ISME2013-1981

شناسایی تجربی مجموعه پیشرانش کوادرتور با استفاده از الگوریتم RLS و بهینه سازی اطلاعات استخراج شده با الگوریتم ژنتیک برای کنترلگر PID

سجاد محمودی [۱] ، سمیه‌نوروزی غضبی [۲] ، سمانه‌امینی [۳] ، محمدحسن جوارشکیان [۴]
[۱] دانشگاه فردوسی مشهد ، دانشکده مهندسی، دانشجوی کارشناسی ارشد، Sajadmahmoudi@yahoo.com
[۲] دانشگاه فردوسی مشهد ، دانشکده مهندسی، دانشجوی کارشناسی ارشد، Somaye_noroozi@yahoo.com
[۳] دانشگاه فردوسی مشهد ، دانشکده مهندسی، دانشجوی کارشناسی ارشد، Amini.samane@ymail.com
[۴] دانشگاه فردوسی مشهد ، دانشکده مهندسی، دانشیار مهندسی مکانیک، Javareshkian@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

در این تحقیق اطلاعات حرکت یک روتور شامل ولتاژ، دور و جریان توسط روش تجربی استخراج و تابع شناسائی آن با روش الگوریتم RLS پیدا شده، سپس اطلاعات استخراجی با الگوریتم ژنتیک بهینه و توسط کنترگر PID استفاده شده است. در این آزمایش جهت شناسایی مدل دینامیکی موتور بدون جاروبک جریان-مستقیم (BLDC موتور) مورد استفاده قرار گرفته است. موتوری که در این تحقیق به شناسایی آن پرداخته می‌شود به صورت متداول در ساخت کوادروتور کاربرد دارد و بخشی از دینامیک کلی چهار روتور را تشکیل می‌دهد. پارامترهای این مدل با استفاده از نمونه برداری از نتایج آزمایشگاهی و الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی شناسایی می-شود. در پایان مدل موتور با استفاده از کنترلگرPID که با بکارگیری الگوریتم ژنتیک بهینه شده‌است، کنترل و پایدار می‌شود.

واژه های کلیدی

شناسایی تجربی- کوادروتور- الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی- موتور بدون جاروبک جریان مستقیم

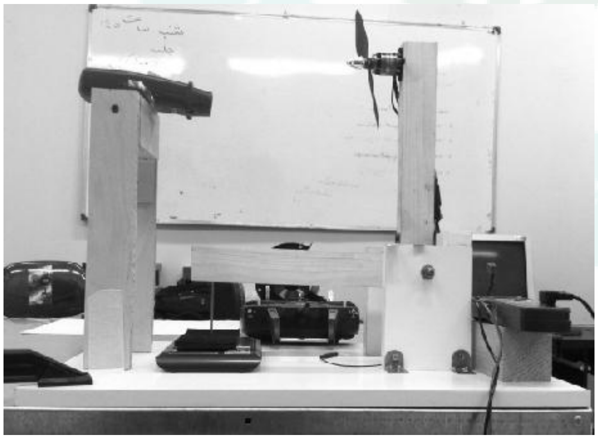
مقدمه

امروزه طراحی سیستمهای کنترلی از نیازهای ضروری می‌باشد. تکنیک‌های جدید کنترلی برای مدلسازی‌فرآیندها از زمینه‌های تحقیقاتی می‌باشد. دربسیاری از سیستم‌ها، بواسطه فقدان دانش دقیق وساختاریافته دررابطه با سیستم،که ناشی از رفتارشدیدا غیرخطی، درجه بالای نامعینی یا مشخصات متغیر با زمان آن است روش‌های متداول مدلسازی قابل استفاده نیست. از آن‌جا که در دهه اخیر علاقه قابل توجهی از سوی صنعت، دولت ها و دانشگاه‌ها به طراحی وسایل بدون سرنشین با قابلیت پرواز و فرود عمودی نشان داده شده است[۱]؛ در این پژوهش با توجه به اهمیت در دست-داشتن مدل دقیق مجموعه پیشرانش این پرنده جهت افزایش راندمان و دقت کنترل مجموعه‌ی موتور و ملخ به شناسایی مجموعه پیشرانش کوادراتور و کنترل آن پرداخته شده‌است. شناسایی در این پژوهش با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی که روشی قدرتمند و متداول در شناسایی سیستم ثابت با زمان است صورت می‌پذیرد. این روش در یک مرحله به شناسایی پارامترهای مجهول مدل سیستم می‌پردازد که در مقایسه با شناسایی مجهولات در معادلات تحلیلی و پس از آن محاسبه‌ی مدل نهایی سیستم بر اساس معادلات با ضرایب معلوم چون کار دی لوئیس و همکاران (۲۰۱۱) [۴] از سادگی بسیار قابل توجهی برخوردار است. همچنین شناسایی با الگوریتم RLS نسبت به شناسایی با روش شبکه‌های عصبی، تحقیق کورولوگو و همکاران (۲۰۰۹) [۲] از مزیت بدست دادن معادله‌ی خطی شده سیستم برخوردار است.

