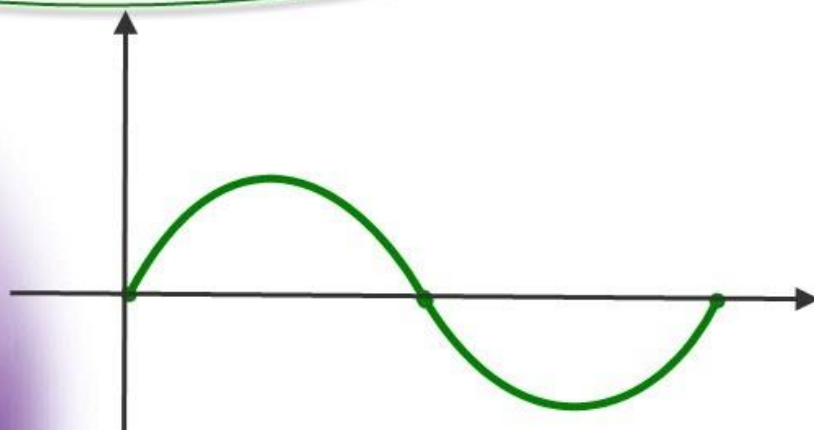


برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

موضوع پروژه:

# طراحی کنترلی مفصل روبات



برای خرید فایل word این پروژه [اینجا کلیک کنید](#).

( شماره پروژه = ۳۳۳ )

پشتیبانی: ۰۹۳۵۵۴۰۵۹۸۶

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

## چکیده

روباتیک دانشی به نسبت نوپا اما گسترده در علمی همچون مکانیک، برق، کامپیوتر و ... می باشد. در این پروژه پس از مقدمه ای درباره تاریخچه روبات و انواع آن، مباحثی همچون توصیف فضای کلی، سینماتیک مستقیم و معکوس، دینامیک روبات و روش های کنترل بازو و مفصل ارائه شده است. در آخر نیز به مبحث اصلی یعنی مدل سازی و کنترل مفصل یک روبات می پردازیم. این نوشتار ثمره مطالعه ی کتب مرجع در علم روباتیک و مقالات فراوانی در این باره است.



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

### فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
.....	مقدمه
.....	توصیف فضای کلی
.....	سینماتیک مستقیم و معکوس
.....	دینامیک روبات
.....	کنترل روبات
.....	مدلسازی و کنترل مفصل روبات
.....	پیوست
.....	منابع



WikiPower.ir

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

## مقدمه

در همه کاربردهای روباتیکی، برای به انجام رسیدن کارها در حالت کلی نیازمند اجرای حرکت معینی هستیم که به روبات دیکته شده است. اجرای دقیق چنین حرکتی به سیستم کنترلی برای رسیدن به حرکت مطلوب با ساختار و قوانین کنترلی واگذار می شود. کنترل حرکت (موقعیت)، آنالیز دقیقی از جزئیات ساختار مکانیکی روبات، محرکه ها و سیستم های قدرت و حسگرها را می طلبد. هدف چنین تحلیلی بدست آوردن مدل های ریاضی است که رابطه بین ورودی و خروجی اجزای روبات را مشخص می سازد. مدل سازی در واقع مقدمه ای است برای نیل به راهبرد کنترل حرکت، اما آشنایی با انواع روبات ها و اصطلاحات مربوط به آن ضروری می باشد.

## انواع روبات های صنعتی

روبات های صنعتی به دو گروه پایه متحرک (موبایل) و پایه ثابت (غیر موبایل) تقسیم می شوند. روبات های موبایل روبات هایی هستند که کل روبات توسط چرخ یا هر وسیله دیگری حابه جا می شوند. روبات ها غیر موبایل همواره یکی از قسمت های آن به زمین جوش یا پیچ می شود. اکثر روبات های کنونی به علت

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

آسانی ساخت ، ارزان بودن و کمبود دانش کافی به صورت پایه ثابت می باشند . پیش بینی می شود تا ۴۰ سال آینده تمامی روبات ها به صورت موبایل تولید شوند .

انواع روبات های صنعتی غیر موبایل

روبات ها بر اساس نوع سه مفصل اول ، به شش دسته تقسیم می شوند . البته ممکن است بعضی از روبات ها در هیچ یک از دسته ها قرار نگیرند . ما در این جا فقط معروف ترین دسته بندی را قرار دادیم .

#### ۱. بند بند ( **Articulated** )

روبات هایی که سه مفصل اول آن ، لولایی باشد و محور مفصل دوم و سوم موازی ، و عمود بر محور مفصل اول باشد را روبات بند بند گویند . پیکر بندی این نوع روبات بسیار شبیه دست انسان می باشد . در نتیجه دارای انعطاف بالایی در کار با اشیا و دستگاه ها می باشد . این روبات ها به علت درجه آزادی و انعطاف زیاد محبوبیت بسیاری یافتند .

#### ۲. اسکارا ( **SCARA** )

روبات هایی که دو مفصل اول ، لولایی و مفصل سوم کشویی باشد و محور سه مفصل اول ، موازی باشد را روبات اسکارا گویند . در واقع یک روبات ساده که می تواند کارهای مونتاژ درست و سریع انجام شده است . مزیت این روبات سرعت افقی آن می باشد .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

### ۳. مستطیلی ( Cartesian )

روبات هایی که سه مفصل اول آن ، کشویی باشد و محور سه مفصل اول دو به دو بر هم عمود باشند را روبات مستطیلی گویند که شبیه استفاده از دستگاه مختصات دکارتی است . مزیت این روبات ها این قدرت و تحلیل ساده ی آن می باشد .

### ۴. استوانه ای ( Cylindrical )

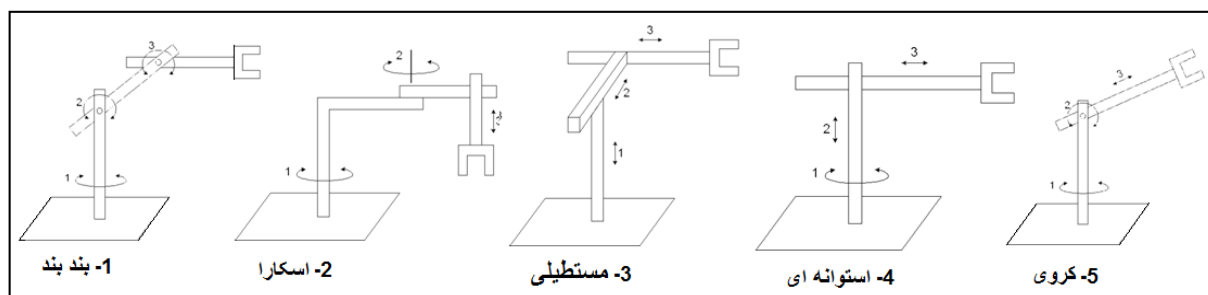
روبات هایی که مفصل اول آن لولایی و مفصل دوم و سوم آن کشویی باشد و محورهای مفاصل اول و دوم موازی و بر محور مفصل سوم عمود باشد را روبات استوانه ای گویند .

### ۵. کروی ( Spherical )

روباتی که مفصل اول و دوم آن لولایی و مفصل سوم آن کشویی باشد و محور مفصل اول بر محور مفصل دوم عمود باشد همچنین محور مفصل سوم بر محور مفصل دوم عمود باشد را روبات کروی گویند . دقت شود محور های مفاصل اول و سوم لزوما عمود نیستند .

امروزه بیشترین نوع به ترتیب مربوط به پوما ، اسکارا و مستطیلی می باشد .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۱-۱ انواع روبات

## اجزای روبات

### مجری نهایی

آخرین نقطه مکانیکی روبات که ابزار به آن بسته می شود یا برای گرفتن اجسام به کار می رود . سازندگان روبات معمولا مجری نهایی را طراحی نمی کنند . در اغلب موارد یک گیره ساده را تحویل می دهند . وظیفه مهندسین مشاور خریدار است که مجری نهایی را طراحی و نصب کنند و برای موقعیت مورد نظر به کار اندازند. انبر جوشکاری ، تفنگ رنگ پاشی ، ابزار چسب کاری از جمله مواردی هستند که توسط مجری نهایی نگه داشته می شود .

### محركه ها

محركه ها مانند ماهیچه های روبات هستند . از انواع متداول محركه ها می توان به سرو موتور ها ، موتور های پله ای ، سیلندر های بادی و روغنی نام برد.



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

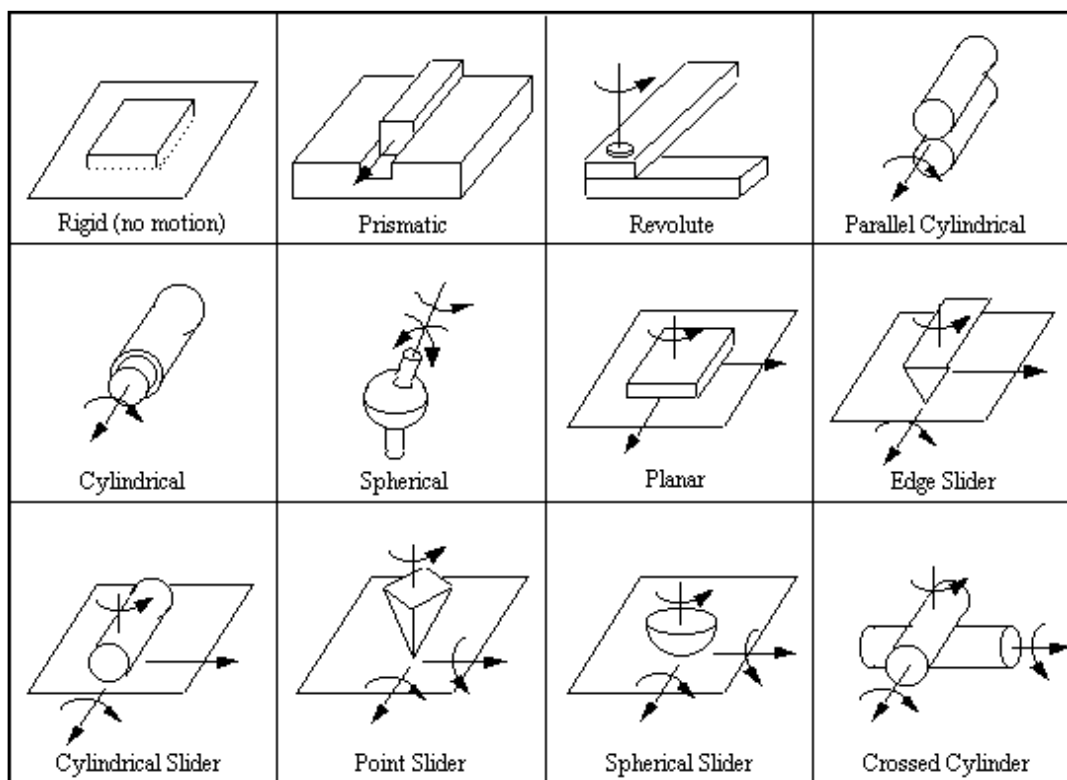
### مفاصل روبات ( joint )

بین هر دو رابط از روبات ، یک مفصل قرار دارد . مفاصل مختلفی در روبات به کار می رود از جمله می توان از مفاصل کشویی ، لولایی ، لغزشی ، کروی و ... نام برد . استفاده از مفاصل کروی در سیستم های مکانیکی کاربرد وسیعی دارد اما چون کنترل آن دشوار است در روباتیک کاربرد چندانی ندارد و جنبه تحقیقاتی دارد. اغلب مفاصلی روبات کشویی و لولایی هستند.

مفاصل کشویی ( منشوری ، طولی ، خطی ، Prismatic, Linear ) ، اجازه حرکت نسبی طولی بین دو رابط را می دهد یعنی حرکت خطی دارند و چرخش در آن ها وجود ندارد و در آن ها از محرکه های روغنی ، بادی یا الکتریکی استفاده می شود .

مفاصل لولایی ( چرخشی ، دورانی ، rotary, Revolute ) ، شبیه لولا است که اجازه چرخش نسبی بین دو رابط را می دهد . یعنی حرکت چرخشی دارند . استفاده از محرکه های بادی و روغنی در آن ها متداول است اما اغلب از محرکه های الکتریکی از نوع موتور های پله ای یا سرو موتور استفاده می شود .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

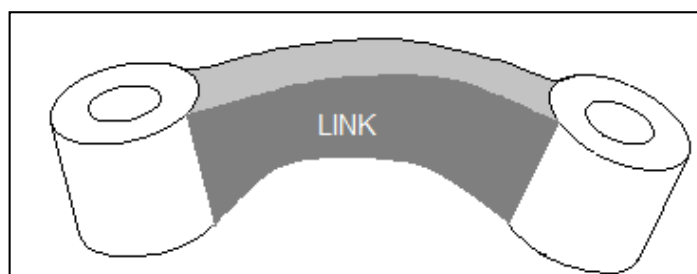


شکل ۱-۲ انواع مفصل

رابط (link)

رابط یک جسم مکانیکی صلب است که دو مفصل را به یکدیگر وصل می نماید. البته رابط آخر روبات ممکن

است فقط به یک مفصل متصل شده باشد.



شکل ۱-۳ رابط

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

درجه حرکت ( **DOM = Degree Of Mobility** )

تعداد مفاصل ، درجه حرکت را مشخص می کند .

درجه آزادی ( **DOF = Degree Of Freedom** )

درجات آزادی به معنای حداقل تعداد مختص لازم برای مشخص کردن وضعیت جسم است به عبارت دیگر جسم دارای  $n$  درجه آزادی است، اگر مشخصات کامل موقعیت آن را بتوان با  $n$  پارامتر تعیین کرد در صورتی که  $n$  حداقل مشخصات بکار رفته باشد. برای دسترسی به هر نقطه در صفحه به دو درجه آزادی و برای دسترسی به هر نقطه در فضا به سه درجه آزادی نیازمندیم همچنین برای جهت گیری ابزار در صفحه به یک درجه آزادی و برای جهت گیری ابزار در فضا به سه درجه آزادی دیگر نیاز مندیم . بنابراین برای یک جسم صلب در صفحه سه درجه آزادی دارد و در فضا ۶ درجه آزادی دارد . یعنی نمی توان بیش از ۶ درجه آزادی برای یک جسم یک جسم صلب متصور شد.

درجه آزادی یک روبات را ابزار انتهای روبات مشخص می کنند بنابراین وقتی می گوئیم یک روبات دارای ۴ درجه آزادی است یعنی ابزار انتهایی روبات ۴ درجه آزادی دارد . روبات اسکارا معمولا ۴ درجه آزادی و روبات چرخان معمولا ۶ درجه آزادی و روبات مستطیلی معمولا ۳ درجه آزادی دارند .

فضای کار قابل دسترسی

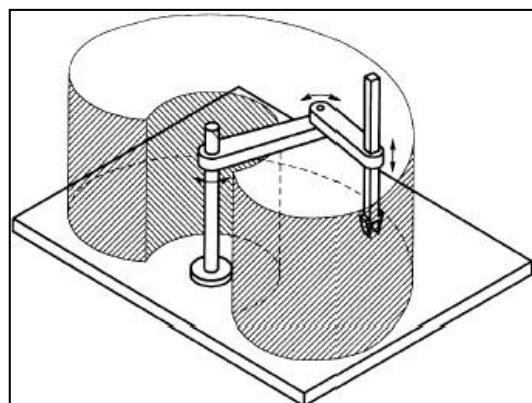
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

به مجموعه نقاطی که مجری نهایی می تواند در آن قرار گیرد فضای کار قابل دسترسی گویند. در شکل ۱-۴ فضای کار قابل دسترسی یک ربات اسکارا نشان داده شده است.

فضای کار ماهر

به مجموعه نقاطی که مجری نهایی می تواند به جهت گیری کامل در آن قرار گیرد فضای کار ماهر گویند.

\* همواره فضای کار ماهر زیر مجموعه ی فضای کار قابل دسترسی می باشد.



شکل ۱-۴ فضای کار قابل دسترسی

مدل سازی

تحلیل سینماتیکی ساختار مکانیکی یک روبات را می توان تشریح حرکت آن نسبت به مرجع ثابت (یا متحرک) بدون در نظر گرفتن تاثیر نیرو و گشتاورها تعریف نمود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

مفید خواهد بود که تمایزی بین سینماتیک مستقیم و مشتق آن قائل باشیم. در بازوی ماهر روباتیک، سینماتیک، تحلیل رابطه بین موقعیت مفاصل و مجری نهایی را مشخص می سازد. مشتق سینماتیکی در واقع رابطه بین حرکت مجری نهایی و مفاصل را در قالب سرعت و ژاکوبین بازوی ماهر تبیین می کند.

در فرموله کردن روابط سینماتیکی، نیازمند مطالعه دو نوع از مسائل هستیم که به ترتیب، مسائل سینماتیک مستقیم و سینماتیک معکوس می باشند. مورد اول در ارتباط با تشریح حرکت مجری نهایی به عنوان تابعی از حرکت مفاصل به وسیله محاسباتی در قالب جبرخطی است. در مورد دوم ابتدا حرکت مطلوبی را برای مجرد نهایی در فضای کار در نظر گرفته، سپس موقعیت و حرکت مفصلی بر مبنای آن محاسبه می کنیم، که عنوان سینماتیک معکوس هم به همین دلیل به آن اطلاق می شود.

داشتن مدل سینماتیکی روبات همچنین برای تعیین روابط بین نیروها و گشتاورهایی که به مفاصل اعمال می شود و نیز نیروهای وارده به مجری نهایی در حالت تعادل استاتیکی مورد استفاده است.

سینماتیک بازوی ماهر در واقع راهی برای دست یابی به دینامیک مدل ارائه شده است. دستیابی به مدل دینامیکی روبات، در طراحی ساختار مکانیکی، انتخاب سیستم های محرکه، تعیین رابرد کنترلی و شبیه سازی کامپیوتری بسیار حائز اهمیت است و در حال حاضر نیز در این زمینه تحقیقات گسترده صورت می گیرد.

مدل کردن روبات های متحرک در ابتدا با در نظر گرفتن قیود حرکت در مدل سینماتیکی و دینامیکی صورت می گیرد که در ادامه روندی مشابه با آنچه گفته شد اعمال می شود.

