



Semnan University



Research Article

Modeling the Load System of the Helicopter Engine Test Bench and Designing the Developed Gain-Scheduling Adaptive PI Controller

Khalil saghi ^a, Abbass dideban ^{b,*}, Y. Alinejad-Beromi ^c

^a Ph.D. Student, Department of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

^b Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

^c Associate Professor, Department of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received:
Revised:
Accepted:

Keywords:

Modeling;
Adaptive
controller;
Helicopter
engine;
Developed Gain-
Scheduling;
Nonlinear
behavior;

ABSTRACT

The helicopter engine test bench is a safe environment for checking the performance of the engine in its various operational areas. In order to check the performance of the engine in different operating areas, a load application system is needed. The torque generated by this system has a strong non-linear relationship with the angular velocity of the shaft and the vortex velocity of the fluid. The linear controller does not perform well in the face of the nonlinear behavior of the dynamometer and it fluctuates strongly in different areas. In this paper, by examining and studying the behavior of dynamometer and helicopter engine in different functional areas, models of engine and dynamometer torque production are presented in relation to effective input parameters. According to the nonlinear behavior of the dynamometer, a developed gain-scheduling adaptive PI controller is designed. The performance of this controller is simulated in the MATLAB software environment with the extracted model. To implement the controller, the time characteristics of the control system components are extracted by considering the controller loop time. The controller is executed in the real system with the designed hardware. The performance of the controller is investigated in different areas of required performance tests. Due to the fact that the linear controller adjusted in each functional area had severe fluctuations in other areas, Experiments showed that the developed gain-scheduling adaptive controller has no fluctuation in all functional areas of the engine and has an error of less than 0.5% in the stable state.

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: adideban@semnan.ac.ir

How to cite this article:

مدل سازی سامانه بار آزمایشگاه موتور بالگرد و طراحی کنترل کننده PI تطبیقی به روش جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته

خلیل ساقی^۱، عباس دیدبان^{۲*} و یوسف علینژاد برمی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله:	آزمایشگاه موتور بالگرد محیطی ایمن برای بررسی عملکرد موتور در نواحی مختلف عملیاتی موتور
بازنگری مقاله:	می باشد. برای بررسی عملکرد موتور در نواحی مختلف عملیاتی نیاز به سامانه اعمال بار می باشد.
پذیرش مقاله:	گشتاور ایجاد شده این سامانه رابطه غیرخطی شدید با سرعت زاویه‌ای شفت و سرعت گردابی
واژگان کلیدی:	سیال دارد. کنترل کننده خطی کلاسیک در مواجهه با رفتار غیر خطی داینامومتر عملکرد مناسبی
مدل سازی،	ندارد و در نواحی مختلف دچار نوسان شدید می شود. در این مقاله با بررسی و مطالعه رفتار
داینامومتر،	داینامومتر و موتور بالگرد در نواحی مختلف عملکردی موتور، مدل های تولید گشتاور موتور و
موتور بالگرد،	داینامومتر نسبت به پارامترهای موثر ورودی ارائه شده است و با توجه به رفتار غیر خطی داینامومتر،
کنترل کننده تطبیقی،	کنترل کننده PI تطبیقی روش جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته طراحی گردیده است. تنظیم
جدول بندی بهره،	پارامترهای کنترل کننده با شبیه سازی در محیط نرم افزار متلب و با استفاده از مدل های استخراج
رفتار غیر خطی،	شده‌ی داینامومتر و موتور بالگرد، انجام شده و عملکرد کنترل کننده مورد بررسی دقیق قرار گرفته
	است. برای تحقق و پیاده سازی کنترل کننده، مشخصات زمان عملکردی قطعات سامانه کنترل با
	مدنظر قراردادن زمان اجرای حلقه کنترل، استخراج شده است. کنترل کننده طراحی شده در
	سامانه‌ی واقعی با سخت افزار طراحی شده اجرا شده است. عملکرد کنترل کننده در نواحی مختلف
	گشتاور تولیدی موتور مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه کنترل کننده خطی تنظیم
	شده در هر ناحیه عملکردی (گشتاور تولیدی موتور) در نواحی دیگر دچار نوسان شدید می شود،
	آزمایشات نشان می دهد، کنترل کننده تطبیقی جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته در تمام نواحی
	عملکردی موتور بالگرد بدون نوسان و دارای خطای کمتر از ۰.۵ درصد در حالت پایا می باشد.

DOI: <https://doi.org/>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه^۱

سرعت زاویه‌ای و توان شفت خروجی بالائی دارد. در صنعت هوائی به خاطر شرایط سخت پروازی و همچنین استهلاک ناشی از سرعت زاویه‌ای بالای توربوشفت نیاز به تعمیرات و بررسی عملکرد دوره ایی موتور می باشد لذا برای بررسی عملکرد ایمن آن نیاز به آزمایشگاه و جایگاه آزمایش^۲

موتورهای توربوشفت نسبت توان به وزن بالائی دارند. ارتعاشات این نوع موتورها نسبت به موتورهای درون سوز بسیار کم می باشد لذا توربوشفت بهترین انتخاب برای محرک های صنعت هوائی مانند بالگرد می باشد. توربوشفت،

استناد به این مقاله:

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: adideban@semnan.ac.ir

² Test Stand

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۲. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

۳. دانشیار بازنشسته، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

می‌باشد. در آزمایشگاه، عملکرد توربوشفت در شرایط مختلف عملیاتی مورد بررسی دقیق قرار می‌گیرد. برای ایجاد شرایط مختلف عملیاتی توربوشفت، نیاز به سامانه اعمال بار می‌باشد تا با اعمال گشتاورهای مختلف به شفت موتور، شرایط مختلف کاری توربوشفت ایجاد شود. بهترین انتخاب سامانه‌ی اعمال بار برای محرک‌هایی مانند توربوشفت که دارای سرعت زاویه‌ای و توان شفت خروجی بالا است، داینامومتر می‌باشد [۱]. مشکل اساسی داینامومترها، رفتار غیر خطی آن در تولید گشتاور نسبت به سرعت زاویه‌ای و سرعت گردابی می‌باشد لذا کنترل دقیق سرعت زاویه‌ای شفت، همراه با مشکلات زیادی همراه است [۱۰-۱]. روش‌های مختلفی در ارتباط با کنترل و مدل‌سازی داینامومتر انجام شده است که به اختصار بررسی می‌گردد.

در مرجع [۱] سرعت زاویه‌ای شفت موتور در یک سامانه موتور الکتریکی کوپل شده به داینامومتر با تنظیم فلوی آب داینامومتر توسط کنترل کننده PID^۳ کنترل شده است. در مرجع [۲] مدل‌های مختلف داینامومتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع نواحی عملکرد مجاز داینامومتر تعریف شده است. با استفاده از منطق فازی پارامترهای کنترل کننده PID، تنظیم شده است. کنترل کننده قابلیت کار در سرعت زاویه‌ای ثابت (قابل کاربرد در سیستم‌های قدرت) و سرعت زاویه‌ای متغیر (سیستم‌های هوایی) می‌باشد. در مرجع [۳] با بررسی و تاکید بر غیر خطی بودن رفتار موتور دیزلی کوپل شده با داینامومتر یک کنترل کننده مدل مرجع چند متغیره طراحی شده است. در مرجع [۴] یک کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع برای کنترل سرعت ارائه شده است. در این مرجع بروز رسانی پارامترها بر اساس نظریه پایداری لیاپانف انجام شده است. در مرجع [۶] یک رویکرد تطبیقی برای کنترل گشتاور موتور احتراقی با وجود تاخیر زمان در سامانه کوپل شده ارائه شده است. در مرجع [۷] برای غلبه بر محدودیتهای ناشی از رفتار غیر خطی داینامومتر یک کنترل کننده گشتاور معکوس بر اساس تقریب وینر ارائه شده است. در مرجع [۸] با تاکید بر رفتار غیر خطی توربوشارژر کوپل شده با داینامومتر و همچنین تاکید بر کاهش کیفیت عملکرد کنترل کننده

