



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



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 ^{a,*} , Yousef Alinejad-Beromi ^a

^a Department of Electrical and Computer Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-09-16

Revised: 2024-11-19

Accepted: 2024-12-09

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.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.35355.2730>

© 2025 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:

K. Saghi, A. Dideban and Y. Alinejad-Beromi, "Modeling, Designing, Simulating and Implementing The Developed Gain-Scheduling Adaptive Controller of The Helicopter Engine Test Bench Load System," Journal of Modeling in Engineering, 23 82 (2025): 27-39, doi: 10.22075/jme.2024.35355.2730

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^{۱*}، یوسف علینژاد برمی^۱

چکیده	اطلاعات مقاله
آزمایشگاه موتور بالگرد محیطی ایمن برای بررسی عملکرد موتور در نواحی مختلف عملیاتی موتور می باشد. برای بررسی عملکرد موتور در نواحی مختلف عملیاتی نیاز به سامانه اعمال بار می باشد. گشتاور ایجاد شده این سامانه رابطه غیر خطی شدید با سرعت زاویه‌ای شفت و سرعت گردابی سیال دارد. کنترل کننده خطی کلاسیک در مواجهه با رفتار غیر خطی داینامومتر عملکرد مناسبی ندارد و در نواحی مختلف دچار نوسان شدید می شود. در این مقاله با بررسی و مطالعه رفتار داینامومتر و موتور بالگرد در نواحی مختلف عملکردی موتور، مدل های تولید گشتاور موتور و داینامومتر نسبت به پارامترهای موثر ورودی ارائه شده است و با توجه به رفتار غیر خطی داینامومتر، کنترل کننده PI تطبیقی روش جدول بندی بهره‌ی توسعه یافته طراحی گردیده است. تنظیم پارامترهای کنترل کننده با شبیه سازی در محیط نرم افزار متلب و با استفاده از مدل های استخراج شده 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.	دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۱۹
	واژگان کلیدی: مدل سازی، داینامومتر، موتور بالگرد، کنترل کننده تطبیقی، جدول بندی بهره، رفتار غیر خطی.
DOI: https://doi.org/10.22075/jme.2024.35355.2730	
© 2025 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

ناشی از سرعت زاویه‌ای بالای توربوشفت نیاز به تعمیرات و بررسی عملکرد دوره‌ای موتور می باشد لذا برای بررسی عملکرد ایمن آن نیاز به آزمایشگاه و جایگاه آزمایش^۲ می باشد. در آزمایشگاه، عملکرد توربوشفت در شرایط مختلف عملیاتی مورد بررسی دقیق قرار می گیرد. برای ایجاد شرایط مختلف عملیاتی توربوشفت، نیاز به سامانه اعمال بار می باشد تا با اعمال گشتاورهای مختلف به شفت

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، سرعت زاویه‌ای و توان شفت خروجی بالائی دارد. در صنعت هوائی به خاطر شرایط سخت پروازی و همچنین استهلاک

² Test Stand

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

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

استناد به این مقاله:

خلیل ساقی، عباس دیدبان و یوسف علینژاد برمی، "مدل سازی، طراحی، شبیه سازی و پیاده سازی کنترل کننده تطبیقی با روش جدول بندی بهره توسعه یافته سامانه بار آزمایشگاه موتور بالگرد"، مدل سازی در مهندسی، ۲۳ (۱۴۰۴): ۲۷-۳۹، doi: 10.22075/jme.2024.35355.2730

شده است. در مرجع [۱۸ و ۲۱-۲۴] ضمن بررسی پارامترهای موثر در تولید گشتاور داینامومتر با شبیه سازی کامپیوتری، کنترل کننده آنالوگ هیدرولیکی طراحی شده است. در مرجع [۲۵ و ۲۶] مدل دینامیکی موتور توربوشفت در حالت های پایدار و گذرا استخراج شده است. با بررسی منابع مختلف مشخص شد کنترل کننده های PID کلاسیک به خاطر رفتار غیر خطی داینامومتر همراه با خطای زیاد و دارای نوسان در عبور از نواحی مختلف توان تولیدی موتور می باشد. در این مقاله برای اولین بار با استفاده از کنترل کننده PI^2 تطبیقی جدول بندی بهره ی توسعه یافته، عملکرد کنترل کننده سامانه بهبود می یابد. برای طراحی و پیاده سازی ایمن کنترل کننده، ابتدا با آزمایش های جامع مدل تولید گشتاور (موتور بالگرد) و سامانه اعمال بار (داینامومتر) استخراج می گردد. برای اولین بار مدل گشتاور تولیدی سامانه بار بر اساس تحریک همزمان شیرهای ورودی و خروجی به منظور افزایش عکس العمل داینامومتر استخراج شده است. در محیط متلب کنترل کننده PI تطبیقی جدول بندی بهره ی توسعه یافته طراحی می گردد. به منظور پیاده سازی کنترل کننده، زمان حلقه سامانه کنترل کننده با آزمایش های مورد نیاز استخراج گردیده است. طراحی سخت افزار بر اساس معیار زمان حلقه سامانه انجام شده است. جدول نگاشت پارامترهای کنترل کننده با استفاده از مدل های استخراج شده در محیط نرم افزاری 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 می گردد. ابتدا مشخصات سامانه آزمایش موتور بالگرد ارائه خواهد شد و در بخش سوم سناریوی مطالعه و طراحی ارائه خواهد شد. در بخش 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 آزمایش های این تحقیق از جایگاه آزمایش ارائه شده در شکل (۱) استفاده شده است.

