ماهنامه علمى يژوهشى





mme.modares.ac.ir

تحلیل شبه بیبعد استاتیکی و دینامیکی مدولاتور پهنا و فرکانس پالس در حضور نویز ورودی

سید حمید جلالی نائینی^{1*}، وحید بهلوری²

1 - استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشجوي دكتري، مهندسي مكانيك، دانشگاه تربيت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستى shjalalinaini@modares.ac.ir ،14115-111

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله، بازههای قابل قبول برای پارامترهای مدولاتور پهنا و فرکانس پالس برمبنای تحلیلهای ورودی صفر، استاتیکی و دینامیکی در حضور نویز حسگر بهدست میآید. مدولاتورهای پهنا و فرکانس پالس دارای 5 پارامتر تنظیمی بوده که برای رسیدن به عملکرد مناسب، مقادیر این پارامترها بایستی بطور مناسبی تعیین شود. در این مطالعه، با در نظر گرفتن مدل شبه بیعد، پارامترهای طراحی مدولاتور به 3 پارامتر کاهش	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 20 شهریور 1395 پذیرش: 22 آبان 1395 ارائه در سایت: 28 آذر 1395
مییابد. بنابراین، نتایج بازههای قابل قبول که فارغ از مقدار هر پارامتر، برحسب پارامترهای گروهبندی شده مستخرج شده، قابل استفاده برای مدولاتور با مقادیر مختلف 5 پارامتر تنظیمی خواهد بود. علاوهبر این، در مدل شبه بیبعد، بار محاسباتی، به خصوص در تحلیلهای آماری، بهطور قابل ملاحظهای کاهش مییابد. همچنین نویز حسگر، یک نویز سفید گوسی است که با عبور از یک فیلتر پایین گذر به ورودی مدولاتور اعمال میشود. فرکانس خروجی مدولاتور نیز به مقدار 50 هرتز محدود شده است. در تحلیل حاضر، مقدار متوسط مصرف سوخت و دفعات روشن شدن تراستر بهعنوان معیار عملکرد در نظر گرفته شده است. روال انتخاب نواحی قابل قبول پارامترها در سیستم شبه بیبعد برمبنای حذف مقدار % (و %10) بالای نمودارهای معیار عملکرد، میباشد. نهیایتاً نواحی قابل قبول پارامترها در سیستم شبه بیبعد برمبنای حذف بیبعد برای آستانه روشن شدن و هیسترزیس و پارامتر ثابت زمانی فیلتر ارائه شده است که هر کدام از این نمودارها به ازای یک مقدار متوسط ب	<i>کلید واژگان:</i> مدولاتور پهنا و فرکانس پالس نویز ورودی معادلات شبه بیبعد کنترل وضعیت ماهواره
برای چگالی طیفی نویز ورودی ترسیم شده است.	

Quasi-Normalized Static and Dynamic Analysis of Pulse-Width Pulse-Frequency Modulator in Presence of Input Noise

Seyed Hamid Jalali Naini^{*}, Vahid Bohlouri

Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran * P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, shjalalinaini@modares.ac.ir

ABSTRACT

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 10 September 2016 Accepted 12 November 2016 Available Online 18 December 2016

Keywords: Pulse-Width Pulse-Frequency Modulator Input Noise Quasi-Normalized Equations Satellite Attitude Control In this paper, the preferred regions of pulse-width pulse-frequency (PWPF) modulator parameters are obtained based on zero-input, static, and dynamic analysis in the presence of sensor noise as an input noise to PWPF modulator. The design parameters are reduced to 3 by using the quasi-normalized equations of PWPF modulator. Therefore, the results are applicable for grouped parameters, regardless of the value of each parameter, separately. Moreover, the computational burden is considerably decreased, especially in a statistical analysis. The input noise of the modulator is constructed by a low pass filter driven by a white Gaussian noise. The fuel consumption and number of thruster firings are considered as performance indices. The modulator output frequency is also limited to 50 Hz. The preferred regions of quasi-normalized system are extracted based on eliminating the upper 30% (and 10%) of the plotted graphs for the above-mentioned performance indices. Finally, the preferred regions can simply be viewed in our resulting curves, i.e., normalized hysteresis plotted versus normalized PWPF on-threshold for different values of modulator time constant. Each of these curves is plotted for a specified value of input noise power spectral density.

