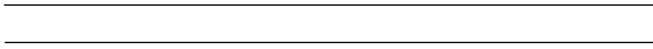
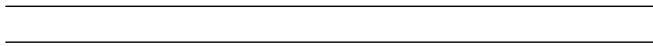
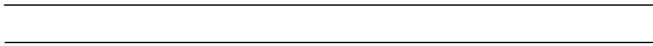




ترجمه و تألیف:
دکتر حمید رضا تقی راد



()



پیشگفتار

PID
PID
PID
PID

PLC

PLC

PLC

STEP 5

PID

۳۴	۲-۱- مقدمه
	PLC
	PLC
۴۱	۲-۲- سخت افزار PLC
	Triac
۴۸	۲-۳- برنامه نویسی PLC
۵۵	۲-۴- مثالهای برنامه نویسی
	OR " " AND " "
	AR
	D-OFF
	D-OFF
۶۲	۲-۵- مثالهای کاربردی
	ON/OFF

فهرست

ج	پیشگفتار
۵	فهرست
۲	فصل اول: اتوماسیون توسط سیستمهای نیوماتیک
۲	۱-۱- مقدمه
۲	۱-۲- اجزاء سیستم نیوماتیک
۱۴	۱-۳- کنترل وضعیت جکهای نیوماتیک
۱۹	۱-۴- کنترل حرکت ترتیبی چند جک نیوماتیک
۲۳	۱-۵- مدارهای موازی
۲۷	۱-۶- جمع بندی
۲۸	مسائل
۳۰	مراجع
۳۴	فصل دوم: کنترل کننده های منطقی برنامه پذیر PLC

۱۴۵	..... ۳-۵- مدلسازی فرآیندهای حرارتی.....
	..... Conduction
	..... Convection

۱۵۲	..... ۳-۶- جمع بندی.....
۱۵۳	..... مسائل.....
۱۶۹	..... مراجع.....
۱۷۲	..... فصل چهارم: روشهای شناسائی فرآیند.....
۱۷۲	..... ۴-۱- مقدمه.....
۱۷۳	..... ۴-۲- مدل‌های دینامیکی.....

۱۷۵	..... ۴-۳- روشهای پاسخ پله.....

۱۸۵	..... ۴-۴- روشهای پاسخ فرکانسی.....
	..... Z.N.

۱۸۹	..... ۴-۵- روشهای شناسایی پارامتریک.....

	..... L.S.
	..... L.S. (
 (

۶۸	..... ۲-۶- مثالهای صنعتی.....

۷۷	..... ۲-۷- مقدمه ای بر برنامه نویسی STEP5.....

	..... Step5
۱۰۴	..... ۲-۸- جمع بندی.....
۱۰۵	..... مسائل.....
۱۱۰	..... مراجع.....
۱۱۴	..... فصل سوم: مدلسازی فرآیندهای صنعتی.....
۱۱۴	..... ۳-۱- مقدمه.....

۱۱۷	..... ۳-۲- مدلسازی سیستمهای صنعتی.....

 ()

۱۲۸	..... ۳-۳- خطی سازی ریاضی.....
 :
 :

۱۳۴	..... ۳-۴- مدلسازی سیستمهای هیدرولیکی.....

 ()

۲۵۸	فارسی - انگلیسی
۲۶۴	انگلیسی - فارسی
۲۷۰	فهرست راهنما

۱۹۴	۴-۶- خلاصه و جمع بندی
۱۹۶	مسائل
۱۹۹	مراجع
۲۰۲	فصل پنجم: طراحی، تنظیم و پیاده سازی کنترل کننده PID
۲۰۲	۵-۱- تعاریف و مفاهیم
	..... PID

۲۰۷	۵-۲- در چه فرآیندهایی کنترل کننده PID کافی است؟
۲۰۸	۵-۳- پیاده سازی کنترل کننده ها

۲۲۷	۵-۴- طراحی کنترل کننده PID

	..... Ziegler-Nichols

۲۴۶	۵-۵- جمع شوندهگی انتگرال گیر Integrator Windup
۲۵۰	۵-۶- کنترل سیستمهای با تأخیر
۲۵۳	مسائل
۲۵۶	مراجع
۲۵۸	واژه نامه

فصل اول

اتوماسیون توسط سیستمهای نیوماتیک

فصل اول: اتوماسیون توسط سیستمهای نیوماتیک

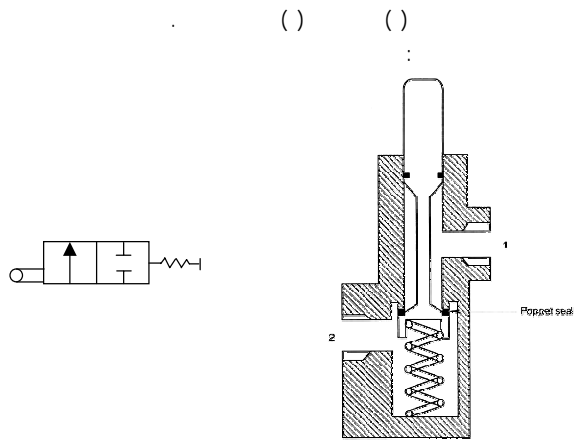
۱-۱- مقدمه

(Pneumatic)
(Pneumos) (

۱-۲- اجزاء سیستم نیوماتیک

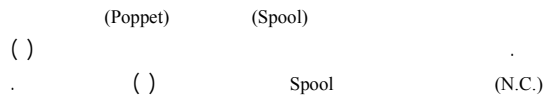
۱-۲-۱- انواع شیرهای نیوماتیک

(directional valve)

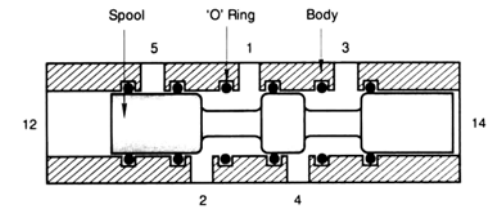
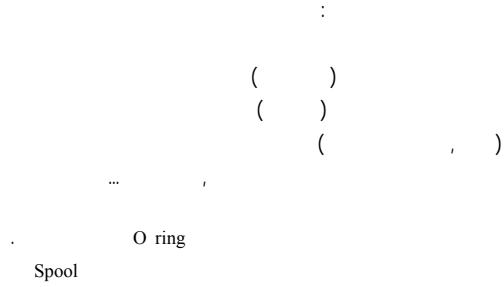
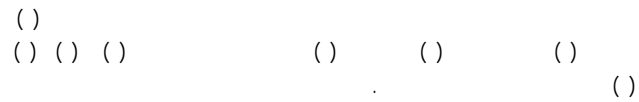


شکل ۱-۲ شیر کنترل وضعیت ۲×۲ و شماتیک نمایش آن در مدارهای نیوماتیک

(ب) شیر ۳×۲ (سه ورودی - خروجی، دو وضعیتی)



(ب) شیر کنترل وضعیت ۴×۲ یا ۴×۳



شکل ۱-۱ اجزاء داخلی یک شیر کنترل وضعیت

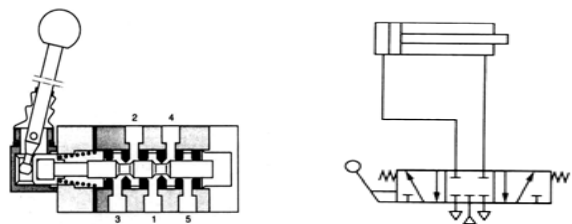
()

(الف) شیر ۲×۲ (دو در دو به معنای دو پورت ورودی - خروجی و دو وضعیتی)



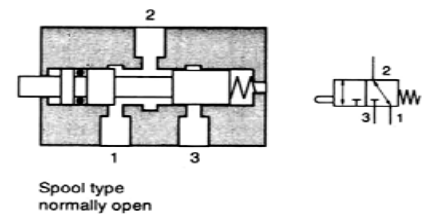
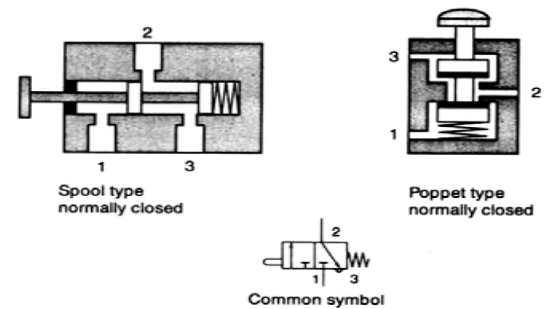
ت) شیر کنترل وضعیت ۵×۲ یا ۵×۳

()

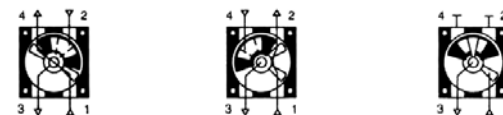
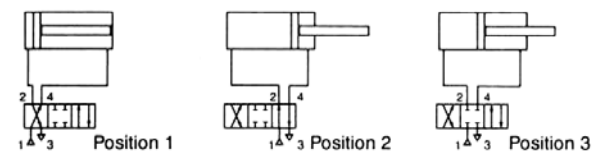


شکل ۱-۴ یک نوع شیر کنترل وضعیت ۵×۳ و نحوه نمایش سمبولیک آن در نقشه های نیوماتیکی

۱-۲-۲- نحوه فعال سازی شیرهای کنترلی



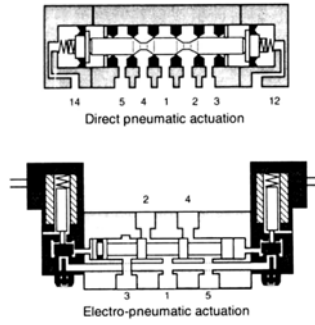
شکل ۱-۳ شیر کنترل وضعیت ۳×۲



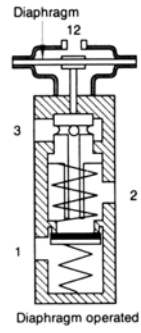
شکل ۱-۳ یک نوع شیر کنترل وضعیت ۴×۳ و نحوه نمایش سمبولیک آن در نقشه های نیوماتیک

پ) تحریک نیوماتیکی یا پیلوت

(Spool)



(Poppet)



شکل ۱-۷ انواع متدهای تحریک نیوماتیکی یا پیلوت شیرهای کنترل

ت) تحریک الکتریکی

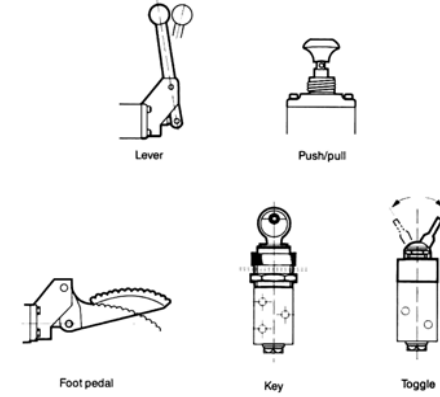
Spool

Spool

Spool

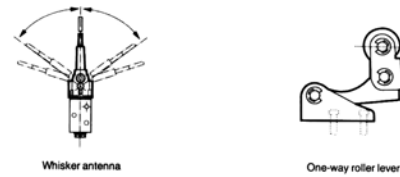
*

الف) تحریک دستی



شکل ۱-۵ انواع متدهای تحریک دستی شیرهای کنترلی

ب) تحریک مکانیکی

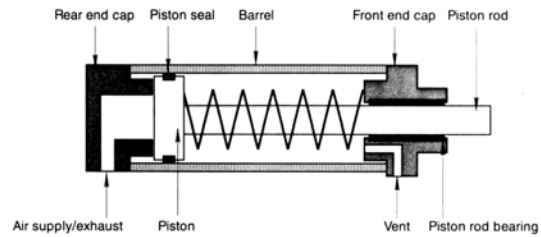


شکل ۱-۶ انواع متدهای تحریک مکانیکی شیرهای کنترلی

۳-۲-۱- عملگرهای نیوماتیکی

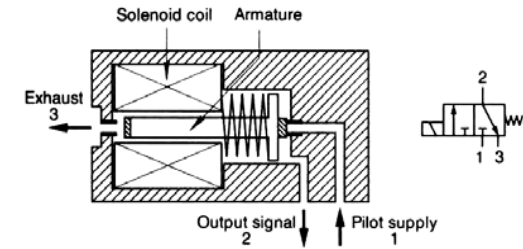
()
 ()
 ()

الف) جکهای یک محوره - یک طرفه



شکل ۱-۱۰ یک نوع جک یک محوره - یک جهته

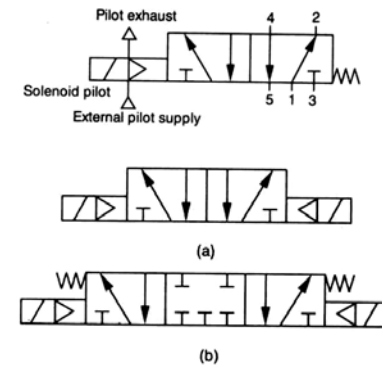
ب) جکهای دیافراگمی یک طرفه



شکل ۱-۸ یک نوع شیر ۳×۲ که از تحریک الکترو-نیوماتیک استفاده می کند

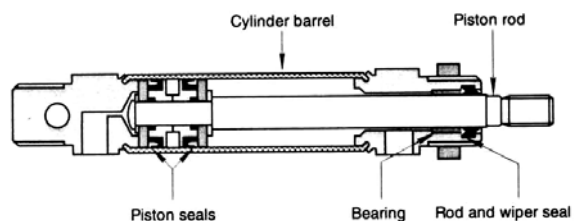
Spool

Spool
 () ()
 * *



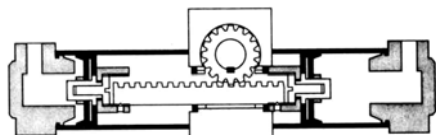
شکل ۱-۹ نمایش مداری شیرهای تحریک شونده الکترو-نیوماتیکی

ت) جکهای دوطرفه

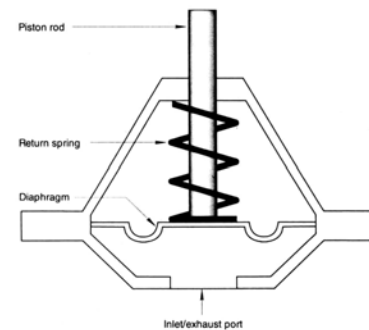


شکل ۱-۱۳ یک نوع عملگر جک دو طرفه

ث) محرکهای نیم دورانی (مولدهای گشتاور)



شکل ۱-۱۴ یک نوع محرک نیمه دورانی یا مولد گشتاور

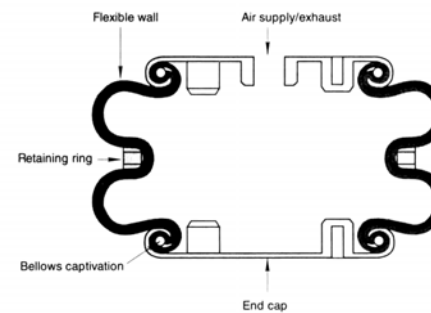


شکل ۱-۱۱ یک نوع جک دیافراگمی یک طرف





پ) بالشتک هوایی (Air Bellows)

()

()



شکل ۱-۱۲ یک نوع عملگر بالشتک هوایی

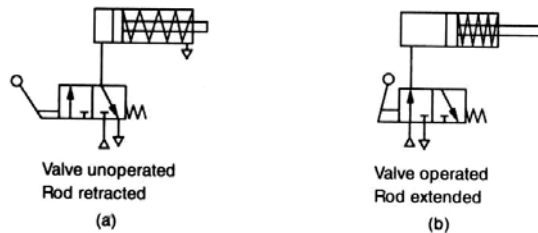
Type	Displacement motors			
Characteristic	Radial piston motor	Linked piston motor	Vane motor	Gear motor
				
Max. operating pressure (bar)	10	8	8	10
Rated power (kW)	1.5 to 30	1 to 6	0.1 to 18	0.5 to 5
Max. speed (rpm)	6000	5000	30000	15000
Specific air consumption (l/kJ)	15 to 23	20 to 25	20 to 50	30 to 50
Lubrication	Sump and/or with compressed air	Sump and/or with compressed air	Compressed air	Compressed air

شکل ۱۶-۱ جدول مقایسه موتورهای نیوماتیکی

۱-۳- کنترل وضعیت جکهای نیوماتیک

۱-۳-۱- کنترل حرکت یک جک یک طرفه

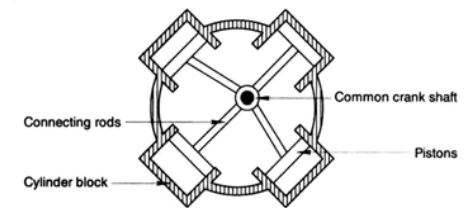
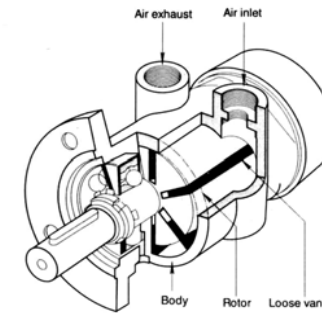
(N.C) *

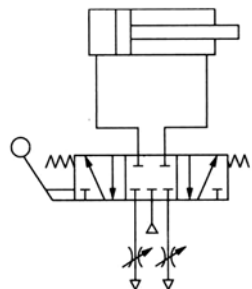


شکل ۱۷-۱ کنترل حرکت یک جک یک طرفه

ج) محرکهای دورانی

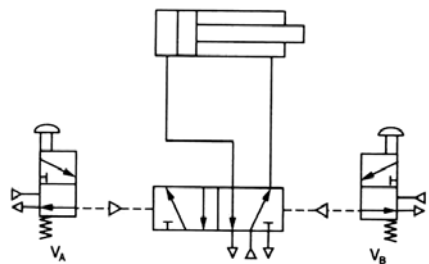
(Vane Motor)





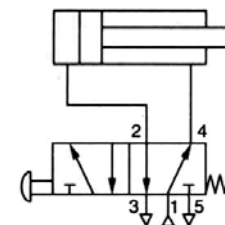
شکل ۱-۱۹ کنترل حرکت یک جک دوطرفه با شیر ۵×۳

()



شکل ۱-۲۰ عملکرد یک جک دوطرفه توسط شیرهای کنترل و فرمان پیلوت

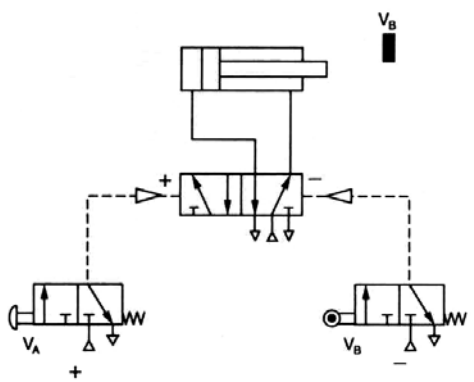
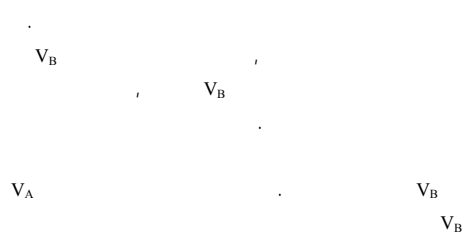
۲-۳-۱- کنترل حرکت یک جک دوطرفه



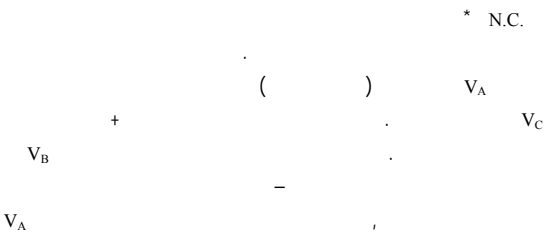
شکل ۱-۱۸ کنترل حرکت یک جک دو طرفه توسط شیر ۵×۲

()

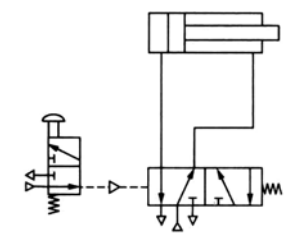
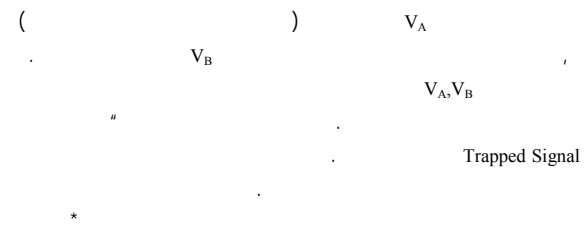
۳-۳-۱- کنترل شیر با استفاده از فشار پیلوت



شکل ۲۲-۱ عملکرد اتوماتیک یک جک دوطرفه



* N.C.



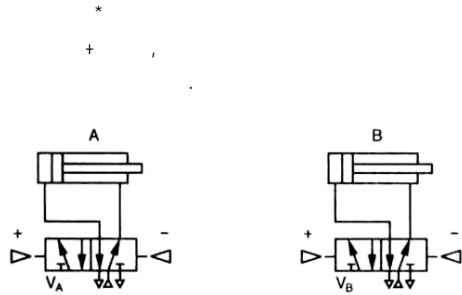
شکل ۲۱-۱ عملکرد یک جک دوطرفه توسط یک شیر کنترل فرمان پیلوت

۴-۳-۱- کنترل اتوماتیک عملیات

PLC

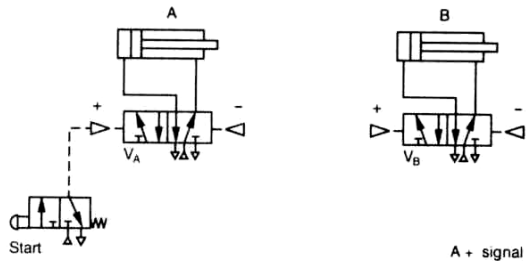
(Pneumatic Trip valve)

A+B+A-B-repeat

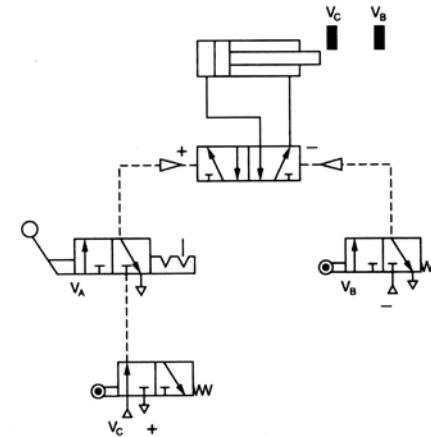


شکل ۱-۲۴ مرحله اول. انتخاب شیرهای اصلی

.A+

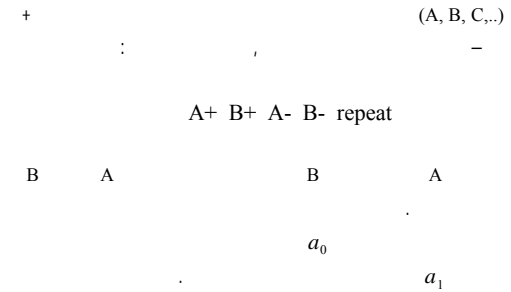


شکل ۱-۲۵ مرحله دوم. طراحی حرکت اول

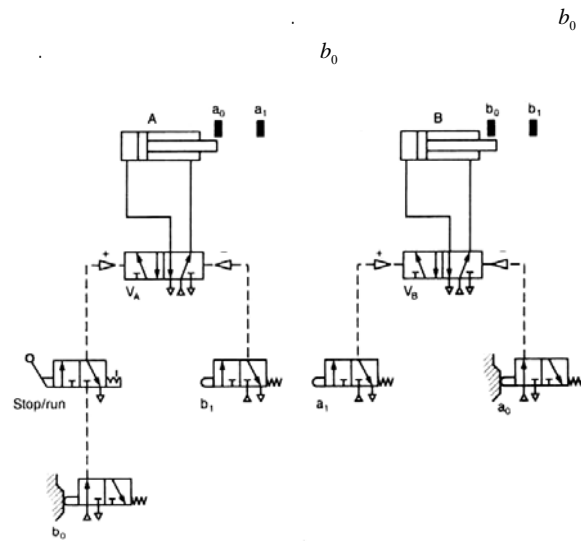


شکل ۱-۲۳ عملکرد اتوماتیک سیکلیک یک جک دوطرفه توسط دو شیر فرمان

۱-۴- کنترل حرکت ترتیبی چند جک نیوماتیک

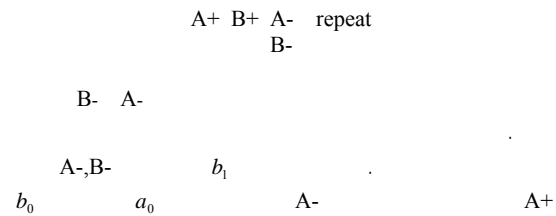


۱-۴-۱- حرکت ترتیبی دو جک



شکل ۲۸-۱ طرح نهائی حرکت اتوماتیک دو جک A,B

۲-۴-۱- ایجاد دو حرکت همزمان



A+ B+ A- repeat
B-

B- A-

A-,B-

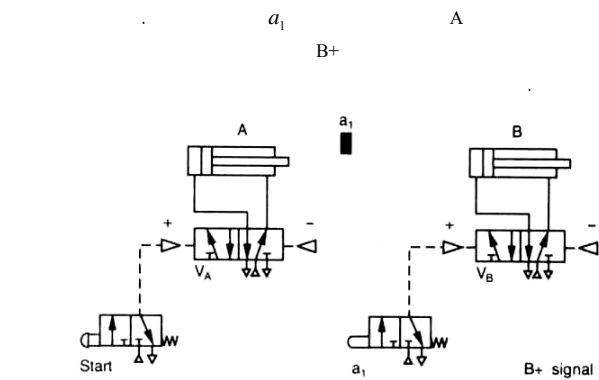
b1

b0

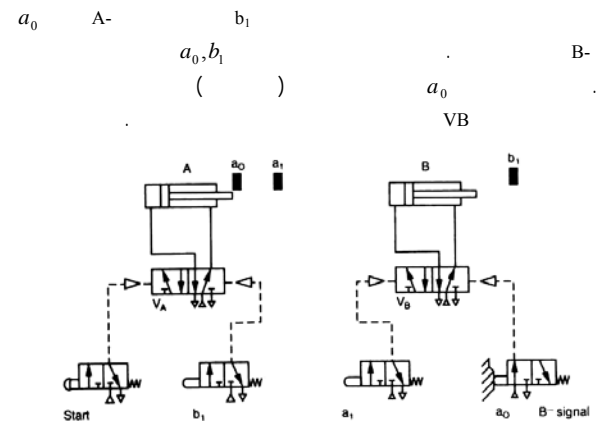
a0

A-

A+



شکل ۲۶-۱ مرحله سوم استفاده از شیر پیلوت a1 در حرکت B+



شکل ۲۷-۱ اجرای مرحله چهارم قرارگیری a0, b1 در مسیر مدار فرمان

b0

B-

۱-۵-۱- طراحی مدار موازی

A+ B+ A- B- repeat

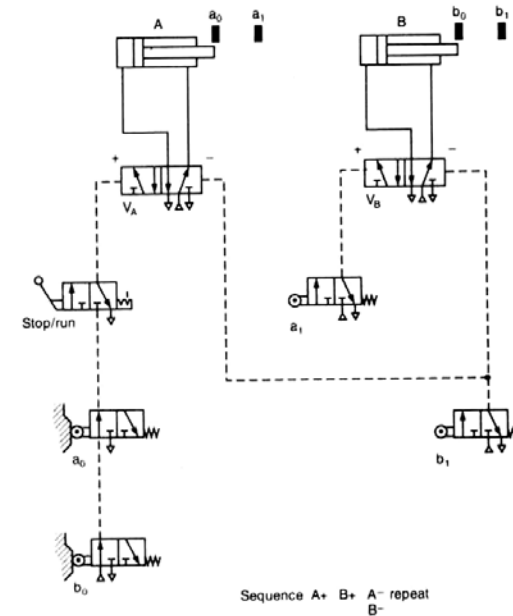
A+ B+ /B- A-
GI GII

A+B+ | A-C+D+ | D-C-B-
I II III

A+B+ | A-C+D+ | D-C-B-
I II I

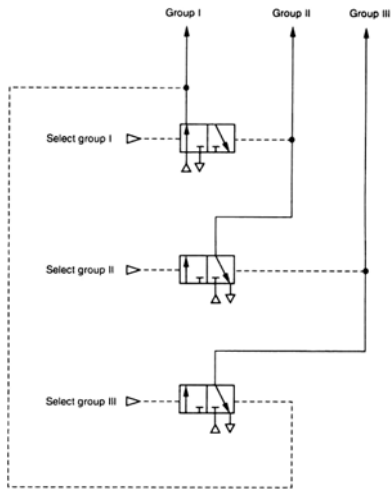
* *
GII GI

*



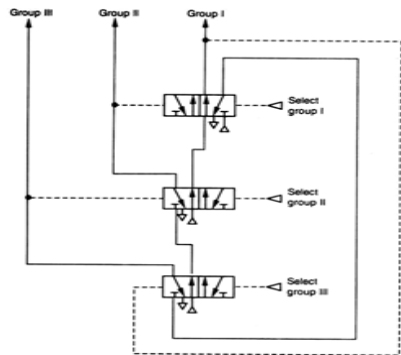
شکل ۱-۲۹ طرح سیستم نیوماتیک لازم جهت ایجاد دو حرکت همزمان در یک سیکل

۱-۵- مدارهای موازی

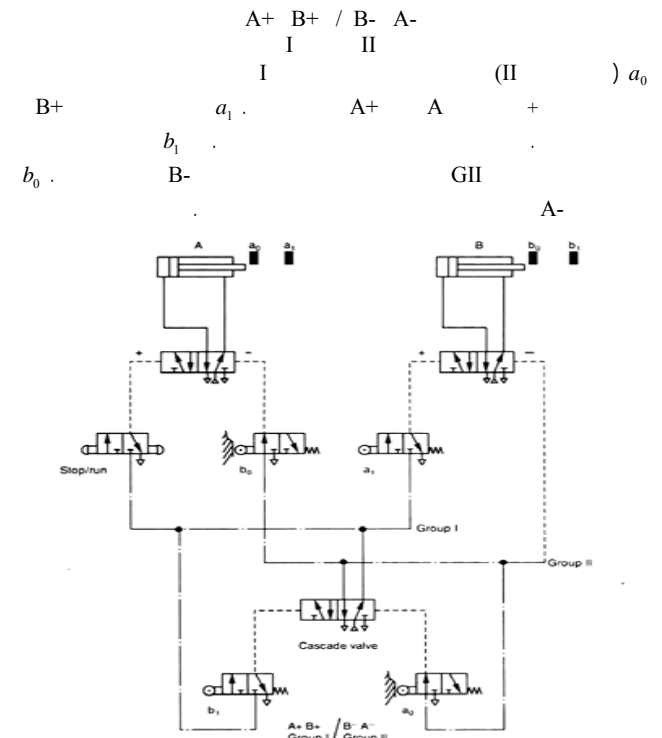


شکل ۳۱-۱ استفاده از سه شیر ۲×۳ برای ایجاد سه خط موازی

*



شکل ۳۱-۱ استفاده از سه عدد شیر ۲×۵ برای ایجاد سه خط موازی



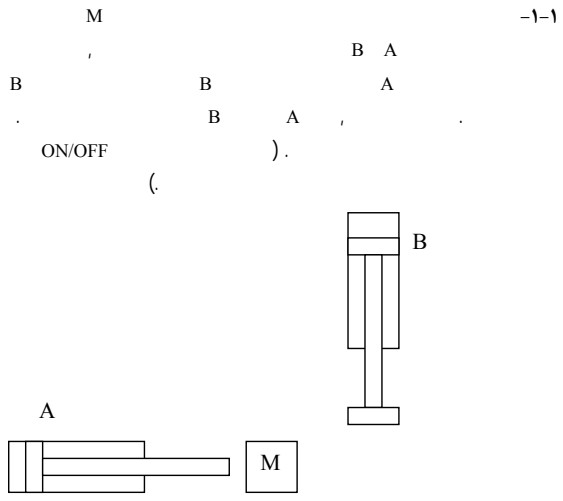
شکل ۳۰-۱ مدار موازی جهت ایجاد ترتیب حرکتی A+B+B-A-