موتور، شرایط مختلف کاری توربوشفت ایجاد شود. بهترین انتخاب سامانه ی اعمال بار برای محرک هایی مانند توربوشفت که دارای سرعت زاویه ای و توان شفت خروجی بالا است، داینامومتر می باشد [۱]. مشکل اساسی داینامومترها، رفتار غیر خطی آن در تولید گشتاور نسبت به سرعت زاویه ای و سرعت گردابی می باشد لذا کنترل دقیق سرعت زاویه ای شفت، همراه با مشکلات زیادی همراه است [۱-۲۰]. روش های مختلفی در ارتباط با کنترل و مدل سازی داینامومتر انجام شده است که به اختصار بررسی می گردد.

در مرجع [۱] سرعت زاویه ای شفت موتور در یک سامانه موتور الکتریکی کوپل شده به داینامومتر با تنظیم فلوی آب داینامومتر توسط کنترل کننده PID^3 کنترل شده است. در مرجع [۲] مدل های 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 زاویه ای ثابت (قابل کاربرد در سیستم های قدرت) و سرعت زاویه ای متغیر (سیستم های هوایی) می باشد. 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 و ۹] 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 [۱۰-۱۲] مدل رفتاری داینامومتر با سه روش مدل سازی بر اساس اصول اولیه فیزیکی، مدل سازی بر اساس جعبه سیاه و روش مدل سازی خاکستری، استخراج

³ Proportional Integral Derivative Controller

⁴ Proportional Integral Controller

۳- سناریوی مورد مطالعه

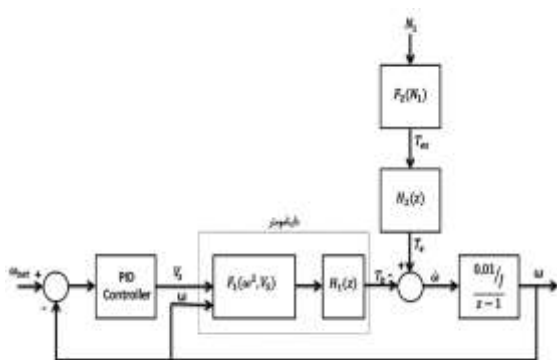
در این مقاله بر روی سامانه داینامومتر-موتور بالگرد کوپل شده ی شکل (۱) مطالعات و بررسی های ذیل انجام شده است.

الف) استخراج روابط گشتاور تولیدی موتور بالگرد بر اساس N_1

ب) استخراج مدل گشتاور اعمالی دینامومتر

ج) طراحی کنترل کننده تطبیقی جدول بندی بهره ی توسعه یافته سرعت

د) نحوه طراحی و تحقق سخت افزار سامانه کنترل بلوک مدل پیشنهادی برای شناسائی و ارائه کنترل کننده سیستم داینامومتر کوپل شده با موتور بالگرد به صورت بلوک دیاگرام شکل (۲) ارائه می گردد.



شکل ۲- بلوک دیاگرام دینامومتر-موتور بالگرد کوپل شده

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

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

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

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

که در آن:

ω : سرعت زاویه ای شفت موتور بالگرد

V_s : مقدار بازشدگی شیرهای آب ورودی و خروجی

دینامومتر

T_b : گشتاور اعمالی دینامومتر به شفت موتور بالگرد

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

a_1, a_2 : مقادیر ثابت

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



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

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

جدول ۱- مشخصات توربین مدل PT6T-6 Series

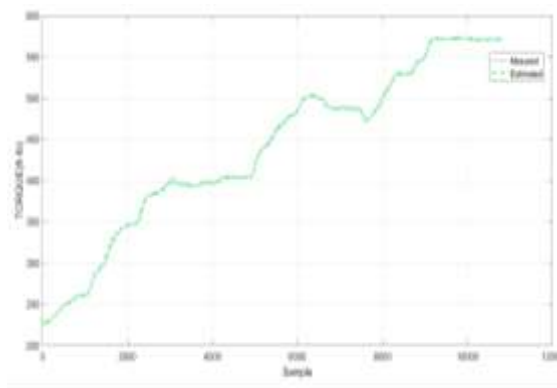
ردیف	پارامتر	مقدار	واحد
۱	سرعت زاویه شفت (نامی)	۶۶۰۰	Rpm
۲	قدرت نامی	۱۸۷۵	Shp

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



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

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.

