریع فشرده و با همان دست کلید دیگر را بفشارد مکانیزم Anti-Tie Down and Anti-Repeat به کار گرفته می شود. برای شروع یک سیکل هر دو کلید که با فاصله از هم قرار دارند در حداکثر فاصله زمانی معمولاً 0.5 ثانیه باید فشرده شوند، در غیر اینصورت سیکل شروع نمی شود. برای این منظور به رله ON-Delay نیاز است.

## ۶-۶ توابع در برنامه PLC

در ساختار RLL علاوه بر کوپل و کنتاکت، المانهای دیگری مانند شمارنده، تایمر و غیره نیز وجود دارند.

## Sequencer Instruction

در سیستمهای رله‌ای کنترل صنعتی، استوانه‌ای مانند شکل زیر توالی عملیات را اعمال می‌کند. استوانه با دور ثابت می‌چرخد و برجستگیهای آن سوییچهای خاصی را در هر زمان فعال می‌کند. این استوانه دارای ۱۶ برجستگی است که مس تواند ۱۶ میکروسویچ را فعال کند.



## تایمر

به مثال که دلیل نیاز به تایمر را مشخص می‌کند دقت کنید. در یک کارگاه ۳ فن وجود دارد که کارکرد آنها الزامی است. هدف طرح سیستم مانیتورینگ برای این فن هاست. جریبات طرح به این قرار است:

۱- اگر حداقل ۲ فن روشن باشد وضع نرمال و چراغ روشن است.

۲- اگر یکی از فن‌ها روشن باشد، چراغ با فرکانس ۰.۵ هرتز چشمک بزند.

۳- اگر هر سه فن خاموش باشند، فرکانس چشمک بیشتر و ۲ هرتز گردد.

۴- مانیتور وقتی فعال است که چراغ "plant in operation" فعال (یک) باشد.

۵- کلید "lamp test" وقتی "plant in operation" صفر است فعال، و یا تمام چراغها را روشن یا چشمک زن می‌کند.

برای پیاده سازی رله‌های تاخیردار، تایمرهایی در پردازشگر PLC تعبیه شده است که تعداد آنها به نوع PLC وابسته است. امکان داشتن زمانهای از چند میلی ثانیه تا چندین ساعت امکانپذیر است. شکل یک تایمر را نشان می‌دهد. قابلیت‌های تایمر در شکل نشان داده شده‌اند.

قابلیت تایمرها عبارتند از:

- Preset register value: ماکزیمم مقدار شمارش است که توسط برنامه قابل تنظیم است.
- 'enable reset logic': وقتی صفر شود شمارش صفر و متوقف می‌گردد. با یک شدن آن اجازه شمارش داده می‌شود.
- 'run logic': وقتی ۱ شود شمارش شروع می‌شود.
- خروجی با رسیدن شمارش به مقدار Preset فعال و یک می‌گردد.

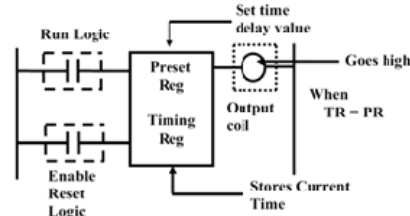


Fig. 19.4 Structure of a Typical Timer

انواع تایمرهای زیر وجود دارند:

## On delay timer

بعد از ۱ شدن ورودی مدتی طول می‌کشد (delay=PR) تا خروجی ۱ شود، ولی با ۰ شدن ورودی خروجی فوراً ۰ می‌شود. این تایمر به ۱ شدن ورودی که کمتر از delay است جواب نمی‌دهد.

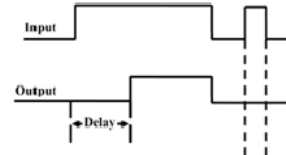
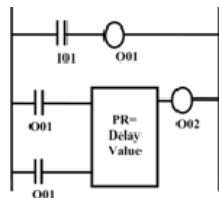


Fig. 19.6 The realization of an On-delay timer from a general timer. Fig. 19.5 A Typical Input output waveform for an On-Delay Timer

نحوه ساخت آن بر اساس تایمر پایه در شکل نشان داده شده است. وقتی  $I01=1$  باشد،  $O01$  فعال و در نتیجه هم enable و هم run تایمر فعال می‌شود. بعد از گذشت delay که قبلاً در تایمر وارد شده است خروجی  $O02$  فعال می‌شود. با ۰ شدن  $I01$  در هر حالت،  $enable=0$  شده و خروجی  $O02=0$  می‌گردد. تایمر مینا on-retentive است.

## Off delay timer

در این تایمر با ۱ شدن ورودی، خروجی فوراً ۱ می‌شود. اما در صورت ۰ شدن ورودی مدتی delay طول می‌کشد تا خروجی صفر شود. اگر ورودی قبل از پایان  $delay=PR$  مجدداً ۱ شود تایمر ۰ نمی‌شود.

برای ساخت آن با تایمر پایه مطابق شکل می‌توان عمل کرد. با فعال شدن  $I01=1$  خروجی  $O03=1$  می‌گردد در حالیکه خروجی تایمر پایه  $O02=0$  است. فعال بودن خروجی تا زمانیکه  $I01=1$  است باقی می‌ماند. با ۰ شدن ورودی  $I01$  هر دو ورودی رله enable و run فعال می‌گردند ولی  $O02$  همچنان ۰ است. در وضعیت  $O02=0$  و  $O03=1$  خروجی همچنان ۱ است. بعد از گذشت delay تایمر ۱ می‌شود. متعاقب آن  $OP02=1$  و خروجی  $OP03$  غیر فعال و ۰ می‌شود. مقدار delay در تایمر قبلاً وارد شده است.

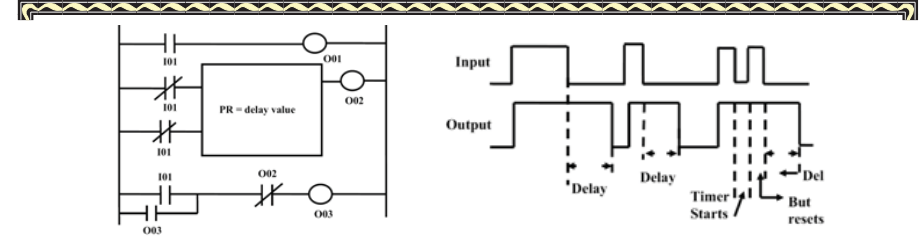


Fig. 19.7 A Typical Input output waveform for an Off-Delay Timer

**Fixed pulse width timer**

در این تایمر بعد از 1 شدن ورودی برای مدت معینی  $delay=PR$  خروجی 1 است و بعد 0 می شود. 0 شدن ورودی در این مدت تاثیری بر زمان 1 بودن خروجی ندارد.

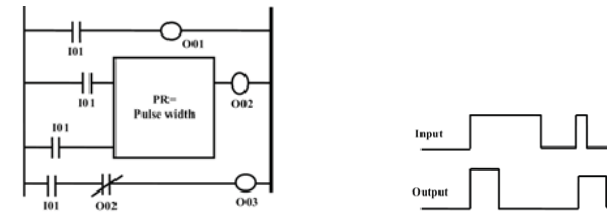


Fig. 19.9 A Typical Input output waveform for a Fixed Width Timer

**Retentive timer**

در تایمرهای retentive بعد از 0 شدن ورودی، خروجی شمارنده تایمر صفر نمی شود بلکه متوقف و مقدار خود را حفظ می کند. در این تایمرها بعد از 1 شدن مجدد ورودی تایمر شمارش را بعد از مقدار قبلی خود ادامه می دهد. وقتی خروجی شمارنده تایمر به PR رسید، خروجی تایمر 1 می شود.

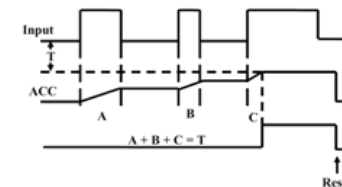


Fig. 19.11 A Typical Input output waveform for a Retentive Timer

**Non-retentive timer**

در تایمرهای non retentive با 0 شدن ورودی خروجی شمارنده تایمر صفر می شود و با یک شدن مجدد ورودی شمارش از صفر آغاز می گردد. هر زمان خروجی شمارنده تایمر PR شود، خروجی تایمر 1 می شود.

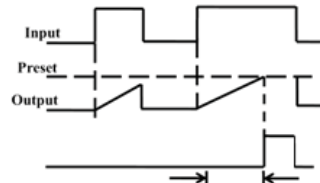


Fig. 19.12 A Typical Input output waveform for a Fixed Width Timer

**شمارنده**

هر PLC ممکن است چندین شمارنده در پردازشگر خود داشته باشد. شمارنده از 0 تا ۹۹۹ (بستگی به PLC) می شمارد. هر وقت مقدار شمارش برابر مقدار داده شده اولیه (set) شود، خروجی "یک" می شود. شمارنده به ازای هر پالس ورودی یک شماره می شمرد.

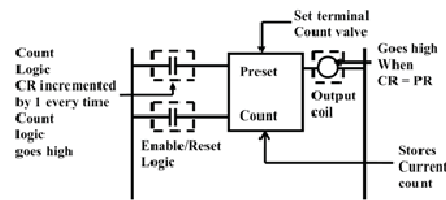


Fig. 19.13 Structure of a Typical Counter

دیگر المانهای کنترل ترتیبی و سمبل آنها به شرح زیر هستند.

- |  |                    |                                |
|--|--------------------|--------------------------------|
| T transformer                          | CR control relay   | R resistor                     |
| C capacitor                            | LS limit switch    | PB pushbutton                  |
| S switch                               | SS selector switch | TDR or TR time delay relay     |
| M motor, or motor relay                |                    | L indicator lamp or line phase |
| F fuse                                 | CB circuit breaker |                                |
| OL overload switch or overload contact |                    |                                |

**تمرین**

مدار RLL بکشید که از ۵ مخزن اگر ۳ تای آنها خالی بودند اخطار دهد.

راهنمایی: مانند آنچه در مدار منطقی دیده اید جدولی درست کرده و سپس رابطه منطقی برای صورت مسئله بدست آورده آنرا بسازید.

مثال چراغ چشمک زن

۷-۶ دیگر زبانهای برنامه نویسی

Function Block Diagram (FBD). A

FBD محصول کلیدی استاندارد است که امکان برنامه نویسی گرافیکی کنترلرهای پیچیده را فراهم می آورد. رسم برنامه مانند کشیدن مدار است که در آن بلوکها توسط سیم بهم وصل می شوند. بلوک توابع الگوریتمی هستند که از قبل نوشته شده اند. نمایش گرافیکی نحوه جریان عملیات را به آسانی نشان می دهد. استاندارد دارای بلوک توابع متعدد است که توسط سازنده و کاربر قابل افزایش است.

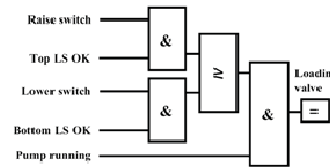


Fig. 21.1 Combinational logic programmed with function blocks

مثال: تابع منطقی شکل فوق را بنویسید.

Structured Text (ST) .B

ST زبان ساختار یافته سطح بالا است که برای برنامه نویسی عملیاتی که نوشتن FBD آنها مناسب نیست استفاده می شود. ST توابع شرطی مانند IF, FOR, WHILE و REPEAT را به سهولت اجرا می کند. با این نحوه برنامه نویسی بلوک توابع ساخته می شود که در FBD مورد استفاده قرار می گیرد.

```

if (temp <= max_temp)
then
  cool_valve := false;
  m_vlv := (viv23 + dbh18) / 2;
else
  alarm := true;
end_if;
    
```

Fig. 21.2 Simple program segment written in Structured Text.

مثال: برای برنامه فوق FBD بکشید.

Instruction List (IL) .C

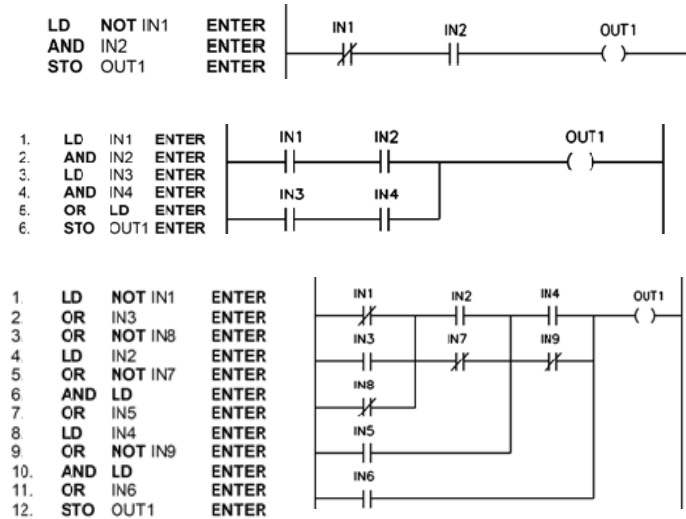
زبان سطح پایین برنامه نویسی است که برای انجام عملیات باینری مناسب است. این زبان برای بهینه سازی زمان اجرا و مقدار حافظه در بلوکها استفاده می شود.

```

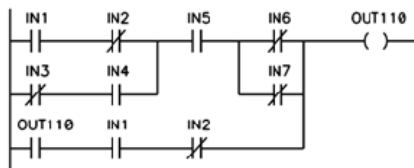
start_cmd: LD      ii 01
           ADD     10
mul_op:   MUL(    i_gain
           SUB     offset 01
           )
           ST      op 01
           JMPNC  mul_op
    
```

Fig. 21.3 Simple program segment written in Instruction List

مثال: RLL معادل برنامه های IL در شکلهای نشان داده شده اند. آنها را تطبیق دهید.



تمرین: برای RLL زیر کد بنویسید



- S4.1 A. Name one programming task for which, IL would be your chosen language.  
 B. Name one programming task for which, ST would be your preferred language over FBD.  
 C. For whom are the features code reusability and library support important, and why?

الف) واحد توسعه I/O فاصله نزدیک در قفسه کنترل مرکزی و یا در نزدیکی آن (تا ۲۰۰ متر بستگی به سرعت تبادل اطلاعات) قرار دارد.

ب) واحد توسعه I/O راه دور تا ۱۰۰۰ متری کنترل مرکزی قرار دارد و از طریق remote interface به آن متصل است. در این حالت به هر کنترل مرکزی تا ۱۶ واحد توسعه I/O می توان وصل کرد. به هر واحد توسعه راه دور تا ۴ واحد توسعه فاصله نزدیک هم می توان وصل کرد. شکل 22.3 این طرحها را نشان می دهد.

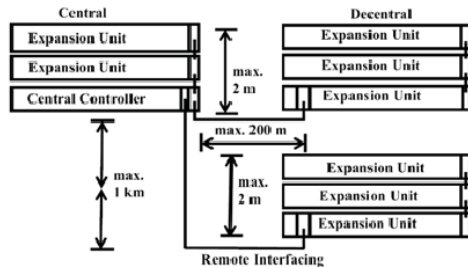


Fig. 22.3 Physical layout and Bus extension System for PLCs

#### ۹. Special Purpose Modules

PLC ها دارای بخشهای خاص نیز ممکن است باشند:

- High speed counting
- High accuracy positioning
- On-line self-optimizing control
- Multi axis synchronisation, interpolation

S 5.0 A. Name three major elements of a PLC System

B. What is the need for special purpose I/O modules? Explain with an example

C. What is a communication Processor?

S 5.1 A. What is remote i/o? How is it different from the other kinds of i/o?

B. What are the functions of the blocks named Man-Machine Interface(MMI) and Programmer?

#### ۱۰. ابعاد PLC

**Rack Mounted PLC**: اغلب بزرگ و دارای چندین برد است. بردها، برد پردازنده، ارتباطی، I/O و برد توابع خاص است. در مواقع لزوم ممکن است چندین rack بهم وصل شوند. کانال اتصال "باس" نام دارد. آدرس دهی پرت در این سیستم شامل: آدرس rack، آدرس slot (خانه در rack) و آنگاه آدرس پرت است. نحوه آدرس دهی در محصولات متفاوت است. این PLC ها گرانترین و قابل انعطافترین نوع می باشد. شکل 22.2 نمونه‌ای از آنرا نشان می دهد.

#### ۸-۶ سخت افزار PLC

PLC در حقیقت یک میکروپروسور است که محاسبات را بلادرنگ انجام می دهد و عملیات I/O و ارتباطی را محقق می کند. PLC دارای اجزا زیر است که در شکل نشان داده شده‌اند.

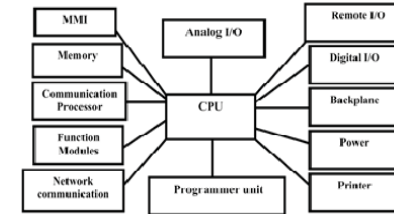


Fig. 18.5 Conventional PLC Architecture

#### A. ساختار PLC

۱. منبع تغذیه: تغذیه ممکن است روی برد پردازنده و یا جدا باشد. ولتاژهای مورد نیاز ۵ و ۲۴ ولت DC و ۲۲۰ ولت AC است. ولتاژها تثبیت شده هستند و صحت آنها کنترل می شود.
۲. واسط کاربر با PLC شامل چراغهای وضعیت: چراغهایی که وضعیت کاری PLC مانند روشن و خاموش را شامل می شود، کلیدهای فرمان و برنامه نویسی.
۳. باس بردهای مختلف PLC را به هم متصل کند.
۴. پردازنده مرکزی: پردازشگری است که ممکن است ۸، ۱۶ یا ۲۴ بیتی باشد.
۵. پردازنده ارتباطات: وظایف ارتباطات ممکن است به یک پردازنده جدا واگذار شود. پردازنده ارتباطی دارای RAM و EPROM مختص خود است. این پردازنده عملیات زیر را انجام می دهد:
  - ارتباط با پرینتر، صفحه کلید، نمایشگر و دیگر وسایل جانبی
  - ارتباط با دیگر PLC ها
  - ارتباط با کامپیوتر کنترل نظارتی
  - Local Area Network (LAN): پروتکل استاندارد interoperable network protocol در PLC های امروزه جای داده می شود.
۶. حافظه: PLC دارای برد حافظه RAM و EPROM برای نگهداری برنامه و اطلاعات است.
۷. بردهای ورودی و خروجی: PLC ها دارای برد و یا واحد I/O هستند که سیگنال سنسورها را دریافت و محرکها را تحریک می کند. ورودیها و خروجیهای دیجیتال و آنالوگ در PLC ها تعبیه می شوند.
۸. توسعه I/O

بردهای I/O داخل واحد توسعه expansion unit قرار می گیرند و از طریق برد اینترفیس آن به کنترل مرکزی اتصال می یابند. این ارتباط به دو روش ممکن است انجام شود.

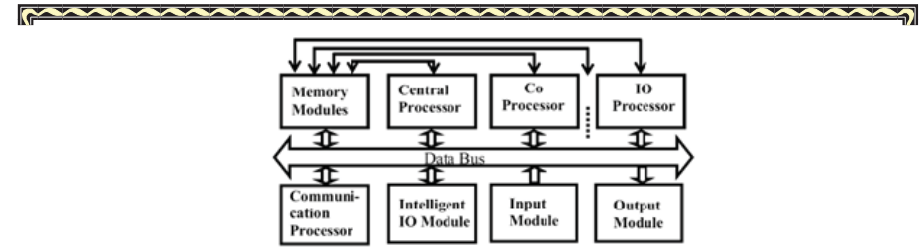


Fig. 22.2 Functional hardware organization of a PLC System

**Mini PLC** مانند Rack Mounted PLC ولی سایز نصف آنرا دارد. شکل 22.4 نمونه ای از آنرا نشان می دهد. این سیستمها ممکن است روی زمین یا به دیوار نصب شوند و اغلب فاقد extended bus هستند.



Fig. 22.4 A mini PLC System

**Compact PLC:** این PLC ها روی دیوار نصب می شوند و امکانات توسعه ای آنها محدود است. قیمت مناسبی دارند و برای کاربردهای کوچک بسیار مناسبند.

**Micro PLC:** اینها روی دیوار و یا روی میز نصب می شوند. قیمت پایینی دارند و به عنوان embedded سیستم داخل طرحها استفاده می گردند. تعداد I/O آنها ثابت و با امکانات محدود هستند، لذا برای کاربردهای صنعتی مناسب نیستند.

**Software Based PLC:** این PLC ها توسط یک برد به یک کامپیوتر مانند PC متصل می شوند. برنامه نرم افزاری PLC که روی کامپیوتر نصب می شود. از منابع PC استفاده کرده و عملیات محاسباتی و I/O را انجام می دهد. مزیت این PLC آن است که از طریق PC می تواند به اینترنت، دیگر PLC ها، یا دیگر کامپیوترها وصل شود و از امکانات گرافیکی PC استفاده کند.

**S 5.2 A.** Name one application each for which a mini PLC may be appropriate. Provide justifications for your choice.

**B.** Why is a special bus extender unit needed for extending the bus over long distances?

### B. پردازنده

پردازندهها با قدرت های متفاوت بستگی به نیاز در PLC ها تعبیه می شود. پردازنده I/O و دیگر بردهای خاص (ارتباط با Fieldbus و لینک سریال و Ethernet و غیره) را که در rack قرار دارند مدیریت می کند.

برد پردازنده دارای battery backup برای موارد زیر است:

- Flags ( internal relays), timers and counters;
- Operating system data
- Process image for the signal states of binary inputs and outputs.

این احتمال وجود دارد که برد پردازنده back up نصب شود تا در صورت ایراد سریعاً کنترل عملیات را بر عهده بگیرد.

حداقل و حداکثر ظرفیت سخت افزاری در rack mounted PLC ها در جدول زیر آمده است.

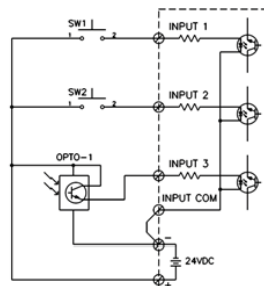
Features	Low end	High end
No. of racks	6	24
No. of module slots	21	87
In-rack discrete I/O	512	2048

In-rack analog I/O	24	256
Application specific function modules	8	64
Process control loops	-	60
Process control channels	-	20
Network connection: TCP/IP, Modbus +, Ethernet	1	4
Fieldbus connection	0	2
Internal memory (16-bit words)	32K	176K
Memory extension (16-bit words)	64K	512K

Table 22.1 Typical Features of high end and low-end processor modules

### C. برد ورودی

برد ورودی سیگنال سنسورها (0-24V Dc, 4- 20mA) را به سطح ولتاژ PLC یعنی 5V یا 3.3V تبدیل می کند. این بردها مستقیماً سیگنالهای آنالوگ RTD, thermocouple و بعضی دیگر سنسورها را دریافت، تقویت و به PLC تحویل می دهند. بین ورودی ها و PLC ایزوله الکتریکی برقرار است. نوعی از این ایزولاسیون در شکل نشان داده شده است.



### ورودی آنالوگ

برد آنالوگ 8/16 ورودی را می پذیرد که مقدار آنها 0-5V و یا 0-10V است. جدول زیر مشخصات این بردها را نشان می دهد. ورودیها می توانند تک سر یا تفاضلی باشند. ورودی تک سر دارای یک سیم common و یک سیم سیگنال است. اما ورودی تفاضلی دارای ۲ سیم سیگنال است که اختلاف ولتاژ بین آنها اندازه گیری و تقویت می شود. علاوه بر اینها ورودیهای خاص برای سنسورهایی نظیر RTD نیز وجود دارد. برد آنالوگ دارای بخشهای زیر است.