۲-۵-۱- ترتیب طراحی شیرهای مدار موازی

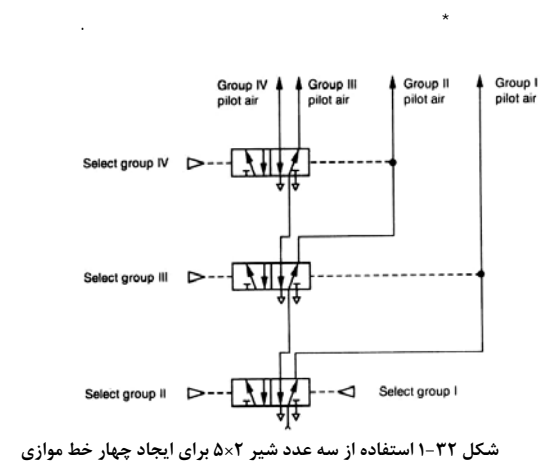
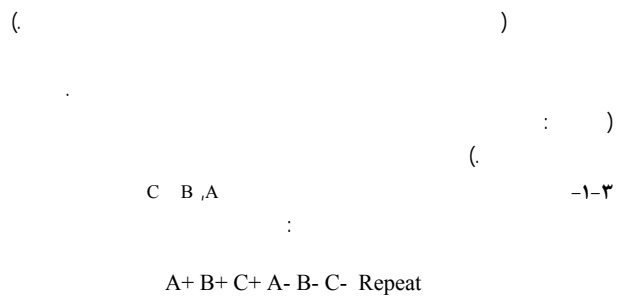
GII,GI

GIII,GII,GI

مسائل



1-2)



شکل ۱-۳۲ استفاده از سه عدد شیر ۵×۲ برای ایجاد چهار خط موازی

۱-۶- جمع بندی

مراجع

- [1] Barber, Antony, *Pneumatic handbook*, 8th ed. Elsevier Science, 1997.
- [2] Bolton, W, *Pneumatic and hydraulic system*, Butterworth Heinemann, 1997.
- [3] Fleischer, Henry, *Manual of pneumatic systems optimization*, McGraw-Hill, 1995.
- [4] Goodman, Robert B., *A primer on pneumatic valves and controls*, Krieger Pub., 1997.
- [5] Hehn, Anton H., *Fluid power troubleshooting*, 2nd ed, Marcel Dekker, 1995.
- [6] Majumdar, S. R., *Pneumatic systems : principles and maintenance*, McGraw-Hill, 1996
- [7] Mills, David, *Pneumatic conveying systems : design, selection, operation and troubleshooting with particular reference to pulverized fuel ash*, Trans Tech Publications, 2001
- [8] Paterson, E. B., *Pneumatics in industry: System design and vibration isolation*, McGraw-Hill, 1984.
- [9] Peterson, E.B., *Pneumatics in Industry: system design and vibration isolation*, McGraw-Hill, 1984.
- [9] Pinches, Michael J. and Brian J. Callear. *Power pneumatics*, Prentice Hall, 1997.
- [10] Yeaple, Franklin D., *Fluid power design handbook*, 3rd ed., Marcel Dekker, 1996

(Trapped Signal)

MG-20 : -1-٤

C B ,A

B+ A+ B- C+ C- Repeat

A-

Cascade -1-٥

Start/Stop

A

) . ON/OFF

(

A, B, -1-٦

C, D

:

A + B + A - C + C - D - D + repeat

B -

B-, C -

start/stop (Cascade)

فصل دوم

کنترل کننده های منطقی برنامه پذیر (PLC)

فصل دوم: کنترل کننده های منطقی برنامه پذیر PLC

PLC

PLC

Siemens

PLC

STEP5

۲-۱- مقدمه

۲-۱-۱- اصول PLC

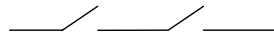
PLC

PLC

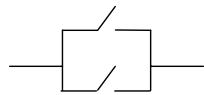
PLC

PLC

PLC



A	B	A · B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



A	B	A + B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

A) Commutative Laws

$$A + B = B + A$$

$$A \cdot B = B \cdot A$$

B) Associated Laws

$$A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot C$$

$$A \cdot (B + C) = (A \cdot B) + C$$

C) Distributive Laws

$$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$$

$$A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$$

D) Absorption Laws

$$A \cdot (A + B) = A$$

$$A + (A \cdot B) = A$$

E) Involution

$$\overline{\overline{A}} = A$$

PLC

PLC

OFF	:	ON	:
Shut	:	Open	:
False	:	True	:

(Proximity switch Limit switch)

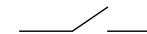
(OFF)

(ON)

(Boolean)

A=1

A=0



A	\overline{A}
1	0
0	1

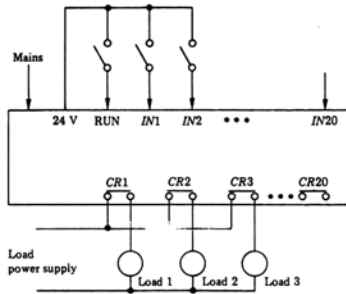
A
" " (AND) " "

(N.C.)

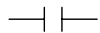
(N.O.)

\overline{A}

(OR)
(OR) " " (AND) " "



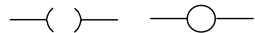
شکل ۱-۲: نمایش شماتیک کلی PLC



N.O.



N.C.



Counters

Timers

PLC

Statement List (STL)

STL

PLC

STL

F) Inversion Laws (De Morgan's Theorem)

$$\overline{(A + B)} = \bar{A} \cdot \bar{B}$$

$$\overline{(A \cdot B)} = \bar{A} + \bar{B}$$

$$\overline{A + B}$$

$$\text{NOR } \bar{A} \cdot \bar{B}$$

$$\text{NAND}$$

۲-۱-۲- شماتیک کلی PLC

PLC

()

PLC

PLC

N.C. N.O.

PLC

PLC

PLC

PLC

PLC

PLC

PLC

IN5

PLC

CR7

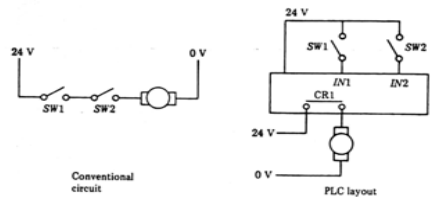
PLC

()

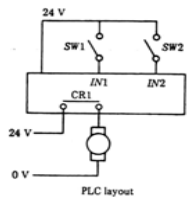
(Control Relay 7)

۲-۱-۳- نمایش منطق به صورت نردبانی

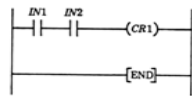
PLC



Conventional circuit



PLC layout

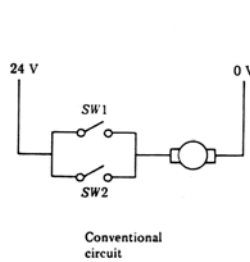


Ladder diagram

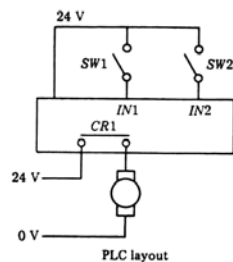
Address	Instruction	Data
0	LOAD	IN1
1	AND	IN2
2	OUT	CR1
3	END	

Program

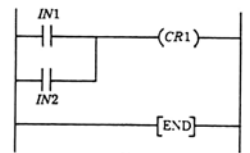
شکل ۲-۲ پیاده سازی مدار سری توسط PLC



Conventional circuit



PLC layout



Ladder diagram

Address	Instruction	Data
0	LOAD	IN1
1	OR	IN2
2	OUT	CR1
3	END	

Program

شکل ۲-۳ پیاده سازی مدار موازی توسط PLC

	Load (LD)
	Load Not (LDN)
" "	AND
" "	AND NOT
" "	OR
" "	OR NOT
	OUT

STL

N.O.

sw1,sw2

PLC

PLC

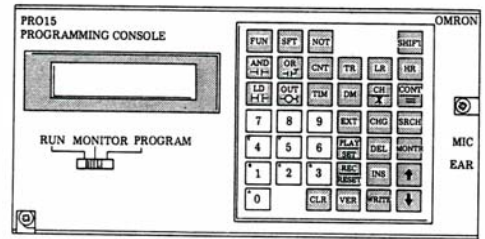
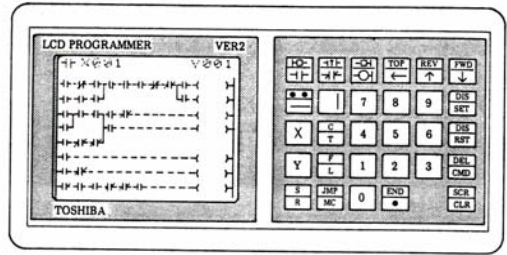
.PLC

PLC

PLC

RAM, ROM

PLC
 EEPROM EPROM
 (Programmer) PG
 LCD PG PLC



شکل ۲-۵ پروگرامر PLC

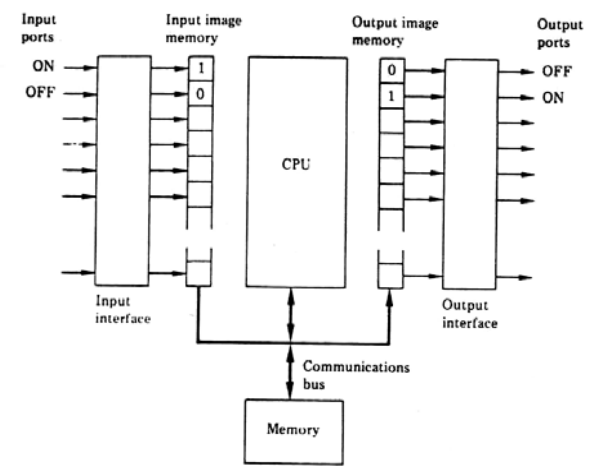
PLC
 (register)
 (byte) (nibble)
 (word)

PLC

۲-۲ سخت افزار PLC

۲-۲-۱ مقدمه

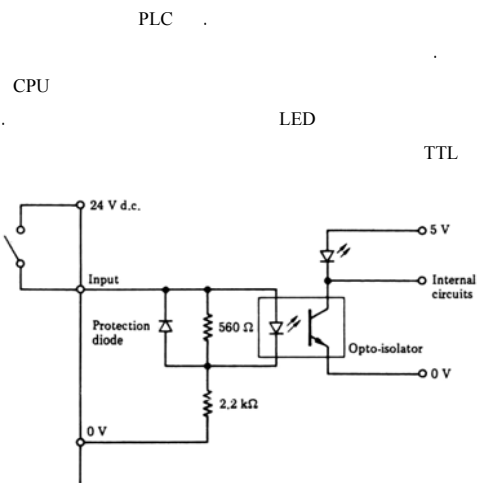
PLC



شکل ۲-۴ سخت افزار PLC

(Memory) (CPU) PLC
 () PLC
 (0,1)
 CPU PLC
 CPU

۲-۲-۲- ورودیهای دیجیتال ایزوله نوری



شکل ۶-۲ مدار واسط ایزولاتور نوری

۲-۲-۳- رله های خروجی

PLC

0 (flag) 1
CPU CPU

PLC (auxiliary relay)

PLC

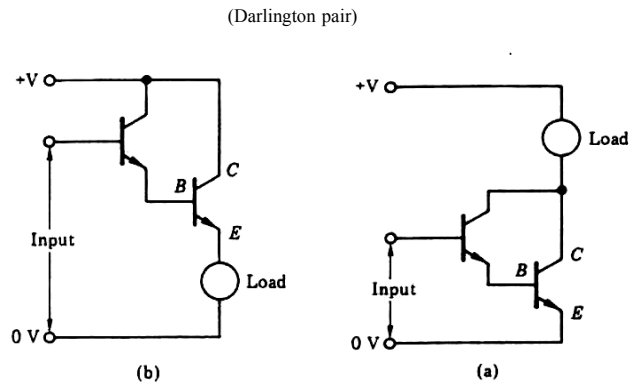
(Binary Counter) ,PLC

PLC

PLC ,Timers (Clock)

PLC

PLC



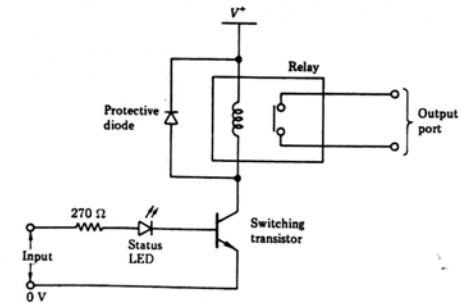
شکل ۲-۹ طبقه خروجی دارلینگتون

(b) (a)

۲-۲-۵- خروجی تریاک Triac

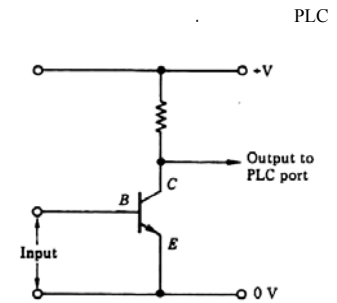
AC

(ZCC)



شکل ۲-۷ طبقه خروجی رله در PLC

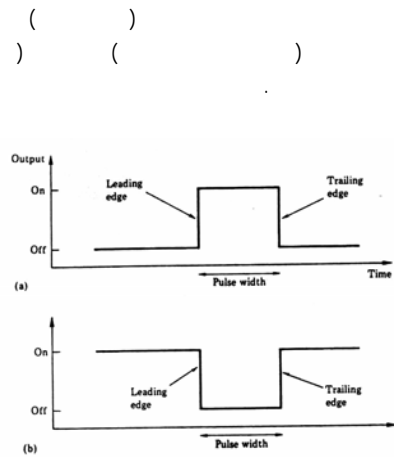
۲-۲-۴- خروجیهای ترانزیستوری



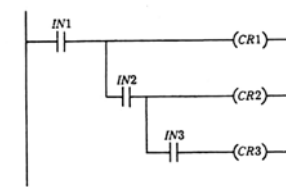
شکل ۲-۸ سوئیچ ترانزیستوری NPN

CR1)
 PLC AR1 , (CR1
 پ (تایمرها
 CPU
) / / (

پ (1) تایمرهای پالسی



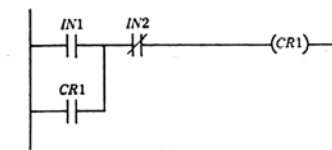
شکل ۱۴-۲ دو نوع مختلف از تایمرهای پالسی (a) جهت مثبت (b) جهت منفی



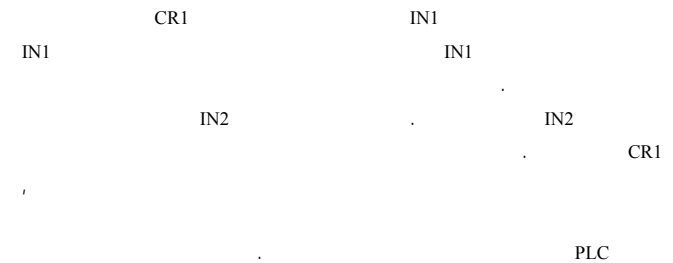
شکل ۱۱۰-۲ خروجیهای متعدد

پ (ب) لچ کردن کنتاکت ورودی (Latching)

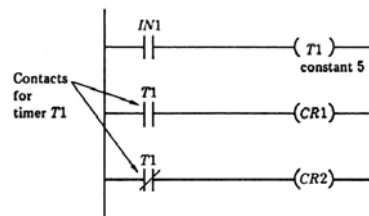
(Push-button)



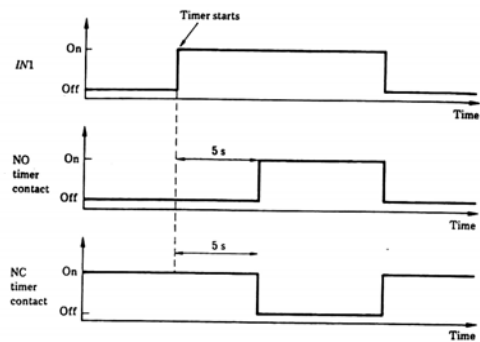
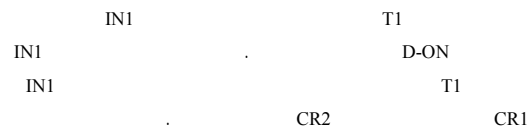
شکل ۱۱۰-۲ مدار لچ



Delay ON, Default

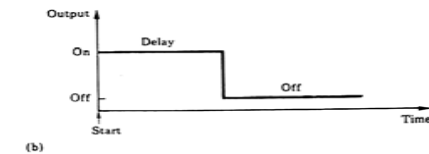
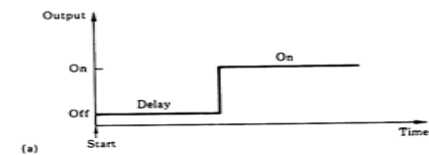


شکل ۱۶-۲ مدار تایمر در دیاگرام نردبانی



شکل ۱۷-۲ دیاگرام زمانی روشن و خاموش شدن خروجیهای تایمر

پ ۲) تایمر روشن ساز با تأخیر (Delay On)



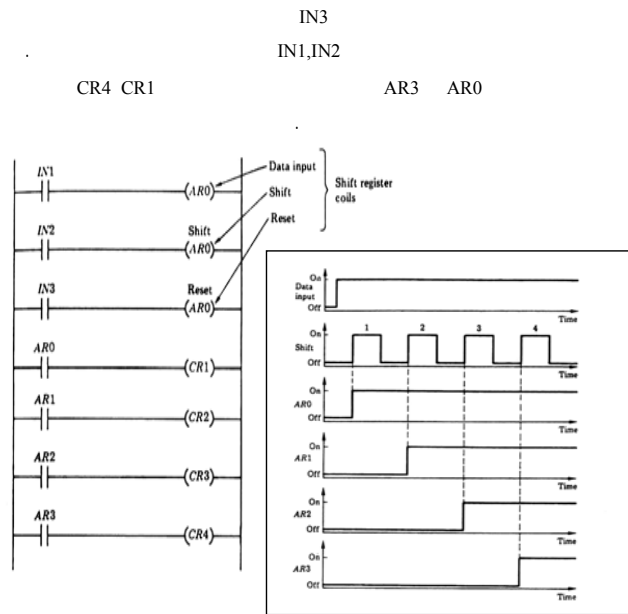
شکل ۱۵-۲ تایمرهای روشن ساز با تأخیر و خاموش شونده با تأخیر

پ ۳) تایمر خاموش شونده با تأخیر (Delay OFF)

PLC ,Delay ON
Default
Delay ON (b)

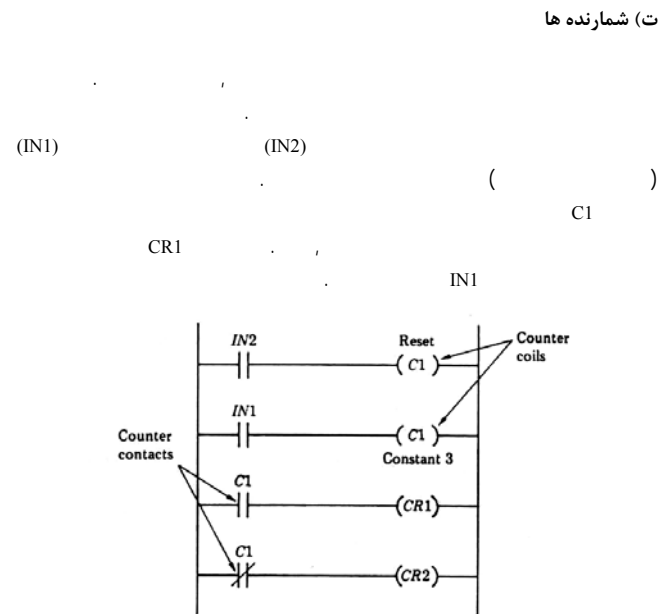
پ ۴) تایمر سیکلی

PLC



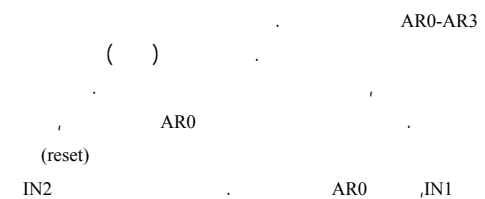
شکل ۱۹-۲ مدار شیفت رجیستر و نحوه روشن شدن رجیستر

ج) زیر برنامه ها و پرش در برنامه



شکل ۱۸-۲ مدار شمارنده نردبانی

ث) شیفت رجیستر

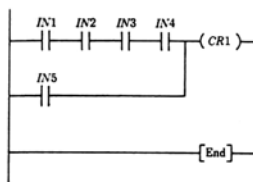


۲-۴-۲- جمع کردن چندین "و" AND و "یا" OR

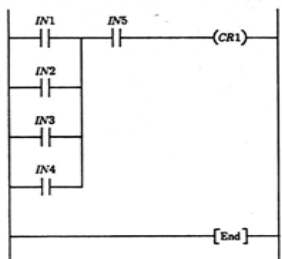
(") " " IN4 IN1

CR1

(") " " IN5



Address	Instruction	Data
0	LOAD	IN1
1	AND	IN2
2	AND	IN3
3	AND	IN4
4	OR	IN5
5	OUT	CR1
6	END	

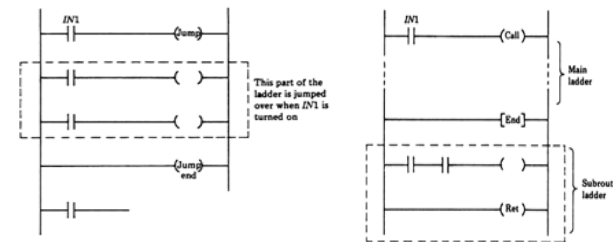


Address	Instruction	Data
0	LOAD	IN1
1	OR	IN2
2	OR	IN3
3	OR	IN4
4	AND	IN5
5	OUT	CR1
6	END	

شکل ۲-۲۲ جمع کردن چند منطق "و" و "یا"

۲-۴-۳- جمع کردن یک بلوک منطقی

(Function Block)



شکل ۲-۲۱ نمایش برنامه های پرش و زیر برنامه ها

۲-۴-۴- مثالهای برنامه نویسی

STL

۲-۴-۱- روشن و خاموش کردن دو خروجی با یک کلید

IN1

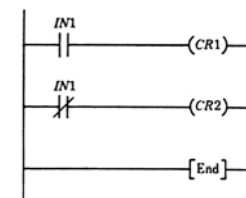
CR2 CR1

CR1

IN1

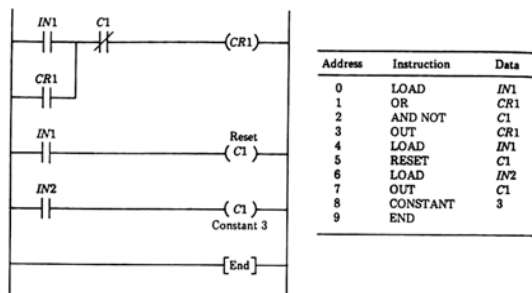
ST1

CR2 CR1



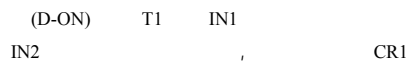
Address	Instruction	Data
0	LOAD	IN1
1	OUT	CR1
2	LOAD NOT	IN1
3	OUT	CR2
4	END	

شکل ۲-۲۱ روشن و خاموش کردن دو خروجی با یک کلید



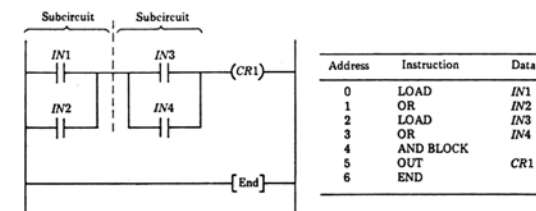
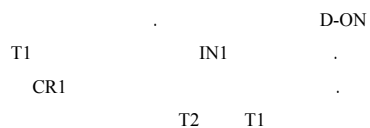
شکل ۲-۲۵ قطع کردن مدار لچ توسط شمارنده

۲-۴-۶- خاموش کردن و تحریک یک تایمر با یک ورودی



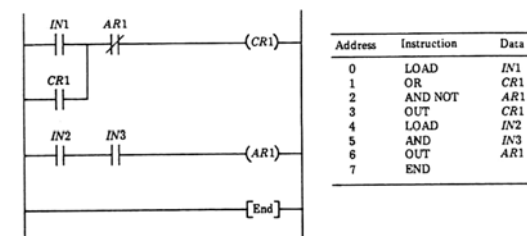
شکل ۲-۲۶ خاموش شدن تحریک یک تایمر توسط ورودی IN2

۲-۴-۷- ایجاد یک پالس توسط دو تایمر



شکل ۲-۲۳ جمع کردن یک بلوک منطقی

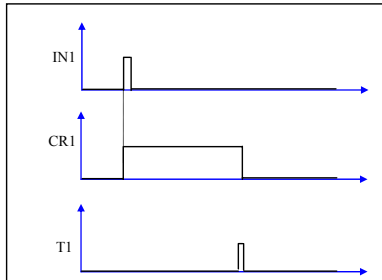
۲-۴-۴- قطع کردن مدار لچ توسط خروجی غیر واقعی AR



شکل ۲-۲۴ قطع کردن مدار لچ توسط AR

۲-۴-۵- قطع کردن مدار لچ توسط شمارنده

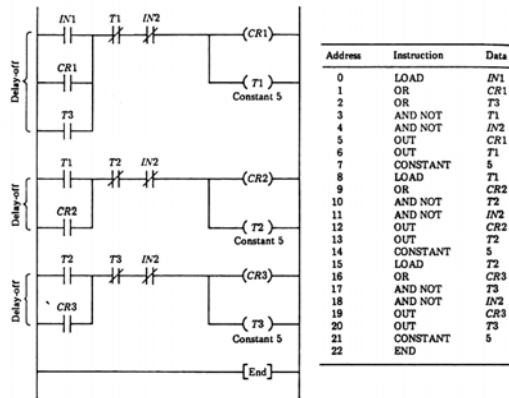




شکل ۲۹-۲ زمانبندی روشن شدن CR1 در ساخت تایمر D-OFF

۲-۴-۹- روشن کردن ترتیبی خروجیها توسط تایمر D-OFF

CR1,CR2,CR3



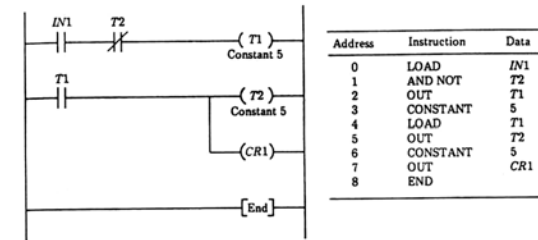
شکل ۳۰-۲ روشن کردن ترتیبی خروجیها توسط تایمر D-OFF

IN1
T1 T1 CR1

T2

T1, T2

T1

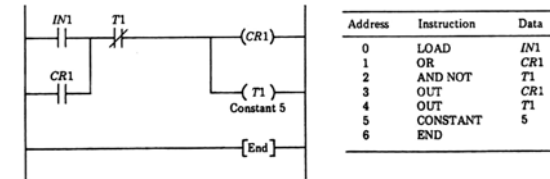


شکل ۲۷-۲ ایجاد یک پالس توسط دو تایمر

۲-۴-۸- تایمر D-OFF

D-Off

D-ON



شکل ۲۸-۲ تایمر D-OFF

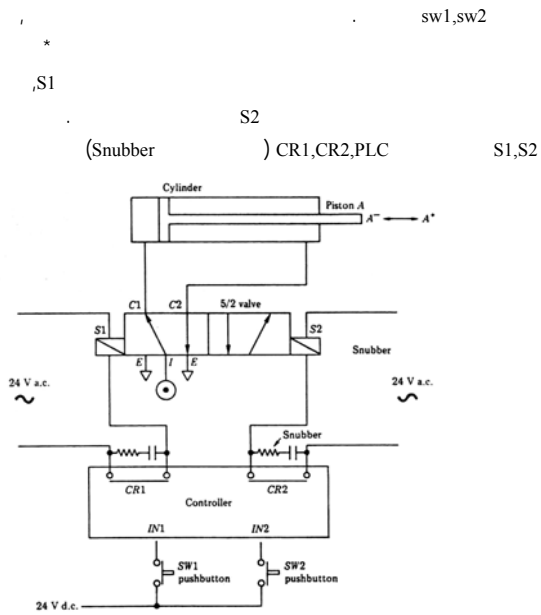
T1 CR1 ,IN1

CR2

۲-۵- مثالهای کاربردی

PLC

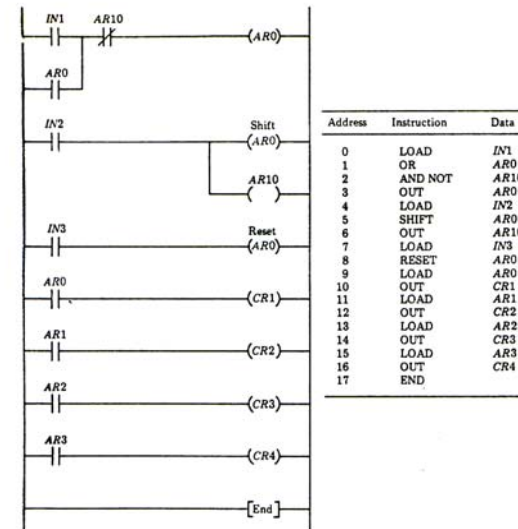
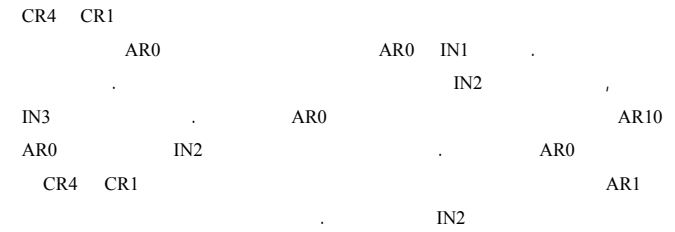
۲-۵-۱- حرکت دادن یک عملگر هیدرولیک یا نیوماتیک



شکل ۲-۳۲- سخت افزار الکترو هیدرولیکی برای حرکت پیستون در دو جهت



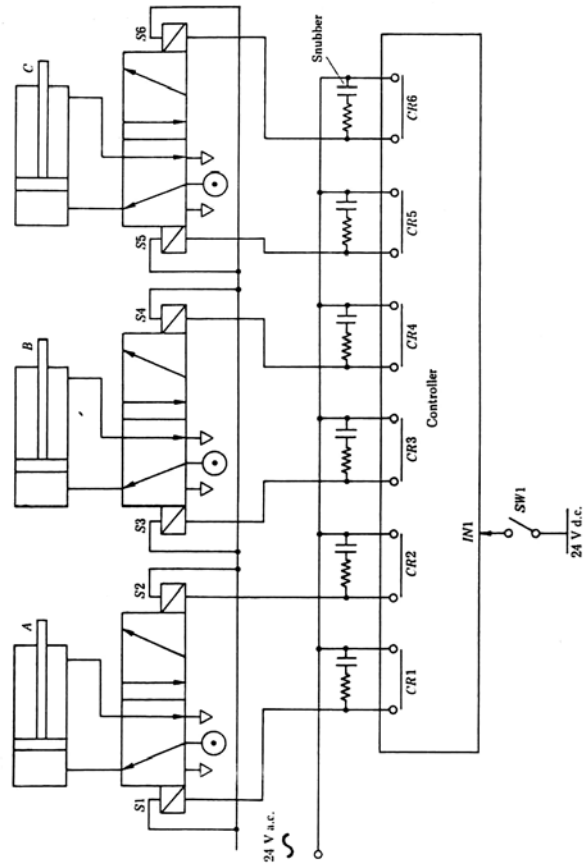
۲-۴-۱۰- روشن کردن ترتیبی توسط شیفت رجیستر



Address	Instruction	Data
0	LOAD	IN1
1	OR	AR0
2	AND NOT	AR10
3	OUT	AR0
4	LOAD	IN2
5	SHIFT	AR0
6	OUT	AR10
7	LOAD	IN3
8	RESET	AR0
9	LOAD	AR0
10	OUT	CR1
11	LOAD	AR1
12	OUT	CR2
13	LOAD	AR2
14	OUT	CR3
15	LOAD	AR3
16	OUT	CR4
17	END	

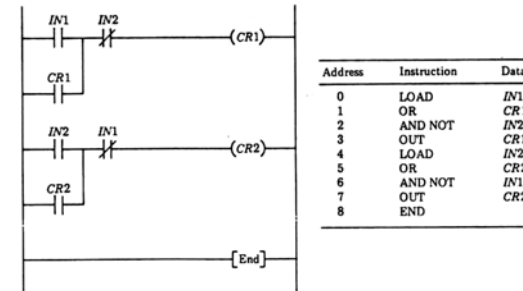
شکل ۲-۳۱- روشن کردن ترتیبی توسط شیفت رجیستر

IN2



شکل ۲-۳۴ سخت افزار الکترو هیدرولیکی سه جک هیدرولیک

(push-button) sw1,sw2
CR1



شکل ۲-۳۳ برنامه کنترلی حرکت پیستون

۲-۵-۲- حرکت ترتیبی اتوماتیک سه جک هیدرولیکی - نیوماتیکی

A,B,C

A+ A- B+ B- C+ C- repeat

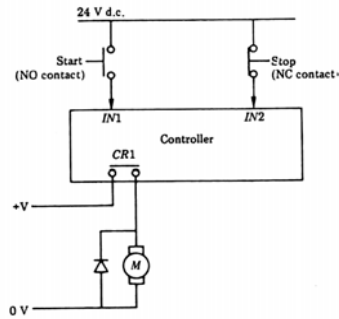
IN1

sw1

D-ON

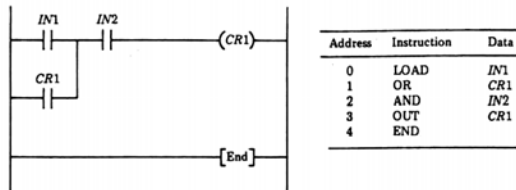
D-OFF

()



شکل ۳۶-۲ سخت افزار کنترل حرکت موتور

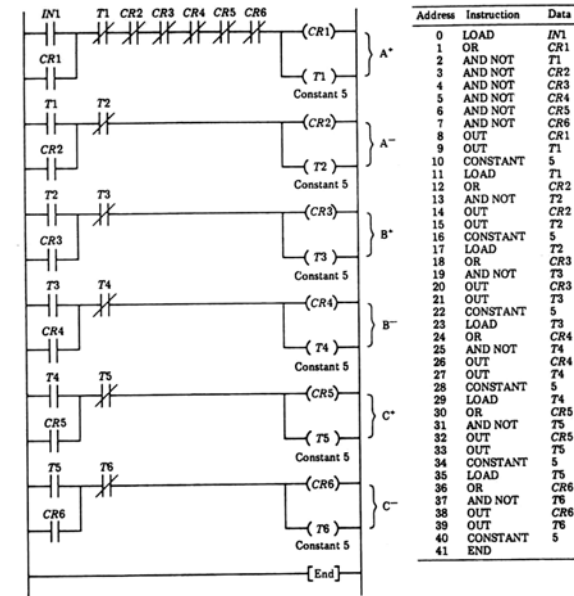
IN1, IN2



شکل ۳۷-۲ برنامه کنترلی و حرکت موتور

۴-۵-۲- کنترل دما به صورت ON/OFF

ON/OFF PLC



شکل ۳۵-۲ برنامه کنترلی حرکت ترتیبی سه جک هیدرولیک

۳-۵-۲- روشن و خاموش کردن یک موتور الکتریکی

START

STOP

...

