بسم الله الرحمن الرحیم

عیسی کیهوند 9013123 — سیستم های اتوماتیک درخضا — استاد: دکتر نوین زاده

فصل اول: مدل سازی سیستم های اتوماتیک

هدف از این فصل، استخراج معادله حالت سیستم های اتوماتیک است (یا سیستم های دینامیکی)

معادله حالت سیستم، یک دستگاه معادله دیفرانسیل مرتبه اول است که با حل آن می توان تغییرات متغیر های حالت را بر حسب زمان می سبه کرده.

فرم کلی یک معادله حالت برای تمام سیستم های دینامیکی به شکل زیراست:

$$\dot{x} = f(\vec{x}, \vec{u})$$

که در آن:

$\vec{x}$: متغیر حالت

$\vec{u}$: متغیر کنترل سیستم اتوماتیک

f یک تابع برداری تحلیلی است.

مثال* معادلات زیر می تواند معادله حالت سیستم های اتوماتیک باشد.

$$* \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_1 - x_2^2 \end{cases} \qquad \vec{x} = [x_1 \quad x_2]^T = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \begin{cases} f_1 = x_2 \\ f_2 = (x_1 - x_2^2) \end{cases}$$

$$* \dot{\vec{x}} = A\vec{x} + B\vec{u} \quad : A = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} ; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = x_1 - x_2 \\ \dot{x}_2 = 2x_2 - u \end{cases}$$

* معادله حالت یک سیستم خطی بصورت زیراست:

$$\dot{\vec{x}} = A\vec{x} + B\vec{u}$$

$$\vec{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n]^T$$

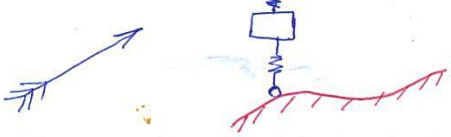
$$\vec{u} = [u_1 \quad u_2 \quad \cdots \quad u_m]^T \qquad m \le n$$

A : ماتریس مشخصه سیستم

B : ماتریس مشخصه سیستم کنترل

* سیستم: یک خط مرزی حول سیستم یا زیر سیستم هایی است که با محیط اطراف خودش تبادل انرژی می کند.

* مدل فیزیکی: شمایی از یک مدل واقعی است که چیدمان هندسی و مشخصه های فیزیکی همان مدل واقعی است.



www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

* مدل ریاضی: به معادلات حالت یک سیستم (حبری، دیفرانسیلی) مدل ریاضی می‌گویند.

* انواع سیستم های دینامیکی:

1 مکانیک خطی مانند هل دادن جسم

2 مکانیک دورانی مانند پره پنکه

3 مکانیک سیالاتی:
- سیالات تراکم ناپذیر ← هیدرولیکی
- سیالات تراکم پذیر ← پنوماتیکی

4 حرارتی

5) الکتریکی

6) مغناطیسی:
- موقت ← سلونوئید
- دائم ← آهنربا

یا مانند ← یاتاقان سانتریفیوژ

7) اقتصادی

8) رشد جمعیت

9) کلاً هرجایی که بتوان کنترل انجام داد.

* انواع متغیرها:

*1 متغیر سعی $e(t)$ یا effort

*2 متغیر پیشرو $f(t)$ یا flow

توان - $p(t) = e(t) * f(t)$ J/s

نوع سیستم	$e(t)$	$f(t)$
مکانیک خطی	F (N)	v (m/s)
مکانیک دورانی	T $(N.m)$	ω (rad/s)
سیالاتی	ΔP (pa)	if ρ=const → Q m^3/s if $\rho \neq$ const → $\dot{m}$ kg/s
حرارتی	ΔT (k)	$\dot{Q}$ (J/s)
الکتریکی	ΔV (V)	I (A)
اقتصادی	عرضه و تقاضا	قیمت

* انواع المان ها:

1) المان های اصلی:

الف) المان اینرسی: انرژی را بدون تبدیل ذخیره می‌کند و در اختیار قرار می‌دهد. (مشخصه: I)

$e(t) = I \frac{df(t)}{dt}$ مانند $\rightarrow$ $T = I\alpha = I \frac{d\omega}{dt}$

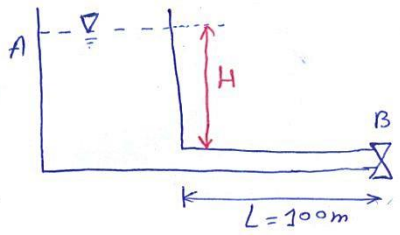
www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

*1 می‌خواهیم اینرسی سیالاتی:

$$F = ma = m\frac{dU}{dt} \longrightarrow \Delta P \cdot A = \rho \cdot L \cdot A \frac{dQ/A}{dt} \longrightarrow \Delta p = \underbrace{\frac{\rho L}{A}}_{I}\frac{dQ}{dt}$$

$$\longrightarrow \boxed{I = \frac{\rho L}{A}}$$

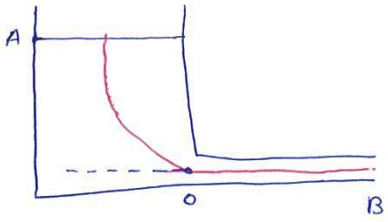
* تمرین: تغییرات Q بر حسب زمان $(Q(t))$ را برای مخزن با ارتفاع $20\,m$ برای داخل لوله به قطر $1\,m$ و طول $100\,m$ می‌خواهیم.



جواب:

$$\frac{U_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + g z_1 = \frac{U_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + g z_2 + \int_1^2 \frac{\partial U}{\partial t} ds$$

$$\begin{cases} z_A = H = 20m \\ P_A = P_a \\ U_A = 0 \end{cases} \qquad \begin{cases} z_B = 0 \\ P_B = P_a \\ U_B = ? \end{cases}$$



Bernouli equation along a streamline from A to B:

$$\frac{0}{2} + \frac{P_a}{\rho} + g(20) = \frac{U_B^2}{2} + \frac{P_a}{\rho} + g(0) + \int_A^B \frac{\partial U}{\partial t} ds$$

$$\longrightarrow 196.2 = \frac{U_B^2}{2} + \int_A^B \frac{\partial U}{\partial t} ds$$

$\int_A^B \frac{\partial U}{\partial t} ds$ آفرار سرعت صرف نظر A تا B $\int_0^B \frac{\partial U}{\partial t} ds$

با استفاده از بقای جرم، سرعت در یک زمان در سراسر لوله یکسان و برابر U_B است.

$$= \int_0^B \frac{dU_B}{dt} ds = \frac{dU_B}{dt}\int_0^B ds = L\frac{dU_B}{dt} = 100\frac{dU_B}{dt}$$

$$\longrightarrow 196.2 = \frac{U_B^2}{2} + 100\frac{dU_B}{dt} \longrightarrow \frac{392.4 - U_B^2}{200} = \frac{dU_B}{dt}$$

$$\longrightarrow dt = \frac{200\,dU_B}{392.4 - U_B^2} \xrightarrow{\text{انتگرال}} t = 200\int_0^{200} \frac{dU_B}{392.4 - U_B^2}$$

$$= 200\frac{1}{\sqrt{392.4}}\,\text{Arc}\tanh\left(\frac{U_B}{\sqrt{392.4}}\right)\Big|_0^{U_B}$$

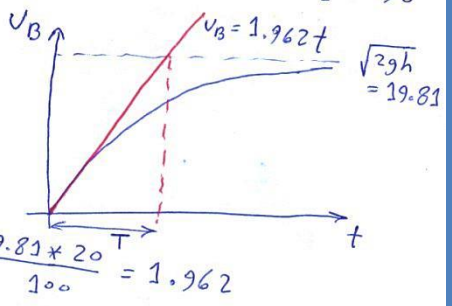
$$\longrightarrow t = 10.096\,\text{Arc}\tanh\left(\frac{U_B}{19.81}\right) \longrightarrow \boxed{U_B = 19.81\tanh\left(\frac{t}{10.096}\right)}$$

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

$$Q = A.V = \frac{\pi(1)^2}{4} * U_B \longrightarrow Q(t) = 0.785 * 19.81 * \tanh\left(\frac{t}{10.096}\right)$$

$$\longrightarrow Q(t) = 15.55 \tanh\left(\frac{t}{10.096}\right)$$

جواب تمرین



$$\left.\frac{dU_B}{dt}\right|_{t=0} = \frac{gH}{l} \cdot \left.\frac{1}{\cosh\left(\frac{\sqrt{2gH}}{2l}.t\right)}\right|_{t=0} = \frac{gH}{l} = \frac{9.81 * 20}{100} = 1.962$$

$$\longrightarrow U_B(t) = 1.96t = 19.81 \longrightarrow t = T = 10.107\,5$$ ثابت زمانی

---

*2 مقایسه اینرسی در مکانیک دورانی:

$$e(t) = I\frac{df(t)}{dt} \longrightarrow I = I$$

$$\tau = I\frac{d\omega}{dt}$$

$$I_{ij} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix}$$

*3 مقایسه اینرسی در سیستم الکتریکی:

$$e(t) = I\frac{df(t)}{dt} \longrightarrow I = L$$

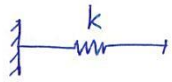
$$\Delta V = L\frac{di}{dt}$$

*4 مقایسه اینرسی در سیستم حرارتی: نداریم

$$e(t) = I\frac{df(t)}{dt} \longrightarrow \Delta T = ?\ \frac{d\dot{Q}}{dt}$$

ب) المان ظرفیتی: این المان، انرژی را با تبدیل ذخیره می‌کند و در اختیار قرار می‌دهد. (مشخصه = C)

$$e(t) = \frac{1}{C}\int f(t)\,dt$$



1) مکانیک خطی:

$$F = K\Delta x = k\int U\,dt$$

$$e = \frac{1}{C}\int f(t)\,dt$$

$$\longrightarrow k = \frac{1}{C} \longrightarrow C = \frac{1}{k}$$

2) سیستم مکانیک دورانی:

$$\tau = k_\beta \cdot \Delta\beta = k_\beta \int \omega\,dt$$

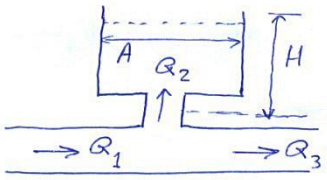
$$e = 1/C \int f(t)\,dt$$

$$\longrightarrow k_\beta = \frac{1}{C} \longrightarrow C = \frac{1}{k_\beta}$$

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

3 سیالاتی :

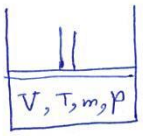
الف) تراکم ناپذیر:



$\Sigma Q = 0$

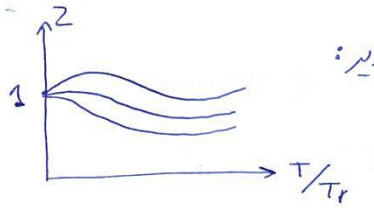
$$\Delta p = \rho g h = \rho g \int \frac{Q}{A}\,dt = \frac{\rho g}{A}\int Q\,dt$$

$$e(t) = \frac{1}{C}\int f(t)\,dt \quad \Rightarrow \quad \frac{\rho g}{A} = \frac{1}{C} \rightarrow C = \frac{A}{\rho g}$$



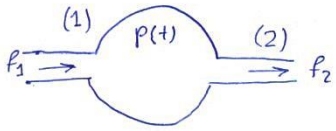
$$PV = Z\,mRT$$
$$Z = Z(P_r, T_r)$$

ب) تراکم پذیر:



تمرین : ما لبه ظرفیت سیالاتی تراکم پذیر؟

$$p = \frac{1}{C}\int \dot{m}\,dt = \frac{1}{C}m$$



جواب :

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dp}\cdot\frac{dp}{dt}$$

$$m = \frac{V}{v} \longrightarrow \frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{V}{v}\right) = \frac{0 - V\frac{dv}{dt}}{v^2} \longrightarrow \dot{m} = -\frac{V}{v^2}\left(\frac{dv}{dp}\cdot\frac{dp}{dt}\right) \quad (1)$$

رابطه پلی تروپیک $\rightarrow pv^n = const \longrightarrow dp\cdot v^n + np v^{n-1}\,dv = 0$

$$\longrightarrow \frac{dv}{dp} = -\frac{v}{np} \quad (2)$$

$$(1),(2) \longrightarrow \dot{m} = -\frac{V}{v^2}\left(-\frac{v}{np}\frac{dp}{dt}\right) = \frac{V}{vnp}\frac{dp}{dt}$$

$$\longrightarrow dp = \frac{vnp}{V}\dot{m}\,dt \longrightarrow \text{در شرایط ایده آل } pv = RT$$

$$\longrightarrow dp = \frac{nRT}{V}\dot{m}\,dt \longrightarrow p = \frac{nRT}{V}\int \dot{m}\,dt \quad \Rightarrow \quad \frac{nRT}{V} = \frac{1}{C}$$

$$e(t) = \frac{1}{C}\int f(t)\,dt \rightarrow p = \frac{1}{C}\int \dot{m}\,dt$$

$$\longrightarrow C = \frac{V}{nRT}$$

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

4 سیستم الکتریکی : $i = \frac{dq}{dt}$

$\Delta V = \frac{q}{C} = \frac{1}{C}\int i\,dt$

$e(t) = \frac{1}{C}\int f(t)\,dt \longrightarrow C = C_{\text{خازن}}$

5 سیستم حرارتی :

جسم لامپ : دمای کل جسم باهم تغییر می‌کند.

$Bi = \frac{hL_c}{k} < 0.1$

جسم غیرلامپ : دمای کل جسم باهم تغییر نمی‌کند.