- Analog to digital (A/D) converters
- Analog multiplexers and simultaneous sample-and-hold (S/H)
- Analog Signal termination
- PLC bus ports
- Synchronisation

Module Parameter	Type/Number/Typical Value
Number of input	8/16 voltage/current/Pt 100/ RTD
Galvanic isolation	Yes /No
Input ranges	±50 mV to ±10 V; ±20 mA; Pt 100
Input impedance for various ranges (ohm)	±50mV: > 10 M ; ±10 V: > 50k; ±20 mA : 25; Pt 100 : > 10 M
Types of sensor connections	2-wire connection; 4-wire connection for Pt 100
Data format	11 bits plus sign or 12 bit 2's complement
Conversion principle	Integrating /successive approximation
Conversion time	In ms (integrating) , μs (successive approx.)

Table 22.2 Typical Parameters for an Analog Input Module



Fig. 22.5 Analog IO Module

ورودی دیجیتال

برد ورودی، سطح ورودیهای باینری را به سطح سیگنال باینری PLC می رساند. ورودی از PLC ایزوله است... جدول مشخصات برد ورودی دیجیتال را نشان می دهد.

Module Parameter	Typical Values
Number of input	16/32
Galvanic isolation	yes
Nominal input voltage	+ 24 V DC
Input voltage range	- "0" signal -33...+7V - "1" signal +13...+33V
Input current	Typically in mA
Delay	Typically in μs
Maximum cable length	Typically within 1000m

Table 22.3 Typical Parameters for an Digital Input Module

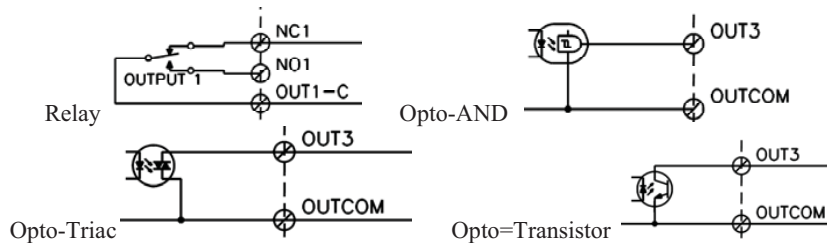
- S 5.3 A. Why so many types of analog inputs have been provided for?  
 B. How to select between integrating and successive approximation converters?  
 C. What is the significance of the input ranges for digital input modules?

D. برد خروجی

خروجی PLC محرکها را فعال می کند.

1. **Solenoid Valves** - logical outputs that can switch a hydraulic or pneumatic flow.
2. **Lights** - logical outputs that can often be powered directly from PLC boards.
3. **Motor Starters** - motors often draw a large amount of current when started, so they require motor starters, which are basically large relays.
4. **Servo Motors** - a continuous output from the PLC can command a variable speed or position to a servo motor drive system.

برای خروجی DC، تقویت کننده ترانزیستوری استفاده می شود که تا 1A جریان می دهد. این تقویت کنندهها زمان سوئیچ 1ms دارند. برای خروجی AC المان Triac در برد تعبیه می شود که تا 1A جریان می دهد. علاوه بر این دو نوع، خروجیهای رلهای برای تحریک محرکهای توان بالا نیز لحاظ می گردد. رلهها هم DC و هم AC را سوئیچ می کنند ولی کند (سوئیچینگ حدود ۱۰ میلی ثانیه) گران، و حجیم هستند. علاوه بر این فرسوده می شوند. شکل خروجیهای ایزوله PLC را نشان می دهد که در آنها از رله، TTL نوری، اپتوترانزیستور و اپتوتریاک استفاده شده است.



ارتباط بین PLC و محرکها از نظر الکتریکی ایزوله است. برای تحریک محرک تغذیه خارجی مانند 120V ac، آنها را بر عهده می گیرد. بردها دارای 8/16 خروجی مشابه هستند. بسته به نیاز، برد با قدرت جریانی-ولتاژی مناسب خریداری می شود.

خروجی آنالوگ

خروجی دیجیتالی به D/A اعمال و سیگنال آنالوگ خروجی تولید می شود. اگر محرک قدرتی باشد، سیگنال آنالوگ خروجی باید توسط تقویت کننده توان خارجی تقویت شود. سیگنال خروجی می تواند disable شود که در این صورت آخرین مقدار ثابت باقی می ماند. جدول مشخصات برد خروجی آنالوگ را معرفی می کند.

Number of outputs	8 voltage and current output	
Galvanic isolation	yes	
Output ranges ( rated values )	± 10 V ; 0...20 mA	
Load resistance		
- for voltage outputs	min.	3.3 k
- for current outputs	max.	300
Digital representation of the signal	11 bits plus sign	
Conversion time	In μs	
Short-circuit protection	yes	
Short-circuit current	approx.	25 mA (for a voltage output)
Open-circuit voltage	approx.	18 V (for a current output)
Linearity in the rated range	±0.25% + 2 LSB	
Cable length	max.	200 m

Table 22.4 Typical Parameters for an Analog Output Module



## خروجی دیجیتال

برد خروجی دیجیتال بین سطح ولتاژی در PLC و سطح ولتاژ مورد نظر در خروجی تبدیل انجام می دهد. سیگنال خروجی با فیوز در مقابل اتصال کوتاه محافظت می شود. مشخصات برد خروجی دیجیتال در جدول آمده است.

Module Parameter	Typical Value
1.Number of outputs	16/32
2.Galvanic isolation	yes
Rated value of Supply voltage Permissible range	+ 24 V DC 20-30 V
Max. output current for "1" signal	0.5 A
Short-circuit protection	Yes
Max. switching frequency for resistive loads, lamps, inductive loads, respectively, in Hz.	100/11/2 Hz ( at 0.3 A )
"0" signal level max	+3 V
"1" signal level max.	$V_{pp} \cdot 1.5$ V
Max. cable length (unshielded)	400 m

Table 22.5 Typical Parameters for an Digital Output Module

**S 5.4 A.** Determine the significance of the following specifications for an analog output module:

- a. Load resistance b. Linearity c. Conversion time  
B. Determine the significance of the following specifications for a digital output module: a. Max. switching frequency b. Shrot circuit protection

**E. برد مستقل توابع عملیاتی**

برای I/O سریع مانند شمارش پالس از سنسور انکودر یا کنترل دقیق موقعیت، برد مستقل I/O در نظر گرفته می شود تا بار محاسباتی پردازنده اصلی را کم کند. این بردها پاسخ سریع و پردازش شده به تغییرات بیونی که معمولاً توسط سنسورها اندازه گیری می شود می دهند.

**برد شمارنده**

این برد پالسهای سریع تا 2MHz را می شمارد و نتیجه شمارش را در اختیار پردازنده اصلی می گذارد. شمارنده معمولاً ۱۶ بیتی و up/down می شمارد. شمارنده برای اندازه گیری پیروید و فرکانس نیز مورد استفاده قرار می گیرد. اجزا برد عبارتند از: واسط با پردازنده مرکزی، شمارنده الکترونیکی، اسیلاتور دقیق کوارتزی و تقسیم کننده فرکانس. با توالی شمارنده ها می توان رنج شمارش را گسترش داد. پالس ورودی می تواند مستقیماً یا از طریق تقسیم کننده فرکانسی به شمارنده وصل شود. شمارنده همچنین می تواند مستقیماً یا از طریق تقسیم کننده فرکانس به اسیلاتور داخلی وصل گردد. اینها ملزومات اندازه گیری فرکانس و پیروید هستند. شمارنده در مدهای مختلف می تواند کار کند که عبارتند از:

- Count mode binary or BCD coded
- Count once or cyclically
- Count on rising or falling edge
- Count up or down
- Counting of internal clock or external pulses

## برد کنترلر حلقه بسته

هر برد می تواند تا چند حلقه کنترل با پیروید نمونه برداری از چند میلی ثانیه تا چند ثانیه را کنترل کند. برد، خروجی فرایند را از ورودی آنالوگ اندازه گیری کرده و با سیگنال مرجع مقایسه می کند. نتیجه مقایسه به کنترلر طراحی شده اعمال و خروجی کنترلر از طریق خروجی آنالوگ، محرک را تحریک می کند. برد دارای پردازنده خاص است. پارامترهای کنترلر و سیگنال مرجع را پردازنده اصلی در حافظه پردازنده برد قرار می دهد و این پردازنده، خروجی فرایند را به پردازنده اصلی ارسال می کند.

برنامه اجرایی پردازنده برد بصورت بلوک تعریف می شود که بستگی به نوع کار حلقه در حافظه آن جای داده می شود. این بلوکها می تواند: کنترل سرعت، کنترل موقعیت یا حرکت رمپی و غیره باشد. در حالت کنترل زنجیره‌ای یکی از کنترلرها به حلقه داخلی و یکی دیگر برای حلقه خارجی منظور می شود.

هر کنترلر می تواند الگوریتم PID را کلا و یا جزا پیاده کند. علاوه بر اینها می تواند نقش مانیتورینگ خروجیها را انجام دهد و برای اضافه جریان یا اضافه سرعت و غیره اخطار دهد.

نحوه پیاده سازی PID در PLC نوع incremental است. برای کنترلر PID پیوسته

$$CV = k_p \left[ (SP - PV) + k_i \int_0^t (SP - PV) dt + k_d \frac{d}{dt} (SP - PV) \right]$$

کنترلر دیجیتالی زیر استفاده می شود

$$CV = k_p \left[ (SP - PV) + k_i \sum_0^t (SP - PV) \Delta t + k_d \frac{\Delta(SP - PV)}{\Delta t} \right]$$

فرم دیگر آن به شکل زیر است.

$$CV = k_p \left[ (SP - PV) + \frac{1}{T_i} \sum_0^t (SP - PV) \Delta t + T_d \frac{\Delta(SP - PV)}{\Delta t} \right]$$

**S5. 5 A.** Name two advantages and two disadvantages of using a function module for an automation application

B. Based on the illustrative figures given for the counter module, determine the maximum possible timing interval that can be programmed on the counter module.

C. Describe the meaning of the various counting modes of a counter module

D. Consider a position control application. Describe the options for receiving feedbacks for the loop controller for this application

## ۹-۶ روش اجرای برنامه

## A. بلوک تابع

بلوک توابع مجموعه دستورات متوالی است که به کرات مورد استفاده قرار می گیرند یا اینکه توابع پیچیده هستند. این بلوکها در کتابخانه توابع نرم افزار قرار می گیرند. توابع گرفتن ورودی، ارتباط با دیگر PLC ها و غیره از جمله آنها هستند.

## B. اجرای برنامه

اجرای برنامه ممکن است سیکلی، اینترپتی یا با پالس ساعت باشد. معمولا در PLC روش سیکلی استفاده می شود.

## اجرای سیکلی

۱. بعد از راه اندازی PLC، ورودیها خوانده و در جدولی در حافظه قرار داده می شوند. این جدول تصویر ورودیهاست (PII).
۲. برنامه قرار داده شده در حافظه را پله به پله اجرا می کند. در این اجرا ورودیها را از تصویر ورودی در حافظه می خواند و خروجیها را در جدول تصویر خروجیها در حافظه می نویسد (PIQ). در صورت نیاز تصویر خروجیهای تایمرها و شمارندهها که در حافظه وجود دارد و خانههای حافظه را می خواند.
۳. بعد از اتمام سیکل، تصویر خروجیها به خروجیها ارسال می گردد.
۴. به گام ۱ رفته و سیکل بعدی اجرا می شود.

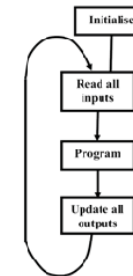


Fig. 19.1 The cyclic execution of PLC Programs

مدت زمان انجام یک چرخه، scan time خوانده می شود. مدت زمان آن به سرعت پردازنده، تعداد پلهها و پیچیدگی آنها بستگی دارد. شکل سیکل اجرای سیکلی را نشان می دهد.

## اجرای اینترپتی و یا با clock

اجرای سیکلی می تواند در معرض وقفه قرار گیرد، وقتی پاسخ به یک رخداد خاص بر ادامه سیکل ترجیح پیدا کند. این کار در صورت وقوع ایراد برای تصحیح عیب و جلوگیری از خسارت ضرورت دارد. اگر وقفه پرودیگ باشد به

این معنی است که اجرا باید سنکرون صورت گیرد. اجرا سیکلی که با پرودیگ ثابت اجرا می شود نحوه کار اغلب PLC ها است.

## S2.1 A. What are the different modes of execution?

- Which is the most common?
- State for each of the others, when these are to be used.
- Give examples for your arguments if you can

## C. دستورات برنامه نویسی:

دستورات برنامه نویسی به ۴ دسته تقسیم می شوند.

- Binary or Logic functions
- Numeric or Arithmetic functions
- Program control functions and
- Other statements

## توابع باینری و لاجیکی

توابع باینری مانند AND، OR و مشابه آن هستند. ورودیهای این توابع عموماً ورودیها I، خروجیها O و Flag هستند. خروجی تابع در تصویر خروجیها (اصلی و کمکی) جای می گیرد.

## توابع ریاضی و عددی

این توابع عملیات ریاضی مانند جمع، تفریق، ضرب و دیگران را انجام می دهند.

## توابع شرطی یا عملیات کنترلی

این توابع گذارها را چک می کنند. مانند cycle، jump و غیره

## آدرس دهی پرتها

سازندگان برای آدرس دهی پرتها از روشهای خاص خود استفاده می کنند. آنچه در PLC های زمینس استفاده می شود اختصاص یک بیت به هر ورودی یا خروجی است که آنها در دسته های هشت تایی قرار دارند. دسته های هشت تایی بایت نام دارند. برای مثال I4.2 به معنی ورودی در بیت ۲ بایت ۴ است. Q0.3 به معنی خروجی روی بیت ۳ بایت صفر است.

### ۱۰-۶ برنامه نویسی و شبیه سازی در محیط Siemens Logo!soft

محیط Logo!soft امکانات زیر را روی PC فراهم می آورد:

- Offline program generation: First you develop your applications at your desktop.
- Simulation of your circuit: You simulate the application in your computer and test whether or not it functions properly before the circuit is actually put to use
- Generation and printing of a block diagram
- Saving the program to the hard disk or other storage media
- Program transfer
  - from the LOGO! to the PC
  - From the PC to LOGO!
- Reading the operating hours counter
- Setting the TOD
- Summertime/Wintertime conversion

[http://www.ad.siemens.de/logo/html\\_00/softcomfort.htm](http://www.ad.siemens.de/logo/html_00/softcomfort.htm)

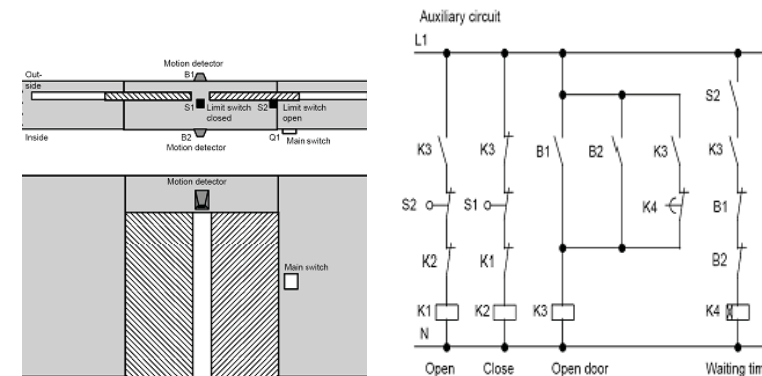
در سایت شرکت زیمنس و demo برنامه، مثالهای حل شده زیادی را می بینید که بعضی از آنها عبارتند از:

- Staircase or corridor lighting system
- Automatic door
- Ventilation system
- Rainwater pump

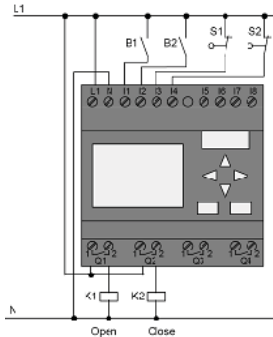
<http://www.ad.siemens.de/logo>

### مثال درب خودکار

این درب وقتی کسی به آن نزدیک شود باز و تا زمانیکه محل درب تخلیه نشده است باز می ماند. وقتی محل درب تخلیه شد بعد از مدت کوتاهی بسته می شود. درب با موتور کنترل می شود و دارای slip coupling است که کسی یا چیزی که بین آن قرار گرفته است را فشار ندهد. کنترل درب به master switch وصل است. طرح پیاده سازی RLL قدیمی در شکل نشان داده شده است.

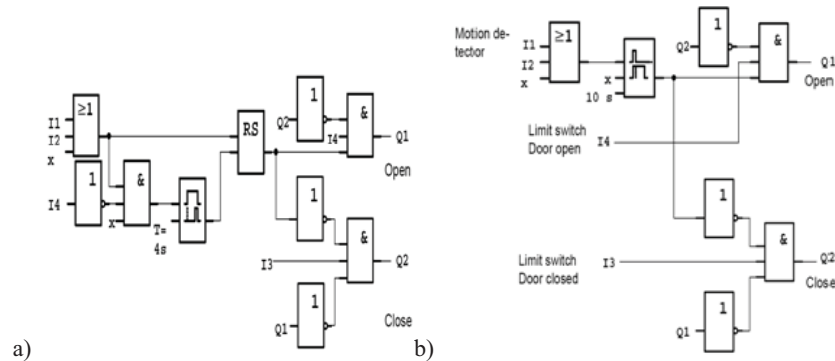


وقتی کسی به محدوده سنسورهای تشخیص حرکت motion sensor B1 یا B2 برسد، درب با K3 باز می شود. مدتی بعد از اینکه فرد از محدوده دید ۲ سنسور خارج شد، درب بسته می شود. این طرح با PLC، مطابق شکل زیر بسته می شود. اجزا سیستم از اینقرارند:



- K1 Main contactor Open
- K2 Main contactor Close
- S1 (n.c. contact) Limit switch Closed
- S2 (n.c. contact) Limit switch Open
- B1 (n.o. contact) Infrared motion detector outdoor
- B2 (n.o. contact) Infrared motion detector indoor

FBD طرح قدیمی مطابق شکل (a) است که می توان از بلوکهای LOGO در طرح استفاده کرد. شکل (b)



### پاسخ سوالات

**S1.1** A. کدامیک از سنسورهای زیر پیوسته و کدام گسسته هستند؟

a) thermostat : Discrete b) clinical thermometer : Continuous c) the infrared sensor in TV sets : Discrete

B. کدامیک از محرکهای زیر پیوسته و کدام گسسته هستند؟

A) the trigger of a gun: Discrete b) the steering wheel of the car: Continuous c) a step motor: May be considered Discrete or Continuous depending on the mode it is used. If it is used in the incremental mode it may be thought to be discrete (clockwise/anticlockwise). If it is used in the slewing mode, it may be considered continuous

**S1.2** A. مثالی برای کنترل ترتیبی بزنید

**Ans:** The example of a die press, However, try to give your own example.

B. In the context of your example show typical objectives in Logic Control

Otherwise the indicating light is switched off. The function "lamp test" can be carried out with the signal "plant in operation". At signal status "1" of this signal the indicating light is either permanently on or is flashing.

**Hints:** The total logic control is primarily made up of 4 elements

- \_ Scan, if at least two fans are running.
- \_ Scan, if no fan is running
- \_ Scan, if only one fan is running
- \_ Summary of all three scans and logic control with the signal "plant in operation"

**S3. 2 A.** Can we use corresponding switches, instead for the Auto, Stop and Reset PBs?

**Ans:** The only difference between PBs and switches is that a PB is assumed to be released automatically, while the switch is not. However, since the transition logic does not remain on for more than one scan cycle, in this case, it does not make a difference whether these are PBs or switches.

B. For the limit switches, and the part detect sensor, would you prefer mechanical switches over photo switches for this application? Justify.

**Ans:** Mechanical switches would be preferred here, since these are much more rugged.

Turning these on and off does not cause any problem for the ram which is hydraulically powered.

C. Propose at least one more each of sensors, indicators and actuators for the above application and mention their benefits.

**Ans:** A hydraulic pressure sensor may be used for sensing the pump pressure before turning the machine into auto mode. This would be useful, particularly if the machine is run in auto mode for long intervals with robotic material handling equipment for part placement and removal. A fault indicator is also useful to indicate any deviation from normal cyclic operation. In this example, the electric power switch is always assumed to be on. One can add a contactor (actuator) to switch the power on, from state 1.

**S3. 3 A.** Note that in step F above it is important to detect that the part is removed. What would happen, if this is not detected?

**Ans:** The same part may be stamped many times, before it is removed.

B. What would happen if after Stop PB is pressed, Reset PB and Auto PB are pressed in that sequence, even if the piston has not been taken to the top position manually?

**Ans:** If reset PB is pressed the process would move to State 1. However, pressing the auto PB would not take it to State 2, since UP Limit switch would not be made. At this point the process would deadlock unless the piston is taken up manually. After it moves up, if the Auto PB is pressed, the machine would move to State 2.

### S 3.4

A. What would happen in the process controlled by the program shown in Fig. 20.2 if top/bottom Limit switch is stuck closed/open ?

**Ans:** If the top LS is stuck closed, the Down solenoid would not be would off even if the piston comes to the bottom position. The piston would push the part to be stamped, but would not go up as desired during normal operation. Similarly, if the bottom LS is stuck closed, the piston would never come to the bottom position, since, the moment it would come to state 3, it would exit to state 4 and thus the UP solenoid would be on. One can similarly argue for the stuck open case.

B. What would happen in the process controlled by the program shown in Fig. 20.2 if the hydraulic pump pressure becomes too low to move the RAM?

**Ans:** The Up solenoid would be switched on, but the piston would not move. Thus the system would be deadlocked in state 4.

B. Mention any one disadvantage of a formal modelling approach, if you can think of it.

**Ans:** The formal modelling may lead to more number of rungs in the RLL program compared to one that does not use it. Consequently the memory and execution time requirements would be higher. However, these are not significant drawbacks for present day PLC speed and memory sizes.

**Ans:** The following are valid control objectives for the die press example.

1. When MCS is off Up\_lamp should never be 1
  2. Every transition of the Up\_lamp signal from 0 to 1 should be immediately followed by a transition of Dn\_lamp from 0 to 1
  3. Up\_lamp and Dn\_lamp can never simultaneously be 1, although they can simultaneously be 0.
- Such statements are specifications in the sense that the logic controller must ensure that they are satisfied in the controlled system.

**S 1.3 A** از بین کنترل ترتیبی و پیوسته کدام ساده تر هستند؟

**Ans:** Analog Control is more complex than logic control. This is because of the fact that logic control models are captured by simple state transition systems containing only a few states. The state space of an analog control system is infinite. The dynamics can be far more complex than simple state transition systems. Factors such as disturbances must be considered, unlike in logic control

B. Can you cite an example system, which requires both Analog and Logic Control?

**Ans:** There are many examples. In a variable air volume air conditioning system, the cooling water temperature is controlled by on-off control of the chiller, while volume of air is controlled by analog speed control of the fan. In a CNC machine the speed of the spindle is controlled by analog means, while auxiliaries, such as coolant flow are controlled by PLCs.

**S1. 4 A** ۳ تا از مزیت‌های PLC بر تابلوهای رله‌ای را بنویسید.

**Ans:** 1. Programmability 2. Ability to incorporate complex control 3. Expandability, among many others.

B. Can you name a single disadvantage in any situation?

**Ans:** For very simple and small systems such as power distribution control a relay based control panel may be a cheaper solution.

C. Do you think the idea of developing programs that look like Relay Ladders is very efficient? If so, why? If not, why was it pursued?

**Ans:** It is not efficient. It was pursued, because when PLCs were developed Plant Engineers were more conversant with Relay Logic. So the language was introduced for ease of understanding of Plant Engineers.