PLC

PLC

N.C. STOP N.O. START

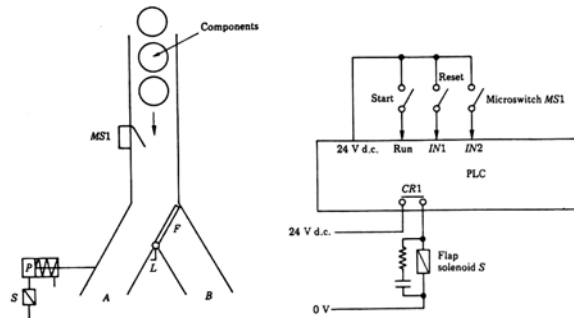
۲-۶- مثالهای صنعتی

PLC

PLC

۲-۶-۱- شمارش و دسته بندی

PLC



شکل ۴۱- شماتیک و سخت افزار دستگاه شمارش و دسته بندی

B

A

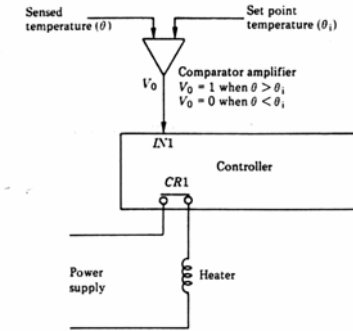
P

F

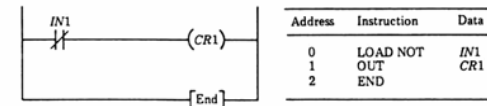
S

B

MS1

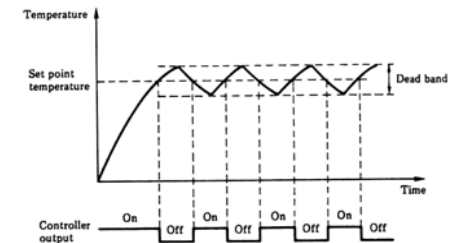


شکل ۳۸- سخت افزار کنترل دما



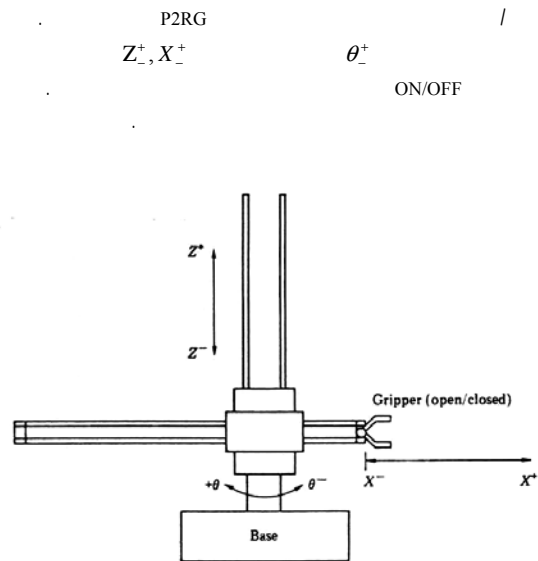
شکل ۳۹- برنامه کنترل دما

ON/OFF



شکل ۴۰- پاسخ کنترلر دمای ON/OFF

۲-۶-۲- روبات جابجا کننده محصول



شکل ۲-۴۳، روبات جابجا کننده قطعات

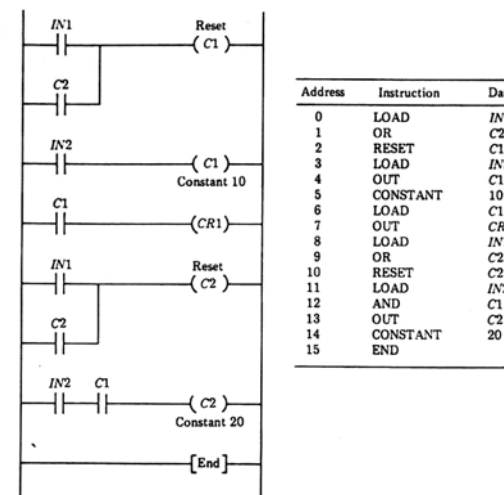
PLC θ^-, X^-

$X^+ \rightarrow G \text{ closed} \rightarrow \theta^+ \rightarrow G \text{ open} \rightarrow X^- \rightarrow \theta^- \rightarrow \text{repeat}$

PLC

(Proximity switch)

PLC



شکل ۲-۴۲ برنامه نردبانی دستگاه شمارش و دسته بندی

IN2 MS1 .

CR1 C1

C2 MS1 F

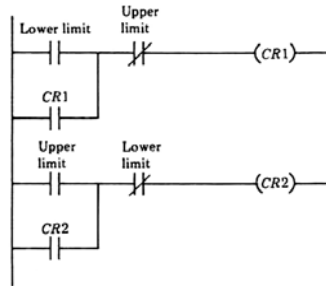
F CR1 C1,C2

IN1

CR1	X ⁺	CR3	Z ⁺	CR5	θ ⁺	CR7	G closed
CR2	X ⁻	CR4	Z ⁻	CR6	θ ⁻	CR8	G open

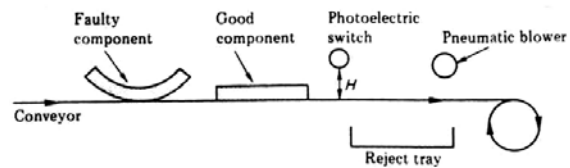
جدول ۲-۲ اتصال الکتریکی شیرهای سلونوئید به PLC

D-OFF



شکل ۲-۴۵ استفاده از میکروسوییچ جهت کنترل حرکت X

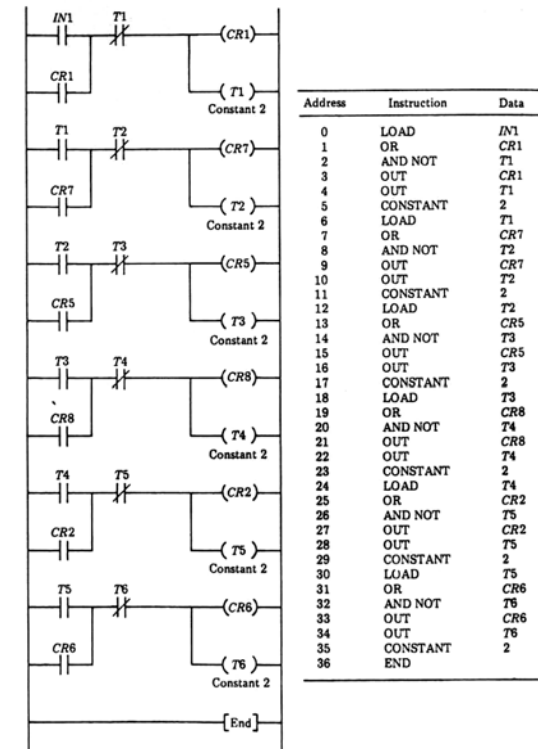
۲-۶-۳- سیستم جداسازی ضایعات



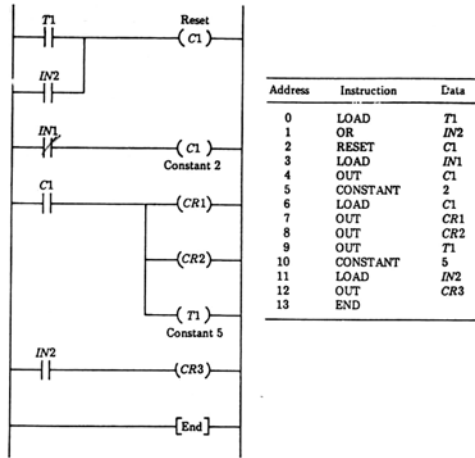
شکل ۲-۴۶ سیستم جداسازی ضایعات

H

H



شکل ۲-۴۴ برنامه کنترل حرکت روبات جابجا کننده قطعات



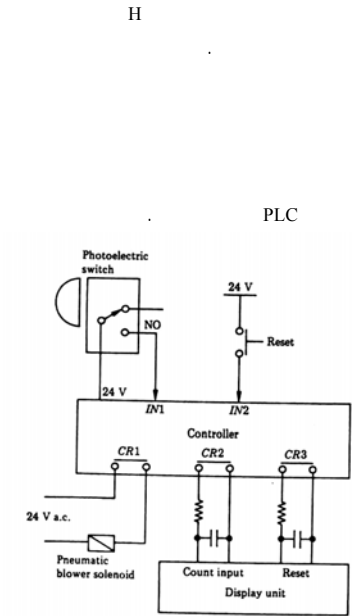
شکل ۲-۴۸ دیاگرام کنترل سیستم جداسازی ضایعات

۲-۶-۴- سیستم کنترل خط تولید اتوماتیک

P3

P1,P2

P4



شکل ۲-۴۷ اتصالات الکتریکی سیستم جداسازی ضایعات

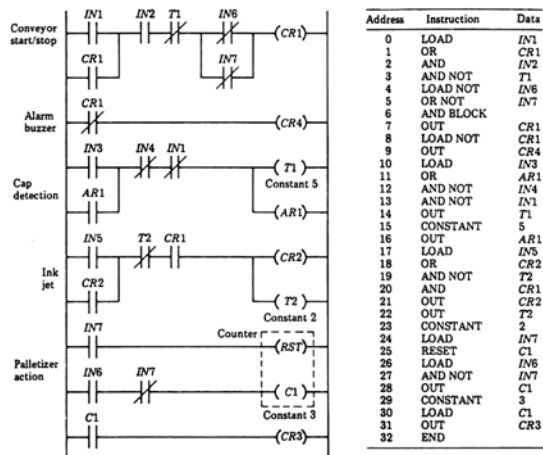
CR2

C1 ()

T1 CR1,CR2

C1

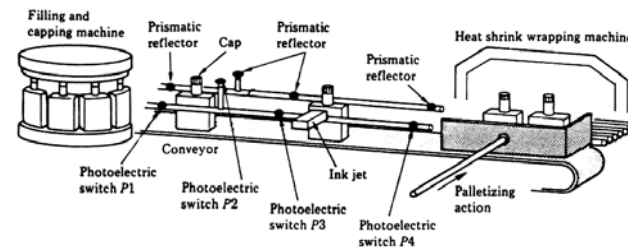
IN2



شکل ۵۱- برنامه کنترلی خط تولید اتوماتیک

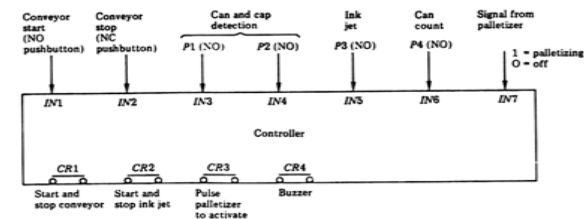
PLC

Siemens STEP5



شکل ۴۹- خط تولید اتوماتیک

P4



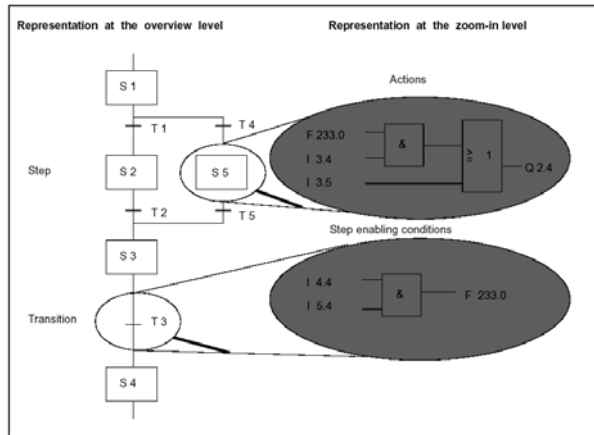
NO = Normally open contact
NC = Normally closed contact

شکل ۵۰- اتصالات الکتریکی PLC

PLC

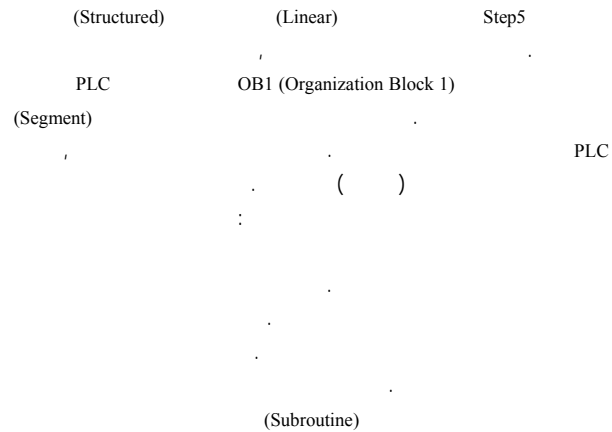
(T1) .

Stop



شکل ۵۳-۲ مثالی از برنامه GRAPH 5

۱-۷-۲- ساختار برنامه نویسی



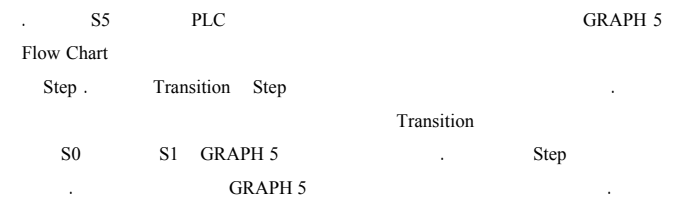
۷-۲- مقدمه ای بر برنامه نویسی STEP5

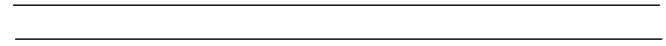
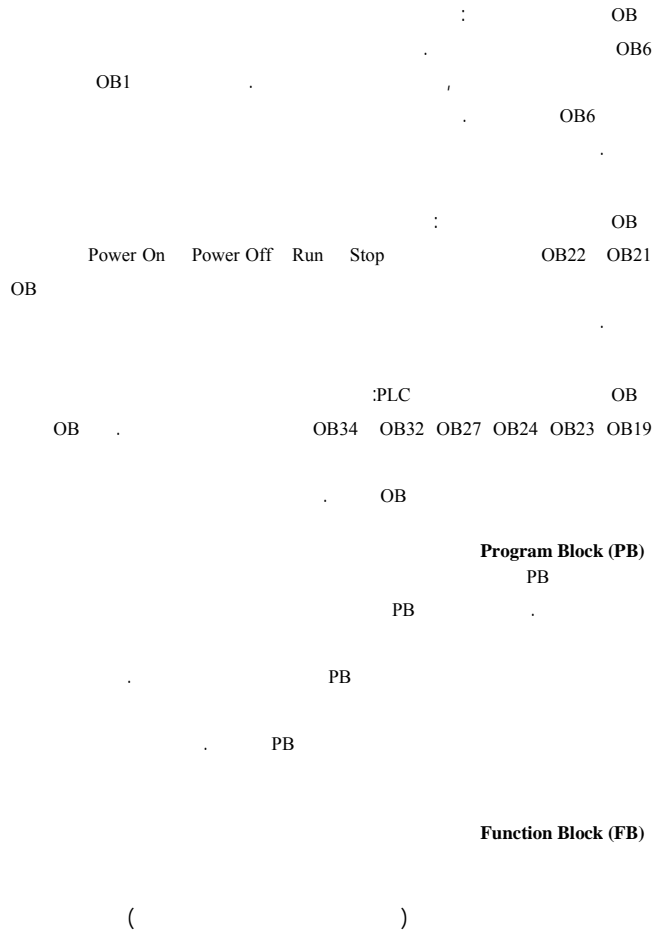
PLC

()

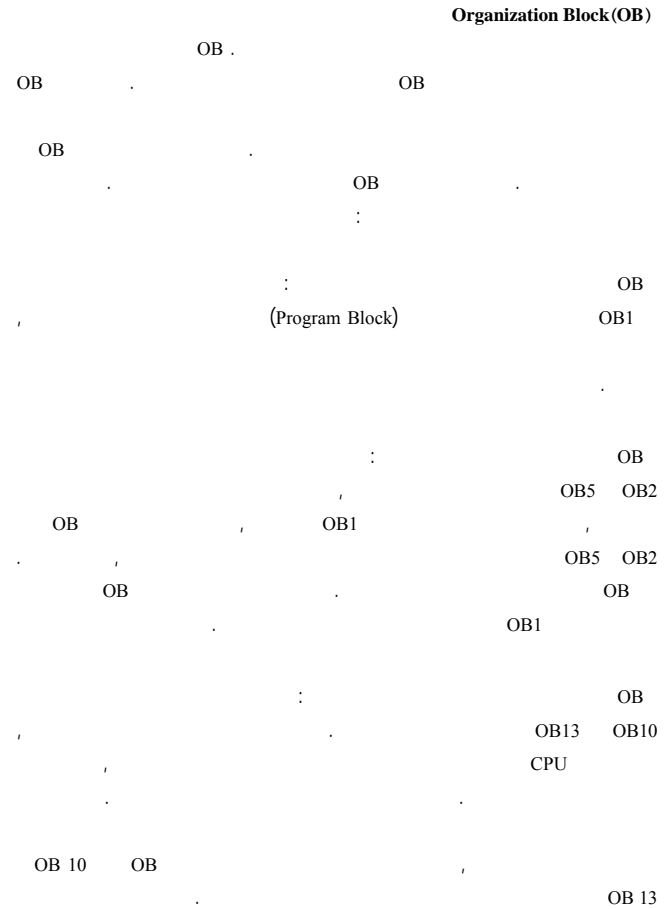
STL	CSF	LAD
<pre> A I 0.0 AN I 0.1 = Q 1.0 </pre>		

شکل ۵۲-۲ مقایسه سه روش STL ، CSF و LAD





انواع بلوک‌های مورد استفاده در برنامه نویسی ساختار یافته



:KM 16
 :KH
 :KT 999.3 0.0
 :KF -32768 +32768
 :KY 255 0
 :KS
 :KC .999 0

()

()

()	DR		IB
()	DL	()	IW
()	DW		QB
()	T		QW
()	C		FB
		()	FW

جدول ۴-۲ انواع مختلف عملوندها

بیت RLO (Result of Logic Operation)

PLC RLO
()

:FB
 (Standard FB) (

(Assignable FB) (

STL FB

Data Block (DB)

)

(

Sequence Block (SB)

PB

SB

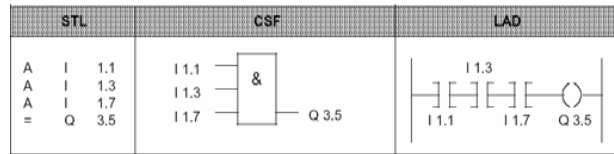
Step 5

B	C	T	K	D	F	Q	I

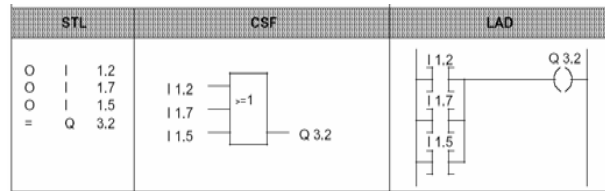
جدول ۳-۲ نمادهای مورد استفاده برای هر عملوند

دستورالعمل های اصلی

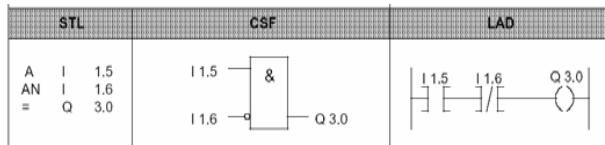
CSF LAD STL " "



شکل ۲-۵۴- مثالی از دستور AND



شکل ۲-۵۵- مثالی از دستور OR



شکل ۲-۵۶- مثالی از دستور AND NOT

RLO
RLO

۲-۷-۲- دستور العمل های زبان Step5

: Step5

(Basic)

(SB FB PB OB)

(-F) (+F)

CSF LAD STL

(Supplementary)

Shift

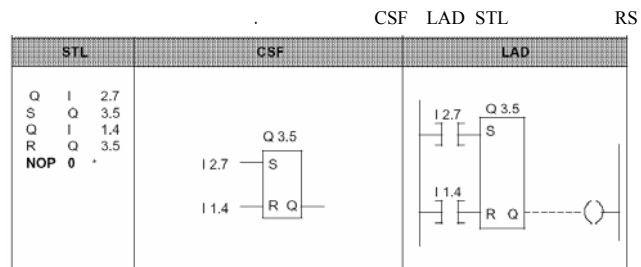
STL FB

(System)

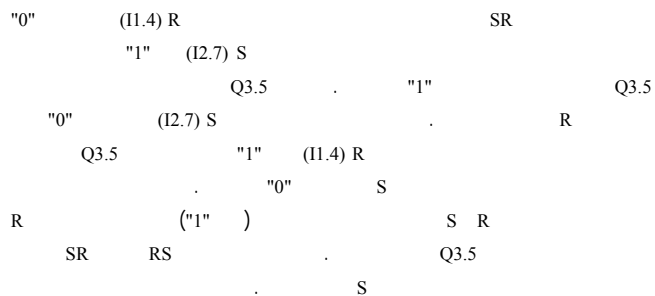
PLC

FB	FB	FB SB PB OB	
STL	STL	CSF LAD STL	

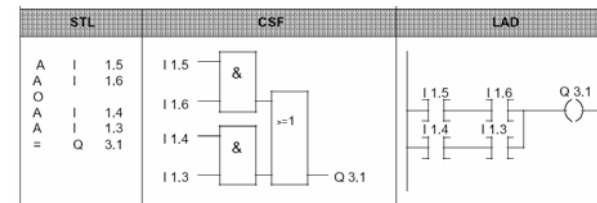
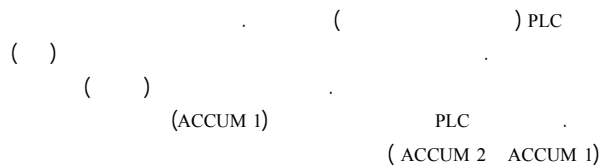
جدول ۲-۵- خصوصیات دستورالعمل های اصلی، تکمیلی و سیستم



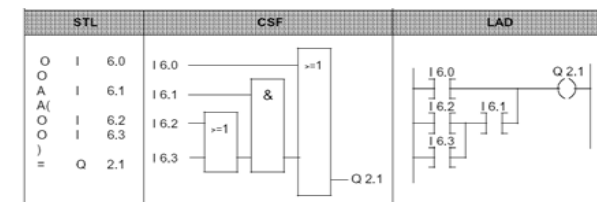
شکل ۶۰-۲ یک فلیپ فلاپ SR



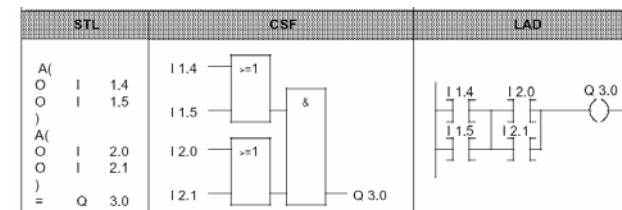
PLC



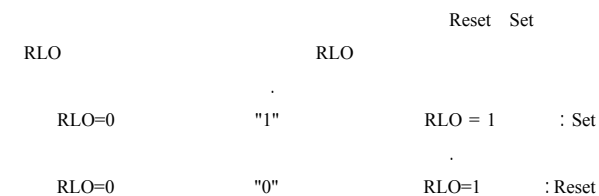
شکل ۵۷-۲ مثالی از کاربرد AND و OR



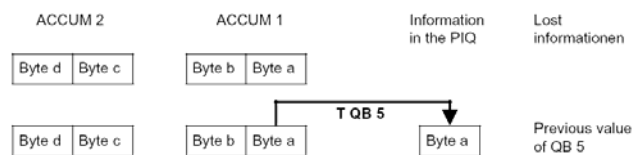
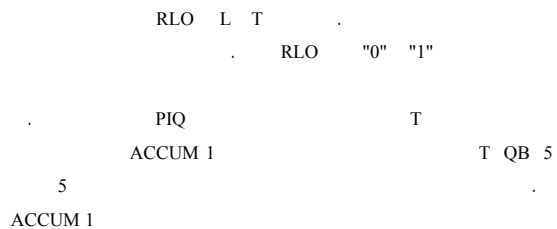
شکل ۵۸-۲ مثالی از استفاده پراگم



شکل ۵۹-۲ مثالی دیگر از کاربرد پراگم در نوشتن دستورات AND و OR



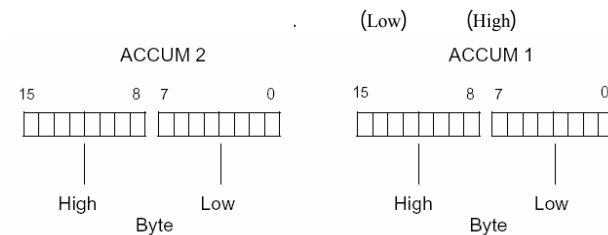
PLC



شکل ۶۲- چگونه اجرای دستور انتقال از ACCUM1 به PIQ

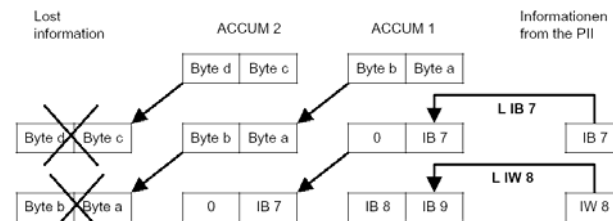
- تایمرها (Timers)

- (Pulse Timer) SP
- (Extended Pulse Timer) SE
- (On – Delay Timer) SD
- (Off – Delay Timer) SF
- (Stored On – Delay Timer) SS
- CSF LAD STL



شکل ۶۱- ساختار انبارک ها و بایت های با ارزش بالا (High) و پائین (Low)

L(Load)
Load
PLC



شکل ۶۲- چگونه اجرای دستور بارگذاری از PLC به انباره ها

L IB 8 L IB 7

PII

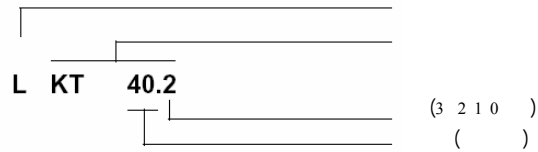
ACCUM 2

PII

(T)

0	0	0.01
0	1	0.1
1	0	1
1	1	10

جدول ۶-۲ ضریب عدد ثابت تایمر



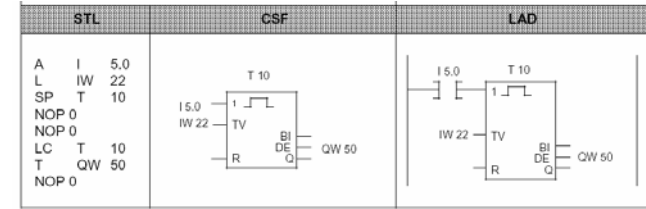
TV

: KT 001.0 → 0.01
 : KT 999.3 → 9990

5 KT

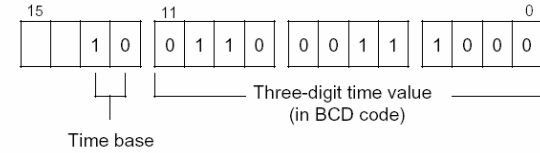
0.05	0 (0.01)	5	L KT 5.0
0.5	1 (0.1)	5	L KT 5.1
5	2 (1)	5	L KT 5.2
50	3 (10)	5	L KT 5.3

جدول ۷-۲ مقایسه مقیاس زمانی های مختلف



شکل ۶۴-۲ یک نمونه تایمر

:(Set) S
 :(Timer Value) TV
 L KT
 BCD
 () KT
 (Time Base)
 999 000 BCD



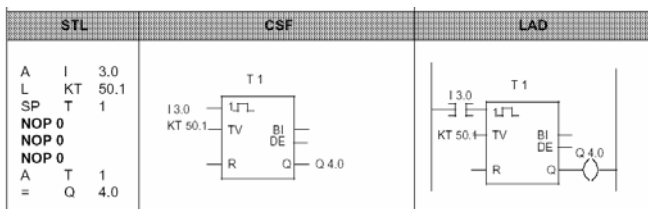
شکل ۶۵-۲ نحوه ذخیره مقدار ثابت تایمر

KT
 999 0
 PLC

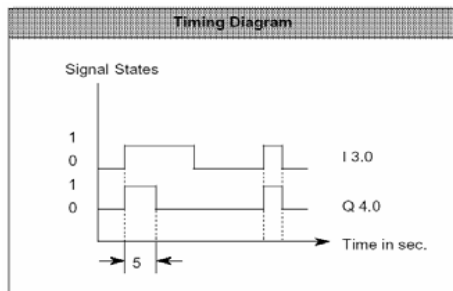
S R

تایمر پله ای (SP)

S TV S "0" S



شکل ۲-۶۶ تایمر پله ای



شکل ۲-۶۷ شکل موج های تایمر پله ای

L KT...