کلاسیک PID در درازمدت، اقدام به طراحی کنترل کننده سرعت تطبیقی بر اساس جبران اختلال شده است. در مرجع [۱۰] مدل رفتاری داینامومتر با سه روش مدل‌سازی بر اساس اصول اولیه فیزیکی، مدل‌سازی بر اساس جعبه سیاه و روش مدل‌سازی خاکستری، استخراج شده است. در مرجع [۲۴-۲۱ و ۱۸] ضمن بررسی پارامترهای موثر در تولید گشتاور داینامومتر با شبیه سازی کامپیوتری، کنترل کننده آنالوگ هیدرولیکی طراحی شده است. در مرجع [۲۵] مدل دینامیکی موتور توربوشفت در حالت‌های پایدار و گذرا استخراج شده است. با بررسی منابع مختلف مشخص شد کنترل کننده‌های PID کلاسیک به خاطر رفتار غیرخطی داینامومتر همراه با خطای زیاد و دارای نوسان در عبور از نواحی مختلف توان تولیدی موتور می‌باشد. در این مقاله برای اولین بار با استفاده از کنترل کننده PI^۴ تطبیقی جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته، عملکرد کنترل کننده سامانه بهبود می‌یابد. برای طراحی و پیاده سازی ایمن کنترل کننده، ابتدا با آزمایش‌های جامع مدل تولید گشتاور (موتور بالگرد) و سامانه اعمال بار (داینامومتر) استخراج می‌گردد. برای اولین بار مدل گشتاور تولیدی سامانه بار بر اساس تحریک همزمان شیرهای ورودی و خروجی به منظور افزایش عکس‌العمل داینامومتر استخراج شده است. در محیط متلب کنترل کننده PI تطبیقی جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته طراحی می‌گردد. به منظور پیاده سازی کنترل کننده، زمان حلقه سامانه کنترل کننده با آزمایش‌های مورد نیاز استخراج گردیده است. طراحی سخت‌افزار بر اساس معیار زمان حلقه سامانه انجام شده است. جدول نگاشت پارامترهای کنترل کننده با استفاده از مدل‌های استخراج شده در محیط نرم‌افزاری متلب تکمیل گردیده است. کنترل کننده طراحی شده در محیط سخت افزاری انتخاب شده در یک سامانه واقعی مورد آزمون قرار گرفته است و در انتها عملکرد کنترل کننده طراحی شده مورد ارزیابی دقیق قرار گرفته است.

این مقاله در چهار بخش ارائه می‌گردد. ابتدا مشخصات سامانه آزمایش موتور بالگرد ارائه خواهد شد و در بخش سوم سناریوی مطالعه و طراحی ارائه خواهد شد. در بخش

در مرجع [۱] سرعت زاویه‌ای شفت موتور در یک سامانه موتور الکتریکی کوپل شده به داینامومتر با تنظیم فلوی آب داینامومتر توسط کنترل کننده PID^۳ کنترل شده است. در مرجع [۲] مدل‌های مختلف داینامومتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع نواحی عملکرد مجاز داینامومتر تعریف شده است. با استفاده از منطق فازی پارامترهای کنترل کننده PID، تنظیم شده است. کنترل کننده قابلیت کار در سرعت زاویه‌ای ثابت (قابل کاربرد در سیستم‌های قدرت) و سرعت زاویه‌ای متغیر (سیستم‌های هوایی) می‌باشد. در مرجع [۳] با بررسی و تاکید بر غیر خطی بودن رفتار موتور دیزلی کوپل شده با داینامومتر یک کنترل کننده مدل مرجع چند متغیره طراحی شده است. در مرجع [۴] یک کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع برای کنترل سرعت ارائه شده است. در این مرجع بروز رسانی پارامترها بر اساس نظریه پایداری لیاپانف انجام شده است. در مرجع [۶] یک رویکرد تطبیقی برای کنترل گشتاور موتور احتراقی با وجود تاخیر زمان در سامانه کوپل شده ارائه شده است. در مرجع [۷] برای غلبه بر محدودیتهای ناشی از رفتار غیر خطی داینامومتر یک کنترل کننده گشتاور معکوس بر اساس تقریب وینر ارائه شده است. در مرجع [۸] با تاکید بر رفتار غیر خطی توربوشارژر کوپل شده با داینامومتر و همچنین تاکید بر کاهش کیفیت عملکرد کنترل کننده

³ Proportional Integral Derivative Controller

⁴ Proportional Integral Controller

ورودی را کاهش و آب شیر خروجی را افزایش می‌دهد تا کاهش گشتاور اعمالی سریع انجام گیرد و برای افزایش بار مکانیکی شفت موتور بالگرد عکس این عمل را انجام می‌دهد. این نحوه اعمال سیگنال به شیرهای دینامومتر در مرحله مدلسازی نیز استفاده شده است. سیگنال خروجی کنترل کننده‌ی طراحی شده، سیگنال مرجع اعمالی به کنترل کننده‌ی موقعیت هر یک از شیرهای دینامومتر می‌باشد.

۳- سناریوی مورد مطالعه

در این مقاله بر روی سامانه دینامومتر-موتور بالگرد کوپل شده‌ی شکل (۱) مطالعات و بررسی‌های ذیل انجام شده است.

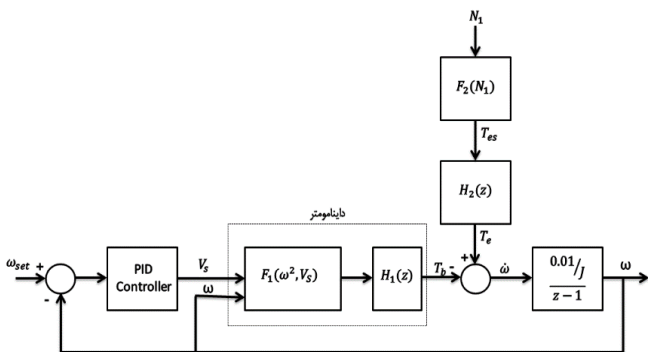
الف) استخراج روابط گشتاور تولیدی موتور بالگرد بر اساس N_1

ب) استخراج مدل گشتاور اعمالی دینامومتر

ج) طراحی کنترل کننده تطبیقی جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته سرعت

د) نحوه طراحی و تحقق سخت افزار سامانه کنترل

بلوک مدل پیشنهادی برای شناسایی و ارائه کنترل کننده سیستم دینامومتر کوپل شده با موتور بالگرد به صورت بلوک دیاگرام شکل (۲) ارائه می‌گردد.



شکل ۲- بلوک دیاگرام دینامومتر-موتور بالگرد کوپل شده

روابط حاکم بر بلوک ارائه شده در شکل (۲) در معادلات (۱) ارائه شده است.

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = T_e - T_b \quad (1)$$

$$T_b = H_1(z) * [F_1(\omega^2, V_s)]$$

$$F_1(\omega^2, V_s) = [V_s^{0.9} * EXP(a_1\omega^{0.5} + a_2V_s) * \omega^2]$$

که در آن:

چهارم تحلیل نتایج عملکرد کنترل کننده در آزمایش واقعی ارائه خواهد شد.

۲- مشخصات سامانه آزمایش موتور بالگرد

برای بررسی عملکرد کنترل کننده و انجام آزمایش‌های این تحقیق از جایگاه آزمایش ارائه شده در شکل (۱) استفاده شده است.