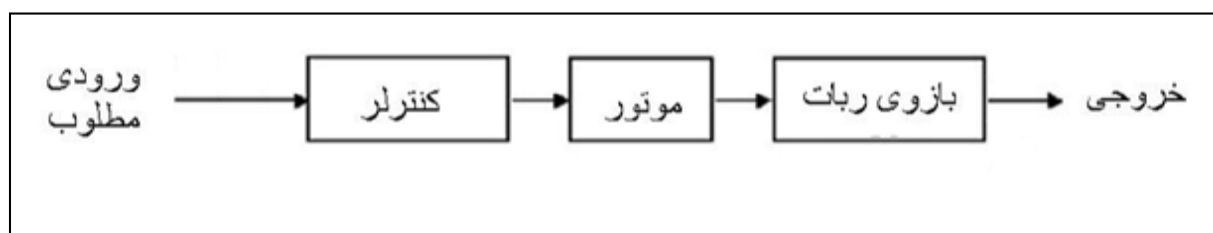
کنترل

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

تحقق حرکت های مشخص که ما خواستار آن هستیم به وسیله قوانین کنترلی، نیازمند به کارگیری محرکه ها و حسگر هاست. مسیر مطلوب به عنوان ورودی سیستم کنترلی حرکت در ساختار مکانیکی در نظر گرفته می شود. مسئله کنترل بازوی ماهر روبات، یافتن رفتار زمانی نیرو و گشتاور هاست که توسط محرکه های مفاصل اعمال می شود، تا مسیر مورد نظر طی شود. این مسئله تقریباً پیچیدگی بالایی دارد، زیرا بازوی ماهر روباتیک ساختار مکانیکی پیچیده ای دارد و حرکت هر عضو آن منجر به تاثیر روی سایر حرکات در سایر مفاصل و مجری نهایی است.

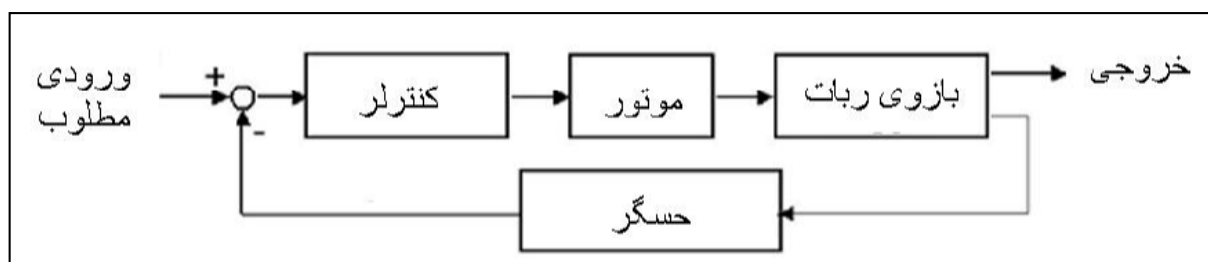
معادلات بازوی ماهر روباتیک به صورت غیر مستقل و وابسته، غیر خطی و دارای پیچیدگی بسیاری است. لذا جهت پایداری و اجرای عملیات مطلوب در سیستم نیازمند دانش کنترلی و تکنیک های خاص مربوط به آن است تا خطا برای رسیدن به جواب مطلوب کاهش می یابد. کنترلر ها به دو صورت حلقه باز و حلقه بسته موجود اند. منظور از کنترل حلقه باز این است که ورودی از خروجی تاثیر نگیرد و منظور از کنترل حلقه بسته تاثیر پذیرفتن ورودی از خروجی است.

در واقع مفهوم سیستم پسخور در کنترل حلقه بسته یعنی اینکه در هر لحظه ما از خروجی سیستم پاسخی می گیریم و به ورودی می دهیم تا ورودی هر لحظه خود را تطبیق دهد و به هدف مورد نظر نزدیک تر شود. این پاسخ در یافتی از خروجی با حسگرها امکان پذیر است.



شکل ۱-۵ کنترل حلقه باز

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۱-۶ کنترل حلقه بسته

هر دو روش مزایا و مشکلاتی دارد مزیت کنترل حلقه باز ، هزینه کمتر و ساخت راحت تر می باشد و مزیت کنترل حلقه بسته دقت آن است مشکل اصلی کنترل حلقه باز این است که اگر در ورودی سیستم اغتشاش ایجاد شود این اغتشاش در خروجی کاملا ظاهر می شود و مشکل کنترل حلقه بسته هزینه ی بالای آن است . کنترل حلقه بسته را می توان به صورت های مشتقی یا انتگرالی یا تناسبی یا ترکیب هایی از آن ساخت . مثلا برای تنظیم سرعت روبات می توان از مسافت پیموده شده (انتگرالی) یا سرعت کنونی روبات (تناسبی) یا شتاب روبات (مشتقی) و یا ترکیب آن استفاده نمود البته نمی توان گفت کنترل حلقه بسته همیشه دقت بیشتری دارد حتی ممکن است در مواردی باعث ناپایدار شدن سیستم گردد .

جهت طراحی کنترلر ما نیاز به مدل سازی داریم . علت خطای روبات نیز دقیق نبودن مدل سازی ها و خطی سازی معادلات غیر خطی می باشد . اگر چه سیستم های کنترل مبتنی بر مدل های خطی تقریبی، در روبات های صنعتی امروز معمول اند، ولی در ترکیب الگوریتم های کنترل، لازم است دینامیک غیر خطی بازوهای مکانیکی ماهر به طور کامل بررسی شود. بعضی از روبات های صنعتی که در حال حاضر عرضه می شوند، در کنترل کننده های خود از الگوریتم های غیر خطی استفاده می کنند که عمل کرد بهتری نسبت به روش های خطی دارد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

بر پایه مطالبی که تا کنون مطالعه کرده ایم، می توانیم مکانهای مفصلی متناظر با حرکتهای مورد نظر مجری نهایی در فضا را در طول زمان محاسبه کنیم. در این فصل، درباره چگونگی وادار کردن بازو به انجام حرکت مورد نظر، بحث می کنیم.

روشهای کنترل مورد بحث در این فصل، روشهای کنترل خطی اند. کاربرد این روشها تنها برای سیستمهایی معتبر است که مدل ریاضی آنها با معادل های دیفرانسیل خطی بیان شود. این روشهای خطی برای کنترل بازوهای مکانیکی ماهر، تقریبی اند، زیرا به طوری که در فصل ۶ دیدیم، دینامیک این بازوها معمولاً با معادله های دیفرانسیل غیر خطی بهتر نمایش داده می شود. اما چنانکه خواهیم دید، این تقریبها غالباً معقول اند، و روشهای کنترل خطی معمولترین روشهای به کار رفته در صنعت امروز به شمار می روند.

بازوی مکانیکی ماهر را به صورت مکانیزمی که هر مفصل آن مجهز به حساسه هایی برای اندازه گیری زاویه مفصلی، و کارانداز برای اعمال گشتاور به رابط همسایه (رابط بالاتر بعدی) است، مدلسازی می کنیم. اگر چه حساسه ها را می توان در نقاط دیگری نیز قرار داد، اما در بیشتر بازوهای مکانیکی ماهر، آنها را در مفصلها در نظر می گیرند.



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

گاهی در مفصلها از حساسه های سرعت ( دورسنج ) نیز استفاده می شود. در روباتهای صنعتی، روشهای کاراندازی و انتقال قدرت گوناگونی به کار می رود، اما بسیاری از آنها را می توان با فرض وجود یک کاراندازی در هر مفصل، مدلسازی کرد.

چون خواهیم مفصلهای بازو مسیرهای از پیش تعیین شده ای را دنبال کنند، و از طرفی کاراندازهای روبات نیز بر حسب گشتاور فرمان می گیرند، باید از نوعی سیستم کنترل برای محاسبه فرمانهای مناسب به کاراندازها، استفاده کرد تا حرکت مورد نظر در مفصل ایجاد گردد. تقریباً در کلیظ موارد، این گشتاورها، توسط پسخوراند از حساسه های مفصلی محاسبه می شوند.

در حالت کلیف تنها راه ساختن سیستم کنترلی با عملکرد خوب، گرفتن پسخوراند از حساسه های مفصلها (به صورت نشان داده شده در شکل ۱-۹) است. معمولاً این پسخوراند برای محاسبه خطای سرو از طریق یافتن اختلاف بین مکان مورد نظر و مکان واقعی، و نیز بین سرعت مورد نظر و سرعت واقعی، به کار می رود. سپس سیستم کنترل می تواند گشتاور لازم برای ارسال به کاراندازها را به صورت تابعی از خطای سرو، محاسبه کند. در اینجا ایده اصلی، محاسبه گشتاورهای کارانداز لازم به گونه ای است که خطاهای سرو کاهش یابند. سیستم کنترل را که در آن از پسخوراند استفاده می شود، سیستم مدار بسته می خوانند. \*\*\*»مدار بسته» تشکیل شده و به وسیله سیستم کنترل در پیرامون روبات، به خوبی نمایان است.

مسئله اساسی در طراحی هر سیستم کنترل، حصول اطمینان از عملکرد سیستم مدار بسته، طبق مشخصات فنی معین است. اصلیتترین این معیارها، پایداری سیستم است. از نظر ما، سیستمی پایدار است که در آن خطاها در هنگام اجرای مسیرهای گوناگون «کوچک» باقی بمانند، حتی اگر اغتشاشهایی در حد «متوسط» موجود باشند.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

باید توجه داشت که اگر سیستم کنترل درست طراحی نشود، عملکرد آن گاهی ناپایدار می شود، و د نتیجه خطاهای سرو به جای کاهش، افزایش می یابند. به همین دلیل، نخستین وظیفه مهندس کنترل، آن است که ثابت کند عملکرد مدار بسته سیستم، رضایتبخش است. در عمل، این «اثبات» می تواند از طریق انجام محاسبات ریاضی متکی بر فرض ها و مدل هایی معین، و یا با استفاده از نتایج تجربی حاصل از شبیه سازی آزمایش، انجام پذیرد.

تقسیم قانون کنترل

به منظور آماده شدن برای سیستمهای پیچیده تر، در اینجا ساختار کنترل کننده متفاوتی را برای معادله مرتبه دوم زیر بررسی خواهیم کرد. برای انجام این کار، کنترل کننده را به دو قسمت وابسته به مدل و سرو تقسیم می کنیم. بر اثر این اقدام، پارامترهای سیستم (در این مورد  $k, b, m$ ) تنها در قسمت وابسته به مدل ظاهر، و قسمت سرو از این پارامتر مستقل می شود. متمایز کردن این دو قسمت ممکن است در حال حاضر با اهمیت به نظر نرسد، اما پس از آنکه در فصل ۱۰، سیستمهای غیرخطی را بررسی کردیم، اهمیت آن آشکار خواهد شد. این رهیافت تقسیم قانون کنترل را در سراسر کتاب به کار خواهیم برد.

می خواهیم کنترل کننده این سیستم را به دو قسمت تجزیه کنیم. در این مورد خاص، قسمت وابسته به مدل قانون کنترل، از اطلاعات موجود درباره  $k, b, m$  استفاده می کند. این قسمت از قانون کنترل، طوری تنظیم می شود که سیستم را کاهش دهد تا به صورت جرم واحدی به نظر رسد. این مطلب در مثال بعدی روشن خواهد شد. قسمت دوم قانون کنترل، از پسخوراندن به منظور بهبود رفتار سیستم استفاده می کند. چون قسمت وابسته به مدل قانون کنترل، سیستم را به صورت جرم واحد جلوه می دهد، طراحی قسمت سرو بسیار ساده

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

خواهد شد، زیرا بهره های آن طوری انتخاب می شوند که تنها برای کنترل سیستم با جرم واحد (بدون اصطکاک و بدون سختی) مناسب باشند.

قسمت وابسته به مدل کنترل، در قانون کنترل به شکل زیر ظاهر می شود

که در آن  $\omega$  و  $\omega^*$  تابعها یا مقادیری ثابت اند و طوری انتخاب می شوند که اگر  $\omega^*$  به عنوان ورودی جدید به سیستم در نظر گرفته شود، سیستم به صورت جرمی واحد به نظر برسد. معادله سیستم (که از ترکیب  $\omega$  و  $\omega^*$  حاصل می شود)، در این ساختار از قانون کنترل، چنین خواهد بود

روشن است که اگر بخواهیم سیستم از دید ورودی، به صورت جرم واحد به نظر برسد، برای این سیستم

خاص، باید  $\omega$  و  $\omega^*$  را چنین انتخاب کنیم با جایگزینی این مقادیر در  $\omega$  و  $\omega^*$ ، معادله سیستم چنین به دست می آید  
این معادله، معادله حرکت جرم واحد است. حال معادله  $\omega$  و  $\omega^*$  را به صورت معادله دینامیکی مدار باز سیستمی که باید کنترل شود، در نظر می گیریم. برای این کار، قانون کنترل زیر را برای محاسبه  $\omega$  (مانند آنچه قبلاً انجام دادیم)، می نویسیم از ترکیب این قانون کنترل با  $\omega$  و  $\omega^*$  نتیجه می شود با کاربرد این روش تنظیم بهره ها ساده است، و این بهره ها از پارامترهای سیستم منتقل اند. در نتیجه، برای حالت میرایی بحرانی می توان نوشت  $\omega$  و  $\omega^*$ ، نمودار بلوکی کنترل کننده تقسیم شده را که برای کنترل سیستم  $\omega$  و  $\omega^*$  به کار گرفته شده است، نشان می دهد.

کنترل تعقیب مسیر

در اینجا می خواهیم کنترل کننده خود را پیشرفت دهیم به طوری که به جای نگه داشتن جسم در محل مورد

نظر، آن را به دنبال کردن مسیر مورد نظر وارد کند. این مسیر، به صورت تابعی از زمان،  $\omega$  و  $\omega^*$  که مجموعه مکانهای

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

مورد نظر جسم را مشخص می سازد، بیان می شود. فرض می کنیم مسیر مورد نظر هموار است (یعنی دو مشتق اول  $**$  وجود دارند)، و همچنان مولد مسیر، مقادیر  $**$  را در هر زمان  $**$  به دست می دهد. خطای سرو بین مسیر مورد نظر و مسیر واقعی را به صورت  $**$  تعریف می کنیم. قانون کنترل سرویی که می تواند تعقیب مسیر را باعث می شود، چنین است  $**$  مشاهده می شود که ترکیب رابطه  $**$  با معادله حرکت جرم واحد  $**$  انتخاب مناسبی است. با ترکیب این دو معادله نتیجه می شود

چون این معادله، یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم با ضرایب قابل انتخاب است، می توانیم هر پاسخ دلخواهی را برای آن در نظر بگیریم (معمولاً میرایی بحرانی در نظر گرفته می شود). گاهی اوقات این معادله را نوشته شده در فضای خطا می نامند، زیرا سیر تکاملی خطاها را نسبت به مسیر مورد نظر، مشخص می کند.  $**$  نمودار بلوکی این کنترل کننده تعقیب مسیر را نشان می دهد.

اگر مدل ما کامل باشد (یعنی  $k, b, m$  را بدانیم)، و اگر نویز و خطای اولیه ای وجود نداشته باشد، آن گاه جسم دقیقاً مسیر مورد نظر را دنبال خواهد کرد. در صورت وجود خطای اولیه، بر طبق رابطه  $**$  بر آن غلبه خواهد شد و پس از آن، سیستم مسیر را دقیقاً دنبال خواهد کرد.

خطای حالت پایا

ابتدا ساده ترین نوع اغتشاش، یعنی حالتی را که  $**$  برابر با عددی ثابت است، در نظر می گیریم. در این حالت، می توانیم تحلیل حالت پایا انجام دهیم. این عمل را با تحلیل سیستم در حال سکون (که در آن مشتقهای کلیه متغیرهای سیستم صفرند)، انجام خواهید داد. با صفر قرار دادن مشتقها در  $**$ ، معادله حالت پایا چنین به

دست می آید

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

مقدار  $e$  به دست آمده از رابطه  $**$  ، برابر با خطای حالت پایاست. بدین ترتیب، دیده می شود که هر چه بهره مکان  $**$  بزرگتر باشد، خطای حالت پایا کوچکتر خواهد بود.

افزودن جمله انتگرالی

به منظور حذف خطای حالت پایا، گاهی از یک قانون کنترل اصلاح شده استفاده می شود. حالت اصلاح شده با افزودن یک جمله انتگرالی به قانون کنترل، به دست می آید. در نتیجه قانون کنترل به صورت زیر نوشته می شود

و معادله خطا چنین به دست می آید

جمله انتگرالی به گونه ای اضافه می شود که خطای حالت پایای سیستم در هنگام وجود اغتشاش ثابت، صفر شود. اگر  $**$  ، آن گاه می توان برای  $**$  ، معادله  $**$  را چنین نوشت

که در حالات پایا ( برای اغتشاش ثابت) به شکل زیر در می آید  
 حل معادله های سیستمهایی که پارامترهای آنها با زمان تغییر می کنند، یا سیستمهایی که ذاتاً غیرخطی اند، دشوار تر است.

اگر خواص غیر خطی ر سیستم شدید نباشند، می توان از خطی سازی موضعی برای به دست آوردن مدل های خطی، که تقریبهایی از معادلات غیرخطی در همسایگی یک نقطه عمل هستند، استفاده کرد. متأسفانه این رهیافت، برای کنترل بازوهای مکانیکی ماهر مناسب نیست، زیرا این بازوها پیوسته در نواحی جداگانه فضای کاری خود در حال حرکت اند، به طوری که هیچ خطی سازی معتبری را برای کلیه نواحی فوق نمی توان یافت.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

آن مستقیماً معادله های دیفرانسیل غیرخطی حرکت را، بدون تکیه بر خطی سازی، در کنترل کننده به کار خواهیم گرفت.