L KT 400.1	$400 * 0.1 = 40 \pm 0.1$	0.1
L KT 40.2	$40 * 1 = 40 \pm 1$	1
L KT 4.3	$4 * 10 = 40 \pm 10$	10

جدول ۲-۸ حالات مختلف برای بارگذاری زمان ۴۰ ثانیه در تایمر

(1 0)

(3 2)

:(Reset) R

()

TV :BI

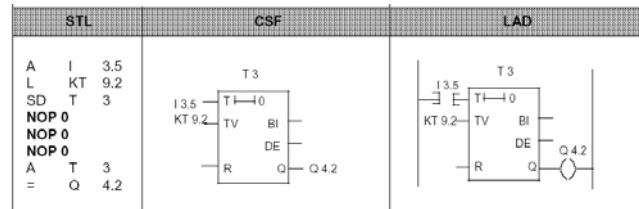
NOP0

BI :DE

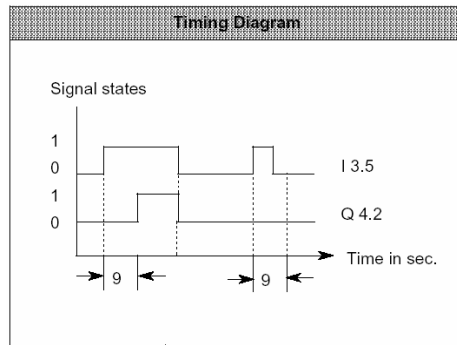
BCD TV

TV :Q

R



شکل ۷۰-۲ تایمر با در تاخیر در روشن شدن

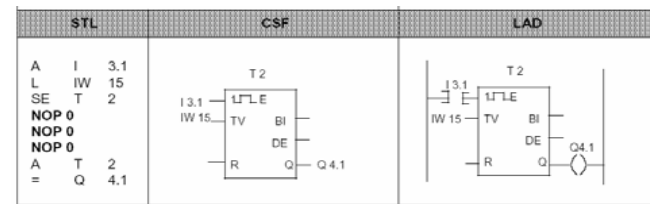
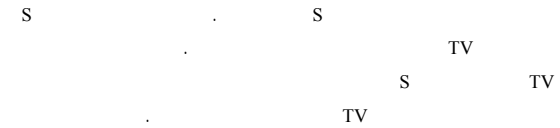


شکل ۷۱-۲ شکل موج تایمر SD

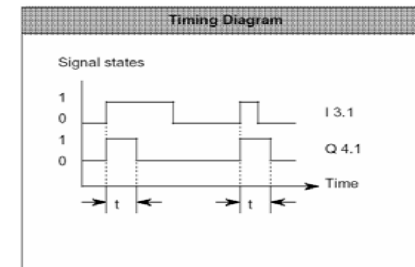
تایمر با تاخیر در خاموش شدن (SF)



تایمر پله ای گسترده (SE)

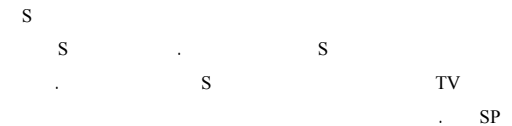


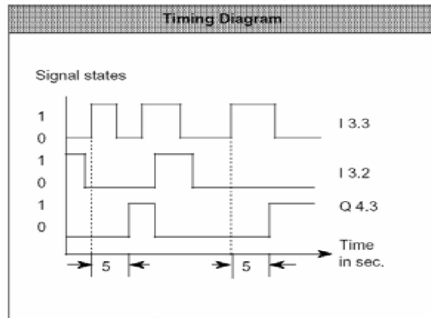
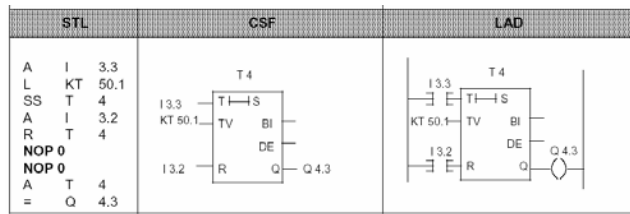
شکل ۶۸-۲ تایمر پله ای گسترده SE



شکل ۶۹-۲ شکل موج تایمر پله ای گسترده SE

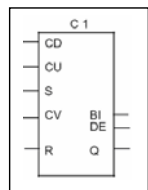
تایمر با تاخیر در روشن شدن (SD)



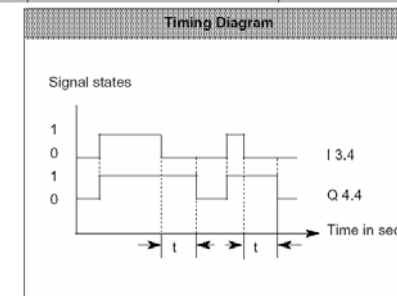
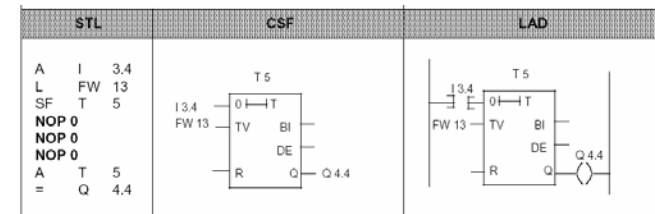


شکل ۷۳-۲ شکل موج تایمر SS

شمارنده ها (Counters)



PLC



شکل ۷۲-۲ تایمر با تاخیر در خاموش شدن (SF) و شکل موج آن

تایمر با تاخیر ماندگار (SS)

S
R

SE

TV

() : BI

BI : DE

BCD

"0" "1" : Q (>0)

CD CU :CD(Count Down) CU(Count Up)

CD CU ()

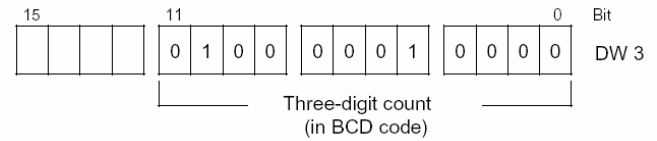
CV S :S(Set)

:CV (Counter Value)

L KC...

CV BCD

999



شکل ۷۴-۲ نحوه ذخیره عدد ثابت شمارنده

:R

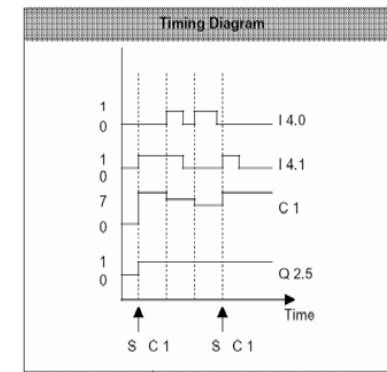
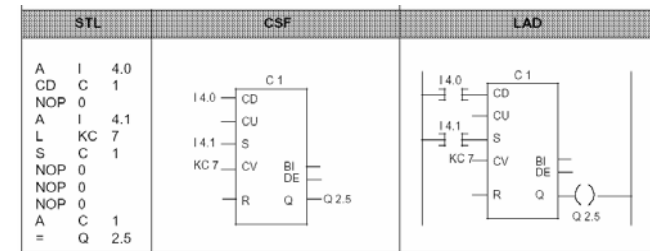
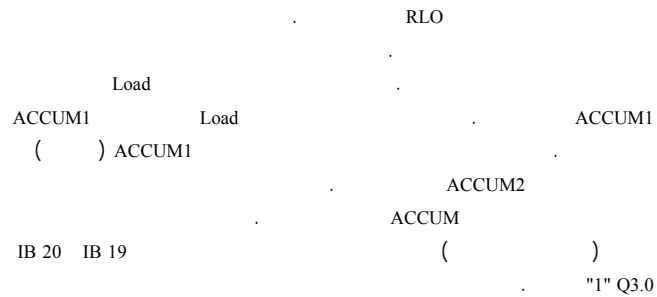
(BE)

) "0"

S C (... , L KC ...

!=F	=	ACCUM : "1" RLO
>>F	≠	ACCUM : "1" RLO
>F	>	ACCUM1 : "1" RLO ACCUM2
>=F	≥	ACCUM1 : "1" RLO ACCUM2
<F	<	ACCUM1 : "1" RLO ACCUM2
<=F	≤	ACCUM1 : "1" RLO ACCUM2

جدول ۹-۲ دستورات مقایسه ای



شکل ۷-۲ شکل موج های شمارنده مثال بالا

مقایسه کننده ها (Comparators)

IB

KF

FY QB

STL	Explanation		
L C 3		ACCUM 1	
L C 1	ACCUM1	ACCUM2	ACCUM1
+ F	ACCUM1	ACCUM2	ACCUM1
T QW 12		QW12	ACCUM1

Numeric Example			
876	15	0	ACCUM 2
+			+ F
668			ACCUM 1
=			
1544			ACCUM 1

شکل ۲-۷۷ کاربرد دستور جمع

دستور های "پرش" (JUMP)

(JU)

STL	CSF/LAD
L IB 19	
L IB 20	
= Q 3.0	

شکل ۲-۷۶ مثالی در مورد کاربرد دستور مقایسه ای مساوی

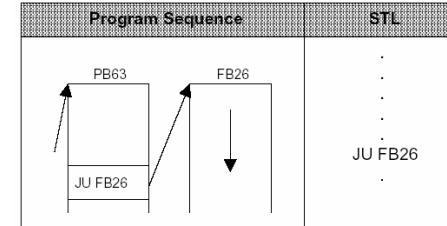
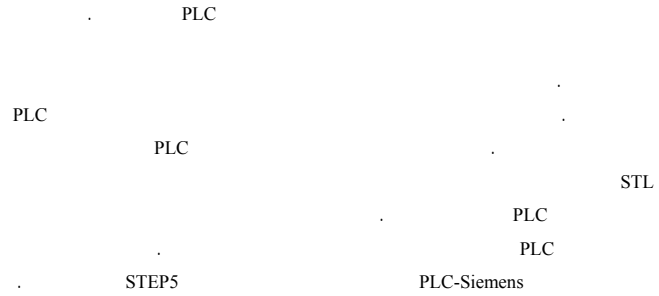
عملیات ریاضی

T L

....

(+F, -F)

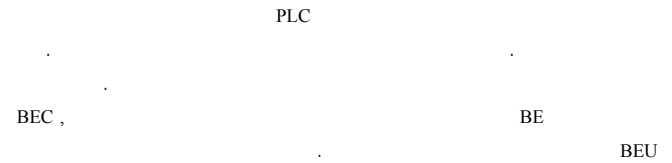
۸-۲- جمع بندی



شکل ۷۸-۲ کاربرد دستور JU

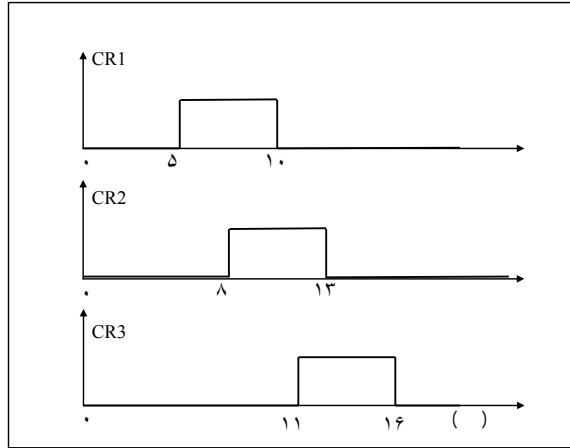
(JC)
 RLO JU
 "1" RLO

دستورهای اعلام پایان



BE		RLO
BEU		RLO
BEC		"1" RLO

جدول ۱۰-۲ دستورات اعلام پایان



شکل ۲-۸۱

-۲-۵

Stop Start
)

(

-۲-۶

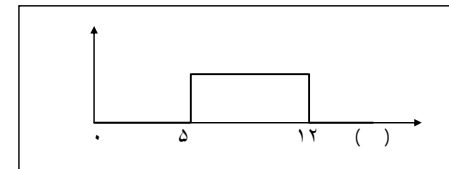
() PLC

مسائل

-۲-۱

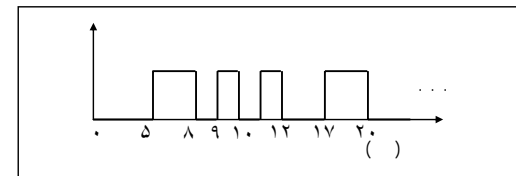
Delay-On

-۲-۲



شکل ۲-۷۹

-۲-۳



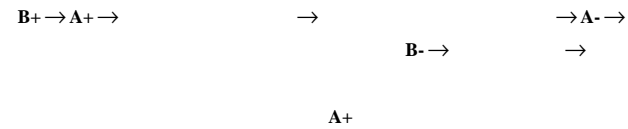
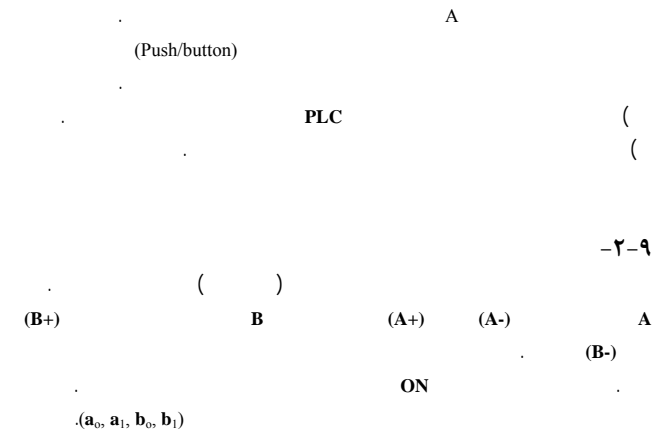
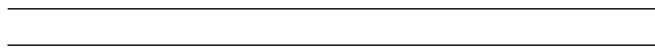
شکل ۲-۸۰

CR1,

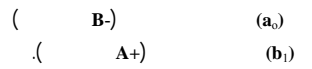
IN2

-۲-۴

CR2, CR3

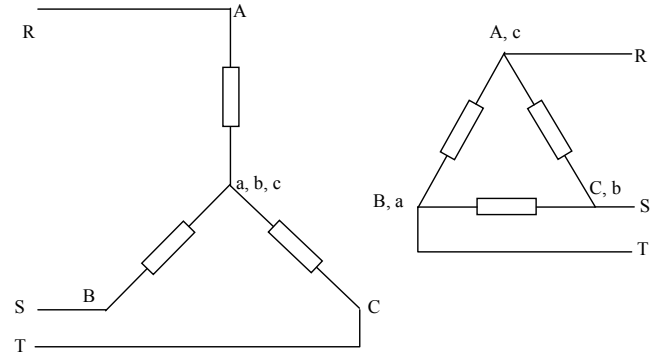
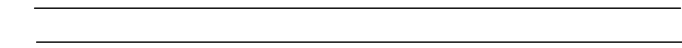


(Push Button)



PLC

PLC



شکل ۸۱-۲ نمایش اتصال ستاره و مثلث مسأله ۲-۵

-۲-۷

push button
PLC

A, B

-۲-۸

(Push/button)

Start/Stop

A

A

مراجع

- [1] Bateson, Robert, *Introduction to control system technology*, 6th ed., Prentice Hall, 1999.
- [2] Brayan B., *Programmable Controller-Collections*, Chicago, Industrial Text Company, 1989.
- [3] Carter, John W., *Digital designing with programmable logic devices*, Prentice Hall, 1997.
- [4] Crispin Alan J., *Programmable logic controllers and their engineering applications*, McGraw-Hill, 1990.
- [5] Hamblen, James O. and Michael D. Furman, *Rapid prototyping of digital systems*, Kluwer Academic, 2000.
- [6] Kissel T.E., *Understanding and Using Programmable Controllers*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1986.
- [7] Simpson C., *Programmable Logic Controllers*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1994.
- [8] Stenerson J., *Fundamentals of Programmable Logic Controllers, sensors, and communications*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1993.
- [9] Webb, John W. and Ronald A. Reis, *Programmable logic controllers: principles and applications*, 4th ed., Prentice Hall, c1999.
- [10]

IN8	A+	IN1	
IN9	B-	IN2	
IN10	B+	IN3	a_0
CR1	A+	IN4	a_1
CR2	A-	IN5	b_0
CR3	B+	IN6	b_1
CR4	B-	IN7	A-

فصل سوم

**مدلسازی
فرآیندهای صنعتی**

فصل سوم: مدلسازی فرآیندهای صنعتی

۱-۳- مقدمه

(Gray box)

Simulink Matlab

۱-۱-۳- معادلات حالت

F M

$$N = \frac{\omega_m}{\omega} \quad N = \frac{\theta_m}{\theta} \quad ()$$

$$\frac{1}{N} = \frac{T_m}{T} \quad ()$$

$$T_m = K_1 \phi i$$

$$T_m = K_m \cdot i \quad ()$$

L R DC
 $K_2 \phi \omega_m$ (Back EMF)

$$K_1 = K_2 \quad \text{SI}$$

$$V_{EMF} = K_m \cdot \omega_m \quad ()$$

DC

$$J_m \dot{\omega}_m = T_m - T_e \quad ()$$

$$T_e = T_m - J_m \dot{\omega}_m$$

$$T_e = T_m - J_m \dot{\omega}_m \quad ()$$

۳-۲- مدلسازی سیستمهای صنعتی

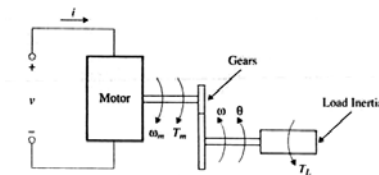
۳-۲-۱- مدلسازی سیستمهای الکترو مکانیک

مثال (۳-۱) سرو موتور DC

DC

J

T_L



شکل ۳-۲ سرو موتور DC

T_L

v

$$u = \begin{bmatrix} v \\ T_L \end{bmatrix} \quad ()$$

$$y = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} \quad ()$$

N

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{NK_m}{J_e} \\ 0 & \frac{-NK_m}{L} & \frac{-R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{J_e} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ T_L \end{bmatrix} \quad ()$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix}$$

- مشابه سازی

$$K_m = 0.05 \frac{Nm}{A}, R = 1.2\Omega, L = 0.05H, J_m = 8 \times 10^{-4} Kgm^2, J = 0.02 Kgm^2, N = 12$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 4.438 \\ 0 & -12 & -24 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -7.396 \\ 20 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad ()$$

Simulink Matlab "lsim"

$$\begin{cases} v(t) = 3 \text{ volts}, & 0 \leq t < 2 \\ v(t) = -3 \text{ volts} & 2 \leq t \leq 4 \end{cases} \quad T_L = 0$$

:

$$J\dot{\omega} = NT_e - T_L$$

$$= N(T_m - J_m\dot{\omega}_m) - T_L \quad ()$$

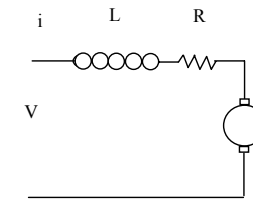
$$: \quad \omega_m = N\omega$$

$$(J + N^2 J_m)\dot{\omega} = NT_m - T_L \quad ()$$

$$J_e \dot{\omega} = NT_m - T_L$$

$$(T_m = K_m i) \quad , J_e \quad N^2$$

$$\dot{\omega} = \frac{NK_m}{J_e} i - \frac{T_L}{J_e} \quad ()$$



$$L \frac{di}{dt} + Ri = v - K_m \omega_m$$

$$i = -\frac{R}{L} i + \frac{1}{L} v - \frac{NK_m}{L} \omega \quad ()$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad ()$$

$$V = mgh + \frac{1}{2}Kx^2 + \dots \quad ()$$

$$L = T - V \quad ()$$

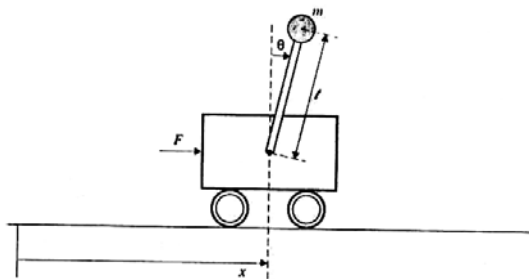
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad ()$$

q_i

Q_i

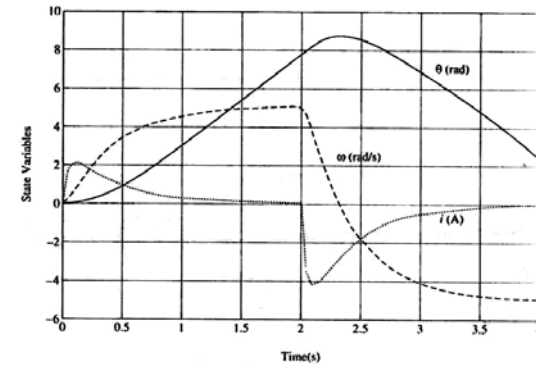
مثال ۲-۳) پاندول معکوس

M l m
 F . M



شکل ۴-۳ مدلسازی پاندول معکوس توسط روش لاگرانژ

x theta F



شکل ۳-۳ پاسخ های سیستم سرو موتور DC

۳-۲-۲- مدلسازی سیستمهای مکانیکی (روش لاگرانژ)

(q_i)
 $T(q_i, \dot{q}_i)$
 $V(q)$

$$T = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad ()$$

$$T = \frac{1}{2}v \cdot P + \frac{1}{2}\omega \cdot H \quad ()$$

H P

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0$$

$$\frac{d}{dt} (m\dot{x} \cos\theta + ml^2\dot{\theta}) - mg\ell \sin\theta = 0 \quad ()$$

$$\boxed{m\dot{x} \cos\theta + ml^2\ddot{\theta} - mg\ell \sin\theta = 0}$$

$$\boxed{\ddot{x} \cos\theta + l\ddot{\theta} - g \sin\theta = 0} \quad ()$$

$$\begin{bmatrix} M+m & m\ell \cos\theta \\ \cos\theta & \ell \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F + m\ell \omega^2 \sin\theta \\ g \sin\theta \end{bmatrix} \quad ()$$

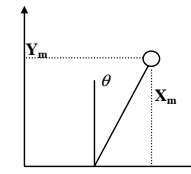
$$() \quad \dot{\omega}, \dot{v}$$

$$\begin{cases} \dot{v} = \frac{F + m\ell \omega^2 \sin\theta - mg \sin\theta \cos\theta}{M + m(1 - \cos^2\theta)} \\ \dot{\omega} = \frac{-F \cos\theta - m\ell \omega^2 \sin\theta \cos\theta + (M+m)g \sin\theta}{\ell[M + m(1 - \cos^2\theta)]} \\ \dot{x} = v \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad ()$$

$$x(0) = v(0) = \omega(0) = 0, \quad \theta(0) = 0.1, \quad F(t) = 0, \quad 0 \leq t \leq 1$$

Ode45 Matlab

$$\dot{\theta} \quad \dot{x} \quad x, \theta$$



$$X_m = x + \ell \sin\theta$$

$$Y_m = \ell \cos\theta$$

$$:$$

$$V_x = \dot{x} + \ell \dot{\theta} \cos\theta$$

$$V_y = -\ell \dot{\theta} \sin\theta$$

$$:$$

$$T = \frac{1}{2} M \dot{X}^2 + \frac{1}{2} m (v_x^2 + v_y^2)$$

$$T = \frac{1}{2} M \dot{X}^2 + \frac{1}{2} m [(\dot{x} + \dot{\theta} \ell \cos\theta)^2 + (-\ell \dot{\theta} \sin\theta)^2] \quad ()$$

$$T = \frac{1}{2} (M+m) \dot{X}^2 + \frac{1}{2} m (\ell \dot{\theta})^2 + m \dot{x} \dot{\theta} \ell \cos\theta$$

$$:$$

$$V = V_0 + V_0 + mg\ell \cos\theta \quad ()$$

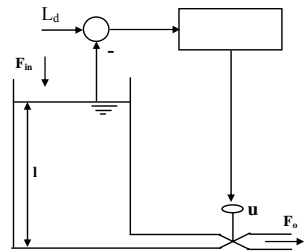
$$L = \frac{1}{2} (M+m) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\ell \dot{\theta})^2 + m \dot{x} \dot{\theta} \ell \cos\theta - 2V_0 - mg\ell \cos\theta \quad ()$$

$$x, \theta \quad F \quad x \quad \theta$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F \quad ()$$

$$\frac{d}{dt} (M\dot{x} + m(\dot{x} + \ell \dot{\theta} \cos\theta)) = F$$

$$\boxed{(M+m)\ddot{x} + m\ell \ddot{\theta} \cos\theta - m\ell \dot{\theta}^2 \sin\theta = F} \quad ()$$



شکل ۳-۷ مدلسازی ارتفاع آب در مخزن روباز

u

Fin

l

$$\Delta \dot{V} = F_{in} - F_{out} \quad ()$$

$$F = S \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad ()$$

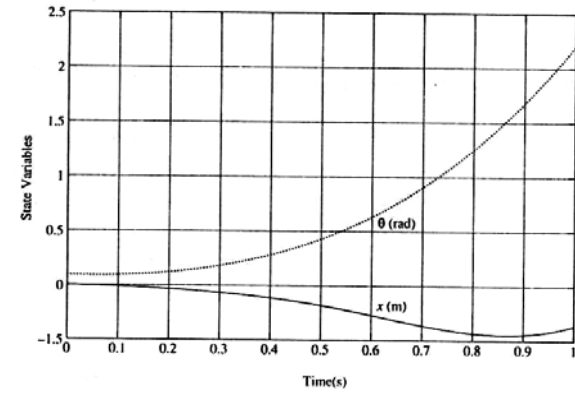
ΔP

ρ

S

$$F = c u \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad ()$$

u

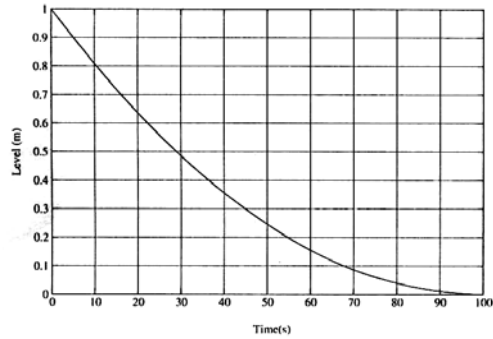


شکل ۳-۶ نتایج مشابه سازی سیستم پاندول معکوس

۳-۲-۳- مدلسازی سیستمهای هیدرولیکی

مثال ۳-۳) ارتفاع آب در مخزن روباز

Fin



شکل ۳-۸ پاسخ مشابه سازی سیستم ارتفاع آب در مخزن روباز

۳-۳- خطی سازی ریاضی

u

$$P = P_0 + \rho g \ell \quad ()$$

P_0

$$\Delta \dot{V} = A \frac{d\ell}{dt} = F_{in} - F_{out} \quad ()$$

$$F_{out} = c_1 u \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

P_0

$$P_1 = P_0 + \rho g \ell \quad ()$$

$$\Delta P = P_1 - P_0 = \rho g \ell \quad ()$$

$$F_{out} = c_1 u \sqrt{\frac{\rho g \ell}{\rho}} = c u \sqrt{\ell} \quad ()$$

$$\frac{d\ell}{dt} = \frac{F_{in}}{A} - \frac{F_{out}}{A} \quad ()$$

$$\dot{\ell} = \frac{F_{in}}{A} - \frac{c u \sqrt{\ell}}{A} \quad ()$$

Matlab (Ode45)

$$l(0) = 1m, u(t) = 0.01m, F_{in} = 0, 0 < t < 100 \text{ sec}$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x^*} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad ()$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x^*} \Delta x + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x^*} \Delta u \\ \Delta y = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x^*} \Delta x + \left. \frac{\partial h}{\partial u} \right|_{x^*} \Delta u \end{cases} \quad ()$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \\ \Delta y = C \Delta x + D \Delta u \end{cases} \quad ()$$

۱-۳-۳-مثال ۱: ارتفاع آب در مخزن روباز

$$\dot{\ell} = \frac{F_m}{A} - \frac{c u \sqrt{\ell}}{A} \quad ()$$

$$F(\ell, u, F_m) = \frac{F_m}{A} - \frac{c u \sqrt{\ell}}{A} \quad ()$$

$$\begin{aligned} &: F_m^* = F_d \quad \ell^* = \ell_d \\ 0 &= -\frac{C}{A} u^* \sqrt{\ell_d} + \frac{F_d}{A} \Rightarrow u^* = \frac{F_d}{c \sqrt{\ell_d}} \quad () \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u) \end{aligned} \quad ()$$

$$\dot{x} = 0$$

$$f(x^*, u^*) = 0 \quad ()$$

$$\Delta x = x - x^*, \quad \Delta y = y - y^*, \quad \Delta u = u - u^* \quad ()$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = f(x^* + \Delta x, u^* + \Delta u) \\ \Delta y = h(x^* + \Delta x, u^* + \Delta u) - y^* \end{cases} \quad ()$$

$$f_i(x^* + \Delta x, u^* + \Delta u) = f_i(x^*, u^*) + \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \right|_{x^*} \Delta x_1 + \dots + \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \right|_{x^*} \Delta x_n \quad ()$$

$$+ \left. \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \right|_{x^*} \Delta u_1 + \dots + \left. \frac{\partial f_i}{\partial u_r} \right|_{x^*} \Delta u_r + O(\Delta x)^2 + O(\Delta u)^2 + \dots$$

$$\left(\begin{array}{c} \vdots \\ \vdots \end{array} \right)_{u^*, x^*}$$

$$u, x \quad \Delta x, \Delta u$$

$$f_i(x^* + \Delta x, u^* + \Delta u) \approx \left. \frac{\partial f_i}{\partial x} \right|_{x^*} \Delta x + \left. \frac{\partial f_i}{\partial u} \right|_{x^*} \Delta u \quad ()$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{v} = -\frac{mg}{M} \Delta \theta + \frac{\Delta F}{M} \\ \Delta \dot{\omega} = \frac{(M+m)g}{M\ell} \Delta \theta - \frac{\Delta F}{m\ell} \\ \Delta \dot{x} = \Delta v \\ \Delta \dot{\theta} = \Delta \omega \end{cases} \quad ()$$

۳-۳-۳- نمایش سیستم به صورت تابع تبدیل

(MIMO)

LTI

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad ()$$

$$\begin{cases} s x(s) = A x(s) + B u(s) \\ y(s) = C x(s) + D u(s) \end{cases} \quad ()$$

$$\begin{cases} x(s) = (sI - A)^{-1} B u(s) \\ y(s) = [C(sI - A)^{-1} B + D] u(s) \end{cases} \quad ()$$

$$H(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = C(sI - A)^{-1} B + D \quad ()$$