ب) استخراج مدل گشتاور اعمالی داینامومتر

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

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

$$T_b(V_s = 0) = 0 \quad \text{و} \quad T_b(\omega = 0) = 0 \quad (6)$$

✓ 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.

$$T_b = H_1(z) * [F_1(\omega^2, V_s)] \\ F_1(\omega^2, V_s) = [V_s^{0.9} * EXP(a_1 \omega^{0.5} + a_2 V_s) * \omega^2] \quad (8)$$

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

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

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.

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

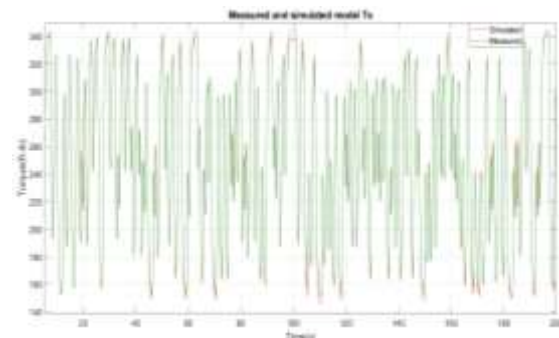
که در آن:

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

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

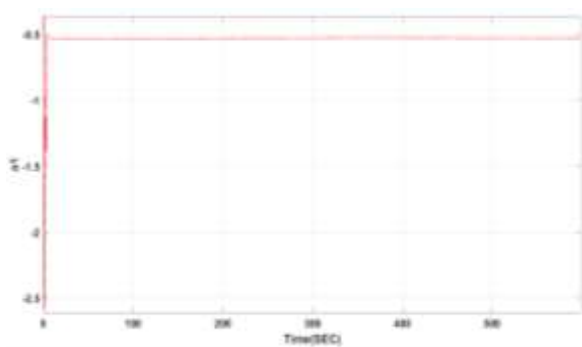
با استفاده از نرم افزار متلب و همچنین داده‌های استخراج شده از طریق آزمایش، مدل نهایی گشتاور تولیدی موتور بالگرد با معیار برازش ۹۵.۲۸ درصد به صورت رابطه (۵) استخراج گردیده است.

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

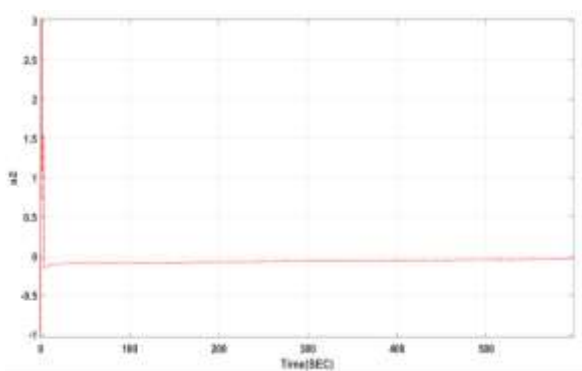


شکل ۳- سیگنال گشتاور تولیدی موتور و مدل استخراج شده

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



شکل ۶-الف- تخمین پارامتر a_1



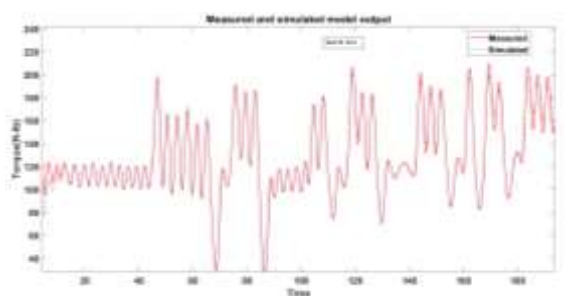
شکل ۶-ب- تخمین پارامتر a_2

برای افزایش دقت مدلسازی با اندازه گیری گشتاور تولیدی موتور بالگرد می توان رابطه ی نهائی (۱۰) را ارائه نمود.

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

رابطه ی (۱۲) ارائه شده است. سیگنال گشتاور اندازه گیری شده و سیگنال حاصل از اعمال تابع تاخیر زمانی در گشتاور استاتیک در شکل (۷) ارائه شده است.

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

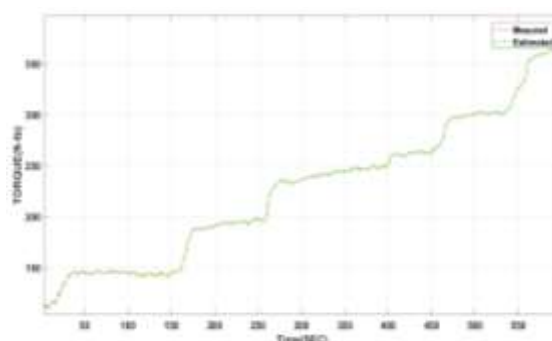


شکل ۷- سیگنال گشتاور اندازه گیری شده و شبیه سازی شده

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 داده های 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 نمونه برداری ده میلی ثانیه در ناحیه عملکردی موتور بالگرد اندازه گیری می شود. گشتاور اندازه گیری شده و خروجی مدل استاتیک داینامومتر در شکل (۵) ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که پیش بینی مدل داینامومتر مورد قبول می باشد.