به منظور شناسایی سیستم نیاز است تا داده‌های ورودی و خروجی سیستم در دسترس باشد که در این مقاله داده‌های مورد نیاز به کمک دستگاه اندازه‌گیری نیروی پیشران ساخته‌شده بدست آمده است. پس از شناسایی، کنترلگر PID جهت کنترل سیستم، مورد استفاده قرار گرفت که پارامترهای آن با کمک الگوریتم ژنتیک بهینه شده است. بمنظور اعتبارسنجی، نتایج شناسایی با یک مدل موتور مشابه در بخش ارزیابی شناسایی مورد مقایسه قرار گرفته است.

دستگاه اندازه‌گیری نیروی پیشرانش

همان طور که در شکل ۱ می بینید، برای اندازه‌گیری نیروی پیشران موتور و پره و همچنین اثر پارامترهای مختلف موثر بر روی نیروی پیشران از دستگاه فوق استفاده شده است.



شکل ۱: دستگاه اندازه‌گیری نیروی پیشران ساخته شده در آزمایشگاه ریزپهباد

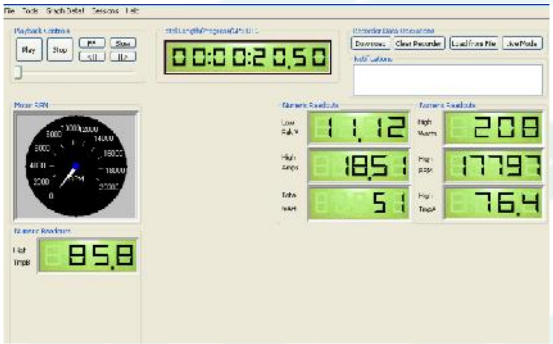
تست رانش برای مشخص کردن ترکیب‌های مختلف از موتور و ملخ به عنوان گزینه‌های مناسب برای نیروی مورد نیاز در ریزپهباد مورد نظر انجام می‌شود. برای انجام آزمایش، باید یک سیستم با قابلیت بررسی این پارامترها طراحی و ساخته می‌شد که به طور موثر به نمایش معادل اثر آن پارامترها روی نیروی پیشرانش در هر ترکیب موتور و پروانه بپردازد. با توجه به تجربیات مختلفی که گروه ویرجینیا[۳] داشتند، از تجربیات آنها در طراحی و ساخت و ساز مکانیزم مورد نظر استفاده شد. در نهایت هم با توجه به مفید بودن، دقیق بودن و همچنین ساده بودن و کم هزینه بودن، دستگاه مورد طراحی و ساخت قرار گرفت. دستگاه اندازه‌گیری ساخته شده متشکل است از : ترازوی دیجیتال، بازوی L شکل، اتصالات و اهرمها، برد الکتریکی، باتری، کنترلگر سرعت، رادیوکنترل، تاکومتر، آمپرمتر، ولت‌سنج، کامپیوتر خارج خط، موتور و ملخ.