**S 2.1 E,F** ۳ روش متفاوت اجرای برنامه کدام هستند؟ کدامیک عمومی تر هستند

**Ans:** Cyclic, Interrupt Driven and Clock Driven, The cyclic Mode is most common

G برای کاربرد هر یک مثالی بزنید.

**Ans:** The interrupt driven mode is to be used for those tasks that need an immediate response during any time of normal execution, but as such are sporadic. Clock driven modes are used for those tasks which have to precisely synchronized with time relative to some defined clocks.

H. Give examples for your arguments if you can

**Ans:** Emergency Shutdown/Alarm Tasks are programmed using interrupt driven modes. Communication tasks to supervisory computers for say trend updates can be implemented with clock-driven tasks.

**S 2.2 A.** What is the basic difference between Input and Auxiliary Contacts?

**Ans:** Input contacts correspond to physical devices that can be asserted either by external agents or by the process itself for feedback. Auxiliary contacts are basically memory locations storing intermediate logical results and do not correspond to physical devices.

B. Design example of Fan monitor

**Ans:** In a controlled plant three fans are to be monitored. If at least two fans are running, the indicator light of the monitor is permanently switched on. The indicating lamp blinks slowly if only one fan is running (with 0.5 Hz) and rapidly (with 2 Hz) if no fan at all is on. the monitor is only active when the signal "plant in operation" signal status "1" is activated.

### 5.0 S A. ۳ تا اجزا مهم سخت افزاری PLC را نام ببرید؟

**Ans:** CPU, I/O Modules, Communication Processor

B. What is the need for special purpose I/O modules? Explain with an example

**Ans:** Some i/o operations like high speed counting of shaft encoder pulses to measure speed is very computationally intensive. Therefore to free the CPU from this load, so that other control logics can be computed, special i/o modules with dedicated processors for the task are used.

C. What is a communication Processor?

**Ans:** It is a special processor that handles all communication related tasks with other supervisory systems.

**S 5.1 A.** What is remote i/o? How is it different from the other kinds of i/o?

**Ans:** Local i/o, as contrasted with remote i/o is where the field terminals of the PLC i/o modules are connected directly to the field devices. Each channel carries data that is not multiplexed. On the other hand for remote i/o, multiplexed data for several field channels is sent in multiplexed form to a remote i/o device that demultiplexes and transmits data for each field device to it, with or without data conversion and signal conditioning. Local i/o may be analog or digital. Remote i/o is always digital. Remote i/o is used to mainly to save on cabling of individual data channels from the device to the PLC rack.

B. What are the functions of the blocks named MMI and Programmer?

**Ans:** MMI is an acronym for Man Machine Interface. Generally PLC modules do not have facilities for visualization. However, if needed, one can connect a special MMI device like a printer and visualization of process outputs and their transitions. Similarly, a programmer is another device which facilitates easy development, debugging and monitoring of programs through graphical interfaces. The developed programs can be compiled and downloaded into the PLC memory. Programmers are available in table-top PC based as well as handheld versions.

**S5. 2 A.** Name one application each for which a mini PLC may be appropriate. Provide justifications for your choice.

**Ans:** A typical example would be a CNC machining Centre. Typical i/o requirements for such a centre would be less than 100 channels. The number of channels are going to be more or less fixed. Communication, visualisation and programming requirements are non trivial but not extensive either. Therefore, neither a full PLC rack, nor a compact PLC is suitable.

B. Why is a special bus extender unit is needed for extending the bus over long distances?

**Ans:** That is because for long distances, the capacitive loading of connecting cables increases significantly. A much higher value of capacitance therefore needs to be charged and discharged at a high rate, without causing signal voltage degradations. This requires much higher current driving capability and thus necessitates a separate driver module.

**S5. 3 A.** Why so many types of analog inputs have been provided for?

**Ans:** So that the user need not face the trouble of signal conditioning for most of the common sensing devices, such as those providing voltage or current outputs, resistance sensors, thermocouples. These can be easily interfaced with the input modules directly.

B. How to select between integrating and successive approximation converters

**Ans:** For integrating ADCs conversion is the slowest with conversion times in the range of several milliseconds but can be very accurate. Successive approximation types are a thousand times faster, are now available with good accuracies and therefore are suited to most applications and are popular too.

C. What is the significance of the input ranges for digital input modules?

**Ans:** The wide input voltage ranges and the wide separation of the ranges for 0 and 1 signal levels has been designed to ensure reliable data transmission in possibly very noisy industrial environments. Obviously power levels for signals drivers have to be very high to maintain these levels but is not a concern here.

C. Mention any one advantage of a formal modelling approach, apart from the reduced risk of programming errors.

**Ans:** It is much easier to modify an RLL developed following the formal method.

### S3. 5

A. What would happen if the order of the transition, state and output logic blocks is changed in an RLL program?

**Ans:** If the transition block is not put first, there would be an unnecessary delay of one scan cycle in turning on the state. If the output block is put before the state logic there would be a similar delay.

### S 4.1

A. Name one programming task for which, IL would be your chosen language.

**Ans:** Consider a triple redundancy voting logic for 3 digital sensor inputs, for tolerance against sensor failures. The logic aims to select the three desired bits corresponding to the sensors from an input word. Then it evaluates a Boolean function that implements the voting logic (the exact Boolean logic for voting is left to the learner as an exercise). Note that all the above involve bit-operations on binary data types and are therefore easily and efficiently implemented using assembly like low-level languages. Hence the preference for IL.

B. Name one programming task for which, ST would be your preferred language over FBD.

**Ans:** Consider implementing a custom fuzzy-logic based PID controller. Since the controller involves logic and arithmetic based on real-valued data, RLLs are clearly not suited. Neither is IL, since the computations are complex and algorithmic in nature and based on real-valued data. Thus ST is the best suited for implementation of this algorithm

C. For whom are code reusability and library support important, and why?

**Ans:** These are very important for developers of control algorithms. This is because a proven library of routines of routines not only lead to faster development of control programs, they also lead to a better quality program in terms of a cleaner and more readable and reliable code.

### S 4.2 A اختلاف بین FSM و SFC در چیست؟

**Ans:** A step of an SFC denotes a computation module which gets executed cyclically, as long as the step is active. A state of an FSM is an instantiation of the values of its state variables. Note that a step in the SFC can represent a possibly cyclic subgraph of an FSM through which the FSM moves during the time the step is active. In the simplest case, a step of an SFC represents one state of an FSM.

B. Why action logic is separately indicated from step logic, although both occur in the same step?

**Ans:** The computation within a step can be of two types, namely, those that update internal state variables other than outputs and those that update the outputs which are exercised on physical outputs. The second type of computation is named action logic and explicitly indicated at the steps. Since the physical outputs are of final importance, these are separately indicated for each step.

C. How is the computation for step logic different from that of transition logic?

**Ans:** Systems are supposed to spend time in the states. Transitions are instantaneous and merely indicate conditions under which systems change from one state to another. In an SFC, at any point of time, a number of steps and transitions are active. However, the computations of the steps can update output variables in the action logic while the computations in the transitions cannot.

**S 4.3A.** Identify whether the SFC segments indicated in Figs. 21.13-21.15 are valid. If not, justify your answer.

**Ans:** a. The SFC in Fig. 21.13 is invalid because a backward jump connects the two states S3 and S1 without an intervening transition. This is illegal. Any two steps in an SFC must contain an intermediate transition.

b. The SFC in Fig. 21.14 is invalid because there is a jump into one of the branches of a simultaneous sequence. This is illegal, since the steps in the other branches of the simultaneous sequence are indeterminate.

c. The SFC in Fig. 21.15 is valid.



**S 5.4 A.** Determine the significance of the following specifications for an analog output module:

a. Load resistance b. Linearity c. Conversion time

**Ans:** The significance of the specifications are described below.

Load Resistance: Decides the current drive capacity that needs to be provided on the output module

Linearity: Basically works like an accuracy specification between the digital value and the analog field level output.

Conversion time: Added to the control computation time, decides the lower bound on sampling time that can be used for control.

**B.** Determine the significance of the following specifications for a digital output module: a. Max. switching frequency b. Short circuit protection

Maximum switching frequency: Decides the speed of the control application. However, for inductive loads, the switching frequency depends on the power sourcing and sinking capabilities provided on the module.

Short circuit protection: Since the load being driven may be shorted, this feature is essential to protect the module from damage.

**S 5.5 A.** Name two advantages and two disadvantages of using a function module for an automation application

**Ans:** First advantage is that the main processor computational burden is reduced significantly. For example, for a control function, that main processor only has to supply the set point and not compute the control input every sampling time. The second advantage is that the application program developer does not need to be concerned with the fine details of a control algorithm for a specific application such as a precision positioning. One of the disadvantages is the additional cost of such a module. The second disadvantage may be that the functional module may prove to be a constraint if one is interested in using a different control algorithm for the application.

**E.** Based on the illustrative figures given for the counter module, determine the maximum possible timing interval that can be programmed on the counter module.

**Ans:** The maximum timing interval that can be programmed on counter, for the data of 5 cascaded 16 bit counters, is, the half clock period divided by  $2^{80}$ .

**F.** Describe the meaning of the various counting modes of a counter module

**Ans:** The meanings of the modes are described below.

Count mode binary or BCD coded: Refers to the code using which the count values propagate. Codes may be chosen depending on requirements of other software/hardware modules that interface to it.

Count once or cyclically: Refers to whether the counter should stop after reaching terminal count or would reload the initial count and restart counting.

Count on rising or falling edge: Refers to the edge that increments/decrements count value.

Count up or down : Self explanatory

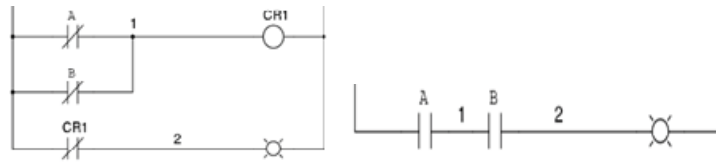
Counting of internal clock or external pulses: If the counter increments by internal clock, it becomes a timer. It would generate output after a fixed time interval which depends on the clock frequency and the number of bits in the counter. With external pulses it counts the number of pulse events in the field.

**G.** Consider a position control application. Describe the options for receiving feedbacks for the loop controller for this application

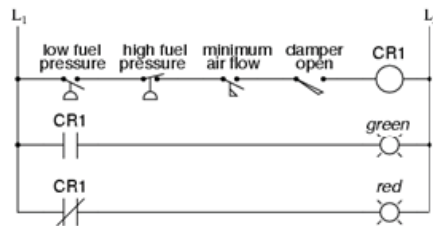
**Ans:** The options for feedback depend on the sensors used in the drive. If the position sensor used is analog, like a resolver, a potentiometer or an LVDT, then an analog input channel has to be used. On the other hand, if the sensor used is a shaft angle encoder, then either a digital input channel is to be used, in which case, the pulse counting has to be done by the module. Else the encoder channel can be interfaced to a counter function module and the count value read from it via the bus. Similar arguments apply for the speed feedback input, if any.

## مسائل

۱. سوالات فصل ۷ را مرور کنید.
۲. چرا دستگاهها به جای تحریک مستقیم از طریق رله کنترل می شوند
۳. RLL های زیر چه تابع منطقی را نشان میدهند. تفاوت این دو در چیست. در این نمودارها ورودی، خروجی و Flag را مشخص کنید.



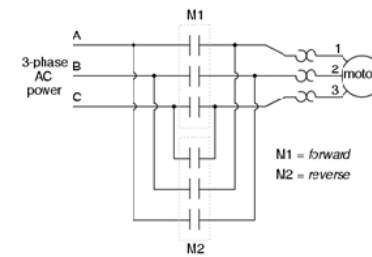
۴. تابع زیر را با فرمول منطقی بنویسید



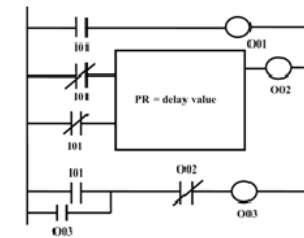
Green light = conditions met: safe to start

Red light = conditions not met: unsafe to start

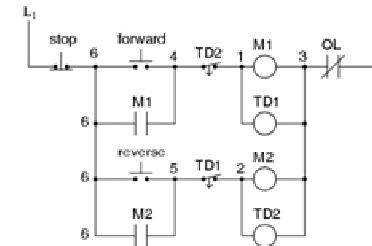
۵. مزایای سیستم PLC را بنویسید و ۵ روش استاندارد برنامه نویسی PLC را توضیح مختصر دهید.
۶. یک اسیلاتور را با RLL بسازید
۷. طرح RLL چراغ راهنما را پیاده کنید که چراغ سبز ۶۰ ثانیه روشن و ۶۰ ثانیه خاموش است. بعد از خاموش شدن چراغ سبز، چراغ زرد به مدت ۱۰ ثانیه روشن است و سپس چراغ قرمز ۵۰ ثانیه روشن می ماند. این سیکل سپس تکرار می گردد.
۸. در کار یک موتور کلید فشاری برای توقف، حرکت به جلو و حرکت معکوس تعبیه شده است. دیاگرام نردبان رله ای RLL آنرا رسم کنید. ضمناً رله خود کار overload protection نیز در مدار قرار دهید. در طراحی خود گام ضروریات طرح را بنویسید و RLL آن را رسم کنید.



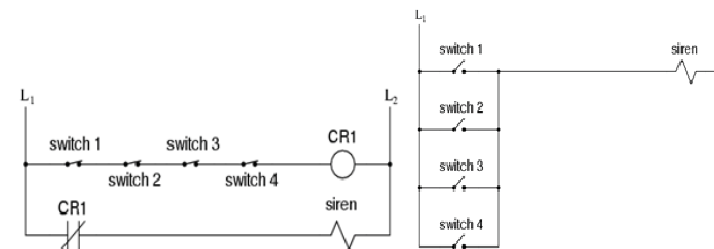
۹. نمودار سیگنال خروجی RLL زیر O03 بعد از فشردن I001 را توضیح دهید.



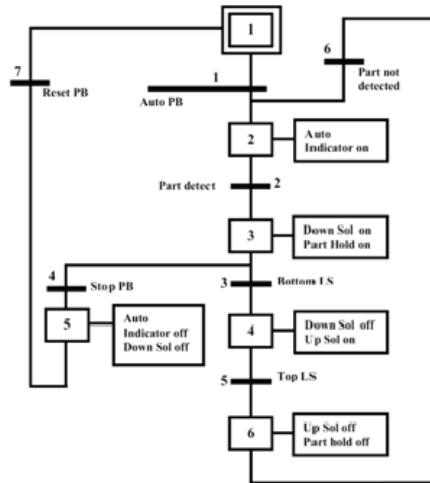
۱۰. در مدار RLL زیر چگونه می توان از forward به inverse رفت. رله های زمانی NC با off delay هستند.



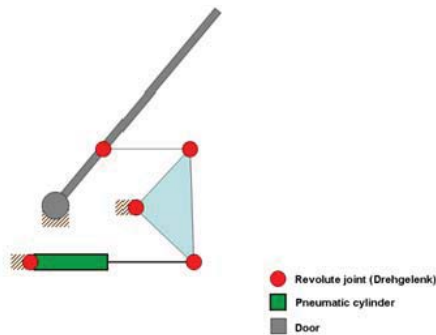
۱۱. آژیر در نزدیکی رله قرار ارد و سوپچها با سیم به آنها وصل می شوند. قابلیت اطمینان کار کدام یک از دو مدار بیشتر است؟ چرا؟



۱۲. برای نمودار SFC شکل نمودار نردبانی رسم کنید.



۱۳. برای کنترل سیستم درب باز کن زیر شکل SFC و FBD بکشید. سپس FBD را در محیط سیمولاتور PLC زیمنس پیاده سازی کرده شبکه نردبانی نظیر آنرا بدست آورید. (راهنمایی: نرم افزار زیمنس خود مثالی مشابه این مسئله دارد)



Symbol	Address	Data type	Comment
do_door_close	A 0.0	BOOL	Set pneumatic cylinder to basic position
do_door_open	A 0.1	BOOL	Set pneumatic cylinder to work position
di_pers_left	E 0.0	BOOL	Detect person left
di_pers_right	E 0.1	BOOL	Detect person right
di_door_closed	E 0.2	BOOL	Limit switch for closed door
di_door_open	E 0.3	BOOL	Limit switch for opened door

I/O-list



## اجزا غیر الکتریکی سیستم کنترل

اجزا غیر الکتریکی سیستمهای کنترل، اجزا بادی و هیدرولیکی هستند.

## ۱-۷ اجزای بادی

کنترلرهای اولیه از نوع بادی بودند. با اختراع المانهای الکترونیکی، آهسته آهسته از اهمیت سیستمهای بادی کاسته و مدارهای الکترونیکی جای آنها را گرفتند. معذالک هنوز تعدادی از اجزا بادی مورد استفاده قرار می گیرند. مزیت سیستمهای بادی از اینقرار است:

- ایمن هستند و در محلهای خطرآفرین (قابل اشتعال) می توان استفاده کرد
  - نسبت به سیستم هیدرولیکی ارزانتر هستند
  - نسبت نیرو به وزن در محرکهای بادی نسبت به الکتریکی بالاتر است
- کندی رفتار عیب آنها نسبت به سیستمهای رقیب است.

## ۱-۱-۷ تقویت کننده بادی

در سیستم های بادی، فشار باد را پمپ به مقدار حدود 20psi تولید می کند. سیگنال باد در این سیستمها فشار بین 3-5psi دارد. اجزا سیستم تقویت کننده بادی که در شکل ۲ نشان داده شده است از اینقرار هستند:

۱- گلوگاه که در یک طرف حفره و در مسیر باد با فشار 20psi قرار دارد.

۲- نازل در طرف دیگر حفره قرار دارد و در مقابل آن فلپری نصب شده است.

نحوه کار تقویت کننده از این قرار است که وقتی فلپر به نازل نزدیک شود فشار داخل حفره افزایش یافته و به 20psi می رسد و با دور شدن فلپر از نازل، فشار داخل حفره به فشار جو کاهش می یابد. شکل ۲ رابطه بین فاصله فلپر تا نازل نسبت به فشار داخل حفره را نشان می دهد. در این سیستم "ورودی" موقعیت فلپر و "خروجی" فشار داخل حفره است. قطر گلوگاه حدود 0.25mm و قطر نازل 0.6mm است. در صورت 2.5µm جابجایی در فاصله فلپر از نازل x، فشار 1psi تغییر می کند. رابطه بین x و p<sub>0</sub> در محدوده 3-15psi تقریباً خطی است.

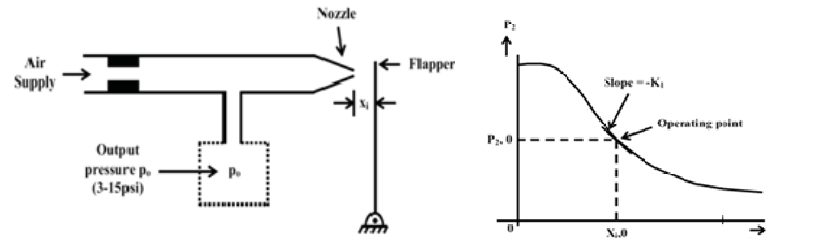


Fig. 1 Flapper nozzle amplifier

Fig. 2 Characteristics of a flapper nozzle amplifier.

## تئوری کار

برای سهولت از تراکم پذیری هوا در اینجا صرف نظر می شود.

۱) گلوگاه: فرمول غیر خطی دبی عبوری از گلوگاه بر اساس قانون برنولی برابر است با:

$$Q_s = \alpha_r \sqrt{P_s - P_0}$$

که در آن  $\alpha_r$  ثابت و به مشخصات گلوگاه از جمله سطح مقطع آن بستگی دارد.  $P_s$  فشار پمپ و  $p_0$  فشار داخل حفره است.

۲) نازل: طبق همان قاعده دبی عبوری از نازل برابر است با

$$Q_s = \alpha_n x_i \sqrt{P_0 - P_{amb}}$$

که در آن نازل استوانه ای با قطر  $d_n$  و عمق  $x_i$  و  $\alpha_n$  ضریب ثابت مشخصه نازل است. فشار هوا در خارج نازل فشار جو است. در حالت تعادل دبی ورودی از گلوگاه با دبی خروجی از نازل برابر است در نتیجه:

$$Q_s = Q_n \Rightarrow \alpha_n x_i \sqrt{P_0 - P_{amb}} = \alpha_r \sqrt{P_s - P_0}$$

با در نظر گرفتن  $P_{amb}=0$  می توان نوشت

$$\frac{P_0}{P_s} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha_n}{\alpha_r} x_i\right)^2} \approx -K x_i$$

شکل ۲ این رابطه را نشان می دهد. برای داشتن حساسیت خوب، محدوده بین 3-20psi که شیب منحنی زیاد است مورد استفاده قرار می گیرد.

## ۲-۱-۷ رله بادی Air Relay

تقویت کننده فلپر-نازل توان انجام کار را ندارد (مانند opamp در سیستمهای الکترونیکی). بنابر این باید آنرا به تقویت کننده توان تبدیل کرد. برای این منظور رله بادی به طرح اضافه می شود. شکل ۳ ساختار جدید را نشان می دهد. نیروی وارد بر ساقه در حالت تعادل برابر است با

$$F = p_2 A - k y = \frac{P_s}{1 + \left(\frac{\alpha_n}{\alpha_r} x_i\right)^2} A - k y$$

جابجایی فلپر موجب تغییر فشار  $p_2$  و متعاقباً حرکت دیافراگم و ساقه متصل به آن می شود. این شیر دارای دو تویی است. وقتی  $p_2$  زیاد شود شیر باز شده و فشار منبع مستقیماً (بدون گلوگاه) به خروجی راه می یابد. با کاهش فشار، مسیر فوقانی بسته و مسیر تحتانی (فشار جو) به خروجی وصل می گردد. بهره این تقویت کننده زیاد است.