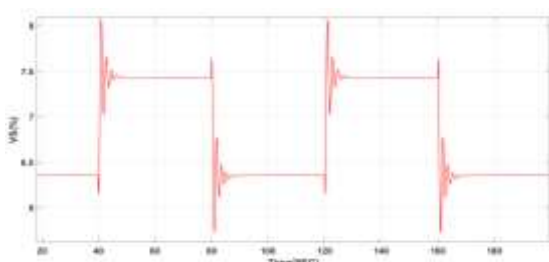


شکل ۵- مقایسه گشتاور اندازه گیری شده و خروجی مدل دینامومتر

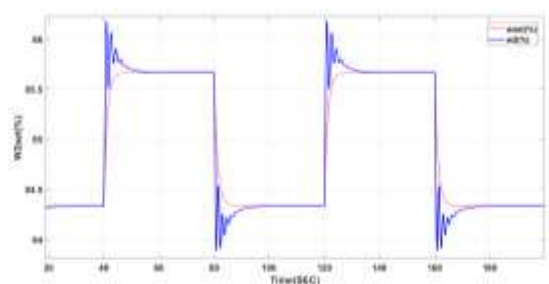
برای بدست آوردن تابع تاخیر زمانی گشتاور، ابتدا سرعت N_1 موتور بالگرد طوری تنظیم می گردد تا موتور بتواند ۶۰٪ گشتاور نامی را ایجاد نماید. کنترل کننده PID ساده در نقطه کار گشتاور ایجاد شده، چنان تنظیم می گردد تا بتواند سرعت شفت را در محدوده مورد نظر تنظیم نماید. در این حالت سیگنال prbs مطابق با رابطه ی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

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

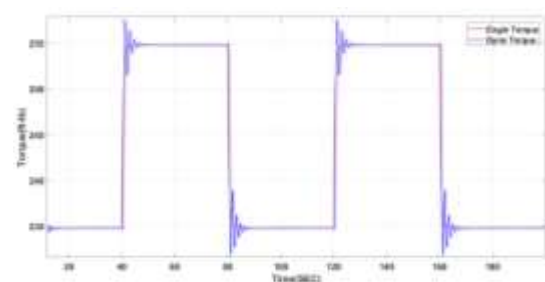
سپس هر لحظه گشتاور استاتیک، T_{bs} ، مطابق با رابطه ارائه شده و گشتاور واقعی داینامومتر ثبت می گردد و با استفاده از نرم افزار شناسائی متلب تابع تاخیر زمانی گشتاور استاتیک نسبت به گشتاور واقعی بدست می آید. این تابع در



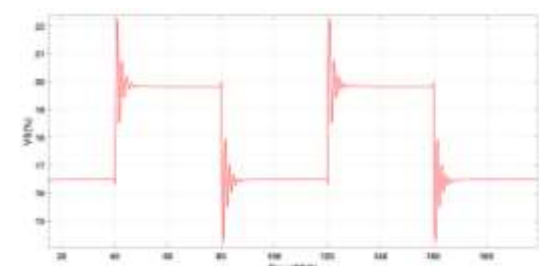
شکل ۱۴- سیگنال اعمالی به شیرهای ورودی و خروجی آب V_s در نقطه ی کاری دوم



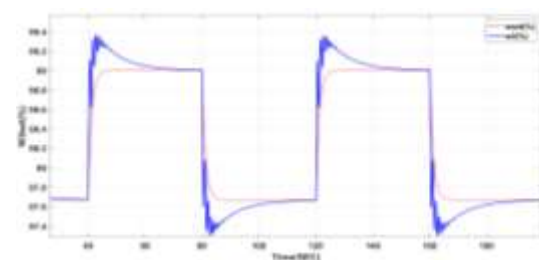
شکل ۱۵- سیگنال آزمون ω_2 و ω_{2set} در نقطه ی کاری سوم