در این دستگاه ترازوی دیجیتال به جهت اندازه‌گیری نیروی پیشرانش با دقت دهم گرم، مورد کاربرد قرار گرفته است. برای انتقال نیروی پیشرانش از موتور و پره به ترازو با توجه به امکانات و ساده بودن آن، از بازویی L شکل استفاده شد. در قسمت بالای(عمودی) بازو موتور و پره در یک مکان مشخص نصب گردیده‌اند و در قسمت افقی اهرم یعنی محل ارتباط اهرم با ترازو ابتدا سوراخی توسط دریل در آن تعبیه شد و یک میله آهنی که دقیقا در مکان با فاصله مشخص نسبت به موتور نصب شده در راستای عمودی اهرم نصب گردید. برای آنکه این اهرم به طور کاملاً ثابت و بدون لرزش نصب گردد از یک پایه با طراحی خاص استفاده گردید، بطوریکه اهرم نسبت به ترازو کاملاً عمود قرار گرفت و همچنین برای عدم انتقال و حذف و به حداقل رساندن هرگونه نیرو از جمله نیروی اصطکاک و حرکت جانبی توسط پره و موتور به پایه، از بلبرینگ استفاده شد، بلبرینگ ها دقیقا در مرکز اتصال قسمت افقی و عمودی اهرم نصب گردید، همچنین برای ارتباط دادن اهرم و پایه با بلبرینگ از یک میله فولادی دو سر- رزوه استفاده شد. اگر طول قسمت عمودی اهرم را r_T و طول قسمت افقی اهرم را r_F بنامیم. طوری این بازو طراحی و ساخته شد که $r_F=r_T$ بوده و همین‌طور که در بالا اشاره شد محل نصب پره و موتور در قسمت عمودی دقیقاً برابر طولی است که میله رابط بین ترازو و قسمت افقی اهرم نصب گردیده بوده است. ازاین رو نیروی پیشرانش و نیروی برآیی که بواسطه حرکت و دوران پره و موتور تولید می‌شود دقیقا به ترازو منتقل گردیده و محاسبات می‌تواند با کمترین خطا با توجه به حساسیت بالای ترازو حاصل گردد.

در ادامه ادوات الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته توضیح داده می‌شود.

تجهیزات الکتریکی

موتور انتخاب شده برای آزمایش EMAX 6T2215/ 09 است که از نوع بدون جاربک بوده و برای تامین قدرت و توان راه‌اندازی آن از یک باتری 3Cell استفاده گردید. همچنین برای اعمال سرعت‌ها و دورهای مختلف به موتور وارد کنیم و اثر آن را روی پارامتر های مختلف، مثلا نیروی پیشرانش، ولتاژ، توان، آمپر و گشتاور، یک دستگاه تنظیم کننده سرعت استفاده کردیم. چون دقت اندازه‌گیری در دورهای مختلف بسیار حائز اهمیت است و اثر بسیار بالایی در نتیجه‌گیری دارد، از دو دستگاه برای انتقال اطلاعات به موتور مربوطه استفاده گردید، رادیو کنترل به همراه رسیور و همچنین کارت دک که به منظور اعتبارسنجی داده‌های دریافتی رسیور مورد استفاده قرار گرفت برای اعمال دور مشخص به موتور، ابتدا یک رسیور در مدار قرار داده شد و از طریق رادیو، دور مورد نظر بطور آنالوگ به موتور منتقل می‌گردید. و همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، اطلاعات نمایش داده می‌شد.



شکل ۲:نمایش اطلاعات اطلاعات برد پردازشگر برروی کامپیوتر

همچنین به منظور بررسی صحت سرعت زاویه‌ای بدست‌آمده، در هرمحله سرعت زاویه‌ای توسط تاکومتر رصد گردیدهمین‌طور برای اندازه‌گیری ولتاژ، توان و آمپر مصرفی در هر دور مشخص، از ولت‌متر و آمپرمترهای مخصوص که دقت بسیار بالایی برخوردارند استفاده شده‌است. در ادامه . نحوه عملکرد دستگاه شرح داده می‌شود.

نحوه عملکرد دستگاه

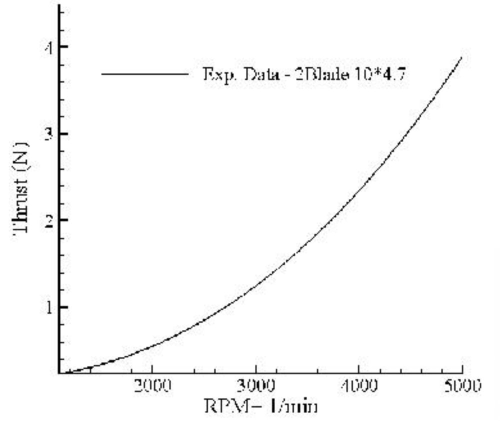
در ابتدا توسط کامپیوتر و یا رادیو کنترل یک دور مشخص برای موتور انتخاب می‌شود، سپس از طریق اهرم مورد نظر نیروی پیشرانش تولیدی توسط موتور به ترازو منتقل شده و به نمایش گذاشته می‌شود که این نیرو برابر نیروی پیشرانش در پرواز افقی و یا برابر نیروی برآ در پرواز عمودی است . همچنین از طریق دورسنج لیزری دور موتور چک شده و با استفاده از ولت‌سنج و آمپرمتر، ولتاژ، آمپر و توان مصرفی در یک دور مشخص موتور و پره حاصل می‌گردد. سپس در دورهای مختلف پارامترهای فوق اندازه‌گیری شده و از آن حالت بهینه با توجه به هدف مورد نظر انتخاب می‌گردد. این دستگاه قابلیت بررسی اثر پارامترهای مختلف آیرودینامیکی برروی نیروی پیشرانش را دارا می باشد. به طور مثال بررسی اثر تعداد پره، اثر طول پره، اثر گام پره، اثر زمین، و همچنین اثر دو پره و فاصله قرارگرفتن آنها از یکدیگر بر روی نیروی پیشرانش تولیدی توسط موتور و پره را

