

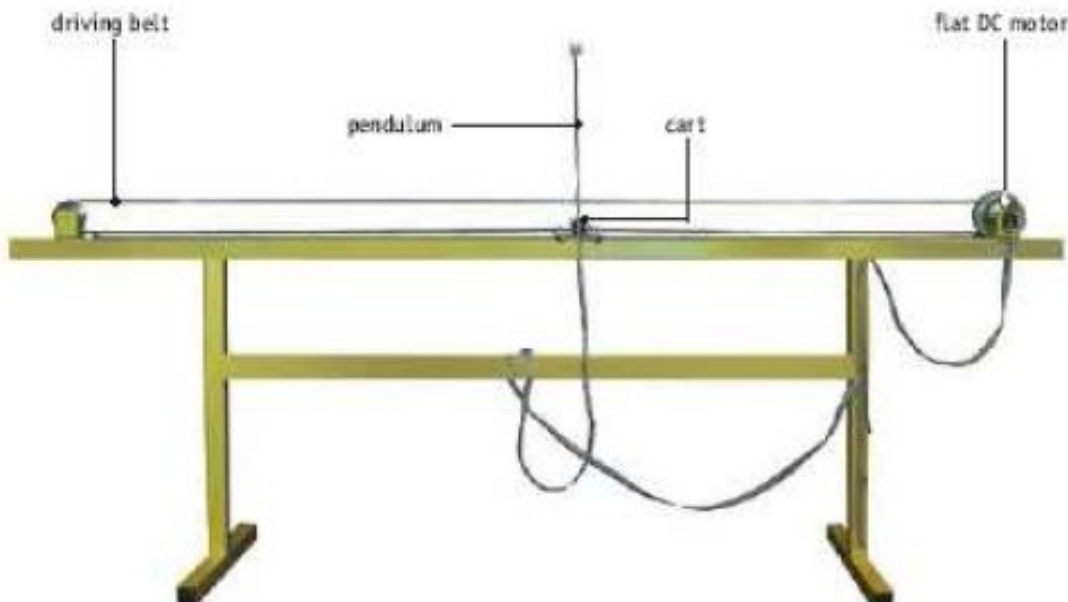
آزمایش ۱- آشنایی با سیستم آونگ معکوس

هدف از آزمایش:

- آشنایی با اجزای سخت افزاری سیستم آونگ معکوس
- آشنایی با Real time workshop در نرم افزار MATLAB و راه اندازی سیستم
- آشنایی با ویژگیهای ذاتی سیستم آونگ معکوس و بررسی اهداف کنترلی آن
- آشنایی با جعبه ابزار PENDULUM1

مقدمه

پاندول معکوس یکی از سیستم های کلاسیک در دینامیک و کنترل است که به واسطه خواصی از قبیل غیر خطی بودن و ناپایداری ذاتی به عنوان یکی از مسائل مطرح در مهندسی کنترل شناخته شده است. سیستم از یک آونگ متصل به یک ارابه (cart) تشکیل شده است، به طوری که ارابه با نیروی اعمال شده از سوی یک موتور DC روی یک ریل با طول مشخص حرکت می کند. هدف، قرار دادن آونگ در وضعیت قائم رو به بالا و حفظ آن در همان موقعیت می باشد، ضمن این که ارابه نیز باید حتی الامکان در مرکز خط ریل قرار گیرد. شکل (۱) نمایی از سیستم آونگ معکوس را نشان می دهد.



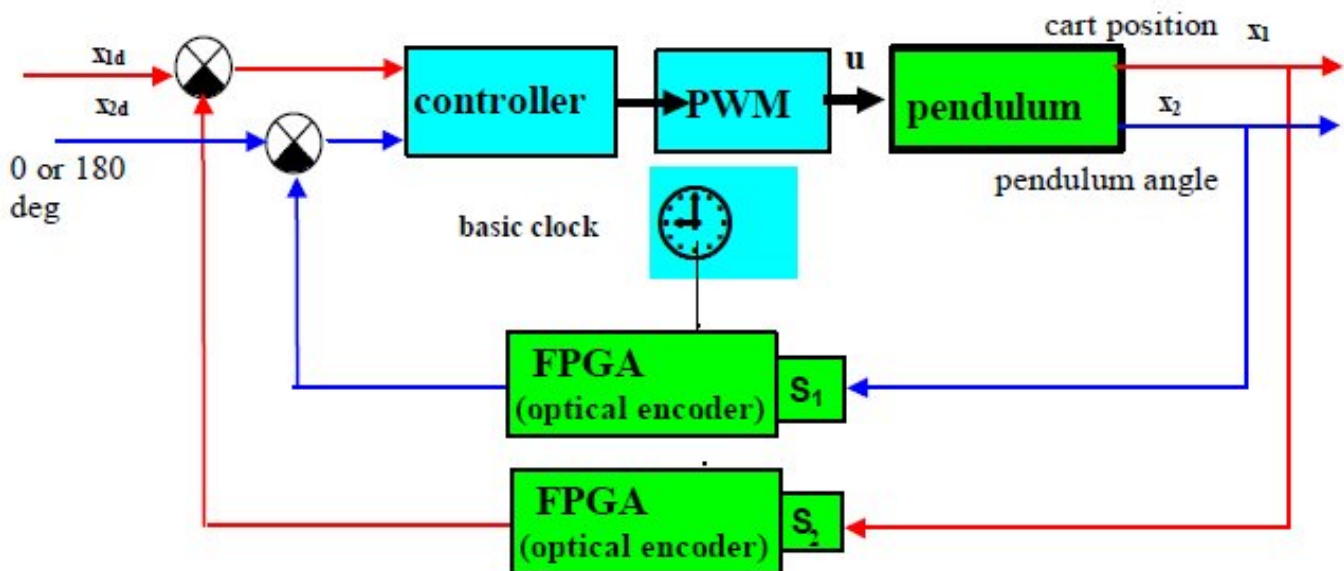
شکل (۱): سیستم آونگ معکوس و ارابه

۱- معرفی سیستم

سیستم مورد نظر از اجزای زیر تشکیل شده است:

- کامپیوتر مجهز به برد Data acquisition از نوع RTDAC4/PCI. (برای برقراری ارتباط با این برد درایورهای به خصوصی مورد نیاز است که در toolbox ارائه شده برای سیستم لحاظ شده است)
- اجزای مکانیکی شامل پاندول به همراه ارابه
- Encoder های نوری و موتور DC
- Power interface
- نرم افزار کنترل که toolbox ی به نام PENDULUM1 در محیط MATLAB می باشد و توسط شرکت سازنده در اختیار کاربران قرار داده می شود. این نرم افزار امکان شناسایی سیستم و پیاده سازی انواع الگوریتم های کنترلی دیجیتال را در محیط SIMULINK و به صورت real time به کاربران می دهد.