مثال: تابع تبدیل سیستم زیر را بدست آورید:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad D = 0 \quad ()$$

$$H(s) = C(sI - A)^{-1} B + D$$

$$\frac{\partial f}{\partial \ell} = -\frac{C}{2A} \frac{u}{\sqrt{\ell}} \rightarrow \left. \frac{\partial f}{\partial \ell} \right|_v = -\frac{c}{2A} \frac{F_d}{c\sqrt{\ell_d}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\ell_d}} = -\frac{F}{2A\ell_d}$$

$$\frac{\partial f}{\partial u} = -\frac{C}{A} \sqrt{\ell} \rightarrow \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_v = -\frac{C}{A} \sqrt{\ell_d} \quad ()$$

$$\frac{\partial f}{\partial F_m} = \frac{1}{A} \rightarrow \left. \frac{\partial f}{\partial F_m} \right|_v = \frac{1}{A}$$

$$\Delta \dot{v} = \left(-\frac{F_d}{2A\ell_d}\right) \Delta \ell - \left(\frac{c}{A}\sqrt{\ell_d}\right) \Delta u + \frac{1}{A} \Delta F_m \quad ()$$

۳-۳-۲- مثال ۲: پاندول معکوس

$$x^* = \theta^* = 0$$

θ

$$\sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1 - \frac{1}{2} \theta^2 \quad ()$$

$$L = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x} + l \dot{\theta})^2 - 2v_0 - mg(1 - \frac{1}{2} \theta^2) \quad ()$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad ()$$

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} + m\ell\ddot{\theta} = F \\ m\ell\ddot{x} + m\ell^2\ddot{\theta} - mg\ell\theta = 0 \end{cases} \quad ()$$

$\ddot{x}, \ddot{\theta}$

$$\lambda = \frac{F_d}{2A\ell_d} \quad a = -\frac{c}{A}\sqrt{\ell_d} \quad b = \frac{1}{A} \quad ()$$

$$s \Delta\ell + \lambda \Delta\ell = a \Delta u + b \Delta F_{in} \quad ()$$

$$H_1(s) = \frac{\Delta\ell(s)}{\Delta u(s)} = \frac{a}{s + \lambda} \quad ()$$

$$H_2(s) = \frac{\Delta\ell(s)}{\Delta F_{in}(s)} = \frac{b}{s + \lambda}$$

جمع بندی:

۳-۴- مدلسازی سیستمهای هیدرولیکی

۳-۴-۱- کنترل سطح سیال در مخزن

()

ℓ_d

()

u

$$(sI - A)^{-1}$$

$$sI - A = \begin{bmatrix} s & -1 \\ 2 & s+3 \end{bmatrix}$$

$$(sI - A)^{-1} = \frac{1}{s(s+3)+2} \begin{bmatrix} s+3 & 1 \\ -2 & s \end{bmatrix} = \frac{1}{(s+1)(s+2)} \begin{bmatrix} s+3 & 1 \\ -2 & s \end{bmatrix}$$

$$H(s) = [1 \ 0] \frac{1}{(s+1)(s+2)} \begin{bmatrix} s+3 & 1 \\ -2 & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + 0$$

$$= \dots = \frac{s+4}{(s+1)(s+2)}$$

مثال ۲: سرو موتور DC

DC

T_L, v

θ

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 4.438 \\ 0 & -12 & -24 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -7.396 \\ 20 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matlab

ss2zp ss2tf

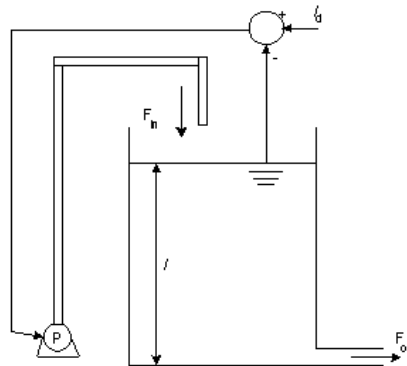
$$\frac{\theta(s)}{v(s)} = \frac{88.76}{s(s+21.526)(s+2.474)}$$

$$\frac{\theta(s)}{T_L(s)} = \frac{-7.396(s+24)}{s(s+21.526)(s+2.474)} \quad ()$$

مثال ۳: ارتفاع آب در مخزن روباز

$$\Delta\dot{\ell} = \left(-\frac{F_d}{2A\ell_d}\right) \Delta\ell - \left(\frac{c}{A}\sqrt{\ell_d}\right) \Delta u + \frac{1}{A} \Delta F_{in} \quad ()$$

$$\Delta\dot{\ell} = -\lambda \Delta\ell + a \Delta u + b \Delta F_{in} \quad ()$$



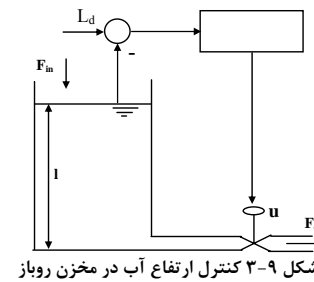
شکل ۳-۱۱ کنترل ارتفاع آب در مخزن روباز توسط پمپ

()

" $\rho g l$ "

$$F_{in} - F_o = A\dot{l}$$

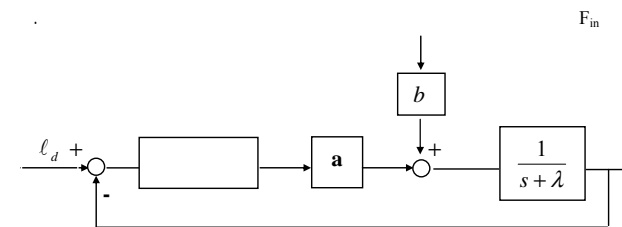
()



شکل ۳-۹ کنترل ارتفاع آب در مخزن روباز

۳-۴-۲- کنترل سطح مخزن توسط پمپ

()



شکل ۳-۱۰ دیاگرام بلوکی کنترل ارتفاع آب در مخزن روباز

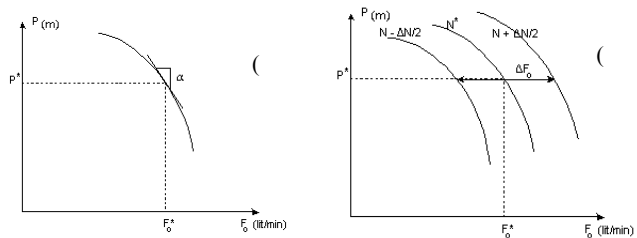
$$F_0 = F_0(P, N) \quad (N^*, P^*)$$

$$\Delta F_0 = \left. \frac{\partial F_0}{\partial P} \right|_{N^*} \Delta P + \left. \frac{\partial F_0}{\partial N} \right|_{P^*} \Delta N = \alpha \Delta P + \beta \Delta N \quad ()$$

$$\alpha, \beta$$

$$\alpha = \left. \frac{\partial F_0}{\partial P} \right|_{P=P^*, N=N^*} = (N^*, P^* \sqrt{2})$$

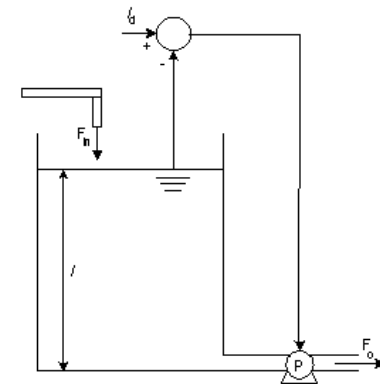
$$\alpha = \left. \frac{\partial F_0}{\partial P} \right|_{P=P^*, N=N^*} = (N^*, P^* \sqrt{2})$$



شکل ۳-۱۴ تعیین مقادیر خطی تابع دبی بر حسب متغیرهای فشار و سرعت پمپ

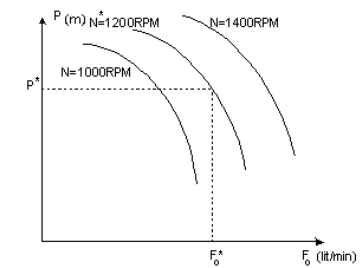
$$\beta = \left. \frac{\Delta F_0}{\Delta N} \right|_{P=P^*=cte}$$

$$\Delta F_0 = N^* \cdot \frac{\Delta N}{2}, N^* + \frac{\Delta N}{2}$$

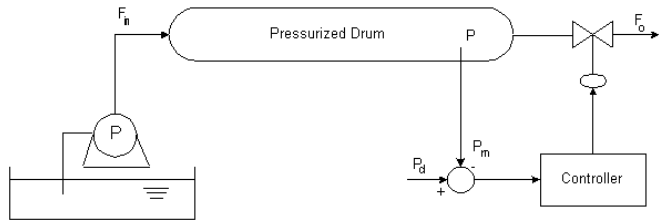


شکل ۳-۱۲ کنترل دبی خروجی آب در مخزن روباز توسط پمپ

(performance specification)

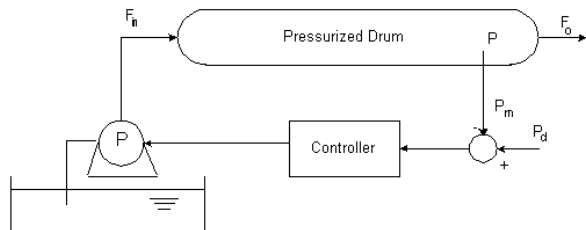


شکل ۳-۱۳ منحنی شاخص عملکرد یک پمپ



شکل ۳-۱۶ کنترل سطح فشار درام توسط تنظیم دبی خروجی

(demand)



شکل ۳-۱۷ کنترل سطح فشار درام توسط تنظیم دبی ورودی بوسیله پمپ

- مدلسازی و تحلیل مدل

$$F_i - F_o = C \dot{P} \quad ()$$

(

(Flow demand)

$$\Delta F_{in} - (\alpha \Delta P + \beta \Delta N) = A \Delta \dot{\ell} \quad ()$$

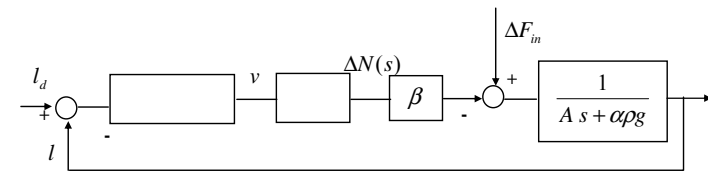
$$\Delta F_{in} - \alpha \rho g \Delta \ell - \beta \Delta N = A \Delta \dot{\ell} \quad ()$$

$$(A s + \alpha \rho g) \Delta \ell(s) = \Delta F_{in} - \beta \Delta N(s)$$

$$\Delta \ell(s) = \frac{1}{A s + \alpha \rho g} \Delta F_{in}(s) - \frac{\beta}{A s + \alpha \rho g} \Delta N(s) \quad ()$$

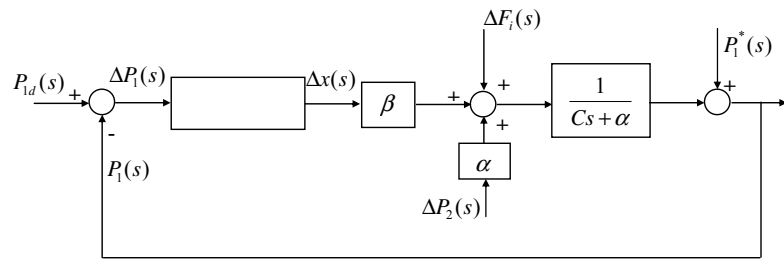
ΔN

ΔF_{in}



شکل ۳-۱۵ دیاگرام بلوکی کنترل سطح مخزن توسط تنظیم سرعت پمپ

۳-۴-۳- کنترل فشار درام (مخزن بسته)



شکل ۳-۱۸ دیاگرام بلوکی کنترل فشار درام توسط شیر کنترلی

$\Delta P_2, \Delta F_i$ $\Delta x(s)$
 $\Delta P_2, \Delta F_i$
 P_{1d}
 PID

۳-۴-۴- کنترل دبی جریان در خط لوله

$$F_o = \frac{\sqrt{(P_1 - P_2) / \rho}}{R(x)} = \frac{k}{R(x)} \sqrt{P_1 - P_2} \quad ()$$

$R(x)$ spool

$P_1, P_2, R(x)$ F_o

$$F_o = F_o(P_1, P_2, R(x)) \quad ()$$

$$\Delta F_o \cong \left. \frac{\partial F_o}{\partial P_1} \right|_* \Delta P_1 + \left. \frac{\partial F_o}{\partial P_2} \right|_* \Delta P_2 + \left. \frac{\partial F_o}{\partial R} \right|_* \Delta R \quad ()$$

Δx

$$\Delta F_o \cong \left. \frac{\partial F_o}{\partial P_1} \right|_* \Delta P_1 + \left. \frac{\partial F_o}{\partial P_2} \right|_* \Delta P_2 + \left. \frac{\partial F_o}{\partial x} \right|_* \Delta x \quad ()$$

$$\Delta F_o \cong \alpha \Delta P_1 - \alpha \Delta P_2 + \beta \Delta x \quad ()$$

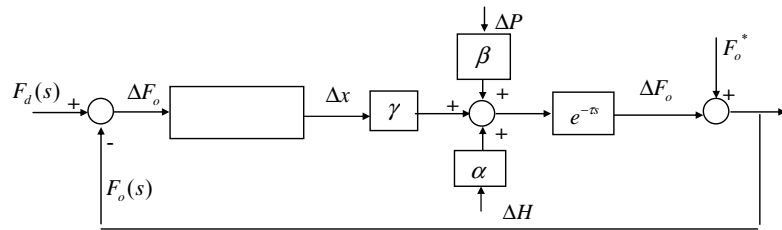
$$\alpha = \frac{k}{R(x^*)} \cdot \frac{1}{2\sqrt{P_1^* - P_2^*}}, \quad \beta = \frac{-k\sqrt{P_1^* - P_2^*}}{R^2(x^*)} \cdot \left. \frac{dR(x)}{dx} \right|_{x=x^*} \quad ()$$

α, β

$$\Delta F_i + \alpha(\Delta P_1 - \Delta P_2) + \beta \Delta x = C \Delta \dot{P}_1 \quad ()$$

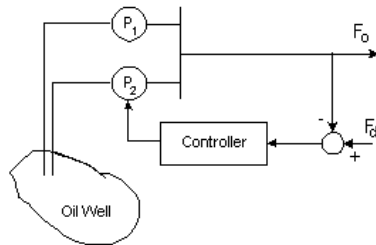
$$(Cs + \alpha)\Delta P_1(s) = \Delta F_i(s) - \alpha \Delta P_2(s) + \beta \Delta x(s) \quad ()$$

$$\Delta P_1(s) = \frac{1}{Cs + \alpha} \Delta F_i(s) - \frac{\alpha}{Cs + \alpha} \Delta P_2(s) + \frac{\beta}{Cs + \alpha} \Delta x(s) \quad ()$$



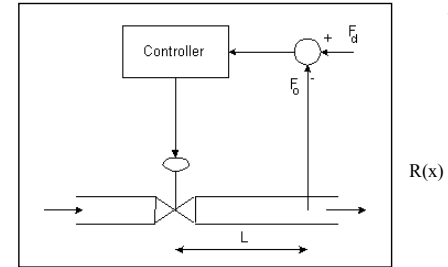
شکل ۳-۲۰ دیاگرام بلوکی کنترل دبی در خط لوله توسط شیر کنترلی

(ب) کنترل دبی توسط پمپ



شکل ۳-۲۱ کنترل دبی خط لوله در مقطع ورود به خط

الف) کنترل دبی توسط شیر



شکل ۳-۱۹ کنترل دبی خط لوله توسط شیر کنترلی

$$F_o = \frac{1}{R(x)} \sqrt{2g(\Delta h) + \frac{2\Delta P}{\rho}} \quad ()$$

$$\Delta F_o \cong \left. \frac{\partial F_o}{\partial \Delta h} \right|_* \Delta h + \left. \frac{\partial F_o}{\partial \Delta P} \right|_* \Delta P + \left. \frac{\partial F_o}{\partial X} \right|_* \Delta X \quad ()$$

$$\Delta F_o = \alpha \Delta h + \beta \Delta P + \gamma \Delta X \quad ()$$

$$G = e^{-s\tau} \quad ()$$

$$q = K\Delta\theta \Rightarrow R_T = \frac{1}{K} = \frac{\Delta\theta}{q} = \text{_____} \quad ()$$

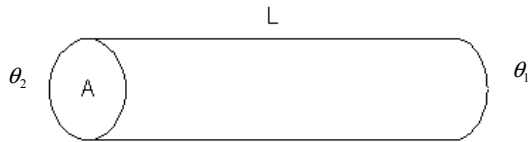
:

$$C_T = \frac{1}{\Delta\theta} \int q \cdot dt = \frac{\Delta Q}{\Delta\theta} = \text{_____} \quad ()$$

۳-۵-۱- هدایت حرارتی Conduction

$$K = \frac{k \cdot A}{\ell} \quad ()$$

:

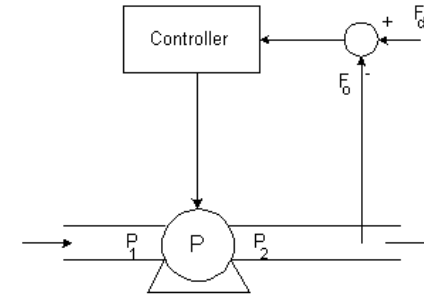


شکل ۳-۲۳ مدل یک المان انتقال حرارت

$$R_T = \frac{\ell}{k \cdot A} \quad ()$$

:

$$\theta_1 - \theta_2 = q \cdot \frac{\ell}{k \cdot A} \quad ()$$



شکل ۳-۲۲ کنترل دبی خط لوله توسط پمپ

Δh , ΔP

N

۳-۵- مدلسازی فرآیندهای حرارتی

$$q(J/sec) \quad (\quad) \quad \theta(^{\circ}c)$$

:

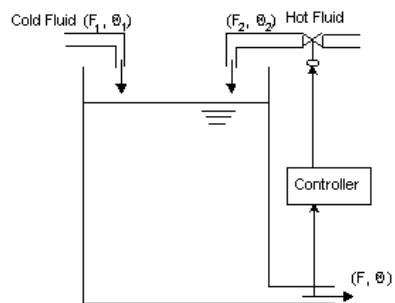
$$C_T(J/^{\circ}C) \quad R_T(^{\circ}C \text{ sec}/J)$$

:

$$K$$

الف) مخلوط کردن مایعات سرد و گرم

$$F_2, \theta_2 < F_1, \theta_1$$



شکل ۳-۲۴ کنترل دما توسط مخلوط کردن سیالات و کنترل دبی سیال سرد

$$F_1, F_2 \rightarrow F \quad \theta_1, \theta_2 \rightarrow \theta$$

۳-۵-۲- انتقال حرارت جابجائی Convection

$$K = \frac{h.A}{\ell}$$

۳-۵-۳- انتقال حرارت تشعشع

$$q = \epsilon \delta A (\Delta\theta)^4$$

Stephan-Boltzman δ , A

$$\Delta\theta \quad q$$

۳-۵-۴- مکانیزم فرآیندهای انتقال حرارت

$$\gamma_1 \rho_1 \theta_1^* \Delta F_1 + \gamma_2 \rho_2 \theta_2^* \Delta F_2 - \gamma \rho F^* \Delta \theta = \gamma \rho V \frac{d(\Delta \theta)}{dt} \quad ()$$

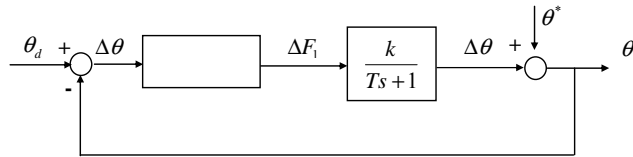
$$\left(\frac{\gamma_1 \rho_1 \theta_1^*}{\gamma \rho F^*} \right) \Delta F_1 + \left(\frac{\gamma_2 \rho_2 \theta_2^*}{\gamma \rho F^*} \right) \Delta F_2 = \frac{V}{F^*} \Delta \dot{\theta} + \Delta \theta \quad ()$$

$$k_1 \Delta F_1 + k_2 \Delta F_2 = T \Delta \dot{\theta} + \Delta \theta \quad ()$$

$$k_1 \Delta F_1(s) + k_2 \Delta F_2(s) = (T s + 1) \Delta \theta \quad ()$$

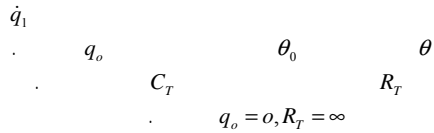
$$F_1 + F_2 = F = cte \Rightarrow \Delta F_1 + \Delta F_2 = 0 \quad \Delta F_2(s) = -\Delta F_1(s) \quad ()$$

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta F_1(s)} = \frac{k_1 - k_2}{T s + 1} = \frac{k}{T s + 1} \quad ()$$

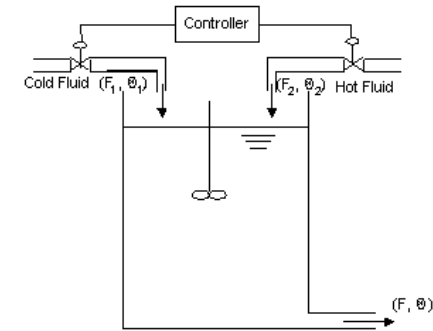


شکل ۲۶-۳ دیاگرام بلوکی کنترل دما مخلوط کردن دو سیال

ب) تبادل حرارتی توسط رادیاتور



$$q_o = o, R_T = \infty$$



شکل ۲۵-۳ کنترل دما توسط مخلوط کردن سیالات و کنترل نسبت ورود سیال سرد و گرم

$$\gamma_1 \rho_1 F_1 \theta_1 + \gamma_2 \rho_2 F_2 \theta_2 - \gamma \rho F \theta = \gamma \rho V \frac{d\theta}{dt} \quad ()$$

$$() - () =$$

$$(\gamma_1 \rho_1 F_1 \theta_1 + \gamma_2 \rho_2 F_2 \theta_2) - (\gamma \rho F \theta) = \gamma \rho V \frac{d\theta}{dt} \quad ()$$

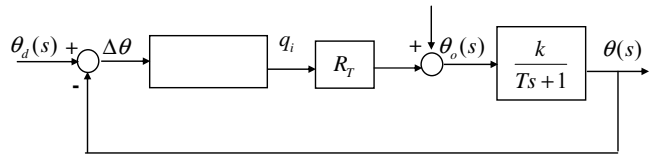
$$\frac{d\theta}{dt} \quad V$$

$$\theta_1 = \theta_1^*, \theta_2 = \theta_2^*$$

$$F = F^*$$

$$F_1 = F_1^* + \Delta F_1, \quad F_2 = F_2^* + \Delta F_2, \quad \theta = \theta^* + \Delta \theta \quad ()$$

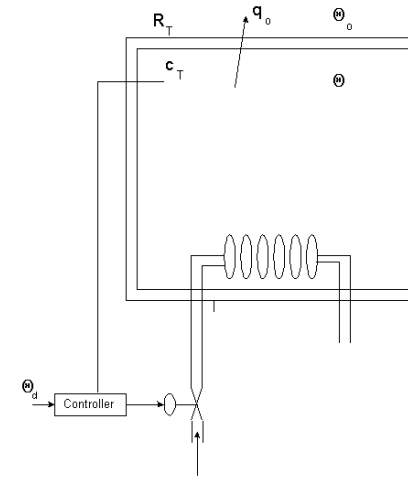
$$\gamma_1 \rho_1 (F_1^* + \Delta F_1) \theta_1^* + \gamma_2 \rho_2 (F_2^* + \Delta F_2) \theta_2^* - \gamma \rho F (\theta^* + \Delta \theta) = \gamma \rho V \frac{d(\theta^* + \Delta \theta)}{dt} \quad ()$$



شکل ۳-۲۸ دیاگرام بلوکی کنترل دمای اتاق توسط رادیاتور

θ_0 q_i

۳-۶- جمع بندی



شکل ۳-۲۷ کنترل دما اتاق توسط رادیاتور

$$q_i - q_0 = C_T \frac{d\theta}{dt} \quad ()$$

$$q_0 = \frac{\theta - \theta_0}{R_T} \quad ()$$

$$\theta(s) = \frac{R_T}{1 + R_T C_T s} q_i(s) + \frac{1}{1 + R_T C_T s} \theta_0(s) \quad ()$$

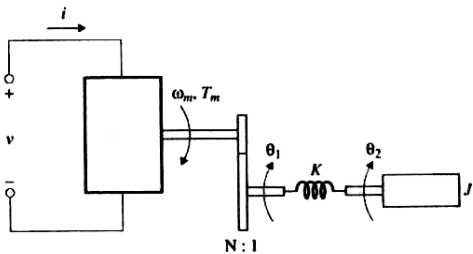
۳-۳ سرو موتور DC و هارمونیک درایو

k DC
 $K(\theta_1 - \theta_2)$

(الف) DC
 $\Delta = \Omega$ $\Delta = \theta_1 - \theta_2$
 Δ Δ Δ Δ Δ Δ
 k=500Nm/rad DC (ب)

Matlab یا Simulink (پ)
 DC

(ت) $\frac{\theta_2}{V}, \frac{\theta_1}{V}$



شکل ۳-۳۱ سرو موتور DC و هارمونیک درایو

۳-۴ کنترل سرعت غلطک

DC

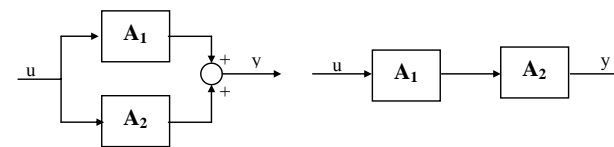
T_o

مسائل

۳-۱

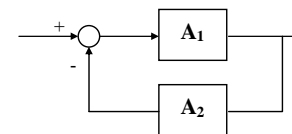
$$A_1 : \begin{cases} \dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u_1 \\ y_1 = C_1 x_1 + D_1 u_1 \end{cases} \quad A_2 : \begin{cases} \dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u_2 \\ y_2 = C_2 x_2 + D_2 u_2 \end{cases}$$

$$y, u \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

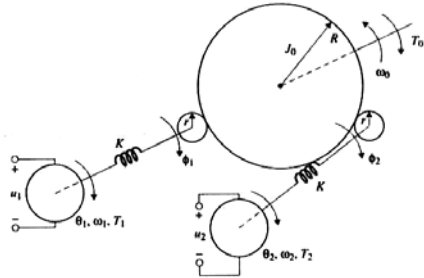


شکل ۳-۲۹ ترکیب سری و موازی دو سیستم

۳-۲



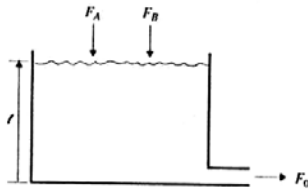
شکل ۳-۲۰ ترکیب فیدبک دو سیستم



شکل ۳-۳۲ کنترل سرعت غلطک توسط دو موتور

۳-۵ کنترل غلظت و ارتفاع در مخزن

() B,A
A B



شکل ۳-۳۳ کنترل غلظت و ارتفاع مایع

(الف)

$$C_A = V_A / V_T \quad A$$

$$C_A F_0 \quad A$$

k

J_m

(الف)

$$T_2, T_1 \quad \dot{\omega}_2, \dot{\omega}_1$$

$$R/r \quad \theta_1 - \varphi_1, \theta_2 - \varphi_2$$

$$r/R$$

$$\Delta_1 = \theta_1 - \varphi_1, \Delta_2 = \theta_2 - \varphi_2$$

$$\omega_0, \omega_2, \omega_1 \quad \dot{\Delta}_2, \dot{\Delta}_1 \quad \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 = \frac{-R}{r} \omega_0$$

$$T_0, u_2, u_1 \quad R_a \quad K_m \quad \omega_0, \omega_2, \omega_1, \Delta_2, \Delta_1$$

(ب)

$$K_m = 6.0 \text{ Nm/A}, R_a = 0.2 \text{ } \Omega, J_m = 1 \text{ kgm}^2$$

$$K = 7.5 \times 10^4 \text{ Nm/rad}, J_0 = 10^4 \text{ kgm}^2, R = 1 \text{ m}, r = 0.07 \text{ m}$$

(پ)

$$\omega_1(0) = \omega_2(0) = 66.68 \text{ rad/s}, \omega_0(0) = 4.67, \Delta_1(0) = \Delta_2(0) = 0$$

$$u_1 = u_2 = 4v$$

$$T_0 = 1000 \text{ Nm}$$

$$\frac{\omega_0}{T_0}, \frac{\omega_0}{u_2}, \frac{\omega_0}{u_1} \quad (\text{ت})$$

$$k(T_{h3} - T_{c1})$$

$$T_{C1} \quad Q_{C1}$$

$$F_1, F_2, T_{h0}, T_{c0}$$

(ب)

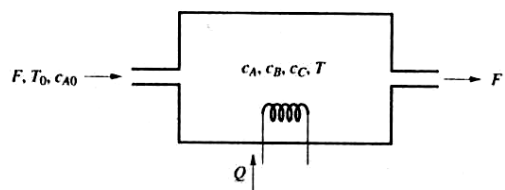
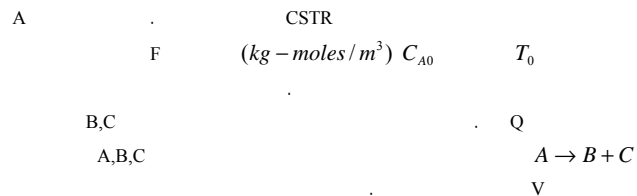
$$V = 0.2m^3, \rho = 10^3 kg/m^3, C_r = 4180J/kg^0c, K = 2 \times 10^5 J/c^0 min$$

(ج)

$$T_{C1}(0) = T_{C2}(0) = T_{C3}(0) = T_{H1}(0) = T_{H2}(0) = T_{H3}(0) = 20^0 C$$

$$F_c = 0.05m^3/min, F_H = 0.15m^3/min, T_c = 20^0 C, T_{h0} = 80^0 C$$

۳-۷ راکتور شیمیائی



شکل ۳-۳۶ راکتور شیمیائی

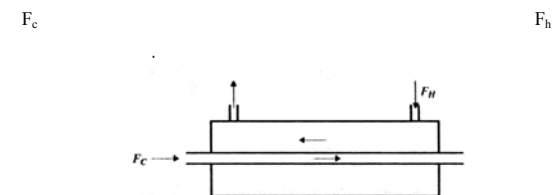
$$A = 0.1m^2 \quad (ب)$$

(ج)

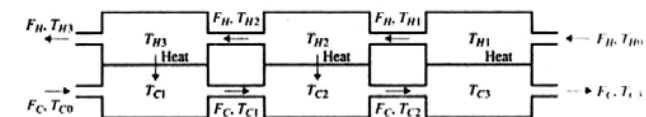
$$\ell(0) = 0.2m, C_A(0) = 0.5, F_A = F_B = 2 \times 10^{-4} m^3/s, F_0 = 3 \times 10^{-4} m^3/s, 0 \leq t \leq 60s$$

$$C_A(0), \ell(0) \quad V_T(0)$$

۳-۶ مبدل حرارتی



شکل ۳-۳۴ مبدل حرارتی با جهت مخالف حرکت سیال



شکل ۳-۳۵ تقسیم مبدل حرارتی به اجزاء محدود

(الف)

$$Q_{c1} = \rho V_{c1} T_{c1}$$

$$\rho F_c T_{c0} \quad \rho F_c T_{c1}$$

(ب)

$$A = 2.68 \times 10^9 \text{ min}^{-1}, E/R = 7553^0 \text{ k}, \Delta H = 2.07 \times 10^8 \text{ J/kg-moles},$$

$$\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3, C_v = 418 \text{ J/kg}^\circ\text{K}, V = 18 \times 10^{-3} \text{ m}^3, F = 3.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min},$$

$$C_{A_0} = 3 \text{ kg-moles/m}^3, T_0 = 293^0 \text{ k}$$

$$T_0 = 445^0 \text{ k} \quad (پ)$$

$$Q = -1.2 \times 10^5 \text{ J/min}, C_B(0) = C_C(0) = 0 \quad C_A(0) = 0.05 \text{ kg-moles/m}^3$$