اگر فنر سیستم **\*\*\*** خطی نبوده، عامل غیر خطی داشته باشد، می توان سیستم را شبه استاتیکی در نظر بگیریم و در هر لحظه محل قطبهای آن را تعیین کنیم. با انجام این عمل، می بینیم که قطبها در صفحه مختلط، به صورت تابعی از مکان جسم، «حرکت» می کنند. بدین ترتیب، نمی توان بهره های ثابتی برای قرار دادن قطبها در وضعیت مورد نظر (مثلاً میرایی بحرانی)، به دست آورد. به همین دلیل، قانون کنترل پیچیده تری را مورد توجه قرار می دهیم که در آن بهره ها متغیر با زمان باشند، به گونه ای که سیستم همواره در حالت میرایی بحرانی قرار گیرد (بهره ها در واقع تابعی از مکان جسم اند). در این قانون کنترل، محاسبه **\*\*\*** طوری انجام می شود که عامل غیرخطی فنر، به وسیله عبارتی غیرخطی در قانون کنترل را می توان قانون کنترل خطی کننده نامید، زیرا در آن از عبارت کنترلی غیرخطی برای «خنثی کردن» عامل غیرخطی در سیستم، به طوری که سیستم مدار بسته در حالت کلی خطی باشد، استفاده شده است.

حال به قانون کنترل تقسیم شده (که در فصل ۸ به آن اشاره شد) باز می گردیم، و خواهیم دید که این قانون می تواند تابع خطی کننده مورد نظر ما را فراهم سازد. در اینجا در روش کنترل تقسیم شده، قانون سرو همانند قبل باقی می ماند، اما قسمت وابسته به مدل، بهمدلی غیرخطی تبدیل می شود. بدین ترتیب، قسمت وابسته به مدل کنترل، شامل تابعی خطی کننده خواهد بود.

سینماتیک مستقیم و معکوس

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

سینماتیک علم حرکت است که حرکت را بدون در نظر گرفتن نیروهای ایجادکننده آن مطالعه می کند. در محدوده علم سینماتیک، مکان، سرعت، شتاب و همة مشتقهای مرتبه بالاتر از متغیرهای مکان (نسبت به زمان یا هر متغیر یا متغیرهای دیگر) بررسی می شود. بدین ترتیب، سینماتیک بازوهای مکانیکی ماهر همة ویژگیهای هندسی و وابسته به زمان حرکت را در برمی گیرد.

در این فصل، مکان و جتگیری میله بندیهای بازوی مکانیکی ماهر را در وضعیتهای استاتیکی بررسی می کنیم. به منظور ساده تر کردن مطالعه بازوهای مکانیکی ماهر که هندسه پیچیده ای دارند، به قسمتهای مختلف آنها چهارچوبهایی را متصل می کنیم و سپس رابطه بین این چهارچوبها را به دست می آوریم.

هر بازوی مکانیکی ماهر را می توان به صورت مجموعه ای از اجسام صلب در نظر گرفت که به وسیله مفصل به یکدیگر اتصال یافته اند. این اجسام را رابط می نامند. مفصل دو رابط مجاور را به هم متصل می سازد. اصطلاح اتصال لغزشی برای توصیف اتصال بین دو جسم که حرکت نسبی آنها به صورت لغزش دو سطح بر روی یکدیگر است، به کار می رود. بنابر ملاحظات طراحی، بازوهای مکانیکی ماهر در حالت کلی از مفصلهایی با تنها یک درجه آزادی تشکیل می شوند. بیشتر بازوهای مکانیکی ماهر دارای مفصلهای لولایی (دورانی) یا مفصلهای لغزشی (کشویی) اند. در موارد نادر که ممکن است مکانیزمی مفصلی با  $n$  درجه آزادی داشته باشد می توان آن را به صورت  $n$  مفصل با یک درجه آزادی که به وسیله  $n-1$  رابط با طول صفر به یکدیگر پیوند یافته اند، مدلسازی کرد.

توصیف رابط و اتصال

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

هر رابط تنها به صورت جسمی صلب که رابطه بین دو محور مفصلی همسایه را در یک بازوی مکانیکی ماهر توصیف می کند، در نظر گرفته خواهد شد. محورهای مفصلی در فضا به وسیله خطوط تعریف می شوند. محور مفصلی  $i$  به وسیله خطی در فضا، یا یک بردار تعریف می شود که رابط  $i$  حول آن، نسبت به  $i-1$ ، دوران می کند. در فضای سه بعدی، همواره می توان فاصله بین هر دو محور را به روشنی تعریف کرد. این فاصله در راستای خطی که بر هر دو محور عمود است (عمود مشترک)، اندازه گیری می شود. این عمود مشترک همواره وجود دارد و بجز در حالتی که دو محور موازی اند، یکتاست. ( شکل )

دومین پارامتر لازم برای تعریف مکان نسبی دو محور مفصلی، زاویه پیش رابط است. در صورتی که صفحه ای را بر عمود مشترک دو محور، عمود کنیم و دو محور  $i-1$  و  $i$  را بر روی این صفحه تصویر کنیم، آن گاه زاویه بین دو محور از محور  $i-1$  به طرف محور  $i$ ، حول  $a_{i-1}$  را زاویه پیش رابط می نامیم. ( شکل )

یکی از پارامترهای اتصال رابطها، فاصله بین دو رابط در راستای این محور مشترک است که انحراف رابط نامیده می شود. انحراف محور مفصلی  $i$  را با  $d_i$  نشان می دهند. پارامتر بعدی، مقدار زاویه دوران حول این محور مشترک را بین یک رابط و رابط همسایه آن توصیف می کند. این پارامتر را زاویه مفصلی می نامند و آن را با  $\theta_{i-1}$  نشان می دهند. ( شکل )

قرارداد برای اتصال چهارچوبها به رابطها

به منظور تعریف مکان هر رابط نسبت به رابطهای مجاور آن، به هر رابط، چهارچوبی متصل خواهیم کرد. چهارچوبهای رابطها، همانند خود آنها شماره گذاری می شوند، یعنی چهارچوب  $\{i\}$  به طور صلب به رابط  $i$  متصل شده است.



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در زیر، خلاصه ای از دستور العمل اتصال چهارچوب به رابط، در حالت کلی ذکر می شود.

۱- محورهای مفصلی را شناسایی کرده و آنها را به صورت خطوط نامتناهی امتداد می دهیم.

۲- عمود مشترک، یا نقطه تقاطع دو محور فوق را تعیین می کنیم. مبدأ چهارچوب متصل به رابط را در نقطه

تقاطع دو محور، یا در نقطه تقاطع عمود مشترک و محور  $Z_i$  در نظر می گیریم.

۳- محور  $Z_i$  را در راستای حوز مفصلی  $Z_i$  قرار می دهیم.

۴. محور  $X_i$  را در راستای عمود مشترک در نظر می گیریم، یا اگر محورهای مفصلی یکدیگر را قطع می کنند،

$X_i$  را عمود بر صفحه گذرنده از دو محور فرض می کنیم.

۵. محور  $Y_i$  را طوری اختیار می کنیم که دستگاه مختصات راستگردی تشکیل شود.

۶. چهارچوب  $\{0\}$  را طوری اختیار می کنیم که به ازای صفر شدن اولین متغیر مفصلی، بر چهارچوب  $\{1\}$

منطبق می شود. مبدأ  $\{N\}$  و جهت  $X_N$  را به اختیار در نظر می گیریم، اما در حالت کلی سعی می کنیم این

دو را طوری انتخاب کنیم که تعداد هرچه بیشتری از پارامترهای میله بندی صفر شود.

#### پارامترهای رابط

در صورتی که چهارچوب مطابق قرارداد فوق به رابطها متصل شوند پارامترهای رابط به صورت زیر تعریف می

شوند.

$a_i$  = فاصله بین  $Z_i$  و  $Z_{i+1}$  اندازه گیری شده در راستای  $X_i$

$\alpha_i$  = زاویه بین  $Z_i$  و  $Z_{i+1}$  اندازه گیری شده حول  $X_i$

$d_i$  = فاصله بین  $X_{i-1}$  و  $X_i$  اندازه گیری شده در راستای  $Z_i$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$\theta_i =$  زاویه بین  $X_i$  و  $X_{i-1}$  اندازه گیری شده حول  $Z_i$

محاسبه تبدیل هر رابط

بعد از این که تمام پارامترهای مورد نیاز را بدست آوردیم، می خواهیم تبدیلی که چهارچوب  $\{i\}$  را نسبت به چهارچوب  $\{i-1\}$  تعریف می کند را تعیین کنیم. در حالت کلی این تبدیل تابعی از چهار پارامتر رابط خواهد بود. اما این تبدیل کلی روباتی مفروض، تابعی از تنها یک متغیر است، زیرا سه پارامتر دیگر در هنگام طراحی روبات تعیین می شوند. به طور خلاصه تبدیلی که چهارچوب  $\{i\}$  را نسبت به چهارچوب  $\{i-1\}$  تعریف می کند به صورت زیر است :

(۱-۴)

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & a_{i-1} \\ \sin(\theta_i)\cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1})d_i \\ \sin(\theta_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & \sin(\alpha_{i-1})d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

پس از آن که ماتریس تبدیل برای هر رابط را محاسبه کردیم به وسیله ضرب ماتریسهای تبدیل در یکدیگر،

می توان ماتریس تبدیل کلی از چهارچوب  $\{N\}$  به چهارچوب  $\{0\}$  را بدست آورد. (رابطه )

(۲-۴)

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

## دینامیک

در این فصل از مسائل مکانی استاتیکی فراتر خواهیم رفت و به بررسی مفاهیمی همچون سرعت خطی و زاویه ای، نیروی وارد بر روبات و... به صورت خلاصه می پردازیم. در آخر نیز مدل ریاضیاتی یک روبات با دو مفصل را با استفاده از مطالب بدسب آمده در این فصل و فصل های گذشته بدست می آوریم.

### سرعت خطی و زاویه ای

چهارچوب {B} را متصل به جسم صلب فرض کنید. می خواهیم حرکت  ${}^B Q$  را نسبت به چهارچوب {A} مانند شکل \*\*\*\* توصیف کنیم.

بدست آوردن سرعت خطی بسیار ساده است، کافی است هر دو مولفه سرعت را برحسب {A} بیان نماییم و آنها را با هم جمع کنیم.

$${}^A V_Q = {}^A V_{Borg} + {}^A R {}^B V_Q \quad (1-4)$$

برای محاسبه سرعت زاویه ای فرض کنید  ${}^B Q$  در چهارچوب {B} ثابت است و با سرعت زاویه ای  ${}^A \Omega_B$  نسبت

به چهارچوب {A} دوران می کند. با کمی دقت می توان سرعت زاویه ای را به صورت زیر بیان کرد :

$${}^A V_Q = {}^A \Omega_B \times {}^A Q \quad (2-4)$$

برای سرعت خطی و زاویه ای به طور همزمان داریم :

$${}^A V_Q = {}^A V_{Borg} + {}^A R {}^B V_Q + {}^A \Omega_B \times {}^A Q \quad (3-4)$$

حرکت رابط های روبات

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در این قسمت فقط به بیان روابط بسنده می کنیم و خواننده می تواند برای اطلاع بیشتر به مراجع [1,4] مراجعه کند. در هر لحظه هر رابط روبات یک سرعت خطی و یک سرعت زاویه ای دارد که در روابط زیر  $V_i$  سرعت خطی مبدا چهار چوب رابط  $\{i\}$  و  $\omega_i$  سرعت زاویه ای این چهار چوب است.

سرعت خطی رابط  $i+1$  توصیف شده در چهار چوب  $\{i+1\}$  :

$${}^{i+1}\dot{V}_{i+1} = {}^{i+1}R({}^i\dot{V}_i + {}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1}) + \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (4-4)$$

سرعت زاویه ای رابط  $i+1$  توصیف شده در چهار چوب  $\{i+1\}$  :

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R {}^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (5-4)$$

$\dot{d}_{i+1}$  = سرعت در امتداد محور Z ( اگر مفصل کشویی باشد )

${}^iP_{i+1}$  = برداری که مبدا چهار چوب  $i$  را به مبدا چهار چوب  $i+1$  وصل می کند.

$$\dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_{i+1} \end{bmatrix}$$

شتاب خطی رابط  $i+1$  توصیف شده در چهار چوب  $\{i+1\}$  :

$${}^{i+1}\ddot{V}_{i+1} = {}^{i+1}R({}^i\ddot{V}_i + {}^i\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1})) + 2 {}^i\omega_i \times \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} + \ddot{d}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (6-4)$$

شتاب زاویه ای رابط  $i+1$  توصیف شده در چهار چوب  $\{i+1\}$  :

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R {}^i\dot{\omega}_i + {}^{i+1}R {}^i\dot{\omega}_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (7-4)$$

معادله نیوتن-معادله اویلر

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

هر رابط از بازوی مکانیکی ماهر را جسمی صلب در نظر خواهیم گرفت. اگر مکان مرکز جرم و تانسور لختی رابط معلوم باشد، آنگاه چگونگی توزیع جرم در آن کاملاً مشخص می شود. برای حرکت دادن رابطها، باید به آنها شتاب (افزاینده یا کاهنده) بدهیم. نیروهای لازم برای چنین حرکتی، تابعی از شتاب مورد نظر، و توزیع جرم در رابطهاست. معادله نیوتن همراه با همتای دورانی آن معادله اویلر، رابطه بین نیروها، لنگرهای لختی و شتابها را در یک جسم صلب، بیان می کنند.

#### معادله نیوتن

جسمی صلب که مرکز جرم آن با شتاب افزایش یافته  $v_c$  در حرکت است، در نظر بگیرید. در چنین حالتی، نیروی  $F$ ، که به مرکز جرم جسم وارد می شود، از معادله نیوتن به دست می آید که در آن  $m$  جرم کل است.

$$F = m\dot{v}_c \quad (۸-۴)$$

#### معادله اویلر

جسمی صلب که با سرعت زاویه ای  $\omega$  و شتاب زاویه ای  $\dot{\omega}$  دوران می کند، در نظر بگیرید. در این حالت، گشتاور  $N$  که باید بر جسم وارد شود تا چنین حرکتی را ایجاد کند، از معادله اویلر به دست می آید که در آن  $I^c$  تانسور لختی جسم نسبت به چهارچوب  $\{C\}$  است، که مبدأ آن بر مرکز جسم قرار دارد. وبا یک ماتریس  $3 \times 3$  بیان می شود.

$$N = I^c \dot{\omega} + \omega \times I^c \omega \quad (۹-۴)$$

محاسبات دینامیکی تکراری نیوتن - اویلر

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

در این بخش، محاسبه گشتاورهای متناظر با مسیری مفروض برای بازوی مکانیکی ماهر را مورد توجه قرار می دهیم. فرض می کنیم مکان، سرعت و شتاب مفصلها را می دانیم. با این دانسته ها و با داشتن اطلاعات سینماتیکی و توزیع جرم در روبات، می توانیم گشتاورهای مفصلی لازم برای ایجاد این حرکت را محاسبه کنیم.

نیرو و گشتار وارد بر یک رابط

پس از محاسبه شتابهای خطی و زاویه ای مرکز جرم هر رابط، که در بخش قبل انجام شد، با استفاده از معادله های نیوتن- اویلر می توانیم نیرو و گشتار لختی وارد بر مرکز جرم هر رابط را محاسبه کنیم. پس داریم:

$$F = m\dot{v}_{C_i}$$

$$N = {}^C_i I \dot{\omega}_i + \omega_i \times {}^C_i I \omega_i \quad (10-4)$$

که در آن مبدأ  $\{C_i\}$  بر مرکز جرم رابط منطبق است و جهتگیری آن با جهتگیری چهارچوب رابط  $\{i\}$  یکسان است.