ج) المان مقاومتی : این المان ، انرژی را تلف می‌کند. (مشخصه آن R)

$e(t) = R * f(t) \longrightarrow$ این رابطه خطی است.

در اکثر اوقات عملکرد یک المان مقاومتی بصورت غیرخطی ظاهر می‌شود.

در این حالت می‌توان آن را خطی سازی کرد. $e(t) = \phi(R, f)$

*1 مکانیک خطی : دمپر ، B

$F(t) = BV \longrightarrow R = B$

*2 مکانیک دورانی : پاتاقان ها ، B_w

$T = B_w \cdot \omega \longrightarrow R = B_w$

*3 الکتریکی : مقاومت الکتریکی ، R

$\Delta V = RI \longrightarrow R = R$

*4 انتقال حرارت : هدایت ، جابه جایی ، تشعشع

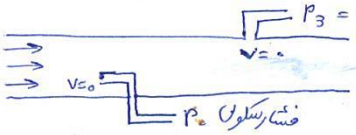
هدایت : $q = kA\frac{\Delta T}{L} \longrightarrow \Delta T = \frac{L}{kA}q \longrightarrow R = \frac{L}{kA}$

جابه جایی : $q = hA\Delta T \longrightarrow \Delta T = \frac{1}{hA}q \longrightarrow R = \frac{1}{hA}$

تشعشع : $q = \varepsilon\sigma A(T_2^4 - T_1^4) = \varepsilon\sigma A\left[(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)\right](T_2 - T_1)$

$\longrightarrow \Delta T = \frac{1}{\varepsilon\sigma A\left[(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)\right]}q \longrightarrow R = \frac{1}{\varepsilon\sigma A\left[(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)\right]}$

*5 سیالات :



$P_0 = P_3 + \frac{1}{2}\rho V^2$

$P_{\text{دینامیکی}} = \frac{1}{2}\rho V^2$

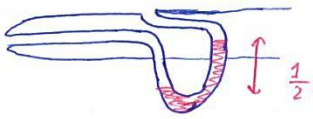
www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

4

فشار سکون : سرعت به صورت آیزنتروپیک به صفر می رسد.

فشار استاتیک : سرعت در لایه مرزی صفر می شود، همراه سیال حرکت می کنیم.

* پیتوت تیوب :



المانی که فشار سکون را کاهش می دهد، المان مقاومتی است، پس در نازل ها که تغییر مقطع سبب تغییر فشار استاتیکی می شود، المان مقاومتی به حساب نمی آید.

لوله - زانویی - هماری ورودی و خروجی - اوریفیس - تبدیل ها - نازل - دیفیوزر - انواع شیر

$\Delta P = k \frac{1}{2}\rho v^2$ k: ضریب افت

لوله : $\Delta P = \frac{fL}{D}\frac{1}{2}\rho v^2$ f: ضریب اصطکاک $f_{آرام} = \frac{64}{Re}$

$\Delta P = k\frac{1}{2}\rho v^2 = \frac{k\rho}{2}\left(\frac{Q}{A}\right)^2 = \frac{k\rho Q}{2A^2}Q \rightarrow R = \frac{k\rho Q}{2A^2}$

$\Delta P = RQ$

---

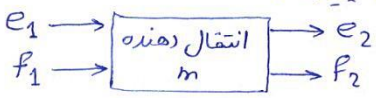
2) المان فرعی :

Source of effort Source of flow

Se - Sf

الف) منابع :

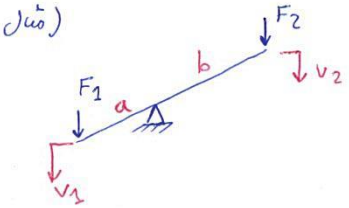
ب) انتقال دهنده ها: المان هایی هستند که انرژی را بدون اتلاف از خود منتقل می کنند که در این انتقال جنس متغیر اصلی (e و f) تغییری نمی کند.



$e_2 = m e_1$

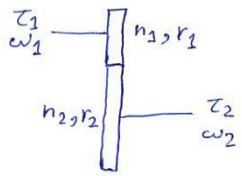
$f_2 = \frac{1}{m} f_1$ $\rightarrow e_1 f_1 = e_2 f_2$

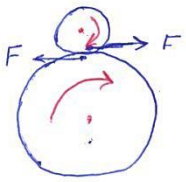
مثال)



$T_1 = T_2 \rightarrow F_2 b = F_1 a \rightarrow F_2 = \frac{a}{b}F_1 \rightarrow m = \frac{a}{b}$

$\omega_1 = \omega_2 \rightarrow \frac{v_2}{b} = \frac{v_1}{a} \rightarrow v_2 = \frac{b}{a}v_1 \rightarrow m = \frac{a}{b}$





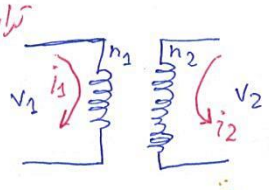
$F_1 = F_2 \rightarrow \frac{\tau_1}{r_1} = \frac{\tau_2}{r_2} \rightarrow \tau_2 = \frac{r_2}{r_1}\tau_1$

$\rightarrow m = \frac{r_2}{r_1} = \frac{n_2}{n_1}$

$V_1 = V_2 \rightarrow r_1\omega_1 = r_2\omega_2 \rightarrow \omega_2 = \frac{r_1}{r_2}\omega_1$

$\rightarrow m = \frac{r_2}{r_1} = \frac{n_2}{n_1}$

ترانس

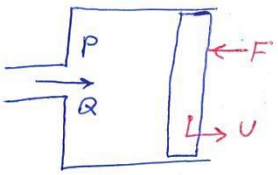


$\begin{cases} V_2 = \frac{n_2}{n_1}V_1 \\ i_2 = \frac{n_1}{n_2}i_1 \end{cases} \rightarrow m = n_2/n_1$

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

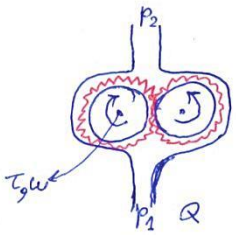
* چرا کلاغ روی سیم برق، دچار برق گرفتگی نمی‌شود؟ چون مقاومت پای کلاغ نسبت به مقاومت سیم بیشتر است و درنتیجه جریان کمی از پاهای کلاغ عبور می‌کند.

* سیلندر - پیستون



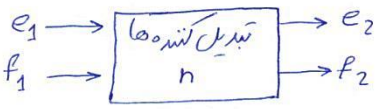
$$\begin{cases} F = A_p P \\ V = \frac{1}{A_p} Q \end{cases} \longrightarrow m = A_p$$

* پمپ های هیدرولیکی (چرخ دنده‌ای):



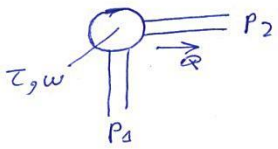
$$\Delta P = k_H \tau$$
$$Q = \frac{1}{k_H} \omega \longrightarrow m = k_H$$

ج) تبدیل کننده ها: المان هایی هستند که انرژی را بدون اتلاف، انتقال می دهند و در انتقال، جنس متغیر اصلی را عوض می‌کنند. $\begin{pmatrix} e \to f \\ f \to e \end{pmatrix}$



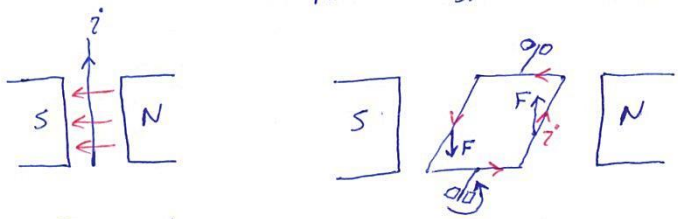
$$\begin{cases} e_2 = n f_1 \\ f_2 = \frac{1}{n} e_1 \end{cases} \qquad e_1 f_1 = e_2 f_2$$

پمپ سانتریفیوژ (مثال)

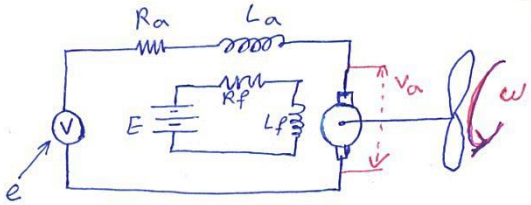


$$\Delta p = k_p \omega$$

* موتورهای هیدرولیکی: دبی میدان تا گشتاور بگیرند. $\tau = k Q$



آمپیچر:



$$\tau = k_m i_a$$
$$\omega = \frac{1}{k_m} V \longrightarrow n = k_m$$

* نکته: اختلاف پتانسیل $\longleftarrow \omega$
* ژنراتور: $\omega \longleftarrow$ اختلاف پتانسیل 220V
* در هل دادن، ماهیچه های ما، جابه جایی وارد می‌کند و بر اثر اصطکاک، نیرو حس می‌شود.
* فقط در حضور میدان ها (جاذبه مغناطیسی) است که نیرو باعث جابه جایی می‌شود، مانند جسم روی سطح شیب دار

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

* مدل سازی سیستم های خطی:

سیستم های دینامیکی خطی، دارای معادله حالت زیر است:

$$\dot{\vec{x}} = A\vec{x} + B\vec{u}$$

(مثال) $ax'' + bx' + cx = f(x)$

$z_1 = x \longrightarrow \dot{z}_1 = x' = z_2$

$z_2 = x' \longrightarrow \dot{z}_2 = x'' = (f(x) - cz_1 - bz_2)\frac{1}{a}$

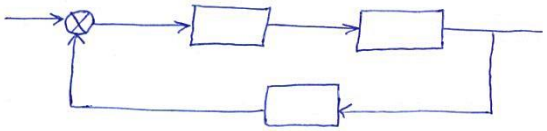
$$\longrightarrow \dot{\vec{z}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{c}{a} & -\frac{b}{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{a} \end{bmatrix} f(x)$$

* هدف از این بخش، استخراج معادله حالت، از روی شمای یک سیستم، بدون نیاز به معادلات دیفرانسیل آن است. در این فرآیند، فقط از مبانی پایه‌ای و شناسایی جنس متغیرهای اصلی، می‌توان معادلات حالت را بدست آورد.

---

* مدل سازی به روش بلوک دیاگرام:

بلوک دیاگرام یک سیستم اتوماتیک، می‌تواند ارتباط بین اجزاء را به صورت سیگنال های اطلاعاتی، که این سیگنال‌ها حامل متغیرهای اصلی بوده، را ایجاد کند.



* بلوک دیاگرام، تابع تبدیل یک سیستم خطی را در فضای فرکانسی بدست می‌آورد.

$$L\{f(t)\} = \int_0^\infty e^{-st} f(t)dt = F(s) \quad ; \quad s = \sigma + \omega j$$

فایده ← معادلات دیفرانسیل حاکم سیستم (در حوزه زمان) به معادلات جبری (در حوزه فرکانس) تبدیل می‌شوند.

* یکی از معایب این روش، استخراج تابع تبدیل فقط برای سیستم های تک ورودی و تک خروجی است.

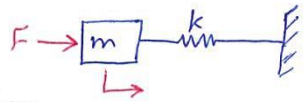
---

* قوانین بنیادی برای رسم بلوک دیاگرام:

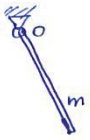
* مکانیک

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \longrightarrow \sum \vec{F} - ma = 0$$

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir



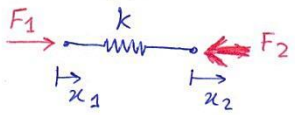
قانون دالامبر ⟶ $F - F_k - m a = 0$



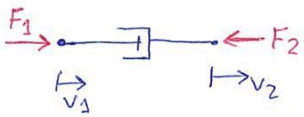
$\Sigma M_o = I_o \alpha = \bar{I}\alpha + m\bar{a}d \longrightarrow \Sigma M_o - \bar{I}\alpha - m\bar{a}d = 0$

(I_o: حول مرکز دوران (O)، $\bar{I}$: حول مرکز جرم میله، d: در اینجا $\frac{L}{2}$)

* فنرها:



$\Sigma x_i = 0 \qquad F_1 = F_2$



$\Sigma v_i = 0 \qquad F_1 = F_2$

* الکتریکی:

قانون در حلقه : $\Sigma v_i = 0$

قانون در گره : $\Sigma i_i = 0$

قانون شاخه : $\Sigma p_i = 0$

قانون گره : $\Sigma Q_i = 0$

* سیالات:

* نکته

$f_1 = f_2 = \cdots = f_n \longrightarrow \Sigma e_i = 0$

$e_1 = e_2 = \cdots = e_n \longrightarrow \Sigma f_i = 0$

ب) رسم بلوک دیاگرام:

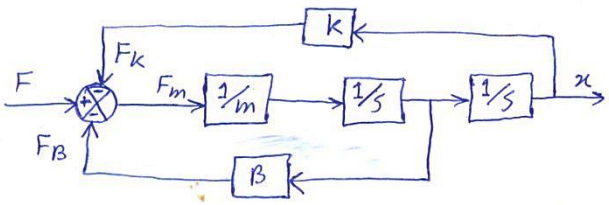
مرحله 1 * شناسایی ورودی و خروجی

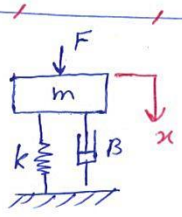
مرحله 2 * از متغیر ورودی شروع کرده و الیان به الیان به متغیر خروجی می رسیم. در این مسیر، شاخه اصلی بلوک دیاگرام را با قرار دادن جمع کننده ها یا بلوک ها، رسم می کنیم.