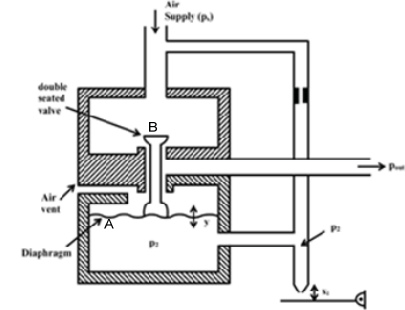


Fig. 3 Schematic diagram of an air relay

۳-۱-۷ کنترلر متناسب بادی (ورودی مکانیکی - خروجی بادی)

مقدار بهره تقویت کننده فلپر-نازل به عوامل ناخواسته ای مانند تغییر فشار منبع وابسته است. برای داشتن تقویت کننده ای با بهره تثبیت شده از فیدبک (مشابه آنچه در تقویت کننده های الکترونیکی اعمال می شود) استفاده می شود. شکل ۱ این کنترلر را نشان می دهد که در آن تقویت کننده فیدبک دار بادی به همراه دم (dam) ها و فنر وجود دارد. این سیستم فشار خروجی  $p_o$  متناسب با  $e$  تولید می کند. در این سیستم فشار بالا نیست تا هوا را بتوان تراکم ناپذیر در نظر گرفت. اجزا بلوک دیاگرام عبارتند از:

۱-میله: میله تحت تاثیر ۲ جابجایی از طرف  $e$  و از طرف  $z$  قرار می گیرد. در نتیجه مقدار  $x$  برابر با:

$$x = \frac{\beta}{\alpha + \beta} e - \frac{\alpha}{\alpha + \beta} z$$

۲-تقویت کننده بادی: خطی شده رابطه بین  $P_2$  و  $x$  برابر است با:

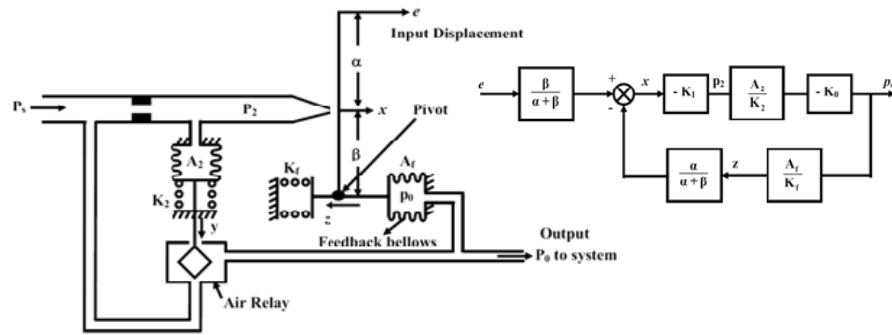


Fig. 1 A pneumatic proportional controller

$$p_2 = \frac{\partial P_{2,o}}{\partial X_{i,o}} x = -K_1 x$$

۳- دم ۱ فنر دار:  $p_2$  به دم می اعمال می گردد که فنری به آن متصل است. در نتیجه

$$K_2 y = p_2 A_2; \text{ or, } y = \frac{A_2}{K_2} p_2$$

۴-دم ۲ فنر دار: رابطه بین فشار  $p_0$  و فنر که به دم ۲ متصل است از این قرار است:

$$K_f z = p_0 A_f; \text{ or, } z = \frac{A_f}{K_f} p_0.$$

در نتیجه بلوک دیاگرام شکل بدست می آید که اگر  $k_1$  بزرگ در نظر گرفته شود، تابع تبدیل حلقه بسته

$$\frac{p_o}{e} \approx \frac{\beta K_f}{\alpha A_f}$$

بدست می آید. بهره این تقویت کننده به عواملی که دارای ترانس هستند بستگی ندارد، لذا بهره قابل تنظیم تثبیت شده ای می دهد. بهره با تنظیم  $\alpha$  و  $\beta$  تغییر می کند.

۴-۱-۷ تقویت کننده بادی (ورودی بادی - خروجی بادی)

شکل ۴ این سیستم تقویت کننده بادی را نشان می دهد. سیستم دارای دو دم (محفظه هوا) است. فشار کم توان ورودی به دم اول  $p_i$  اعمال می شود. دم دوم توسط فشار پرتوان  $p_0$  تحریک می گردد. سیستم همچنین دارای فنری است که برای تنظیم صفر استفاده می گردد یعنی مثلاً به ازای  $p_i=0$  مقدار  $p_0=3\text{psi}$  شود. رابطه تعادل بین دو دم اینگونه است.

$$T_A = P_i A_{B1} a + F_0 b = T_C = p_0 A_{B2} b$$

در این رابطه  $A$  ها سطح مقطع دم ها و  $a$  و  $b$  بازوی مربوط به هریک از دم هاست. در نتیجه

$$p_0 = \frac{A_{B1} a}{A_{B2} b} p_i + \frac{F_0}{A_{B2}} \quad (6)$$

بدست می آید. در این رابطه بهره به نسبت بین سطح مقطعها و بازوها، که ثابت هستند، وابسته است.

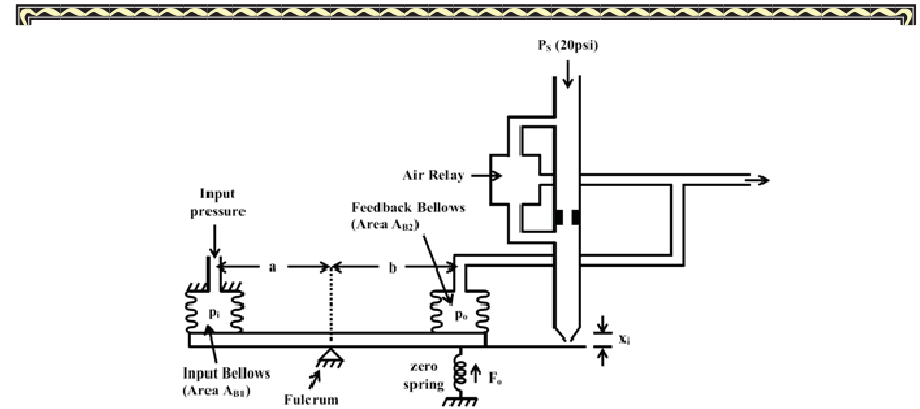


Fig. 4 Flapper nozzle amplifier with feedback.

نحوه کار از این قرار است که وقتی  $p_i$  افزایش یابد، نیروی اعمالی به میله موجب کم شدن  $x_i$  می گردد. متعاقباً این امر افزایش فشار داخل رله  $p_o$  را به همراه دارد. افزایش  $p_o$  نیرویی با جهت مخالف به میله وارد می کند تا  $x_i$  زیاد شده و فشار  $p_o$  کاهش یابد. این تعامل به نقطه تعادلی می رسد که رابطه (۶) آنرا تعیین می کند.

### ۷-۱-۵ کنترلر PD بادی

با اضافه کردن گلوگاه در مسیر باد ورودی به دم، کنترلر PD مطابق شکل بدست می آید. عناصر این سیستم و روابط هر یک از این قرار است.

**گلوگاه:** خطی شده دبی گاز عبوری از گلوگاه برابر است با.

$$Q = G(P_o, P_f) \Rightarrow q = \frac{P_o - P_f}{R_1}$$

**دم فنردار:** خطی شده فشار داخل دم در درجه حرارت ثابت برابر است با

$$\begin{aligned} M &= \text{Mass of the gas inside the bellows} \\ V_f &= \text{Volume of the gas inside the bellows} \\ T_f &= \text{Temperature of the gas (constant)} \end{aligned} \quad p_f = \frac{MRT_f}{V_f} \Rightarrow p_f = C_3 m - C_4 v_f$$

است. تغییر حجم و اثر مقاومت فنر برابند با

$$v_f = A_f z \quad K_f z = p_f A_f,$$

در نتیجه بدست می آید.

$$C_3 m = \frac{K_f}{A_f} z + C_4 A_f z \Rightarrow m = Cz$$

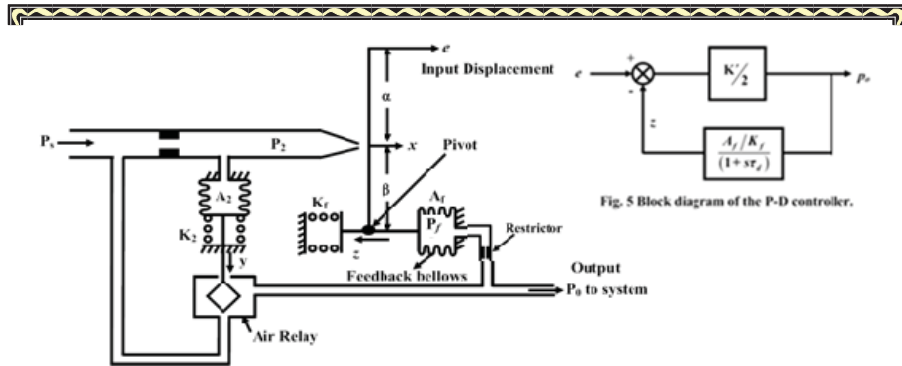


Fig. 5 Block diagram of the P-D controller.

حال رابطه بین  $z$  و فشار  $p_o$  با در نظر گرفتن مقاومت گلوگاه به این ترتیب بدست می آید.

$$q = \dot{m} = Cz = \frac{p_o - p_f}{R} = \frac{p_o - \frac{K_f}{A_f} z}{R} \Rightarrow$$

$$\frac{z(s)}{p_o(s)} = \frac{1}{RCS + \frac{K_f}{A_f}} = \frac{\frac{A_f}{K_f}}{RC \frac{A_f}{K_f} S + 1} = \frac{\frac{A_f}{K_f}}{\tau_d s + 1}$$

اگر  $\alpha = \beta$  فرض شود بلوک دیاگرام ساده شکل زیر بدست می آید. اگر بهره تقویت کننده  $K'$  بزرگ در نظر گرفته شود، تابع تبدیل PD است.

$$\frac{p_o(s)}{e} \approx \frac{K_f}{A_f} (1 + \tau_d s)$$

### ۷-۱-۶ کنترلر PI بادی

کنترلر PI با اضافه کردن گلوگاه به دم سمت چپی مانند شکل بدست می آید. روابطی که برای این سیستم می توان نوشت از اینقرار است.

گلوگاه: رابطه خطی شده گلوگاه عبارت است از

$$q = \frac{P_o - P_1}{R_1}$$

**دم فنردار:** رابطه دم مانند کنترلر PD اینگونه نوشته می شود.

$$\begin{aligned} p_1 &= C_3 m - C_4 v_1 \\ v_1 &= -A_f z \\ (p_o - p_1) A_f &= k_f z \end{aligned} \quad m = \frac{1}{C_3} \left[ p_o - \frac{K_f}{A_f} z - C_4 A_f z \right] = C_p p_o - Cz$$

ارتباط بین دبی ورودی و  $z$  را برای دمی که گلوگاه در مسیر آن قرار دارد را اینگونه می نویسیم.

$$q = \dot{m} = C_p \dot{p}_o - Cz$$



نتیجه پیستون بالا رفته و به تبع آن ساقه شیر پیلوت را نیز بالا می کشد. در حالت ماندگار ساقه شیر اصلی در موقعیتی قرار می گیرد که بین نیروی فنری به اضافه فشار ورودی پیلوت به شیر با فشاری که سیلندر اصلی وارد می کند برابر شود. ارتباط بین موقعیت ساقه شیر اصلی و فشار ورودی به شیر پیلوت تقریباً خطی است.

### ۲-۲-۷ مبدل الکتریکی-بادی

این مبدلها سیگنال الکتریکی را به بادی تبدیل می کنند. خروجی کنترلرها الکتریکی هستند در حالیکه محرکها ممکن است بادی باشند. برای برقراری ارتباط از این وسیله استفاده می شود. ورودی اغلب جریان 4-20mA است که به فشار باد 3-15psi بدل می شود. شکل ۵ این وسیله را نشان می دهد. ساختمان آن مشابه تقویت کننده بادی است با این تفاوت که ورودی به جای باد سیگنال الکتریکی است. عبور جریان از سیم پیچ موجب می شود بین هسته آن و آهنربای دائم نیروی دافعه بوجود آمده و سر سمت چپ میله به طرف بالا رانده می شود. سیستم بادی به این تغییر واکنش نشان داده و با افزایش فشار  $P_0$  به مقابله با نیروی اعمالی عمل می کند. این تعامل در نقطه تعادل تثبیت می شود. هر چه جریان بیشتر باشد فشار خروجی بیشتر است.

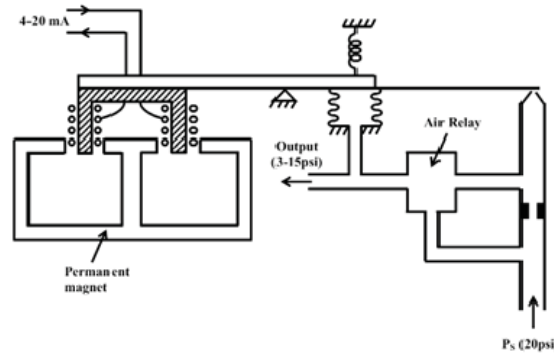


Fig. 5 Electro-pneumatic Signal Converter

### ۳-۲-۷ دسته بندی شیرها

۱- عادی باز و عادی بسته: شیرها در نتیجه اعمال دستور ممکن است باز یا بسته شوند (شکل ۲). نوع شیری که استفاده می شود به ایمنی که باید تعبیه شود بستگی دارد. مثلاً در سیستم بخار، شیر تامین کننده سوخت در صورت وجود ایراد ارتباطی باید بسته شود. ولی در یک سیستم خنک کننده، در صورت وجود ایراد ارتباطی شیر باید کاملاً باز بماند.

۲- تعداد توپی ها: شیرها ممکن است دارای یک یا دو توپی باشند شکل ۳.

شیر تک توپی: این شیرها می توانند کاملاً بسته و یا کاملاً باز شوند. به دلیل فشار به طرف بالا ناشی از عبور مایع نیروی زیادی برای تثبیت وضعیت شیر لازم است. لذا این شیرها در دبی های کم استفاده می شوند.

## ۲-۷ محرکها

### ۱-۲-۷ شیر کنترل بادی

اعمال کنترل توسط محرکها صورت می گیرد. محرک مهم در فرایندهای شیمیایی و بسیاری از فرایندهای دیگر شیر کنترل است. این شیرها ممکن است با دستور الکتریکی، بادی یا هیدرولیکی کار کنند. در شیرهای بادی، فشار باد ساقه شیر را حرکت داده و شیر را باز یا بسته می کند. مقدار فشار 3-15psi است. این شیرها به دو دسته کنترل مستقیم و کنترل فیدبکی تقسیم می شوند.

**الف) شیر بادی با کنترل مستقیم:** شکل ۶ نمونه ای از این شیر را نشان می دهد.

با اعمال فشار باد بر دیافراگم، ساقه پایین رفته و شیر که در حالت عادی باز است بسته می شود. در نقطه تعادل رابطه زیر بین فشار و موقعیت ساقه برقرار است:

$$p_c A = K x$$

که در آن  $A$  سطح مقطع دیافراگم و  $K$  ثابت فنر است. مشکل بزرگ این شیر عبارت است از (۱) ارتباط غیر خطی بین فشار ورودی و جایابی ساقه، به دلیل تغییر سطح موثر دیافراگم و مشخصات فنر واقعی. (۲) اغماض از نیروی عمودی که سیال به ساقه وارد می کند و آنرا برای دبی های بزرگ نامناسب می نماید. بنابراین این شیرها برای دبی های کم و لوله های با سطح مقطع های کوچک استفاده می شود.

**ب) شیر بادی با کنترل فیدبکی:** این وسیله در شکل ۷ نشان داده شده است.

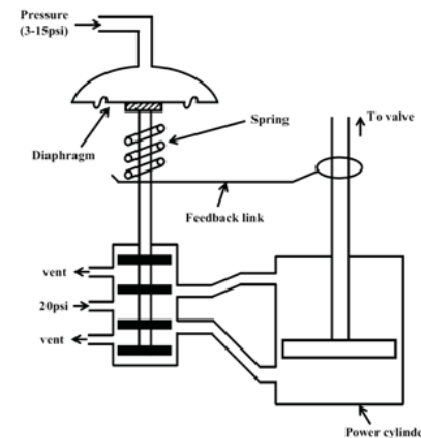


Fig. 7 Feedback type valve positioner

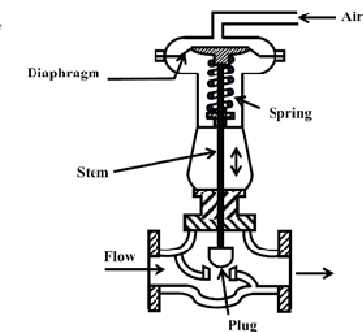


Fig. 6 Direct acting type valve positioner

با اعمال فشار باد به شیر پیلوت، ساقه آن حرکت کرده و مقدار و جهت باد به پیستون اصلی که شیر کنترلی به ساقه آن متصل است تغییر می کند. ساقه شیر پیلوت علاوه بر فشار باد ورودی، تحت تاثیر اتصال مکانیکی با ساقه شیر اصلی نیز هست. این اتصال نقش فیدبک منفی را بازی می کند. با افزایش فشار باد، ساقه شیر پیلوت به پایین می رود و در نتیجه حفره پایینی سیلندر اصلی به منبع فشار و حفره بالایی به مسیر تخلیه وصل می شود. در

a تابعی از موقعیت ساقه شیر Z است. وقتی فشار در دو طرف شیر ثابت است، مشخصه ذاتی شیر بدست می آید.

$$q = f(z)$$

این مشخصه به شکل توپی ها بستگی دارد. مشخصه نرمال شده شیر اینگونه نوشته می شود

$$m = f(x)$$

که در آن x و m برابرند با:

$$m = \frac{q}{q_{\max}} \quad \text{and} \quad x = \frac{z}{z_{\max}}$$

مشخصه دبی عبوری شیرها ممکن است

- (a) Quick opening
- (b) Linear
- (c) Equal Percentage.

باشد. این رفتارها در شکل ۴ نشان داده شده است، وقتی فشار در دو طرف شیر ثابت فرض شود.

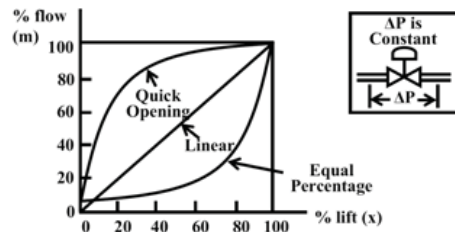


Fig. 4 Flow characteristics of control valves

توپی هایی که می توانند این رفتار را ایجاد کنند در شکل ۵ نشان داده شده اند.

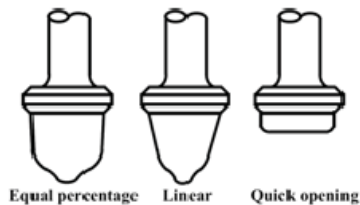


Fig. 5 Valve plug shapes for the three common flow characteristics.

در حالت خطی  $dm/dx=1$  و در حالت equal percentage، شیب مشخصه برابر دبی عبوری است.

$$\frac{dm}{dx} = \beta m$$

این نمودار وقتی محور افقی لگاریتمی است، خطی است. ضمناً در صفر نیز دبی صفر نیست.

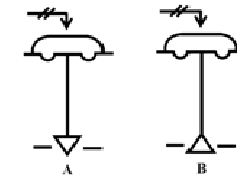
$$m = m_0 e^{\beta x}$$

### ۲-۷-۵ مشخصه شیر واقعی

در حالت واقعی علاوه بر مشخصات ذاتی شیر عوامل دیگری نیز در رفتار شیر تاثیر دارند که در مجموع رفتار موثر شیر را می سازند. در شکل ۶ بین دو مخزن با ارتفاع ثابت، لوله ای به طول L قرار دارد. لوله موجب افت فشار

شیر دو توپی: به دلیلی تفرانس ساخت، این شیرها نمی توانند کاملاً بسته شوند ولی نیروی تثبیت وضعیت در آنها کم است. زیرا مایع در هر دو جهت بالا و پایین حرکت می کند و نیروی یکدیگر را خنثی می کنند.

۳- مشخصه دبی: شکل توپی نحوه وابستگی دبی به تغییر وضعیت ساقه را مشخصه می کند. به این مشخصه، مشخصه ذاتی inherent شیر می گویند. رفتار شیر به وضعیت آن در سیستم کلی مایع نیز بستگی دارد که به آن مشخصه موثر effective می گویند.



- Fail open or Air to close : A
- Fail closed or Air to open : B

Fig. 2 Air to open and Air to close valves

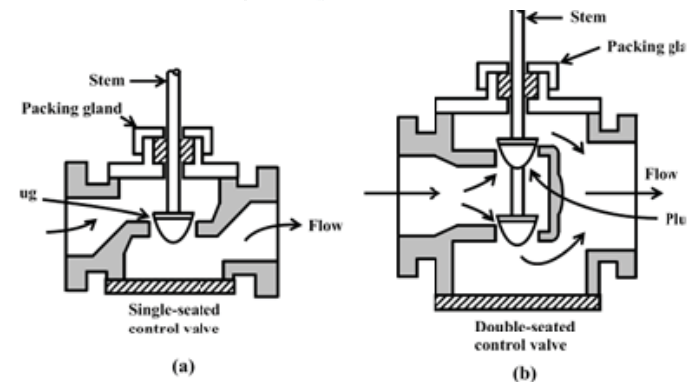


Fig. 3 Single-seated and double-seated valves

### ۲-۷-۴ مشخصه شیر ایده آل

شیر مانند گلوگاه orifice است که اندازه آنرا توپی plug شیر تعیین می کند. برگرفته از قانون برنولی، دبی عبوری از یک دهانه را می توان نوشت:

$$q = K_1 a \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

where  $q$  = flow rate in  $m^3/sec$ .

$K_1$  = flow coefficient

$a$  = area of the control valve opening in  $m^2$

$h_1$  = upstream static head of the fluid in m

$h_2$  = downstream static head of the fluid in m

$g$  = acceleration due to gravity in  $m/sec^2$ .

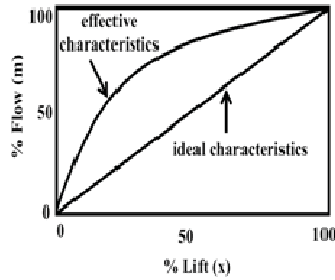


Fig. 8 Comparison of ideal and effective characteristics for a linear valve

می شود و مشخصه رفتاری موثر شیر را تغییر می دهد. فرض کنید مشخصه ذاتی شیر خطی باشد. مقدار دبی عبوری برابر است با:

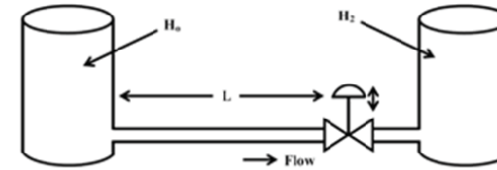


Fig. 6 Effect of friction loss in pipeline for a control valve

$$q = \left[ K \sqrt{2g(H_0 - H_2 - \Delta h_L)} \right] z$$

که در آن  $Z$  موقعیت ساقه شیر و  $\Delta h$  افت فشار ناشی از لوله است. مقدار افت فشار برابر است با:

$$\Delta h_L = F \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

که در آن  $F$  ضریب اصطکاک لوله،  $L$  طول لوله،  $D$  سطح مقطع آن و  $v$  سرعت عبور مایع است.

$$v = \frac{q}{\frac{\pi}{4} D^2}$$

با جایگزینی، رابطه جدید دبی بدست می آید.

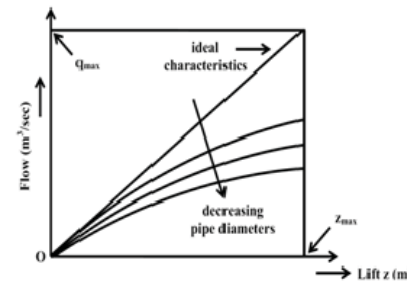


Fig. 7 Effect of pipeline diameter on the effective flow characteristics of the control valve

$$q = \left[ K \sqrt{\frac{2g(H_0 - H_2)}{1 + \alpha z^2}} \right] z \quad \alpha = \frac{16FLK^2}{\pi^2 D^5}$$

همچنانکه رابطه نشان می دهد، ارتباط دبی با  $Z$  دیگر خطی نیست. این ارتباط در شکل ۷ نشان داده شده است. نمودار رفتار  $q/q_{max}$  در شکل ۸ نشان داده شده است.



### ۳. شیر چرخان Rotary Valve

شیری است که با چرخاندن ساقه، ساقه عقب یا جلو می رود و مسیر عبور مایع را تغییر می دهد. این شیرها نقش شیر فرمانده را دارند که شیرهای دیگر را کنترل می کنند.

### ۴. شیر ماسوره ای Spool Type Valve

در این شیرها، ماسوره استوانه ای عقب-جلو می رود و میتواند در موقعیتهای محدود مشخصی توقف کند. در هر موقعیت شیر بین بعضی از مسیرهای ورودی و خروجی ارتباط می دهد.

### ۵. شیر دو راهه Two way valve

شکل شیر دو راهه را نشان می دهد.