در هر مرحله موقعیت ارابه و زاویه آونگ توسط encoder ها (سنسورهای نوری) تعیین و به واحد FPGA (در برد Data acquisition) فرستاده می شود. با توجه به مقادیر ارسال شده اندازه گیری ها و مقادیر مرجع که در برنامه تعیین می شود، الگوریتم کنترل سیگنال کنترلی را محاسبه و آن را به برد می فرستد. ژنراتور PWM، سیگنال PWM مناسب را به موتور DC اعمال کرده و ارابه روی ریل جابجا می شود. شکل (۲) نمونه ای از این فرایند را نشان می دهد.



شکل (۲) کنترل دیجیتال سیستم آونگ معکوس

تذکر: با توجه به اجرای الگوریتم به صورت real time در برنامه نوشته شده از جعبه ابزار Real time target Windows استفاده می شود. برای اطلاعات بیشتر در این زمینه می توانید به help این toolbox در MATLAB مراجعه نمایید.

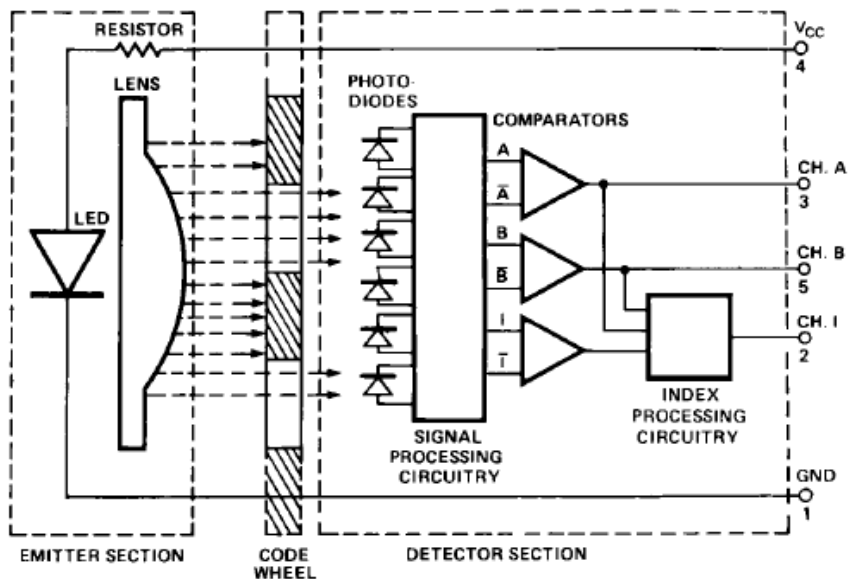
۲- سخت افزار سیستم

• Encoder نوری

این سیستم دارای ۲ عدد encoder نوری یکی برای تعیین موقعیت ارابه و دیگری برای تعیین زاویه آونگ می باشد. محل این سنسورها را روی دستگاه شناسایی کنید.

ساختار encoderهای نوری شامل یک منبع نور و یک دریافت کننده نور و یک دیسک چرخنده دارای چندین شکاف می باشد که بین آن دو قرار می گیرد. به این ترتیب که تعداد پالس ها متناسب با زاویه چرخش دیسک شمرده می شود. سیستم آونگ معکوس از یک encoder افزایشی استفاده می کند.

شکل (۳) نحوه ی ایجاد این پالس ها را نشان می دهد.



شکل (۳) نحوه ی تشکیل پالس ها در encoder

سوال ۱: برای تعیین جهت چرخش آونگ توسط encoder چه می توان کرد؟

• برد RTDAC4/PCI Data acquisition

این برد که روی کامپیوتر مورد استفاده در این آزمایش نصب گردیده است شامل مبدل A/D و D/A و خطوط دیجیتال I/O می باشد. ویژگی های کلی آن عبارت است از:

- ۱۶ ورودی آنالوگ - قدرت تفکیک ۱۲ بیت - محدوده ولتاژ ورودی +/-10V
- تقویت کننده آنالوگ با بهره ۱-۲-۴-۸-۱۶
- ۴ خروجی آنالوگ - قدرت تفکیک ۱۲ بیت - محدوده ولتاژ خروجی 0-10V, -10, +/-10V
- ۴ خروجی PWM - قدرت تفکیک ۱۲ یا ۸ بیت - محدوده فرکانسی 0.15kHz تا 156kHz
- ۴ ورودی encoder افزایشی - شمارنده ۳۲ بیتی

۳- مشخصات فیزیکی سیستم آونگ معکوس و مکانیزم های کنترل آن

۱-۳ مشخصات فیزیکی

مدل های ریاضی ابزار مناسبی برای توصیف کمی رفتار سیستم می باشند که اساسا از روی قوانین فیزیکی حاکم بر سیستم استخراج می شوند و معمولا به فرم معادلات دیفرانسیل هستند. سیستم آونگ و ارابه با معادلات زیر قابل بیان است. (در جلسه آینده راجع به نحوه به دست آوردن این معادلات بحث خواهیم نمود.)

$$\dot{x}_1 = x_3$$

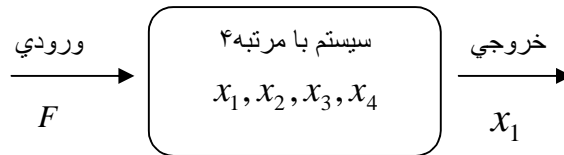
$$\dot{x}_2 = x_4$$

$$\dot{x}_3 = \frac{a(F - f_c x_3 - \mu x_4^2 \sin x_2) + l \cos x_2 (\mu g \sin x_2 - f_p x_4)}{J + \mu l \sin^2 x_2} \quad (1)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{l \cos x_2 (F - f_c x_3 - \mu x_4^2 \sin x_2) + \mu g \sin x_2 - f_p x_4}{J + \mu l \sin^2 x_2}$$

که در آن M مجموع جرم آونگ و ارابه، l فاصله محور چرخش آونگ تا مرکز جرم سیستم، J ممان اینرسی کل مربوط به مرکز جرم سیستم، f_c ضریب اصطکاک دینامیکی، f_p ضریب اصطکاک دورانی، $a = l^2 + \frac{J}{M}$ و $\mu = M.l$ و F نیروی وارد بر ارابه می باشد.