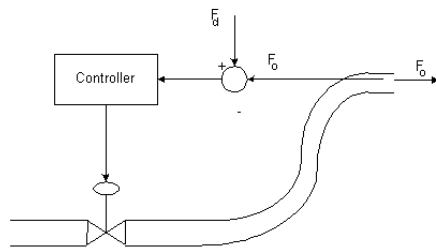
$$0 < t < 10 \quad ()$$

۳-۸ کنترل جریان در خط لوله

$$S = A.u$$

L

(الف)



شکل ۳-۳۷ کنترل جریان در خط لوله

H

F

$$r \text{ (Kg-moles/sec)}$$

$$C_A, V, R, E, A$$

$$r = V A C_A e^{-E/RT}$$

$$T \text{ (kg-moles/m}^3)$$

$$\Delta H, \Delta H.r :$$

(الف)

$$N_A(t), F_{CA_0} \Delta t, \Delta t, t, A$$

$$r \cdot \Delta T, F_{CA} \Delta t$$

$$N_A(t + \Delta t), B, C, A, N_A(t)$$

$$N_A, C_A, v, C_C, C_B, C_A = N_A / v$$

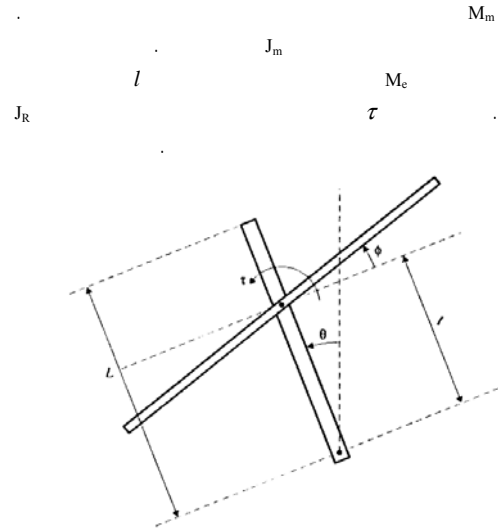
$$\Delta T, B, C, r \Delta T, F_{C_C} \Delta T, F_{C_B} \Delta T$$

$$\Delta T, H(t) = \rho V C_v T(t), F \rho C_v T \Delta t, F \rho C_v T_0 \Delta t$$

$$Q \Delta t, r \cdot \Delta H \cdot \Delta t$$

$$H(t), H(t + \Delta t), \Delta T \rightarrow 0, \Delta T, H(t)$$

۳-۱۰ بندباز



شکل ۳-۲۹ مدل دینامیکی یک بند باز

$$M_m = 75kg, J_m = 3.2kgm^2, M_e = 2kg, J_R = 1.5kgm^2, L = 1.8m, l = 1m, \omega_\theta = \dot{\theta}, \omega_\phi = \dot{\phi}$$

۳-۱۱ کنترل غلظت و ارتفاع در مخزن

$$C_A^*, \ell^*, F_B^* \quad F_o^*, F_A^* \quad ($$

$$A = 4 \times 10^{-2} m, C = 0.9$$

$$H = 100m$$

$$L = 1000m$$

(ب)

$$\rho = 10^3$$

$$L = 1000m$$

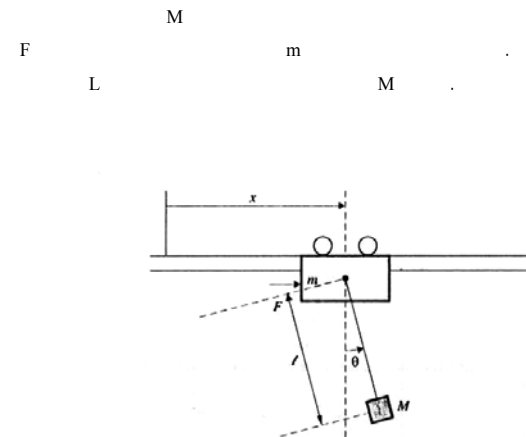
$$P_0$$

$$F(0) = 1m^3/s$$

(ج)

$$5 \times 10^{-2} \quad 10^{-2}$$

۳-۹ جرثقیل سقفی



شکل ۳-۳۸ جرثقیل سقفی

$$\ell = 10m, M = 2000kg, m = 500kg$$

$$F = 1000N$$

۳-۱۴ جرثقیل سقفی:

()

$$\frac{\theta}{F} = \frac{x}{F}$$

۳-۱۵ بندباز:

()

$$\frac{\varphi}{\tau} = \frac{\theta}{\tau}$$

۳-۱۶ پاندول دوتائی معکوس

m

M

F

ℓ_1, ℓ_2

F_A, F_B, F_o (

(

$$\ell^* = 0.2m, C_A^* = 0.8, F_B = 5 \times 10^{-5} m^3/s$$

$\Delta F_A, \Delta F_o, \Delta F_B$ $\Delta C_A, \Delta \ell$ (

۳-۱۲ مبدل حرارتی

$T_{ho}^*, T_{co}^*, F_A^*, F_c^*$ (

(

(

$\Delta T_{co}, \Delta T_{ho}, \Delta F_c$ () ΔH ΔT_{c3} (

()

۳-۱۳ راکتور شیمیائی:

C_c^*, C_B^*, C_A^*, Q^*

$F^*, T_o^*, T^*, C_{Ao}^*$

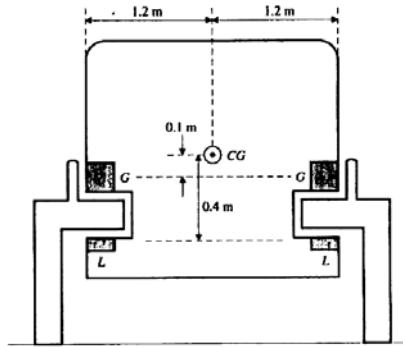
F, C_{Ao}, T_o, Q

$$C_A = 3 \text{ kgmoles}/m^3, T^* = 346^\circ K, F = 3.6 \times 10^{-3} m^3/\text{min}$$

$\Delta C_{Ao}, \Delta F$

ΔQ

$\Delta T, \Delta C_A, \Delta C_B, \Delta C_c$



شکل ۳-۴۱ مقطعی از یک وسیله نقلیه دارای سیستم تعلیق مغناطیسی

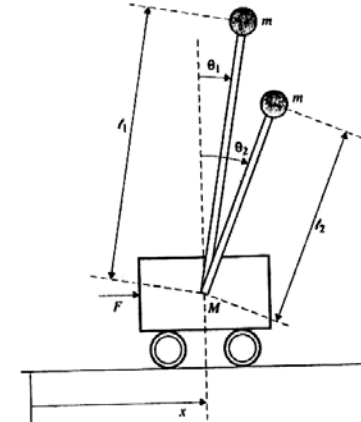
$$i \quad \frac{k i^2}{S^2} \quad S \quad Z_G(t) \quad F_w$$

$$F_{L1}^*, F_{L2}^* \quad F_v = 0, M = 4000kg$$

$$i^* \quad 5.4 \times 10^{-3} \frac{i^2}{s^2}$$

$$S^* = 0.014$$

$$S^*, 5000N = F_{G2}^* = F_{G1}^*$$



شکل ۳-۴۰ پاندول دوتائی معکوس

$$(\quad) \quad M=m=1$$

$$l_1, l_2 \quad \ell_2 = 1m, \ell_1 = 1.5m$$

$$\frac{\theta_2}{F}, \frac{\theta_1}{F}, \frac{x}{F}$$

Maglev ۳-۱۷

km/h

Magnetically "

km/h

"Levitated

(y,z)

yaw, pitch

(\theta

فصل چهارم

روشهای

شناسائی فرآیند

مراجع

- [1] Astrom, Karl J. and Hagglund T., *PID Controllers: theory, design, and tuning*, 2nd Ed. Instrument Society of America, 1995.
- [2] Belanger Pierre R., *Control Engineering, a modern approach*, Saunders College Publishing, 1995.
- [3] Close C.M. and Fredrick D.K., *Modeling and Analysis of Dynamic System*, Houghton Mifflin, 1993.
- [4] Hagglund T., *Process control in Practice*, Chartwell-Bratt Ltd, U.K., 1991
- [5] Luyben W.L., *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*, 2nd Ed., McGraw-Hill, 1986.
- [6] Marlin, T. E., *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*, McGraw-Hill, 1995
- [7] Seborg D.E., Edgar T.F. and Mellichamp D.A., *Process Dynamics and Control*, Wiley, New York, 1989.
- [8]

فصل چهارم

روشهای

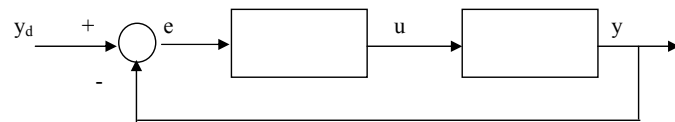
شناسائی فرآیند

مراجع

- [1] Astrom, Karl J. and Hagglund T., *PID Controllers: theory, design, and tuning*, 2nd Ed. Instrument Society of America, 1995.
- [2] Belanger Pierre R., *Control Engineering, a modern approach*, Saunders College Publishing, 1995.
- [3] Close C.M. and Fredrick D.K., *Modeling and Analysis of Dynamic System*, Houghton Mifflin, 1993.
- [4] Hagglund T., *Process control in Practice*, Chartwell-Bratt Ltd, U.K., 1991
- [5] Luyben W.L., *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*, 2nd Ed., McGraw-Hill, 1986.
- [6] Marlin, T. E., *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*, McGraw-Hill, 1995
- [7] Seborg D.E., Edgar T.F. and Mellichamp D.A., *Process Dynamics and Control*, Wiley, New York, 1989.
- [8]

فصل چهارم: روشهای شناسائی فرآیند

۴-۱- مقدمه



شکل ۴-۱ دیاگرام بلوکی کنترل فرآیند

e y_d y

PID PD PI , P



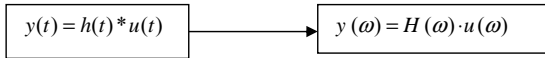
$h(t)$

:

$$h(t) : \quad h(t) = \frac{dS(t)}{dt} \quad S(t) :$$

"

۲-۲-۴ - پاسخ فرکانسی



$$H(\omega) = a(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} \quad ()$$

$$\varphi(\omega) \quad a(\omega)$$

(Bode)

« »



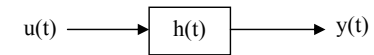
۲-۲-۴ - مدل‌های دینامیکی

LTI

(transient)

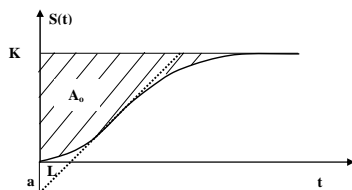
۱-۲-۴ - پاسخ گذرا

(Convolution Integral) LTI



$$y(t) = u(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad ()$$

۱-۳-۴- مدل دو پارامتری یا دو جزئی



شکل ۳-۴ پاسخ پله نرمالیزه سیستم

a, L, K
 A_0

(Average resident time) T_{ar}

$$T_{ar} = \frac{A_0}{K} \quad ()$$

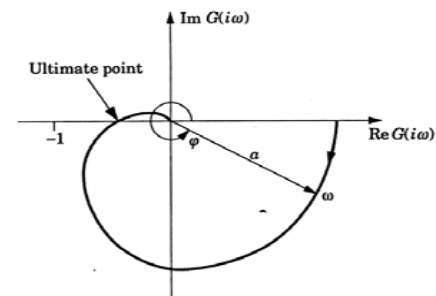
A_0 K

$$A_0 = \int_0^{\infty} (S(\infty) - S(t)) dt = \int_0^{\infty} (K - S(t)) dt \quad ()$$

$$G_{2a}(s) = \frac{K}{1 + T_{ar}s} \quad ()$$

S-shape

$$G_{2b}(s) = \frac{a}{sL} e^{-sL} \quad ()$$



شکل ۲-۴ دیاگرام نایکوئیست

Ultimate

(Z.N)

Point

$$H(s) = \int_0^{\infty} h(t) e^{-st} dt \quad ()$$

۳-۴- روشهای پاسخ پله

۲-۳-۴- مدل‌های سه جزئی

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

L : T : deadtime

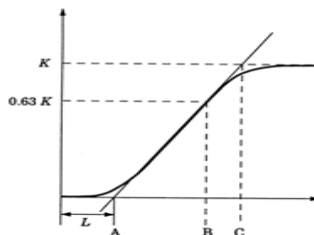
$$S(t) = K(1 - e^{-(t-L)/T}) \quad ()$$

$$T_{ar} = \frac{1}{K} \int_0^{\infty} (S(\infty) - S(t)) dt = L + T \quad ()$$

$$\tau = \frac{L}{L+T} = \frac{L}{T_{ar}} \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad ()$$

$\tau \rightarrow 0$

$\tau \rightarrow 1$



شکل ۴-۵ پاسخ پله یک سیستم نمونه جهت تعیین پارامترهای سیستم سه جزئی

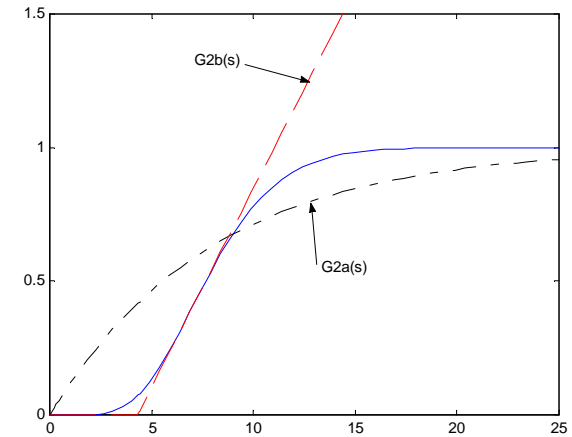
L K a

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

L a $G_{2a}(s) = \frac{1}{1+8.0s}$ T_{ar} K

$$G_{2b}(s) = \frac{0.64}{4.3s} e^{-4.3s}$$

G_{2a}
 G_{2b}



شکل ۴-۶ پاسخ پله نرمالیزه سیستم رتبه هشت

$$G_{3b}(s) = \frac{e^{-4.3s}}{1+4.3s} \quad G_{3a}(s) = \frac{e^{-4.3s}}{1+6.7s}$$

نتیجه گیری: $T_{ar} = AB$
 $0.63K$ $0.63K$

۳-۳-۴ مدل چهار جزئی

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

L K T_2 T_1 L K
 T_2 T_1

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

T_1

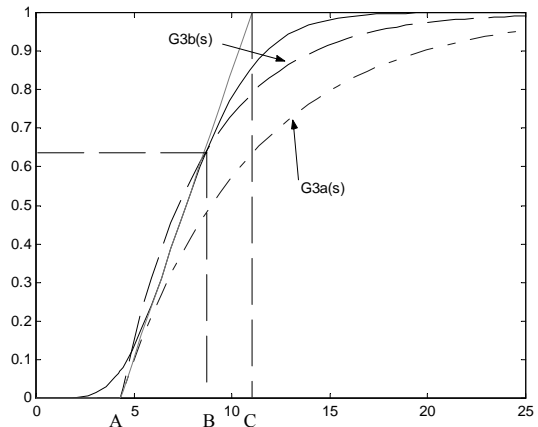
$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^8} \quad \text{مثال:}$$

$0.33K$ $0.67K$

$S(6.5)=0.33$, $S(8.9)=0.67$

K C A
 $T_{ar}=L+T$ T T_{ar}
 B) $T_{ar}=B$ $T_{ar}=C$ T_{ar}
 $T_2=AB$ $T_1=AC$ $T_2=AB$
 T_{ar} 0.63 T

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



شکل ۶-۴ پاسخ پله سیستم رسته هشت و مدل‌های سه جزئی

AC AB

T2 T1

توجه ۲:

۴-۳-۴ - مدل سیستم های انتگرال گیر

S-Shape

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

:L :T :K

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

$T_{ar} = L + T$ K

T, L

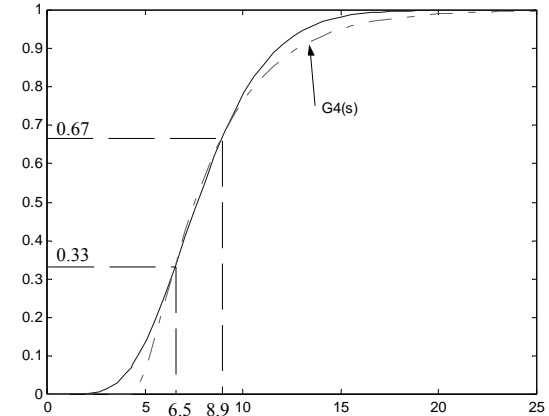
L+T

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

$$= KTe^{-1}$$

:

$$T = \frac{S(L+T) \cdot e^1}{K} \quad ()$$



شکل ۴-۷ پاسخ پله سیستم رسته هشت و مدل چهار جزئی

$$0.67 = 1 + \frac{T_2 e^{-(8.9-4.3)/T_2} - T_1 e^{-(8.9-4.3)/T_1}}{T_1 - T_2} \quad ()$$

$$0.33 = 1 + \frac{T_2 e^{-(6.5-4.3)/T_2} - T_1 e^{-(6.5-4.3)/T_1}}{T_1 - T_2} \quad ()$$

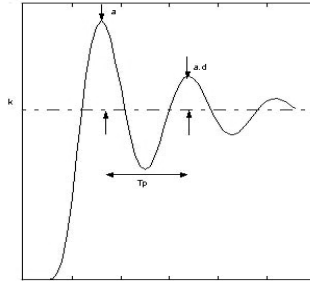
$$T_1 = 0.93, \quad T_2 = 3.2 \quad ()$$

:

$$G(s) = \frac{e^{-4.3s}}{(1+0.93s)(1+3.2s)} \quad ()$$

T2 T1

توجه ۱:



شکل ۴-۹ پاسخ پله نوسانی یک سیستم

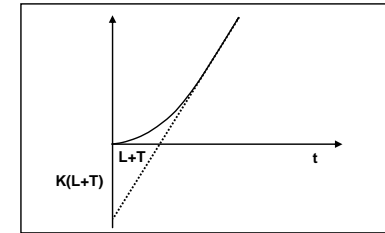
$$T_p = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\xi^2}} \quad d = e^{\frac{-2\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad ()$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T_p\sqrt{1-\xi^2}} \quad \xi = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2\pi}{\ln d}\right)^2}} \quad ()$$

$$G(s) = \frac{K\omega^2 e^{-sL}}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad ()$$

L

جمع بندی:



شکل ۴-۸ پاسخ پله سیستم انتگرال گیر

S-Shape

جمع بندی:

()

L+T, K

T

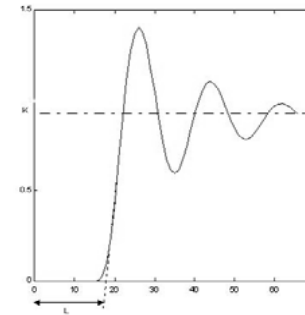
۵-۳-۴- مدل سیستمهای نوسانی

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

: ω

: K

: ξ



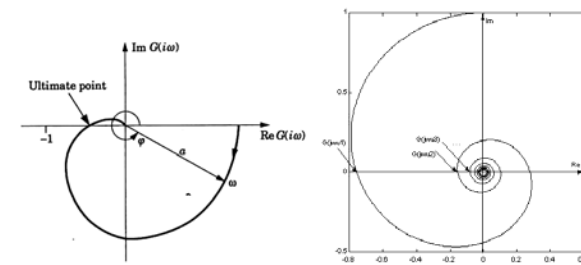
شکل ۴-۱۰ پاسخ پله نوسانی یک سیستم با تاخیر

۴-۴- روشهای پاسخ فرکانسی

LTI

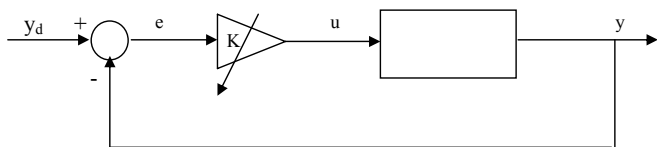
(Ultimate point)

$G(i\omega_u)$



شکل ۴-۱۱ دیاگرام نایکوئیست و نقطه بحرانی

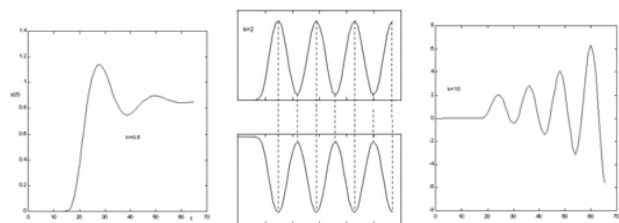
۴-۴-۱- روش پاسخ فرکانسی زیگلر-نیکولز. Z.N.



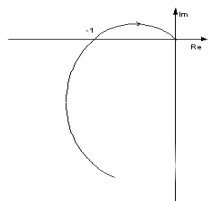
شکل ۴-۱۲ سیستم مدار بسته با کنترل کننده تناسبی

Loop)

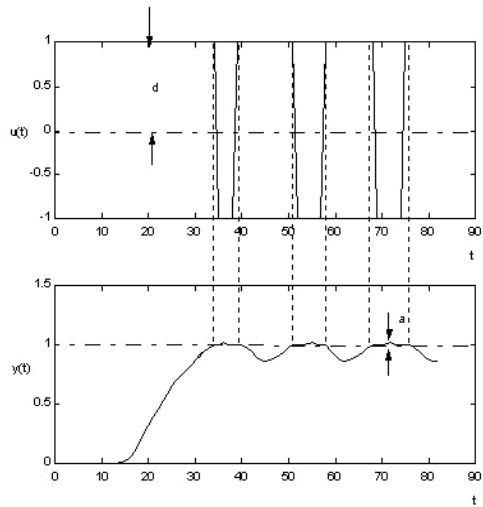
(Gain



شکل ۴-۱۳ پاسخ حلقه بسته سیستم در حالات ناپایداری، مرز ناپایداری و پایداری



$$K_u \cdot G(i\omega_u) = -1$$



شکل ۴-۱۵ شکل ورودی و خروجی فرآیند در روش فیدبک رله

$$G(i\omega_u) = -\frac{\pi a}{4 d} \quad ()$$

a

d

ω_u

d

توجه:

$$G(i\omega_u) = -\frac{1}{K_u} \quad ()$$

خلاصه متد:

K

$$() \quad \omega_u$$

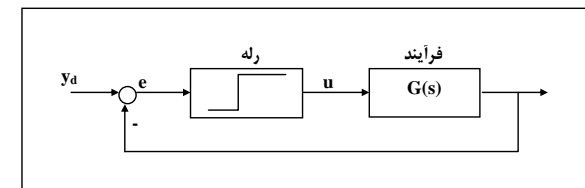
$$\kappa = \frac{|G(i\omega_u)|}{|G(0)|} \quad ()$$

K

K

۴-۴-۲- روش فیدبک رله

Z.N.



شکل ۴-۱۴ روش فیدبک رله

$$a = e^{-hT}$$

$$b_1 = K(1 - e^{-(h-L)T}) \quad ()$$

$$b_2 = Ke^{-hT}(e^{LT} - 1)$$

n) $n = L$ $\text{div } h$ L

$$y(kh) = ay(kh-h) + b_1u(kh-nh) + b_2u(kh-nh-h) \quad ()$$

Z q

$$q y(kh) = y(kh+h) \quad ()$$

$$q^{-1}y(kh) = y(kh-h) \quad ()$$

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

$$\frac{y(kh)}{u(kh)} = \frac{b_1q + b_2}{q^n (q - a)} \quad ()$$

$$H(z) = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{b_1z + b_2}{z^n (z - a)} \quad ()$$

$$y(kh) + a_1y(kh-h) + \dots + a_ny(kh-nh) = b_1u(kh-h) + \dots + b_nu(kh-nh) \quad ()$$

$$A(q) y(kh) = B(q) u(kh) \rightarrow \begin{cases} A(q) = q^n + a_1q^{n-1} + \dots + a_n \\ B(q) = b_1q^{n-1} + b_2q^{n-2} + \dots + b_n \end{cases} \quad ()$$

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

a_i, b_i

Z.N

جمع بندی:

(Ultimate Point)
PID

۴-۵- روشهای شناسایی پارامتریک

۴-۵-۱- مدل‌های پارامتریک

A/D

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

) $L \leq h$ h

$$y(kh) = ay(kh-h) + b_1u(kh-h) + b_2u(kh-2h) \quad ()$$

$$Y = \begin{bmatrix} y(h) \\ y(2h) \\ \vdots \\ y(Nh) \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} \Phi_1^T \\ \Phi_2^T \\ \vdots \\ \Phi_N^T \end{bmatrix} \quad ()$$

$$\Phi \cdot \theta = Y \quad ()$$

(N>>n)

N×n

Φ

$$E = Y - \Phi \cdot \theta$$

$$V(\theta) = E^T \cdot E$$

$$\theta_{opt} = \hat{\theta} = \Phi^{-1} \cdot Y \quad ()$$

()

Φ^{-1}

$$\Phi^{-1} \doteq (\Phi^T \Phi)^{-1} \cdot \Phi^T \quad ()$$

جمع بندی:

$\hat{\theta}$

L.S. روش تخمین کمترین مربعات ۴-۵-۲

Least-Squares

$$\{u(kh)\}_{k=1}^N, \quad \{y(kh)\}_{k=1}^N \quad ()$$

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

$$e(kh) = A(q)y(kh) - B(q)u(kh) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad ()$$

θ

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

$V(\theta)$ θ

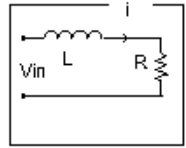
$$\varphi_k = (-y(kh-h), \dots, -y(kh-nh), u(kh-h), \dots, u(kh-nh))^T \quad ()$$

$$y(kh) = \varphi_k^T \cdot \theta \quad ()$$

$$\begin{cases} y(h) = \varphi_1^T \cdot \theta \\ y(2h) = \varphi_2^T \cdot \theta \\ \vdots \\ y(Nh) = \varphi_N^T \cdot \theta \end{cases} \quad ()$$

θ

۴-۵-۴ - مثال ۲) مدل دینامیکی



RL

L,R

$$v_{in} = v_L + v_R = L \frac{di}{dt} + Ri \quad ()$$

$$Y = \begin{bmatrix} v_{in}^1 \\ v_{in}^2 \\ \vdots \\ v_{in}^N \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} \frac{di^1}{dt} & i^1 \\ \frac{di^2}{dt} & i^2 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{di^N}{dt} & i^N \end{bmatrix}, \quad \theta = [L \ R]^T \quad ()$$

$$Y = \Phi \cdot \theta \quad ()$$

L.S. : ()

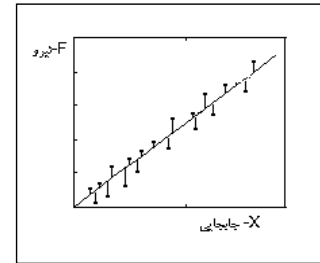
$$\theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \cdot \Phi^T \cdot Y \quad ()$$

N

۴-۶ - خلاصه و جمع بندی

۴-۵-۳ - مثال ۱) نمایش گرافیکی روش L.S.

()



()

$$F = K \cdot x \quad ()$$

:

$$Y = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad ()$$

$$\theta = [K]$$

$$Y = \Phi \cdot \theta \quad ()$$

θ

$$K = \theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \cdot \Phi^T \cdot Y \quad ()$$

K



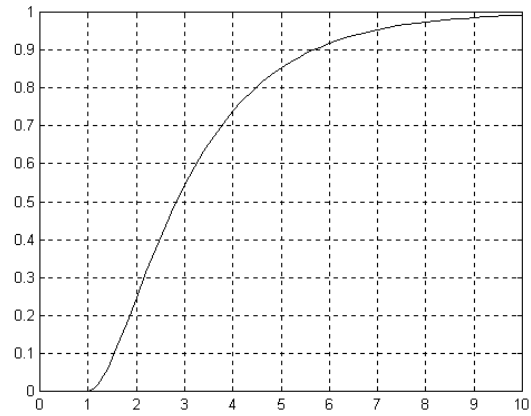
مسائل

$$G(s) = \frac{e^{-s}}{(s+2)(s+3)} \quad -\text{ف-1}$$

) .

(

-\text{ف-2}



-\text{ف-3}

$$J \quad F_d \quad \Phi^{-1} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T$$

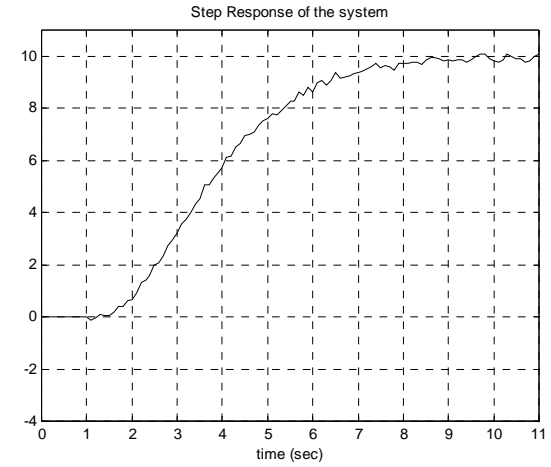
$$G(s) = \frac{K e^{-s}}{s+a}$$

L.S.

PID

$$U = \begin{bmatrix} 0.21 \\ 0.605 \\ 1.01 \\ 1.59 \\ 2.01 \\ 2.05 \end{bmatrix} \rightarrow y = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 5 \\ 10 \end{bmatrix}$$

L.S.



$$S(t) = t - 4 + e^{-(t-3)} \quad -\text{f-f}$$

$$G(s) = \frac{10e^{-s}}{(s+2)^3}$$

$$\tau = J \ddot{\theta} + F_d \quad : \quad \begin{matrix} F_d & J & \tau \end{matrix}$$

$$\dot{\theta} = [0 \ 1 \ 2 \ 2.5 \ 3]^T \quad \tau = [1 \ 3 \ 5 \ 6 \ 7]^T$$

فصل پنجم

طراحی، تنظیم و پیاده سازی

کنترل کننده PID

- [1] Astrom, Karl J. and Haggglund Tore, *PID Controllers: theory, design, and tuning*, 2nd Ed. Instrument Society of America, 1995.
- [2] Coripio A.B., *Tuning of Industrial Control Systems*, Instrument Society of America, 1990.
- [3] Datta, Aniruddha, Ming-Tzu Ho, and Shankar P. Bhattacharyya, *Structure and synthesis of PID controllers*, Springer, 2000.
- [4] Marlin, T. E., *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*, McGraw-Hill, 1995
- [5] McMillan G.K., *Tuning and Control Loop Performance*, 2nd Edition, Instrument Society of America, 1983.
- [6] Özbay, Hitay, *Introduction to feedback control theory*, CRC Press, 2000.
- [7] Shinskey F.G., *Process Control Systems: Application, Design and Tuning*, 3rd Edition, McGraw-Hill, 1988.
- [8] Tan, Kok Kiong et al., *Advances in PID control*, Springer, 1999
- [9] Wang, Liuping and William R. Cluett, *From plant data to process control : ideas for process identification and PID design*, Taylor & Francis, 2000.
- [10] Yu, Cheng-Ching, *Auto-tuning of PID controllers : relay feedback approach*, Springer, 1999.