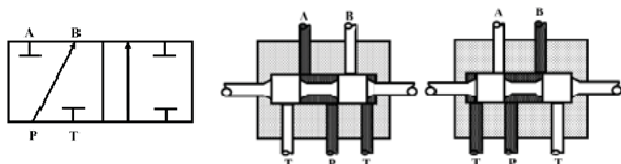


Fig. 27.4 a(left) symbol for a two way valve, a two way valve with the spool to the left, c(right) the right

این شیر در یک حالت، ورودی P را به B و در حالت دیگر به A راه می دهد شکل 27.4a. این شیر T بسته است و فقط باقیمانده مواد در شیر را به مخزن هدایت می کند. انتخاب وضعیت ممکن است دستی، هیدرولیکی، الکتریکی و غیره باشد. P نماینده پمپ، T نماینده مخزن روغن (برگشت) و A و B مسیرهای فرمان به سیستم هستند. در نمودار سمبولیک شیر دو حالت، وضعیت شیر دو بار رسم می شود که هر بار یک وضعیت عبور را نشان می دهد

### ۶. شیر ۴ راهه

نحوه راه دهی در شیرهای ۴ راهه در شکل نشان داده شده است.

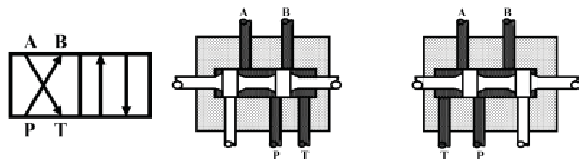


Fig. 27.5 a(left) symbol for a four way valve, a four way valve with the spool to the left, c(right) the right

این شیر، شیر ۲ حالت است. شیر ۳ حالت آن نیز وجود دارد که یک حالت خنثی نیز در نظر گرفته می شود.

### وضعیت خنثی

شکل 27.6 چند وضعیت ممکن برای حالت خنثی شیرهای ۴ راهه ۳ حالت را نشان می دهد. نحوه باز یا بسته بودن مسیره در هر یک از شکلها توضیح داده شده است. شیر ممکن است با فنر یا فشار روغن به حالت خنثی برود.

### ۷-۲-۶ شیرهای کنترل جهت direction control valves

شیرهای کنترلی به دو دسته تقسیم می شوند

۱. شیرهای تنظیم پیوسته مانند شیرهای سرو servo و شیرهای متناسب Proportional
۲. دسته ای از شیرها، شیرهای کنترل جهت عبور است. به این شیرها، شیرهای کنترل جهت می گویند. انواع این شیرها عبارتند از:

### ۱. شیر یکطرفه Check Valve

این شیر مشابه دیود یک طرفه است. در ساختمان این شیر، فنر و توپی مانند شکل 27.2 تعبیه شده است. عبور مایع از یکطرف مسدود و از طرف دیگر با فشردن فنر امکان پذیر است. شکل 27.1 سمبل این شیر را نشان می دهد.

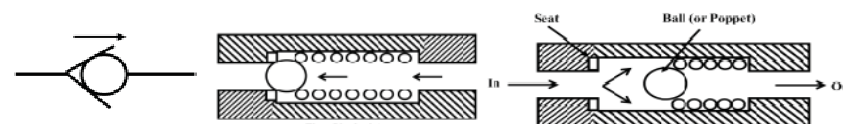


Fig. 27.2 A check valve (from left) 1) Symbol, 2) blocks flow in reverse direction, 3) permits flow in one direction.

### ۲. شیر یک طرفه پیلوتی Pilot – operated Check Valves

این شیر در شکل 27.3 نشان داده شده است. عملکرد شیر مانند شیر یک طرفه است با این تفاوت که عبور در جهت معکوس، اگر فرمان داده شود امکان پذیر است. فرمان بادی، پیلوت را تحریک و ساقه را به پایین می راند. در نتیجه امکان عبور مایع در جهت عکس پدید می آید.

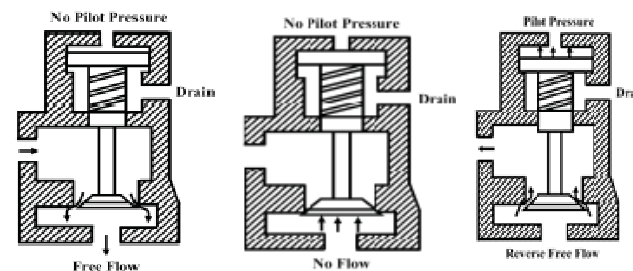


Fig 27.3 a(left) Unidirectional flow without pilot pressure, b(middle) Unidirectional flow without pilot pressure, c(right) Reverse flow with pilot pressure

### S 1.1

- A. Can you draw an inlet pressure flow characteristics of the ball type check valve?
- B. What should be the nature of the spring used in the check valves, hard or soft?

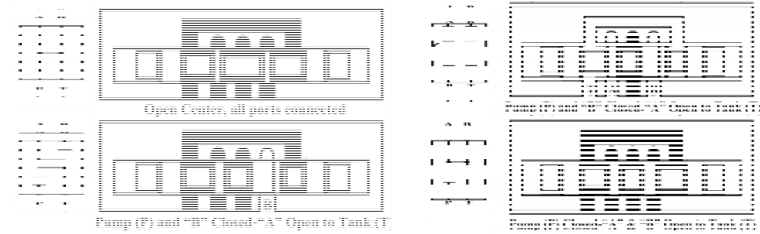


Fig. 27.6 Various center configurations and their symbols

**تحریک شیر**

شکل 27.7a سمبل یک شیر ۴ راهه ۳ حالت سلونوئیدی است که بصورت الکتریکی کنترل می شود. کنترل شیر می تواند مکانیکی، بادی و هیدرولیکی نیز باشد. شیرهای قدرتی، هیدرولیکی کنترل می شوند.

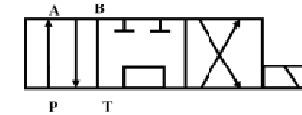


Fig. 27.7a A solenoid operated three-position four-way directional valve symbol

**S 1.2**

A. In Fig. 27.7a, what is the position of the valve when there is no pressure at both the pilot ports?  
 B. Is it possible to connect directional control valves in series and/or parallel? Can anything be achieved thereby? Are there conditions in which this is possible?

**۷. شیرهای اطمینان Relief Valve**

در صورت افزایش فشار به حد بالای مجاز شیر اطمینان باز می شود. شکل 27.8 ساختمان سبک شیر اطمینان و سمبل آنرا نشان می دهد. ساختمان یک شیر اطمینان ساده شامل فنر و توپی است. شیر اطمینان پیلوتی نیز وجود دارد که تنظیم فشار مجاز در آن به جای مکانیکی، از طریق پیلوت فرمان است.

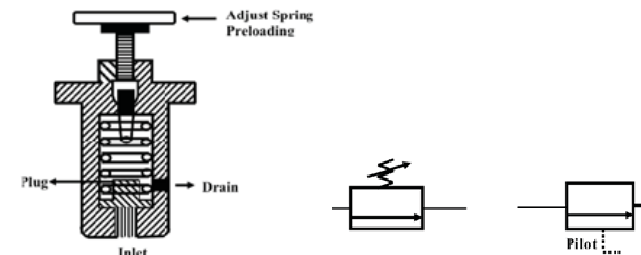


Fig. 27.8a Relief valve and Fig. 27.8b Relief valve symbols



**۷-۳ سیستمهای هیدرولیکی: اصول و اجزا**

محركه‌های هیدرولیکی در کاربرد هایی که سرعت و نیروی زیاد ضروری است استفاده می شوند.

**۷-۳-۱ اصول کار سیستمهای هیدرولیکی**

**۱. قانون پاسکال**

فشار اعمالی به هر نقطه مایع محدود شده، عینا به تمام نقاط منتقل شده و عمود بر سطح مخزن به آن اعمال می شود.

**۲. تقویت نیرو**

نیروی اعمالی بر سطح کوچک مایع محدود شده، منجر به تولید نیروی بزرگتر در سطح بزرگتر می شود.

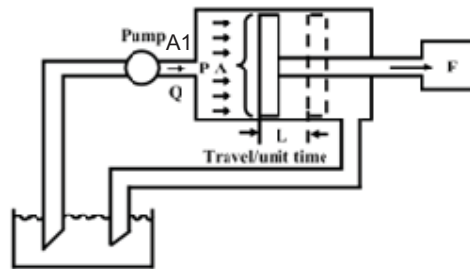


Fig. 26.1 Major hydraulic and mechanical variables

$$\begin{cases} F_1 = PA_1 \\ F_2 = PA \end{cases} \Rightarrow F_2 = \frac{A}{A_1} F_1$$

در

نتیجه این تقویت، کار انجام شده بدون تغییر است  $F_1 x_1 = F_2 x_2$

S 2.1: A. Can you give an analogy of the force amplification in hydraulic system from an electrical system?

**۷-۳-۲ مزایای محركه‌های هیدرولیکی**

منظور از سیستم هیدرولیک انتقال توان از طریق مایعات است. در این سیستمها محرك اصلی، پمپ الکتریکی یا موتور است. امکان تغییر توان خروجی فقط با کنترل پمپ میسر نیست لذا مدارهای هیدرولیکی تعبیه می شوند تا امکان کنترل توان انتقالی فراهم آید. مزایای سیستمهای هیدرولیکی از این قرار هستند:

**انعطاف در تغییر سرعت و جهت:** موتورهای الکتریکی و موتورهای احتراقی عموماً در دور تقریباً ثابت کار می کنند و تغییر جهت حرکت آنها به سرعت امکانپذیر نیست. اما محركه‌های هیدرولیکی به سرعت تغییر جهت و تغییر سرعت می دهند.

**Power-to-weight ratio:** نسبت وزن و سایز محرك هیدرولیکی به قدرت، کمتر از سیستم الکتریکی است

**Stall Condition and Overload Protection:** سیستمهای هیدرولیکی در صورت اضافه بار یا گیر کردن صدمه نمی بینند. در این شرایط شیر اطمینان باز شده و مایع به اندازه کافی به تانک هدایت می شود. این وضعیت به موتورهای الکتریکی صدمه می زند و بخشهایی نیم سوز می گردند.

S2. 2

A. Consider two types of variable speed drives. In the first one an electric motor with a power electronic servo drive is directly coupled to the load through a mechanism. In the second one an electric motor with a constant speed drive drives the pump in a hydraulic system which provides the variable speed drive to the load. Which one of these two is more energy efficient?  
 B. Why is stalling an electric motor is likely to cause damage? What can be done to prevent it?

۳-۳-۷ اجزا سیستم هیدرولیکی

۱. مایع هیدرولیک

- روغن هیدرولیک اساسا باید تراکم ناپذیر باشد تا توان را منتقل کند
  - همزمان باید قطعات متحرک را روغن کاری کند تا اصطکاک کاهش یابد
  - قطعات گرم شده را با انتقال گرما خنک کند
  - نقش درزگیر sealing در فاصله بین قطعه متحرک و بدنه را دارد.
- مایعی که استفاده می شود از مشتقات نفتی است که فقط اندکی متراکم می شود.

۲. مخزن روغن

مخزن، منبع روغن سیستم است. اگر هوا در روغن باشد، که سفتی سیستم هیدرولیکی را مخدوش می کند، در اینجا آزاد می شود و صمنا گرمای روغن از آن گرفته می شود.

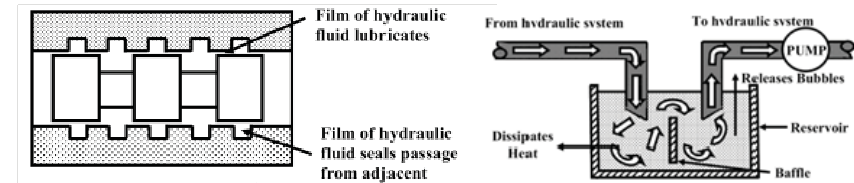


Fig. 26.2 Lubrication and Sealing by Hydraulic Fluid

Fig. 26.3 The functions of the reservoir

۳. فیلتر روغن

ذرات زائد ریزی که در سیستم ایجاد می شوند و می توانند موجب خراب شدن سیستم شوند، توسط روغن جابجا شده، و توسط فیلتر جمع آوری می گردند.

S2. 3

A. What would happen if orifices of valves are blocked by, say, a metal chip in the hydraulic oil?

۴. لوله ها، اتصالات و واشرها

لوله ها، روغن سیستم را از پمپ به محرکها و از آنجا به مخزن منتقل می کنند.

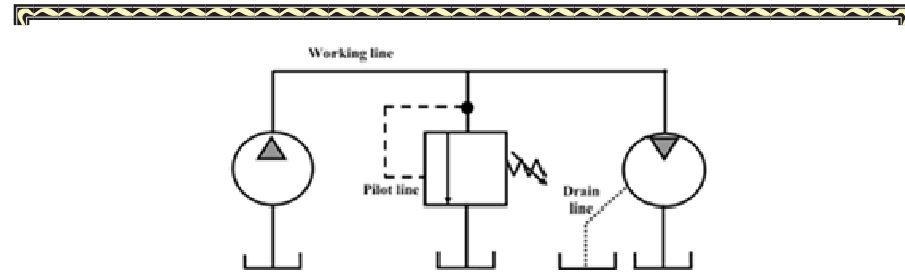


Fig. 26.4 The various kinds of lines in a hydraulic system

شکل 26.5 نمونه از اتصالات و نمایش سمبولیک آنها نشان می دهد.

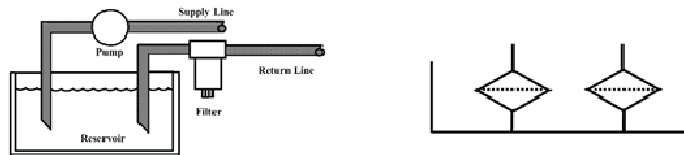


Fig. 26.5 Connection Arrangement of Filter and Lines with a Reservoir

Fig. 26.6 The graphical symbol for Reservoirs and Filters

برای اتصال لوله ها، نیاز به سرهای اتصال و واشرها آب بندی است.

۵. پمپهای هیدرولیکی

پمپهای انرژی مکانیکی را به فشار مایع تبدیل می کنند. دبی خروجی پمپ تابع سرعت دوران شفت آن است. نمایش سمبولیک پمپ در شکل نشان داده شده است.



Fig. 26.8 The graphical symbol for Pumps

پمپ دنده ای Gear Pumps

در این پمپ یکی از چرخ دنده ها چرخانده می شود و دیگری به تبع آن می چرخد. در نتیجه منطقه کم فشار در ورودی پدید می آید که مایع را به داخل می کشد. در خروجی منطقه پر فشار ایجاد می گردد که مایع را به خارج هدایت می کند. شکل ۲۶-۹

S2. 4 :A. Why do gear pumps usually operate at comparatively low pressure?

پمپ تیغه ای Vane Pumps

در این پمپها روتور داخل حلقه ای بیضوی می چرخد. در شکافهای روی پوسته روتور تیغه هایی قرار دارند که در انتها به فنرهایی متصل هستند که آنها را به سمت حلقه می راند. با کم و زیاد شدن فاصله بین محیط روتور و حلقه تیغه ها به بیرون یا داخل می روند. مقابل ورودی این فاصله زیاد است و تیغه ها بیرون آمده و روغن را به طرف خروجی که فاصله کم می شود می راندند. در منطقه ای که فاصله پیرامونی آن دو زیاد است، ورودی و در

محلی که فاصله کم است خروجی قرار دارد. شکل، یک پمپ چند تیغه که حلقه آن بیضوی است را نشان می دهد. این پمپ ۲ ورودی و دو خروجی با ۱۸۰ درجه اختلاف مکانی دارد. شکل ۲۶-۱۱

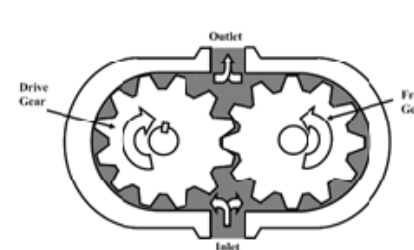


Fig. 26.9 The construction of a Gear Pump

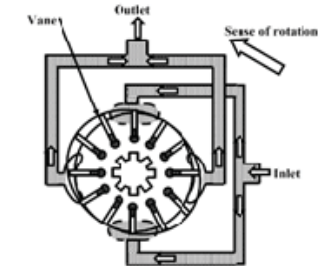


Fig. 26.11 Construction of Balanced Vane Pumps

### Radial Piston Pumps

در این پمپ روتور و حلقه دور آن هم محور نیستند. در نتیجه دوران، پیستونها شعاعی حرکت می کنند. در منطقه ای که فاصله پیرامون روتور و حلقه زیاد است، پیستونها تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز به بیرون رفته و مایع را به درون می مکند. در منطقه خروجی فاصله پیرامون روتور و حلقه کم شده و مایع به خارج رانده می شود. شکل این سیستم را نشان می دهد. شکل ۲۶-۱۲

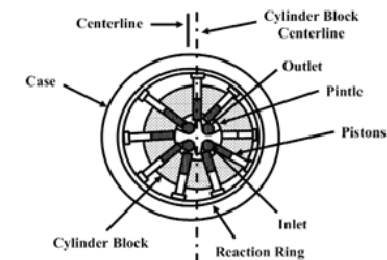


Fig. 26.12 Cross Sectional View of Radial Piston Pumps

### ۶. موتورهای هیدرولیکی: محرکهای دوار

موتورها عکس پمپها کار می کنند و فشار هیدرولیکی را به جابجایی مکانیکی تبدیل می کنند. موتور، مشابه تمام انواع پمپهایی که توضیح داده شدند وجود دارد.

### ۷. انبارها یا Accumulators: ذخیره ساز

روغن هیدرولیک فشرده نمی شود تا بتوان مانند گازها آنها را فشرده و در موقع لزوم با نرخ بالا دریافت کرد. انبارها (مشابه خازن) مایع تحت فشار ذخیره می کنند. فشار توسط فنر یا گاز تولید می گردد. در صورتیکه فشار خروجی افت کند، این انبارها دبی مورد نیاز برای جلوگیری از افت فشار تامین می کنند.

### انبارهای فنر دار Spring-Loaded Accumulators شکل ۲۶-۱۵

شکل ۲۶-۱۵ نمونه ای از این انبارها را نشان می دهد.

### انبارهای گازی Gas Charged Accumulator شکل ۲۶-۱۶

انبارهایی که عموماً استفاده می شوند، انبارهای گازی هستند. گاز آنها معمولاً نیتروژن خشک است.

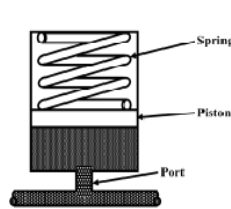


Fig. 26.15 A spring-loaded accumulator

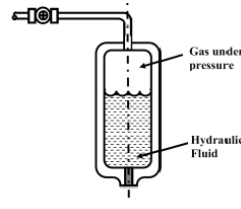


Fig. 26.16 A gas-charged accumulator

### ۸. محرکهای خطی: سیلندرها

سیلندرها محرک حرکت خطی هستند.

*Single Acting Cylinder* این سیلندرها دارای یک محفظه فشار هستند.

*Double-Acting Cylinder* این سیلندرها دارای ۲ محفظه اعمال فشار هستند.

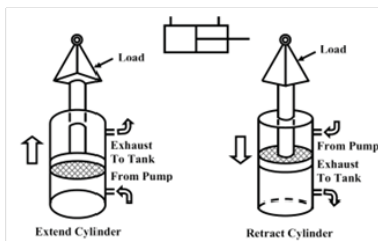


Fig. 26.18 Cross Sectional View of Single-acting Cylinder

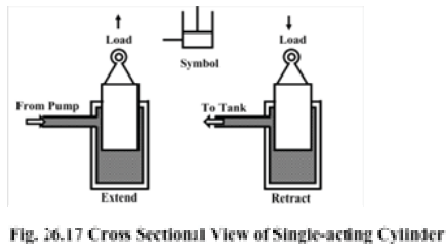
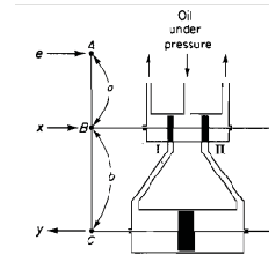


Fig. 26.17 Cross Sectional View of Single-acting Cylinder

۴-۷ مدارهای هیدرولیکی

۱-۴-۷ تقویت کننده هیدرولیکی

شکل، یک تقویت کننده هیدرولیکی را نشان می دهد.



$$x = e \cdot \frac{b}{a+b}$$

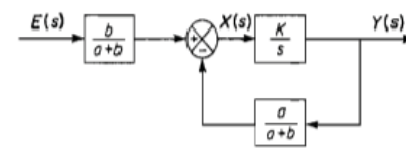
$$q = K_1 x$$

$$q = A \dot{y}$$

با وارد شدن روغن (non compressible) به پیستون حجم  $dV$  را اشغال می کند  $q dt = dV = A dy$  در این رابطه  $A$  سطح مقطع،  $dy$  مقدار جابجایی و  $q$  دبی روغن است. اگر رابطه بین  $q$  و  $x$  شیر ۴ راهه خطی فرض شود  $q = K_1 x$  رابطه زیر برای پیستون بدست می آید که نشان می دهد عملکرد انتگرالی دارد.

$$A \dot{y} = K_1 x$$

حال به عملکرد اهرم دقت کنید. با جابجایی  $e$  موقعیت  $x$  نیز تغییر می کند. در نتیجه دبی  $q$  وارد پیستون شده و این می تواند موقعیت  $y$  را تغییر دهد. موقعیت  $y$  به گونه ای خواهد بود که در مدار هیدرولیکی تعادل برقرار گردد شکل بلوک دیاگرام آنرا نشان می دهد. در نتیجه رابطه زیر بدست می آید.



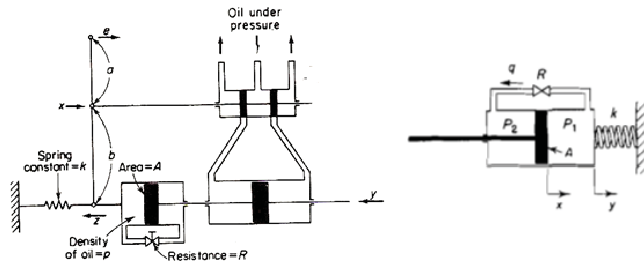
$$\frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{\frac{b}{a+b} \cdot \frac{K}{s}}{1 + \frac{K}{s} \cdot \frac{a}{a+b}} = \frac{bK}{s(a+b) + Ka}$$

با فرض اینکه بهره تقویت کننده هیدرولیکی زیاد است می توان نوشت

$$\frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{b}{a} = K_p$$

۲-۴-۷ کنترلر PI

شکل مدار کنترلر PI هیدرولیکی را نشان می دهد. در این مدار یک تقویت کننده و یک Dashpot و یک فنر قرار دارد. مدل تقویت کننده در بخش قبل نوشته شد. مدل Dashpot و فنر اینگونه بدست می آید. دبی خروجی از شیر Dashpot برابر است با:



$$q = \frac{p_1 - p_2}{R}$$

مقدار جابجایی پیستون نیز از این قرار است.

$$q dt = A(dx - dy)$$

نیروی که فنر وارد می کند اینگونه بدست می آید.

$$F = A(p_1 - p_2) = ky$$

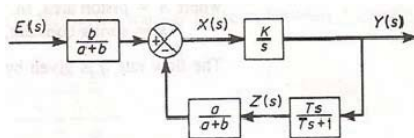
در نتیجه رابطه

$$\dot{x} = \dot{y} + \frac{k}{RA^2} y$$

بدست می آید که تابع تبدیل آن برابر است با:

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{Ts}{Ts+1} \quad T = \frac{RA^2}{k}$$

حال بلوک دیاگرام کلی سیستم از اینقرار است:

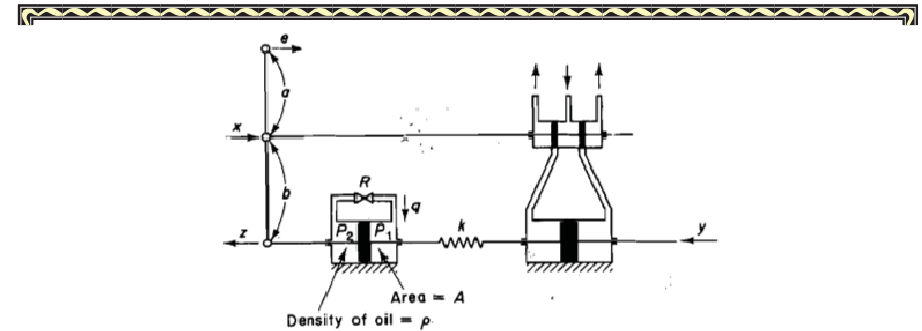


که اگر  $K$  بهره تقویت کننده بزرگ در نظر گرفته شود، رابطه کنترلر PI بدست می آید.

$$\frac{y(s)}{e(s)} = \frac{b}{a+b} \cdot \frac{a+b}{a} \cdot \frac{Ts+1}{Ts} = \frac{b(1+Ts)}{aTs}$$

۳-۴-۷ کنترلر PD

شکل ساختمان کنترلر PD را نشان می دهد.