الگوریتم دینامیکی تکراری نیوتن- اویلر

الگوریتم کامل محاسبه گشتاورهای مفصلی با استفاده از حرکت مفصلها از دو قسمت تشکیل شده است. در قسمت اول، سرعتها و شتابهای رابطها با استفاده از روابط تکراری، از رابط ۱ تا رابط n محاسبه، و معادله های نیوتن- اویلر برای هر رابط نوشته می شوند. در قسمت دوم، نیروها و گشتاورهای بین رابطها و گشتاورهای کارانداز مفصل، به طور پی در پی از رابط n به رابط ۱، محاسبه می شوند. معادله های فوق، در حالتی که کلیه مفصلها لولایی هستند، به شرح زیر خلاصه می شوند:

محاسبات تکراری بیرونی:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (11-4)$$

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i + {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (12-4)$$

$${}^{i+1}\dot{V}_{i+1} = {}^{i+1}R^i (\dot{V}_i + {}^i\dot{\omega}_i \times {}^iP_{i+1} + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1})) + 2 {}^i\omega_i \times \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} + \ddot{d}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (13-4)$$

$${}^{i+1}\dot{V}_{Ci+1} = {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{Ci+1} + {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times ({}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{Ci+1}) + {}^{i+1}\dot{V}_{i+1} \quad (14-4)$$

$$V_C = \text{شتاب خطی مرکز جرم}$$

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} {}^{i+1}\dot{V}_{Ci+1} \quad (15-4)$$

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{Ci+1}I_{i+1} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{Ci+1}I_{i+1} {}^{i+1}\omega_{i+1} \quad (16-4)$$

محاسبات تکراری درونی :

$${}^i f_i = {}^iR^{i+1} f_{i+1} + {}^i F_i \quad (17-4)$$

$${}^i n_i = {}^iR^{i+1} n_{i+1} + {}^i N_i + {}^i P_{Ci} \times {}^i F_i + {}^i P_{i+1} \times {}^iR^{i+1} f_{i+1} \quad (18-4)$$

$$T_i = {}^i n_i^T {}^i Z_i \quad (19-4)$$

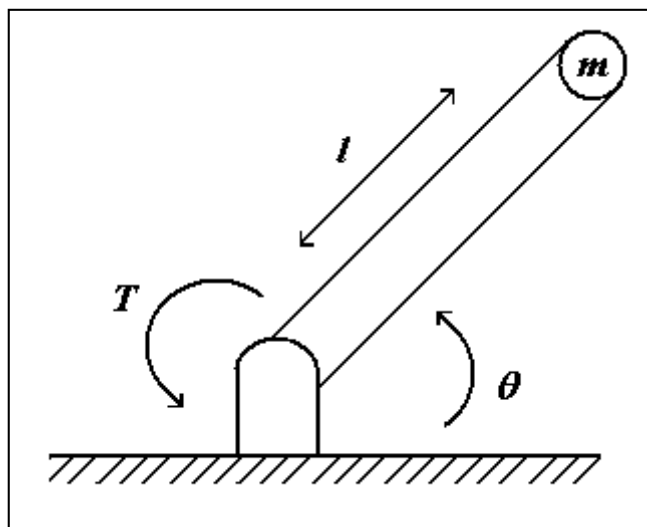
مفصل تنها

در اینجا معادله دینامیکی بسته را برای یک مفصل تنها که در شکل ۴-۱ آمده است را بدست می آوریم. برای

سادگی کار کل جرم رابط را در انتهای آن در نظر می گیریم. حال کمیت های گوناگونی که در معادلات نیوتن

اوایلر ظاهر می شوند را بدست می آوریم.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۱-۴ یک مفصل تنها

$${}^1P_{C1} = l X_1$$

مکان مرکز جرم

$${}^c I_1 = 0$$

تانسور لختی

$$f_2 = 0$$

بر مجری نهایی نیرویی وارد نمی شود

$$n_2 = 0$$

$$\omega = 0$$

پایه روبات دوران نمی کند

$$\dot{\omega} = 0$$

$${}^0V_0 = g Y_0$$

نیروی گرانشی

$${}^1R = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1\omega_1 = \dot{\theta}_1 {}^1Z_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$${}^1\dot{\omega}_1 = \ddot{\theta}_1 {}^1Z_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}$$

$${}^1\dot{V}_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ g \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \sin(\theta) \\ g \cos(\theta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^1\dot{V}_{c1} = \begin{bmatrix} 0 \\ l\ddot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -l\dot{\theta}^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g \sin(\theta) \\ g \cos(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l\dot{\theta}^2 + g \sin(\theta) \\ l\ddot{\theta} + g \cos(\theta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} -ml\dot{\theta}^2 + mg \sin(\theta) \\ ml\ddot{\theta} + mg \cos(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad {}^1N_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^1f_1 = {}^1F_1 \quad {}^1n_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ ml^2\ddot{\theta} + mlg \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$T_1 = ml^2\ddot{\theta} + mlg \cos(\theta)$$

همان طور که مشاهده می کنید این معادله غیر خطی است و برای روبات با مفاصل بیشتر بسیار پیچیده تر

خواهد بود. در فصل بعد ما روشی برای کنترل چنین مفاصلی ارائه می دهیم که بسیار کار آمد است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

## طراحی کنترلی مفصل روبات

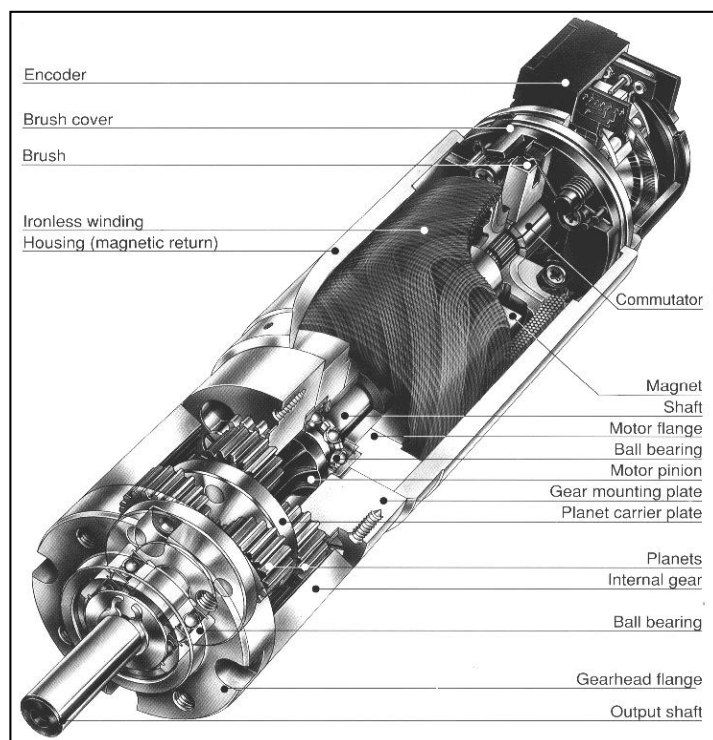
همان طور که در فصل های قبل مشاهده کردیم مسئله کنترل ربات ها، مسئله ای کنترلی با چند ورودی و چند خروجی ( MIMO ) است. در این فصل رهیافتی را برای طراحی سیستم کنترل در پیش می گیریم که در آن هر مفصل به صورت جداگانه کنترل می شود. بدین ترتیب، برای بازوی مکانیکی با  $N$  مفصل، تعداد  $N$  سیستم کنترل مستقل با یک ورودی و یک خروجی ( SISO ) طراحی می کنیم. این رهیافت که کنترل مفصل مستقل خوانده می شود، در حال حاضر به وسیله بیشتر سازنده گان روبات های صنعتی استفاده می شود. [2,4]

در این فصل ، مدلی از یک مفصل لولایی تنها را در بازوی مکانیکی ماهر بررسی می کنیم. البته با توجه به آنچه در بالا گفته شد، طراحی چند مفصل مرتبط، با مستقل فرض کردن هر کدام به صورت جداگانه انجام می شود. پس رهیافت زیر قابل تعمیم به چند مفصل مرتبط، نیز هست.

### کارانداز

یکی از کاراندازهایی که غالباً در بسیاری از روبات های صنعتی یافت می شود موتور گشتاوری جریان مستقیم است (شکل ۶-۱). اما کاراندازهای دیگری هم وجود دارد که بسته به نوع آن، کنترلرها طراحی می شوند .

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آر م سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۶-۱ موتور گشتاوری DC

### موتور گشتاوری

قسمت ساکن موتور ( استاتور ) از محفظه با یاتاقانها و آهنرباهای دائمی یا غیر دائمی تشکیل می شود. آهنرباها در اطراف قسمت گردان موتور ( روتور ) میدان مغناطیسی برقرار می کنند. روتور از یک محور و سیم پیچ هایی تشکیل می شود که جریان یافتن الکتریسیته در آن ها برای موتور ایجاد قدرت و گشتاور می کند. در حالت کلی قابلیت ایجاد گشتاور موتور را به وسیله ثابت گشتاور موتور بیان می کنند که جریان موتور را به

گشتاور مرتبط می سازد. ( رابطه ۶-۱ )

$$T_m = K_m i_a \quad (۶-۱)$$

$$T_m = \text{گشتاور موتور}$$

$$K_m = \text{ثابت گشتاور موتور}$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$i_a = \text{جریان موتور}$$

البته رابطه اصلی به صورت  $T_m = K\phi i_a$  است که از رابطه  $F = qV \times B$  نشئت می گیرد ولی چون شار مغناطیسی در آن ثابت فرض می شود آن را با رابطه (۶-۱) معادل در نظر می گیریم.

هنگامی که موتور در حال دوران است در دو سر آرمیچر اختلاف ولتاژی پدید می آید که متناسب با سرعت روتور و شار مغناطیسی است و به آن نیروی ضد محرکه گفته می شود. چون شار مغناطیسی ثابت است این

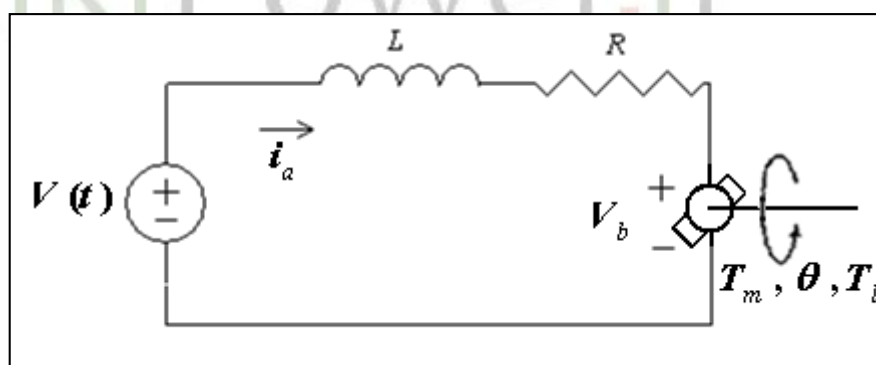
نیروی ضد محرکه با ثابت نیروی ضد محرکه فقط به سرعت روتور مربوط می شود. (رابطه ۶-۲)

$$\begin{aligned} V_b &= K\phi \omega_m \\ V_b &= K_e \omega_m \end{aligned} \quad (۶-۲)$$

$$V_b = \text{ولتاژ دو سر موتور}$$

$$K_e = \text{ثابت نیروی ضد محرکه}$$

$$\omega_m = \text{سرعت روتور}$$



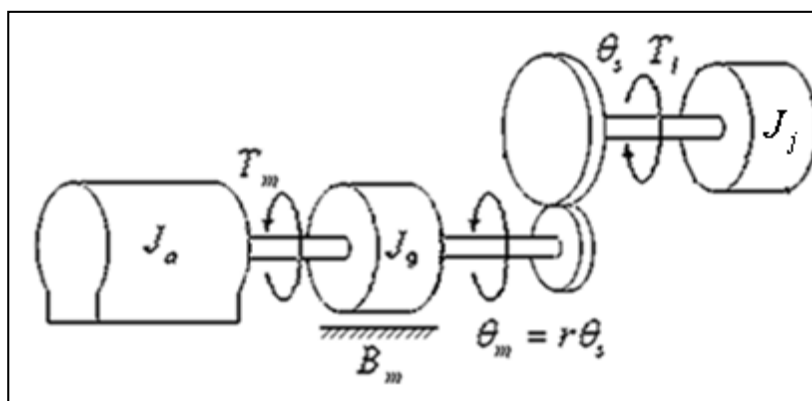
شکل ۶-۲ مدار آرمیچر در موتور DC

همان طور که در شکل ۶-۲ نشان داده شده مدل موتور از منبع ولتاژ، اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر، نیروی

ضد محرکه و مقاومت آرمیچر تشکیل شده است و توسط رابطه ۶-۳ توصیف می شود.



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۴-۶ مدل مکانیکی مفصل و کارانداز

معادله ریاضی که این مدل را توصیف می کند بر حسب  $\theta_m$  این چنین است.

$$J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d \theta_m}{dt} = T_m - \frac{T_l}{r} \quad (4-6)$$

$$= K_m i_a - \frac{T_l}{r}$$

$$J_j = ml^2$$

$$J_m = J_a + J_g + \frac{J_j}{r}$$

اینرسی موتور و چرخنده

$$B_m = \text{ضریب اصطکاک موتور و چرخنده}$$

$$\theta_m = \text{زاویه روتور}$$

$$r = \text{نسبت چرخنده}$$

$$T_l = m l g \cos(\theta_s)$$

با توجه به رابطه بدست آمده (۴-۶) مشاهده می شود این معادله غیر خطی است و همان طور که در فصل قبل

گفته شد، قابل خطی شدن حول نقطه ای خاص نیست زیرا حوزه عملکردی مفصل محدود نیست.  $0 \leq \theta \leq \pi$

ما در اینجا از راهکاری بسیار مفید استفاده می کنیم به این صورت که  $\frac{T_l}{r}$  را که قسمت غیر خطی معادلات

است، به عنوان اغتشاش ورودی در نظر می گیریم البته این اغتشاش به علت وجود نسبت چرخنده بسیار

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

تضعیف می شود پس اینرسی که هر رابط می بیند ثابت فرض می شود، همان طور که در بالا گفته شد به این رهیافت، کنترل مفصل مستقل می گویند.

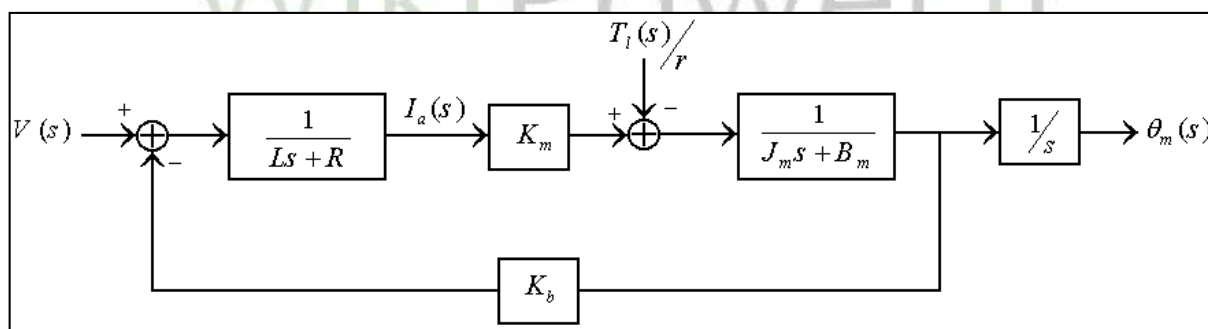
باید توجه داشت این راهکار برای روبات ها با سرعت پایین ونسبت چرخنده بزرگ کاربرد دارد. [4,6]  
پس سیستم ما به یک سیستم مرتبه دو خطی با یک اغتشاش تبدیل شد که کنترل کردن زاویه گردش روتور به منزله کنترل زاویه چرخش مفصل می باشد و از این پس از زاویه گردش روتور  $\theta_m$  در معادلات استفاده می کنیم.

پس سیستم کلی به همراه کارانداز آن با دو رابطه اصلی در حوزه لاپلاس به صورت زیر توصیف می شود.

$$(Ls + R)I_a(s) = V(s) - K_b s \theta_m(s) \quad (5-6)$$

$$(J_m s^2 + B_m s) \theta_m(s) = K_m I_a(s) - \frac{T_l(s)}{r} \quad (6-6)$$

بلوک دیاگرامی که این دو معادله را توصیف می کند در شکل زیر آمده است.



شکل ۵-۶ بلوک دیاگرام سیستم کلی

برای بدست آوردن تابع تبدیل  $\frac{\theta_m(s)}{V(s)}$  با قرار دادن  $T_l(s)$  برابر صفر بدست می آوریم:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$\frac{\theta_m(s)}{V(s)} = \frac{K_m}{s[(Ls + R)(J_m s + B_m) + K_b K_m]} \quad (7-6)$$

و برای بدست آوردن تابع تبدیل  $\frac{\theta_m(s)}{T_1(s)}$  با قرار دادن  $V(s)$  برابر صفر بدست می آوریم:

$$\frac{\theta_m(s)}{T_1(s)} = \frac{-(Ls + R)/r}{s[(Ls + R)(J_m s + B_m) + K_b K_m]} \quad (8-6)$$

ملاحظات

چون موتور مدل سازی شده یک موتور جریان مستقیم است و ثابت زمانی الکتریکی  $\frac{L}{R}$  خیلی کوچکتر از

ثابت زمانی مکانیکی  $\frac{J_m}{B_m}$  است می توان به درستی اندوکتانس سیم پیچ روتور را برابر صفر در نظر گرفت که

توابع تبدیل به صورت زیر ساده می شوند.

$$\frac{\theta_m(s)}{V(s)} = \frac{K_m/R}{s(J_m s + B_m + K_b K_m/R)} \quad (9-6)$$

$$\frac{\theta_m(s)}{T_1(s)} = \frac{-1/r}{s(J_m s + B_m + K_b K_m/R)} \quad (10-6)$$

ما در مدل سازی سیستم فرض کردیم که چرخنده ها، محورها، یاتاقان ها، مفصل و رابطها انعطاف پذیر نیستند

ولی در عمل این اجزا سختی محدودی دارند. اما دلیل صرف نظر کردن از انعطاف پذیری اجزا آن است که

بسامد های طبیعی این تشدید های مدل سازی نشده بسیار بالاست و تاثیر آن در مقایسه قطب های غالب

مدلسازی شده قابل چشم پوشی خواهد بود.

چون تصمیم گرفته ایم انعطاف پذیری های سازه ای را در سیستم وارد نکنیم، باید احتیاط کنیم تا تشدید های

مربوط به آن تحریک نشود. قاعده ساده برای این منظور آن ایت که اگر کوچکترین تشدید سازه ای  $\omega_{res}$

باشد، آنگاه بسامد طبیعی سیستم مدار بسته از نصف  $\omega_{res}$  کمتر باشد. (رابطه ۶-۱۱) تشدید های سازه های



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

صنعتی معمولاً بین ۵ تا ۲۵ هرتز است. این محدودیت، راهنمایی برای انتخاب بهره های کنترل کننده خواهد بود.

$$\omega_n \leq \frac{1}{2} \omega_{res} \quad (11-6)$$

از دو رابطه ۶-۹ و ۶-۱۰ معادله کلی یک مفصل روبات با کارانداز آن به صورت زیر بدست می آید و بلوک دیاگرام آن در شکل ۶-۶ آمده است :

$$J_m \ddot{\theta}_m(t) + (B_m + K_b K_m / R) \dot{\theta}_m(t) = (K_m / R) V(t) - T_1(t) / r \quad (12-6)$$

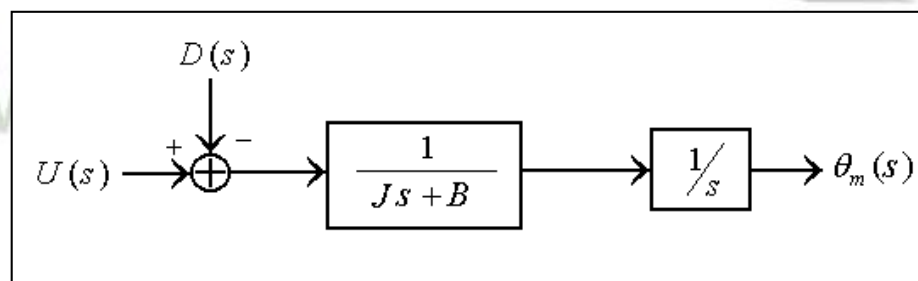
$$J \ddot{\theta}_m(t) + B \dot{\theta}_m(t) = u(t) - d(t) \quad (13-6)$$

$$B = B_m + K_b K_m / R$$

$$J = J_m$$

$$u(t) = (K_m / R) V(t)$$

$$d(t) = T_1(t) / r$$



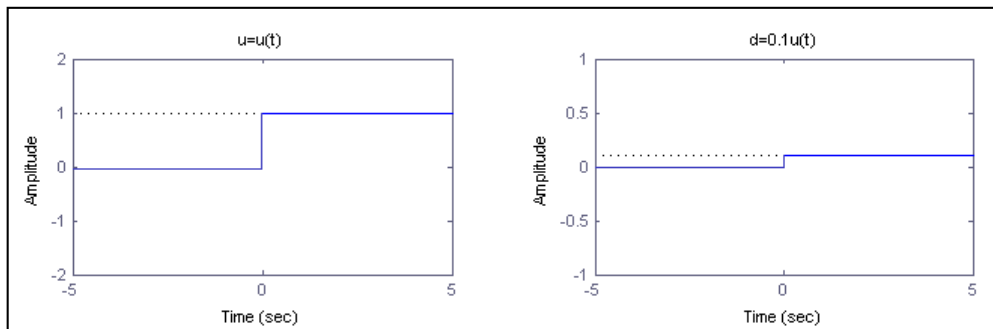
شکل ۶-۶ بلوک دیاگرام سیستم کلی

در شکل آن ورودی اغتشاش است که بار آن را به وجود می آورد که می توان از آن چشم پوشی کرد ولی ما از آن چشم پوشی نمی کنیم زیرا در ادامه می خواهیم اثر آن را با وجود کنترل کننده ها بررسی کنیم.