شکل ۱- جایگاه آزمایش موتور بالگرد و دینامومتر مورد مطالعه [۲۷]

مشخصات موتور بالگرد و دینامومتر در جداول (۱) و جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات توربین مدل PT6T-6 Series

ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	سرعت زاویه شفت (نامی)	۶۶۰۰	Rpm
۲	قدرت نامی	۱۸۷۵	Shp

جدول ۲- مشخصات دینامومتر مدل 105-001-096

شرکت Kahn آمریکا

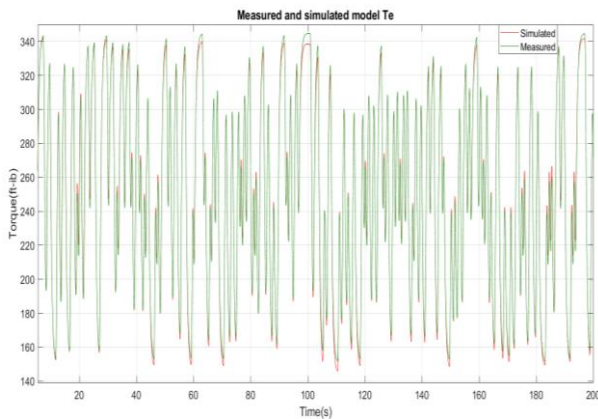
ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	سرعت چرخشی نامی	۷۵۰۰	Rpm
۲	گشتاور نامی	۲۰۳۴	N.m
۳	ممان اینرسی	۳.۳۳	Slug-ft ²
۴	فلوی آب (نامی)	۶۰	Gal/hr
۵	فشار آب ورودی	۵۰	Psig
۶	حداکثر دمای آب ورودی	۳۲	°C

در این مقاله به منظور افزایش سرعت عملکرد دینامومتر به طور همزمان از دو شیر ورودی و خروجی آب دینامومتر استفاده شده است یعنی در صورت نیاز به کاهش بار شفت موتور بالگرد تحت آزمایش با توجه به خروجی تعیین شده، کنترل کننده به طور همزمان و به یک نسبت آب شیر

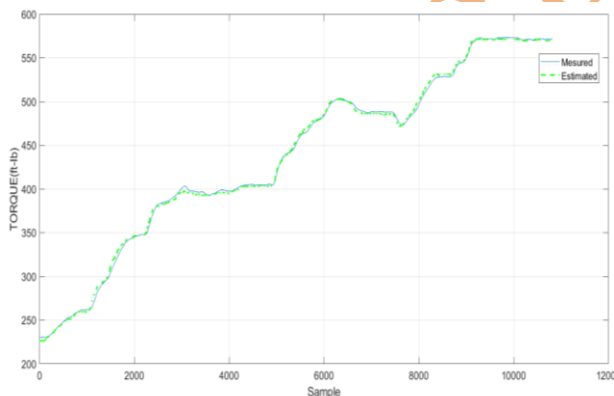
با استفاده از نرم افزار متلب و همچنین داده‌های استخراج شده از طریق آزمایش، مدل نهائی گشتاور تولیدی موتور بالگرد با معیار برازش ۹۵.۲۸ درصد به صورت رابطه (۵) استخراج گردیده است.

$$T_e = \frac{0.02493}{1-0.9751Z^{-1}} [0.5135N_1^2 - 67.8894N_1 + 2295] \quad (5)$$

پاسخ واقعی و پاسخ مدل تخمین زده در شکل (۳) ارائه شده است. پاسخ مدل و داده‌های واقعی ثبت شده در یک آزمایش واقعی در شکل (۴) مقایسه شده است.



شکل ۳- سیگنال گشتاور تولیدی موتور و مدل استخراج شده



شکل ۴- پاسخ مدل استخراج شده گشتاور موتور بالگرد و داده‌های واقعی ثبت شده

ب) استخراج مدل گشتاور اعمالی داینامومتر

برای استخراج مدل گشتاور اعمالی داینامومتر نکات ذیل در نظر گرفته شده است:

ω : سرعت زاویه‌ای شفت موتور بالگرد

V_s : مقدار بازشدگی شیرهای آب ورودی و خروجی داینامومتر

T_b : گشتاور اعمالی داینامومتر به شفت موتور بالگرد

T_e : گشتاور تولیدی موتور بالگرد (اغتشاش ورودی به سامانه بار)

a_1, a_2 : مقادیر ثابت

گشتاور تولیدی موتور بالگرد با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$T_e = H_2(z) * F_2(N_1) \quad (2)$$

که در آن N_1 سرعت موتور بالگرد به درصد می‌باشد. در ادامه نحوه استخراج توابع ارائه خواهد شد:

الف- استخراج مدل گشتاور تولیدی موتور بالگرد بر اساس N_1

این روش با استفاده از ثبت داده‌های سرعت N_1 و اختلاف فشار گیربکس موتور با فاصله زمانی ده میلی ثانیه انجام شده است. گشتاور موتور با استفاده از استخراج مدل کارکردی سامانه اندازه‌گیری گشتاور موتور بر حسب اختلاف فشار از رابطه (۳) بدست آمده است.

$$T_e = 14.38 * P - 41.71 \quad (3)$$

که در آن:

T_e : گشتاور تولیدی موتور بالگرد (ft-lb)

P : اختلاف فشار دو نقطه از گیربکس (psi)

برای استخراج گشتاور تولیدی موتور بالگرد سیگنال N_1 به صورت رابطه (۴) به موتور بالگرد اعمال می‌شود و گشتاور موتور با فاصله زمانی ده میلی ثانیه ثبت می‌گردد.

$$N_1(\%) = 80 + prbs * 5 \quad (4)$$

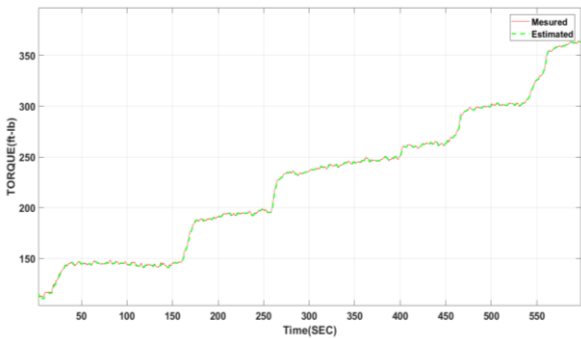
که در آن :

$prbs$: سیگنال تولیدی نرم افزار متلب با پریود ۴۳۰ میلی ثانیه

N_1 : نقطه تنظیم سرعت سامانه کنترل سرعت موتور بالگرد به درصد

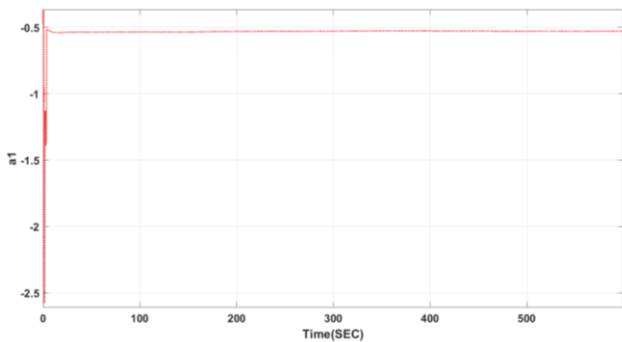
مدل سازی سامانه بار آزمایشگاه موتور بالگرد و طراحی کنترل کننده PI تطبیقی به روش جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته

داینامومتر در شکل (۵) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که پیش‌بینی مدل داینامومتر مورد قبول می‌باشد.

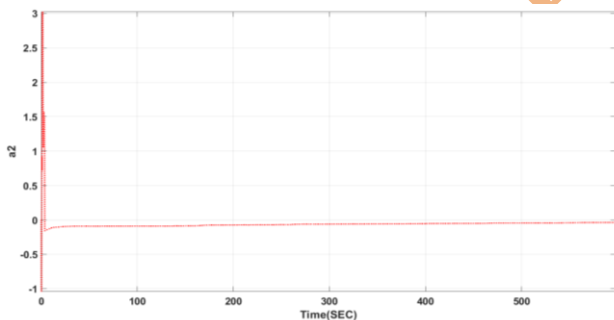


شکل ۵- مقایسه گشتاور اندازه‌گیری شده و خروجی مدل داینامومتر

تخمین پارامترهای a_1 و a_2 در شکل (۶) ارائه شده است.



شکل ۶-الف- تخمین پارامتر a_1



شکل ۶-ب- تخمین پارامتر a_2

برای افزایش دقت مدلسازی با اندازه‌گیری گشتاور تولیدی موتور بالگرد می‌توان رابطه‌ی نهائی (۱۰) را ارائه نمود.

✓ مدل باید بتواند نقاط مرزی رفتار گشتاوری داینامومتر را مطابق رابطه (۶) پوشش دهد یعنی:

(۶)

$$T_b(V_s = 0) = 0 \quad \text{و} \quad T_b(\omega = 0) = 0$$

✓ مدل باید مطابق مطالعات انجام شده، رفتار گشتاوری داینامومتر با توان دوم سرعت شفت متناسب باشد یعنی:

$$T_b \propto \omega^2 \quad (7)$$

✓ مدل برازش خوبی بر داده‌های سایر نقاط سامانه بار را شده باشد. برای رسیدن به اهداف فوق رابطه (۸) ارائه شده است.