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

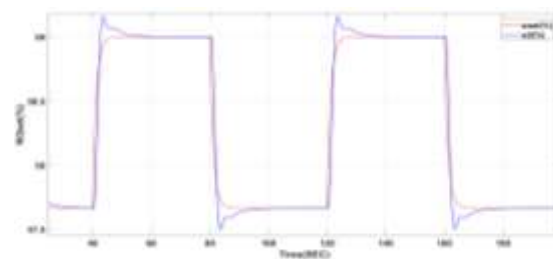


شکل ۱۷- سیگنال اعمالی به شیرهای ورودی و خروجی آب V_s در نقطه ی کاری سوم

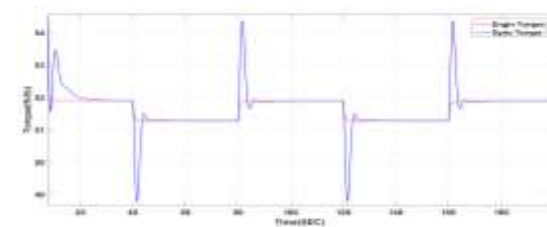


شکل ۱۸- سیگنال آزمون ω_2 و ω_{2set} در نقطه ی کاری چهارم

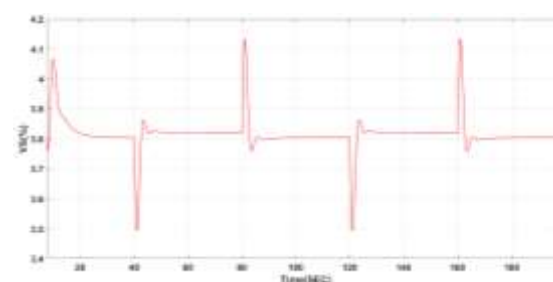
بعد از تنظیم پارامترهای کنترل کننده، سرعت زاویه ایی شفت، سیگنال های گشتاور اعمالی داینامومتر، گشتاور تولیدی موتور، سیگنال اعمالی شیرهای ورودی و خروجی آب در نقاط چهارگانه جدول نگاشت در شکل (۹) الی شکل (۲۱) ارائه شده است.



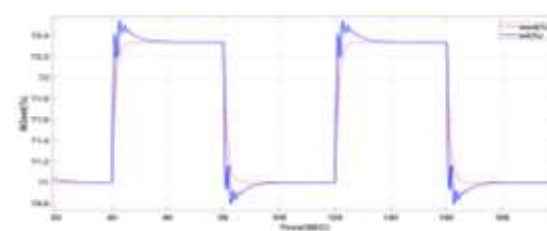
شکل ۹- سیگنال آزمون ω_2 و ω_{2set} در نقطه ی کاری اول



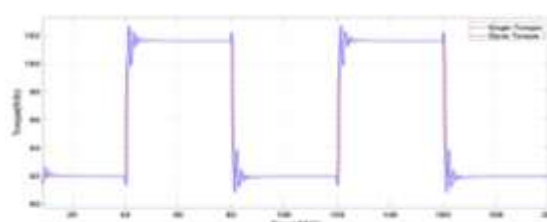
شکل ۱۰- سیگنال گشتاور تولیدی موتور و گشتاور اعمالی داینامومتر در نقطه ی کاری اول



شکل ۱۱- سیگنال اعمالی به شیرهای ورودی و خروجی آب V_s در نقطه ی کاری اول



شکل ۱۲- سیگنال آزمون ω_2 و ω_{2set} در نقطه ی کاری دوم

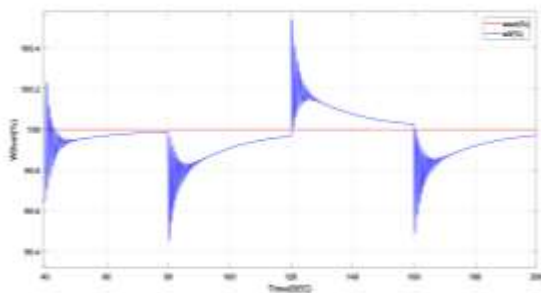


شکل ۱۳- سیگنال گشتاور تولیدی موتور و گشتاور اعمالی داینامومتر در نقطه ی کاری دوم

K_{IF} : پارامتر انتگرالی کنترل کننده

T_e : گشتاور تولیدی موتور بالگرد

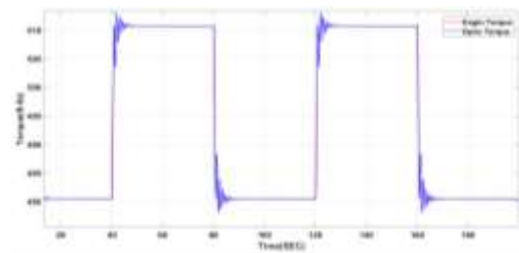
بررسی پایداری کنترل کننده سرعت در ناحیه حداکثر گشتاور تولیدی موتور بالگرد (نقطه حداکثری توان تولیدی موتور) انجام گرفته است. برای بررسی عملکرد کنترل کننده، اغتشاش پله‌ای با دامنه ۳۰ فوت پوند به صورت تغییرات ناگهانی در گشتاور تولیدی موتور بالگرد (T_D) در نظر گرفته می‌شود (شکل (۲۱)). عملکرد کنترل کننده 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 می‌باشد.