- سیستم از مرتبه چهار بوده و دارای ۴ متغیر حالت x_1 (موقعیت ارابه)، x_2 (زاویه بین راستای قائم رو به بالا و آونگ)، x_3 (سرعت ارابه)، x_4 (سرعت زاویه ای آونگ) و یک متغیر کنترلی می باشد. (شکل (۴))



شکل (۴)

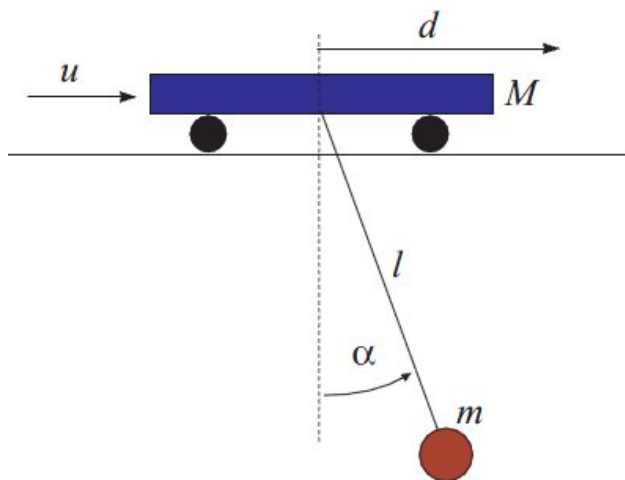
- با توجه به معادلات حالت (۱)، سیستم فوق غیر خطی است. یعنی سمت راست معادلات، تابعی غیر خطی از متغیرهای x_1, x_2, x_3, x_4 است.

سوال ۲- با توجه به آنچه درسخت افزار این سیستم دیده می شود چه محدودیت های فیزیکی در کنترل این مجموعه وجود دارد؟

۲-۳ مکانیزم های کنترل

در کنترل سیستم پاندول و ارابه ۲ نوع مسئله متفاوت را می توان در نظر گرفت:

- **Crane Control**: هدف کنترلی به این شکل تعریف می شود که ضمن تغییر مکان ارابه از یک موقعیت اولیه به یک موقعیت نهایی نوسانات در آونگ حداقل باشد و آونگ در وضعیت قائم رو به پایین قرار گیرد. شکل (۵) نمونه ای از این مد کنترل را نشان می دهد.

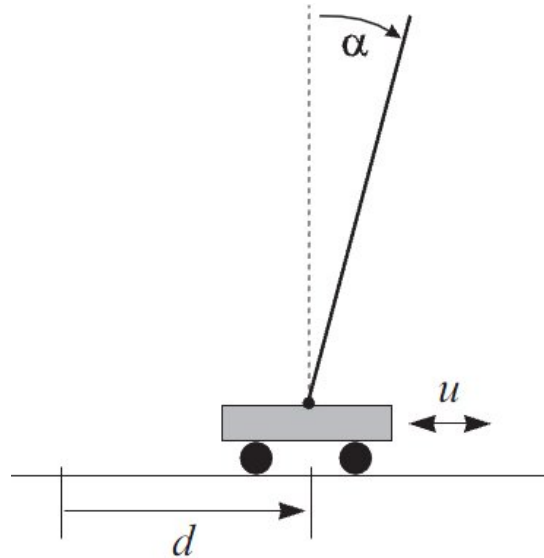


شکل (۵) Crane Control

- **Swing up Control**: هدف کنترلی قرار دادن آونگ در وضعیت قائم و حفظ آن در همان حالت (پایدار سازی) می باشد. ضمن این که ارابه نیز در موقعیت مطلوب (معمولا مرکز ریل) قرار گیرد. این مسئله شامل دو الگوریتم مختلف می باشد:

الف) الگوریتم **swing**: در این الگوریتم که بر مبنای تحلیل انرژی سیستم طراحی شده آونگ به نوسان واداشته می شود تا انرژی آن مرتبا افزایش یابد. این فرایند تا آن جا ادامه می یابد که آونگ در محدوده ای نزدیک به حالت قائم قرار گیرد. در این جا عملکرد این الگوریتم پایان یافته و وارد الگوریتم دیگری به نامه "پایدارسازی" می شویم.

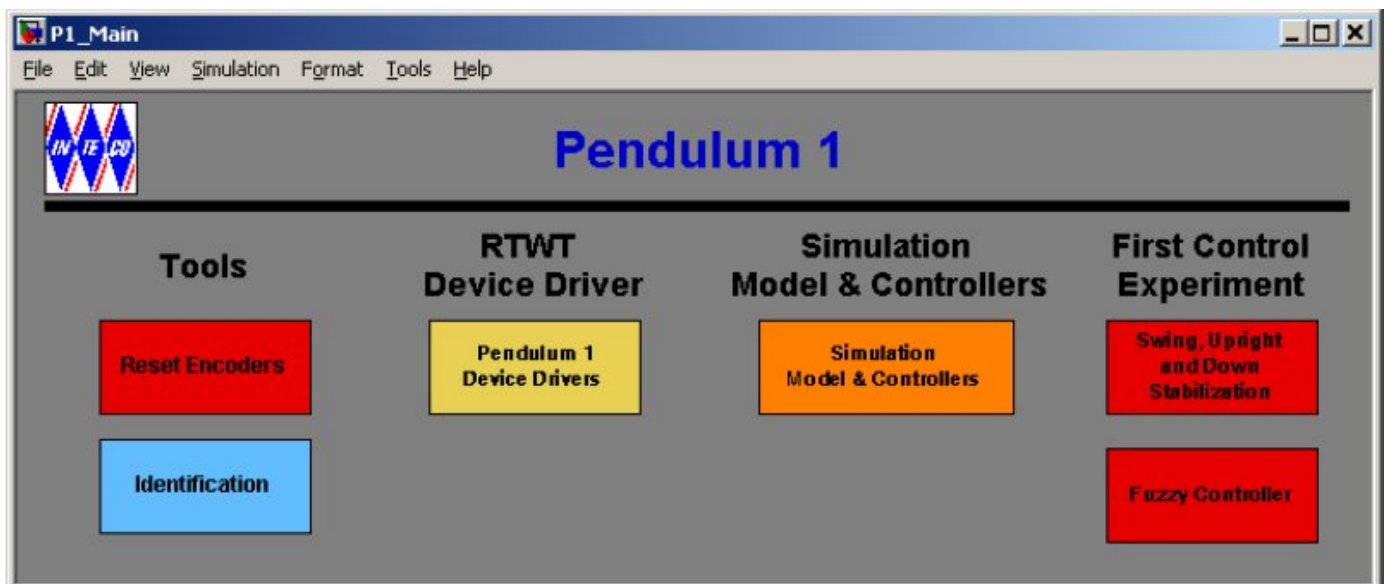
ب) الگوریتم پایدار سازی: حال که آونگ در محدوده ای نزدیک به حالت قائم قرار گرفته می توان با استفاده از مدل خطی شده سیستم حول نقطه کار ناپایدار کنترلی برای آن طراحی نمود که سیستم حلقه بسته پایدار شود. در بخش طراحی کنترل کننده سعی خواهیم نمود تا کنترلی برای مسئله crane control و نیز کنترلی برای مسئله پایدار سازی طراحی نماییم. شکل (۶) نمایی از این مد کنترلی را نشان می دهد.