(۸)

$$T_b = H_1(z) * [F_1(\omega^2, V_s)] \\ F_1(\omega^2, V_s) = [V_s^{0.9} * EXP(a_1 \omega^{0.5} + a_2 V_s) * \omega^2]$$

که در آن:

ω : سرعت زاویه‌ای شفت موتور بالگرد

V_s : مقدار بازشدگی شیرهای آب ورودی و خروجی داینامومتر.

T_b : گشتاور اعمالی داینامومتر به شفت موتور بالگرد

a_1 و a_2 : مقادیر ثابت با استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی استخراج می‌گردد.

$H_1(z)$: تابع تاخیر زمانی اعمال گشتاور بعد از تغییرات V_s .

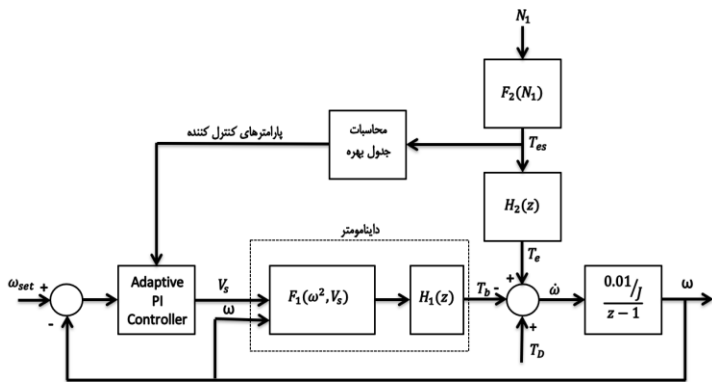
برای بدست آوردن پارامترهای مدل استاتیک داینامومتر ارائه شده در رابطه (۹)، از روش حداقل مربعات خطای پی در پی وزندار استفاده شده است.

$$T_{bs} = [V_s^{0.9} * EXP(a_1 \omega^{0.5} + a_2 V_s) * \omega^2] \quad (9)$$

برای ایجاد داده‌های مورد نیاز این مرحله با تنظیم موقعیت شیرهای آب ورودی و خروجی داینامومتر، سیگنال اعمالی موقعیت شیر V_s ، گشتاور ایجاد شده داینامومتر و سرعت دورانی شفت داینامومتر با زمان نمونه‌برداری ده میلی ثانیه در ناحیه عملکردی موتور بالگرد اندازه‌گیری می‌شود. گشتاور اندازه‌گیری شده و خروجی مدل استاتیک

$$T_{bs} = [V_s^{0.9} * EXP(a_1 \omega^{0.5} + a_2 V_s) * \omega^2] \begin{cases} a_1 = -0.65, a_2 = -0.025 & T_e < 100 \\ a_1 = -0.60, a_2 = -0.02 & 100 \leq T_e < 150 \\ a_1 = -0.55, a_2 = -0.015 & 150 \leq T_e < 300 \\ a_1 = -0.53, a_2 = -0.01 & 300 \leq T_e \end{cases} \quad (10)$$

موتور می‌باشد. از آنجائیکه برای بررسی عملکرد موتور بالگرد سرعت N_1 موتور از ۶۰ درصد مقدار نامی آن تا ۱۰۰ درصد مقدار نامی توسط اهرم تنظیم سرعت N_1 افزایش و سپس کاهش می‌یابد لذا برای استخراج نقاط کاری داینامومتر از مقدار دائمی پاسخ پله مدل گشتاوری موتور در نقاط ۶۵ درصد، ۷۵ درصد، ۸۵ درصد و ۹۵ درصد سرعت نامی N_1 با محدوده کاری ± 5 درصد استفاده می‌شود. گشتاور نقاط کار در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل ۸- سیستم داینامومتر-موتور کوپل شده همراه با کنترل کننده تطبیقی

جدول ۳- نقاط کار داینامومتر کوپل شده به موتور بالگرد

نقطه کار	سرعت N_1 %	گشتاور تولیدی موتور ft-ib	محدوده گشتاور
۱	۹۵	۴۸۰	۶۴۲-۳۴۵
۲	۸۵	۲۴۵	۳۴۵-۱۵۰
۳	۷۵	۹۱	۱۵۰-۵۹
۴	۶۵	۵۰	۵۹-۰

برای تحقق کنترل کننده PI تطبیقی از تابع تبدیل کنترل کننده دیجیتال به صورت رابطه (۱۳) و رابطه (۱۴) استفاده می‌شود.

$$\frac{V_s(z)}{E(z)} = K_p + \frac{K_I}{1-z^{-1}} \quad (13)$$

$$E(z) = \omega_2(z) - \omega_{2set}(z) \quad (14)$$

که در آن:

$E(z)$: خطای سامانه کنترل کننده

$\omega_2(z)$: سرعت زاویه‌ای شفت داینامومتر

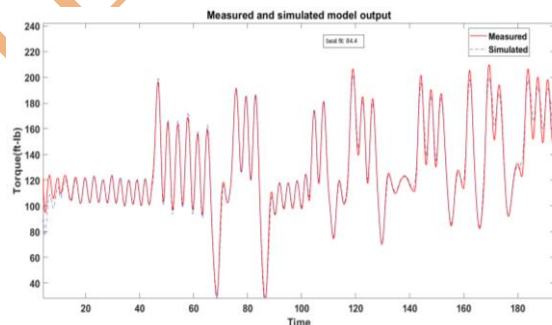
$\omega_{2set}(z)$: سرعت زاویه‌ای مرجع سامانه کنترل

برای بدست آوردن تابع تاخیر زمانی گشتاور، ابتدا سرعت N_1 موتور بالگرد طوری تنظیم می‌گردد تا موتور بتواند ۶۰٪ گشتاور نامی را ایجاد نماید. کنترل کننده PID ساده در نقطه کار گشتاور ایجاد شده، چنان تنظیم می‌گردد تا بتواند سرعت شفت را در محدوده مورد نظر تنظیم نماید. در این حالت سیگنال prbs مطابق با رابطه (۱۱) به ورودی حلقه‌ی کنترل یعنی ω_{set} اعمال می‌شود.

$$\omega_{set}(rpm) = 5600 + prbs * 60 \quad (11)$$

سپس هر لحظه گشتاور استاتیک، T_{bs} ، مطابق با رابطه ارائه شده و گشتاور واقعی داینامومتر ثبت می‌گردد و با استفاده از نرم‌افزار شناسایی متلب تابع تاخیر زمانی گشتاور استاتیک نسبت به گشتاور واقعی بدست می‌آید. این تابع در رابطه (۱۲) ارائه شده است. سیگنال گشتاور اندازه‌گیری شده و سیگنال حاصل از اعمال تابع تاخیر زمانی در گشتاور استاتیک در شکل (۷) ارائه شده است.

$$H_1(z) = \frac{0.02002}{z-0.9798} \quad (12)$$



شکل ۷- سیگنال گشتاور اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده

ج) طراحی کنترل کننده تطبیقی جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته سرعت

در این مرحله به منظور بهبود عملکرد کنترل سرعت شفت موتور بالگرد کوپل شده به داینامومتر نسبت به کنترل کننده PID کلاسیک، یک کنترل کننده تطبیقی جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته طراحی و اجرا می‌گردد. بلوک دیاگرام سیستم داینامومتر- موتور کوپل شده همراه با کنترل کننده تطبیقی در شکل (۸) ارائه شده است.