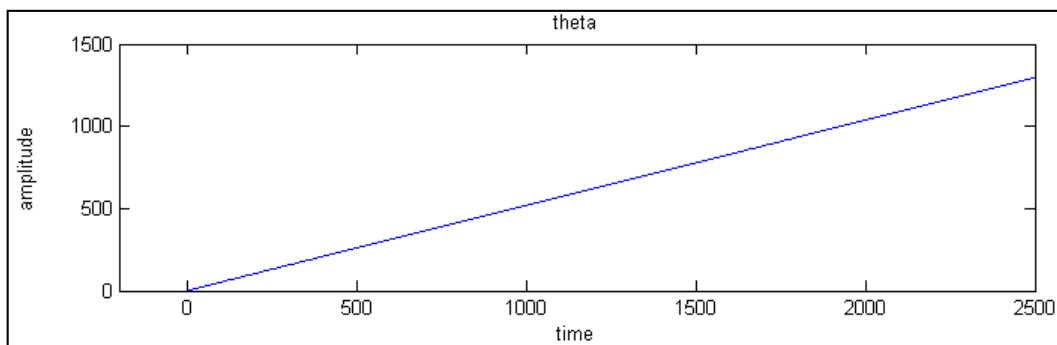
مشکلات سیستم

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

مفصلی که در بالا مدلسازی شد و معادلات آن بدست آمد دارای مشکلاتی است که از جمله آن می توان به این موضوع اشاره کرد که ورودی و اغتشاش به یک نسبت در خروجی تاثیر گذارند و این امر باعث می شود ما به  $\theta_m$  مورد نظرمان نرسیم. همچنین خروجی ناشی از ورودی پله واحد باعث می شود خروجی به بی نهایت برود و ناپایداری سیستم را به دنبال دارد ( شکل ۶-۷ و ۶-۸). پس با توضیحاتی که در بالا داده شد وجود یک کنترل کننده در سیستم امری ضروری است که در بخش های بعدی انواعی از کنترل کننده ها برای بهبود سیستم آورده می شود.



شکل ۷-۶ ورودی مطلوب و اغتشاش



شکل ۸-۶ پاسخ به ورودی مطلوب و اغتشاش پله

کنترل کننده P

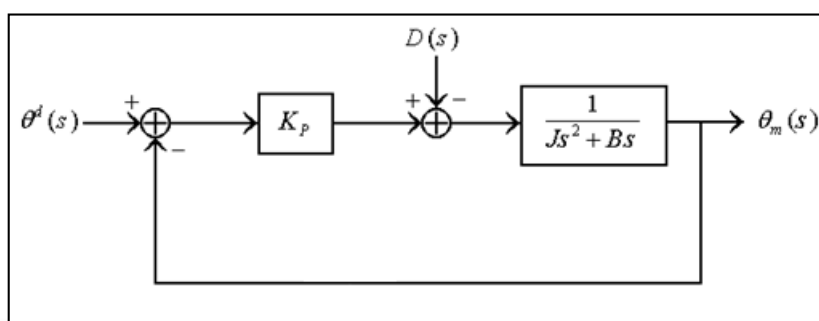
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

اولین و سادهترین کنترل کننده ای که برای سیستم در نظر می گیریم شامل یک بهره و یک مسیر فید بک است که در آن داریم :

$$U(s) = K_p (\theta^d(s) - \theta(s)) \quad (۱۴-۶)$$

$$\theta^d(s) = \text{زاویه مطلوب ما}$$

سیستم با کنترل کننده P در شکل زیر نشان داده شده است .



شکل ۶-۹ سیستم با کنترل کننده P

معادله  $\theta(s)$  و  $E(s)$  به صورت زیر است :

$$\theta(s) = \frac{K_p}{g(s)} \theta^d(s) - \frac{1}{g(s)} D(s) \quad (۱۵-۶)$$

$$g(s) = Js^2 + Bs + K_p$$

$$\begin{aligned} E(s) &= \theta^d(s) - \theta(s) \\ &= \frac{Js^2 + Bs}{g(s)} \theta^d(s) + \frac{1}{g(s)} D(s) \end{aligned} \quad (۱۶-۶)$$

همان طور که از معادله مشخصه پیداست سیستم به ازای  $K_p$  های مثبت پایدار است. پس مشکل پایداری

پاسخ پله رفع شد، اما ....

برای ورودی واغتشاش پله واحد، خطای حالت ماندگار را بدست می آوریم.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$D(s) = \frac{D}{s} \quad \theta^d(s) = \frac{d}{s}$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = -\frac{D}{K_p} \quad (17-6)$$

همان طور که در بخش های قبل گفته شد اغتشاش  $D$  با نسبت چرخنده نسبت عکس دارد پس با افزایش این نسبت می توان اثر اغتشاش را کاهش داد. همچنین خطای حالت ماندگار با  $K_p$  نسبت عکس دارد که با افزایش  $K_p$  می توان خطا را کاهش داد. اما همان طور که در بخش ملاحظات گفته شد ( رابطه ۶-۱۱)  $K_p$  نمی تواند از محدوده ای بیشتر شود. پس در حالت ماندگار خطایی به اندازه  $\frac{D}{K_p}$  در خروجی وجود دارد.

معادله مشخصه سیستم به صورت زیر است :

$$g(s) = s^2 + \frac{B}{J}s + \frac{K_p}{J} = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (18-6)$$

همان طور که از معادلات بالا مشخص است فقط  $\omega_n$  ( فرکانس طبیعی نوسانات سیستم ) با انتخاب  $K_p$  تغییر می کند و  $\zeta$  ( نسبت میرایی سیستم ) به طور مستقل توسط ما تعیین نمی شود. پس با انتخاب  $K_p$  نمی توان جای قطب ها را به طور مطلوب تعیین کرد و خواسته های مورد نظر را از سیستم به دست آورد.

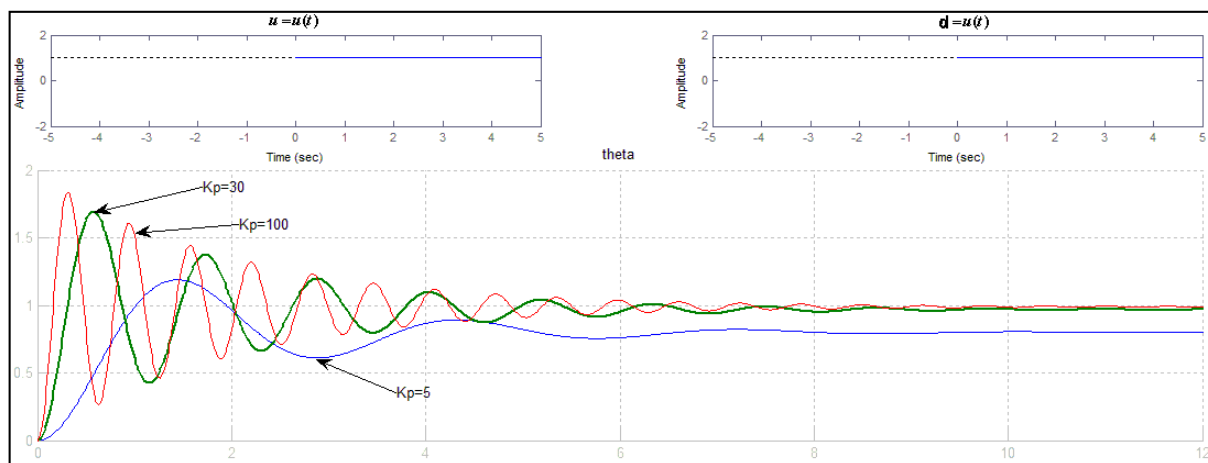
در زیر برای چند ورودی و  $K_p$  های خاص خروجی را رسم کرده ایم.

تمام نمودار ها با برنامه متلب کشیده شده و برنامه آن در پیوست الف آمده است.

در تمام تحلیل ها پارامتر های  $B$  و  $J$  را برابر یک فرض کرده ایم.

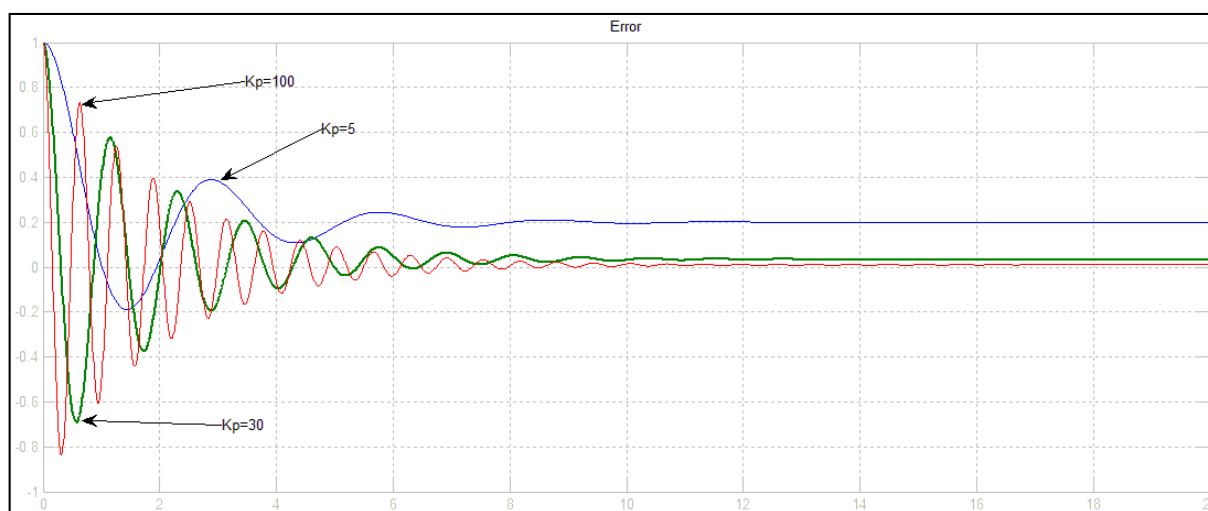
ورودی = اصلی پله واحد، اغتشاش = پله واحد :

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۶-۱۰ ورودی به همراه پاسخ

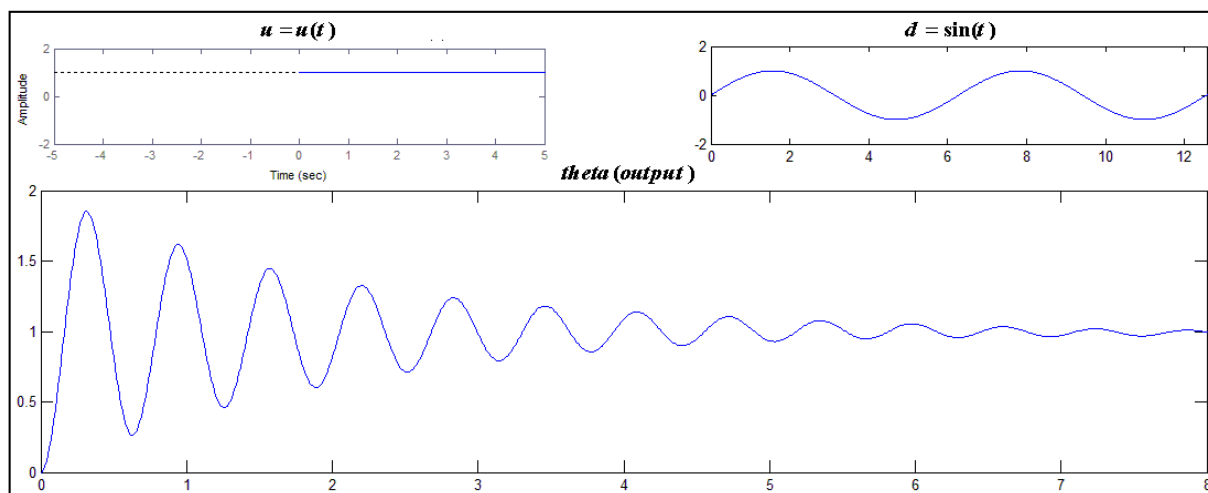
خطای حالت ماندگار به ورودی های ذکر شده در بالا :



شکل ۶-۱۱ خطا

ورودی = اصلی پله واحد، اغتشاش = سینوسی :

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



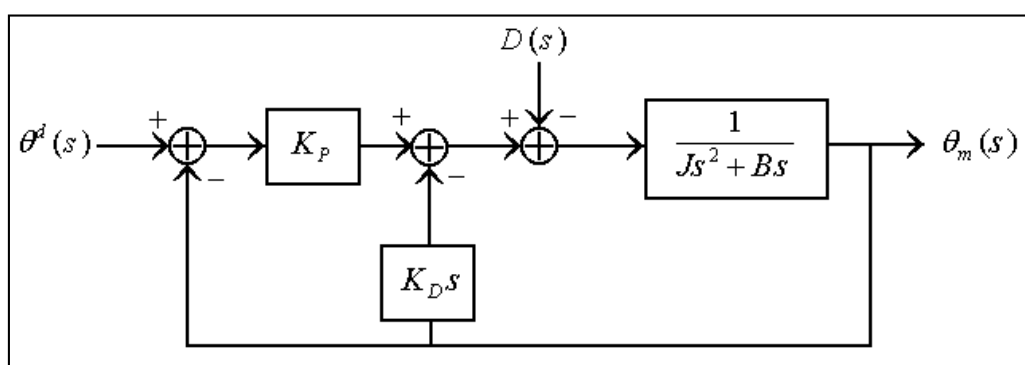
شکل ۶-۱۲ ورودی به همراه پاسخ

### کنترل کننده PD

دومین کنترل کننده ای که برای سیستم بالا در نظر می گیریم کنترل کننده PD است. برای این کار  $U(s)$  را به صورت زیر می گیریم.

$$U(s) = K_p (\theta^d(s) - \theta(s)) - K_D s \theta(s) \quad (۶-۱۹)$$

سیستم کلی با کنترل کننده PD در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۳ سیستم با کنترل کننده PD

حال معادله  $\theta(s)$  و  $E(s)$  را بدست می آوریم.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$\theta(s) = \frac{K_p}{P(s)} \theta^d(s) - \frac{1}{P(s)} D(s) \quad (20-6)$$

$$\begin{aligned} E(s) &= \theta^d(s) - \theta(s) \\ &= \frac{Js^2 + (B + K_D)s}{P(s)} \theta^d(s) + \frac{1}{P(s)} D(s) \end{aligned} \quad (21-6)$$

همان طور که مشاهده می شود سیستم برای تمام مقادیر مثبت  $K_p$  و  $K_D$  پایدار است.

برای ورودی واغتشاش پله واحد، خطای حالت ماندگار را بدست می آوریم.

$$D(s) = \frac{D}{s} \quad \theta^d(s) = \frac{d}{s}$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = -\frac{D}{K_p} \quad (22-6)$$

همان طور که مشخص است خطای حالت ماندگار با  $K_p$  نسبت عکس دارد که با افزایش  $K_p$  می توان خطا را

کاهش داد. اما به دلیل ملاحظات مکانیکی این کار امکان پذیر نیست (رابطه ۶-۱۱) و در حالت ماندگار

خطایی به اندازه  $\frac{D}{K_p}$  در خروجی وجود دارد.

در معادله بدست آمده برای  $\theta(s)$  معادله مشخصه برابر است با :

$$\begin{aligned} s^2 + \frac{(B + K_D)}{J}s + \frac{K_p}{J} &= s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \\ K_p &= \omega_n^2 J \quad K_D = 2\zeta\omega_n - B \end{aligned} \quad (23-6)$$

که به راحتی می توان خواسته های خود را با انتخاب مناسب  $\zeta$  و  $\omega_n$  بدست آورد. برای مثال برای بدست

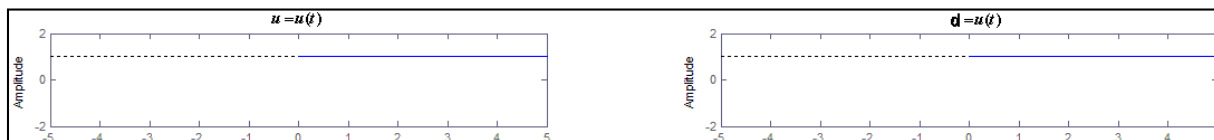
آوردن سریع ترین پاسخ بدون فرا جهش می توان  $\zeta$  را برابر یک قرار داد و متناسب با آن  $K_p$  و  $K_D$  را انتخاب

کرد. پس جای دقیق قطب ها بر خلاف کنترل کننده  $P$  به دست ما تعیین می شود.

در زیر برای چند ورودی و  $K_p$  و  $K_D$  های خاص خروجی را رسم و مقایسه کرده ایم.