شکل (۶) swing up control

۴- آشنایی با جعبه ابزار Pendulum

در Command Window نرم افزار MATLAB، p1 را تایپ کنید تا پنجره شکل (۷) نمایان شود.

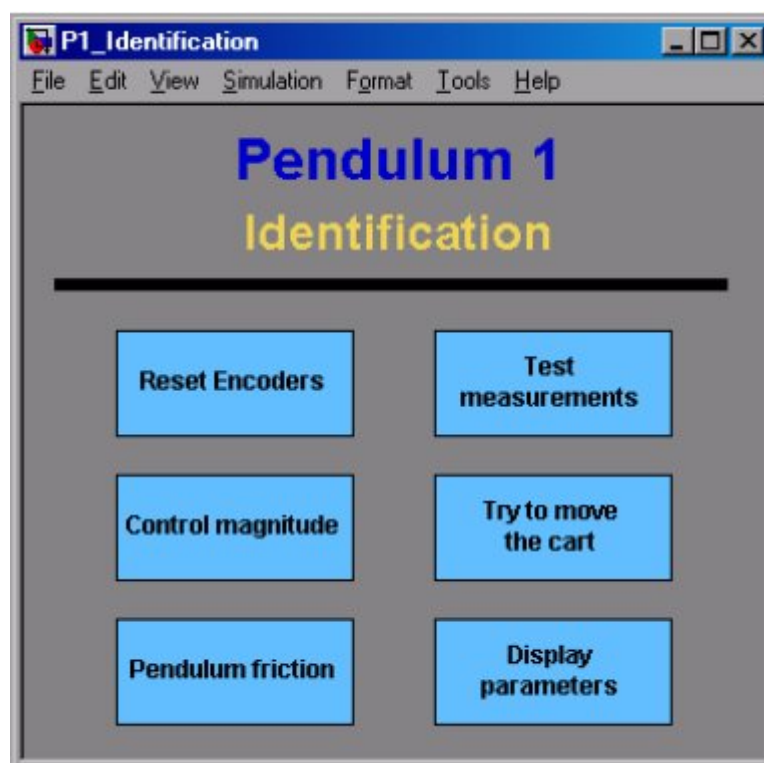


شکل (۷) پنجره کنترل Pendulum

در این پنجره بخش های مختلف کار با toolbox آورده شده است. بخش Tools شامل reset کردن سنسورها، کالیبراسیون، تعیین مشخصه اصطکاک بین ارابه و ریل آن و اندازه گیری سیگنال کنترلی می باشد. بخش RTWT Device Driver ارتباط بین محیط MATLAB و برد Data acquisition را برقرار می کند. در بخش Simulation Model and Controllers مدلی از سیستم واقعی با پارامترهای قابل تنظیم ارائه شده است که عملیات شبیه سازی در MATLAB در این قسمت قابل پیاده سازی است. بخش First Control Experiment دو دیدگاه کنترلی مختلف برای سیستم آونگ ارائه می دهد و امکان اجرای الگوریتم های کنترلی به صورت real time را فراهم می آورد.

۴-۱ بخش identification

با کلیک روی دکمه identification پنجره دیگری باز می شود که امکانات مختلف این بخش را نشان می دهد. (شکل ۸)



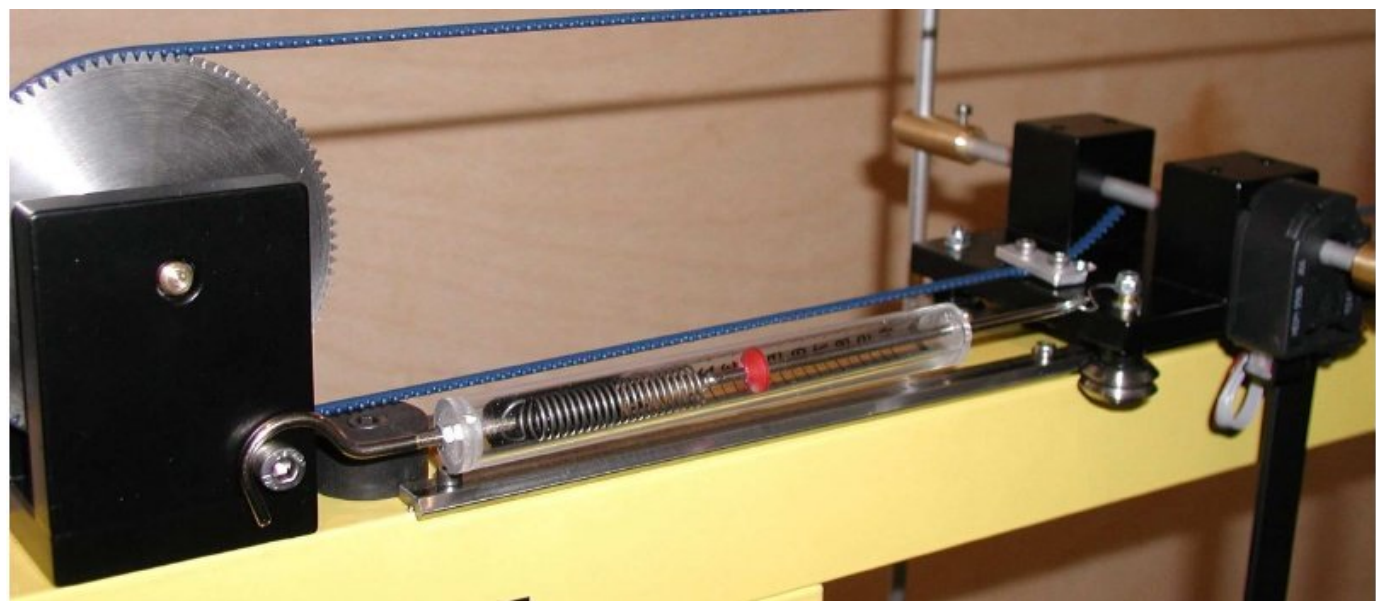
شکل (۸) پنجره identification

Reset Encoders: در آغاز کار با سیستم ارابه را به انتها الیه سمت چپ برده و روی این بلوک ۲ بار کلیک کنید. به این ترتیب مقدار هر دو سنسور موجود، صفر قرار داده می شود.