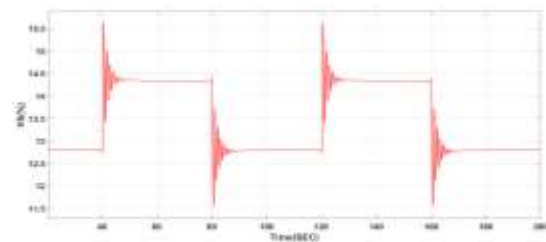
شکل ۲۱- سرعت مرجع ω_{2set} و سرعت ω_2 با حضور اغتشاش T_D

د) طراحی و تحقق سخت افزار سامانه کنترل

تحقق سامانه کنترل در دو بخش طراحی و ساخت سیستم سخت‌افزاری و طراحی و ساخت سیستم نرم‌افزاری انجام گرفته است. در بخش طراحی و ساخت سیستم سخت‌افزاری سامانه‌های کنترل، مواردی همچون آشکارسازی کمیت‌های فیزیکی تحت کنترل با دقت و زمان نمونه‌برداری مورد قبول، مدت زمان محاسبات سیگنال‌های خروجی سامانه کنترل و مدت زمان اعمال سیگنال خروجی سامانه کنترل به سامانه تحت کنترل از اهمیت بالایی برخوردار است. سیستم سخت‌افزاری طراحی شده باید بتواند در زمان اجرای حلقه کنترل (τ_l) کمیت‌های فیزیکی تحت کنترل را اندازه‌گیری (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 نمونه‌برداری در سامانه کنترل از پاسخ پله شیرهای آب ورودی و خروجی داینامومتر که دارای عملکرد سریعتری نسبت به سایر بخش‌های فرآیند دارد، استفاده شده است (شکل (۲۲)). مطابق شکل (۲۲) زمان خیز پاسخ پله حدود ۴۲۰



شکل ۱۹- سیگنال گشتاور تولیدی موتور و گشتاور اعمالی داینامومتر در نقطه کاری چهارم



شکل ۲۰- سیگنال اعمالی به شیرهای ورودی و خروجی آب در نقطه کاری چهارم

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

(۱۵)

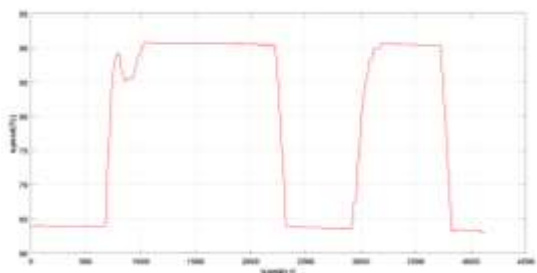
$$\begin{aligned} K_{PF}(t) &= 0.5 & T_e < 59 \\ K_{PF}(t) &= 0.0625 * (T_e - 59) + 0.5 & 59 \leq T_e < 91 \\ K_{PF}(t) &= 2.5 & 91 \leq T_e < 150 \\ K_{PF}(t) &= 0.0235 * (T_e - 150) + 2.5 & 150 \leq T_e < 235 \\ K_{PF}(t) &= 4.5 & 235 \leq T_e < 345 \\ K_{PF}(t) &= 0.0148 * (T_e - 345) + 4.5 & 345 \leq T_e < 480 \\ K_{PF}(t) &= 6.5 & 480 \leq T_e \end{aligned} \quad (16)$$

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

K_{PF} : پارامتر تناسبی کنترل کننده

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.

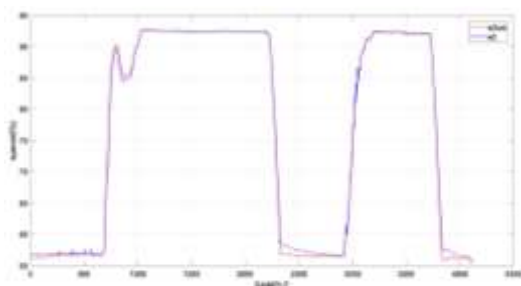
گام ۳: سرعت N_1 موتور ۲ مطابق با قسمت دوم (از نمونه برداری ۲۵۰۰ تا نمونه برداری ۴۰۰۰) منحنی شکل (۲۳) تا نقطه حداکثر N_1 افزایش و سپس مطابق با منحنی کاهش داده شد و سرعت N_1 در ۶۰ درصد تنظیم گردید.



شکل 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.



شکل ۲۴- مقادیر ثبت شده ω_2 و ω_{2set}

میلی ثانیه می‌باشد لذا می‌توان 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 گونه‌ای باشد که رابطه (۱۸) نیز برقرار باشد لذا مشخصات زمانی سخت افزار سامانه‌ی 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:

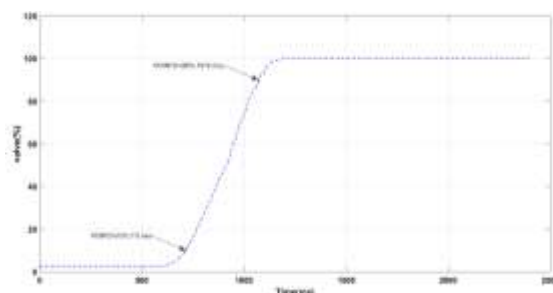
τ_l : زمان اجرای حلقه کنترل

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 المان‌های 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 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.