مرحله 3 * در شاخه اصلی رسم شده، تعدادی جمع کننده وجود خواهد داشت که دارای حلقه های داخلی بازمانده هستند. در این مرحله، این حلقه ها را با استفاده از چیدمان و قوانین بنیادی، کامل می کنیم.

نکته * در شاخه های اصلی، کلیه متغیرها، معلوم فرض می شوند.

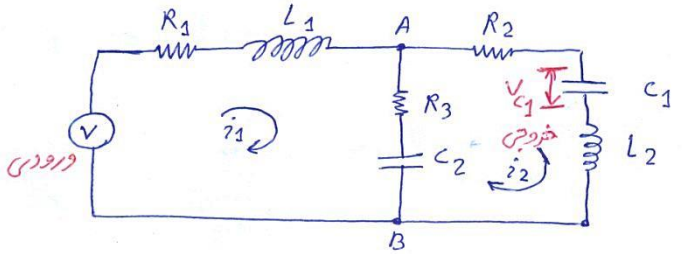
* مثال

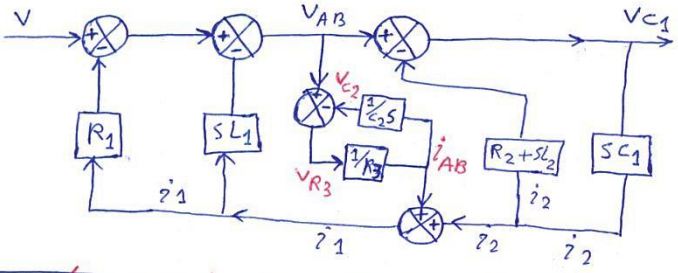




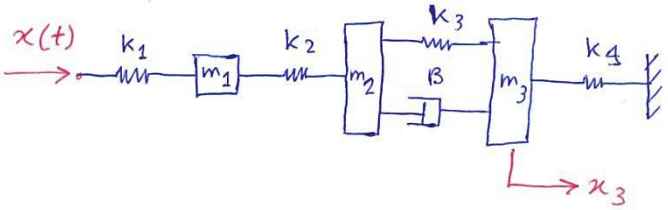
www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

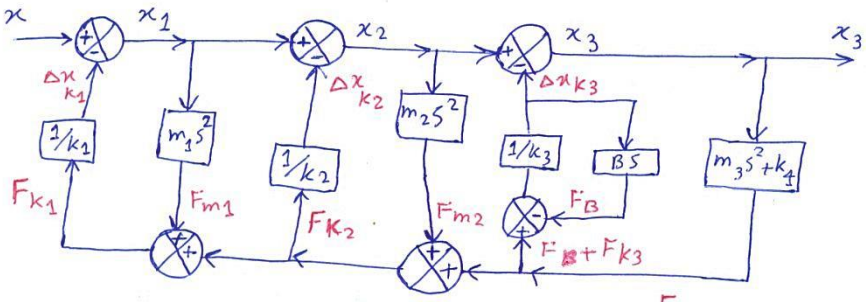
مثال *





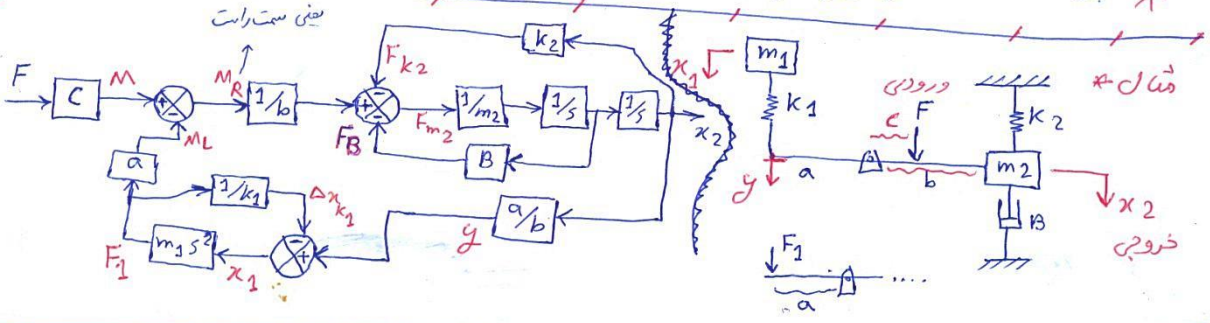
مثال *





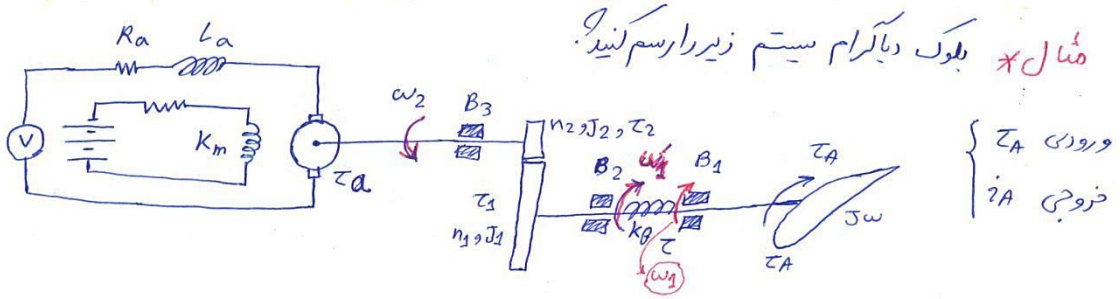
* جمع کننده ها روی الیان اصلی (effort یا flow)

* بلوک برای تبدیل (e→f / f→e)

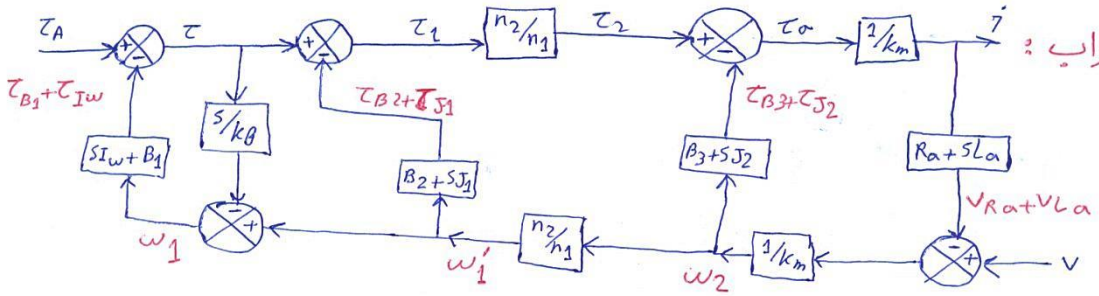


www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

مثال * بلوک دیاگرام سیستم زیر را رسم کنید.



جواب :



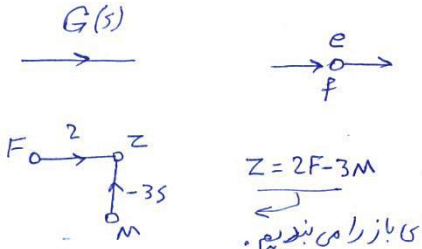
نکته * اگر k_θ در سیستم وجود نداشت، $k_\theta \to \infty$

---

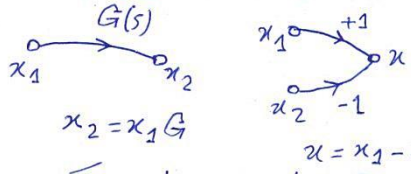
* مدل سازی به روش سیگنال فلوگراف :

این روش برمبنای تغییرات e ها و f ها رسم می‌شود و می‌تواند سیستم‌های دینامیکی MIMO (چندورودی و چندخروجی) را مدل سازی کند، به عبارت دیگر، این روش برخلاف روش بلوک دیاگرام، می‌تواند معادلات حالت یک سیستم را بدست آورد.

* اجزای اصلی سیگنال فلوگراف :



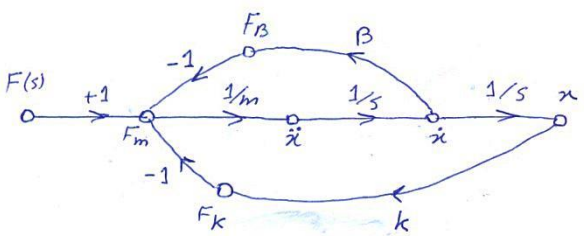
$Z = 2F - 3M$

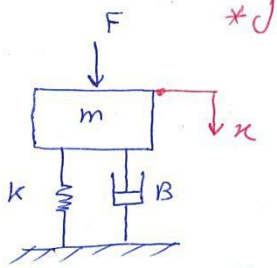


* برای رسم، ابتدا شاخه اصلی را رسم می‌کنیم و در انتها، گره‌های باز را می‌بندیم.

---

* مثال *

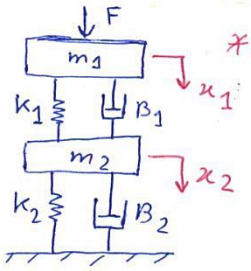


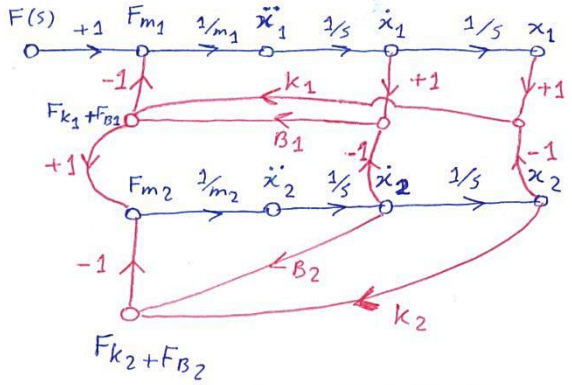


www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

* در سیگنال فلوگراف به ازای هر خروجی، یک شاخه اصلی داریم. 7

* مثال

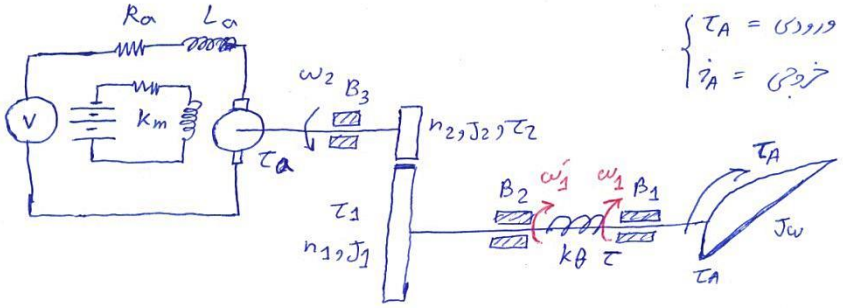




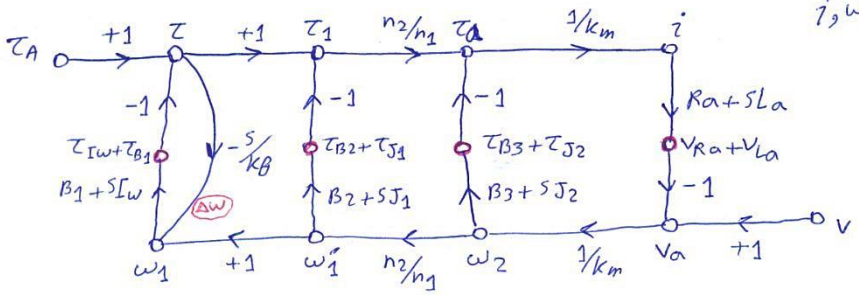
* مثال سرو الکتور

τ_A = ورودی

$\dot{\tau}_A$ = خروجی



درجات آزادی: ω_1 و ω_2 و i



* استخراج معادلات حالت از سیگنال فلوگراف:

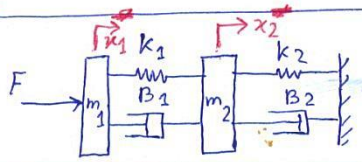
1 * ابتدا سیگنال فلوگراف انتگرالی را رسم می‌کنیم.

2 * بعد از هر انتگرال گیر، $(\frac{1}{s})$، یک متغیر جدید قرار می‌دهیم.

3 * قبل از هر انتگرال گیر $(\frac{1}{s})$، مشتق متغیرهای جدید را قرار می‌دهیم.

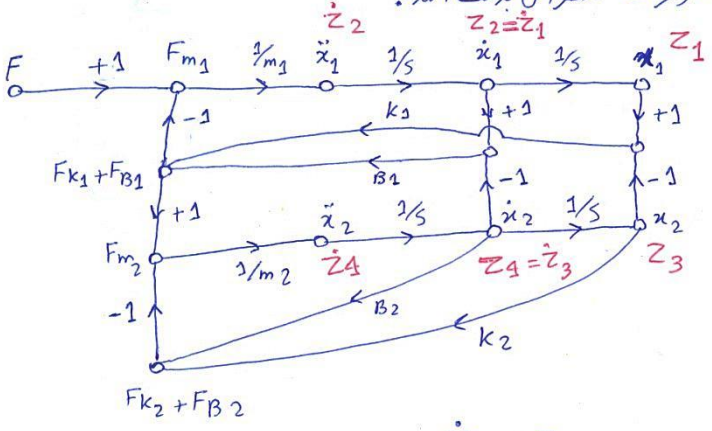
4 * مشتق هر متغیر را سمت چپ مساوی، نوشته و در سمت راست، جمع جبری تابع سایر متغیرها را می‌نویسیم.