Test measurements: ارابه را در مرکز ریل قرار دهید به طوری که آونگ بی حرکت قرار گیرد. با کلیک روی این قسمت، امکان دیدن مقادیر اندازه گیری شده برای موقعیت ارابه و زاویه آونگ را خواهیم داشت. با تغییر

موقعیت ارابه به راست و چپ و سپس تغییر زاویه آونگ در ۲ جهت مقادیر اندازه گیری شده را بخوانید و صحت آن ها را بسنجید. به علاوه به علامت نظر گرفته شده برای موقعیت ارابه و زاویه آونگ توجه کنید.

Control magnitude: نیروسنج را مطابق شکل ۹ نصب کنید



شکل ۹) نصب نیروسنج

با فشردن این دکمه می‌توانید مقدار duty cycle سیگنال PWM را تغییر دهید و نیروی متناظر با آن را اندازه بگیرید. این مرحله را برای مقادیر مختلف duty cycle تکرار کنید و نمودار نیرو بر حسب duty cycle سیگنال PWM را رسم کنید.

: Try To Move The Cart

اصطکاک ارابه روی ریل از دو قسمت تشکیل می‌شود.

(۱) اصطکاک ایستایی (Coulomb Friction) که فقط به جهت سرعت ارابه بستگی دارد و از رابطه (۲) به دست می‌آید. ($\alpha > 0$)

$$T_s = -\alpha \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) \quad (2)$$

(۲) اصطکاک جنبشی (Viscous Friction) که متناسب با سرعت ارابه روی ریل می‌باشد و از رابطه (۳) به دست می‌آید. ($\beta > 0$)

$$T_C = \beta \dot{x}_1 \quad (3)$$

در این قسمت می توانیم مقدار اصطکاک ایستایی که معادل کمترین نیروی لازم برای حرکت ارابه است محاسبه نماییم. روی دکمه Try To Move The Cart کلیک کنید. ارابه یک بار از چپ به راست و سپس از راست به چپ حرکت خواهد نمود. در پایان، نمودار $duty\ cycle$ سیگنال PWM بر حسب موقعیت ارابه رسم می شود. مقدار متوسط $duty\ cycle$ مورد نیاز را به دست آورید. از روی آن اصطکاک ایستایی را محاسبه و با مقدار ارائه شده در جدول (۱) مقایسه کنید.

Pendulum friction: ارابه را در متناهی سمت چپ با فنر کوچکی ثابت نگه دارید. در **Workspace** تایپ کنید **P1-ExplidentPF** تا فایل سیمولینک به این نام باز شود. حال در منوی **Tools** در قسمت **Real Time Workshop** روی گزینه **Build Model** کلیک کنید تا مدل **Compile** شود. بعد از آن که در محیط **MATLAB** موفقیت آمیز بودن فرآیند کامپایل اعلام شد، روی دکمه **Connect to target** کلیک کنید. آونگ را ۲۰ درجه از حالت عمودی رو به پایین منحرف و رها کنید و بلافاصله روی دکمه **Start real time code** کلیک کنید، زاویه آونگ را روی **scope** مشاهده می کنید. برای تحلیل بهتر داده ها می توانید آن ها را به **Workspace** منتقل کنید.

- نمودار تغییرات زاویه آونگ بر حسب زمان را در ۳۰ ثانیه اول رسم کنید.
- متوسط دوره تناوب آونگ را به دست آورید.
- ضریب اصطکاک آونگ (f_p) را به دست آورید.
- مقدار به دست آمده را با مقدار اشاره شده در جدول (۱) مقایسه کنید.

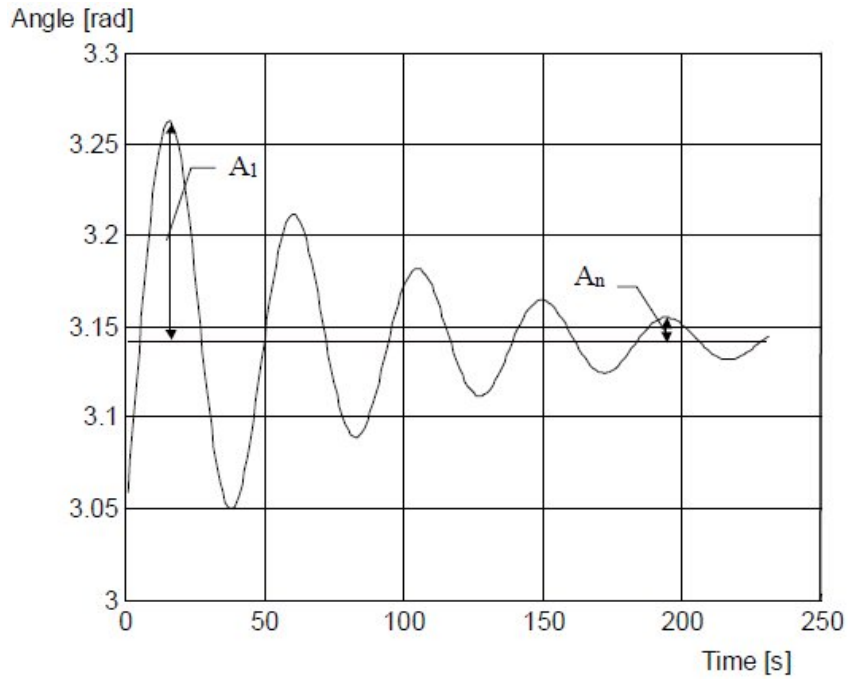
طریقه محاسبه ضریب اصطکاک دورانی آونگ:

ضریب اصطکاک دورانی آونگ از رابطه زیر به دست می آید:

$$f_{pc} = \frac{2}{(2n-1)T} \log\left(\frac{A_1}{A_n}\right)$$

$$f_p = J_p f_{pc}$$

A_1 و A_n مقادیر ماکزیمم نسبی بعد از به ترتیب، ۱ و n نوسان هستند. (شکل ۱۰) T پریود نوسانات و J_p ممان اینرسی آونگ است که از جدول (۱) قابل بازیابی است.