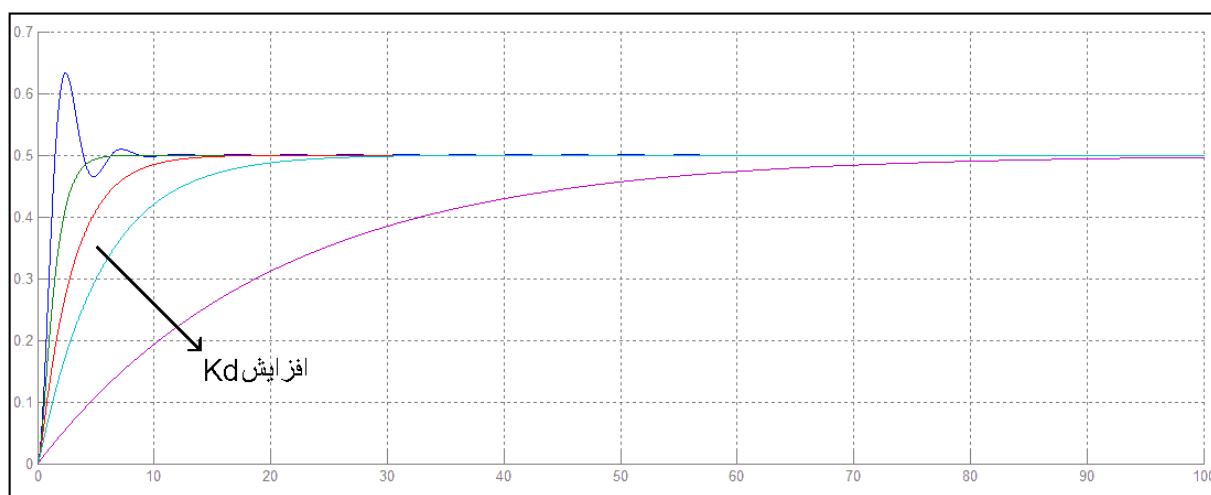
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

ورودی = اصلی پله واحد، اغتشاش = پله واحد :



شکل ۶-۱۴ ورودی

۱-  $K_p = 2$      $K_d = 0.1, 2, 5, 10, 40$

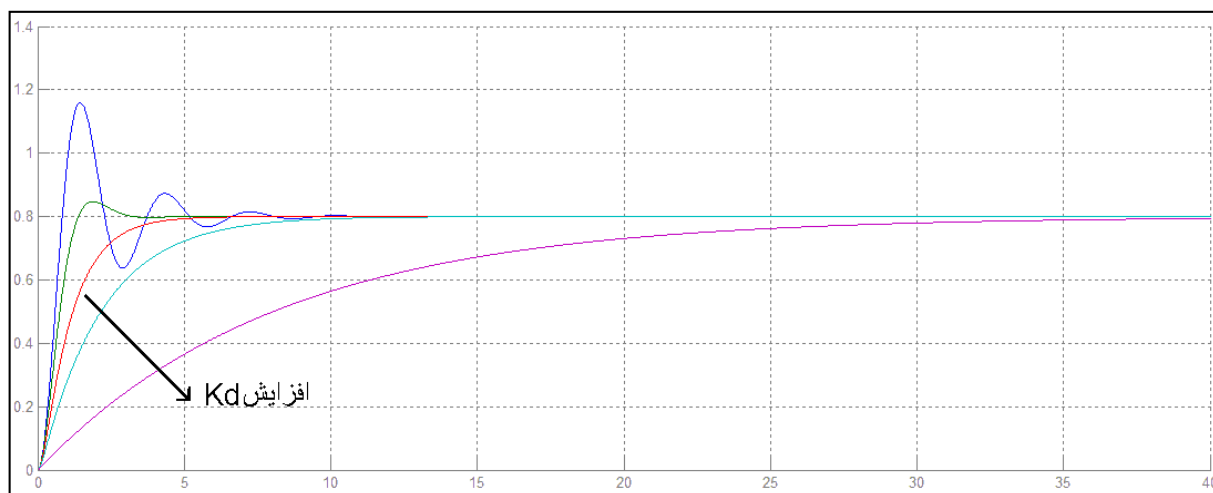


شکل ۶-۱۵ خروجی

۲-  $K_p = 5$      $K_d = 0.1, 2, 5, 10, 40$

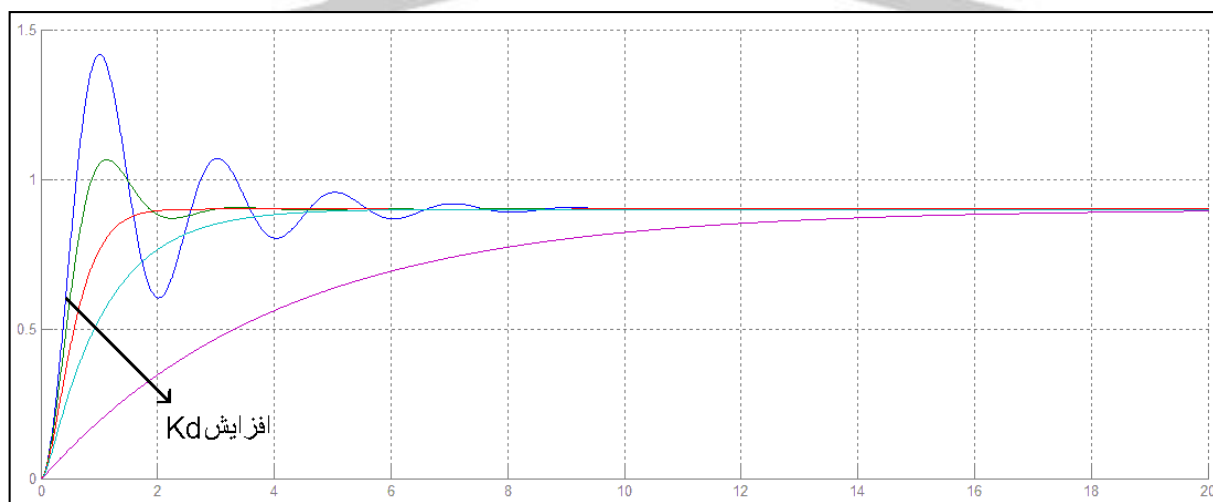


برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۶-۱۶ خروجی

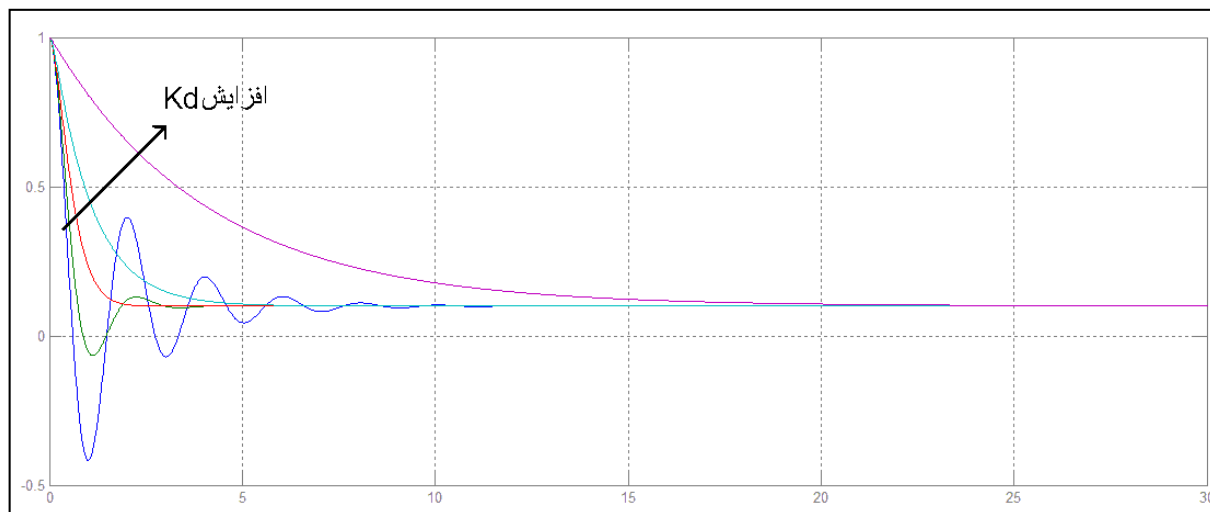
$K_d = 0.1, 2, 5, 10, 40$        $K_p = 10$       -۳



شکل ۶-۱۷ خروجی

خطای حالت ماندگار به ورودی های ذکر شده در بالا و برای  $K_p = 10$  :

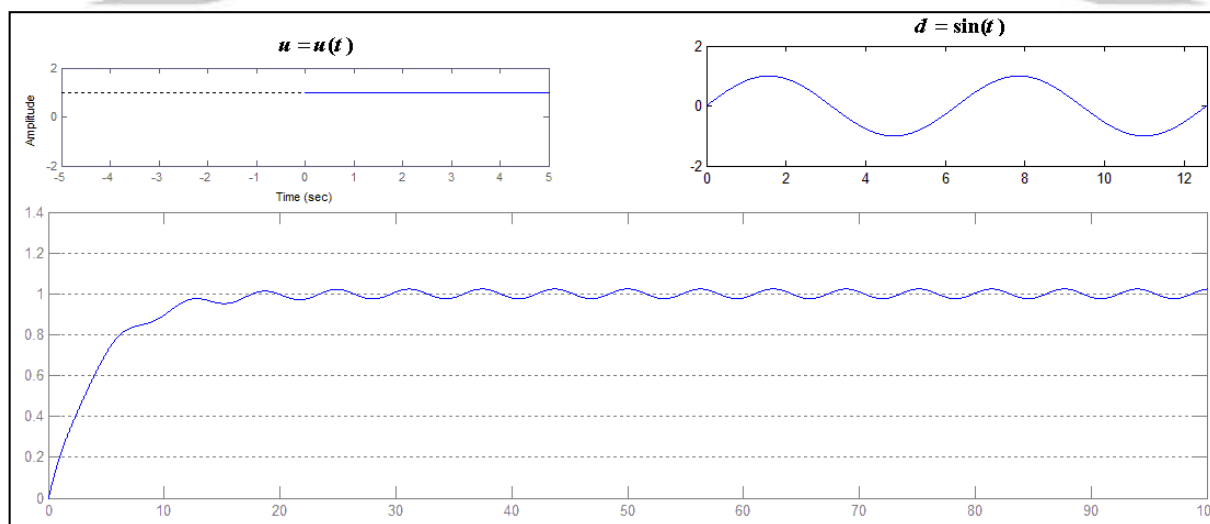
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۶-۱۸ خطا



ورودی = اصلی پله واحد، اغتشاش = سینوسی (Kd=20, Kp=20):



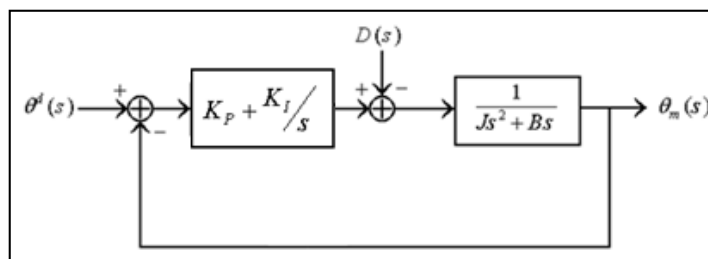
شکل ۶-۱۹ ورودی به همراه پاسخ

کنترل کننده PI

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

کنترل کننده دیگری که می توان برای سیستم استفاده کرد کنترل کننده PI است که در آن  $U(s)$  را به صورت زیر می گیریم، که بلوک دیاگرام این سیستم در شکل ۶-۲۰ آمده است.

$$U(s) = K_p (\theta^d(s) - \theta(s)) - \frac{K_I}{s} \theta(s) \quad (24-6)$$



شکل ۶-۲۰ سیستم با کنترل کننده PI

حال معادله  $\theta(s)$  و  $E(s)$  را بدست می آوریم .

$$\theta(s) = \frac{K_p s + K_I}{F(s)} \theta^d(s) - \frac{s}{F(s)} D(s) \quad (25-6)$$

$$F(s) = Js^3 + Bs^2 + K_p s + K_I$$

$$\begin{aligned} E(s) &= \theta^d(s) - \theta(s) \\ &= \frac{Js^3 + Bs^2}{F(s)} \theta^d(s) + \frac{s}{F(s)} D(s) \end{aligned} \quad (26-6)$$

معادله مشخصه سیستم برابر است با  $Js^3 + Bs^2 + K_p s + K_I$  که برای پایداری سیستم با استفاده از معیار

راث هورویتز باید داشته باشیم :

$$K_I < \frac{BK_p}{J} \quad (27-6)$$

و تمام ضرایب مثبت باشند.

برای ورودی واغتشاش پله واحد، خطای حالت ماندگار را بدست می آوریم.

$$D(s) = \frac{D}{s} \quad \theta^d(s) = \frac{d}{s}$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = 0 \quad (28-6)$$

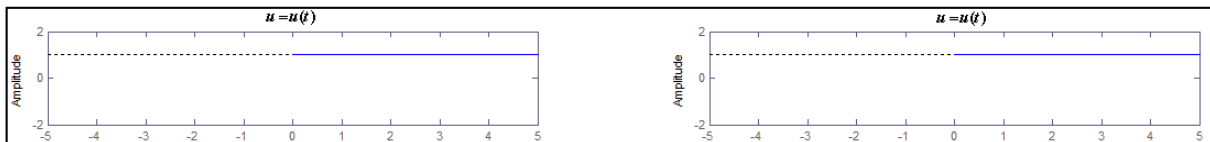
پس با این کنترل کننده توانستیم خطای حالت ماندگار را صفر کنیم، اما با توجه به معادله مشخصه سیستم فقط

$K_p$  و  $K_I$  بدست ما تغییر می کنند و این برای کنترل یک سیستم مرتبه سوم کافی نیست و ممکن است برخی

مطالبات ما را وصول نکند.

در زیر برای چند ورودی و  $K_p$  و  $K_I$  های خاص خروجی را رسم کرده ایم.

ورودی = اصلی پله واحد، اغتشاش = پله واحد :

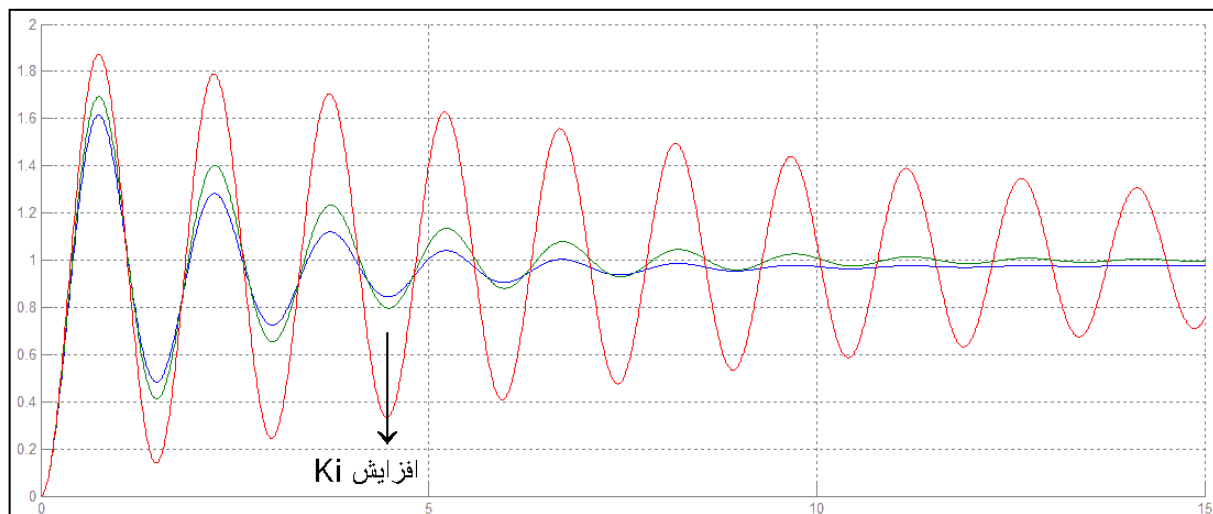


شکل ۶-۲۱ ورودی



$$K_i = 1, 5, 15 \quad K_p = 18 \quad -1$$

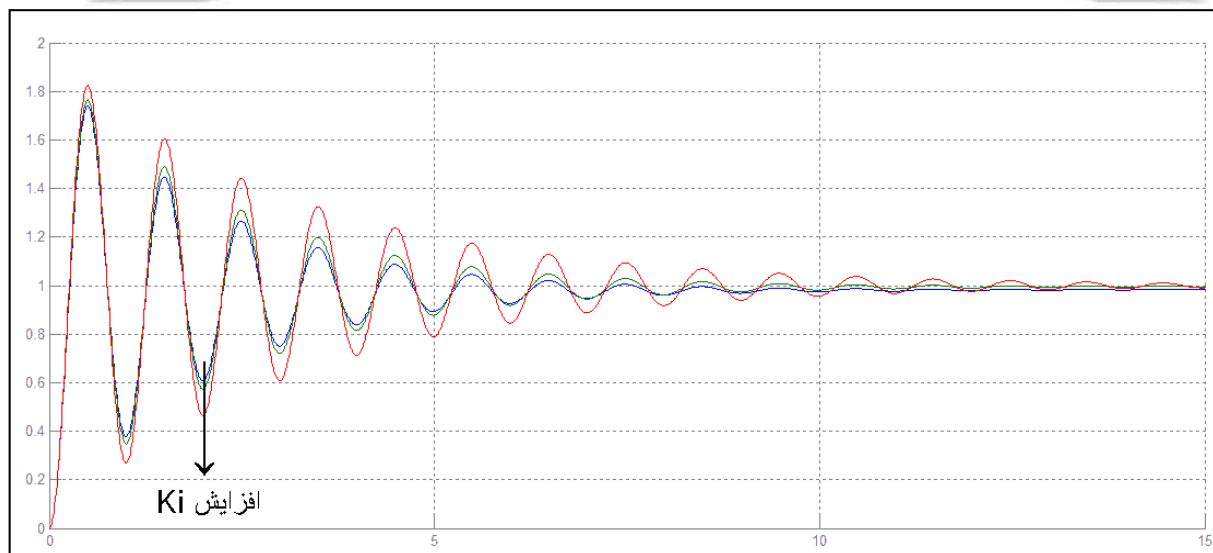
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۶-۲۲ خروجی