* مثال برای سیستم زیر، معادلات حالت را استخراج کنید.



www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

در مثال های قبل ، سیگنال فلوگراف انتگرالی بدست آمد :



$$\dot{z}_1 = z_2$$

$$\dot{z}_2 = \frac{1}{m_1}\left\{F - k_1 z_1 - B_1 z_2 + k_1 z_3 + B_1 z_4\right\}$$

$$\dot{z}_3 = z_4$$

$$\dot{z}_4 = \frac{1}{m_2}\left\{-k_2 z_3 - B_2 z_4 + k_1 z_1 + B_1 z_2 - k_1 z_3 - B_1 z_4\right\}$$

$$\dot{\vec{z}} = A\vec{z} + B\vec{u}$$

تمرین * معادلات حالت ، مثال سروآکچیتور ، صفحه قبل را بدست آورید

جواب : با توجه به فلوگراف رسم شده در صفحه قبل :

$$\tau = \tau_A - (\tau_{Iw} + \tau_{B1})$$

$$\tau_a = \tau_1 \frac{n_2}{n_1} - (\tau_{B3} + \tau_{J_2})$$

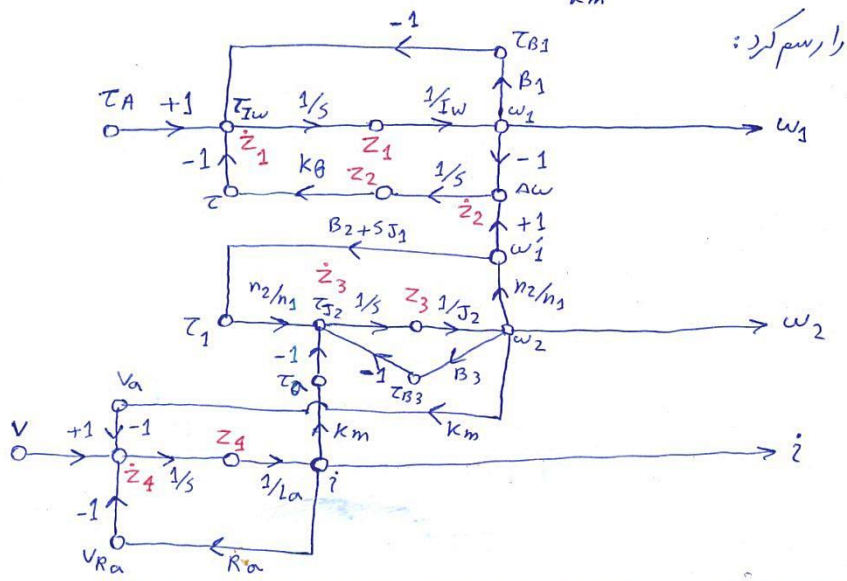
$$V - (V_{Ra} + V_{La}) = V_a$$

$$\tau_1 = \tau - (\tau_{B2} + \tau_{J1}) \qquad i = \frac{\tau_a}{km}$$

$$\omega_1 = -\frac{s}{k\theta} + \omega_1' \qquad \omega_1' = \frac{n_2}{n_1}\omega_2 \qquad \omega_2 = \frac{V_a}{km}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{km} V_a$$

* حالا باید فرم انتگرالی را رسم کرد :



www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

8

$$\dot{z}_1 = \tau_A - z_2 k_\theta - \frac{z_1 B_1}{I_\omega} \qquad (1)$$

$$\dot{z}_2 = \frac{-z_1}{I_\omega} + \frac{z_3}{J_2}\frac{n_2}{n_1} \qquad (2)$$

$$\dot{z}_4 = -\frac{z_4}{L_a}\cdot R_a - \frac{z_3}{J_2} k_m + v \qquad (3)$$

$$\dot{z}_3 = \frac{z_3}{J_2}\left(\frac{n_2}{n_1}\right)\left(B_2 + S J_1\right)\left(\frac{n_2}{n_1}\right) - \frac{z_4}{L_a} k_m - \frac{z_3}{J_2} B_3$$

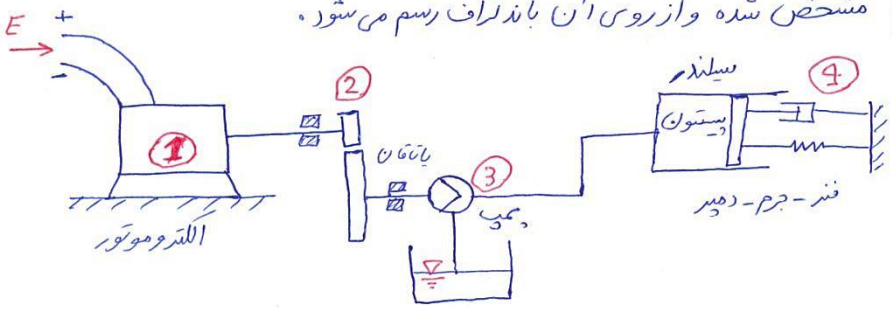
$$\longrightarrow \dot{z}_3 - \dot{z}_3\left(\frac{1}{J_2}\frac{n_2}{n_1} J_1\right)\frac{n_2}{n_1} = \frac{z_3}{J_2}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) B_2 \left(\frac{n_2}{n_1}\right) - \frac{z_4}{L_a} k_m - \frac{z_3}{J_2} B_3$$

$$\longrightarrow \dot{z}_3 = \frac{n_1^2 J_2}{n_1^2 J_2 - n_2^2 J_1}\left[z_3\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \frac{B_2}{J_2} - \frac{z_4}{L_a} k_m - \frac{z_3}{J_2} B_3\right] \qquad (4)$$

---

* مدل سازی سیستم های دینامیکی به روش باندگراف :

مبنای طراحی این روش، استفاده از قانون بقای انرژی است. بدین ترتیب که مسیر مصرف انرژی در یک سیستم مشخص شده و از روی آن باندگراف رسم می شود.



سوال * انرژی که وارد سیستم می شود، در چه المان هایی مصرف می شود؟

* موتور الکتریکی : 1 گرما 2 صدا 3 اصطکاک جاروبک ها 4 فن خنک کن 5 انرژی سلف

* جعبه دنده : 1 اینرسی چرخ دنده 2 یاتاقان ها 3 صدا 4 گرما 5 الاستیک چرخ دنده

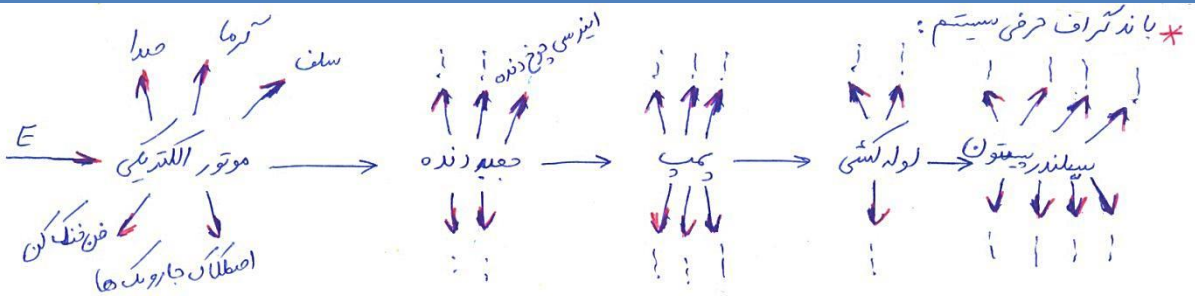
* پمپ : 1 اینرسی پره و سیال 2 اصطکاک پره و سیال 3 صدا 4 یاتاقان ها 5 کاویتاسیون 6 نشتی

* لوله کشی : 1 افت لوله - زانویی - ورودی - خروجی 2 اینرسی سیال 3 الاستیک لوله

* سیلندر : 1 افت ورودی سیال 2 اصطکاک پیستون 3 الاستیک سیلندر 4 نشتی پیستون 5 ظرفیت گرمایی سیال 6 اینرسی پیستون 7 فنر 8 دمپر

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

* باند گراف حرفی سیستم :



* مدل سازی به روش باند گراف :

باند گراف حرفی : انتقال توان را در باند گرام با یک نیم فلش نشان می دهیم. ⟶

این نیم فلش حامل 2 متغیر اصلی $e(t)$ و $f(t)$ است. که e در بالای آن و f در پایین آن نوشته می شود :

$$\frac{e(t)}{f(t)} \longrightarrow \frac{F}{v} \longrightarrow \frac{\tau}{\omega} \longrightarrow \frac{\Delta v}{i} \longrightarrow \frac{p}{Q}$$

الف) تک شاخه ها :

تک شاخه ها مربوط به المان های اصلی هستند.

$\frac{e}{f} \longrightarrow I \qquad e = I \frac{df}{dt}$

$\frac{e}{f} \longrightarrow C \qquad e = \frac{1}{C}\int f\,dt$

$\frac{e}{f} \longrightarrow R \qquad e = f(R, f) \xrightarrow{\text{خطی}} e = Rf$

$Se \longrightarrow e$

$Sf \longrightarrow f$

ب) 2 شاخه ای ها :

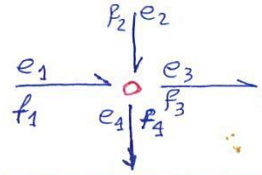
انتقال دهنده ها :

$$\frac{e_1}{f_1} \longrightarrow \overset{m}{TF} \frac{e_2}{f_2} \longrightarrow \begin{cases} e_2 = \frac{1}{m} e_1 \\ f_2 = m f_1 \end{cases}$$

تبدیل کننده ها :

$$\frac{e_1}{f_1} \longrightarrow \overset{n}{GY} \frac{e_2}{f_2} \longrightarrow \begin{cases} e_2 = \frac{1}{n} f_1 \\ f_2 = n e_1 \end{cases}$$

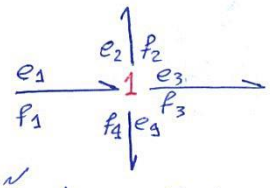
ج) چند شاخه ای ها :



$\sum F_i = 0 \quad ; \quad e_1 = e_2 = \cdots = e_n$

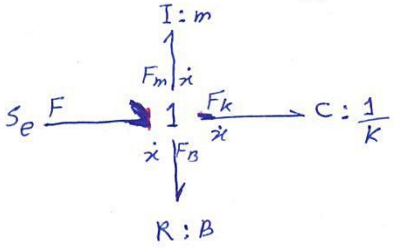
www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

9

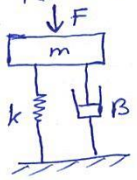


$\sum e_i = 0$ $\quad f_1 = f_2 = \dots = f_n$

* پس اگر به المانی برخورد کردیم که x یا w یا p یا Q تغییر کرد، به 0 (صفر) رسیده‌ایم وگرنه جریان دارد



به 1 رسیده‌ایم.



* مثال

شاخص علیت:

همان طور که گفته شد، یک باند انرژی حاصل 2 متغیر اصلی است.

$\frac{e(t)}{f(t)}$

این سوال مطرح می‌شود که در یک باند، کدام یک از آن‌ها ورودی و دیگری معلول خواهد بود؟

تحقیق این موضوع به وسیله شاخص علیت معلوم می‌شود.

flow ورودی است.

effort ورودی است.

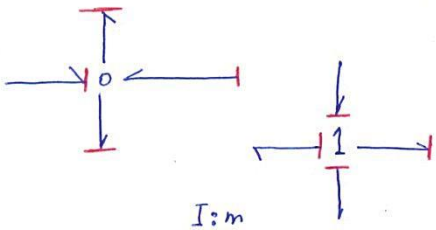
* قوانین رسم شاخص علیت: اولویت با قانون علیت است.

الف) قانون علیّت: دوشاخه‌ای‌ها:

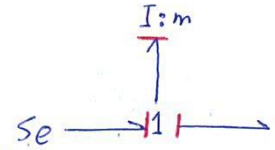
چند شاخه‌ای‌ها:

0 : دور صفر فقط یک خط تیره دارد (در داخل)

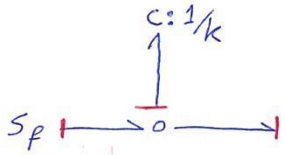
1 : دور 1 فقط یک خط تیره در بیرون می‌خورد.



ب) قوانین فیزیکی:

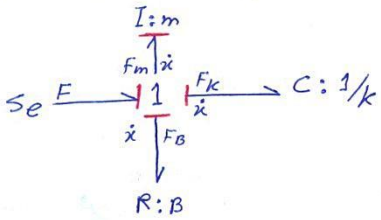


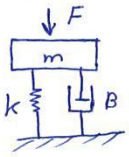
فلوها مساوی



افورت‌ها مساوی

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir





مثال *

* المان های انتگرالی و مشتقی:

انتگرالی: المانی است که دارای متغیر حالت (درجه آزادی) است.

$e \rightarrow I \qquad f = \frac{1}{I}\int e\,dt$

المان انتگرالی

$f \rightarrow C \qquad e = \frac{1}{C}\int f\,dt$

المان انتگرالی

$f \rightarrow I \qquad e = I\frac{df}{dt}$

المان مشتقی

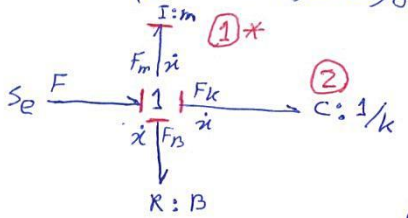
$e \rightarrow C \qquad f = C\frac{de}{dt}$

المان مشتقی

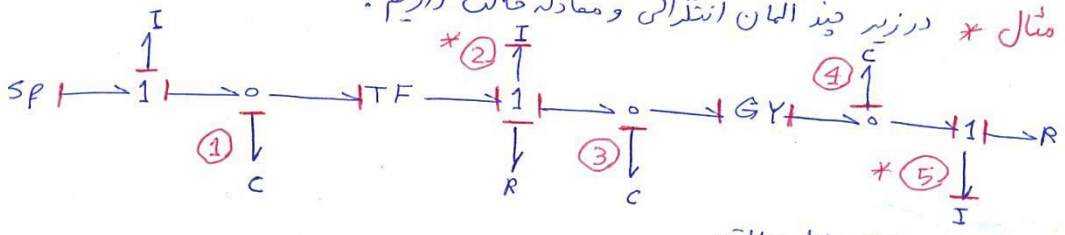
* به تعداد المان های انتگرالی (I)، درجه آزادی داریم.