فصل پنجم

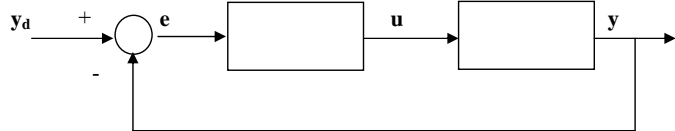
طراحی، تنظیم و پیاده سازی

کنترل کننده PID

- [1] Astrom, Karl J. and Hagglund Tore, *PID Controllers: theory, design, and tuning*, 2nd Ed. Instrument Society of America, 1995.
- [2] Coripio A.B., *Tuning of Industrial Control Systems*, Instrument Society of America, 1990.
- [3] Datta, Aniruddha, Ming-Tzu Ho, and Shankar P. Bhattacharyya, *Structure and synthesis of PID controllers*, Springer, 2000.
- [4] Marlin, T. E., *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*, McGraw-Hill, 1995
- [5] McMillan G.K., *Tuning and Control Loop Performance*, 2nd Edition, Instrument Society of America, 1983.
- [6] Özbay, Hitay, *Introduction to feedback control theory*, CRC Press, 2000.
- [7] Shinskey F.G., *Process Control Systems: Application, Design and Tuning*, 3rd Edition, McGraw-Hill, 1988.
- [8] Tan, Kok Kiong et al., *Advances in PID control*, Springer, 1999
- [9] Wang, Liuping and William R. Cluett, *From plant data to process control : ideas for process identification and PID design*, Taylor & Francis, 2000.
- [10] Yu, Cheng-Ching, *Auto-tuning of PID controllers : relay feedback approach*, Springer, 1999.

فصل پنجم: طراحی، تنظیم و پیاده سازی کنترل کننده PID

۵-۱- تعاریف و مفاهیم



شکل ۵-۱ دیاگرام بلوکی کنترل فرآیند با حلقه فیدبک

PID P
 PID - - PI
 PID

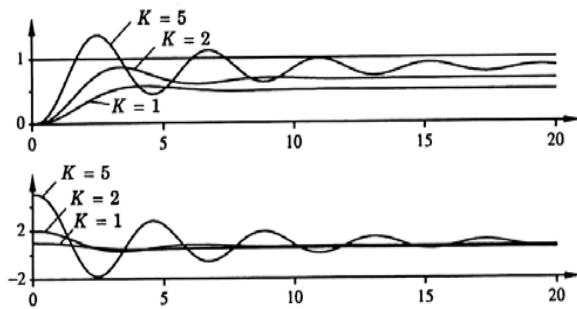
$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(c) dc + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad ()$$

PID (e=y_d-y) e u

K : P
 : D
 : I

T_d, T_i, K : PID T_d T_i K

$$\frac{y}{n} = \frac{L(s)}{1+L(s)} \quad (1)$$

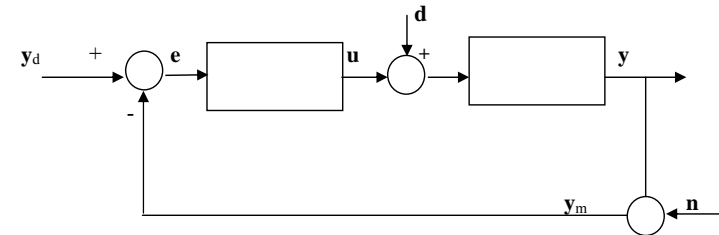


شکل ۳-۵ تاثیر افزایش بهره کنترل در پایداری و پاسخ سیستم

PID

۱-۱-۵- ترم تناسبی کنترل کننده PID

$$u(t) = Ke(t) \quad (2)$$



شکل ۲-۵ دیاگرام بلوکی کنترل فرآیند با حلقه فیدبک و حضور نویز و اغتشاش

$$y = \frac{G(s)K}{1+G(s)K} y_d + \frac{G(s)}{1+G(s)K} d - \frac{G(s)K}{1+G(s)K} n \quad (3)$$

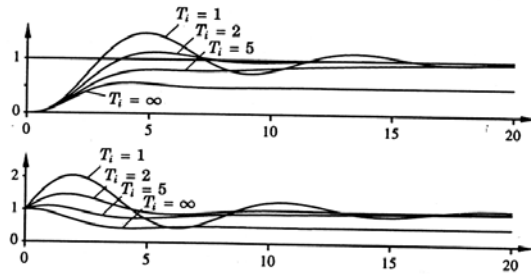
$$\frac{y}{y_d} = \frac{G(s)K}{1+G(s)K} = \frac{L(s)}{1+L(s)} \quad (4)$$

$$\frac{y}{d} = \frac{G(s)}{1+G(s)K} = \frac{G(s)}{1+L(s)} \quad (5)$$

۵-۱-۲- ترم انتگرال گیر

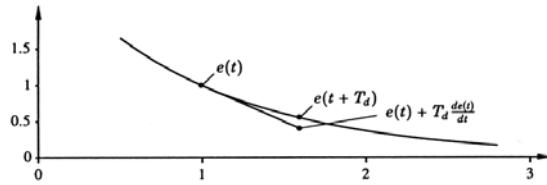
(Steady-

state)



شکل ۵-۵ تاثیر ترم انتگرالگیر در کاهش خطای ماندگار

۵-۱-۳- ترم مشتق گیر

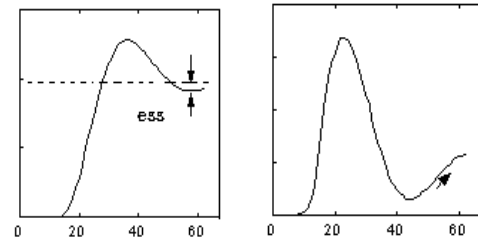


شکل ۵-۶ تعبیر ترم مشتق گیر

$$\frac{de(t)}{dt}$$

$$u(t) = K \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

PI



شکل ۵-۴ تاثیر ترم انتگرالگیر در کاهش خطای ماندگار کنترل کننده PI

%

$(T_i = \infty)$
 $(T_i \quad)$

T_i

PI

PID

PD

PID

(Notch filter)

PID

۵-۳- پیاده سازی کنترل کننده ها

۵-۳-۱- کنترل کننده های الکتریکی

PI

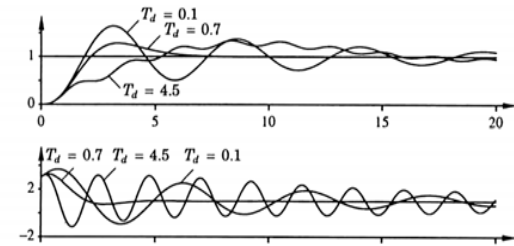
(passive)

PID

$$e(t + T_d) \cong e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

T_d T_d
PD

T_d



شکل ۷-۵- تاثیر ترم مشتق گیر در افزایش سرعت سیستم

۵-۲- در چه فرآیندهایی کنترل کننده PID کافی است؟

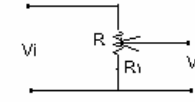
(tracking)

PID

PI

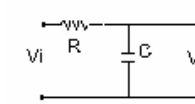
PI

- کنترل کننده تناسبی



$$K(s) = \frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{R_1}{R} = K \leq 1$$

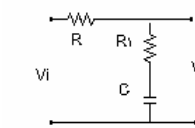
- کنترل کننده انتگرال گیر



$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{1}{1+RCs} \quad RC \gg 1$$

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} \cong \frac{1}{RCs} \Rightarrow T_i = RC$$

- کنترل کننده PI



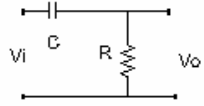
PI

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{1+R_1Cs}{1+(RC+R_1C)s} \cong \frac{R_1}{R+R_1} + \frac{1}{(R+R_1)Cs}$$

$$\Rightarrow K = \frac{R_1}{R+R_1}, \quad \frac{K}{T_i} = \frac{1}{(R+R_1)C}$$

$$K = \frac{R_1}{R} < 1, \quad \frac{K}{T_i} = \frac{1}{RC} \quad R \gg R_1$$

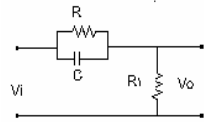
- کنترل کننده مشتق گیر



$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{RCs}{1+RCs} \quad RC \ll 1$$

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} \cong RCs \quad T_d = RC$$

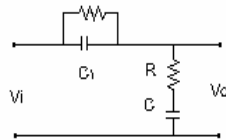
- کنترل کننده PD



$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{R_1(1+RCs)}{R+R_1(1+RC)s} \cong \frac{R_1}{R}(1+RCs)$$

$$\Rightarrow K = \frac{R_1}{R}, \quad T_d = RC, \quad R \gg R_1$$

- کنترل کننده PID



PD,PI

PID

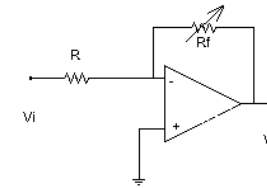
$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = K \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$K = \frac{R}{R_1}, \quad T_d = R_1 C_1, \quad T_i = R_1 C, \quad R_1 \gg R, \quad R_1 C \gg 1$$

۲-۳-۵- کنترل کننده های الکترونیکی

Op-Amp

-کنترل کننده تناسبی



$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = -\frac{R_f}{R}$$

$R < R_f$

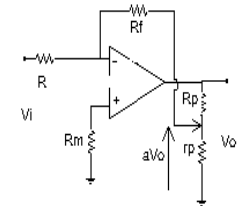
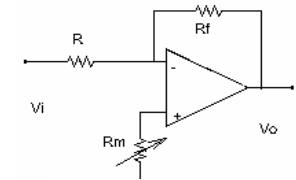
(-1)

($R_f = R$)

offset

offset

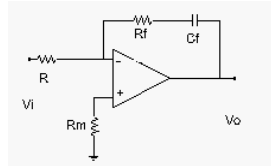
R_m



$$\alpha = \frac{r_p}{R_p + r_p} < 1$$

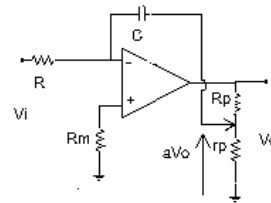
$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = -\frac{1}{\alpha} \frac{R_f}{R}$$

-کنترل کننده انتگرال گیر



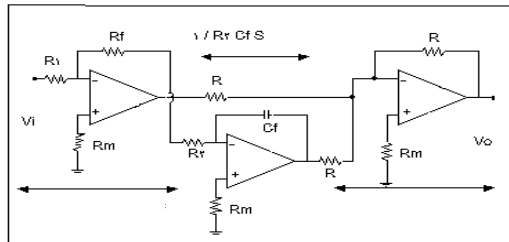
$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = -\frac{R_f}{R} \left(1 + \frac{1}{R_f C_f s} \right) = -K \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$K = \frac{R_f}{R}, \quad T_i = R_f C_f$$

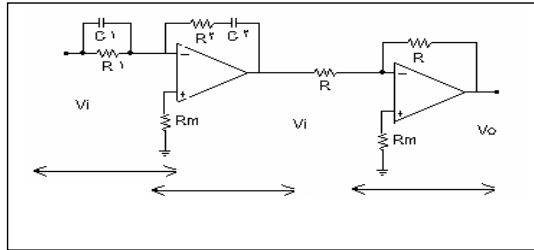


$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = -\frac{1}{\alpha R C s}$$

PI

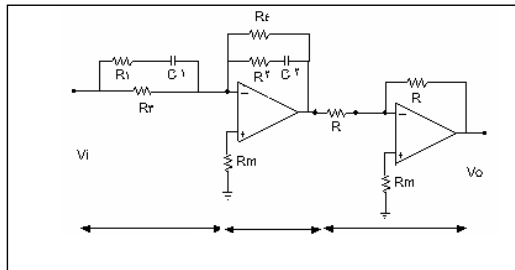


شکل ۸-۵ کنترل کننده PI ساخت شرکت فیات و زیمنس



شکل ۵-۸ کنترل کننده الکترونیکی PID

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{R_2 (R_1 C_1 s + 1)(R_2 C_2 s + 1)}{R_1 R_2 C_2 s} \quad ()$$

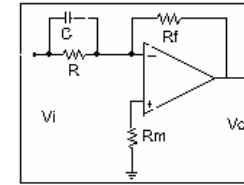


شکل ۵-۹ کنترل کننده الکترونیکی پیش فاز- پس فاز

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{[(R_1 + R_3)C_1 s + 1](R_2 C_2 s + 1)}{(R_1 C_1 s + 1)(R_2 + R_4)C_2 s + 1} \quad ()$$

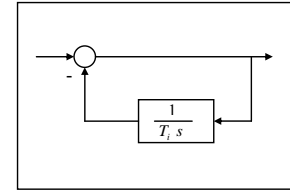
۳-۳-۵- کنترل کننده های نیوماتیکی

- کنترل کننده مشتق گیر



$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = -\frac{R_f}{R}(1 + RCs) = -K(1 + T_d s)$$

$$K = \frac{R_f}{R}, \quad T_d = RC$$

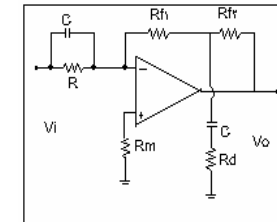


$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = \frac{1}{1 + \frac{1}{T_i s}} = \frac{T_i s}{1 + T_i s}$$

$$T_i s \ll 1$$

$$\frac{v_o(s)}{v_i(s)} = T_i s$$

PI

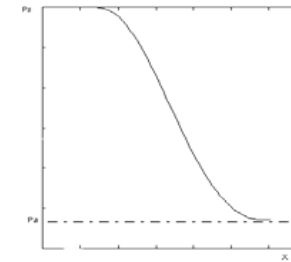
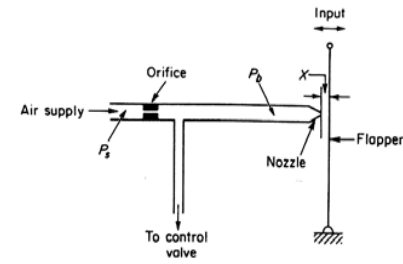


PID

- کنترل کننده PID

PD,PI

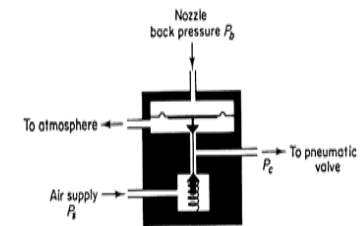
- تقویت کننده های نیوماتیکی نازل - فلپر (Nozzle - Flapper)



P_b
 $P_b = P_s$ Supply

$P_b = P_a$

- رله نیوماتیکی

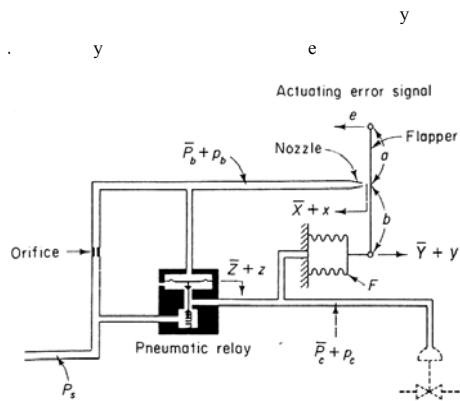


() P_b

$$P_b \qquad P_s$$

$$P_a \leq P_c \leq P_s \qquad P_s$$

- کنترل کننده تناسبی نیوماتیکی



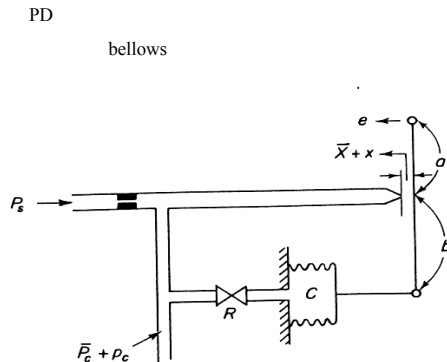
شکل ۵-۱۰ کنترل کننده تناسبی نیوماتیک

y Bellows Bellows

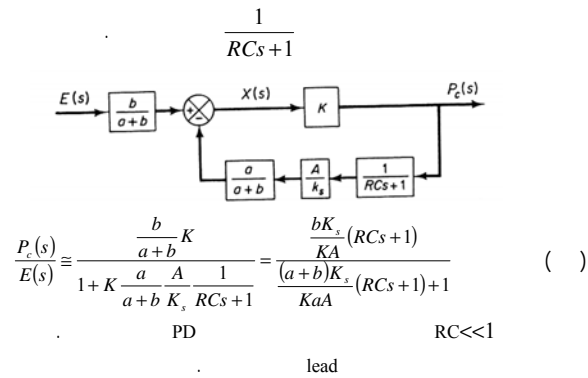
() e P_o

y

- کنترل کننده PD نیوماتیک



شکل ۵-۱۱ کنترل کننده PD نیوماتیک



P_c bellows R y

$$P_b = K_1 \cdot x$$

$$P_b = K_2 \cdot z \Rightarrow z = \frac{P_b}{K_2}$$

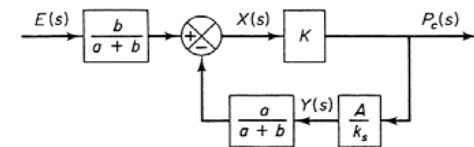
$$P_c = K_3 \cdot z = \frac{K_3}{K_2} P_b = \frac{K_1 K_3}{K_2} x \Rightarrow P_c = K \cdot x$$

$$x = \frac{b}{a+b} e - \frac{a}{a+b} y$$

bellows

$$A \cdot P_c = K_s \cdot y$$

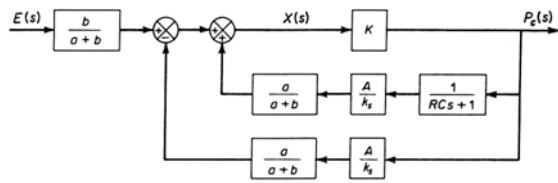
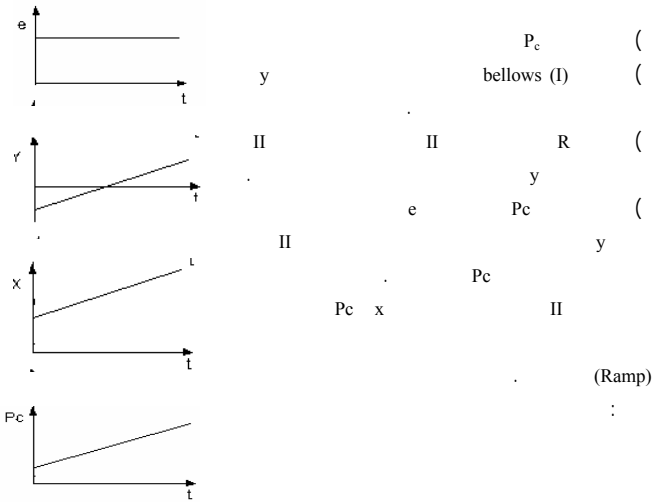
$$x = \frac{b}{a+b} e - \frac{a}{a+b} \frac{A}{K_s} P_c$$



$$\frac{P_c}{E} = \frac{\frac{bK}{a+b}}{1 + K \frac{a}{a+b} \frac{A}{K_s}} = K_p \quad ()$$

K_p e

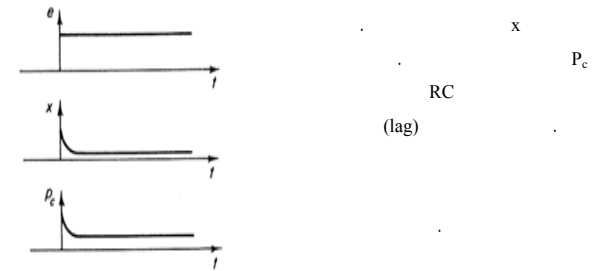
$P = K_p e$
 a,b : (bellows) K_s K_p
 b,a K_s (Knob)



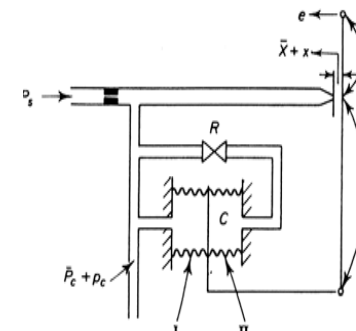
شکل ۱۳-۵ دیاگرام بلوکی کنترل کننده PI نیوماتیک

$$\frac{P_c(s)}{E(s)} \cong \frac{\frac{Kb}{a+b}}{1 + K \frac{a}{a+b} \frac{A}{K_s} \left(1 - \frac{1}{RCs+1}\right)} \stackrel{RC \gg 1}{=} \frac{bK_s}{aA} \left(1 + \frac{1}{RCs}\right) \quad ()$$

PID



- کنترل کننده PI نیوماتیکی



شکل ۱۲-۵ کنترل کننده PI نیوماتیک

۴-۳-۵ - کنترل کننده های میکروپروسسوری

PLC PID

PID

PID

- کنترل کننده تناسبی:

$$P = K(y_d - y) \Rightarrow P(t_k) = K(y_d(t_k) - y(t_k)) \quad ()$$

- کنترل کننده انتگرالی:

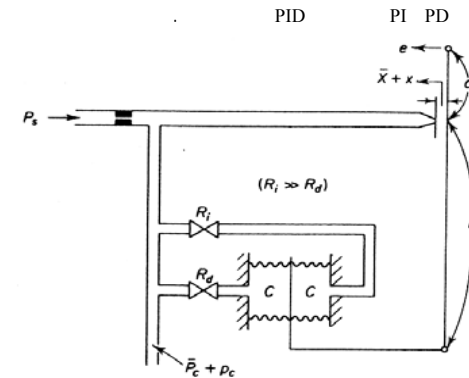
$$I(t) = \frac{K}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \Rightarrow \frac{dI(t)}{dt} = \frac{K}{T_i} e(t) \quad ()$$

- روش Backward Difference

$$\frac{dI(t)}{dt} \cong \frac{I(t_k) - I(t_{k-1})}{h} = \frac{K}{T_i} e(t_k) \quad ()$$

$$K = \frac{bK_s}{aA}, \quad T_i = RC \quad ()$$

- کنترل کننده نیوماتیک



شکل ۱۴-۵ کنترل کننده PID نیوماتیک

$$\frac{P_c(s)}{E(s)} \cong \frac{\frac{Kb}{a+b}}{1 + K \frac{a}{a+b} \frac{A}{K_s} \frac{(R_i C - R_d C)s}{(R_d C s + 1)(R_i C s + 1)}} \quad ()$$

PID:

$$\frac{P_c(s)}{E(s)} \cong K \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad ()$$

$$K = \frac{bK_s}{aA}, \quad T_i = R_i C, \quad T_d = R_d C \quad ()$$

$$D = KT_d s \quad ()$$

$$D: \frac{KT_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \quad ()$$

1/10 8 < N < 20

$$D + \frac{T_d}{N} Ds = KT_d s E(s) \quad ()$$

$$D = -\frac{T_d}{N} \frac{dD}{dt} + KT_d \frac{de}{dt} \quad ()$$

- روش B.D.

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

$$\equiv \frac{T_d}{N} \frac{D(t_k) - D(t_{k-1})}{h} + D(t_k) = KT_d \frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{h} \quad ()$$

$$\frac{T_d}{N} \frac{(1 - z^{-1})}{h} D + D = KT_d \frac{(1 - z^{-1})}{h} e$$

$$D(t_k) = \frac{T_d}{T_d + Nh} D(t_{k-1}) + \frac{NKT_d}{T_d + Nh} (e(t_k) - e(t_{k-1})) \quad ()$$

- روش Tustin

$$s = \frac{2}{h} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad ()$$

$$D(t_k) = \frac{2T_d - Nh}{2T_d + Nh} D(t_{k-1}) + \frac{2KT_d N}{2T_d + Nh} (e(t_k) - e(t_{k-1})) \quad ()$$

PID

$$\Rightarrow I(t_k) = I(t_{k-1}) + \frac{Kh}{T_i} e(t_k) \quad ()$$

Z

Z

$$\frac{1}{s}$$

$$s(I) = \frac{1 - z^{-1}}{h} (I) \Rightarrow s = \frac{1 - z^{-1}}{h} \quad ()$$

S

Z

B.D.

S

Z

- روش دو خطی یا Tustin

$$I(t_k) = I(t_{k-1}) + \frac{Kh}{T_i} \left(\frac{e(t_k) + e(t_{k-1})}{2} \right) \quad ()$$

Z

$$S = \frac{2}{h} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad ()$$

$$I(t_k) = I(t_{k-1}) + b_{i1} e(t_k) + b_{i2} e(t_{k-1}) \quad ()$$

b_{ij}

- کنترل کننده مشتق گیر

H(s)

	B.D	Tustin
a_0	$-T_i(T_f + h)$	$2T_i(2T_f + h)$
a_1	$-T_i(2T_f + h)$	$-8T_iT_f$
a_2	T_iT_f	$2T_i(2T_f - h)$
b_0	$K(h^2 + (T_i + T_f)h + T_i(T_d + T_f))$	$K(h^2 + 2(T_i + T_f)h + 4T_i(T_d + T_f))$
b_1	$-K(2T_i(T_d + T_f) + h(T_i + T_f))$	$K(2h^2 - 8T_i(T_d + T_f)h - 2h(T_i + T_f))$
b_2	$K(h^2 + (T_i + T_f)h + T_i(T_d + T_f))$	$K(h^2 + 4T_i(T_i + T_f) + 2h(T_i + T_f))$

جدول ۵-۱ پارامترهای کنترل کننده PID دیجیتال

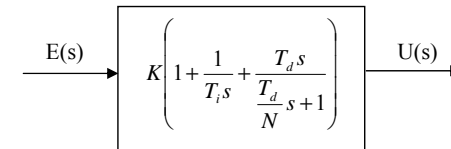
$$u(t_k) = \frac{1}{a_0} \{b_0 e(t_k) + b_1 e(t_{k-1}) + b_2 e(t_{k-2}) - a_1 u(t_{k-1}) - a_2 u(t_{k-2})\} \quad ()$$

$$D(t_k) = a_d D(t_{k-1}) + b_d (e(t_k) - e(t_{k-1})) \quad ()$$

- جمع بندی:

PID

Z



$$T_f = \frac{T_d}{N}, \quad 8 \leq N \leq 20 \quad ()$$

$$B.D. \quad s \rightarrow \frac{1-z^{-1}}{h} \quad Tustin \quad s \rightarrow \frac{2}{h} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$$

Z

h

$$H(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K(T_i(T_f + T_d))s^2}{T_i s(T_f s + 1)} \rightarrow \quad ()$$

$$H(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{b_2 z^{-2} + b_1 z^{-1} + b_0}{a_2 z^{-2} + a_1 z^{-1} + a_0}$$

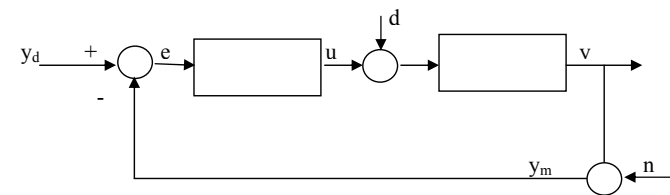
۵-۴- طراحی کنترل کننده PID

۵-۴-۱- مقدمه

PID

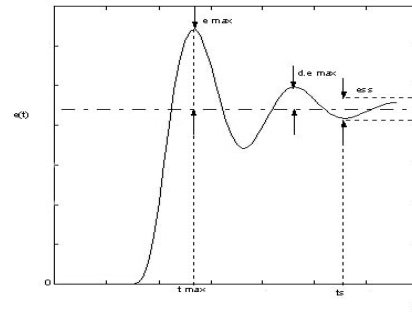
L(s)

()



شکل ۵-۱۵ دیاگرام بلوکی کنترل حلقه بسته یک فرآیند

$e(t) = y_d(t) - y(t)$ ()



شکل ۵-۱۶ پاسخ پله خطای یک سیستم حلقه

e_{max} :

t_{max} :

t_s :

d :

(Integral Absolute Error) : $IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt : \|e\|_1$ ()

(Integral Square Error) : $ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt : \|e\|_2$ ()

(Integral Time Absolute Error) : $ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt$ ()

$$y(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_0 t} \sin(\omega_0 t \sqrt{1-\xi^2} + \varphi) \quad ()$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right) \quad ()$$

PD PI $\xi \omega_0$

$$\%O = e^{\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \times 100 \quad ()$$

$$d = e^{\frac{-2\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad ()$$

$$t_{\max} = \frac{\pi}{\omega_0 \sqrt{1-\xi^2}} \quad ()$$

$$t_s \cong \frac{\ln(0.05\sqrt{1-\xi^2})}{\xi\omega_0} \quad ()$$

$$t_r = \frac{1}{\omega_0} e^{\varphi/\tan\varphi} \quad ()$$

()

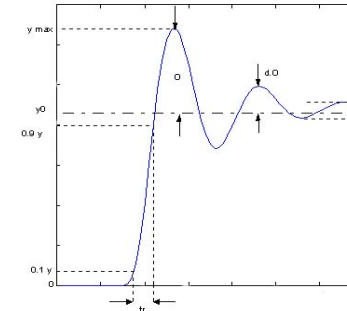
PD PI $\xi \omega_0$

ω_0

$\xi = 0.707$ $\xi = 0.2155$ $d = 1/4$ 50%

(quarter cycle) $d = 1/4$

()



شکل ۱۷-۵ تعریف معرفهای خطا در پاسخ پله یک سیستم حلقه بسته

$$\% O = \frac{O}{y_0} \times 100 \quad ()$$

ω_0

d

5%

t_s

0.9y_0

0.1y_0

t_r (rise time)

PD PI

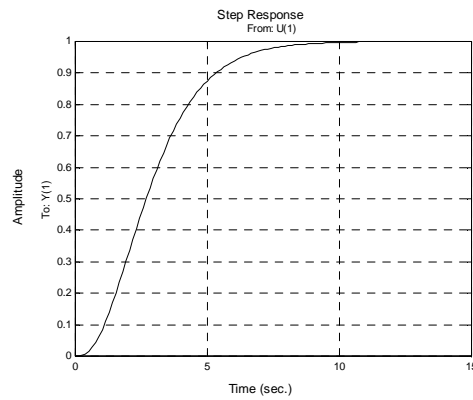
$$T(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad ()$$

کنترل کننده	K	Ti	Td	Tp
P	1/a	0	0	4L
PI	0.9/a	3L	0	5.7L
PID	1.2/a	2L	L/2	3.4L

جدول ۵-۲ پارامترهای کنترل کننده PID برای سیستم انتگرال گیر با تاخیر

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^3}$$

مثال:



PID

$$L = 0.806$$

$$a = 0.218$$

$$C(S) = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

$$K = 5.5, T_i = 1.61, T_d = 0.403$$

()

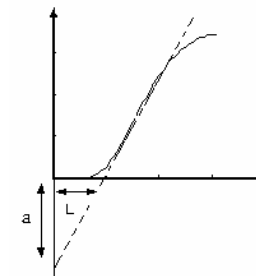
۲-۴-۵- روشهای تنظیم زیگلر-نیکولز Ziegler-Nichols

Z.N. PID

Z.N.

الف) روش پاسخ پله

$$G(s) = \frac{a}{sL} e^{-sL} \quad ()$$



شکل ۵-۱۸ پاسخ پله یک سیستم انتگرال گیر با تاخیر

T_d, T_i, K

PID, PI P

T_p

(ب) روش پاسخ فرکانسی

$$K_u \cdot G(\omega_u) = -1 \quad ()$$

$$T_u = \frac{2\pi}{\omega_u} \quad (rad / sec) \quad ()$$

K_u

$T_u \quad K_u$

T_p	T_d	T_i	K	کنترل کننده
T_u			$0.5K_u$	P
$1.4T_u$		$0.8T_u$	$0.4K_u$	PI
$0.85T_u$	$0.125T_u$	$0.5T_u$	$0.6K_u$	PID

جدول ۳-۵ پارامترهای کنترل کننده PID با استفاده از روش پاسخ فرکانسی

PI

T_p

PID P

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^3}$$

$$K_u = 8 \quad \text{and} \quad T_u = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} = 3.63 \quad ()$$

$$K = 4.8, \quad T_i = 1.81, \quad T_d = 0.44 \quad ()$$

(quarter cycle) $d = 1/4$

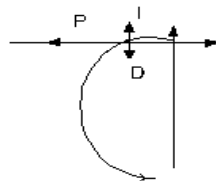
50% $\xi = 0.2155$

K

(ج) توضیح نحوه عملکرد روش Z.N. در حوزه فرکانسی

Z.N.