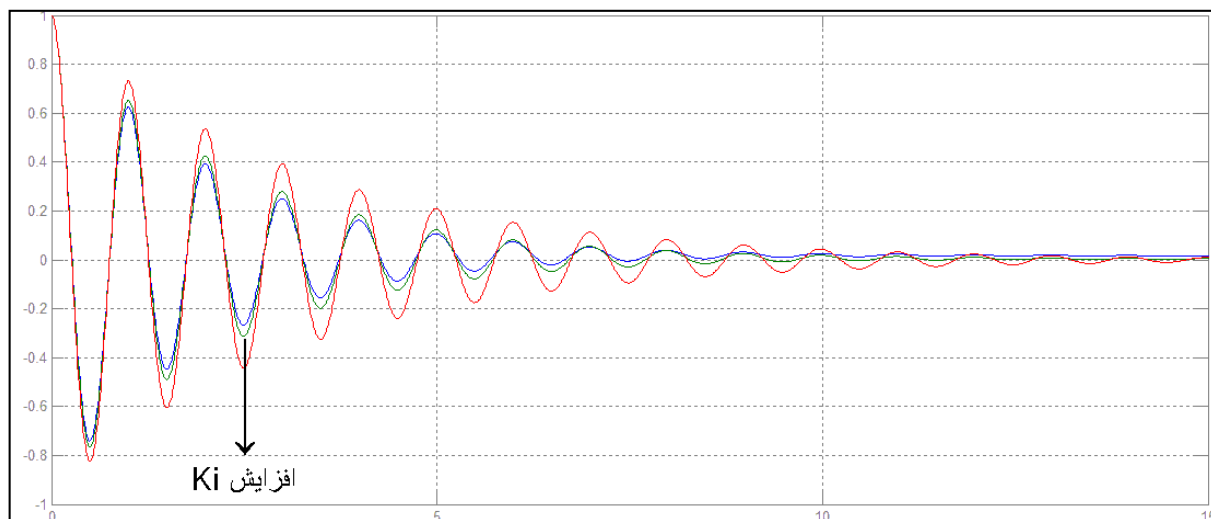
$K_p = 40$      $K_i = 1, 5, 15$     -۲



شکل ۶-۲۳ خروجی

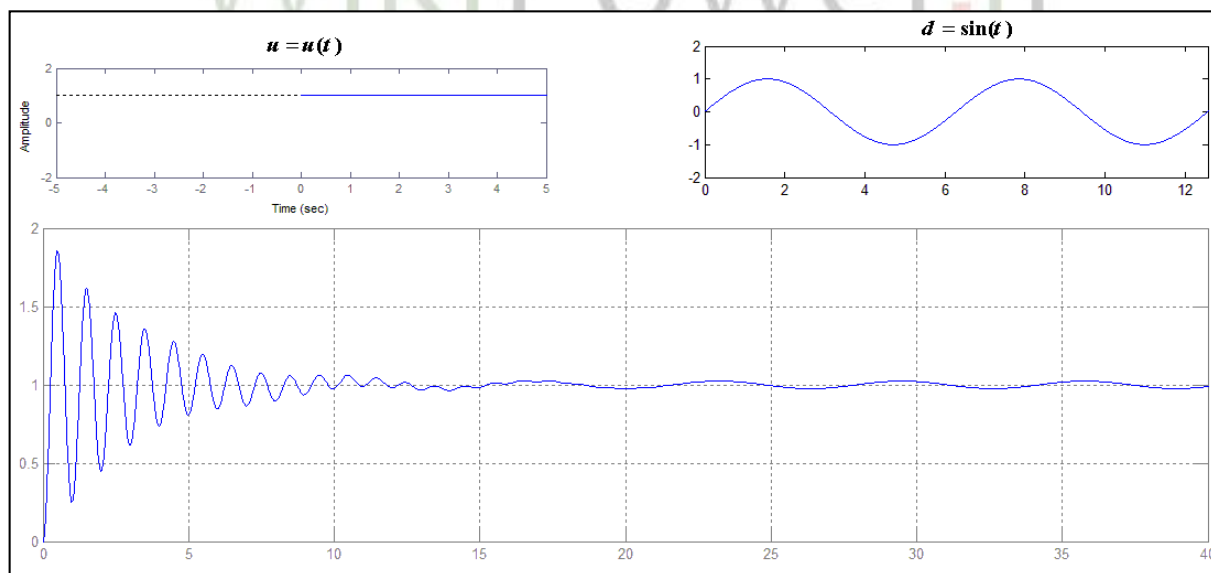
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

خطای حالت ماندگار به ورودی های ذکر شده در بالا و برای  $K_d = 40$  :



شکل ۶-۲۴ خطا

ورودی = اصلی پله واحد، اغتشاش = سینوسی  $(K_i=20, K_p=20)$  :



شکل ۶-۲۵ ورودی به همراه پاسخ

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

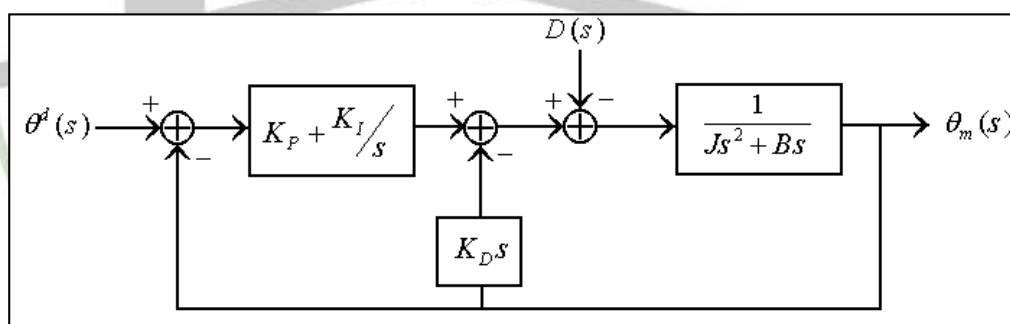
### کنترل کننده PID

همان طور که در قسمت های قبل ذکر شد کنترل کننده های P، PD، PI هر کدام مشکلاتی داشتند، ما برای

رفع این مشکلات کنترل کننده PID را پیشنهاد می کنیم. پس  $U(s)$  را به صورت زیر در نظر می گیریم.

$$U(s) = \left(K_P + \frac{K_I}{s}\right)(\theta^d(s) - \theta(s)) - K_D s \theta(s) \quad (۲۹-۶)$$

سیستم کلی با کنترل کننده PID در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۲۶-۶ سیستم با کنترل کننده PID

پس برای  $\theta(s)$  و  $E(s)$  داریم :

$$\theta(s) = \frac{(sK_P + K_I)}{q(s)} \theta^d(s) - \frac{s}{q(s)} D(s) \quad (۳۰-۶)$$

$$q(s) = Js^3 + (B + K_D)s^2 + K_P s + K_I$$

$$\begin{aligned} E(s) &= \theta^d(s) - \theta(s) \\ &= \frac{Js^3 + (B + K_D)s^2}{q(s)} \theta^d(s) + \frac{s}{q(s)} D(s) \end{aligned} \quad (۳۱-۶)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

معادله مشخصه سیستم برابر است با  $Js^3 + (B + K_D)s^2 + K_Ps + K_I$  که برای پایداری سیستم با استفاده از

معیار راث هورویتز باید داشته باشیم :

$$K_I < \frac{(B + K_D)K_P}{J} \quad (۳۲-۶)$$

و تمام ضرایب مثبت باشند.

برای ورودی واغتشاش پله واحد، خطای حالت ماندگار را بدست می آوریم.

$$D(s) = \frac{D}{s} \quad \theta^d(s) = \frac{d}{s}$$

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = 0 \quad (۳۳-۶)$$

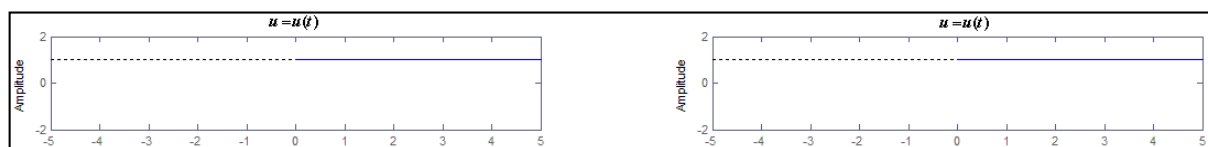
این کنترل کننده نیز خطای حالت ماندگار را صفر کرد، اما برخلاف کنترل کننده PI، با توجه به معادله مشخصه،

با انتخاب  $K_P$  و  $K_I$  و  $K_D$  می توان جای دقیق قطب های سیستم را تعیین نمود و به هر خواسته مطلوبی

رسید.

در زیر برای چند ورودی خاص و به ازای مقادیر مختلف ضرایب، خروجی رسم شده است.

ورودی = اصلی پله واحد، اغتشاش = پله واحد :

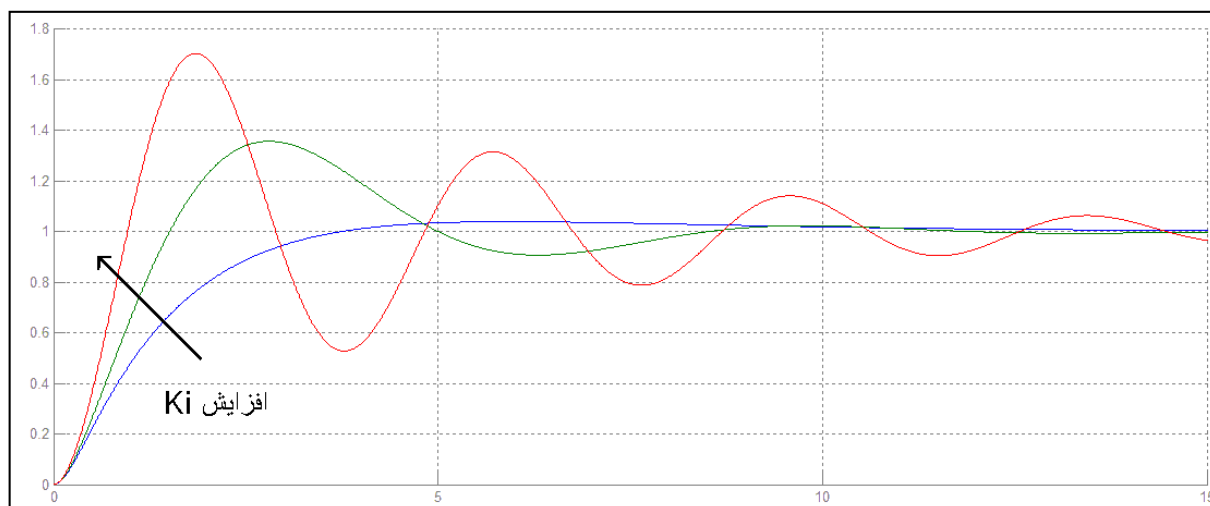


شکل ۶-۲۷ ورودی

$$K_i = 1, 5, 15 \quad K_p = 5 \quad K_d = 5 \quad -۱$$

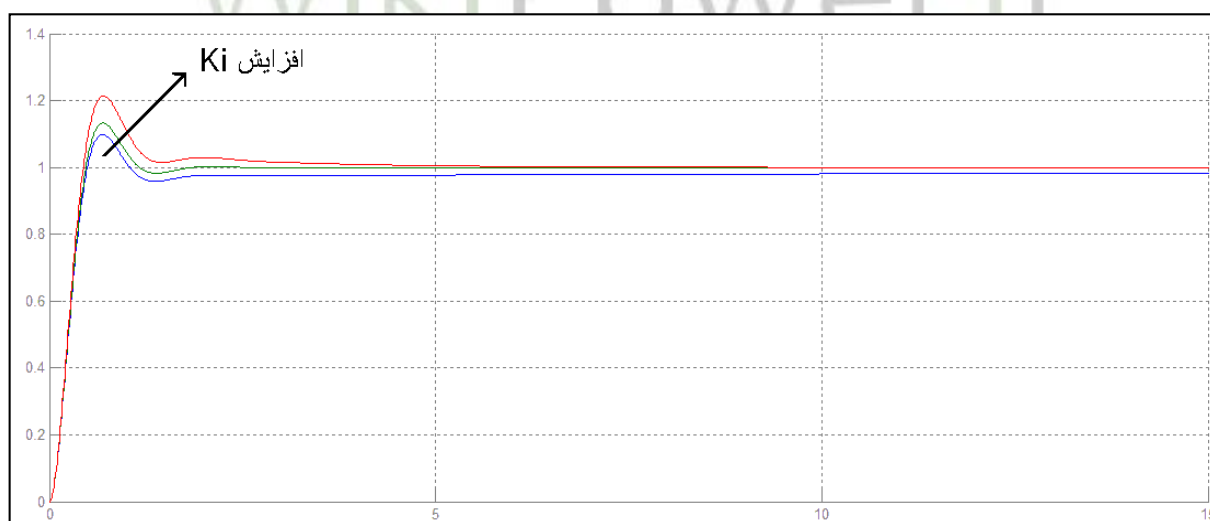


برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۶-۲۸ خروجی

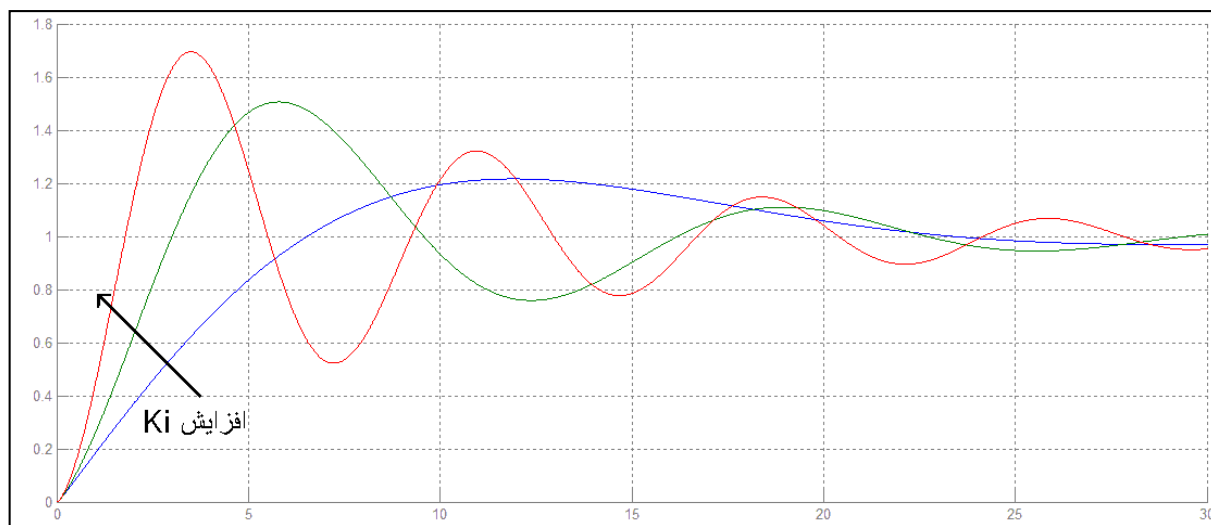
$K_i = 1, 5, 15$        $K_p = 30$        $K_d = 5$       -۲



شکل ۶-۲۹ خروجی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۳-  $K_i = 1, 5, 15$      $K_p = 5$      $K_d = 20$

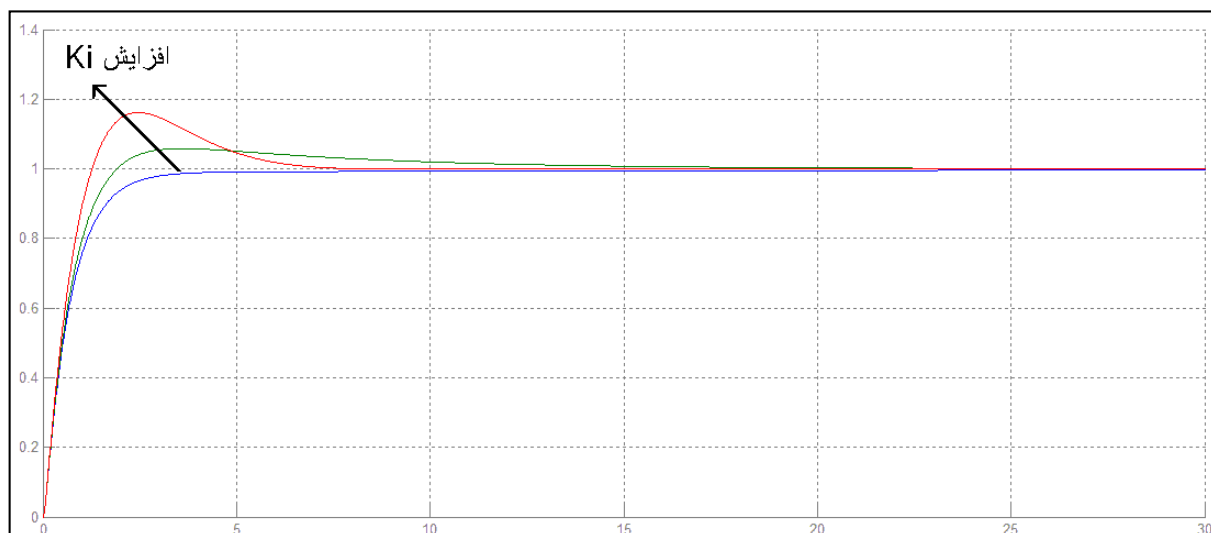


شکل ۳۰-۶ خروجی



WikiPower.ir

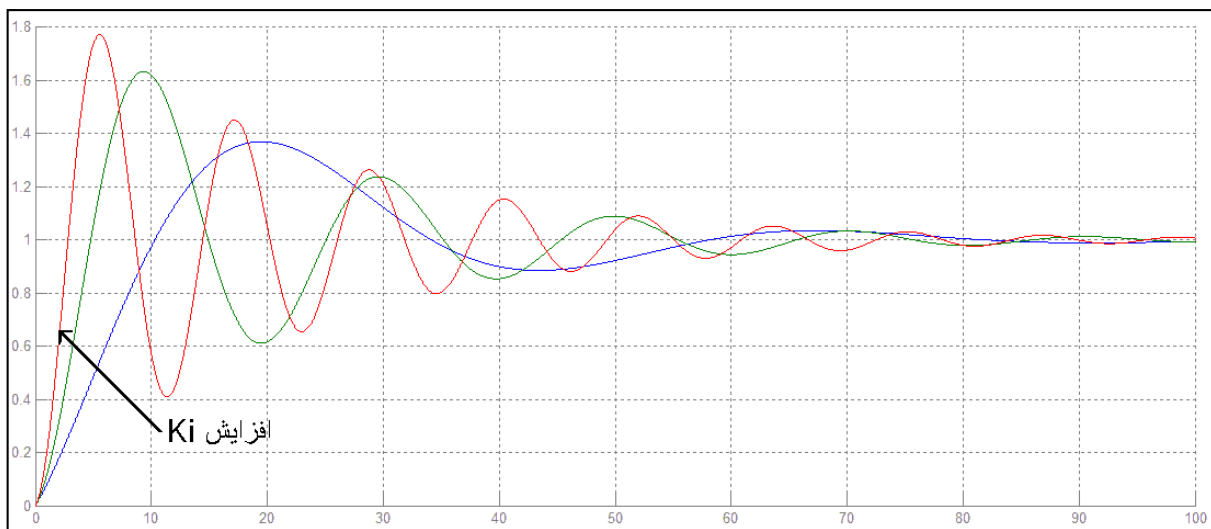
۴-  $K_i = 1, 5, 15$      $K_p = 30$      $K_d = 20$