* به تعداد کل المان های انتگرالی، معادله حالت داریم.

مثال * در مثال جرم و فنر ساده بالا، 1 درجه آزادی و 2 معادله حالت داریم.

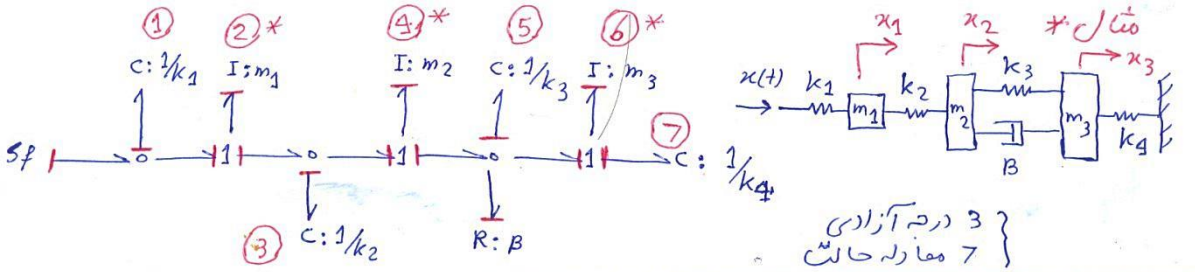


مثال * در زیر چند المان انتگرالی و معادله حالت داریم.



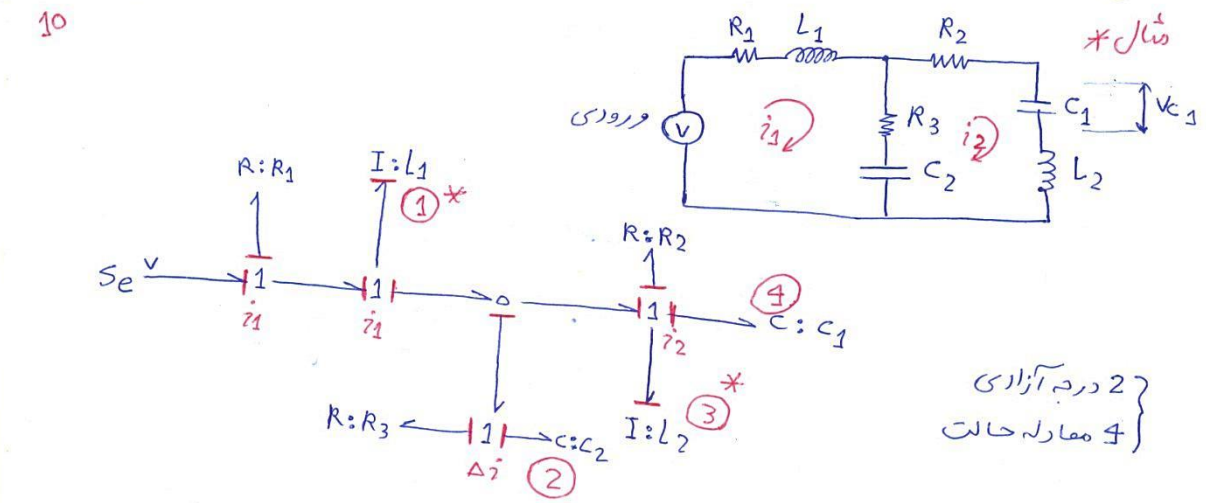
5 تا معادله حالت

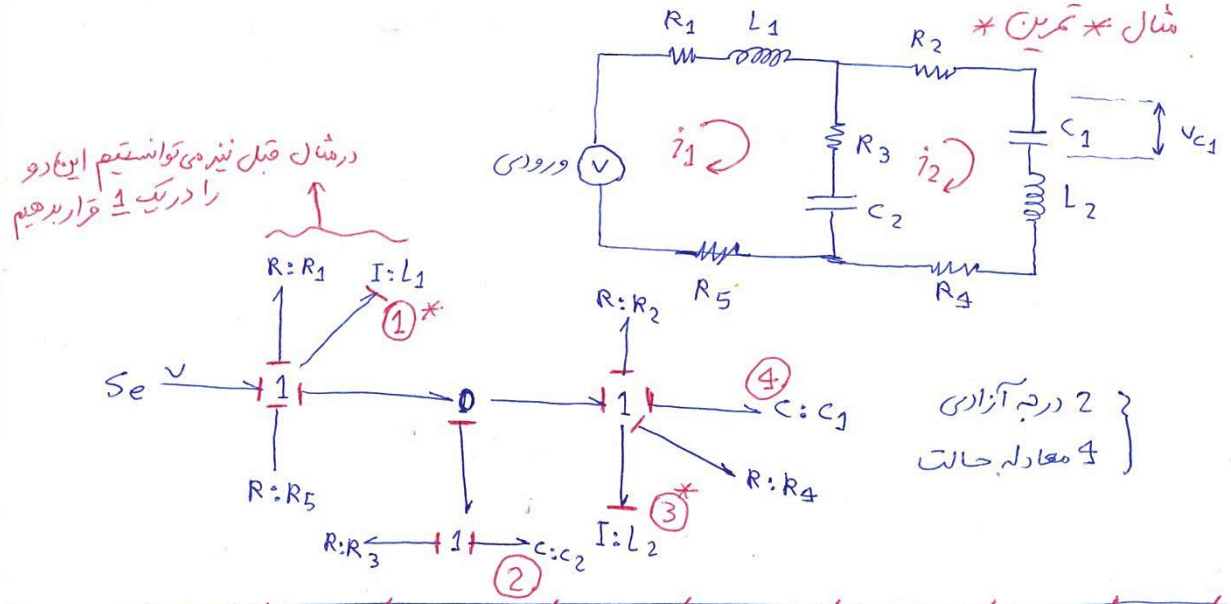
2 تا المان انتگرالی یا درجه آزادی

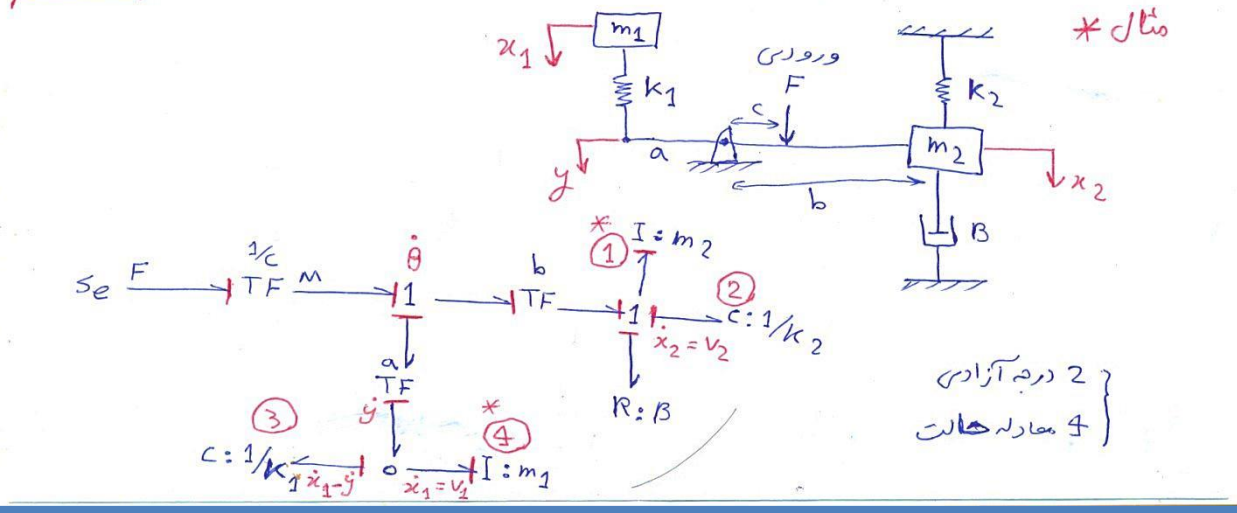


3 درجه آزادی
7 معادله حالت

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

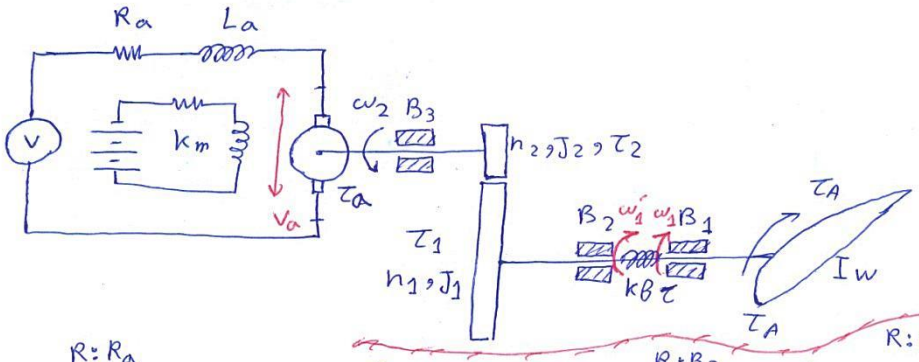


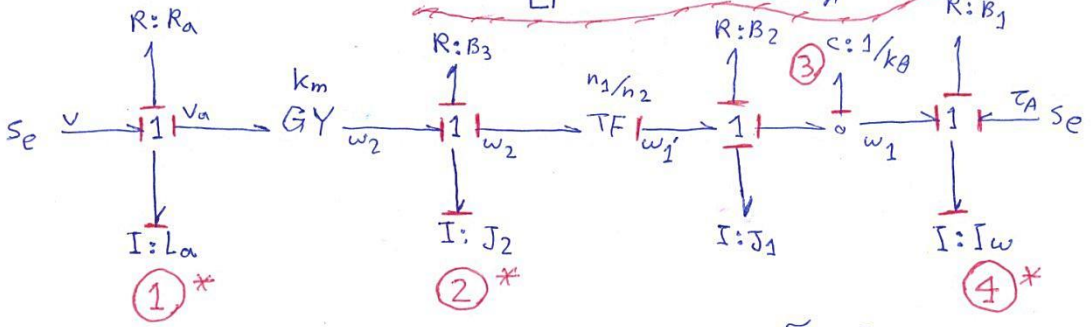




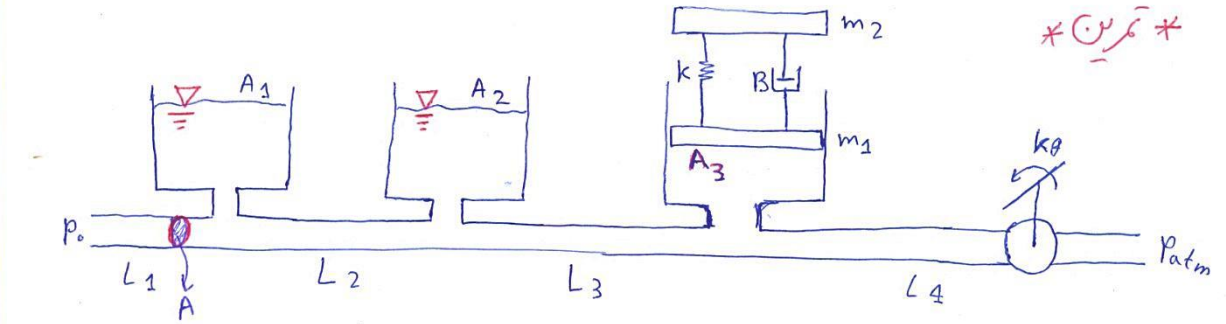
www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

مثال *



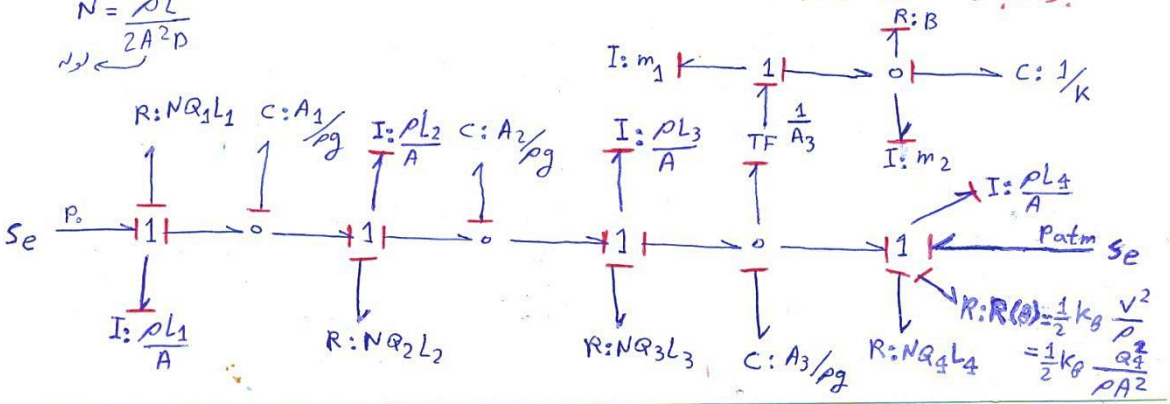


3 درجه آزادی
4 معادله حالت



جواب: برای هرکدام از L ها یک Q هست. پس در لوله‌ی L_1، Q_1 و در لوله‌ی L_2، Q_2 و...