سادهترین نوع کنترل روشن-خاموش، کنترل بنگبنگ¹، کنترل بنگبنگ با ناحیه مرده² و کنترل بنگبنگ با ناحیه مرده و هیسترزیس است که اصطلاحاً به آن کنترلگر اشمیت تریگر می گویند [2]. کلاس دیگری از کنترلگرهای دو

1- مقدمه

در سیستمهای کنترل وضعیت و موقعیت ماهواره، از عملگر تراستر دو وضعیتی (روشن-خاموش) بهدلیل ایجاد سطح گشتاور بالا و سرعت عمل زیاد، استفاده فراوانی میشود. جهت اعمال سیگنالهای کنترلی به این نوع تراسترها، نیاز به کنترلکنندههای دو وضعیتی روشن-خاموش است [1].

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-19

S. H. Jalali Naini, V. Bohlouri, Quasi-Normalized Static and Dynamic Analysis of Pulse-Width Pulse-Frequency Modulator in Presence of Input Noise, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 455-466, 2016 (in Persian)

¹ Bang-Bang ² Dead Band

وضعیتی، مدولاتورها هستند که سبب بهبود عملکرد سیستم کنترل در کاهش مصرف سوخت و کاهش ارتعاشات میشوند. مدولاتور پهنای پالس'، مدولاتور نرخ كاذب² و مدولاتور پهنا و فركانس پالس³ (PWPF) از جمله اين مدولاتورها هستند [4,3]. در این میان، مدولاتور پهنا و فرکانس پالس به دلیل تنظیم همزمان پهنای پالس و فرکانس پالس اعمالی، عملکرد مناسبتری نسبت به سایر مدولاتورها و کنترلهای دو وضعیتی دارد. قابلیتها و مزیتهای مدولاتور پهنا و فرکانس پالس در مقایسه با مدولاتورهای مذکور در مراجع [6,5] تشریح شده است. به طور نمونه کاربرد مدولاتور پهنا و فرکانس پالس برای کنترل وضعیت ماهوارههای صلب در مراجع [7-9] و برای کنترل وضعیت ماهوارههای انعطاف پذیر در مراجع [12-10] آمده است. تنها بلوک مدولاتور پهنا و فرکانس پالس در سیستم کنترل دارای 5 پارامتر تنظیمی است که دستیابی به عملکرد مطلوب مستلزم تنظیم مناسب این پارامترها است. تنظیم پارامترهای مدولاتور پهنا و فرکانس پالس شامل تحلیل استاتیکی، دینامیکی و تحلیل سیستمی در حضور نویز و اغتشاش و اعمال محدودیت در فرکانس مدولاتور و دینامیک عملگر میباشد. در مرجع [13] برای تنظیم پارامترهای مدولاتور پهنا و فرکانس پالس، تحلیل استاتیکی و دینامیکی انجام شده است. در این مرجع با بررسی فعالیت تراستر، بازهای جهت تنظیم پارامترهای مدولاتور پهنا و فرکانس پالس پیشنهاد شده است. در مرجع [14] علاوه بر تحلیل استاتیکی و دینامیکی، با انجام تحلیل سیستمی بازههای مناسب پارامترهای مدولاتور پهنا و فرکانس یالس پیشنهاد شده است. نتایج دو مرجع فوق الذکر بدون حضور نویز و اغتشاش و اعمال محدودیت در فرکانس مدولاتور و دینامیک عملگر بدست آمده است. مقایسهای بین دو مدولاتور پهنا و فرکانس پالس و مدولاتور نرخ کاذب در تحلیل استاتیکی، دینامیکی و سیستمی در مرجع [15] صورت پذیرفته است و بازه مناسب پارامترها در این تحلیلها ارائه شده است که در آن نسبت به مرجع [14] از جنبه مدلسازی، تنها دینامیک عملگر اضافه شده است. لازم به ذکر است که بازه پیشنهادی در مراجع مذکور بهازای ماهواره با یک مشخصات مفروض (گشتاور تراستر معین، ممان اینرسی ماهواره در تحلیل سیستمی) است. لذا با تغییر این مشخصات، بازه تنظیمی پارامترهای سیستم کنترل نیاز به اصلاح دارد.