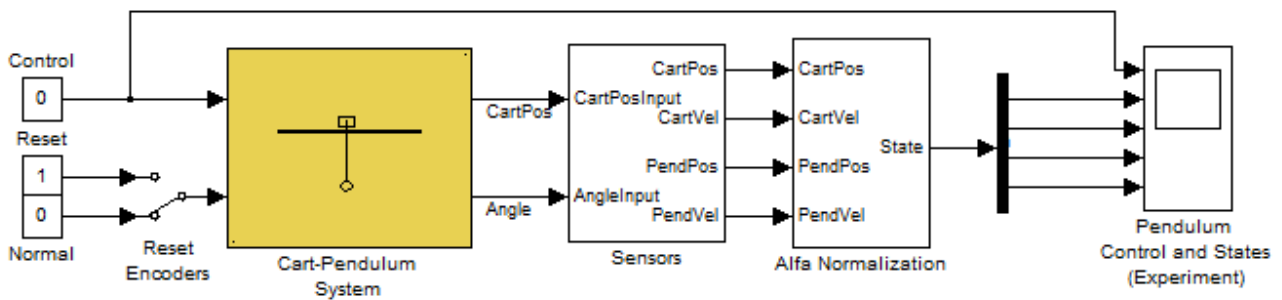


شکل (۱۰) محاسبه ضریب اصطکاک دورانی

۲-۴ بخش Device Driver

در پنجره اصلی بر روی دکمه Pendulum1 Device Drivers دو بار کلیک کنید تا فایل Simulink متناظر با آن باز شود. چنان که گفته شد وظیفه اصلی درایور ایجاد ارتباط مناسب بین محیط MATLAB و برد Data acquisition است. ورودی ها و خروجی های درایور را مشخص کنید.

Pendulum 1 Device drivers



شکل (۱۱) بخش درایور در جعبه ابزار Pendulum

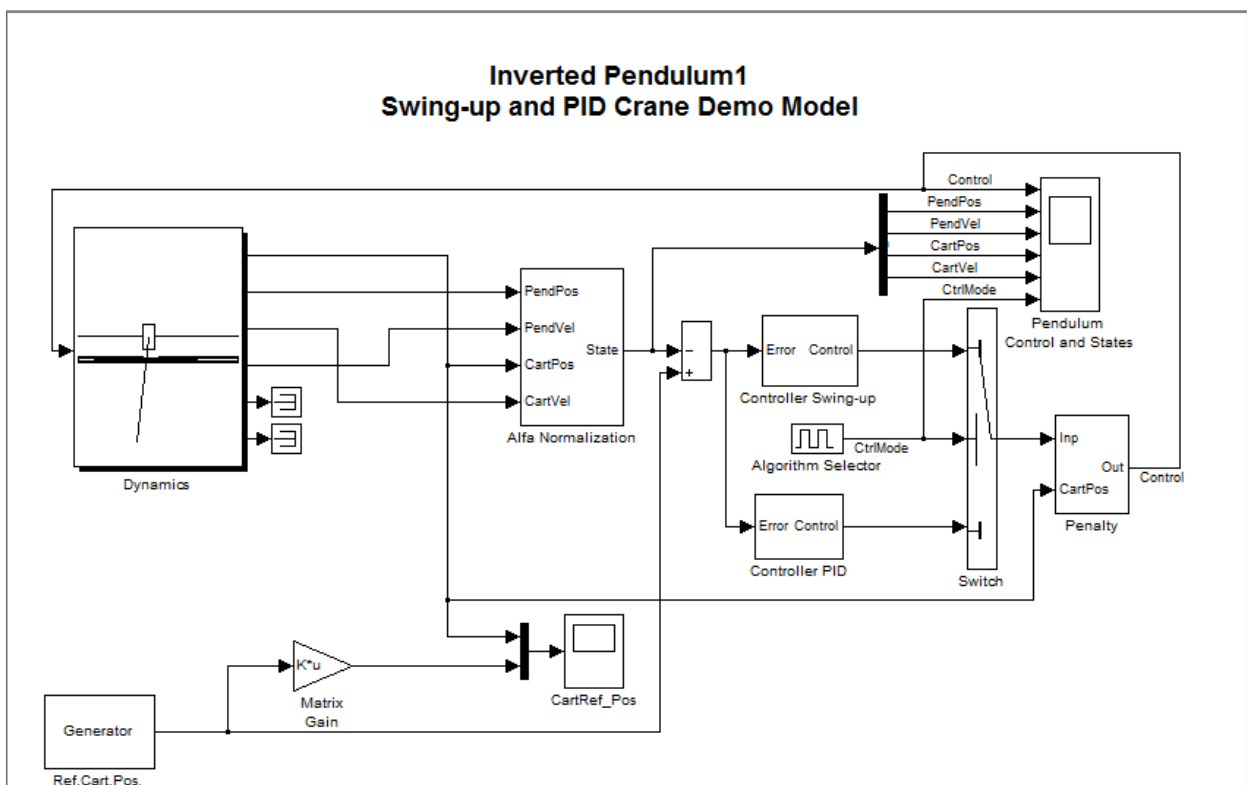
توجه شود که نباید هیچ گونه تغییری در این فایل اعمال کنید.

- روی بلوک Cart-Pendulum system راست کلیک کرده و گزینه look under mask را انتخاب کنید. عملیات درایور در این بخش به سه قسمت تقسیم شده است هر یک از آن ها را بررسی کنید.
- حد بالا و پایین سیگنال کنترل چه قدر است؟
- قدرت تفکیک هر یک از سنسورهای تعیین زاویه و موقعیت ارا به چه قدر است؟
- هر یک از بلوک های Sensors و Alfa Normalization را باز کنید. زاویه نرمال شده چگونه محاسبه می شود و در چه بازه ای قرار میگیرد؟

۳-۴ بررسی بلوک های به کار رفته در Simulation

شبیه سازی سیستم در MATLAB را می توان در قسمت Simulation model and controllers انجام داد. همواره بعد از طراحی کنترل کننده و پیش از قرار دادن کنترل کننده در مسیر سیستم واقعی باید آن را در بخش شبیه سازی اعمال کنید تا از بروز اشتباهات جزئی که منجر به نتایج دور از انتظار میشود جلوگیری شود.

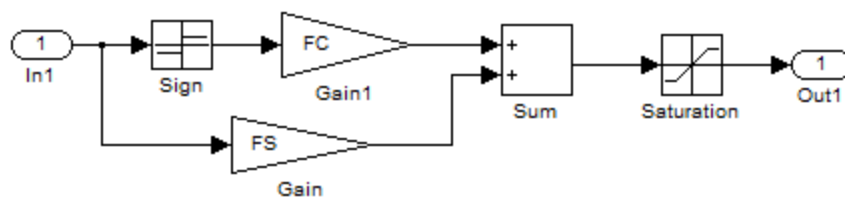
روی Simulation model and controllers دو بار کلیک کنید تا فایل Simulink متناظر با آن باز شود. در درایو F یک پوشه به نام گروه خود ایجاد کنید و یک کپی از این فایل را در آنجا ذخیره کنید. فایل اصلی را ببندید و از این پس با نسخه کپی شده آن کار کنید. (توجه شود که هیچ تغییری در فایل اصلی ایجاد نشود.) شکل ۱۲ نمایی از فایل شبیه سازی را نشان میدهد.



شکل (۱۲) مدل شبیه سازی

بلوک Dynamics شبیه سازی سیستم آونگ معکوس را با استفاده از معادلات حالت بیان شده در این جلسه نشان می دهد. روی این بلوک راست کلیک کرده و گزینه look under mask را انتخاب کنید.