D, I P



شکل ۱۹-۵ نحوه انتقال نقطه بحرانی توسط کنترل کننده PID

PID

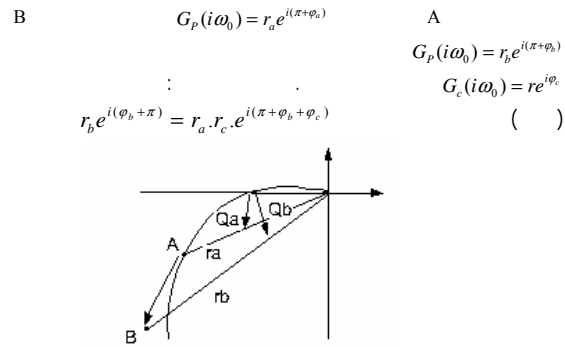
$$G(S) = K \left(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$G(j\omega) = K \left(1 + j(\omega T_d) - \frac{j}{T_i \omega} \right) \quad ()$$

۳-۴-۵- روش زیگلر-نیکولز تعمیم یافته

$d = 1/4$

Quarter Cycle



شکل ۲۰-۵ نحوه انتقال نقطه بحرانی توسط روش Z.N. تعمیم یافته

$\begin{cases} rc = \frac{rb}{ra} & \text{PI} \\ \phi_c = \phi_b - \phi_a \end{cases}$ ()

$\begin{cases} K = r_b \cos(\phi_b - \phi_a) / r_a \\ T_i = \frac{1}{\omega_0 \tan(\phi_a - \phi_b)} \end{cases}$ ()

Lag $\phi_a > \phi_b$ $T_i > 0$

T_d, T_i, K PID

T_d, T_i

$(K < 1)$ $(K > 1)$

$+90^\circ$ $T_d > 0$

-90°

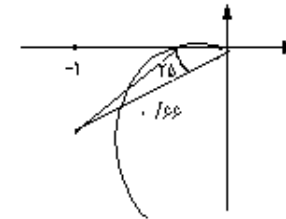
: PID

$K = 0.6K_u, \omega_u T_i = \pi, \omega_u T_d = \pi/4$ ()

$G_c(i\omega_u) = K(1 + i(\omega_u T_d - \frac{1}{\omega_u T_i})) =$ ()

$0.6K_u(1 + i(\frac{\pi}{4} - \frac{1}{\pi})) = 0.6K_u(1 + 0.407i) = 0.6622K_u e^{j25^\circ}$

$+25^\circ$ 0.6622



شکل ۲۰-۵ نحوه انتقال نقطه بحرانی توسط روش Z.N.

$+25^\circ$

$+25^\circ$

Lag

r_b

۴-۴-۵- کارآیی روش زیگلر-نیکولز

Z.N.

(Quarter-Cycle)

Z.N.

) κ τ

$$\tau = \frac{L}{L+T} = \frac{L}{T_w} \quad \kappa = \frac{|G(i\omega_u)|}{|G(0)|} \quad ()$$

κ τ

κ τ

حالت ۱: $\kappa < 0.07, \tau < 0.15$:

PI

PID

PID

$$\begin{cases} K = \frac{r_b}{r_a} \cos(\varphi_b - \varphi_a) \\ \omega_d T_d - \frac{1}{\omega_b T_i} = \tan(\varphi_b - \varphi_a) \\ T_d = \alpha T_i \end{cases} \quad ()$$

$\alpha = 0.25$

$$\begin{cases} K = \frac{r_b}{r_a} \cos(\varphi_b - \varphi_a) \\ T_i = \frac{1}{2\alpha\omega_b} (\tan(\varphi_b - \varphi_a) + \sqrt{4\alpha + \tan^2(\varphi_b - \varphi_a)}) \\ T_d = \alpha T_i \end{cases} \quad ()$$

A

$$PI: \begin{cases} K = K_u r_b \cos \varphi_b \\ T_i = \frac{-T_u}{2\pi \tan(\varphi_b)} \end{cases} \quad PID: \begin{cases} K = K_u r_b \cos \varphi_b \\ T_i = \frac{T_u}{\pi} \left(\frac{1 + \sin \varphi_b}{\cos \varphi_b} \right) \\ T_d = \frac{\alpha T_u}{\pi} \left(1 + \frac{\sin \varphi_b}{\cos \varphi_b} \right) \end{cases} \quad ()$$

$r_b = 0.6622, \varphi_b = 25^\circ$

$\xi > 0.2155$

Pessen $r_b = 0.5, \varphi_b = 20^\circ$

$$\begin{cases} r_b = 0.41, \varphi_b = 61^\circ \\ r_b = 0.29, \varphi_b = 46^\circ \end{cases} \quad ()$$

R_b

PID

PID

جمع بندی:

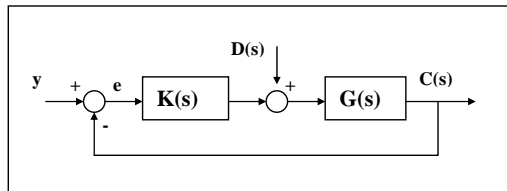
Z.N.

۵-۴-۵- سایر روشهای طراحی

ITAE

IAE ISE

مثال:



شکل ۲۲-۵- دیاگرام بلوکی یک سیستم مدار بسته

PI

$$\frac{K}{1 + \tau s}$$

ISE

$$J = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt$$

()

e(t)

T_i K

PID

حالت ۲: $\tau < 0.4$, $0.07 \leq \kappa < 0.4$:

Z.N

Z.N

PID

Z.N

Set point

حالت ۳: $\tau > 0.4$:

$$G(s) = \frac{e^{-5s}}{(s+1)^3}$$

$$K_u = 1.25, T_u = 15.7$$

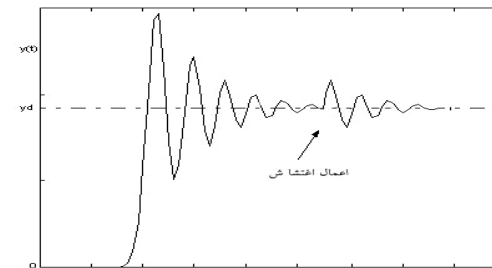
$$K = 0.75, T_i = 7.9, T_d = 2.0$$

$$\tau = 0.68, \kappa \approx 0.8$$

PID

Z.N

κ τ



شکل ۲۱-۵- پاسخ پله سیستم مدار بسته با اعمال اغتشاش

$$\frac{E(s)}{y(s)} = \frac{1}{1+K(s)G(s)}, \quad y(s) = \frac{1}{s}$$

$$\Rightarrow E(s) = \dots = -\frac{T_i}{k} \frac{kK / \tau T_i}{s^2 + \left(\frac{1+kK}{\tau}\right)s + \frac{kK}{\tau T_i}} \quad ()$$

:

$$e(t) = -\frac{T_i}{k} \frac{e^{-\xi \omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\omega_d t + \theta) \quad ()$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{kK}{\tau T_i}}, \quad \xi = (1+kK) \frac{\sqrt{T_i / \tau}}{2\sqrt{kK}}, \quad \omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2} \quad ()$$

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt = \int_0^{\infty} \left(\frac{T_i}{k}\right)^2 \frac{e^{-2\xi \omega_n t}}{1-\xi^2} \sin^2(\omega_d t + \theta) dt \quad ()$$

$T_i \quad K$

J

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial k} = 0 \\ \frac{\partial J}{\partial T_i} = 0 \end{cases}$$

 $T_i \quad K$

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

:

$$\theta = \frac{\tau}{T} \quad ()$$

- کنترل کننده تناسبی:

b	a	روش
1	1	Z.N.
0.98	0.9	IAE
0.92	1.4	ISE
1.08	0.5	ITAE

جدول ۴-۵ پارامترهای کنترل کننده P با استفاده از روشهای مختلف برای مدل سه جزئی

$$K(s) = k$$

$$k = \frac{1}{K} a(\theta)^{-b} \quad ()$$

$\theta, b, a \quad K$

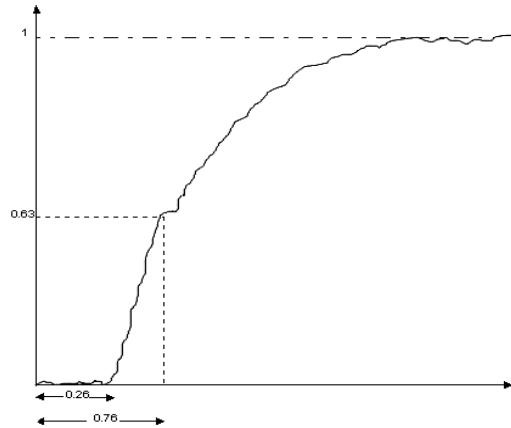
- کنترل کننده PI

$$\theta = \frac{\tau}{T} \quad G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1+Ts}$$

d	c	b	a	روش
1	3.33	1	0.9	Z.N.
0.71	1.65	0.98	0.98	IAE
0.74	2.03	0.96	1.3	ISE
0.68	1.48	0.98	0.86	ITAE

جدول ۵-۵ پارامترهای کنترل کننده PI با استفاده از روشهای مختلف برای مدل سه جزئی

مثال:



شکل ۲۳-۵ پاسخ پله یک سیستم حرارتی

$$T = 0.76 - 0.28 = 0.48$$

$$\Rightarrow G(s) = \frac{e^{-0.28s}}{1 + 0.48s}$$

$$K = 1$$

$$\theta = \frac{c}{T} = \frac{0.28}{0.48} = 0.5834$$

$$K(s) = k \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

$$k = \frac{a}{k} (\theta)^{-b}$$

$$T_i = T.c.(\theta)^d$$

- کنترل کننده PID

f	e	d	c	b	a	روش
1	0.5	1	2	1	1.2	Z.N.
1.14	0.48	0.75	1.14	0.92	1.4	IAE
1	0.56	0.77	0.92	0.95	1.5	ISE
1	0.38	0.74	1.18	0.95	1.36	ITAE

جدول ۵-۶ پارامترهای کنترل کننده PID با استفاده از روشهای مختلف برای مدل سه جزئی

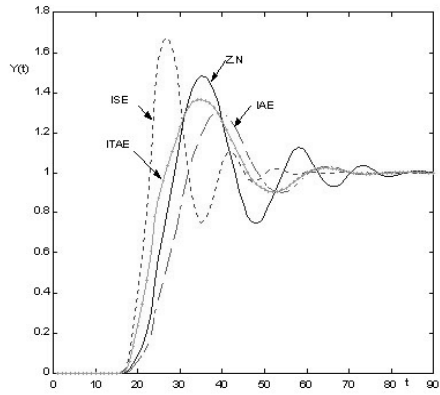
$$K(s) = k \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right)$$

$$k = \frac{1}{K} a (\theta)^{-b}$$

$$T_i = T.c.(\theta)^d$$

$$T_D = T.e.(\theta)^f$$

Z.N.



شکل ۲۴-۵ پاسخ حلقه بسته پروسه حرارتی با کنترل کننده های مختلف

۵-۵- جمع شوندهگی انتگرال گیر Integrator Windup

PID

spool

PID

windup

PID

:PI (

روش	K	T _i
Z.N	1.543	0.932
IAE	1.662	0.540
ISE	2.181	0.654
ITAE	1.458	0.492

جدول ۷-۵ پارامترهای کنترل کننده PI برای پروسه حرارتی

$$K(S) = k(1 + \frac{1}{T_i S}) \quad ()$$

IAE

ISE

Z.N.

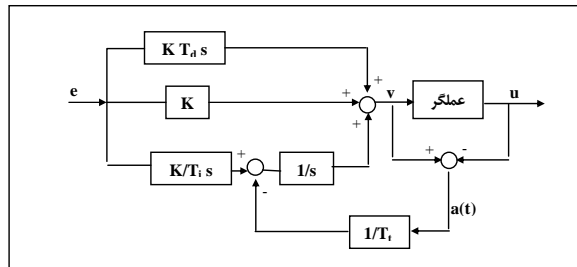
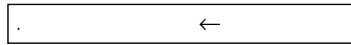
جمع بندی:

PID

PID

(Anti-windup)

(Reset)



شکل ۲۶-۵ دیاگرام بلوکی اعمال Anti-windup

$$V = \frac{K}{T_i} \frac{a(t)}{T_i} + \dots$$

$$u = V$$

$$V = U$$

$$\frac{K}{T_i} \frac{a(t)}{T_i} \quad a(t) > 0$$

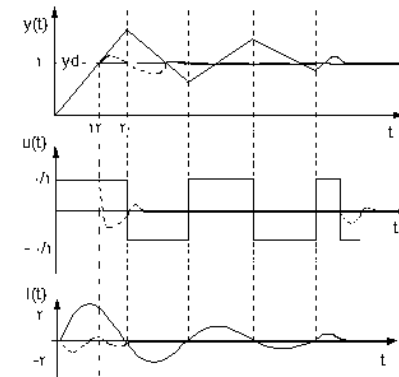
$$T_i$$

PID

PI

± 0.1

I(t)



شکل ۲۵-۵ پاسخ حلقه بسته سیستم با کنترل کننده PID به صورت معمولی (خط توپر) و با اعمال Anti-windup

I(t)

I P

u(t)

ON-OFF

PI

۵-۶- کنترل سیستمهای با تأخیر

$$|e^{-j\omega T}| = 1 \quad e^{-sT}$$

$$\angle e^{-j\omega T} = -\omega T$$

(Pade approximation)

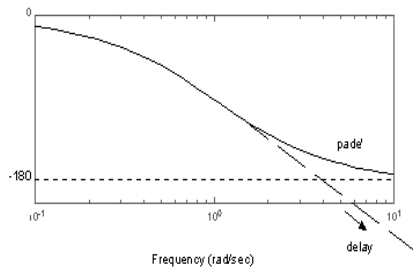
$$e^{-Ts} \approx \frac{-as+1}{+as+1} \quad a > 0$$

$$\frac{-as+1}{as+1} = 1 - 2as + 2a^2s^2 - 2a^3s^3 + \dots \quad ()$$

$$e^{-sT} = 1 - sT + \frac{1}{2}(sT)^2 - \frac{1}{6}(sT)^3 + \dots$$

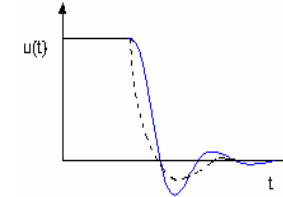
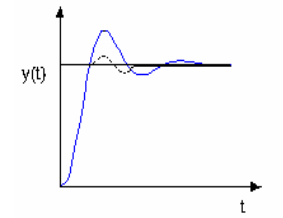
$$a = T/2$$

$$e^{-Ts} \approx \left(\frac{-T/2}{T/2} s + 1 \right) \left(\frac{T/2}{T/2} s + 1 \right) \quad ()$$



شکل ۵-۲۷ مقایسه دیاگرام فاز تقریب پده

$$() \quad T_i$$



شکل ۵-۲۶ پاسخ حلقه بسته سیستم با تغییر T_i

D,I

T_i

$T_i \quad T_d$

$$T_i = \sqrt{T_i T_d} \quad ()$$

PID

PI

reset

V,U

T_i

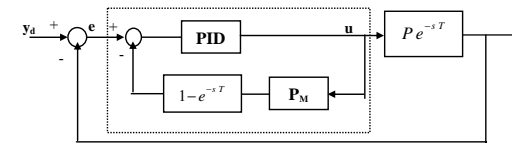
Anti-windup

$$e^{-sT}$$

جمع بندی:

T

Smith Predictor
Z.N.



شکل ۲۸-۵ دیاگرام بلوکی پیاده سازی تخمینگر اسمیت

$$P_M = P \quad \frac{P e^{-sT}}{P_M (1 - e^{-sT})}$$

C(s)

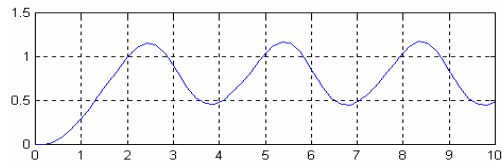
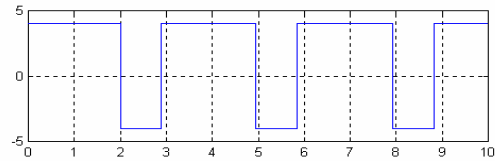
$$\frac{U(s)}{e(s)} = \frac{C(s)}{1 + P_M C(s)(1 - e^{-sT})} \quad ()$$

$$\frac{y}{y_d} = \dots = \frac{CP e^{-sT}}{1 + CP_M - CP_M e^{-sT} + CP e^{-sT}} \quad ()$$

$$\text{If } P = P_M \Rightarrow \frac{y}{y_d} = \frac{CP}{1 + CP} e^{-sT} \quad ()$$

-Δ-٤

PID K_u T_u

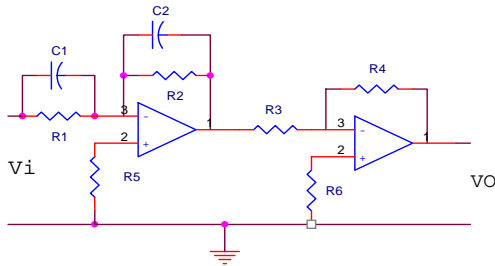


Lag Lead

-Δ-٥

Lag

Lead



$$G(s) = 12 \frac{1+0.1s}{1+0.3s}$$

Back Ward Difference Tustin

-Δ-٦

)

1KHz

-Δ-٧

مسائل

$$G(S) = \frac{1}{(S+2)(S+1)^2}$$

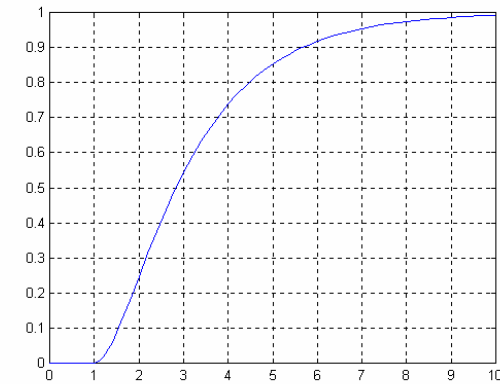
-Δ-١

K

-Δ-٢

ITAE Z.N., ISE, IAE

PID



$$G_p(S) = \frac{1}{(S+2)(S+1)^2}$$

-Δ-٣

PID

Z.N. Z.N.

(

مراجع

[1] Astrom, Karl J. and Hagglund Tore, *PID Controllers: theory, design, and tuning*, 2nd Ed. Instrument Society of America, 1995.

[2] Belanger Pierre R., *Control Engineering, a modern approach*, Saunders College Publishing, 1995.

[3] Coripio A.B., *Tuning of Industrial Control Systems*, Instrument Society of America, 1990.

[4] Datta, Aniruddha, Ming-Tzu Ho, and Shankar P. Bhattacharyya, *Structure and synthesis of PID controllers*, Springer, 2000.

[5] Marlin, T. E., *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*, McGraw-Hill, 1995

[6] Hagglund T., *Process control in Practice*, Chartwell-Bratt Ltd, U.K., 1991

[7] Marlin, T. E., *Process control: designing processes and control systems for dynamic performance*, McGraw-Hill, 1995

[8] McMillan G.K., *Tuning and Control Loop Performance*, 2nd Edition, Instrument Society of America, 1983.

[9] Özbay, Hitay, *Introduction to feedback control theory*, CRC Press, 2000.

[10] Shinskey F.G., *Process Control Systems: Application, Design and Tuning*, 3rd Edition, McGraw-Hill, 1988.

[11] Tan, Kok Kiong et al., *Advances in PID control*, Springer, 1999

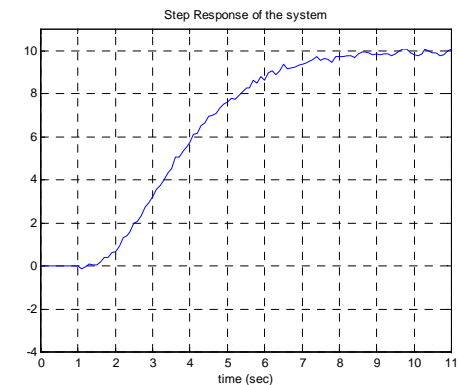
[12] Wang, Liuping and William R. Cluett, *From plant data to process control: ideas for process identification and PID design*, Taylor & Francis, 2000.

[13] Yu, Cheng-Ching, *Auto-tuning of PID controllers: relay feedback approach*, Springer, 1999.

[14] Seborg D.E., Edgar T.F. and Mellichamp D.A., *Process*

$$G(s) = \frac{10e^{-s}}{(s+2)^3}$$

PID Z.N.
% %



-Δ-V

ISE Z.N.

ISE

Dynamics and Control, Wiley, New York, 1989.

[15]

واژه نامه

فارسی - انگلیسی

sequence block	Laplace operator	
data block	orifice	
organization block (OB)	superposition law	
acrobat	disturbance	
step response	accumulator	
impulse response	integral absolute error (IAE)	
frequency response	integral time absolute error (ITAE)	
transient response	convolution integral	
double inverted pendulum	integral squared error (ISE)	
inverted pendulum	kinetic energy	
internal stability	heat energy	
jump	potential energy	
thermal process	opto-coupler isolator	
turbine pumps	pumping stations	
analogue ports	air bellows	
transfer function	PLC programming	PLC
stored on delay timer	statement list (STL)	
pulse timer (SP)	flowchart programming	
extended pulse timer	ladder programming	
delay-off timer	Taylor expansion	
delay-on timer	program block (PB)	
cyclic timer	function block (FB)	
heat convection	assignable function block	

Poppet valve	dead time	
Directional valve	normalized dead time	
Pneumatic valve	settling time	
pneumatic trip valve	average resident time	
	subroutine	
shift register	Jacobian	
anti windup	DC servo-motor	DC
heat capacity	Taylor's series	
insensitivity	pneumatic sensor	
linear actuator	spool	
rotary actuator	integrating system	
semi-rotary actuator	magnetic levitation system	
pneumatic actuator	time invariant system	
operand	oscillating system	
cyclic operation	electro-mechanical system	
overshoot	multi body systems	
heat transfer process	non-minimum phase	
thermal process		
valve actuation	trapped signal	
flip-flop	computer simulation	
relay feedback	continuity condition	
thermodynamics first law	counting and batching	
Euler law	binary counter	
De Morgan law	counter	
Newton's second law	parametric identification	
calibration	process identification	
push button	error slope	
optimal control	solenoid valve	
pilot control	Spool valve	
sequential motion control		

pipeline	electric actuation
linearization	pilot actuation
linearization about trajectory	manual actuation
flow	mechanical actuation
flow demand	pneumatic actuation
tracking	least squares estimation
Bode diagram	Smith Predictor
nyquist diagram	triac
ladder diagram	thermocouple
Bernoulli relation	thermal radiation
heat radiator	Pade approximation
chemical reactor	pneumatic amplifier
linear regression	controller tuning
electro magnetic relay	describing function
control relay	thermal convection
auxiliary relay	Boolean algebra
pneumatic relay	heat flow
Hydrostatic relations	grey box
pick and place robot	black box
Pessen method	gearbox
Backward difference method	two port cylinder
	(BD) Pneumatic cylinder
Ziegler-Nichols tuning method	single port cylinder
Tustin method	single acting cylinder
Ziegler Nichols method	Integral windup
modified Z.N.	stability margin
	simultaneous motion
	output
delay time	transistor output
rising time	automatic production line
timer	

back-emf voltage
integrated

harmonic drive
thermal conduction
input

four parameter
model
two parameter model

three parameter
model
process modeling

dynamic models

discrete model

filtered
differentiation
incremental
equations
state equation

differential equation

Lagrange equations

comparator

moment of inertia

effective moment of
inertia

valve specification

permanent magnet
DC motor

radial-piston motor

vane motor

pneumatic motor

torque producer

nozzle-flapper

blending tank

decay ratio

quarter cycle

equilibrium point

ultimate point

noise

Pneumatic

floe control

temperature control

drum speed control

delayed system
control

electronic controller

electric controller

integral controller

proportional
controller

PID controller

derivative controller

Programmable Logic
Controller

microprocessor
controller

pneumatic controller

DC motor motion
control

strain gauge

operation automatic
control

disturbance torque

Lagrangian

heat exchanger

generalized
coordinates
state variables

rugged

drum

open tank

two-phase flow

liquid blending

Cascade circuit

()

انگلیسی - فارسی

continuity condition		accumulator	
control relay		acrobat	
controller tuning		air bellows	
convolution integral		analogue ports	
counter		anti windup	
counting and batching		assignable function block	
cyclic operation		automatic production line	
cyclic timer		auxiliary relay	
data block		average resident time	
DC motor motion control		back-emf voltage	
DC servo-motor	DC	Backward difference method	(BD)
De Morgan law		Bernoulli relation	
dead time		binary counter	
decay ratio		black box	
delay time		blending tank	
delayed system control		Bode diagram	
delay-off timer		Boolean algebra	
delay-on timer		calibration	
derivative controller		Cascade circuit	
describing function		chemical reactor	
differential equation		comparator	
Directional valve		computer simulation	
discrete model		concentration control	
disturbance			

opto-coupler isolator		Lagrange equations
organization block (OB)		Lagrangian
orifice		Laplace operator
oscillating system		least squares estimation
output		linear actuator
overshoot		linear regression
Pade approximation		linearization
parametric identification		linearization about trajectory
permanent magnet DC motor		liquid blending
pick and place robot		magnetic levitation system
PID controller		manual actuation
		mechanical actuation
pilot actuation		microprocessor controller
pilot control		
pipeline		modified Z.N.
PLC programming	PLC	
PLC schematic	PLC	moment of inertia
Pneumatic		multi body systems
pneumatic actuation		Newton's second law
pneumatic actuator		noise
pneumatic amplifier		non-minimum phase
pneumatic controller		normalized dead time
Pneumatic cylinder		nozzle-flapper
pneumatic motor		nyquist diagram
pneumatic relay		open tank
pneumatic sensor		operand
pneumatic trip valve		operation automatic control
Pneumatic valve		Optimal control

harmonic drive		disturbance torque
headline crane		double inverted pendulum
heat capacity		drum ()
heat convection		drum speed control
heat energy		dynamic models
heat exchanger		effective moment of inertia
heat flow		electric actuation
heat radiator		electric controller
heat transfer process		electro magnetic relay
Hydrostatic relations		electro-mechanical system
impulse response		electronic controller
incremental equations		equilibrium point
input		
insensitivity		error slope
integral absolute error (IAE)		Euler law
integral controller		extended pulse timer
integral squared error (ISE)		filtered differentiation
integral time absolute error (ITAE)		flip-flop
Integral windup		floe control
integrated		flow
integrating system		flow demand
internal stability		flowchart programming
inverted pendulum		four parameter model
Jacobian		frequency response
jump		function block (FB)
kinetic energy		gearbox
ladder diagram		generalized coordinates
ladder programming		gray box

ultimate point	trapped signal
valve actuation	triac
valve specification	turbine pumps
vane motor	Tustin method
Ziegler Nichols method	two parameter model
Ziegler-Nichols tuning method	two port cylinder
	two-phase flow

Spool valve	Poppet valve
stability margin	potential energy
state equation	process identification
state variables	process modeling
statement list (STL)	program block (PB)
step response	Programmable Logic Controller
stored on delay timer	
strain gauge	proportional controller
subroutine	pulse timer
superposition law	pulse timer (SP)
Taylor expansion	pumping stations
Taylor's series	push button
temperature control	Quarter cycle
thermal conduction	radial-piston motor
thermal convection	relay feedback
thermal process	rising time
thermal process	rotary actuator
thermal radiation	rugged
thermocouple	semi-rotary actuator
thermodynamics first law	sequence block
three parameter model	sequential motion control
time invariant system	settling time
timer	shift register
torque producer	simultaneous motion
tracking	single port cylinder
transfer function	single rod cylinder
transient response	Smith Predictor
transistor output	solenoid valve
	spool

فهرست راهنما

۱۷۲	۱۵۰
۱۷۲	۱۲۵-۱۲۶-۱۴۲
۱۷۲	۱۷۱
۱۶۵	۲۰۲
۱۲۲-۱۳۰	۸۶
۲۰۶-۲۲۶	۲۲۷-۲۴۰-۲۴۱
۵۵-۱۰۲	۲۲۸-۲۴۰-۲۴۱
۲۴۲	۱۷۲
۱۳۴	۲۲۷-۲۳۸- ۲۴۰-۲۴۱
۱۴۴	۱۲۰
۴۷	۱۴۷
۱۳۱	۱۲۱
۹۵	۴۳
۵۰	۱۴۴
۹۲	۱۲-۲۱۴-۲۱۶
۹۳	۴۸
۵۰	۷۷
۵۱	۴۱
۵۱	۴۸
۱۴۸	۲-۵
۹	۸۰
۸	۸۰
۷	۸۱
۷	۸۱
۸	۸۱
۱۹۰	۷۹
۲۵۰	۱۶۱-۱۶۴
۴۶	۱۷۲
۴۷	

PLC

٢٢٦	PID	١٦٦	
١٤٨		١١٥	
٢-٢-٢٢٦		١٨٢	
١١		١١٦	
١١		١٢٠	
١١		٢-٧	
١١		١٦	
٨٢		١١٢	
١٨-١٩		١١٥	
٢٢٧		٢٧	PLC
١٤٦		٤٨	
١٤٤		٤٢	
٧		٢٧-٥٢-٩٦	
٣٨		١٨٨	
١٨٦		١٦٤	
١٤٨		٢-٥	
١١٧		٩	
٣٧		٤	
١١٤		٤	
١٩٢		٣	
٤٩		٣	*
٢٢٩		٤	*
١٥		٥	*
١٩		٤	*
٤٢		٥	*
		٤	*
٤٢		٢	
		١٧	
١٤٢-١٤٢		٥٢	
٤٦		٢٤٦-٢٤٧	

٣٨		١٤٦	
١٤٢		٢٤٩	
١٤٦		٢١٢	
١٥٨-١٤٤		٢-١	
١٩٠		١٨٧	
٤٤		١٤٥	
٤١-٤٢		٣٧	
٤٢		١٤١-١٤٤	
٢١٤		١٤٤	
١٢٤		١١٢	
٧٠		١١٢	
٢٢٦	Pessen	١١٧	
٢٢٢-٢٢٢	(BD)	١١	
٢٢٠		٢	
٢٢٢-٢٢٤		١١	
١٨٥		١١	
٢٢٥		٢٤٥	
١٤٢		٢-٢	
٢٢٨		٢٢	
٣٨		١١٥	
١٧٦		٤٥	
١٧٩		٧٤	
٢٢٧-٢٢٨		١٤٢-١٤٠	
١٧٥		١٢٧	
٥٤		١٤٧	
١٢٩		١٢٩	
١١٤-١٢٢	DC	١٢٩	
١٢٩		٢-٢-٢٢٦	
١٧		١٧٢	
١٨١		١٧٢-٢٢٢	

115	٢٠٢
11٧	15٣
	1٤5

1٤٧	15٤	
٢٤	٢٤٩	
1٧٨	155-1٥٣	
1٧٣	٢٠٩	PD
1٧٧	٢٠٩- ٢11- ٢1٩	PI
1٣٣	٢٠٩- ٢1٣- ٢٢٠-	PID
1٧1	٢٢5	
1٤٤	٢1٠	
1٧1	٢٠٧	
1٩٠	٢٠٤- ٢٠٨- ٢11-	
	٢٢٢	
٢٢٣	٢٠1- ٢٠٢- ٢٠٨-	
1٢٩	٢1٠- ٢1٤- ٢٢٢	
	٢٠1	
115		
115	٢٠5- ٢٠٩- ٢1٢-	
	٢1٧- ٢٢٣	
1٢٠	٢٤	
٩٩	٢٢1	
11٤	٢1٤	
11٨	٤5	
1٤- 1٤1	1٤	
11٧	٤٧	
1٤	1٧	
1٤	11٤	
1٤	1٢1	
1٤	٤٩	
٢1٤	15٤- 1٥٣	
1٤٩	1٢1	
٢٢٧	115	
٢٣- ٢٣٣ ٢٣٧	1٣٨	()
1٢٧	1٢٤- 1٢٠- 1٣٢	
1٧٣	1٤٠	