در صورت تلفیق پارامترهای مدولاتور با یکدیگر بهصورت بیبعد یا شبه بیبعد، علاوه بر کاهش پارامترها، گستره استفاده از نتایج نیز افزایش مییابد. به عبارت دیگر، بازه پیشنهادی پارامترهای (شبه) بیبعد با تغییر گشتاور تراستر در تحلیل استاتیکی، دینامیکی، سیستمی و تغییر ممان اینرسی در تحلیل سیستمی همچنان معتبر میباشد. در مرجع [16] پنج نمونه از شبه بیبعدسازی کنترل وضعیت با مدولاتور پهنا و فرکانس پالس ارائه شده است. در ادامه، در مرجع [17] با استفاده از مدل شبه بیبعد مذکور، بازههای مطلوب پارامترهای شبه بیبعد مدولاتور PWPF در تحلیل استاتیکی، دینامیکی و سیستمی بدست آمده است.

به دلیل وجود حسگر و ادوات نیمههادی الکترونیکی، معمولاً در یک حلقه کنترلی، نویز و سیگنالهای ناخواسته وجود دارد. نویز آمیخته با سیگنال اصلی میتواند عملکرد سیستم کنترل را تحت تأثیر قرار دهد. اثر نویز در کنترلگرهای دو وضعیتی میتواند بسیار مخرب باشد. این موضوع در مدولاتور پهنا و فرکانس پالس میتواند در نواحی کلیدزنی سبب روشن و

خاموش شدن متعدد و سریع مدولاتور شده که علاوه بر افزایش فعالیت عملگر و افزایش مصرف سوخت باعث ارتعاشات ناخواسته و مخرب می شود.

اگر چه طراحی سیستم کنترل وضعیت ماهواره با استفاده از مدولاتور پهنا و فرکانس پالس در حضور نویز، علی القاعده در صنایع پیشرو صورت پذیرفته است، اما انتشار این منابع در سطح عموم با محدودیتهای جدی مواجه بوده است. در این خصوص می توان به مرجع [18] اشاره نمود که به بررسی و مقایسه اثر نویز در عملکرد سیستم کنترل در دو حالت استفاده از حسگر زاویه و استفاده از دو حسگر زاویه و سرعت زاویهای در ماهواره صلب پرداخته است. در این مرجع، مقدار مصرف سوخت براساس مقدار واریانس نویز حسگر، بهره فیلتر مدولاتور، پهنای هیسترزیس و آستانه روشنشدن بررسی شده است. اگر چه نویز حسگر در مرجع مذکور در تحلیل سیستم کنترل لحاظ شده است، اما تحلیل استاتیکی، دینامیکی و سیستمی برای تعیین بازههای پارامترهای مدولاتور در حضور نویز مذکور انجام نشده است. بعلاوه، نتایج مرجع [18] بهازای عملگر تراستر ایده آل و عدم اعمال محدودیت فرکانس کاری ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می شود، تحلیل استاتیکی و دینامیکی مدولاتور پهنا و فرکانس پالس در حضور نویز به ویژه در شکل شبه بیبعد آن و اعمال محدودیتهای عملی، ضروری میباشد. در صورت انجام این تحلیل، این امکان وجود دارد که این مدولاتور با پارامترهای تنظیمی در ترکیب با سایر کنترلگرهای کلاسیک و مدرن نظیر كنترلگر تناسبى-انتگرالگير-مشتتقگير، كنترل بهينه، كنترل مد لغزشى استفاده شود. بطور نمونه در مرجع [19] از ترکیب منطق فازی و مدولاتور پهنا و فرکانس پالس برای بهبود عملکرد مدولاتور و کاهش اثر نویز استفاده شده است. به عبارت دقیقتر بهازای یک مدولاتور پهنا و فرکانس پالس با پارامترهای مشخص گرفته شده از منابع، دو سیستم کنترل ترکیبی با فازی و با کنترلگر تناسبی-مشتتق گیر مقایسه شده است. پارامترهای مدولاتور در منابع مذکور بر اساس نویز تنظیم نشده است. بعلاوه، تحلیل و تعیین بازههای مدولاتور انجام نشده است و نتایج آن بهازای عملگر تراستر ایدهآل و عدم اعمال محدوديت فركانس كارى ارائه شده است.