در این مقاله برای طراحی ایمن کنترل کننده، ابتدا مدل سازی سامانه داینامومتر کوپل شده به موتور بالگرد انجام گردید. لذا ابتدا مدل سازی در بخش تولید گشتاور (موتور بالگرد) و همچنین مدل سازی 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 بهره ی 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.

تعارض منافع:

نویسندگان مقاله تایید می کنند که هیچ گونه تعارض منافع (مالی، حرفه ای یا شخصی) که بر نتایج یا تفسیر پژوهش تاثیر بگذارد وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان مقاله متعهد می شوند که این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

مشارکت های نویسندگان

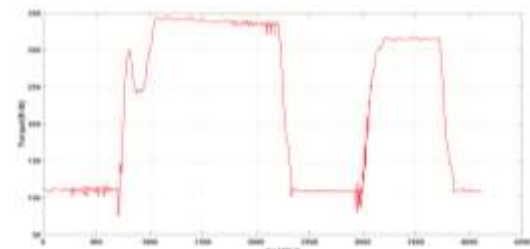
خلیل ساقی: جمع آوری داده ها، انجام شبیه سازی ها، تحلیل نتایج، نگارش و تهیه پیش نویس مقاله

عباس دیدبان: راهنمایی علمی، ویرایش تخصصی و نگارشی مقاله، ارزیابی و تفسیر نتایج

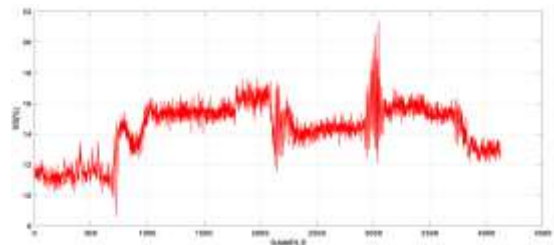
یوسف علینژاد برمی: راهنمایی علمی، ویرایش تخصصی و نگارشی مقاله، ارزیابی و تفسیر نتایج

منابع مالی

ندارد.

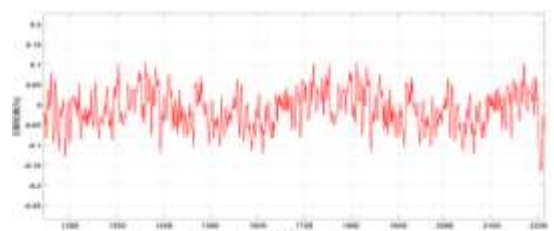


شکل ۲۵- مقادیر ثبت شده گشتاور تولیدی داینامومتر



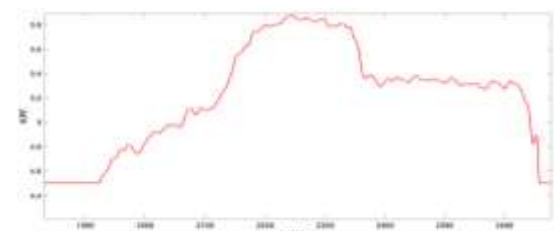
شکل ۲۶- سیگنال اعمالی به شیرهای ورودی و خروجی آب V_S

شکل (۲۷) نشان می دهد 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 ۲۸-الف- مقادیر پارامتر $K_{PF}(t)$