دارا می‌باشد. که در تحقیق حاضر به بررسی اثر دور پره بر روی پارامترهای مذکور پرداخته شده است.

نتایج حاصل از اثر دور بر روی پارامترهای مختلف موتور و ملخ دو پره ۱۰×۴/۷که در شکل۳ مشاهده می‌شود، در شکل‌های زیر که به صورت تجربی اندازه‌گیری شده، نشان داده شده است.

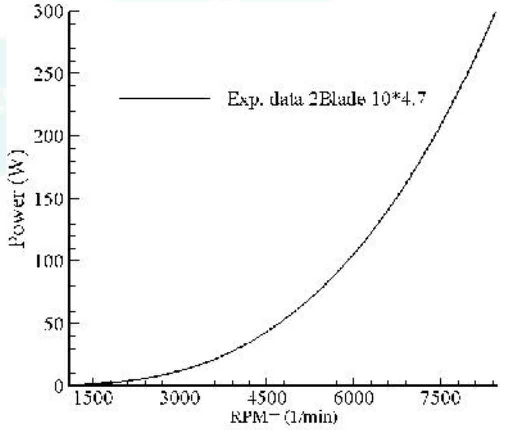
شکل ۳:ملخ دوپره ۱۰×۴/۷ مورد استفاده شده در این تحقیق

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، با افزایش دور نیروی پیشرانش تولیدی حاصل از موتور و پره افزایش می‌یابد. اما این افزایش نیروی تراست، روی برخی از پارامترهای دیگر اثر می گذارد که در شکل‌های بعدی قابل مشاهده است.



شکل ۴: نتایج تجربی اثر دور بر نیروی پیشرانش

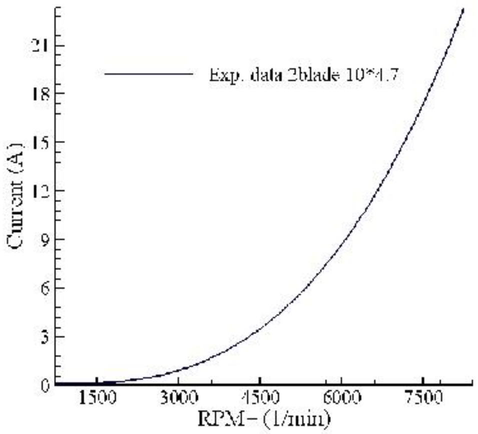
در شکل۵ مشاهده می‌شود که افزایش دور در حالی که نیروی پیشرانش تولیدی حاصل از موتور و پره افزایش می‌یابد، اثر قابل توجی بر توان مصرفی موتور دارد و باعث می‌شود در یک بازه زمانی مشخص باتری زودتر خالی شود و این زمان استفاده از باطری را کم می‌کند. لذا باید با توجه به هدف از ساخت ریزپهباد مورد نظر، نیروی پیشرانش مورد نیاز آن را تامین نمود.



شکل ۵: نتایج تجربی اثر دور بر روی توان مصرفی موتور و پره

همچنین مشاهده می‌شود در بازه‌ی دورهای بین ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ دوربر دقیقه تغییرات توان مصرفی نسبت به افزایش دور با شیب کمتری مواجه است که این امر نکته قابل توجهی است، چراکه در این بازه ما می توان با یک توان مصرفی ثابت، نیروی پیشرانش بیشتری را با افزایش دور تولید نمود.