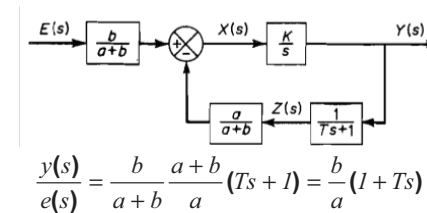
در این طرح نیز فنر و Dashpot در کنار تقویت کننده قرار دارد. مدل فنر و Dashpot از اینقرار است:

$$q = \frac{p_2 - p_1}{R} \quad A(p_2 - p_1) = k(y - z) \quad qdt = Adz$$

در نتیجه تابع تبدیل

$$\frac{z(s)}{y(s)} = \frac{l}{Ts + l} \quad T = \frac{RA^2}{k}$$

بدست می آید. بلوک دیاگرام کلی سیستم مطابق شکل است که اگر K بزرگ فرض شود تابع تبدیل PD بدست می آید.



$$\frac{y(s)}{e(s)} = \frac{b}{a+b} \frac{a+b}{a} (Ts + l) = \frac{b}{a} (l + Ts)$$

### ۴-۴-۷ نمونه مدار هیدرولیکی

#### مدار ۱: صرفه جویی انرژی

در سیستمی برای تامین فشار روغن در ماکزیمم قدرت به ۲ پمپ نیاز است. مدار طراحی کنید که وقتی فشار درخواستی را یکی از پمپها می تواند تامین کند دیگری از مدار خارج شود (با بایس شدن خروجی آن فشار روی پمپ برداشته شود) تا صرف جویی مصرف انرژی شود.

شکل این سیستم را نشان می دهد. اجزا این سیستم عبارتند از:

- A, B: Hydraulic pumps,
- C, E: Pilot operated Spring loaded Relief valves,
- D: Check valve

در شکل 28.1 هر دو پمپ فشار را تامین می کنند. اگر فشار تامین شده بیش از مقدار تنظیم شده برای شیر اطمینان C شود، از طریق C، پمپ A تحت فشار کم به تانک راه داده می شود (بار آن صفر می گردد) در این حال

پمپ B فشار را تامین می کند. اگر B نتواند فشار خروجی را تامین کند، فشار می افتد و شیر اطمینان C قطع شده A به تامین فشار بر می گردد.

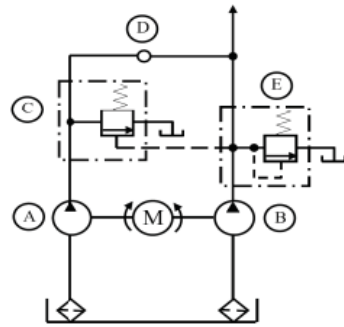


Fig. 28.1 Unloading Circuit

### S 3.1:

- A. Can you imagine what would happen, if the check valve was not present?
- B. How would you modify the system if you wanted to unload pump B instead of pump A?

#### مدار ۲: تامین ۳ حالت فشار

مداری طراحی کنید که فشار را در ۳ مقدار حداقل، متوسط و حد اکثر تامین کند. اجزا مدار که در شکل 28.2 نشان داده شده اند عبارتند از:

- A: Reservoir with Filter,
- B: Hydraulic Pump,
- C, E: Pilot Relief Valve,
- D: Solenoid activated Four-way Directional valve.

#### A. حداقل فشار

- ۱- هر دو سلونوئید a و b غیر فعال هستند.
- ۲- شیر ۴ راه توسط فنر خود در حالت خنثی قرار دارد.
- ۳- حداکثر فشار را تنظیم فنر C تعیین می کند (زیرا تخلیه آن به به مخزن وصل است).

#### B. فشار متوسط

- ۱- در شکل 28.3 سلونوئید a فعال و شیر ۴ راه در سمت چپ است.
- ۲- حداکثر فشار را مجموع تنظیم فنرهای شیرهای C و E تعیین می کند. زیرا تخلیه C باید به حدی شود تا با فنر E مقابله کند.

#### C. فشار بالا

- ۱- در شکل 28.3 رله b فعال و شیر ۴ راه در حالت سمت راست قرار دارد.
- ۲- سقف فشار را فنر C با تخلیه مسدود تعیین می کند.



7 Name two functions of an accumulator.

### S 1.1

A. Can you draw an inlet pressure flow characteristics of the ball type check valve?

**Ans:** Let a positive pressure drop correspond to the forward flow direction. Then, because of spring force, a minimum positive pressure drop would be needed to establish full flow. Similarly, below a minimum pressure drop, no flow would take place. For negative pressure drop, the flow is zero.

B. What should be the nature of the spring used in the check valves, hard or soft?

**Ans:** With a hard spring, because of spring force, the minimum positive pressure drop needed to establish full flow would be high. Therefore the spring should be soft, only ensuring that when the pressure drop across the valve is very small, the flow is cut off.

### S 1.2

A. In Fig. 27.7b, what is the position of the valve when there is no pressure at both the pilot ports?

**Ans:** The valve shown is a two-position four-way valve. The spring symbol indicates that if no pilot pressure exists at either port, the position is determined by the spring. Since the spring is shown at the left, the left box shows the position of the valve when pilot pressures at the ports are zero.

B. Is it possible to connect directional control valves in series and/or parallel? Can anything be achieved thereby? Are there conditions in which this is possible?

**Ans:** The valves can easily be connected in parallel, provided the pump is capable of delivering the required flow. In case they are connected in series, the tank port of the first valve is connected to the pump port of the other. For two position valves this is possible. However for three position valves, for independent operation of the two loads, the valve should be open center type, that is the pump and tank ports should be connected. If these ports remain plugged then independent operation of loads would not be possible.

### S 2.1

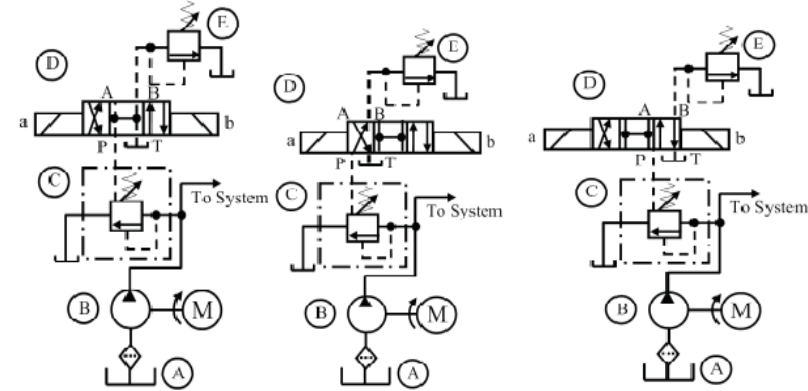
Can you give an analogy of the force amplification in hydraulic system from an electrical system?

**Ans:** The electrical analog of force is voltage. Both are called across variables, while the electrical analog of flow rate is current, both which are called through variables. Note that the product of force and flow rate is power as is the product of voltage and current. Thus the analogy of force amplification is voltage amplification as can be achieved by transformers.

### S2. 2

A. Consider two types of variable speed drives. In the first one an electric motor with a power electronic servo drive is directly coupled to the load through a mechanism. In the second one an electric motor with a constant speed drive drives the pump in a hydraulic system which provides the variable speed drive to the load. Which one of these two is more energy efficient?

**Ans:** The first one is likely to be more efficient. This is because the overall efficiency of both the systems would include the efficiency of the motor and the efficiency of the final mechanism that connects the load with the actuator, such a gear or a ball screw. However, the hydraulic system would further involve the efficiency of the pump and cylinder as well as that of other speed control equipment such control valves. For the first system this would involve only the efficiency of the power electronic converter, which is likely to be higher. Thus the



شکل 28.2 (چپ) - 28.3 (وسط) و 28.4 (راست)

### § 3.2

A. Why are lines connecting C to D and D to E marked in dashed lines?

### سوالات

سیستم بادی

1. Explain with a simple sketch the principle of operation of a flapper nozzle amplifier.
2. Sketch the input-output characteristics of a flapper nozzle amplifier.
3. What is the function of air relay in pneumatic control?
4. What is the major advantage of using a flapper nozzle amplifier in closed loop?
5. Explain the construction and working principle of a direct acting type pneumatic valve positioner. What are the limitations of this type of positioners?
6. How can you convert a 4-20mA current signal to a 3-15 psi pressure signal? Explain with a schematic

شیرها

1. Discuss the construction, advantages and disadvantages of a double-seated control valve.
2. When would you recommend to use an air-to-close control valve? Give an example.
3. Sketch and discuss the plug shapes and ideal flow characteristics of three different types of control valves.
4. How does the friction loss of a pipeline connecting the control valve affect the flow characteristics of the valve? Explain clearly.

سیستم هیدرولیک

1. State Pascal's Law
2. Name several advantages of a hydraulic system
3. What makes petroleum oil suitable as a hydraulic fluid?
4. What determines the speed of an actuator?
- 5 Name four primary functions of the hydraulic fluid.
8. Name three functions of the reservoir?



lesson is that hydraulic systems are not used for their energy efficiency, but rather for their small size, high power handling capacity and ease of control under high loads.

B. Why is stalling an electric motor is likely to cause damage? What can be done to prevent it?

**Ans:** Stalling an electric motor reduces the back emf in the motor to zero. Therefore very high current flows in the motor causing thermal damage. To prevent such damages, current control techniques are applied in all motor drives which sense the current and reduce the motor terminal voltage whenever the current exceeds its limit. In other cases, where such rise of current is considered to be due to fault, over current trip mechanisms are employed that switch off supply to the motor.

**S 2.3**

A. What would happen if orifices of valves are blocked by, say, a metal chip in the hydraulic oil?

**Ans:** Immediately the pressure difference across the hydraulic cylinder, which moves the cylinder against load, would be neutralized. Thus the load motion would stop. At the same time the pressure difference across the jammed orifice would rise. Sometime this resulting force can dislodge or shear the chip that causes the jam.

**S 2.4**

A. Why do gear pumps usually operate at comparatively low pressures?

**Ans:** The load imposed by the drive shaft depends on the operating pressure. By construction, this load is unbalanced in the gear pump and therefore, considerable side loading on the drive shaft exists. To limit this loading, operating pressures have to be kept low. Note that due to the symmetry of the inlet and outlet ports such forces do not arise in balanced vane pumps.

**S 3.1**

A. Can you imagine what would happen, if the check valve was not present?

**Ans:** Then, if the setting of the relief valve C is reached, both pumps would have unloaded.

B. How would you modify the system if you wanted to unload pump B instead of pump A?

**Ans:** Then, a check valve is to be placed between pump B and the system, after the relief valve D. The relief valve after C would be removed. Finally, the setting of D would have to be set lower than that of C.

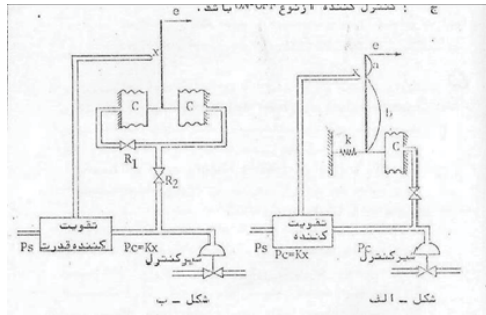
**S 3.2**

A. Why are lines connecting C to D and D to E marked in dashed lines ?

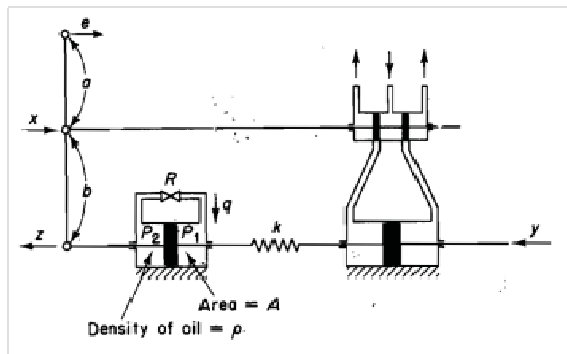
**Ans:** Because these are pilot lines for the relief valve.

**مسائل**

- 1- موارد استفاده سیستمهای بادی و هیدرولیکی چیست
- 2- بلوک دیاگرام و تابع تبدیل کنترلر بادی شکل الف را بنویسید
- 3- تابع تبدیل PC/E شکل ب را بنویسید
- مقدار R1 و R2 چقدر باشد تا کنترلر PID گردد.
- برای اینکه کنترلرها PI باشند مقدار مقاومتها چقدر باشد.
- برای کنترلر ON-OFF مقدار مقاومتها چقدر باشد



۴- تابع تبدیل سیستم هیدرولیکی زیر را بنویسید



- S2.1** A. Give one example of an embedded system and of one that is not. Justify your examples.  
 B. Name an industrial embedded system. Explain whether the above characteristics hold for it.  
 C. Name an Industrial Real Time systems, which may not be called embedded. Explain your answer.

### ساختار عمومی RTES

متفاوت با سیستمهای عمومی، برای RTES نمی توان ساختار قطعی ثابتی برای تمام کاربردها ترسیم کرد. معذک به منظور توضیح می توان آن را بصورت بلوک دیگرامهایی توضیح داد. شکل ساختار این سیستمها را نشان می دهد. سیستم عامل در حافظه سیستم جای داده می شود و بخش دیجیتال آن می تواند شامل بلوکهای زیر باشد.

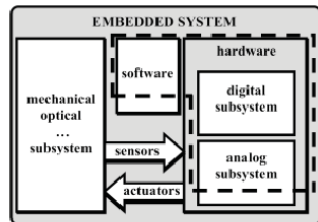


Fig. 36.2 Typical Embedded System Architecture

1. Processor
2. Memory
3. Input/Output devices and interface chips
4. Real Time System Operating System Software
5. Application Software •

### ۱-۸ سخت افزار

#### A. پردازنده

پردازنده RTES باید کارهای خاص مانند کنترلر PID، کنترلر محور CNC و غیره انجام دهد. پردازنده هایی که ممکن است مورد استفاده قرار گیرند عبارتند از:

1. General Purpose Microprocessors
2. Microcontrollers
3. Digital Signal Processors

معمولا از پردازنده های موجود در بازار استفاده می گردد ولی برای طرحهای خاص ممکن است از FPGA استفاده شود. FPGA المانی است که دارای تعداد زیادی المانهای منطقی است که می توان مشابه کنترلر ترتیبی آن را طراحی کرد.

#### General Purpose Processors

این پردازندهها چون در تعداد زیاد تولید می شوند ارزان هستند و پشتیبانی نرم افزاری قوی دارند. مانند پنتیوم که با قابلیت فوق آلعادهای که دارد ارزان است. شکل ساختمان این پردازنده ها را نشان می دهد.

## Real Time Embedded System

Real Time Embedded System (RTES) سخت افزار کامپیوتری محاسباتی است که داخل ماشینها برای انجام عملیات خاصی تعبیه می شود.

**بلادرنگ Real Time**: به این معنی است که زمانبندی عملیات منطبق با پالس ساعت دنبال می شود. سیستمهای RTES باید مرتب محیط را مانیتور کرده و به آن واکنش بلادرنگ نشان دهند. برای مثال در سیستم کنترل، خروجی باید بطور منظم اندازه گیری شود، با توجه به کنترلر سیگنال کنترل محاسبه و به فرایند اعمال گردد. وجود تاخیر نا مطلوب و حساب نشده در این حلقه منجر به ناپایداری و نقص عملکرد می گردد.

**سیستم Embedded**: سیستمی است که در سیستم دیگر به نحوی جا داده شده است که قابل رویت نیست. برای مثال کنترلر CNC که داخل تابلو فرمان قرار دارد قابل رویت نیست. محدودیتهای طراحی زیادی در ساخت سیستمهای RTES وجود دارد که در سیستمهای دیگر موجود نیست، از جمله آنها می توان به ابعاد، وزن، مصرف انرژی مجاز و از همه مهمتر سرعت کار مناسب است تا بتواند بلادرنگ عمل نماید. شکل برد RTES را نشان می دهد که می تواند در rack یا slot تابلو فرمان یک دستگاه قرار گیرد.



Fig. 36.1 Embedded Single Board Position Controller Module

#### Technical Features

- Shaft encoder input
- Onboard dedicated high speed CPU
- Motor drive set point output
- Digital IO
- Programmer port
- Set point from data bus

### RTES برای کاربرد خاص

RTES ها معمولا برای کاربردهای مشخص طراحی می شوند و برنامه های محدود خاصی را مرتب با سرعت و با راندمان انجام می دهند. این عملیات را سیستم عامل OS آن مدیریت می کند. سیستم عامل RTES بسیار ساده تر از یک سیستم عامل عمومی مانند Windows است.

### Digital Signal Processor (DSP)

DSP بر اساس پیکربندی Harvard است و برای کاربردهای بلا درنگ استفاده می شود.

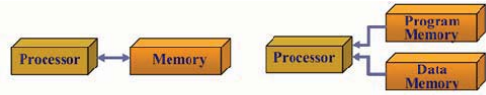


Fig. 36.8 The Von Neumann and the Harvard architectures

ویژگی مهم آنها

۱. array multiplication.
۲. اجرا دستورات در یک سیکل
۳. دسترسی همزمان به چندین حافظه در یک سیکل: حافظه dual port

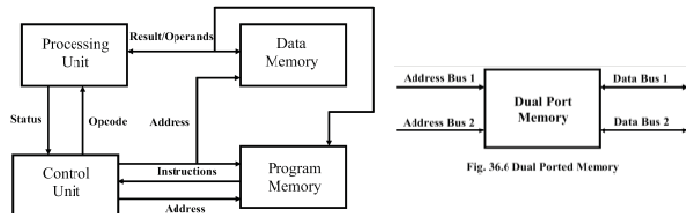


Fig. 36.5 The modified Harvard architecture

Fig. 36.6 Dual Ported Memory

۴. تعداد واسطهای خارجی روی المان محدود است.
۵. Very Long Instruction Word (VLIW) برای کارهای پردازشی مناسب است. شکل نمونه‌ای از آنرا نشان می دهد که در یک دستورالعمل چندین تابع و مسیر ورود و خروج دیتا وجود دارد.

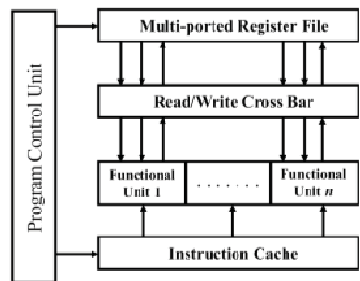


Fig. 36.7 Block Diagram of VLIW architecture

**S2.3** A. Give one example each of an embedded system that can use a GPP, a microcontroller and a DSP. Justify your examples.  
 B. Name one each of commercial versions of a GPP, a microcontroller and a DSP that is used in industrial embedded applications.

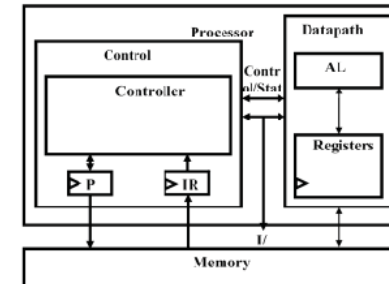


Fig. 36.3 The architecture of a General Purpose Processor

میکروپروسور المان است که دیتا را می خواند، روی آن عملیات ریاضی-منطقی انجام می دهد و نتیجه را در حافظه می نویسد. میکروپروسور انواع دستورات برای تبادل اطلاعات با حافظه را دارد.

### میکروکنترلر

میکروکنترلر یک single board computer است که در یک IC جای داده شده است. شکل اجزا ساختار میکروکنترلر را نشان می دهد.

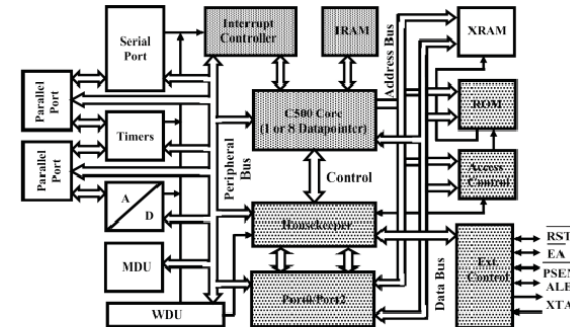


Fig. 36.4 The architecture of a typical microcontroller named as C500 from Infineon Technology, Germany

میکروکنترلر المانی است که در خود دارای:

۱. میکروپروسور
۲. EPROM, ROM و یا
۳. تعدادی مسیر I/O دیجیتال و آنالوگ
۴. تایمر و شمارنده

دستورات ارتباط با حافظه در میکروکنترلرها محدود است ولی دستورات bit processing متعددی ممکن است داشته باشد.

- محاسبات در عکس العمل به رخدادهای سیستم فیزیکی است، بنابراین کامپیوترهای صنعتی باید تعداد زیادی I/O داشته باشند.
- سرعت عمومی رخدادهای زیاد نیست زیرا دینامیک فرایندها مانند درجه حرارت کند هستند. در فرایندهای مکانیکی که سرعت بالاتر است، از پردازنده اختصاصی استفاده می شود.
- الگوریتمها پیچیدگیهای زیادی ندارند، لذا پردازندههای معمولی کفایت می کنند.
- بخش مهم محاسبات سیگلی و یلا درنگ است، لذا مدیریت استاتیکی زمانبندی اجرا کفایت می کند.
- نسبت بین قیمت کنترلر و قیمت فرایند بسیار پایین است ولی کنترلر باید در شرایط سخت محیطی کار کند، لذا قابلیت اطمینان فوق العاده مهم است.

### A. سیستم عامل

سیستم عامل مجموعه برنامه‌های هابی هستند که توسط برنامه‌های کاربردی برای ارتباط با سخت افزار استفاده می شوند. منظور از سخت افزار حافظه RAM و وسایل جانبی و محاسباتی است.

### انواع سیستمهای عامل

۱. سیستم عامل stand alone که در PCها استفاده می شوند عبارتند از:
    - DOS
    - Windows 2000 Professional
    - Mac OS X
  ۲. سیستم عامل شبکه‌ها عبارتند از:
    - Windows 2000 Server
    - Unix
    - Linux
    - Solaris
  ۳. سیستم عامل وسایل و کامپیوترهای کوچک که در یک ROM جای می شود عبارتند از:
    - Windows CE
    - Pocket PC 2002
    - Palm OS
- این سیستم عاملها می توانند بلادرنگ باشند یا نباشند و در سیستمهای emdeded استفاده می شوند.