- پیاده سازی معادلات حالت مطرح شده در این جلسه (رابطه ۱) را دنبال و سیگنال متناظر با هر یک از متغیرها را بیابید.
- بلوک Friction را باز کنید و با توجه به آنچه راجع به اصطکاک در این جلسه گفته شد عملکرد آن را توضیح دهید.



شکل (۱۳) مدل سازی اصطکاک

- در این فایل ۳ بلوک Deadzone دیده می شود که در مسیر سیگنال های سرعت ارابه ، سرعت آونگ و سیگنال کنترل u قرار گرفته است. با توجه به محدودیت های فیزیکی، استفاده از آن ها چه نقشی در مدل سازی بهتر سیستم آونگ معکوس دارد؟
- سیگنال کنترل که به عنوان ورودی بلوک Dynamics به کار می رود، قبل از اعمال به سیستم، با بهره M تقویت می شود. نقش این بهره چیست و مقدار آن با توجه به آزمایش مطرح شده در بخش identification چگونه محاسبه می شود؟ مقدار آن را با توجه به آزمایش خود اصلاح کنید.
- در شبیه سازی بعد از محاسبه حالت های سیستم، مقدار آن ها به بلوک Quantization فرستاده می شود که در واقع رفتار سنسورها را مدل می کنند. هر یک از این بلوک ها را باز کنید و راجع به نحوه عمل آن ها بحث کنید.

بعد از این که با مدل سازی سیستم در Simulink آشنا شدید رفتار کنترلی آن را در محیط شبیه سازی بررسی کنید. به این منظور ابتدا محل کنترل کننده ها در فایل شبیه سازی را بیابید. چنان که می بینید، دو هدف کنترلی مختلف و متناظر با آن دو بلوک Controller Swing up و Controller PID برای سیستم آونگ معکوس در نظر گرفته شده است. در ابتدا کنترل کننده اول در مسیر حلقه بسته قرار می گیرد که وضعیت هدایت آونگ از وضعیت پایین به حالت قائم و نگه داشتن آن را بر عهده دارد (پایدار سازی). بعد از زمان مشخصی که توسط سیگنال Ctrl Mode تعیین می شود، آونگ رها شده و کنترل کننده دوم سیستم را در وضعیت Crane control نگه می دارد. (در بخش الگوریتم های کنترلی راجع به هر دو این اهداف توضیح داده شد).

بلوک متناظر با Controller Swing Up را باز کنید. در این قسمت سه هدف عمده دنبال می شود.

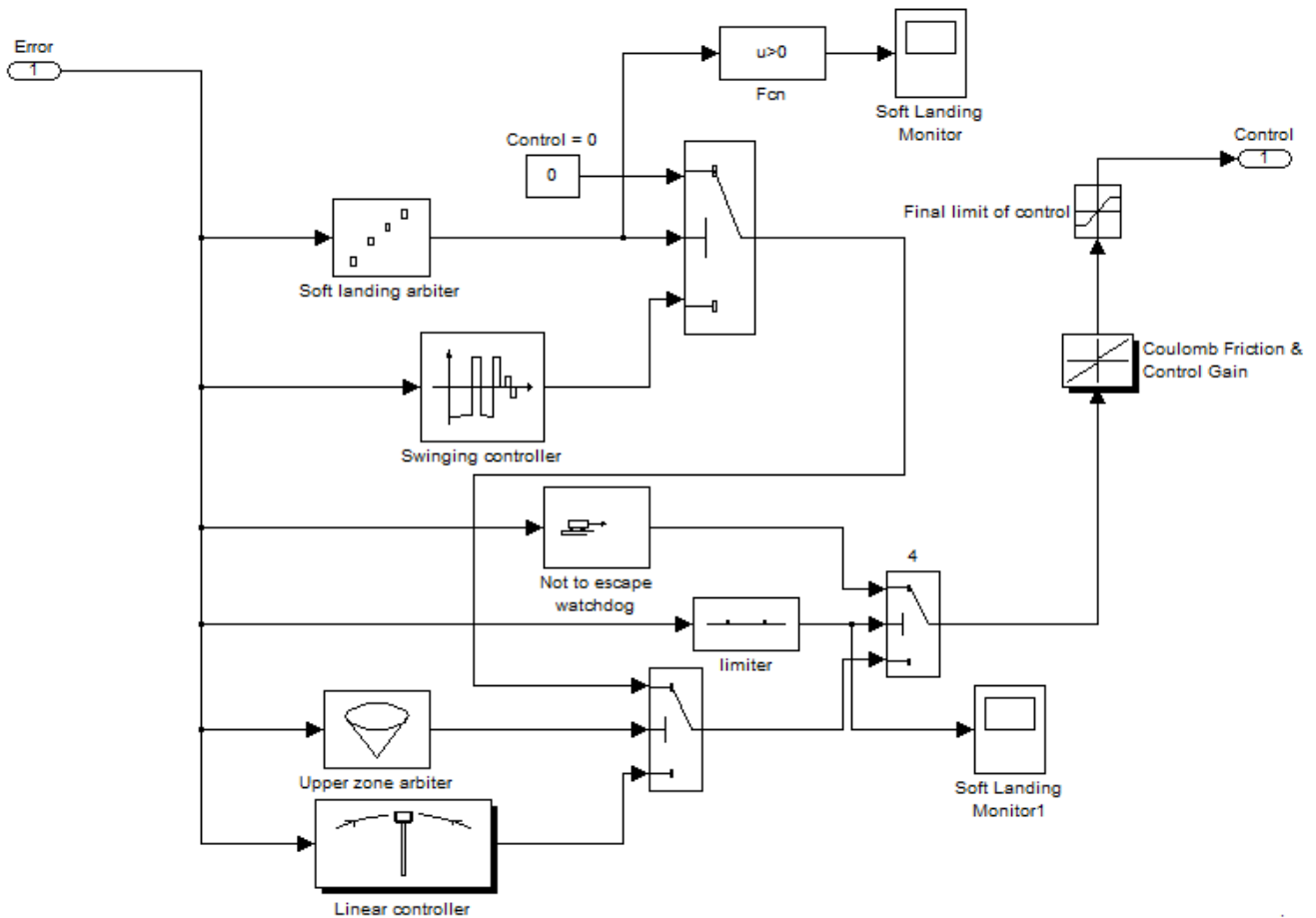
هدف اول: با اعمال سیگنال کنترلی مناسب، آونگ از وضعیت رو به پایین به وضعیت قائم در آید. این هدف با استفاده از سه بلوک soft landing arbiter، Upper zone arbiter، swing controller برآورده می شود:

- بلوک Swing controller با استفاده از قاعده ای موسوم به bang-bang این کار را انجام می دهد. در این روش سیگنال u از رابطه ی (۴) به دست می آید که بسته به زاویه آونگ و سرعت زاویه ای آن، سیگنالی با مقادیر ۱ یا -۱ را اعمال می کند.

$$u = \text{sign}\left[x_4 \left(x_2 - \frac{\pi}{2}\right)\right] \quad (۴)$$

برای مشاهده جزئیات بیشتر این بلوک را باز کنید و عملکرد آن را ببینید.