همچنین همانطور که از شکل ۶ بر میاید، اثر دور بر روی آمپر مصرفی موتور و پره به صورت افزایشی است، و با افزایش دور جریان مصرفی آنها افزایش می یابد، اما نکته قابل توجه آن است که، همانطور که در نمودار دور برحسب توان مشاهده کردیم در بازه دورهای از ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ تغییرات جریان مصرفی موتور و پره نسبت به دور کم است، و این نکته به ما کمک خواهد کرد که در یک جریان مصرفی تقریبا ثابت، بتواتیم با افزایش دور، نیروی پیشرانش بیشتری تولید کنیم، و این مسئله بسیار مهم و قابل توجه خواهد بود.



شکل ۶: نتایج تجربی اثر دور بر روی آمپر مصرفی موتور و پره

از نتایج بدست آمده به منظور شناسایی مجموعه پیشرانش که در آن ولتاژ به عنوان ورودی سیستم و دور به عنوان خروجی در نظر گرفته شده است، استفاده می‌شود.

شناسائی با الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی

یکی از پرکاربردترین روش‌های شناسایی سیستم‌ها، استفاده از الگوریتم RLS می‌باشد. برای سیستم های ثابت با زمان، سرعت همگرایی این روش بالا بوده و مربع خطای تخمین آن کم می باشد[۴].

مدل موتور را در حالت گسسته به صورت ذیل در نظر گرفته‌می‌شود:

$$\frac{y(t)}{u(t)}=\frac{B(q)}{A(q)}=\frac{b_1}{q^2+a_1q+a_2} \qquad (۱)$$

مرتبه‌ی مدل از مرجع ... انتخاب شده است.مدل انتخاب شده دارای یک پارامتر مجهول در صورت (b_1) و دو پارامتر مجهول در مخرج (a_1 و a_2) می‌باشد.

در اینجا ساختار مدل به صورت معادله‌ی تفاضلی در مسئله شناسایی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - a_2 y(t-2) + b_1 u(t-2) \qquad (۲)$$

می‌توان مدل سیستم را به صورت $y(t) = \ddot{\ }(t)\bar{\ }$ در نظر گرفت که ماتریس تتا ماتریس ضرایب مجهول صورت و مخرج بوده و ماتریس ¨ ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم در زمان‌های متوالی هستند. هدف از شناسایی تخمین ماتریس θ می‌باشد.

بر اساس قاعده‌ی حداقل مربعات ، پارامترهای مجهول یک مدل ریاضی باید چنان انتخاب شوند که مجموع مربعات اختلاف بین مشاهده‌ی واقعی و مقادیر محاسبه شده ضرب در اعدادی که مقدار دقت را تعیین می‌کنند کمینه شود. تابع معیار حداقل مربعات برای مساله‌ی رگرسیون بصورت نشان داده شده در ذیل است:

$$V(\bar{\ },t) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{t}\left(y(i) - \ddot{\ }^{T}(i)\bar{\ }\right)^2 \qquad (۳)$$

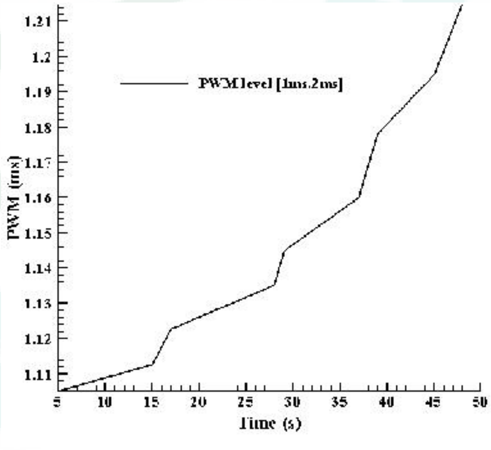
تابع معیار فوق به ازای θ نشان داده شده در زیر دارای مقدار کمینه خواهد بود:

$$\tilde{\ } = (\ddot{\ }^{T}\ddot{\ })^{-1}\ddot{\ }^{T} y \qquad (۴)$$

شرط یکتایی ماتریس مجهول شناسایی شده غیر منفرد بودن $\ddot{\ }^{T}\ddot{\ }$ (ماتریس نرمال) است.

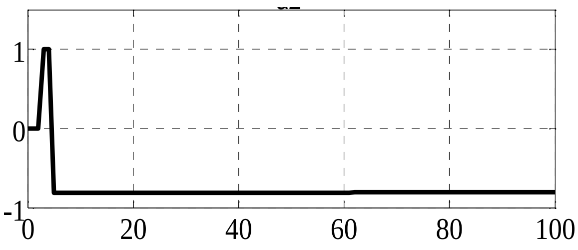
شبیه‌سازی

به منظور مدلسازی رفتار واقعی سیستم چندین تست تجربی انجام شده است. در یکی از این تست‌ها PWM مطابق شکل ۷ تغییر نموده‌است.