### S3.1 A. What are the factors on which the execution time of a program depends on?

- B. While a task is executing, is the CPU continuously busy?
- C. Suppose there are two mutually independent programs A and B. If only program A (B) executes on the processor P, it takes  $t_A$  ( $t_B$ ) units of time. If these programs are fired simultaneously and run under multi-programming, neglecting time related to program switching, would the execution time for both programs taken together be greater than, equal to or less than  $(t_A + t_B)$ ?

### سیستم عامل بلادرنگ

Real-Time OS (RTOS) سیستم عاملی است که نه تنها برای آن انجام عملیات، بلکه زمانبندی دقیق آن نیز اهمیت دارد. عدم تحقق زمانبندی برای آن به مثابه وقوع ایراد است.

**program:** برنامه ای است که باید اجرا شود.

### Memory B

در RTES حافظه و پردازنده روی یک برد و یا در یک IC قرار دارند. برنامه در ROM جای می گیرد. حافظه‌ها از نوع Flash هستند که با قطع قدرت اطلاعات خود را از دست ندهند و بتوان به سادگی آنها را برنامه نویسی کرد. در ساختار Princeton برنامه و دیتا در یک حافظه قرار دارند ولی در Harvard Architecture برنامه و دیتا از حافظه‌های متفاوت استفاده می کنند.

### S2.4 A. State with justification if the following statements are right (or wrong)

- Cache memory can be a static RAM
  - Dynamic RAMs occupy more space per word storage
  - The full-form of SDRAM is static-dynamic RAM
  - BIOS in your PC is not a Random Access Memory (RAM)
- B. Order the following in the increasing order of their access speed Flash Memory, Dynamic Memory, Cache Memory, CDROM, Hard Disk, Magnetic Tape, Processor Memory

### Input Output Devices and Interfaces.C

RTES دارای مدار واسط برای I/O و ارتباط با وسایل جانبی، آنتن و LAN می تواند باشد. برای برقراری ارتباط، RTES معمولاً نیاز به مدار خارجی ندارد. برای ارتباط I/O آنالوگ در آن A/D و D/A تعبیه می گردد. شکل نمونه مدارهای واسط RTES را نشان می دهد.

فیلتر برای حذف نویز، فیلتر ضد همپوشانی Anti-aliasing برای ورودی A/D، مدار کنترلر موتور و محرک از دیگر بخشهای مدارهای واسط در RTES است.

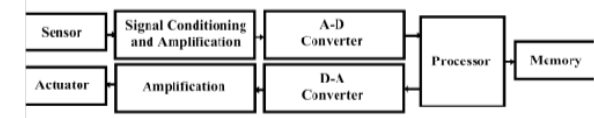


Fig. 36.9 The typical input-output interface blocks

### S2.2 A. State one characteristics each of industrial embedded systems in respect of Processors, Memory and I/O.

B. Describe typical i/o organization of industrial embedded systems.

### ۸-۲ نرم افزار

RTES مانند بقیه سخت افزارهای کامپیوتری دارای نرم افزار سیستم و نرم افزار کاربردی است. سیستم عامل نوشتن برنامه‌های کاربردی برای ارتباط با سخت افزار را تسهیل می کند.

### ماهیت محاسبات اتوماسیون صنعتی

محاسبات مورد نیاز کنترل صنعتی ویژگیهای زیر را دارد.

### S3.2 A. What are possible reasons for which execution time for a can be unpredictable?

B. Why preemptive multi-tasking is such an important requirement for an RTOS?

C. Suppose there are two mutually independent tasks A and B. Let B be the higher priority task. If only task A (B) executes on the processor P, it takes  $t_A$  ( $t_B$ ) units of time. If these tasks are run under multi-tasking, neglecting time related to task switching, can the execution time for task A be less than  $(t_A + t_B)$ ?

#### پاسخ سوالات

### S2.1 A. Give one example of an embedded system and of one that is not. Justify your examples.

**Ans:** The controller for a microwave oven is an embedded system. Its existence is deep within the oven casing and not immediately visible at all. However, it controls each functionality of the microwave oven. On the other hand a pocket calculator is not an embedded system although it has very similar structural characteristics and handles similar kind of i/o, like LCD display and keypad. The calculator is a standalone computing device, which does not have an embedding environment.

B. Name an industrial embedded system. Explain whether the above characteristics hold for it.

**Ans:** Consider a CNC milling machine controller. The controller is custom designed to control the CNC milling machine. It cannot be used, as a PC for example. Thus it is single-functioned. It is clearly reactive and real-time, since it interacts with sensors every sampling cycle. Its design is likely to be constrained by cost. However, design of industrial systems is less constrained compared to other categories, in respect of power, size, weight and consequently, memory, processor speed etc.

### S2.2 A. State one characteristics each of industrial embedded systems in respect of Processors, Memory and I/O.

**Ans:** Processors for industrial embedded systems are generally characterized by a sophisticated interrupt handling system. This is necessary to support an asynchronous i/o subsystem, that is typical of industrial i/o as well as to facilitate a preemptive priority scheduler that is an integral part of an RTOS. Memory configurations for industrial embedded systems are characterized by the fact that there is generally enough available memory to preclude a virtual memory system. This is because virtual memory systems can introduce significant variations in task latencies and are therefore not good reliable for realtime applications. One important characteristics of industrial embedded i/o is that it involves both processor driven cyclic i/o as well device interrupt driven asynchronous i/o.

B. Describe typical i/o organization of industrial embedded systems.

**Ans:** I/O in industrial embedded systems can be divided into field i/o and device i/o. Field i/o typically means signals from sensors and signals to actuators and indicators. These are generally sensed cyclically, as for every scan of an RLL. Other kinds of i/o involve data exchange with various system devices such as programmers, MMI devices or communication processors, keyboards and displays. Finally the last kind of i/o involves network i/o following standard protocols such as the Ethernet or the fieldbus.

### S2.3 A. Give one example each of an embedded system that can use a GPP, a microcontroller and a DSP. Justify your examples.

**Ans:** A large industrial controller like a rack-based PLC can use a GPP. Motor drive controllers often use DSPs. A single-loop temperature controller can use a microcontroller. These are chosen depending

**Process:** process به اجرای برنامه اشاره دارد. یک independently executable unit است که توسط سیستم عامل مدیریت می شود.

**Thread:** Thread process ها به thread ها تجزیه می شوند. چندین Thread می توانند موازی اجرا شوند.

**task:** task می تواند process یا thread باشد. یک independently schedulable unit است.

#### Multitasking

- امکان واکنش به رخدادهای موازی را فراهم می آورد.
  - چندین thread همزمان اجرا می شوند
  - زمان CPU به نحو موثری مدیریت می شود.
  - task ها می توانند با هم طبق روشی که سیستم عامل تعیین می کند communicate کنند.
- برای داشتن سیستم multi task موارد زیر باید لحاظ شود:

#### A. Process Management

- interrupt handling
- task scheduling and dispatch
  - \_ create/delete, suspend/resume task
  - \_ manage scheduling information
  - priority, scheduling policy, etc

#### B. Interprocess Communication and Synchronization

- Code, data and device sharing
- Synchronization, coordination and data exchange mechanisms
- Deadlock and Livelock detection

#### C. Memory Management

- dynamic memory allocation
- memory locking
- Services for file creation, deletion, reposition and protection

#### D. Input/Output Management

- Handles request and release functions and read, write functions for a variety of peripherals

#### مشخصات مهم سیستم عامل بلادرنگ

1. RTOS باید multithreaded باشد.
2. باید بتواند به thread ها priority بدهد.
3. thread با اولویت پایین نباید بتواند راه thread با اولویت بالا را سد کند.
4. سیستم عامل باید انواع مکانیزمهای همزمانی بین thread/task را فراهم آورد.
5. زمان اجرای برای هر system function قابل پیش بینی باشد.

environmental factors, the execution time of a task depends on the input data set used for the run. However, this cannot be termed “unpredictable”.

B. Why preemptive multi-tasking is such an important requirement for an RTOS?

**Ans:** The first reason is that, without it, the concept of priority cannot be implemented properly. Thus without preemption, a task, that may have started when no other higher priority task was present, can block such higher priority tasks for long times, thus violating the principle of priority scheduling. Secondly, with a given computing speed the CPU utilization that can be realised with preemption cannot be utilised without it. Even if limited preemption, (namely that, only a task waiting for I/O is preempted) is used, a given set of tasks that is schedulable with respect to their deadlines under preemptive scheduling, may not

be so without preemption. It is for these reasons that it is an indispensable feature for an RTOS.

C. Suppose there are two mutually independent tasks A and B. Let B be the higher priority task. If only task A (B) executes on the processor P, it takes  $t_A$  ( $t_B$ ) units of time. If these tasks are run under multi-tasking, neglecting time related to task switching, can the execution time for task A be less than  $(t_A + t_B)$  ?

**Ans:** Yes, because, while task B is waiting for I/O, it would be removed to a waiting queue and task A would be scheduled till the time the interrupt for I/O completion is received and task B is put into a ready queue.

on the number of computing tasks, special kind of floating point computational requirements and the need for a simple system with limited off-chip resource requirement.

B. Name one each of commercial versions of a GPP, a microcontroller and a DSP that is used in industrial embedded applications.

**Ans:** 80186 processors have been used in the past to build embedded controller cards. More recently processors like the Power-PC may be used for industrial applications. Similarly, 8031 processors have been used for building small industrial controllers. More recently one can use ARM processors to build industrial embedded devices like intelligent sensors. Texas instruments has a special category of DSPs that have been designed for motor control (TMS 658030)

**S2. 4** A. State with justification if the following statements are right (or wrong)

- Cache memory can be a static RAM
- Dynamic RAMs occupy more space per word storage
- The full-form of SDRAM is static-dynamic RAM
- BIOS in your PC is not a Random Access Memory (RAM)

**Ans:** a. Yes, because it is very fast and limited in density; b. No, they have the highest densities among memory technologies; c. No. it is synchronous dynamic RAM; d. Yes, BIOS cannot be on volatile memory like RAM.

B. Order the following in the increasing order of their access speed Flash Memory, Dynamic Memory, Cache Memory, CDROM, Hard Disk, Magnetic Tape, Processor Memory

**Ans:** CDROM, Magnetic tape, Hard disk, Flash memory, Dynamic memory, Cache memory, Processor memory

**S3.1** A. What are the factors on which the execution time of a task depends on?

**Ans:** The execution time of a task can be divided into two types of activities, namely, CPU time and I/O time. In a multi-tasking operating system a third kind of time is added to this, namely the time spent by the task in waiting for the resources needed, that is CPU, or I/O. This may depend on a variety of factors, such as the other tasks running in the environment, priority, scheduling policies etc.

B. While a task is executing, is the CPU continuously busy?

**Ans:** The CPU is always doing something except during the times when it is fetching address or data from memory or devices. But since it may require sometime for the device to send the data, during that time, the CPU may do tasks other than the one for which it requested the device. In this sense the CPU may not be continuously busy.

C. Suppose there are two mutually independent tasks A and B. If only task A (B) executes on the processor P, it takes  $t_A$  ( $t_B$ ) units of time. If these tasks are fired simultaneously and run under multi-tasking, neglecting time related to task switching, would the execution time for both tasks taken together be greater than, equal to or less than  $(t_A + t_B)$  ?

**Ans:** That depends on the scheduling policy. If the policy is non-preemptive, it will take time equal to  $(t_A + t_B)$ . If it is preemptive, however, it is expected to take less time than  $(t_A + t_B)$ .

**S3. 2** A. What are possible reasons for which execution time for a task can be unpredictable?

**Ans:** Basically due to variations in its execution environment. This includes factors such as the other tasks which are executing at the same time, their priorities related to the task in question, the nature and frequency of interrupts coming from the environment etc. Note that, even apart from these



		TOOL MOTION			
		●	↗	↻	↺
WORKPIECE MOTION	●	Shaping broaching	Drilling boring		
	↗	Broaching planing	Sawing milling grinding		
	↻	Turning boring			
	↺			Hobbing	

Fig. 23.2 Nature of motion of the Job and the Tool for various Metal Cutting Processes

### CNC چیست؟

ماشینکاری دقیق را بصورت دستی نمیتوان انجام داد، حتی اگر بتوان، به کارگر ماهر و وقت زیاد نیاز دارد. از اینرو سیستم ماشینکاری خودکار در صنعت امروز مورد نیاز می باشد. (CNC) computer numerically controlled دستگاهی است که امکان ماشینکاری خودکار روی قطعات کوچک تا متوسط را فراهم می آورد.

در سال ۱۹۴۰ نیروی هوایی آمریکا برای ساخت قطعات پیچیده آنرا طراحی و بکار گرفت. این ماشین در دههای ۵۰ و ۶۰ قبل از اختراع میکروپروسور تجاری شد. تعداد ابزار آن ابتدا کم بود ولی تکمیل شده و تعداد ابزار آن افزایش یافت.

### Numerical Control

در NC کنترل انتخاب ابزار، نوع عملیات و سرعت انجام آن با دستورات عددی به دستگاه داده می شود. از همین رو نیز نام Numerical Control به خود گرفته است. در ابتدا دنباله دستورات روی نوار پانچ می شد که به آن برنامه کاری قطعه گفته می شد. دستگاه نوار را گام به گام می خواند و اجرا می کرد. کد هر گام حاوی سرعت براده برداری، سرعت حرکت ابزار و غیره است. روش پانچی اینک منسوخ شده است.

Computer Numerically Controlled (CNC) نوع مدرن NC است که کدهای عددی را کامپیوتر داخلی آن Machine Control Unit (MCU) تولید و اعمال می کند. در CNC چندین پردازنده، همزمان کار کنترل موقعیت و سرعت محورها را انجام می دهند تا پردازنده مرکزی کنترل ماشینکاری را عهده دار شود.

### مزایای CNC

CNC دارای مزایای زیر است:

- انعطاف پذیری بالا: به دلیل انجام چندین کار توسط یک ماشین
- برداشتن اتوماتیک ابزار
- دادن برنامه قطعه بصورت کامپیوتری
- افزایش تولید: به دلیل کاهش زمان قطعه گذاری و تغییر ابزار
- بهبود کیفیت: به دلیل سیستم کنترل محور دقیق کامپیوتری که اینک دارند.
- کاهش زائدات: به دلیل امکان برنامه نویسی برای استفاده بهینه از قطعه
- مانیتورینگ قطعه/ابزار: برای بهبود کیفیت و جلوگیری از شکستن آنها

## Computer Numerically Controlled (CNC)

### ماشین کاری

ماشینکاری به معنی براده برداری از یک قطعه توسط ابزار مناسب برای رسیدن به ابعاد و یا شکل مورد نظر است. منظور از ماشینکاری ممکن است سوراخکاری boring، برش و ساب زدن milling، تراشکاری turning و غیره یا ترکیب آنها باشد.

در هر حال ماشینکاری در نتیجه حرکت نسبی بین قطعه و ابزار حاصل می شود. معمولا یکی از آنها در دور از قبل مشخص شده، که اغلب دور بالا است، می چرخد و در نتیجه تماس ابزار و قطعه براده برداری صورت می گیرد. در این حین یک از آنها با سرعت کم حرکت می کند.

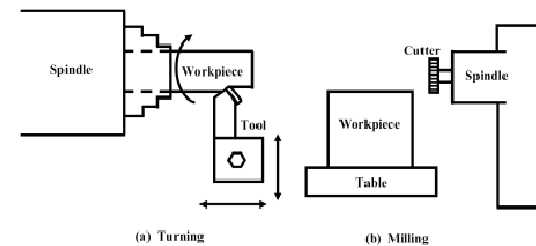


Fig. 23.1 Drive in a metal cutting

برای مثال در شکل فوق، برای تراشکاری قطعه می چرخد و ابزار با سرعت کم در جهت محور افقی جابجا می شود. در تراشکاری، سرعت دوران قطعه، سرعت حرکت ابزار و عمق براده برداری اهمیت دارد. از طرف دیگر برای ساب زدن، ابزار با سرعت می چرخد و قطعه که به میز کار محکم شده است با حرکت میز جابجا می شود. برای داشتن سطح صیقلی روی قطعه، ضرورت دارد که موقعیت و سرعت حرکت میز کار دقیقا کنترل شود. شکل نوع حرکت قطعه و ابزار برای ماشینکاریهای مختلف را نشان می دهد.



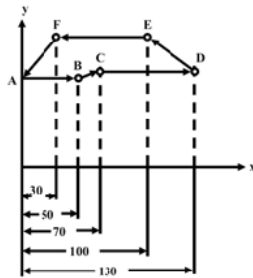


Fig. 23.6 A trajectory for drilling

**مختصات مطلق:** در مختصات مطلق اندازه ها نسبت به صفر مبدأ، که می تواند ثابت یا وابسته به زمان باشد، برای هر محور داده می شود. مختصات دهی در شکل فوق به روش مطلق صفر ۵۰، ۱۰۰، ۱۳۰، ۱۰۰، ۳۰ و صفر است. هر دو روش مختصات دهی در CNC های امروزی وجود دارد.

### C. کنترل حلقه باز / بسته

**حلقه باز:** در حلقه باز سیگنال مرجع به موتور یا محرک اعمال می گردد و فیدبکی از خروجی آن دریافت نمی شود. کنترل حلقه باز در ماشینکاری PTP کاربرد دارد و در ماشینکاری کانتوری قابل استفاده نیست. معمولاً stepper motor حلقه باز کار می کند و با پالس کنترل می شود.

**حلقه بسته:** در کنترل حلقه بسته، خروجی سیگنال مرجع را به نحو دقیقی علیرغم اختلال و تغییر در پارامترها دنبال می کند. مدار این کنترلر ها به مراتب پیچیده تر است و در CNC های امروزی تا دقت های  $2.5\mu\text{m}$  قابل دسترسی است.

**S1.5 A.** Why is closed loop control required for continuous axes and not for PTP axes?

B. What sort of motors, drives, controllers and sensors would you recommend for continuous axis control?

C. Comment on the comparative requirements of computing speed and memory for PTP and continuous axis control

### ۲-۹ کد دستورات CNC

#### واحد و جهت محور مختصات

جهت محورهای مختصات تعریف شده است. شکلها نمونه این تعاریف را در ۲ کاربرد نشان می دهند. واحد مختصات حرکت، رزولوشن حرکت هر محور است که به نام basic length-unit (BLU) خوانده می شود. برای مثال اگر سنسور انکودری ۵۰۰ بر پالس بر دور تولید کند و در نتیجه هر دور، محور 5mm جابجایی خطی داشته باشد، رزولوشن یا BLU برابر  $5\text{mm}/500=0.01\text{mm}$  است. مقدار حرکت بصورت مضرب صحیح BLU در برنامه آورده می شود. CNC های جدید مختصات floating point نیز می پذیرند که توسط میان یاب جایابی می شود.

- کارکرد ایمن و با قابلیت اطمینان بالا: به دلیل سیستم مانیتورینگ و کاهش دخالت انسانی
- جاگیری کم: به دلیل آنکه چند ماشین در یکی جای داده شده است.

از معایب CNC عبارتند از:

- قیمت نسبتاً بالای دستگاه
- تعمیر و نگهداری نسبتاً پیچیده
- نیاز به برنامه نویسی ماهر

این معایب به آن معنی است که CNC برای کاربردهای دقیق و حجم تولید متوسط مناسب است.

### ۱-۹ انواع NC ها

CNC ها از نظر مشخصات کاری به دسته های زیر تقسیم می شوند:

- Point-to-point or contouring / ماشینکاری نقطه ای / ماشینکاری کانتوری (منحنی یا سطح هم تراز)
- Incremental or absolute / مختصات نسبی یا مطلق
- Open-loop or closed-loop / کنترل حلقه باز یا بسته

### A. ماشینکاری نقطه ای PTP / کانتوری (هم تراز) Contouring

**ماشینکاری PTP:** در این روش موقعیت محورها به هنگام ماشینکاری ثابت است و در حال حرکت ابزار یا قطعه، ماشینکاری انجام نمی شود. بنابراین در این روش فقط موقعیت مقصد کنترل می شود و موقعیت لحظه ای در مسیر اهمیت ندارد. این سیستم برای سوراخکاری نظیر drilling, boring, reaming, tapping و punching استفاده می شود.

**ماشینکاری کانتوری:** در این روش، ماشینکاری در حال حرکت قطعه یا ابزار یا هر دو انجام می شود. بنابراین مسیر لحظه به لحظه باید کنترل شود. وقتی مسیر غیر خطی باشد سرعت محورها باید تغییر کند. از اینرو نیاز به motion controller است تا سرعت و موقعیت لحظه ای را برای دنبال کردن مسیر داده شده تثبیت کند. برای این منظور موتور محورها هم از نظر سرعت و هم از نظر موقعیت باید جداگانه قابل کنترل باشند. علاوه بر این نیاز به میان یابی است که سیگنال مرجع برای کنترلر سرعت و موقعیت محورها را تولید کند.

**S1.2 A.** Comment on the sensing requirements for PTP and Contouring axes

B. Do you think the overall cutting time can be optimized for PTP and Contouring systems? Are there any constraints to that?

### B. مختصات نسبی / مطلق مسیر

**مختصات نسبی:** در این روش مختصات دهی، موقعیت بعدی روی هر محور نسبت به موقعیت فعلی داده می شود. موقعیت نسبی در حرکت شکل زیر از A به A برابر است با ۵۰، ۶۰، ۲۰، ۳۰، -۳۰، -۷۰ و -۳۰

```
N0010G90;
N0011G01X1Y2;
N0012G01X2Y2;
N0013G91;
N0014G01X1;
N0015G92X2Y2;
N0016G01X1Y1;
```

Identify the meaning of the codes

B. Draw the trajectory of table motion that this program seeks to create.

C. Consider the part program segment given below for cutting a circular arc.

```
N10G01XY1;
N11G03X2Y5I2J1;
```

Determine the parameters of the circle.

D. Is there any other way of operating machine tools other than by Part programs?

### کد برنامه ماشینکاری

G و M کدهای CNC در بخش زیر ارائه شده اند. G کدها مربوط به حرکت ابزار هستند.

G00 - Rapid move (not cutting)	G01 - Linear move
G02 - Clockwise circular motion	G03 - Counterclockwise circular motion
G04 - Dwell	G05 - Pause (for operator intervention)
G08 - Acceleration	G09 - Deceleration
G17 - x-y plane for circular interpolation	G18 - z-x plane for circular interpolation
G19 - y-z plane for circular interpolation	G20 - turning cycle or inch data specification
G21 - thread cutting cycle or metric data specification	
G24 - face turning cycle	G25 - wait for input to go low
G26 - wait for input to go high	G28 - return to reference point
G29 - return from reference point	G31 - Stop on input
G33-35 - thread cutting functions	G35 - wait for input to go low
G36 - wait for input to go high	G40 - cutter compensation cancel
G41 - cutter compensation to the left	G42 - cutter compensation to the right
G43 - tool length compensation, positive	G44 - tool length compensation, negative
G50 - Preset position	G70 - set inch based units or finishing cycle
G71 - set metric units or stock removal	G72 - indicate finishing cycle
G72 - 3D circular interpolation clockwise	G73 - turning cycle contour
G73 - 3D circular interpolation counter clockwise	G74 - facing cycle contour
G74.1 - disable 360 deg arcs	G75 - pattern repeating
G75.1 - enable 360 degree arcs	G76 - deep hole drilling, cut cycle in z-axis
G77 - cut-in cycle in x-axis	G78 - multiple threading cycle
G80 - fixed cycle cancel	
G81-89 - fixed cycles specified by machine tool manufacturers	
G81 - drilling cycle	G82 - straight drilling cycle with dwell
G83 - drilling cycle	G83 - peck drilling cycle

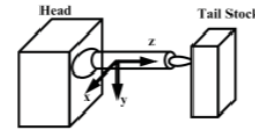


Fig. 23.4 Co-ordinate system for turning

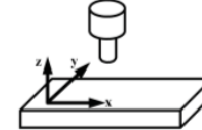


Fig. 23.5 Co-ordinate system for drilling and milling

**S1.3** A. Can you think of one advantage and one disadvantage of the incremental coordinate system compared to the absolute one?