مساله کلیدی در این روش، پیدا نمودن متغیر مناسبی است که بتواند شرایط کار سامانه‌ی داینامومتر را مشخص نماید. در سامانه‌ی داینامومتر کوپل شده به موتور بالگرد متغیر مورد استفاده برای انتخاب شرایط کار، گشتاور تولیدی

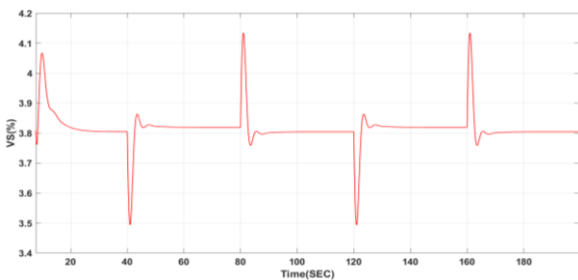
مدل سازی سامانه بار آزمایشگاه موتور بالگرد و طراحی کنترل کننده PI تطبیقی به روش جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته

فراجهش یک درصد و... در محدوده موردقبول برآورده نماید. با استفاده از نرم‌افزار متلب و مدل استخراج شده سامانه، جدول نگاشت از نقاط کار (گشتاور تولیدی موتور) داینامومتر به مقدار پارامترهای کنترل کننده تکمیل می‌گردد (جدول (۴)). مطابق با آزمون واقعی موتور که حداکثر تغییرات پله‌ای N_1 ، یک درصد می‌باشد در تکمیل جدول نیز سیگنال فرمان سامانه‌ی کنترل سرعت N_1 به صورت پله‌ای با حداکثر دامنه یک درصد انتخاب می‌گردد.

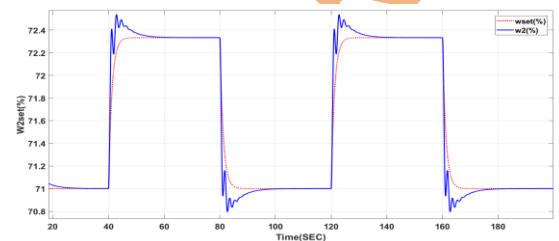
$V_S(z)$: سیگنال اعمالی سامانه‌ی کنترل به صورت همزمان به دو شیر آب ورودی و شیر آب خروجی داینامومتر K_I ، K_P : پارامترهای تنظیمی کنترل کننده برای طراحی کنترل کننده می‌بایست جدول نگاشت از نقاط کار (گشتاور تولیدی موتور) داینامومتر به مقدار پارامترهای کنترل کننده را تکمیل نمود. برای این منظور در هر نقطه از شرایط کاری باید پارامترهای کنترل کننده چنان تنظیم گردد تا بتواند معیارهای کنترلی مانند خطای حالت مانای کمتر از ۰.۵ درصد، زمان نشست پنج ثانیه، حداکثر خطای

جدول ۴- پارامترهای کنترل کننده در نقاط کار داینامومتر کوپل شده با موتور بالگرد

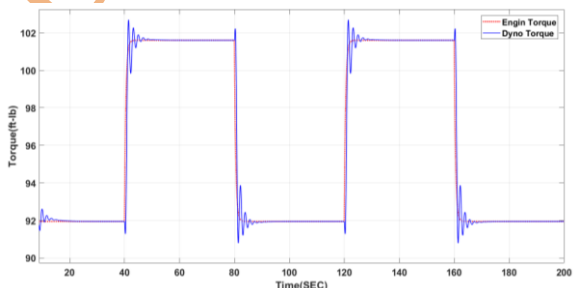
نقطه کار (I)	سرعت N_1 %	گشتاور تولیدی موتور $(T_{MI})ft\cdot ib$	محدوده گشتاور $ft\cdot ib$	K_P	K_I
۱	۹۵	۴۸۰	۶۴۲-۳۴۵	۶.۵	۰.۵
۲	۸۵	۲۳۵	۳۴۵-۱۵۰	۴.۵	۱.۳۵
۳	۷۵	۹۱	۱۵۰-۵۹	۲.۵	۰.۶
۴	۶۵	۵۰	۵۹-۰	۰.۵	۰.۱



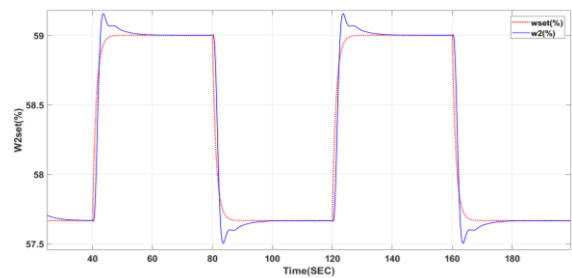
شکل ۱۱- سیگنال اعمالی به شیرهای ورودی و خروجی آب V_S در نقطه‌ی کاری اول



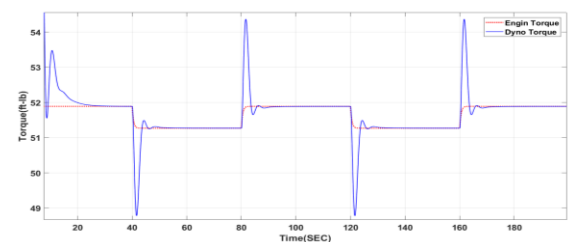
شکل ۱۲- سیگنال آزمون W_2 و W_{2set} در نقطه‌ی کاری دوم



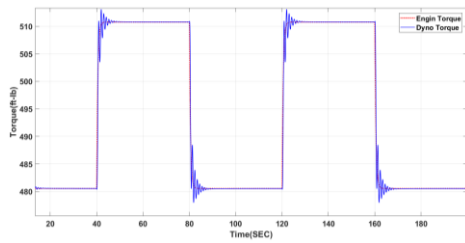
شکل ۱۰- سیگنال گشتاور تولیدی موتور و گشتاور اعمالی داینامومتر در نقطه‌ی کاری اول



شکل ۹- سیگنال آزمون W_2 و W_{2set} در نقطه‌ی کاری اول

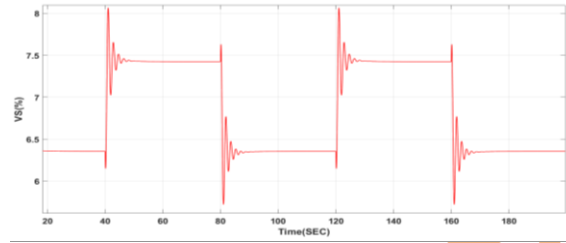


نقطه‌ی کاری چهارم

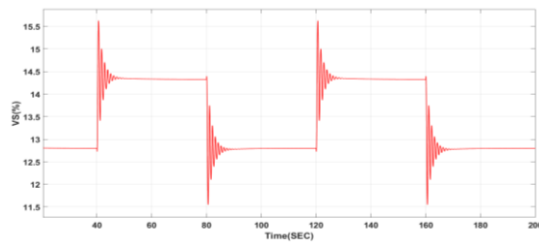


شکل ۱۳- سیگنال گشتاور تولیدی موتور و گشتاور اعمالی داینامومتر در نقطه‌ی کاری دوم

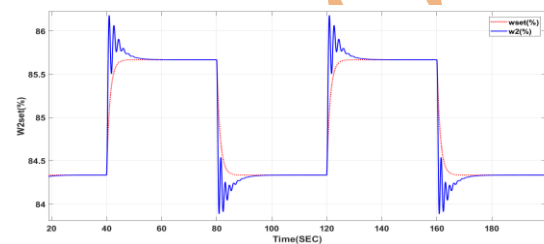
شکل ۱۳- سیگنال گشتاور تولیدی موتور و گشتاور اعمالی داینامومتر در نقطه‌ی کاری دوم



شکل ۱۴- سیگنال اعمالی به شیرهای ورودی و خروجی آب در نقطه‌ی کاری دوم



شکل ۱۹- سیگنال اعمالی به شیرهای ورودی و خروجی آب داینامومتر در نقطه‌ی کاری چهارم



شکل ۱۵- سیگنال آزمون ω_2 و ω_{2set} در نقطه‌ی کاری سوم

شبیه‌سازی نشان می‌دهد معیارهای کنترلی مانند خطای حالت مانا کمتر از ۰.۵ درصد، زمان نشست پنج ثانیه، حداکثر خطای فراجهش یک درصد و ... برآورده شده است. در شرایط مرزی نقاط کاری پارامترهای کنترل‌کننده تغییرات ناگهانی دارند. به منظور جلوگیری از تغییرات ناگهانی از روش جدول‌بندی بهره‌ی توسعه یافته با ارائه روابط (۱۵) و (۱۶) استفاده می‌شود.