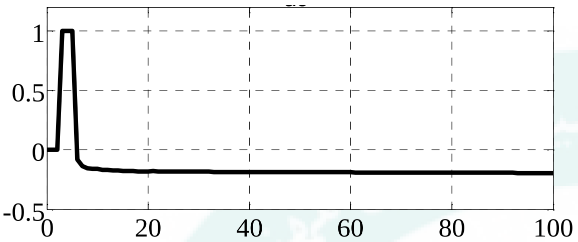


شکل ۷: تغییرات PWM نسبت به زمان

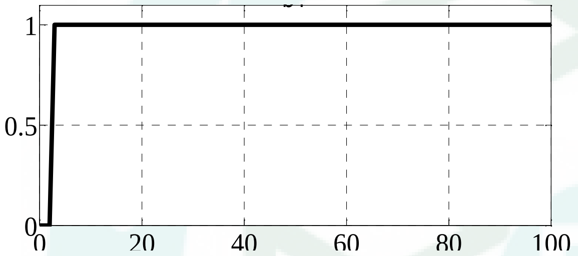
در شکل‌های ۸ تا ۱۰ تغییرات پارامترهای مدل بر حسب زمان نشان داده شده است.



شکل ۸: تخمین پارامتر a_1



شکل ۹: تخمین پارامتر a_2



شکل ۱۰: تخمین پارامتر b_1

همانطور که مشاهده در نمودارهای ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌شود پارامترها به صورت خوبی همگرا شده‌اند. بنابراین تابع تبدیل مدل بصورت زیر بدست می‌آید.

$$G(q) = \frac{1}{q^2 - 0.804q - 0.1947} \qquad (۵)$$

ارزیابی شبیه سازی

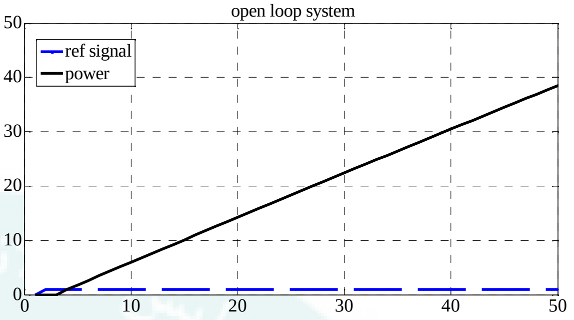
در این بخش مدل بدست آمده با نتیجه کار دی لویس[۵] که در تحقیق خود به شناسایی مدل موتور بدون جاروبک جریان- مستقیم مشابهی پرداخته است مقایسه میشود. دی لویس، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی پارامترهای موتور را شناسایی نموده و با توجه به مدل ارائه شده توسط کریشمن [۶] تابع تبدیل موتور را به صورت رابطه‌ی (۵) تخمین زده است.

$$G(q) = \frac{2.64}{q^2 - 1.338q - 3.115} \qquad (۶)$$

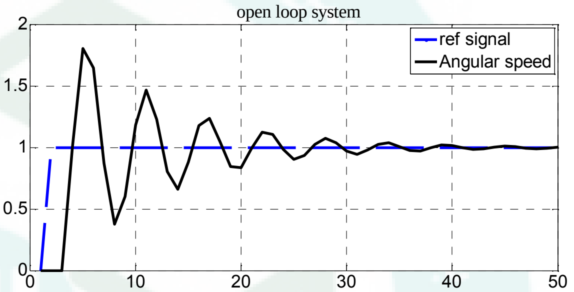
مقایسه‌ی مدل شناسایی شده در این مقاله با مدل تخمینی دی لویس تاییدگر روش شناسایی به کار گرفته شده و مدل تخمینی است.