B. Is there any connection between the choice of coordinate system and the position sensing machine used for the machine tool?

C. How would you decide on the BLU for systems with position sensors such as LVDTs and resolvers?

D. Is the BLU affected by the motor or the drive system also?

### برنامه ماشینکاری

شکل syntax دستور CNC را معرفی می کند.

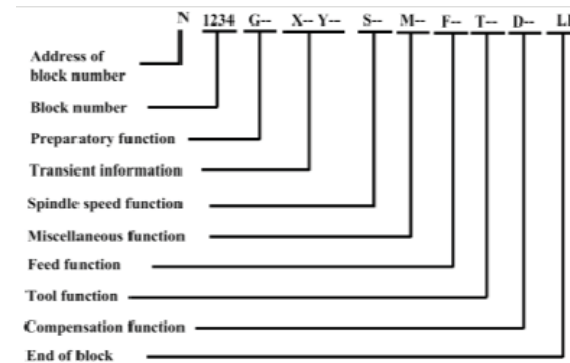


Fig. 23.7 Structure of a block in a part program

در این کد نویسی اجزا زیر وجود دارند:

- ۱- کدهای G حرکت ابزار را مشخص می کند. لیست آنها در بخش بعد آمده است.
- ۲- مختصات مسیر X، Y و Z که ممکن است نسبی یا مطلق باشد.
- ۳- کد S سرعت spindle
- ۴- کد M عملیاتی مانند شروع و توقف spindle و غیره که در لیست آمده اند
- ۵- کد F، feed rate، T شماره ابزار و غیره می باشند و غیره.
- ۶- دیگر بخشها مربوط به کدهای اجرای برنامه مانند block skip یا end of block هستند.

**S1.4** A. Consider the part program segment given below.

Knnn - z-axis center for circular interpolation, or first z-axis spline control point
Lnnn - arc angle, loop counter and program cycle counter
Nnnn - a sequence/line number
Onnn - subprogram block number
Pnnn - subprogram reference number
Rnnn - a clearance plane for tool movement, or arc radius, or taper value
Qnnn - peck depth for pecking cycle
Snnn - cutting speed (rpm), spindle speed
Tnnn - a tool number
Unnn - relative motion in x
Vnnn - relative motion in y
Wnnn - relative motion in z
Xnnn - an x-axis value
Ynnn - a y-axis value
Znnn - a z-axis value
; - starts a comment , or end of block

### ۳-۹ مدیریت حرکت محورها

برنامه نرم افزاری که بر اساس کد داده شده مسیر حرکت را تعیین و set point کنترل موتورها را مشخص می کند  
axis manager نام دارد. عملیات مدیریت حرکت محورها به ۲ قسمت تقسیم می شود

- Axes interpolation
- Axes servo control

این عملیات را ممکن است یک پردازنده یا بیشتر انجام دهند. تعیین مسیر در PTP ساده است و فقط تثبیت رسیدن به مقصد را نیاز دارد. اما در ماشینکاری کانتوری تعیین مسیر به محاسبات نسبتاً زیادی نیازمند است. مسیر تعیین شده سپس بصورت set point به کنترل موتور و از آنجا به محرکهای موتورها اعمال می گردد.

#### A. میان یاب مسیر حرکت

تعیین مسیر حرکت به معنی مشخص کردن سیگنال مرجع موتورهای محورهاست تا مسیر خاصی مانند مسیرهای زیر را طی کنند.

- Straight line
- Circular
- Helicoidal

در روش کانتوری، مختصات مبدا و مقصد داده می شود و میان یاب مختصات مسیر را با ترکیب قطعه خطوط مستقیم و منحنی می سازد. سیگنال مرجع کنترل سرعت و موقعیت موتورهای محورها از مسیر تولید شده تعیین می شوند. سیگنال مرجع به دو نوع reference-pulse و یا reference word اعمال می گردد.

#### دستور پالسی reference-pulse

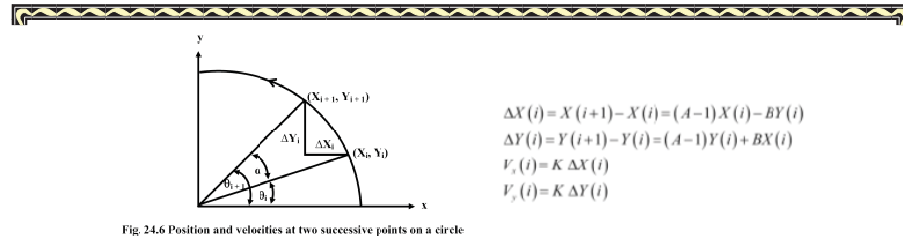
G84 - tapping cycle	G85 - reaming cycle
G85 - boring cycle	
G86 - boring with spindle off and dwell cycle	G89 - boring cycle with dwell
G90 - absolute dimension program	G91 - incremental dimensions
G92 - Spindle speed limit	G93 - Coordinate system setting
G94 - Feed rate in ipm	G95 - Feed rate in ipr
G96 - Surface cutting speed	G97 - Rotational speed rpm
G98 - withdraw the tool to the starting point or feed per minute	
G99 - withdraw the tool to a safe plane or feed per revolution	
G101 - Spline interpolation	

M کدها توابع کنترل ماشین هستند.

M00 - program stop	M01 - optional stop using stop button
M02 - end of program	M03 - spindle on CW
M04 - spindle on CCW	M05 - spindle off
M06 - tool change	M07 - flood with coolant
M08 - mist with coolant	M08 - turn on accessory (e.g. AC power outlet)
M09 - coolant off	M09 - turn off accessory
M10 - turn on accessory	M11 - turn off accessory or tool change
M17 - subroutine end	M20 - tailstock back
M20 - Chain to next program	M21 - tailstock forward
M22 - Write current position to data file	M25 - open chuck
M25 - set output #1 off	M26 - close chuck
M26 - set output #1 on	M30 - end of tape (rewind)
M35 - set output #2 off	M36 - set output #2 on
M38 - put stepper motors on low power standby	
M47 - restart a program continuously, or a fixed number of times	
M71 - puff blowing on	M72 - puff blowing off
M96 - compensate for rounded external curves	
M97 - compensate for sharp external curves	
M98 - subprogram call	M99 - return from subprogram, jump instruction
M101 - move x-axis home	M102 - move y-axis home
M103 - move z-axis home	

دیگر کدها عبارتند از:

Annn - an orientation, or second x-axis spline control point
Bnnn - an orientation, or second y-axis spline control point
Cnnn - an orientation, or second z-axis spline control point, or chamfer
Fnnn - a feed value (in ipm or m/s, not ipr), or thread pitch
Innn - x-axis center for circular interpolation, or first x-axis spline control point
Jnnn - y-axis center for circular interpolation, or first y-axis spline control point



که در آن  $K = \alpha V/R$  است.

**S2.2 B.** How does one choose the value of  $\alpha$  for circular reference word interpolation?

**B. کنترل موقعیت و سرعت محورها**

با کنترل پیوسته سرعت و موقعیت محورها، تلاش می شود مسیر تعیین شده توسط میان یاب طی شود. موتورها طبق دستوراتی که میان یاب تعیین می کند مستقلاً کنترل می شوند. کنترل موتورها ممکن است حلقه باز یا حلقه بسته باشد. در ماشینکاری PTP که نیازی به دنبال کردن مسیر نیست، مقصد باید به درستی محقق شود.

۳ نوع کنترل محور استفاده می شود:

- Point-to-point Axis
- Coordinated Axis
- Spindle Axis

**کنترل PTP**

در کنترل PTP:

- ۱- مسیر خیلی مهم نیست و فقط رسیدن به مقصد اهمیت دارد.
- ۲- از مختصات نسبی یا مطلق می توان استفاده کرد.
- ۳- از کنترل حلقه باز با استفاده از stepper motor در کاربردهای قدرت پایین استفاده می شود. برای جلو گیری از فراخیز، قبل از رسیدن به مقصد سرعت باید کم شود. شکل 24-7 کنترل حلقه باز سیستم PTP را نشان می دهد.
- ۴- با اعمال یک پالس، حداکثر فرکانس پالس باید مناسب انتخاب شود. مقدار آن به اینرسی بار و قدرت موتور بستگی دارد. در غیر اینصورت slipping اتفاق می افتد.
- ۵- برای رفع این مشکل از طرح حلقه بسته که در شکل نشان داده شده است می توان استفاده کرد. در این طرح اگر خروجی ورودی را دنبال نکند اضافه توان اعمال می شود تا خروجی مطلوب محقق گردد. حتی در سیستم حلقه بسته، به دلیل وجود backlash باید از فراخیز اجتناب شود. برای این منظور قطعه یا میز فقط به سمت مقدار نهایی با سرعت کم می خزند.

در این روش سیگنال مرجع بصورت پالس اعمال می گردد. با اعمال هر پالس، محور 1BLU جا بجا می شود. به این ترتیب سرعت محور متناسب با فرکانس پالسهاست. این پالسها ممکن است stepper motor و یا یک سیستم کنترل حلقه بسته را فرمان دهد. محدودیت این روش ساده آن است که سرعت محدود است و بیش از فرکانس ساعت \* 1BLU نمی شود.

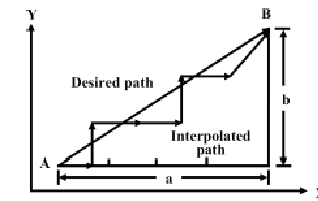
**دستور مقداری reference word**

در این روش سیگنال مرجع بصورت بایت دیتا داده می شود و محدودیتی از نظر اعمال سرعت حرکت ندارد.

**S2.1A.** Is it possible to have a reference pulse interpolator for a CNC machine with dc drive?

**B.** What limits the speed of operation in reference word interpolator based systems?

**حرکت روی خط مستقیم**



برای حرکت 2-D روی یک خط، نسبت بین سرعت محورها باید برابر شیب خط باشد. از آنجا که واحد جابجایی BLU است، برای هر محور فرکانس پالس مناسب توسط میان یاب محاسبه و به کنترلر موتورها اعمال می گردد. شکل نحوه حرکت محورها برای دنبال کردن خط را نشان می دهد.

**حرکت روی خط منحنی**

برای دنبال کردن مسیر منحنی شکل، سرعت محورها باید نسبت به هم با زمان تغییر کند. اگر مسیر دایره ای به شعاع R باشد، سرعت لحظه‌ای پیوسته دو محور برابرند با:

$$V_x(t) = V \sin \theta(t)$$

$$V_y(t) = V \cos \theta(t)$$

این سرعت به کنترلر موتورها اعمال می گردد ولی آنچه حاصل می شود حرکت موتورها در مضارب BLU است (حرکت از یک موقعیت به موقعیت دیگر گسسته است) که در شکل نشان داده شده است. منظور این است که خطایی در محدوده 1BLU ممکن است پدید آید. از شکل فرمولهای بازگشتی زیر بدست می آید.

$$X(i+1) = AX(i) - BY(i)$$

$$Y(i+1) = AY(i) + BX(i)$$

با قرار دادن  $B = \sin \alpha$  و  $A = \cos \alpha$  سیگنالهای سرعت بدست می آید.

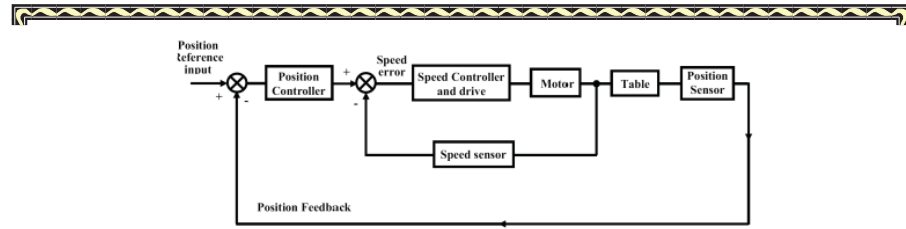
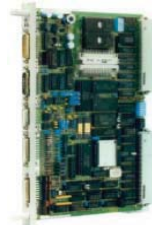


Fig. 24.9 Control loop of a contouring system

۴-۹ برد PLC برای کنترل حرکت موتورهای CNC

PLC، برد خاص برای کنترل دقیق محورهای CNC دارند. این بردها سیگنال سنسورها را دریافت و انواع کنترلرهای محورهای CNC را انجام می دهند. برد شامل:



Position Control Module

- Shaft encoder input
- Onboard dedicated high speed CPU
- Motor drive set point output
- Digital IO
- Programmer port
- Set point from data bus

Fig. 24.10 A typical PLC Function module for Axis Control in a CNC

۱- CPU برای انجام محاسبات و کنترل

۲- two rotational speed set point

۳- شمارنده ۱۶ بیتی برای Incremental encoder

۴- ریجیستر ۲۰ بیت GRAY Code برای Absolute encoders

۵- ورودی برای limit switches set point

۵-۹ موتورها

دو نوع موتور در CNC ها استفاده می شود. این دو موتور DC هستند. برای براده برداری یکنواخت، موتور spindle باید constant power و موتور حرکت ابزار باید constant torque کنترل شوند. همچنین هر دو موتور باید سرعت متغیر باشند. با ساخت درایورهای الکترونیک قدرت که کوچک، با راندمان و با قابلیت اطمینان خوب هستند، موتورهای AC دور متغیر هم در CNC ها جای پیدا کرده اند.

موتور Spindle

موتور spindle دو نوع کنترل می شود. در بعضی فقط سرعت دوران کنترل می شود و در بعضی دیگر هم سرعت و هم زاویه محور کنترل می شود. این کار برای دنده زنی threading نیاز است تا زاویه محور پروفایل خاصی را ثابت دنبال کند. سرعت دوران محور ممکن است در ارتباط با دیگر محورها نیز تعیین شود.

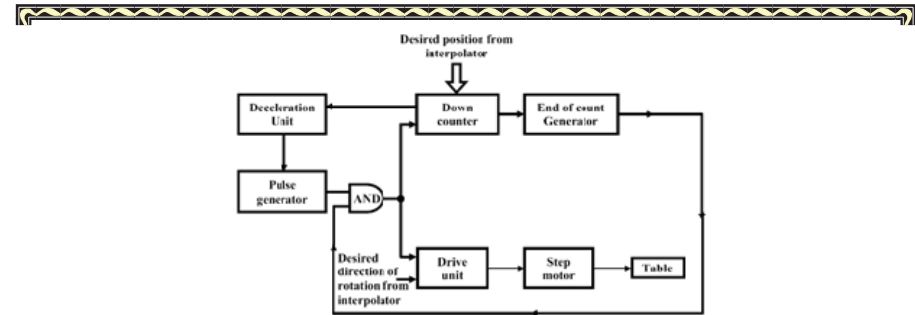


Fig. 24.7 Incremental open-loop control for PTP systems

اگر مختصات مطلق داده شود و سنسورها از نوع incremental باشند نیاز به یک شمارنده است تا پالسها را به شمارد. علاوه بر این جهت گردش برای up یا down شمردن ضروری است

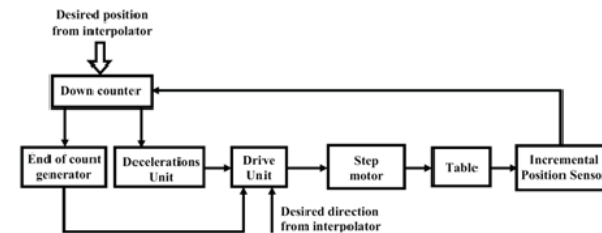


Fig. 24.8 Block diagram of closed-loop incremental PTP system

کنترل کانتوری

در کنترل کانتوری نسبت بین سرعت دو محور باید تنظیم شود تا ابزار یا قطعه مسیر تعیین شده را طی کند. در این سیستمها کنترل حلقه بسته و از نوع زنجیره‌ای است. میان یاب سیگنالهای مرجع را بصورت پالس به کنترلر اعمال می کند. شکل این سیستم کنترل را نشان می دهد. حلقه داخلی دارای سرعت سنج (Tachometer) و حلقه خارجی برای اندازه گیری موقعیت، مجهز به absolute encoder است.

در خروجی انکودر incremental اغلب یک پالس معادل 1 BLU است. اگر خروجی با انکودر incremental اندازه گیری شود، با استفاده از یک شمارنده up/down می توان خطای کنترل را تعیین کرد.

S2.3 A. Do you think the closed loop PTP system control loop would work for arbitrary axis velocities? Justify your answer.

B. What type controllers would you prefer for a cascade position controller for a contouring system?

B. Is there any connection between the choice of coordinate system and the position sensor used for the machine tool?

**Ans:** Among the position sensors used, the most common ones are the linear optical scales or inductosyns which directly measure movement of the table slide with respect to the fixed parts of the machine. The other kinds are the rotary sensors such as the shaft angle encoders and resolvers. The translational motion of the slide is deduced from these using the ball screw pitch constant. Among these, the linear optical scale and the rotary encoder can either give absolute or incremental displacement, depending on the encoding on the grating. However, in fact incremental output is more common, since better resolution can be achieved. Thus, in an absolute coordinate system, this output must be integrated to generate absolute positions by electronic means. The resolver or the inductosyn, on the other hand naturally generate absolute positions with respect to a fixed origin. This means that these signals have to be differenced from the current origin of the incremental system, to generate incremental coordinate positions.

C. How would you decide on the BLU for systems with continuous position sensors such as inductosyns and resolvers?

**Ans:**

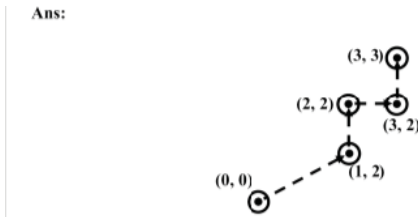
D. Is the BLU affected by the motor or the drive system also?

**S1.4** A: برنامه کاری قطعه نوشته شده در زیر را توضیح دهید.

**Ans:**

N0010G90;	N0010G90: PUT IN ABSOLUTE MODE
N0011G01X1Y2;	N0011G01X1Y2: MOVE TO (1, 2)
N0012G01X2Y2;	N0012G01X2Y2: MOVE TO (2, 2)
N0013G91;	N0013G91: PUT IN INCREMENTAL MODE
N0014G01X1;	N0014G01X1: MOVE TO (3, 2)
N0015G92X2Y2;	N0015G92X2Y2: SET NEW ORIGIN
N0016G01X1Y1;	N0016G01X1Y1: MOVE TO (3, 3) ABSOLUTE
	N0017G92X0Y0Z0: RESET THE ZERO

B. Draw the trajectory of table motion that this program seeks to create.



**S2.1** A. Is it possible to have a reference pulse interpolator for a CNC machine with dc drive?

**Ans:** Yes, it is. Consider a closed loop system with an incremental encoder feedback. Implement an up-down counter with the pulse train from reference pulse interpolator driving the count-up input and the pulse train from the encoder driving the count-down input. The counter value indicates the instantaneous position error which can be used to drive say an analog controller through a DAC.

B. What limits the speed of operation in reference word interpolator based systems?

**Ans:** The servo system dynamics limit it, rather than the interpolator loop execution time. This is especially true when one is cutting angles and corners.

**S 2.2** B. How does one choose the value of  $\alpha$  for circular reference word interpolation?

موتور معمولاً DC است و سرعت متغیر در محدوده 10-20000 RPM را داراست. سرعت نباید تحت تاثیر تغییر سختی قطعه تغییر کند. بنابراین کنترل سرعت با توان ثابت باید انجام گیرد. موتورهای AC امکان تغییر سرعت 10-1000000RPM را فراهم آورده اند.

### موتور حرکت خطی

این موتورها باید گشتاور ثابت تامین کنند و حرکت روان خطی ناشی از دور متغیر 0.1-3000rpm داشته باشند... کنترل موقعیت باید سریع و دقیق باشد. موتور DC سرعت متغیر برای این قسمت استفاده می شود اگرچه اخیراً موتورهای AC سرعت متغیر نیز مورد استفاده قرار گرفته اند...

**S2.4** A. For the motion control board:

a. Where is the interpolator situated?

b. Where are the position and velocity loops situated?

B. Why should a feed drive operate in constant torque mode, while the spindle drive should operate in a constant power mode?

### پاسخ سوالات

**S1.2** A: سنسورهای سیستم PTP و کانتوری را توضیح دهید.

**Answer:** PTP systems require only feedback of position. Contouring axes require feedback of position and velocity both. In PTP systems velocity is varied in open loop to achieve rapid traversal of the table with preprogrammed acceleration, deceleration patterns. However, often the hardware capabilities of the axis conforms to contouring.

B. Do you think the overall machining time can be optimized for PTP and Contouring systems? Are there any constraints to that?

**Ans:** For PTP systems the rapid traverse feature saves overall machining time. This means that the table movements from point to point are carried out as fast as possible, with acceleration and deceleration features. Deceleration is needed, so that the final position is reached accurately and quickly. The extent to which time can be minimized depends on the motoring and braking torque levels of the table drive. For contouring systems the instantaneous ratios of velocities along the motion axes are important to maintain the contours. Therefore over all time has to be minimized maintaining them. Note that whenever the contours take sharp turns, the velocity ratios also do so. Therefore it is very difficult to change the ratios sharply, if the velocities themselves are high. Thus contour cutting around sharp edges have to be done at low speeds. This constrains the minimization of overall machining time to maintain dimensional accuracy.

**S1.3** A. Can you think of one advantage and one disadvantage of the incremental coordinate system compared to the absolute one?

**Ans:** An advantage of the absolute system is that a change in any one a position coordinate in an instruction does not affect the rest of the part program. In the case of the incremental system, any such change would require corresponding changes to be made in all subsequent instructions in the part program. On the other hand, for incremental systems programming for parts with mirror image symmetry is easier, since it involves only changes in signs for the position commands with respect to the symmetrical points. Similarly, verification of program dimensions with drawing is easier with incremental system.



**Ans:** The upper bound is decided by the maximum allowable deviation from a perfect circle. The lower bound is decided by loop execution speed of the interpolator.

**S2.3** A. Do you think the closed loop PTP system control loop would work for arbitrary axis velocities? Justify your answer.

**Ans:** May not be. One of the reasons being that with high axial velocities there would be position overshoots. However, unless the counter can represent negative position errors correctly correct positions would not be reached.

B. What type controllers would you prefer for a cascade position controller for a contouring system?

**Ans:** Typically P or PD controllers are used in the position loop, since there is already one speed to position integration built into the open loop dynamics. Inner velocity loop controllers are generally proportional (usually a servo amplifier).

**S2.4** C. For the motion control board:

a. Where is the interpolator situated?

**Ans:** The interpolator must be situated external to the board, such as, in a PLC processor module.

b. Where are the position and velocity loops situated?

**Ans:** The position loop is implemented in the on-board software. Since the board provides velocity set points, it is assumed that the speed loop exists within the drive system.

D. Why should a feed drive operate in constant torque mode, while the spindle drive should operate in a constant power mode?

**Ans:** Because both torque on the feed drive motor and the power of the spindle motor can be shown to be roughly proportional to the material removal rate in machining. For a required degree of finish, a certain maximum material removal rate is possible. This is set through speed, feed and depth of cut settings. For all possible settings, to be able to obtain the best possible material removal rates, the feed and spindle motors should operate in their constant torque and constant power regions, respectively.