شکل ۳۱-۶ خروجی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

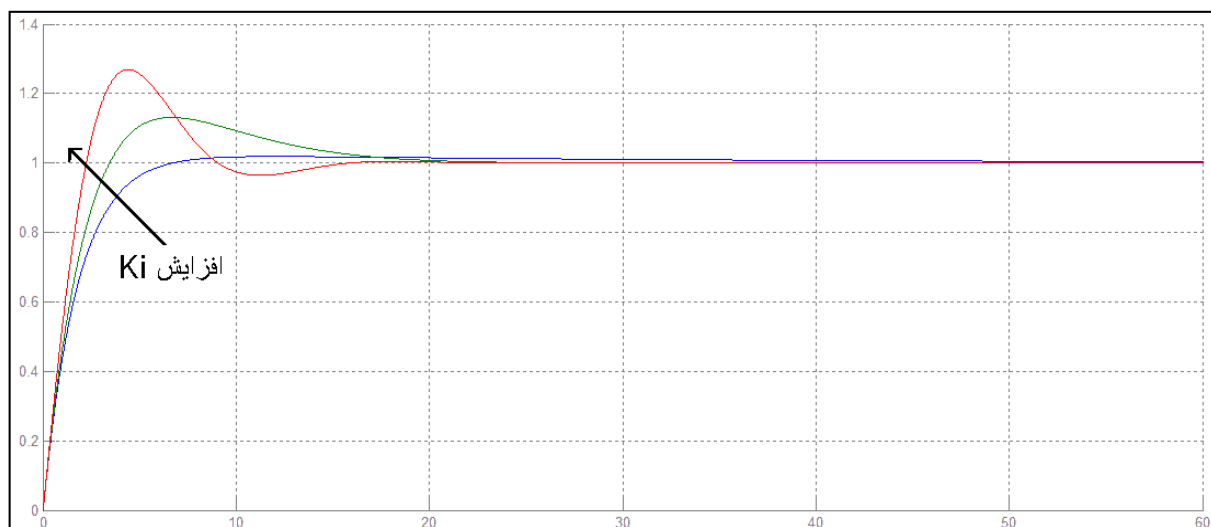
۵-  $K_i = 1, 5, 15$        $K_p = 5$        $K_d = 50$



شکل ۶-۳۲ خروجی

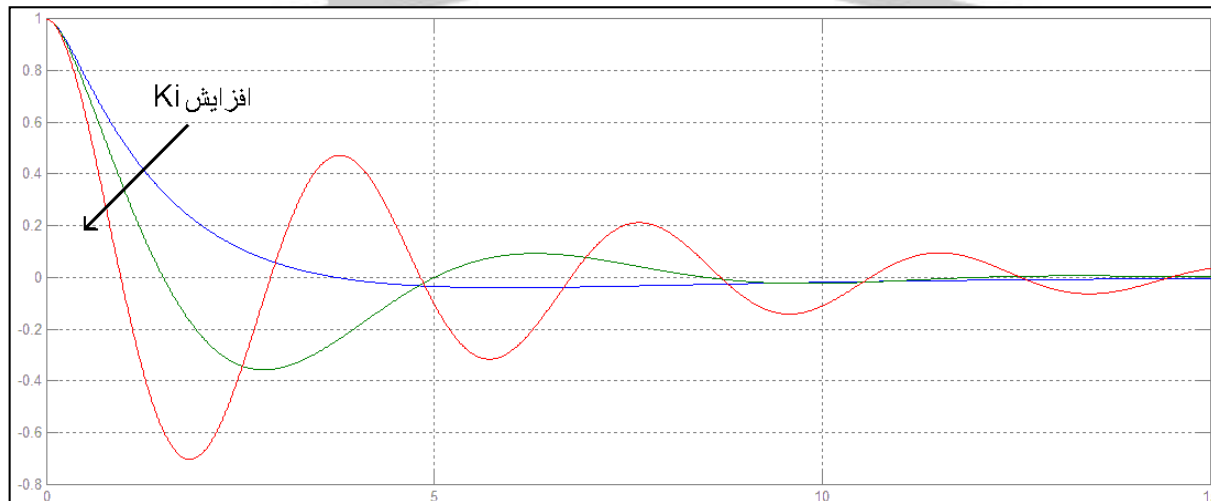
۶-  $K_i = 1, 5, 15$        $K_p = 30$        $K_d = 50$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۳۳-۶ خروجی

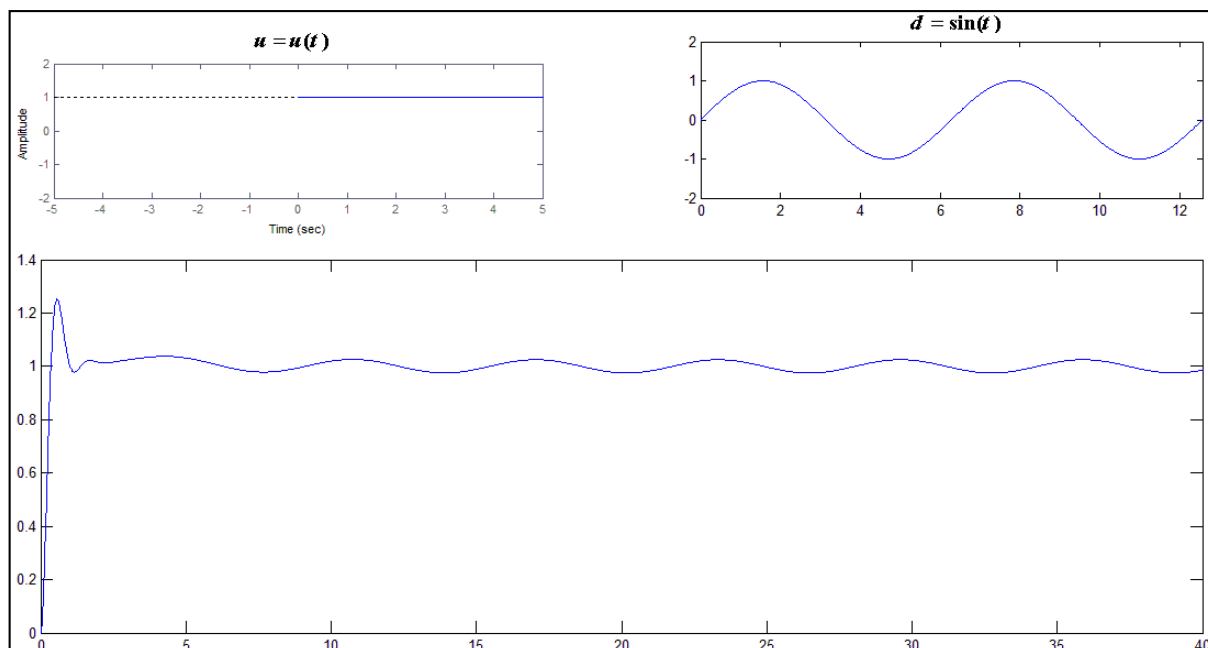
خطای حالت ماندگار به ورودی های ذکر شده در بالا (پله واحد) و برای  $K_d = 5$ ,  $K_p = 5$ :



شکل ۳۴-۶ خطا

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

ورودی = اصلی پله واحد، اغتشاش = سینوسی ( $K_d = 30, K_i = 20, K_p = 30$ ):



شکل ۶-۳۵ ورودی به همراه پاسخ

خلاصه ای از ویژگی های کنترل کننده های ذکر شده :

کنترل کننده **P** :

- پایداری سیستم و پاسخ محدود به ورودی پله واحد.
- خطای حالت ماندگار غیر صفر به ورودی پله واحد.
- عدم وصول برخی خواسته ها. (انتخاب جای دقیق قطب ها دست ما نیست)

کنترل کننده **PD** :

- پایداری سیستم و پاسخ محدود به ورودی پله واحد.
- خطای حالت ماندگار غیر صفر به ورودی پله واحد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

- وصول خواسته ها ی مطلوب. (انتخاب جای قطب های سیستم)

#### کنترل کننده PI :

- پایداری سیستم و پاسخ محدود به ورودی پله واحد.
- خطای حالت ماندگار صفر به ورودی پله واحد.
- عدم وصول برخی خواسته ها. (انتخاب جای دقیق قطب ها دست ما نیست)

#### کنترل کننده PID :

- پایداری سیستم و پاسخ محدود به ورودی پله واحد.
- خطای حالت ماندگار صفر به ورودی پله واحد.
- وصول خواسته ها ی مطلوب. (انتخاب جای قطب های سیستم)

پس با توضیحاتی که در این فصل داده شد بهترین و کاملترین کنترل کننده از بین کنترل کننده های ذکر شده برای این سیستم (مفصل روبات) کنترل کننده PID است که تمام خواسته های ما را وصول می کند.

#### مراجع

۱- جان کریگ ، ترجمه ی دکتر علی مقداری ، مکانیک و کنترل در رباتیک ، ۱۳۸۵

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

۲- سینماتیک ، دکتر سعید شیری قیداری ، ۱۳۸۵

۳- میانی مهندسی رباتیک ، [www.avaxnet.com](http://www.avaxnet.com) ، ۱۳۹۰

4-Mark W. Spong, Robot Modeling and Control, Jhon Wily & sons Inc, 1976

5-Cosmin Ionete , Robust Control for a Two Revolute Joints Robot Arm , 2000

6- Myoung Hwan Choi, Redundancy Resolution by Minimization of Joint Disturbance Torque for Independent Joint Controlled Kinematically Redundant Manipulators, Seoul National University Korea, 1992

6-Gordon Wyeth , Single Joint Design , University of Queensland , 2002

7-H .I .Christensen , Kinematics , 2006

پیوست

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

برنامه متلب

بدون کنترل کننده :

کنترل کننده **P** :

```

clc;
close all;
t=-5:0.01:5;
s=tf('s');
B=1
J=1
num=1
den=1
sys1=1/(J*s^2+B*s)
sys2=1/(J*s^2+B*s)
figure (1)
subplot 221
step(tf(num,den))
hold all
subplot 222
step(tf(.1*num,den))
u=step(sys1)
d=step(sys2)
theta=u-d

theta1=u-d1
subplot 321
step(tf(num,den))
xlim([-5 5])
ylim([-2 2])
hold all
subplot 322
plot (t,i)
xlim([0 4*pi])
ylim([-2 2])
subplot(3,2,[3 4 5 6])
plot(t,theta1)
xlim([0 8])
figure (4)
e1=i1-theta1
plot (t,e1)

```



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

```

subplot(2,2,[3 4])
plot(theta)
s=tf('s')
B=1
J=1
num=1
den=1
figure (1)
subplot 321
step(tf(num,den))
i1=step(tf(num,den),t)
xlim([-5 5])
ylim([-2 2])
hold all
subplot 322
step(tf(num,den))
xlim([-5 5])
ylim([-2 2])
for kp=[5 30 100]
sys1=kp/(J*s^2+B*s+kp)
sys2=1/(J*s^2+B*s+kp)
u=step(sys1,t)
d=step(sys2,t)
xlim([0 20])
کنترل کننده PD :
end
kp=20
kd=20
figure (f+2)
d2=sin(t)
d1=lsim(sys2,d2,t)
theta1=u-d1
subplot 321
step(tf(num,den))
xlim([-5 5])
ylim([-2 2])
hold all
subplot 322
subplot 322
plot (t,d2)
xlim([0 4*pi])
ylim([-2 2])
subplot(3,2,[3 4 5 6])
plot(t,theta1)
xlim([0 8])
figure (f+3)
e1=i1-theta1

```

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

```

theta=u-d
figure (1)
subplot(3,2,[3 4 5 6])
hold all
plot(t,theta)
xlim([0 12])
figure (2)
e=i1-theta
plot (t,e)
xlim([0 20])
hold all
end
kp=20
ki=20
figure (f+2)
d2=sin(t)
d1=lsim(sys2,d2,t)
theta1=u-d1
subplot 321
step(tf(num,den))
xlim([-5 5])
ylim([-2 2])
hold all
subplot 322
plot (t,d2)
xlim([0 4*pi])
ylim([-2 2])
subplot(3,2,[3 4 5 6])
plot(t,theta1)
xlim([0 40])
figure (f+3)

```

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

```

den=1
figure (1)
subplot 321
step(tf(num,den))
i1=step(tf(num,den),t)
xlim([-5 5])
ylim([-2 2])
hold all
subplot 322
step(tf(num,den))
xlim([-5 5])
ylim([-2 2])
f=2
for kp=[2 5 10]
for kd=[0.1 2 5 10 40]
sys1=kp/(J*s^2+(B+kd)*s+kp)
sys2=1/(J*s^2+(B+kd)*s+kp)
u=step(sys1,t)
d=step(sys2,t)
theta=u-d
figure (f)
hold all
plot(t,theta)
xlim([0 100])
e1=i1-theta1
plot (t,e1)
xlim([0 20])
کنترل کننده PID :
end
f1=f+2
f=f1
end
kp=20
ki=20
figure (f+2)
d2=sin(t)
d1=lsim(sys2,d2,t)
theta1=u-d1
subplot 321
step(tf(num,den))
xlim([-5 5])
ylim([-2 2])
hold all
subplot 322
plot (t,d2)

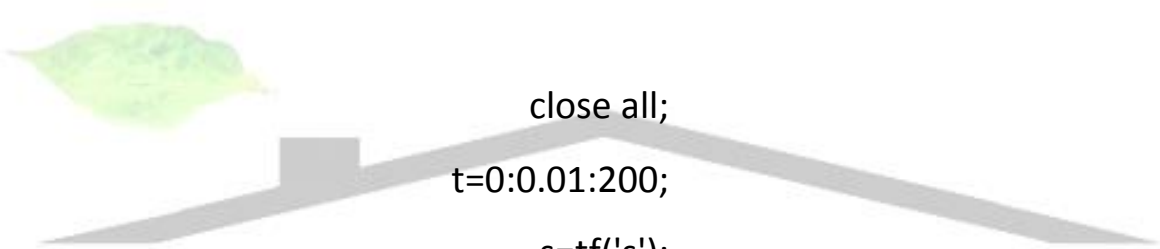
```

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

```

figure (f+1)                xlim([0 4*pi])
e=i1-theta                  ylim([-2 2])
plot (t,e)                  subplot(3,2,[3 4 5 6])
xlim([0 100])               plot(t,theta1)
hold all                    xlim([0 40])
end                          figure (f+3)
f1=f+2                      e1=i1-theta1
f=f1                        plot (t,e1)
                             xlim([0 20])

```



```

close all;
t=0:0.01:200;
s=tf('s');
B=1
J=1
num=1
den=1
figure (1)
subplot 321
step(tf(num,den))
i1=step(tf(num,den),t)
xlim([-5 5])
ylim([-2 2])

```

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

```
hold all
subplot 322
step(tf(num,den))
xlim([-5 5])
ylim([-2 2])
f=2
for kp=[18 30 40]
for ki=[1 5 15]
sys1=(kp*s+ki)/(J*s^3+B*s^2+kp*s+ki)
sys2=s/(J*s^3+B*s^2+kp*s+ki)
u=step(sys1,t)
d=step(sys2,t)
theta=u-d
figure (f)
hold all
plot(t,theta)
xlim([0 15])
figure (f+1)
e=i1-theta
plot (t,e)
xlim([0 15])
hold all
end
f1=f+2
```

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

```
f=f1
```

```
close all;
```

```
t=0:0.01:200;
```

```
s=tf('s');
```

```
B=1
```

```
J=1
```

```
num=1
```

```
den=1
```

```
figure (1)
```

```
subplot 321
```

```
step(tf(num,den))
```

```
i1=step(tf(num,den),t)
```

```
xlim([-5 5])
```

```
ylim([-2 2])
```

```
hold all
```

```
subplot 322
```

```
step(tf(num,den))
```

```
xlim([-5 5])
```

```
ylim([-2 2])
```

```
f=2
```

```
kd=50
```

```
for kp=[5 30]
```

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

```
for ki=[1 5 15]
```

```
O=(J*s^3+(B+kd)*s^2+kp*s+ki)
```

```
sys1=(kp*s+ki)/O(s)
```

```
sys2=s/O(s)
```

```
u=step(sys1,t)
```

```
d=step(sys2,t)
```

```
theta=u-d
```

```
figure (f)
```

```
hold all
```

```
plot(t,theta)
```

```
xlim([0 60])
```

```
figure (f+1)
```

```
e=i1-theta
```

```
plot (t,e)
```

```
xlim([0 60])
```

```
hold all
```