بررسی دینامیک موتور

در این بخش به بررسی و مقایسه مدل سیستم حلقه باز و حلقه بسته پرداخته می‌شود.. پاسخ گسسته سیستم حلقه باز و حلقه بسته به ازای ورودی پله در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۱: پاسخ سیستم حلقه باز موتور



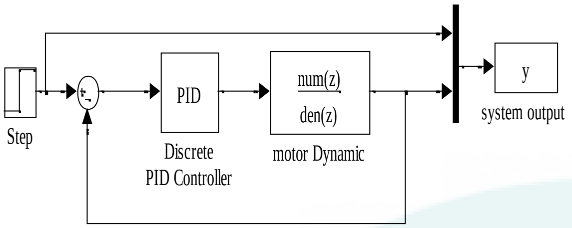
شکل ۱۲: سیستم حلقه بسته موتور

با توجه به شکل های ۱۱و۱۲ زمان نشست سیستم در حدود ۴۰ ثانیه می‌باشد که زمان بسیار زیادی است. همچنین فراجهش ۸۰.۴۰٪ خروجی ممکن است به سیستم اختلال وارد کند. در ادامه با طراحی کنترلگر PID سعی در رفع مشکلات بوجود آمده خواهیم داشت.

تنظیم پارامترهای کنترلگر PID

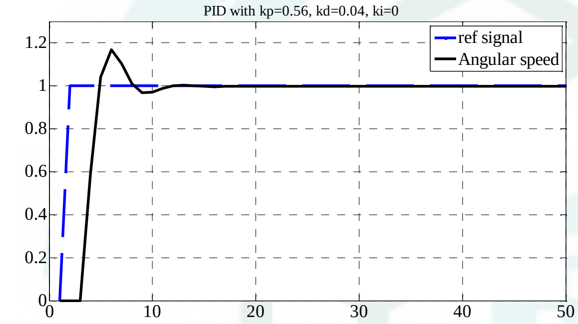
یکی از مهمترین مسائلی که مهندسین کنترل در طراحی سیستمهای کنترل با آن روبرو هستند تعیین مقادیر پارامترهای کنترلگر می‌باشد. در این راستا هر طراح سیستم کنترلی پس از انتخاب نوع کنترلگر برای یک سیستم باید به تعیین پارامترهای کنترلی بپردازد. پارامترهای کنترلگر باید طوری انتخاب شوند که سیستم مدار بسته بهترین رفتار مورد نظر را داشته باشد. برای بدست آوردن بهترین عملکرد کنترلگر PID و تعیین پارامترهای مربوط به کنترلگر در عمل روشهای مختلفی وجود دارد. یکی از متداول ترین این روشها، سعی وخطا می‌باشد. در این بخش کنترلگر را در مسیر خطای حاصل از خروجی سیستم و سیگنال مرجع قرار داده تا خطای حالت ماندگار را کاهش دهد (شکل ۱۳). توجه شود که هدف در این قسمت به دست آوردن سه ضریب کنترلگر PID یعنی k_p, k_i, k_d با توجه به معادله (۱۲)می باشد.

$$G(S)=k_p+\frac{k_i}{S}+k_dS \qquad (۷)$$



شکل ۱۳: مدل سیمولینک سیستم حلقه بسته با اعمال PID

نتایج به دست آمده از طراحی پارامترهای کنترلگر بعد از سعی وخطا های متعدد در شکل(۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۴: تغییرات قدرت موتور با اعمال کنترلگر PID

پارامترهای کنترلی k_p=0.56, k_d=0.04, k_i=0 برای کنترلگر PID شده اند. همانطور که مشاهده می شود خطای حالت ماندگار کاهش یافته است. با این وجود میزان فراجهش سیستم در حدود ۱۶.۹۹٪ و زمان نشست در حدود ۱۵ ثانیه می‌باشد. ضمن اینکه تنظیم پارامترهای کنترلگر PID به روش سعی و خطا عملی زمان بر می باشد.

بهینه سازی پارامترهای PID با اعمال الگوریتم ژنتیک

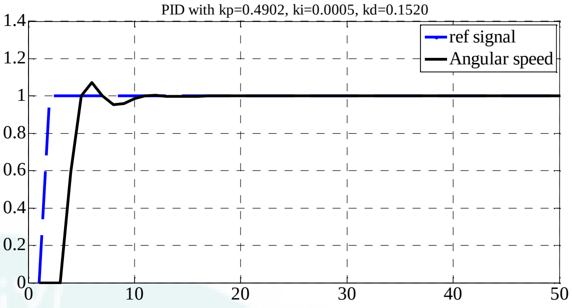
الگوریتم ژنتیک نخستین بار توسط جان هلند در طول سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ توسعه داده شد که با الهام گیری از تئوری تکامل و اصول ژنتیک به جستجوی راه حل مناسب برای مسائل می‌پردازد.