(۱۵)

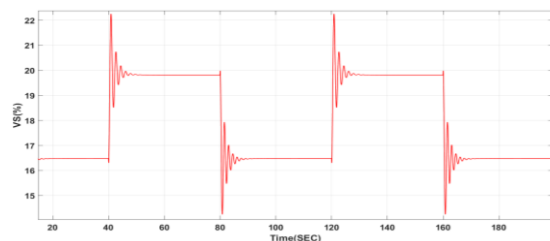
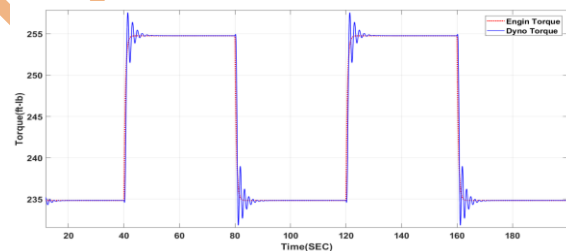
$$\begin{aligned} K_{PF}(t) &= 0.5 & T_e < 59 \\ K_{PF}(t) &= 0.0625 * (T_e - 59) + 0.5 & 59 \leq T_e < 91 \\ K_{PF}(t) &= 2.5 & 91 \leq T_e < 150 \\ K_{PF}(t) &= 0.0235 * (T_e - 150) + 2.5 & 150 \leq T_e < 235 \\ K_{PF}(t) &= 4.5 & 235 \leq T_e < 345 \\ K_{PF}(t) &= 0.0148 * (T_e - 345) + 4.5 & 345 \leq T_e < 480 \\ K_{PF}(t) &= 6.5 & 480 \leq T_e \end{aligned}$$

(۱۶)

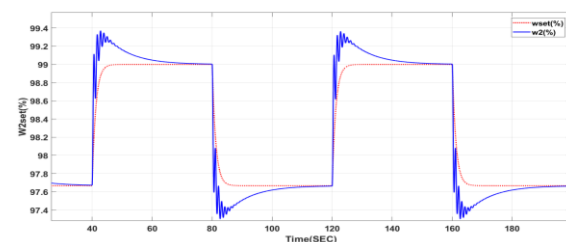
$$\begin{aligned} K_{IF}(t) &= 0.1 & T_e < 59 \\ K_{IF}(t) &= 0.0156 * (T_e - 59) + 0.1 & 59 \leq T_e < 91 \\ K_{IF}(t) &= 0.6 & 91 \leq T_e < 150 \\ K_{IF}(t) &= 0.0088 * (T_e - 150) + 2.5 & 150 \leq T_e < 235 \\ K_{IF}(t) &= 1.35 & 235 \leq T_e < 345 \\ K_{IF}(t) &= -0.0062 * (T_e - 345) + 4.5 & 345 \leq T_e < 480 \\ K_{IF}(t) &= 0.5 & 480 \leq T_e \end{aligned}$$

که در آن:

شکل ۱۶- سیگنال گشتاور تولیدی موتور و گشتاور اعمالی داینامومتر در نقطه‌ی کاری سوم



شکل ۱۷- سیگنال اعمالی به شیرهای ورودی و خروجی آب در نقطه‌ی کاری سوم



شکل ۱۸- سیگنال آزمون ω_2 و ω_{2set} در

K_{PF} : پارامتر تناسبی کنترل کننده

K_{IF} : پارامتر انتگرالی کنترل کننده

T_e : گشتاور تولیدی موتور بالگرد

مطابق شکل (۲۲) زمان خیز پاسخ پله حدود ۴۲۰ میلی ثانیه می باشد لذا می توان مطابق با قانون نمونه برداری و با استفاده از رابطه (۱۷) زمان حلقه را ۱۰ میلی ثانیه انتخاب نمود.

$$\tau_s = \frac{T_r}{40} \quad (17)$$

طراحی سخت افزار باید به گونه ای باشد که رابطه (۱۸) نیز برقرار باشد لذا مشخصات زمانی سخت افزار سامانه ی کنترل مطابق با جدول (۵) انتخاب شده است.

$$\tau_l = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 < \tau_s \quad (18)$$

که در آن:

τ_l : زمان اجرای حلقه کنترل

τ_1 : مدت زمان تبدیل سیگنال تحت کنترل از فرکانسی به ولتاژ آنالوگ

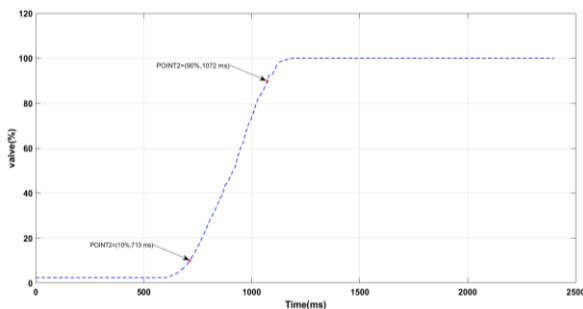
τ_2 : مدت زمان تبدیل سیگنال آنالوگ به سیگنال دیجیتال

τ_3 : مدت زمان تبدیل سیگنال دیجیتال به آنالوگ (اعمال

سیگنال کنترل به عملگر)

τ_4 : مدت زمان تخصیصی به زمان محاسبات سیگنال

کنترل توسط کنترل کننده اصلی



شکل ۲۲- پاسخ پله شیر آب ورودی و خروجی داینامومتر

جدول ۵- مقادیر سهم زمانی المان های مختلف سامانه کنترل

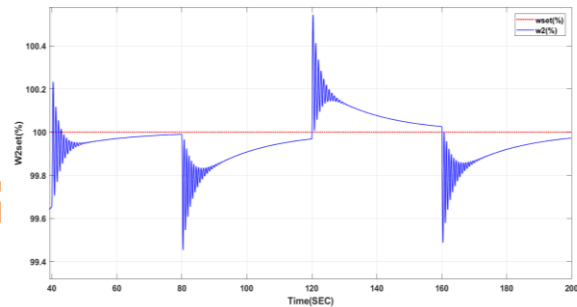
پارامتر	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
مقدار (میلی ثانیه)	۲/۶	۳/۰	۰/۶۲۵	۰/۴

۴- عملکرد کنترل کننده در آزمایش واقعی

الف) ارائه روش آزمایش

برای بررسی عملکرد کنترل کننده در سامانه واقعی دو موتور بالگرد با رفتار دینامیکی متفاوت PT6T و T400 به صورت دابل استفاده شده است. آزمایش به صورت زیر انجام

بررسی پایداری کنترل کننده سرعت در ناحیه حداکثر گشتاور تولیدی موتور بالگرد (نقطه حداکثری توان تولیدی موتور) انجام گرفته است. برای بررسی عملکرد کنترل کننده، اغتشاش پله ای با دامنه ۳۰ فوت پوند به صورت تغییرات ناگهانی در گشتاور تولیدی موتور بالگرد (T_D) در نظر گرفته می شود (شکل (۲۱)). عملکرد کنترل کننده در تنظیم سرعت مرجع (۱۰۰٪ نامی) در حضور اغتشاش در شکل (۲۲) ارائه شده است. خطای مانای کنترل کننده کمتر از ۰.۵ درصد در ناحیه عملکردی می باشد.