$N = \frac{\rho L}{2A^2 D}$ لوله



www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

* استخراج معادلات حالت از روی باندگراف :

* متغیرهای حالت :

در بحث مدل سازی سیستم‌های دینامیکی به طورکلی 2 متغیر حالت، P و q وجود دارد.

$$\begin{cases} q = ce \\ p = If \end{cases}$$

* مکانیک خطی :

$$\begin{cases} q = \frac{1}{k}F = x & \text{جابه‌جایی} \\ p = mv & \text{اندازه حرکت} \end{cases}$$

* مکانیک دورانی :

$$\begin{cases} q = \frac{1}{k\theta}\tau = \theta & \text{جابه‌جایی زاویه‌ای} \\ p = I\omega & \text{اندازه حرکت زاویه‌ای} \end{cases}$$

* الکتریکی :

$$\begin{cases} q = CV = q & \text{بار الکتریکی} \\ p = Li \end{cases}$$

* سیالات (تراکم ناپذیر)

$$\begin{cases} q = \frac{A}{\rho g}\Delta p = \frac{A}{\rho g}\rho g H = V \\ p = \frac{\rho L}{A}Q \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{q} = C\frac{de}{dt} = f \\ \dot{p} = I\frac{df}{dt} = e \end{cases}$$

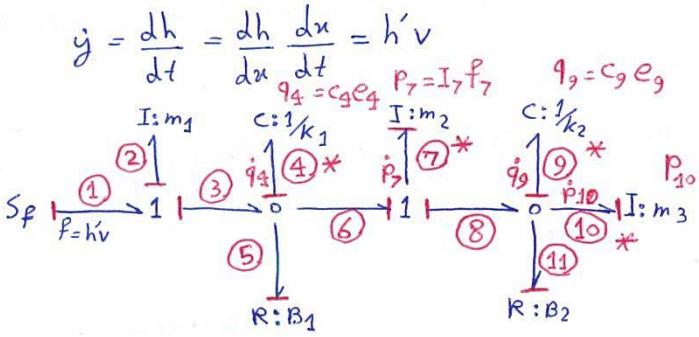
* مراحل زیر برای استخراج معادلات حالت از باندگراف بکار می‌رود:

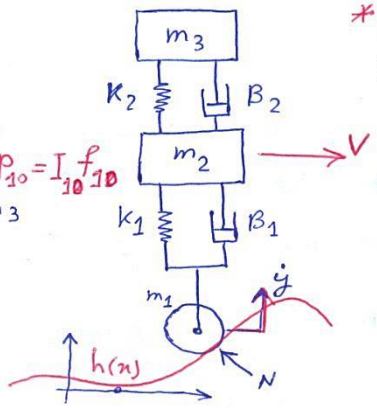
1. رسم باندگراف و شماره‌گذاری باندها
2. تعیین شاخص‌های علیت
3. المان های انتگرالی را مشخص می‌کنیم.
4. درکنار هر المان انتگرالی، متغیرحالت آن و معادله متغیرحالت را می‌نویسیم.
5. سمت چپ مساوی، متغیرحالت را نوشته و توسط معادلات آنها و قوانین صفر و یک خود را به المان های انتگرالی می رسانیم.

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

* مثال

$$\dot{y} = \frac{dh}{dt} = \frac{dh}{dx}\frac{dx}{dt} = h'v$$





2 درجه آزادی
4 معادله حالت

* $\dot{q}_4 = f_4 = f_3 - f_5 - f_6$

$f_7 = \frac{P_7}{I_7} = \frac{1}{m_2} P_7$

$f_5 = \frac{1}{R_5} e_5$

$e_5 = e_4 = \frac{1}{c_4} q_4$

$f_1 = h'v$

$$\rightarrow \dot{q}_4 = h'v - \frac{k_1}{B_1} q_4 - \frac{1}{m_2} P_7 \quad (1)$$

* $\dot{P}_7 = e_7 = e_6 - e_8$

$e_8 = e_9 = \frac{1}{c_9} q_9$

$e_6 = e_4 = \frac{1}{c_4} q_4$

$$\rightarrow \dot{P}_7 = k_1 q_4 - k_2 q_9 \quad (2)$$

* $\dot{q}_9 = f_9 = f_8 - f_{11} - f_{10}$

$\frac{1}{I_{10}} P_{10}$

$\frac{1}{R_{11}} e_{11}$

$e_9 = \frac{1}{c_9} q_9$

$f_8 = f_7 = \frac{1}{I_7} P_7$

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

12

$$\dot{q}_9 = \frac{1}{m_2} p_7 - \frac{k_2}{B_2} q_9 - \frac{1}{m_3} p_{12} \quad (3)$$

$$* \quad \dot{p}_{10} = e_{10} = e_9 = \frac{1}{c_9} q_9$$

$$\dot{p}_{12} = k_2 q_9 \quad (4)$$

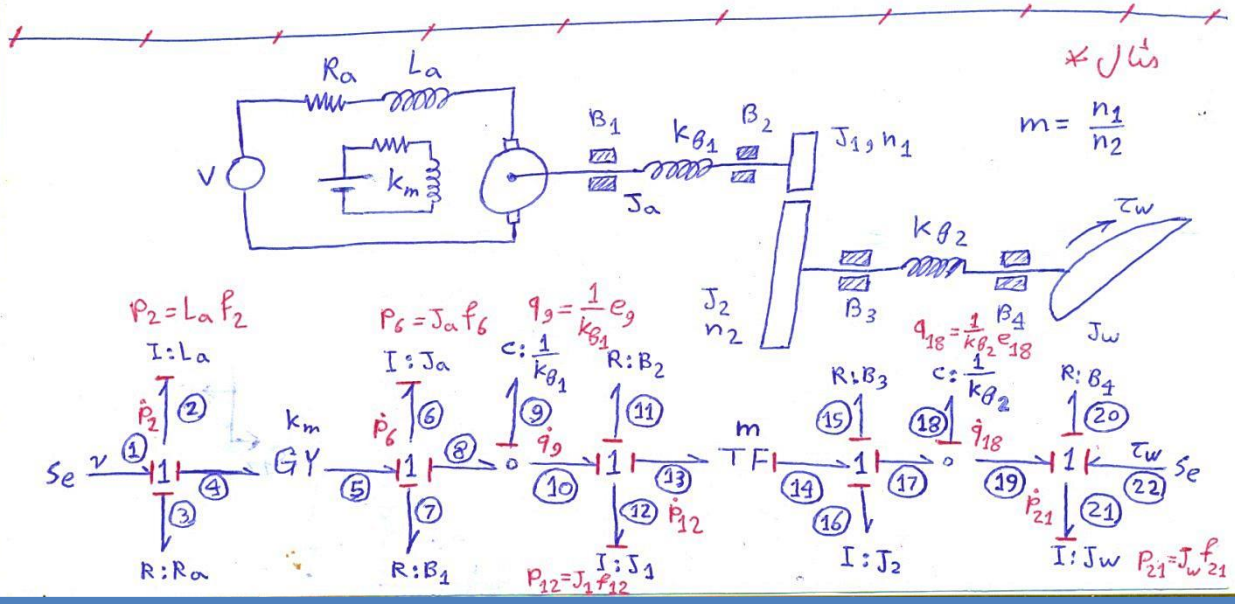
$$\begin{bmatrix} \dot{q}_4 \\ \dot{p}_7 \\ \dot{q}_9 \\ \dot{p}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k_1}{B_1} & -\frac{1}{m_2} & 0 & 0 \\ k_1 & 0 & -k_2 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2} & -\frac{k_2}{B_2} & -\frac{1}{m_3} \\ 0 & 0 & k_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_4 \\ p_7 \\ q_9 \\ p_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h'v \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

عکس العمل سطح $= e_1 = e_2 + e_3 = I_2 \dot{f}_2 + \frac{1}{1/k_1} q_4$

$f_2 = f_1 = h'v \longrightarrow \dot{f}_2 = \frac{d(h')}{dt} \cdot v$

$\dot{f}_2 = \frac{d(h')}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \cdot v \longrightarrow \dot{f}_2 = h'' v^2$

$$\longrightarrow N = m_1 h'' v^2 + k_1 q$$



www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

$$\vec{x} = [p_2, p_6, q_9, p_{12}, q_{18}, p_{21}]$$

$$* \dot{p}_2 = e_2 = e_1 - e_3 - e_4$$

$e_1 = V(t)$

$e_3 = R_a f_3 \rightarrow f_2 = \frac{1}{I_2} p_2$

$e_4 = \frac{1}{k_m} f_5 \rightarrow f_6 = \frac{1}{I_6} p_6$

$$\rightarrow \boxed{\dot{p}_2 = V - \frac{R_a}{L_a} p_2 - \frac{1}{k_m \cdot J_a} p_6}$$

$$* \dot{p}_6 = e_6 = e_3 - e_7 - e_8$$

$e_3 = \frac{1}{k_m} f_4 \rightarrow f_2 = \frac{1}{L_a} p_2$

$e_7 = B_1 f_7 \rightarrow f_6 = \frac{1}{J_a} p_6$

$e_8 = k_{\theta_1} q_9$

$$\rightarrow \boxed{\dot{p}_6 = \frac{1}{k_m \cdot L_a} p_2 - \frac{B_1}{J_a} p_6 - k_{\theta_1} q_9}$$

$$* \dot{q}_9 = f_9 = f_8 - f_{10} = f_6 - f_{21} = \frac{1}{J_a} p_6 - \frac{1}{J_1} p_{12}$$

$$\rightarrow \boxed{\dot{q}_9 = \frac{1}{J_a} p_6 - \frac{1}{J_1} p_{12}}$$

$$* \dot{p}_{12} = e_{12} = e_{10} - e_{11} - e_{13}$$

$e_{11} = B_3 f_{12} = \frac{B_2}{J_1} p_{12}$

$e_{10} = k_{\theta_1} q_9$

$e_{13} = m e_{14}$

$e_{14} = e_{15} + e_{16} + e_{17}$

$e_{15} = B_3 f_{15}$

$f_{14} = m f_{13} \rightarrow \frac{1}{J_1} p_{12}$

$\frac{m J_2}{J_1} \dot{p}_{12} = J_2 \dot{f}_{16}$

$f_{16} = f_{14} = m f_3 = \frac{m}{J_1} p_{12}$

$e_{17} = k_{\theta_2} q_{18}$

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

$$\longrightarrow \dot{p}_{12} = k_{\theta_1} q_9 - \frac{B_2}{J_1} p_{12} - m\left[\frac{mB_3}{J_1} p_{12} + \frac{mJ_2}{J_1} \dot{p}_{12} + k_{\theta_2} q_{18}\right]$$

$$\longrightarrow \dot{p}_{12} = \frac{1}{1 + \frac{m^2 J_2}{J_1}} \left[k_{\theta_1} \cdot q_9 - \left(\frac{B_2}{J_1} + \frac{m^2 B_3}{J_1}\right) p_{12} - m k_{\theta_2} q_{18}\right]$$

$$* \quad \dot{q}_{18} = f_{18} = f_{17} - f_{19}$$

$$f_{19} = \frac{1}{J_w} p_{21}$$

$$f_{17} = m f_{13}$$

$$f_{13} = \frac{1}{J_1} p_{12}$$

$$\longrightarrow \dot{q}_{18} = \frac{m}{J_1} p_{12} - \frac{1}{J_w} p_{21}$$

$$* \quad \dot{p}_{21} = e_{21} = e_{19} - e_{20} + e_{22}$$

$$e_{22} = \tau_w$$

$$e_{20} = B_4 f_{20}$$

$$f_{20} = \frac{1}{J_w} p_{21}$$

$$e_{19} = k_{\theta_2} q_{18}$$

$$\longrightarrow \dot{p}_{21} = k_{\theta_2} q_{18} - \frac{B_4}{J_w} p_{21} + \tau_w$$

* تمرین:

$$\begin{cases} \omega_{\text{بالک}} = ? \\ \tau_{\substack{\text{چرخ دنده} \\ \text{اول}}} = ? \end{cases}$$

جواب:

$$* \quad \omega_{\text{بالک}} = f_{22} = f_{21} = \frac{p_{21}}{J_w}$$

$$* \quad \tau_{\substack{\text{چرخ دنده} \\ \text{اول}}} = e_{13} \xrightarrow{\text{برعکس آمد}} m\left[\frac{mB_3}{J_1} p_{12} + \frac{mJ_2}{J_1} \dot{p}_{12} + k_{\theta_2} q_{18}\right]$$

$$\frac{1}{1 + \frac{m^2 J_2}{J_1}} \left[k_{\theta_1} \cdot q_9 - \left(\frac{B_2}{J_1} + \frac{m^2 B_3}{J_1}\right) p_{12} - m k_{\theta_2} q_{18}\right] \leftarrow$$

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

$$\rightarrow e_{13} = \frac{m^2 J_2 k_{\theta 1}}{J_1 + m^2 J_2} q_9 + \left[\frac{m^2 \beta_3}{J_1} - \frac{m^2 J_2}{J_1 + m^2 J_2} \left(\frac{B_2 + m^2 \beta_3}{J_1} \right) \right] p_{12}$$

$$+ \left[\frac{m^3 J_2 k_{\theta 2}}{J_1 + m^2 J_2} + m k_{\theta 2} \right] q_{18}$$

تمرین * این مثال را کامل کنید. (ماتریسی)

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_2 \\ \dot{p}_6 \\ \dot{q}_9 \\ \dot{p}_{12} \\ \dot{q}_{18} \\ \dot{p}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & \frac{-1}{k_m \cdot J_a} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{k_m \cdot L_a} & -\frac{\beta_1}{J_a} & -k_{\theta 1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_a} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{J_1 k_{\theta 1}}{J_1 + m^2 J_2} & -\frac{B_2 + m^2 B_3}{J_1 + m^2 J_2} & \frac{-m J_1 k_{\theta 2}}{J_1 + m^2 J_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{m}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_w} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_\theta & -\frac{B_1}{J_w} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_2 \\ p_6 \\ q_9 \\ p_{12} \\ q_{18} \\ p_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ \tau_w \end{bmatrix}$$

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

فصل 2 * شناسایی انواع سیستم های اتوماتیک در فضا

* سیستم های فضایی

1) ماهواره : در فضا و در خلأ کار می‌کند، پس ماهواره همیشه در حال سقوط است.