منطق ریاضی روش الگوریتم ژنتیک سعی بر این دارد که با حداقل نمودن یک تابع ارزشیابی یا تابع هدف[۱] ، خروجی سیستم کنترلی را بهینه نماید[۲].

تابع هدف در این پژوهش با کدنویسی در نرم افزار متلب، برای حداقل نمودن خطای حالت ماندگار سیستم نوشته شده است و با به

[۱] Cost Function

کارگیری دستور GA پارامترهای دقیق کنترلی PID را به دست آمده است(شکل۱۵).



شکل ۱۵: طراحی کنترلگردور موتور با به کارگیری الگوریتم ژنتیک

پارامترهای کنترلگر PID در این روش مقادیر k_p= 0.4902 و k_i=0.0005, k_d=0.1520 می باشند. همانطور که از نمودار مشاهده می شود، سیستم دارای فراجهش ۷.۱۸٪ می باشد، خطای حالت ماندگار سیستم کاهش یافته و سیستم پایدار می باشد، زمان نشست به ۱۰ ثانیه کاهش یافته است. علاوه بر این یافتن پارامترهای کنترلگر در مدت زمان کمی از دیگر مزایای به کارگیری این روش می‌باشد.

نتیجه گیری

در این مقاله به شناسایی پارامترهای موتور بدون جاروبک جریان مستقیم پرداخته شد. جهت تامین داده‌های مورد نیاز شناسایی یک دستگاه اندازه گیری نیروی پیشرانش، مورد طراحی و ساخت قرار گرفت. نتایج شناسایی با کار دی لویس مورد مقایسه قرار گرفت و صحت شناسایی تایید گردید. همانطور که در شکل (۴) مشاهده به دلیل عدم استفاده از کنترلر نمودار خروجی سیستم مناسب نیست. با به کارگیری کنترلرPID در سیستم کنترلی، سرعت موتور تا حدودی به مقدار مطلوب نزدیک شد اما با توجه به اینکه روش سعی و خطا دقت لازم را نداشته و برای رسیدن به جواب مطلوب زمان زیادی را می طلبد نمودار چندان مناسب نمی باشد. شکل (۸) نمودار تغییرات سرعت موتور را در حالتی که کنترلر PID با روش الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شده، نشان می دهد و ملاحظه می شود که در این حالت سرعت بهتر از روش سعی وخطا ورودی پله واحد را دنبال نمود و زمان نشست تا حد قابل قبول کاهش یافت.. ضمن اینکه تنظیم پارامترهای کنترلگر عملی زمان‌بر می‌باشد.

مراجع

[1] Giorgia Sinibaldi, A., Luca Marino, B., 2012.“ Experimental analysis on the noise of propellers for small UAV”. *Applied Acoustics*, 1(10), July, pp.1–10.

[2] Köroğlu, M., Önder Efe*, M. Experimental Modelling of Propulsion Transients of a Brushless DC Motor and Propeller Pair under Limited Power Conditions: A Neural Network Based Approach, 2009 IFAC

[3] Nate Carlos , A., Ben Cole , B., John cook, C., 2009.“ Rules for the International Aerial Robotics Competition 5th Mission. [Online] [Cited: December 11, see also URL: http://iarc.angelstrike .com /IARC_5th_Mission_ Rules.pdf.

[۴] دورعلی محمد، فتحی علیرضا؛۱۳۸۴. استفاده از تخمین‌گر بازگشتی حداقل مربعات (RLS) در مدلسازی به هنگام فرایند رسوب‌دهی لیزری پودر. سیزدهمین کنفرانس سالانه (بین المللی) مهندسی مکانیک- اردیبهشت ۱۳۸۴- دانشگاه صنعتی اصفهان.

[5] De Lellis, M., 2011. “Modeling, Identification and control of quadrotor aircraft”. MS Thesis, Czech Technical University of Prague, Cambridge, June, See also URL: http://pure.ltu.se/portal/files/33687298/LTU-EX-2011-33633120.pdf

[6] Krishnan.R.,2010.” Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives”. CRC Press, 1st edition.

[۷] صفایی مهدی، رفعت محسن، حسنی رضا، "طراحی و بهینه سازی کنترلگر PID برای دینامیک جانبی خودرو به کمک الگوریتم ژنتیک". نخستین کنگره ملی توسعه خوشه صنعتی خودرو، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، ۱۳۹۱.