- بلوک Upper zone arbiter محدوده ای را مشخص می کند که از کنترل کننده swing استفاده می شود. این محدوده چقدر است؟
- بلوک soft landing arbiter به منظور اطمینان از اعمال به موقع سیگنال u و جلوگیری از رد کردن نقطه تعادل قائم طراحی شده است و با استفاده از مفاهیم انرژی، اعمال یا عدم اعمال نیرو را بررسی می کند. این بلوک را باز کنید و عملکرد آن را شرح دهید.



شکل (۱۴) کنترل کننده swing up

هدف دوم: با قرار گرفتن آونگ در محدوده مناسب از یک کنترل کننده خطی برای پایدارسازی استفاده می شود. کنترل کننده در نظر گرفته شده در این ساختار از نوع فیدبک حالت می باشد. در جلسات آینده یک کنترل کننده lead-lag برای پایدارسازی در این مرحله، طراحی خواهید نمود.

هدف سوم: محدود نمودن مکان ارابه با توجه به محدودیت طول ریل و تمایل به قرار گرفتن ارابه در مرکز. بلوک های limiter و Not to escape watchdog به این منظور طراحی شده اند. با بررسی این دو بلوک، مکانیزم به کار رفته در محدود کردن مکان ارابه را شرح دهید.

توجه کنید که اصطکاک ایستایی به دلیل ماهیت غیر خطی آن قابل مدل سازی در ساختار مدل خطی نیست و باید به طریقی جبران سازی شود. بلوک Coulumb Friction and Control Gain این جبران سازی را انجام می دهد. با بررسی این بلوک، نحوه جبران سازی اصطکاک ایستایی را بررسی کنید.

در عمل به دلایل حفاظتی مایل نیستیم از تمام توان موتور DC استفاده کنیم. لذا سیگنال کنترل، قبل از اعمال به سیستم آونگ و ارا به، از یک محدود کننده نهایی عبور می کند که مقدار آن را مثلاً بین 0.2 و -0.2 محدود می کند. به این ترتیب فقط از 20% توان موتور DC استفاده خواهیم نمود.

حال که با بلوک های مهم به کار رفته در دینامیک سیستم و نیز کنترل آن آشنا شدید، دکمه Start simulation را بزنید و نتایج شبیه سازی را روی scope مشاهده کنید.

۴-۴ راه اندازی سیستم در real-time

برای کار با سیستم آونگ معکوس مراحل زیر را طی کنید

۱. در پنجره اصلی روی Swing, Uptight and Down Stabilization کلیک کنید تا فایل سیمولینکی به نام P1_ExpDemo باز شود. این بار نیز در درایو F یک پوشه به نام گروه خود ایجاد کنید و یک کپی از این فایل را در آنجا ذخیره کنید. فایل اصلی را ببندید و از این پس با نسخه کپی شده آن کار کنید. (توجه شود که هیچ تغییری در فایل اصلی ایجاد نشود).

۲. ارا به را به انتها الیه سمت چپ برده و روی دکمه Reset Encoders دو بار کلیک کنید. به این ترتیب مقدار هر دو سنسور موجود صفر قرار داده می شود. سپس ارا به را در مرکز ریل قرار دهید.

۳. حال در منوی Tools در قسمت Real Time Workshop روی گزینه Build Model کلیک کنید تا مدل Compile شود. (می توانید از Ctrl+B استفاده کنید) بعد از آن که در محیط MATLAB موفقیت آمیز بودن فرآیند کامپایل اعلام شد، روی دکمه Connect to target کلیک کنید.

۴. در ادامه دکمه Start real time code را بزنید. به این ترتیب سیگنال PWM به موتور DC اعمال شده و سیستم در وضعیت کنترل شده به راه می افتد. مکانیزم کنترل همان است که در بخش Simulation بررسی شد.

۵. در حین آزمایش، با دو بار کلیک روی scope می توانید سیگنال های سرعت و موقعیت و سیگنال کنترل را را همزمان مشاهده کنید. چنان که در شبیه سازی دیدیم آونگ پس از مدت معینی به نقطه تعادل پایدار خود باز می گردد و الگوریتم کنترلی به وضعیت crane control تغییر می یابد. در این حالت آونگ را با دست کمی حرکت دهید و رفتار سیستم حلقه بسته را مشاهده کنید.

۶. برای توقف آزمایش، روی دکمه Stop simulation کلیک کنید.

توجه: با فشردن دکمه اضطراری قرمز در هر لحظه می توان به آزمایش خاتمه داد. در صورت بروز رفتارهای غیر منتظره در سیستم، از این دکمه برای پایان دادن به آزمایش استفاده کنید.

توجه: با حفظ بلوک های درایور، sensors و Normalization می توانید سایر قسمتها را مطابق با الگوریتم مورد نظر خود تغییر دهید.

ضمیمه ۱:

Name	Description	Unit
m	Equivalent mass of cart and pendulum	0.872 [kg]
l	distance from axis of rotation to center of mass of system	0.011 [m]
f_c	dynamic cart friction coefficient	0.5 [Ns/m]
f_s	static friction of the cart	1.203 [N]
f_p	rotational friction coefficient	$6.65 \cdot 10^{-5}$ [Nms/rad]
J_p	moment of inertia of pendulum with respect to axis of rotation	0.00292 [kgm ²]
g	Gravity	9.81 [m/s ²]
p_1	control force to PWM signal ratio	9.4 [N]
p_2	control force to cart velocity ratio	-0.548 [Ns/m]
u_{\max}	maximum value of PWM signal	0.5
m_c	Equivalent cart mass	0.768 [kg]
m_{ps}	pole mass	0.038 [kg]
m_{pw}	load mass	0.014 [kg]
R_l	rail length	1.8 [m]
l_p	length of pole	0.5[m]
l_{po}	distance between centre of pole mass and rotation axis	0.107[m]
l_c	length of load	0.03 [m]
l_{pwo}	distance between centre of load mass and rotation axis	0.354 [m]
T	pendulum period	1.17 [s]
J	moment of inertia related to the mass centre	0.00282 [kg·m ²]

جدول (۱) پارامترهای سیستم آونگ معکوس