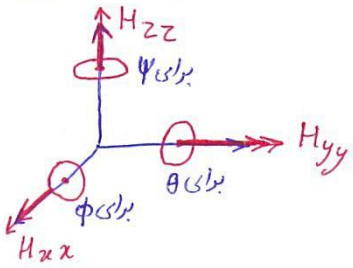
* به خاطر سرعت مداری (در دایروی $V=\sqrt{\frac{\mu}{r}}$)، ماهواره باید در خلا باشد وگرنه به خاطر اصطکاک، آتش می‌گیرد.

* تعریف سقوط : حرکت جسم تحت جاذبه جسم بزرگتر را سقوط می‌گویند.

* ماهواره چون برآیند نیروهای وارد بر آن صفر است، در مسیر حرکت خود باقی می‌ماند و مسیر آن را همان انرژی اولیه داده شده تعیین می‌کند.

الف) سیستم کنترل وضعیت ماهواره : 3 تا زاویه را کنترل می‌کند. pitch, yaw, roll

* عکس‌العمل‌های چرخ های عکس العملی (3 دیسک عمود بر محورهای x و y و z)



$H_{ii} = J_{ii} \cdot \omega_i$

چرخ ماهواره

$\dot{H}_s + \dot{H}_w = M$

↓ گشتاور مزاحم

فرض $M = 0 \longrightarrow \dot{H}_s = -\dot{H}_w$

با فرض ثابت بودن ماهواره در لحظه اول (منظور زاویه است و نه سرعت) و خاموش بودن موتور چرخ:

برای pitch

$H_s = -H_w \longrightarrow J_s \dot{\theta}_s = -J_w \omega_w \longrightarrow$ اگر یکی از دیسک ها حرکت کند (بچرخد) ماهواره باید با یک سرعت دورانی کوچکتر و برخلاف دیسک بچرخد.

* مثال: می خواهیم به یک ماهواره با $J_s = 100 \frac{kg \cdot m^2}{y}$ توسط یک چرخ عکس العملی با $I_w = 2 \frac{kg \cdot m^2}{y}$، سرعت زاویه‌ای $\dot{\theta} = 0.1 \frac{deg}{s}$ بدهیم، سرعت دورانی چرخ (Ω) چقدر باید باشد؟

$\Omega =$ سرعت دورانی چرخ نسبت به ماهواره

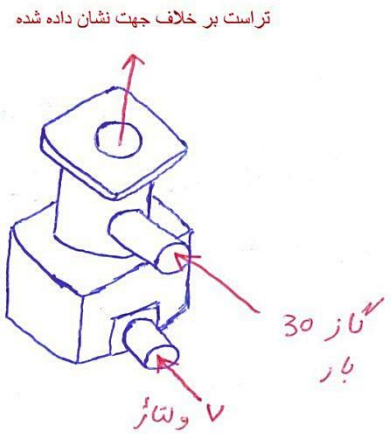
$H_s = -H_w \xrightarrow{\text{برای pitch}} J_s \dot{\theta}_s = -J_w \omega_w$

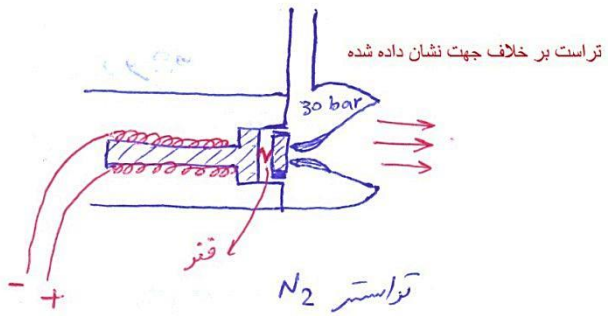
$\longrightarrow J_s \dot{\theta}_s = -J_w (\dot{\theta}_s + \Omega) \longrightarrow 100 * 0.1 = -2(0.1 + \Omega)$

$\longrightarrow \Omega = -5.1 \ deg/s = -0.089 \ rad/s$

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

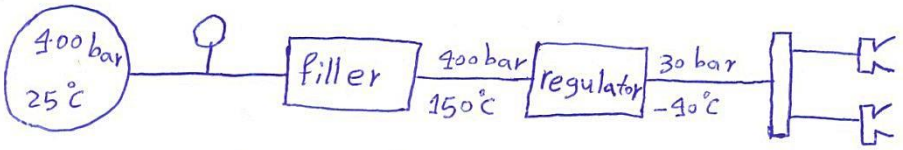
* عملگرهای گاز سرد یا گرم: thruster



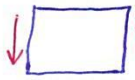


تراستر N_2

صفر و یک است، یعنی یا باز است و یا بسته.



* برای چرخش حول یک محور ← به 2 تراستر نیاز داریم.

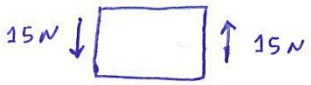


* برای چرخش برعکس حول همان محور ← به 2 تراستر دیگر نیاز داریم.

پس به 4 تراستر برای کنترل یک محور نیاز داریم.

← برای کنترل roll و pitch و yaw به 12 تراستر نیاز داریم.

* مثال



$t_b = 15\ s$

تراست ↑

→ تکانه $= 2\int T dt = 2 * 15 * 15$

$= 2 * 225 = 450\ N.s = kgm/s$

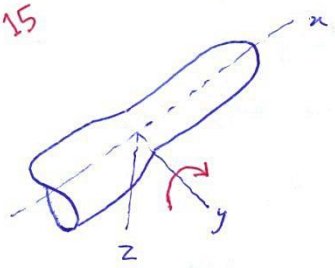
نکته * مقدار تراست در تراستر ثابت است، برخلاف Ω در چرخ عکس العملی.

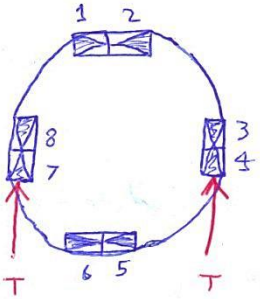
* گاز سرد در موشک استفاده می شود.

* گاز سرد سبب چرخش موشک می شود تا با نوک به زمین وارد شود.

* گاز سرد در ماهواره نیز استفاده می شود.

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir





* مثال 8 تراستری در انتها

مثلاً برای pitch
و برای اینکه دماغه موشک به
طرف پایین قرار بگیرد،
2 تراستر نشان داده شده (4و7)
باید عمل کنند،

$$\begin{cases} \Sigma M_x = T_2 - T_1 = 0 \longrightarrow \dot{\phi} = 0 \\ \Sigma M_y = T * L * 2 = 2TL \\ \Sigma M_z = 0 \longrightarrow \dot{\psi} = 0 \end{cases}$$

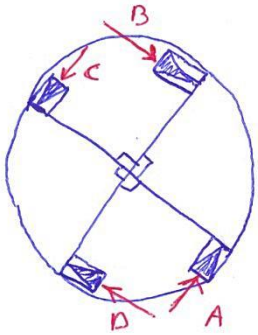
(x) فاصله تا مرکز جرم

$$\begin{cases} \Sigma F_x = 0 \\ \Sigma F_y = 0 \\ \Sigma F_z = 2T \end{cases}$$

تنها نکته اینجاست که مثلاً در این مثال
برآیند نیروها در جهت z، صفر نیست
و این باعث حرکت انتقالی به سمت بالا
می شود

← پس اگر این سیستم در ماهواره
باشد، باعث می‌شود تا ماهواره از
مدار خود خارج بشود، پس در ماهواره
باید 12 تراستر باشد.

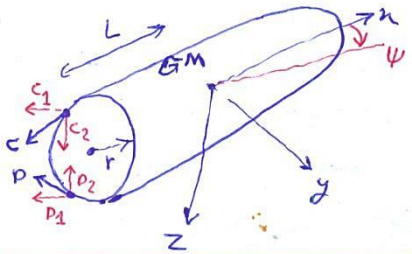
تمرین * اگر بخواهیم به جای 8 تراستر از 4 تراستر فقط استفاده کنیم تا roll و pitch و yaw را دوران دهیم، چگونه باید این 4 تراستر را در انتهای آن، قرار دهیم؟



جواب:

تراست ثابت

$$T_A = T_B = T_C = T_D = T$$



* مثلاً برای Yaw^+ (چرخش دماغه به سمت راست)
باید تراسترهای C و D عمل کنند.

$$\begin{cases} \Sigma M_z = C_1 L + D_1 L = 2\frac{\sqrt{2}}{2} T \cdot L = \sqrt{2}\, TL \\ \Sigma M_y = C_2 L - D_2 L = 0 \checkmark \longrightarrow \dot{\theta} = 0 \\ \Sigma M_x = C_r - D_r = 0 \checkmark \longrightarrow \dot{\phi} = 0 \end{cases}$$

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

* مشکل این سیستم ها نند 8 تراستری ، حرکت انتقالی می باشد، چون مثلاً برای yaw^+ ،

$\Sigma F_x \neq 0$ ولی $\Sigma F_y = \Sigma F_z = 0$

* به همین ترتیب :

* برای yaw^- ← A و B باید عمل کنند.

* برای θ^+ (چرخش دماغه به سمت بالا) ← B و C باید عمل کنند.

$$\begin{cases} \Sigma M_x = 0 \\ \Sigma M_y = \sqrt{2}\,TL \\ \Sigma M_z = 0 \end{cases}$$

* برای θ^- ← A و D باید عمل کنند.

* برای ϕ^+ ← B و D باید عمل کنند.

$$\begin{cases} \Sigma M_x = 2Tr \\ \Sigma M_y = 0 \\ \Sigma M_z = 0 \end{cases}$$

* برای ϕ^- ← A و C باید عمل کنند.

Isp : معیار سنجش و مقایسه موتور ها با هم :

$$I_{sp} = \frac{\int_0^{t_b} T\,dt}{m_p \cdot g} \qquad (\text{ثانیه} = \text{واحد})$$

$\int_0^{t_b} T\,dt$ ← تکانه ایجاد شده

$m_p \cdot g$ ← وزن سوخت مصرفی

* گاز سرد کمترین Isp را دارد.

N_2 ⟶ 70s − 80s جرم مولکولی بیشتر - مخازن کوچکتر

He ⟶ 80s − 100s جرم مولکولی کمتر - مخازن بزرگتر

پس از N_2 استفاده می کنند.

* گاز گرم :

* موتورهای سوخت جامد 228s − 240s (دمای محفظه احتراق $= 3150^\circ$)

* موتورهای سوخت مایع 250s − 300s

* موتورهای یونی 12000s

* موتورهای سوخت اتمی 10^6s

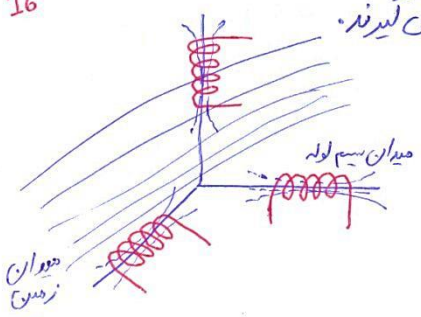
---

* اکثر موشک ها roll control هستند $\dot{\phi} = 0$

* درمعادلات 6 درجه آزادی اگر قراردهیم $p = \dot{\phi} = 0$ (rate roll) ، pitch و yaw از هم مستقل می شوند ، واگر p صفرنباشد ، باید سیستم و gain های قرار دهیم تا 3 محور را کنترل کرد. با این کار ، هزینه ها مسافت بیشتر می شود.

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

* عملگرهای مغناطیسی : چرخش های آخر را به عهده می گیرند.



* در 3 جهت نصب می شوند.
* هنگامی که دو میدان در کنار یکدیگر قرار می گیرند، تمایل به هم جهت شدن دارند. پس یک گشتاور ایجاد می شود.

---

* سیستم های اتوماتیک فضایی کنترل حرارت ماهواره :

ژیروسکوپ Free gyro ← زاویه را به ما می دهد
Rate gyro ← سرعت زاویه ای را به ما می دهد.

* کنترل حرارتی غیر فعال ← بین تجهیزات فلزات را قرار می دهند تا از روش هدایت دما منتقل شود.
* کنترل حرارتی فعال ← سیال را قرار می دهند - طرف سرد یک رادیاتور و طرف گرم هم یک رادیاتور - سیال باری کم و head کوچک - سیکل بسته - در ماهواره های بزرگ

* وقتی جسمی در فضاست، طرفی که رو به خورشید است تا 150 درجه سانتی گراد بالا می رود در حالی که طرف دیگر تا 100°- سرد می شود. و این سرد شدن به خاطر تشعشع بین آن و آسمان سیاه (صفر مطلق) است. پس این اختلاف دما باید کنترل شود.
* روش ماهواره غیرفعال، گرانتر است، چون چیدمان فلز سخت است.
* انبساط طولی یکی از معضلات ساخت ماهواره است.
* عایق تشعشعی : در برخی از ماهواره ها، فویل آلومینیومی روی ماهواره می کشند تا تشعشع خورشید را برگرداند.