شکل ۲۱- سرعت مرجع ω_2 set و سرعت ω_2 با حضور اغتشاش T_D

د) طراحی و تحقق سخت افزار سامانه کنترل

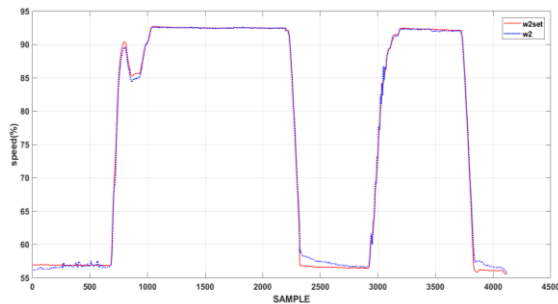
تحقق سامانه کنترل در دو بخش طراحی و ساخت سیستم سخت افزاری و طراحی و ساخت سیستم نرم افزاری انجام گرفته است. در بخش طراحی و ساخت سیستم سخت افزاری سامانه های کنترل، مواردی همچون آشکارسازی کمیت های فیزیکی تحت کنترل با دقت و زمان نمونه برداری مورد قبول، مدت زمان محاسبات سیگنال های خروجی سامانه کنترل و مدت زمان اعمال سیگنال خروجی سامانه کنترل به سامانه تحت کنترل از اهمیت بالایی برخوردار است. سیستم سخت افزاری طراحی شده باید بتواند در زمان اجرای حلقه کنترل (τ_l) کمیت های فیزیکی تحت کنترل را اندازه گیری (τ_1) و محاسبات سیگنال کنترل (τ_4) و همچنین اعمال آن را به سامانه تحت کنترل (τ_4) را انجام دهد. برای بدست آوردن زمان حلقه و زمان نمونه برداری در سامانه کنترل از پاسخ پله شیرهای آب ورودی و خروجی داینامومتر که دارای عملکرد سریعتری نسبت به سایر بخش های فرآیند دارد، استفاده شده است (شکل (۲۲)).

شده است:

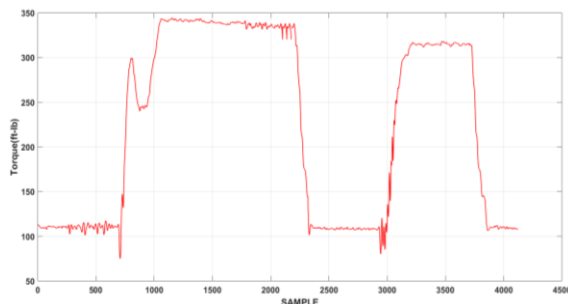
گام ۱: ابتدا موتور ۱ بعد از روشن شدن در سرعت ۶۰ درصد N_1 تنظیم گردید سپس موتور ۲ نیز روشن و در سرعت ۶۰ درصد N_1 تنظیم گردید.

گام ۲: سرعت N_1 موتور ۱ مطابق با قسمت اول (تا نمونه برداری ۲۵۰۰) منحنی شکل (۲۳) تا نقطه حداکثر N_1 افزایش و سپس مطابق با منحنی شکل (۲۳) کاهش داده شد و سپس سرعت N_1 در ۶۰ درصد تنظیم گردید.

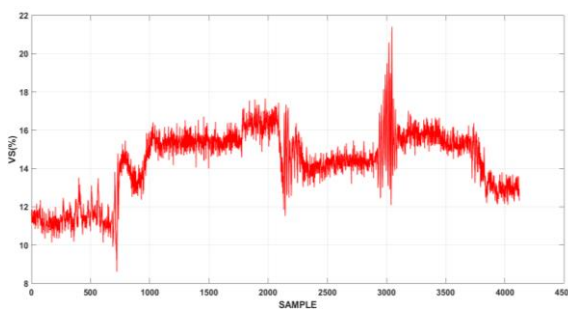
گام ۳: سرعت N_1 موتور ۲ مطابق با قسمت دوم (از نمونه برداری ۲۵۰۰ تا نمونه برداری ۴۰۰۰) منحنی شکل (۲۳) تا نقطه حداکثر N_1 افزایش و سپس مطابق با منحنی کاهش داده شد و سرعت N_1 در ۶۰ درصد تنظیم گردید.



شکل ۲۴- مقادیر ثبت شده ω_2 و ω_{2set}



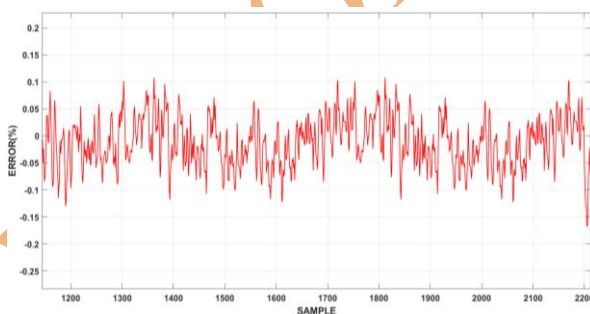
شکل ۲۵- مقادیر ثبت شده گشتاور تولیدی داینامومتر



شکل ۲۶- سیگنال اعمالی به شیرهای ورودی و

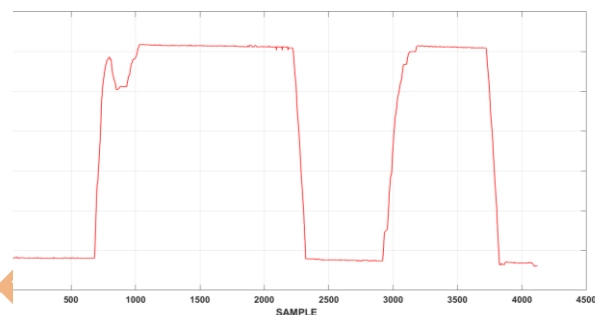
خروجی آب V_s

شکل (۲۷) نشان می‌دهد کنترل کننده در ناحیه حداکثر سرعت گشتاور موتور بالگرد پایدار و در حالت مانا خطای کمتر از ۰.۵ درصد دارد.



شکل ۲۷- خطای ثبت شده ω_2 در حالت مانا

نحوه تنظیم پارامترهای کنترل کننده در عبور از نواحی مختلف در آزمون واقعی در شکل (۲۸) ارائه شده است.

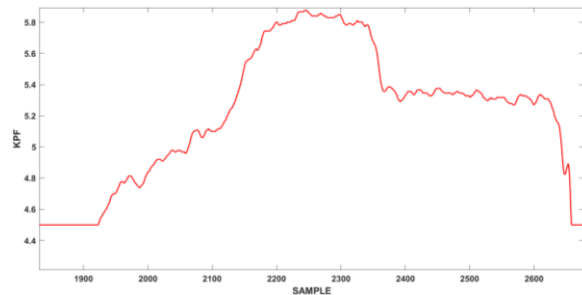


شکل ۲۳- منحنی افزایش و کاهش سرعت N_1 در تست عملیاتی

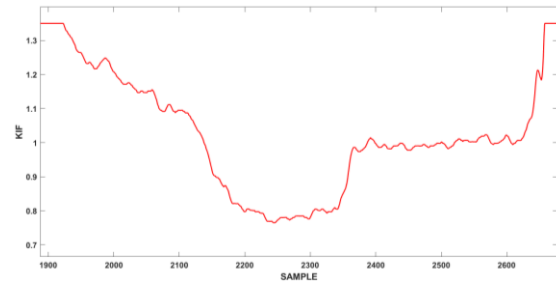
(ب) تحلیل نتایج

داینامومتر هیدرولیکی تحت مطالعه رفتار غیر خطی شدید در تولید و اعمال گشتاور به سیستم‌های دوار با سرعت خیلی بالا مانند موتور بالگرد از خود نشان می‌دهد. با توجه به اینکه برای آزمایش موتور بالگرد نیاز به ناحیه عملکردی وسیع سرعت گشتاور می‌باشد لذا اگر کنترل کننده کلاسیک PID برای یک ناحیه و به عنوان مثال ناحیه گشتاور سرعت حداکثر تنظیم گردد در گذر از نواحی مختلف گشتاور سرعت به شدت ناپایدار می‌گردد. همانطوریکه در منحنی داده‌های شکل (۲۴) مربوط به سرعت ω_2 و ω_{2set} نشان می‌دهد که کنترل کننده ارائه شده در نواحی مختلف عملکردی پایدار می‌باشد. در شکل (۲۵) گشتاور اعمالی داینامومتر در نواحی مختلف عملکردی، ارائه شده است. نحوه تنظیم شیر ورودی و خروجی آب داینامومتر در شکل (۲۶) ارائه شده است.