شکل ۲۸-ب- مقادیر پارامتر $K_{IF}(t)$

۵- نتیجه گیری

مراجع

- [1] Corti, Enrico, Nahuel Rojo, Marco Abbondanza, and Lorenzo Raggini. "Application of a model for optimizing steady state and transient control of hydraulic dynamometers." In AIP Conference Proceedings, vol. 2191, no. 1, p. 020052. AIP Publishing LLC, 2019.
- [2] Banazadeh, Afshin, and Hossein Abdollahi Gol. "Model-based fuzzy control of a gas turbine coupled with a dynamometer." *Journal of Propulsion and Power* 34, no. 5 (2018): 1178-1188.
- [3] Samokhin, Sergey, Sotiris Topaloglou, George Papalambrou, Kai Zenger, and Nikolaos Kyrtatos. "Adaptive power-split control design for marine hybrid diesel powertrain." *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 139, no. 2 (2017).
- [4] Yanakiev, Diana. "Adaptive control of diesel engine-dynamometer systems." In *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 98CH36171)*, vol. 2, pp. 1530-1534. IEEE, 1998.
- [5] Banis, Karlis. "Design development of dynamometer water absorber." In *Engineering for Rural Development. Proceedings of the International Scientific Conference (Latvia)*, no. 18/2019. 2019.
- [6] Gruenbacher, Engelbert, L. Del Re, H. Kokal, M. Schmidt, and M. Paulweber. "Adaptive control of engine torque with input delays." *IFAC Proceedings Volumes* 41, no. 2 (2008): 9479-9484.
- [7] Passenbrunner, Thomas E., Mario Sassano, Hannes Trogmann, Luigi del Re, Michael Paulweber, Martin Schmidt, and Helmut Kokal. "Inverse torque control of hydrodynamic dynamometers for combustion engine test benches." In *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, pp. 4598-4603. IEEE, 2011.
- [8] Ruan, Diwang, Hui Xie, Kang Song, and Guohui Zhang. "Adaptive speed control based on disturbance compensation for engine-dynamometer system." *IFAC-PapersOnLine* 52, no. 5 (2019): 642-647.
- [9] Ozsoy, Can, Ahmet Duyar, Recep Kazan, and Recep Kilic. "Power turbine speed control of the GE T700 engine using the zero steady-state self-tuning regulator." In *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems*, pp. 371-378. IEEE, 1997.
- [10] Vetr, Martin, Thomas E. Passenbrunner, Hannes Trogmann, Peter Ortner, Helmut Kokal, Martin Schmidt, and Michael Paulweber. "Control oriented modeling of a water brake dynamometer." In *2010 IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 222-227. IEEE, 2010.
- [11] Uthman, Aveen. "Antenna azimuth position control system using model reference adaptive control method gradient approach and stability approach." *J Eng Appl Sci* 14, no. 16 (2019): 5657-5664.
- [12] Mercer, Thomas Alexander. "The development of a water dynamometer for turbine test applications." PhD diss., Monterey, California. US Naval Postgraduate School, 1969.
- [13] Singh, Richa, Arnab Maity, and P. S. V. Nataraj. "Shaft speed control of laboratory gas turbine engine." *IFAC-PapersOnLine* 52, no. 12 (2019): 262-267.
- [14] Tuken, Taner. *Adaptive torque control of a diesel engine for transient test cycles*. Iowa State University, 1991.
- [15] Gowrishankar, K., and Vasanth Elancheralath. "Adaptive Fuzzy Controller to Control Turbine Speed." *Ubicc Jjournal* 3, no. 5 (2008).
- [16] Feyo, Abu, Amruth Ramesh Thelkar, C. Bharatiraja, and Yusuff Adedayo. "Reference Design and Comparative Analysis of Model Reference Adaptive Control for Steam Turbine Speed Control." *FME Transactions* 48, no. 2 (2020).
- [17] Toodeshki, M. H., and Javad Askari. "Model-Reference Adaptive Control for a nonlinear boiler-turbine system." In *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 1-6. IEEE, 2008.
- [18] Hodgson, P. G. "Theoretical model and dynamic simulation of a hydraulic dynamometer." PhD diss., PhD thesis, University of Canterbury, Christchurch, NZ, 1991.
- [19] Sivalingam, Ramalingam. *Flow modelling and computer-aided design of fluid couplings and torque converters*. University of Bath (United Kingdom), 1977.
- [20] Cahyono, Sukmaji Indro, Gwang-Hang Choe, and Nazaruddin Sinaga. "Numerical Analysis Dynamometer (Water Brake) Using Computational Fluid Dynamic Software." (2008): 103-111.
- [21] Raine, J. K., and P. G. Hodgson. "Computer simulation of a variable fill hydraulic dynamometer; part 1: torque absorption theory and the influence of working compartment geometry on performance." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Mechanical Engineering Science* 205, no. 3 (1991): 155-163.

- [22] Hodgson, P. G., and J. K. Raine. "Computer Simulation of a Variable Fill Hydraulic Dynamometer: Part 2: Steady State and Dynamic Open-Loop Performance." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Mechanical Engineering Science* 206, no. 1 (1992): 49-56.
- [23] Hodgson, P. G., and J. K. Raine. "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* 206, no. 5 (1992): 327-336.
- [24] Vladov, Serhii, Arkadiusz Banasik, Anatoliy Sachenko, Wojciech M. Kempa, Valerii Sokurenko, Oleksandr Muzychuk, Piotr Pikiewicz, Agnieszka Molga, and Victoria Vysotska. "Intelligent Method of Identifying the Nonlinear Dynamic Model for Helicopter Turboshift Engines." *Sensors* 24, no. 19 (2024): 6488.
- [25] Romandoni, Nanang, Achmad Aminudin, Kholis Nur Faizin, Indah Puspitasari, Alfi Tranggono Salim Agus, and Abdul Aziz. "Design of Water Brake Dynamometer." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1845, no. 1, p. 012048. IOP Publishing, 2021.
- [26] Song, Shuo, Hong Xiao, Leibo Jiang, and Yufeng Liang. "Neural Network Based Digital Twin for Performance Prediction of Water Brake Dynamometer." In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 87967, p. V004T05A028. American Society of Mechanical Engineers, 2024.
- [27] Saghi Kh. "Technical Knowledge development of speed controller For Turboshift engine Test Cell." *The Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR)*. (2018). (in Persian)