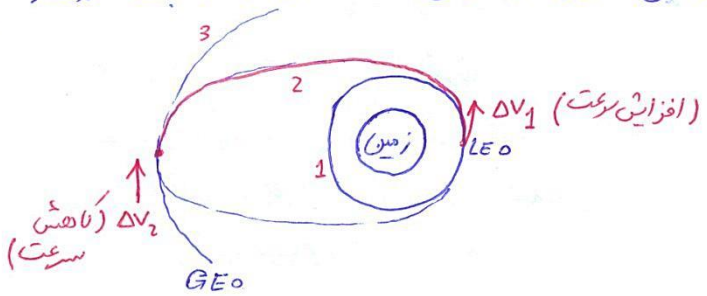
---

* بلوک انتقال مداری :

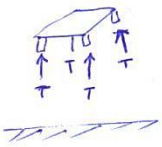
* ماهواره های LEO از خود موشک مستقیم جدا می شوند و به مدار خود می روند.
* ماهواره های GEO نمی توانند مستقیم جدا شوند، چون موشک نمی تواند تا آن ارتفاع بالا برود. بعد از رهایی ماهواره از موشک در LEO، موشک می رقصد

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

که با استفاده از 12 تا گاز سرد، این رقص محوری را می‌گیرند و ماهواره را در جهت مورد نظر قرار می‌دهند.



* ماه نشین: اول وارد مدار می‌شود، پس سرعت کم می‌شود، عمودی می‌شود.



* اگر تراست زیادی اعمال شود، سرعت در وسط صفر شده و برمی‌گردد.
* اگر تراست کمی اعمال شود، سرعت برخورد با ماه زیاد می‌شود و به سقوط آزاد نزدیک می‌شود.
* کنترل تراست برای این مهم است که سوخت برای برگشت داشته باشیم.

---

* شناسایی سیستم های اتوماتیک در فضا

موشک های حامل و بالستیک و کاوشی

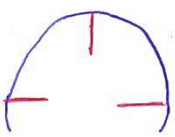
↳ جداشونده: بار مرده را جدا می‌کند.

Close loop ⟶ تراست را کنترل می‌کند.

اکچیتور ← on_off (گازهای سرد) ← man load

سرو اکچیتور ← بین صفر و load قابل کنترلند، مثل بالک.

* بالک وین: با تغییر جهت تراست نسبت به موشک، می‌توان زوایا را کنترل کرد. اگر یکی از 4 تا خراب شود، نسبت به حالتی که 4 تا سالم هستند، بالک باید مقدار بیشتر بچرخد تا همان گشتاور را برای کنترل زوایا تولید کند.



www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

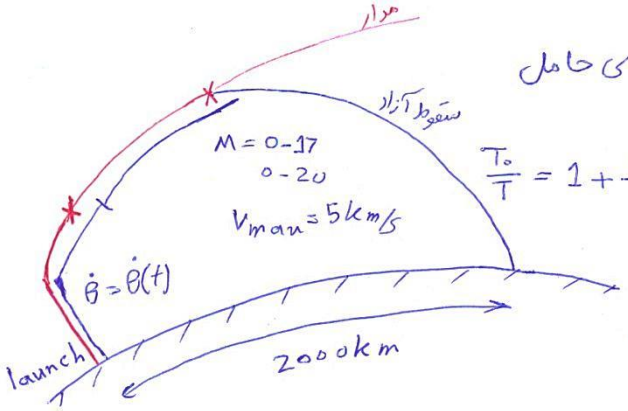
* بالک های گرافیتی: موتور سوخت مایع (گرافیت دمای ذوب بالا دارد) ← 1700°k دمای اشتعال

* بالک های تنگستن: چگالی بالا و دمای ذوب بالا (موتور سوخت جامد) ← 3200°k دمای اشتعال

* در سوخت جامد، مواد جامد (مثل پودر آلومینیوم) خارج می‌شود و چون شکنندگی گرافیت بالا است، می شکند ولی سوخت مایع تک فاز می باشد.

* نیوماتیک (N_2)

* هیدرولیکی (روغن): موشک های حامل



$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2$

launch: نصب و قرارگیری قبل از پرتاب

بالستیک: سقوط آزاد

موشک های حامل: ماهواره را در مدار قرار می دهند.

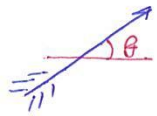
* مسیر این بالستیک ها بیضی است و کانون دوم بیضی مرکز زمین است.

* چون موشک های حامل با ماخ بالا حرکت می کنند، و ماخ خیلی بالا است، پس عموماً یک بار مصرف هستند.

هدایت: مسیرهایی طراحی می کنیم و سیستم باید در همان مسیر حرکت کند. (موشک کروز)
(طراحی مسیر)

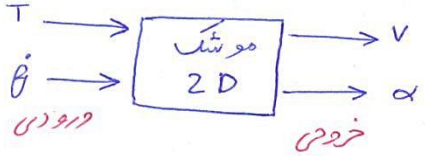
↳ یکی از state های سیستم را باید از قبل طراحی کرده باشیم (مثلاً pitch را از قبل طراحی کرده باشیم!)

* یکی از مهمترین state ها: θ یا $\dot{\theta}$



نتیجه θ ← مسیر

$\dot{\theta} = \dot{\theta}(t)$ → از قبل طراحی نشده



* در دو درجه آزادی: در ابتدا $\dot{\theta} = 0$
و بعد از گذشتن یک زمان مشخص، $\dot{\theta}$ شروع به تغییر می کند.

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

* معیارهای طراحی pitch :

1 مدت زمان عمود پرواز : به سرعتی برسد که نیروهای آیرودینامیکی سبب پایداری آن شود.

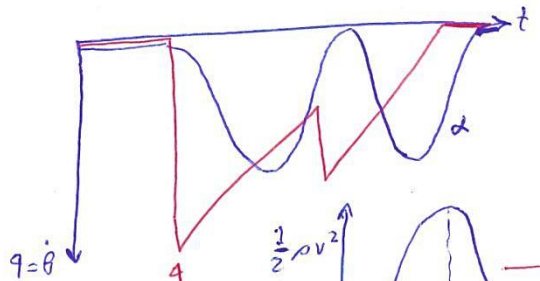
* اگر مدت عمود پرواز خیلی زیاد باشد، انرژی بی جهت مصرف می‌شود و از برد موشک کاسته می‌شود. پس باید t بهینه را طراحی کرد.

2 $q_\infty = \frac{1}{2}\rho v^2$ و در $q_{\infty_{max}}$ باید $\alpha = 0$ چون bending وارد به موشک سبب شکست آن می‌شود.

پس برای اینکه نیروی bending به صفر میل کند.

$$N = \frac{1}{2}\rho v^2 S C_{n\alpha} \cdot \alpha$$

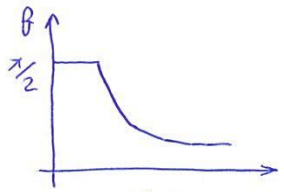
نیروی bending



درست است که با گذشت زمان سرعت افزایش پیدا می‌کند، ولی چگالی به صورت نمایی با ارتفاع تغییر می‌کند و با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد.

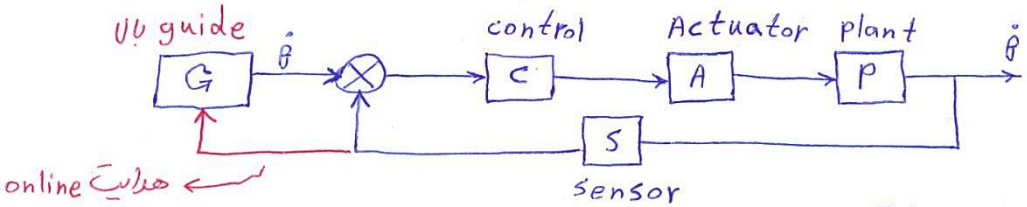
3 نقطه جدایش ($h > 26km$)

$\dot{\theta} = 0$ و $\alpha = 0$



4 برد ماکزیمم (وزن پایین‌تر باشد)

* سیستم کنترل همه موشک‌ها ← PID ← چون برد (R) زیاد است و مثلاً برای اختلاف زاویه کوچک، اختلاف هدف‌زنی خیلی بالا می‌رود.



* مشکل‌ترین هدایت ← هدایت سوخت جامد (خطای اصابت مهم است)

حتی از پدافندهای هوایی که هدف متحرک است، مشکل‌تر است.

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

* طراحی سیستم‌های اتوماتیک :

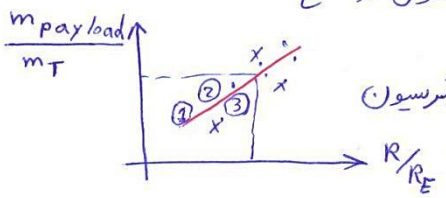
الف) تهیه rfp (کارفرما) - تعریف مسئله

* عنوان پروژه
* محدودیت های به‌کارگیری محصول - global
* الزامات (جرم - ابعادی - $-40^\circ < T < 60^\circ$ - $\varphi = 100\%$ و
* در ایران وقتی کسی rfp می دهد، باید با امکانات هماهنگ کند، پس باید قابل اصلاح باشد.
* حداکثر مدت زمان پروژه (انجام)

ب) تهیه پیشنهادیه (proposal) - به سطح سواد و تجربه افراد پی می بریم.

* ساختار سیستم
* ساختار اداری
* امکان سنجی
  - در طراحی
  - در تکنولوژی
  - در ساخت
  - تست
  - اورهال
* طراحی آماری (محاسبات کاملاً تقریبی)
  - جمع‌آوری کلیه اطلاعات محصول از منابع
  - عملیات ریاضی
  - طراحی آماری

بی بعدسازی وجود دارد.



* مراحل انجام کار
* گانت چارت (زمان بندی)
* هزینه ها (انسانی، تجهیزات، ایاب ذهاب، ندیده و...) 25%
* مراجع
* رزومه

لم نفر-ساعت

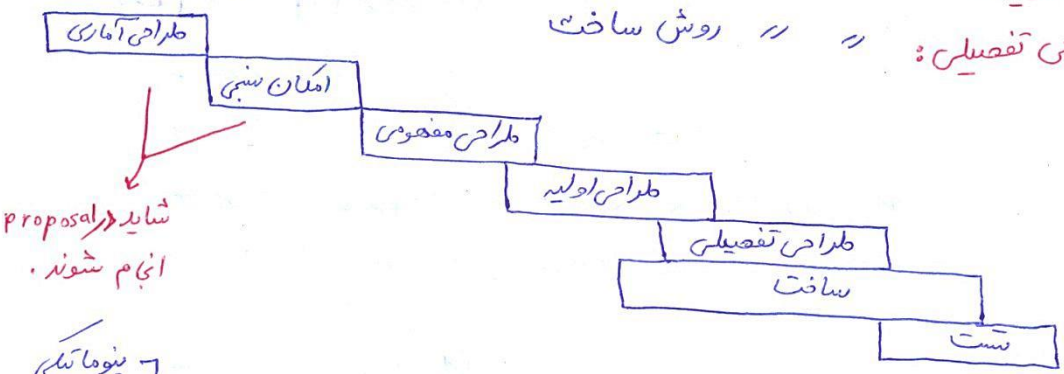
- حال به مرحله انجام پروژه می‌رسیم ...

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir

طراحی مفهومی : می‌سبه کلیه پارامترهایی که در عملکرد سیستم تأثیر دارند.

طراحی اولیه : " " " " تکنولوژی روی آنها تأثیر دارد.

طراحی تفصیلی : " " " روش ساخت



شاید proposal انجام شوند.

مانند نوع جدایش - تعداد رزوه‌ها - هندسه - نوع Actuator - gain

پنوماتیکی
هیدرولیکی

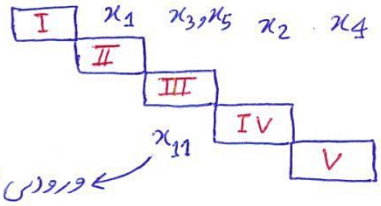
ج) مراحل طراحی مفهومی

* زیر سیستم‌های اصلی شناسایی شود.
* کلیه پارامترهای هر زیر سیستم را لیست کنیم.
* با توجه به روش طراحی زیر سیستم، پارامترهای مستقل و وابسته شناسایی شود.
* پارامترهای ورودی و خروجی زیر سیستم را شناسایی می‌کنیم.

ص و ۲ سوخت

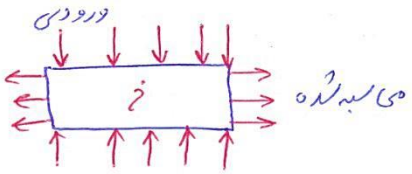
yeild فاز نیازمند در محدوده قطر خروجی نازل

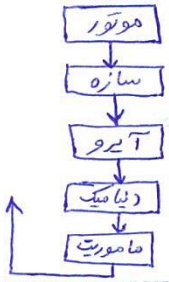
قطر اصلی را زیر سیستم می‌گیرند.



ورودی 2 و خروجی 5

* رسم ماتریس سیستمی





* تعیین روابط (مدل ریاضی) هر زیر سیستم برحسب متغیرهای ورودی و خروجی
* تهیه فلوچارت طراحی

www.havafazaiha.ir
www.Asec.ir