مدل سازی سامانه بار آزمایشگاه موتور بالگرد و طراحی کنترل کننده PI تطبیقی به روش جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته



شکل ۲۸-الف- مقادیر پارامتر $K_{PF}(t)$



شکل ۲۸-ب- مقادیر پارامتر $K_{IF}(t)$

۵- نتیجه گیری

در این مقاله برای طراحی ایمن کنترل کننده، ابتدا مدلسازی سامانه داینامومتر کوپل شده به موتور بالگرد انجام گردید. لذا ابتدا مدلسازی در بخش تولید گشتاور (موتور بالگرد) و همچنین مدلسازی در بخش اعمال گشتاور (داینامومتر) انجام گرفت. در تحلیل سامانه تحت کنترل مشخص شد که سامانه رابطه غیر خطی با پارامترهای ورودی ایجاد گشتاور دارد. لذا برای کنترل سرعت شفت موتور بالگرد یک کنترل کننده PI تطبیقی جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته با معیار گشتاور تولیدی موتور با استفاده از نرم افزار متلب طراحی و شبیه سازی گردید. در تجزیه و تحلیل سامانه مشخص شد که زمان حلقه مورد نیاز ده میلی ثانیه می باشد. لذا در طراحی و اجرای سخت افزار مورد نیاز برای کنترل کننده زمان حلقه ده میلی ثانیه مدنظر قرار گرفت. در اعمال سیگنال خروجی کنترل کننده به سامانه اعمال گشتاور همزمان از دو شیر ورودی و خروجی آب داینامومتر به منظور افزایش و بهبود زمان پاسخ داینامومتر استفاده شد. عملکرد کنترل کننده تطبیقی جدول بندی بهره توسعه یافته در آزمون واقعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد کنترل کننده در عبور از نواحی مختلف بدون نوسان و پایدار می باشد و همچنین خطای حالت مانای کنترل کننده کمتر از ۰.۵ درصد در هر ناحیه از توان تولیدی موتور بالگرد می باشد.

مراجع

- [1] Corti, Enrico & Rojo, Nahuel & Abbondanza, Marco & Raggini, Lorenzo. (2019). Application of a model for optimizing steady state and transient control of hydraulic dynamometers. AIP Conference Proceedings. 2191. 020052. 10.1063/1.5138785.
- [2] Banazadeh, Afshin & Abdollahi Gol, Hossein. (2018). Model-Based Fuzzy Control of a Gas Turbine Coupled with a Dynamometer. Journal of Propulsion and Power. 34. 1-11. 10.2514/1.B36765.
- [3] Samokhin, Sergey & Topaloglou, Sotiris & Papalambrou, George & Zenger, Kai & Kyrtatos, Nikolaos. (2016). Adaptive Power-Split Control Design for Marine Hybrid Diesel Powertrain. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 139. 10.1115/1.4034804.
- [4] Yanakiev, Diana. (1999). Adaptive control of diesel engine-dynamometer systems. 2. 1530 - 1534 vol.2. 10.1109/CDC.1998.758506.
- [5] Bani, Karlis. (2019). Design development of dynamometer water absorber. 10.22616/ERDev2019.18.N544.
- [6] Gruenbacher, Engelbert. (2008). Adaptive Control of Engine Torque with Input Delays. IFAC Proceedings Volumes. 41. 9479-9484. 10.3182/20080706-5-KR-1001.01602.
- [7] Passenbrunner, T.E. & Sassano, Mario & Trogmann, Hannes & Re, L. & Paulweber, Michael & Schmidt, Martin & Kokal, Helmut. (2011). Inverse torque control of hydrodynamic dynamometers for combustion engine test benches. 4598 - 4603. 10.1109/ACC.2011.5991317.
- [8] Ruan, Diwang & Xie, Hui & Song, Kang & Zhang, Guohui. (2019). Adaptive Speed Control based on Disturbance Compensation for Engine-Dynamometer System. IFAC-PapersOnLine. 52. 642-647. 10.1016/j.ifacol.2019.09.102.
- [9] Ozsoy, Can & Duyar, Ahmet & Kazan, R. & Kılıç, Recep. (1997). Power turbine speed control of the GE T700 engine using the zero steady-state self-tuning regulator. 371 - 378. 10.1109/INES.1997.632447.
- [10] Vetr, M. & Passenbrunner, T.E. & Trogmann, Hannes & Ortner, P. & Kokal, Helmut & Schmidt, Martin & Paulweber, Michael. (2010). Control Oriented Modeling of a Water Brake Dynamometer. 222 - 227. 10.1109/CCA.2010.5611137.
- [11] Hassan, Aveen. (2019). Antenna Azimuth Position Control System using Model Reference Adaptive Control Method Gradient Approach and Stability Approach. Journal of Engineering and Applied Sciences. 14. 5657-5664. 10.36478/jeasci.2019.5657.5664.
- [12] tomas alexsander mercer(1969).The development of a water dynamometer for Turbine test application. united states naval postgraduate school
- [13] Chauhan, Richa & Maity, Arnab & Paluri, Nataraj. (2019). Shaft Speed Control of Laboratory Gas Turbine Engine. IFAC-PapersOnLine. 52. 262-267. 10.1016/j.ifacol.2019.11.253.
- [14] Taner Tuken, Iowa State University(1991).Adaptive Torque Control of a diesel engine For transient test cycles. PHD Theses,
- [15] Gowrishankar, K & Elancheralathan, Vasanth. (2008). Adaptive Fuzzy Controller to Control Turbine Speed. Ubiquitous Computing and Communication Journal. 3. 53-59

- [16] Foyo, Abu & Thelkar, Amruth Ramesh & Bharatiraja, C. & Yusuff, Adedayo. (2020). Reference design and comparative analysis of model reference adaptive control for steam turbine speed control. *FME Transactions*. 48. 329-341. 10.5937/fme2002329F.
- [17] Hosseini, Mojtaba & Askari, Javad. (2008). Model-Reference Adaptive Control for a nonlinear boiler-turbine system. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*. 1 - 6. 10.1109/ICIT.2008.4608468.
- [18] Hodgson, P. G. (1991). Theoretical model and dynamic simulation of a hydraulic dynamometer. PhD thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [19] Sivalinam, R. (1978). Flow Modeling and Computer Aided Design of Fluid Coupling and Torque Converters. Ph.D. Thesis, University of Bath.
- [20] Cahyono, Sukmaji & Sinaga, Nazaruddin. (2008). Numerical Analysis Dynamometer (Water Brake) Using Computational Fluid Dynamic Software.
- [21] Raine, J. K. and Hodgson, P. G. (1991). Computer simulation of a variable fill hydraulic dynamometer. Part 1 : torque absorption theory and the influence of working compartment geometry on performance. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part C*, 205(C3), 155-163.
- [22] Hodgson, P. G. and Raine, J. K. (1992). Computer simulation of a variable fill hydraulic dynamometer. Part 2: steady state and dynamic open-loop performance. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part C*, 206(C1), 49-56.
- [23] Hodgson, P & Raine, J.K.. (1992). Computer Simulation of a Variable Fill Hydraulic Dynamometer Part 3: Closed-Loop Performance. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part C-journal of Mechanical Engineering Science - PROC INST MECH ENG C-J MECH E*. 206. 327-336. 10.1243/PIME_PROC_1992_206_135_02
- [24] Vladov, Serhii & Banasik, Arkadiusz & Sachenko, Anatoliy & Kempa, Wojciech & Sokurenko, Valerii & Muzychuk, Oleksandr & Pikiewicz, Piotr & Molga, Agnieszka & Vysotska, Victoria. (2024). Intelligent Method of Identifying the Nonlinear Dynamic Model for Helicopter Turboshaft Engines. *Sensors*. 24. 6488. 10.3390/s24196488.
- [25] Romandoni, Nanang & Aminudin, Achmad & Nur Faizin, Kholis & Puspitasari, Indah & Agus Salim, Alfi & Aziz, Abdul. (2021). Design of Water Brake Dynamometer. *Journal of Physics: Conference Series*. 1845. 012048. 10.1088/1742-6596/1845/1/012048.
- [26] Song, Shuo & Xiao, Hong & Jiang, Leibo & Liang, Yufeng. (2024). Neural Network Based Digital Twin for Performance Prediction of Water Brake Dynamometer. 10.1115/GT2024-126589.

[۲۷] ساقی خ. (۱۳۹۷) "تدوین دانش فنی آزمایشگاه بررسی عملکرد توربوشفت". تهران. سازمان جهاددانشگاهی صنعتی شریف.