بنابراین برای مطالعه دقیق و عدم افت عملکرد مدولاتور، نیاز است تا بازه پارامترهای مدولاتور PWPF با توجه به مقدار چگالی طیفی نویز تعیین شود. از طرفی فرکانس کاری عملگرهای دو وضعیتی محدود بوده و لازم است این محدودیت در بدست آوردن بازه مناسب پارامترهای مدولاتور لحاظ شود. بعلاوه، استفاده از معادلات شبه بی بعد، کاربرد بازههای بدست آمده را تعمیم می دهد. در این پژوهش، تحلیل استاتیکی و دینامیکی مدولاتور پهنا و فرکانس پالس برای دستیابی به این مهم انجام شده است. نتایج پارامترهای تنظیمی برای مدولاتور مذکور می تواند در ترکیب مدولاتور با سایر کنترلگرها نیز استفاده شود.

2- مدولاتور پهنا و فرکانس پالس و مدل شبه بیبعد

مدولاتور پهنا و فرکانس پالس سیگنال کنترلی پیوسته را بهصورت گسسته سه وضعیتی $(0, \pm U_m)$ مقدار حداکثر گشتاور سه وضعیتی U_m مقدار حداکثر گشتاور کنترلی در بلوک اشمیت تریگر از یک رله بنگ بنگ با ناحیه مرده و ناحیه هیسترزیس تشکیل شده است. این مدولاتور از ترکیب یک فیلتر مرتبه اول و یک بلوک اشمیت تریگر مطابق "شکل 1" تشکیل شده است. در این شکل ، مقدار سیگنال ورودی با سیگنال بازخورد مقایسه شده و بعد از عبور از فیلتر مرتبه اول به بلوک اشمیت تریگر وارد می شود. در این مدولاتور ای ترکیس شده و بعد از عبور از فیلتر مرتبه اول به بلوک اشمیت تریگر وارد می شود. در این مدولاتور ای بی ترکیس شده و بعد از عبور از فیلتر مرتبه اول به بلوک اشمیت تریگر وارد می شود. در این مدولاتور ای با ترکیس این مدولاتور مره ناحیه هیسترزیس،

¹ Pulse Width Modulator

 ² Pseudo Rate
 ³ Pulse Width Pulse Frequency Modulator

سیگنال ورودی به اشمیتتریگر، K بهره فیلتر و T_f ثابت زمانی فیلتر U

در این جا به منظور کاهش تعداد پارامترهای طراحی مدولاتور و همچنین فراگیر بودن بازه جواب، از روش شبه بی بعدسازی در "شکل 2" مطابق مرجع [17] استفاده می شود. در این شکل با تلفیق دو پارامتر U_m و X با سایر پارامترها، عملاً 5 پارامتر تنظیم مدولاتور به 3 پارامتر $U_{\rm on}/KU_m$ ، $U_{\rm off}/KU_m$ و T_f کاهش یافته است. برای استفاده از مدولاتور کافی است این 3 پارامتر به طور مناسب تنظیم شود.

بهدلیل ساختار ذاتی حسگرها، معمولاً خروجی آنها آغشته به نویز و همراه با خطا است. حسگرهای استفاده شده در سیستمهای تعیین و کنترل وضعیت ماهواره، مانند ژیروسکوپ، ردیاب ستاره، مغناطیسسنج و حسگر زمین هم دارای نویز هستند. البته نوع و مقدار نویز برای هر کدام از حسگرهای مذکور متفاوت بوده و در برگه مشخصات حسگر، مقدار واریانس یا انحراف معیار خروجی حسگر ذکر میشود [21,20].

در اینجا مطابق "شکل 3" نویز اعمالی به مدولاتور، یک نویز سفید گوسی با مقدار میانگین صفر است که از یک فیلتر پایین گذر مرتبه اول عبور می کند. برای تحلیل اثر نویز، با توجه به غیرخطی بودن مدولاتور PWPF، از روش آماری مونت کارلو استفاده می شود. مقدار ثابت زمانی فیلتر نویز 0.01 تا 0.001 تا 0.01 تا در فر گرفته شده است. در نظر گرفته شده است.

3- بررسی مدولاتور PWPF با ورودی نویز خالص

PWPF در ابتدا تنها نویز سفید گوسی عبوری از فیلتر مرتبه اول به مدولاتور PWPF اعمال شده تا عملکرد آن تنها در حضور نویز بررسی شود. به عبارت دیگر، این تحلیل مطابق "شکل 3" با مقدار ورودی اصلی صفر ($\mathbf{0} = \mathbf{3}$) انجام میشود. همان طور که از این شکل ملاحظه میشود، نویز سفید گوسی ابتدا وارد یک فیلتر مرتبه اول شده تا پهنای باند آن محدود شده (چگالی طیفی نویز به مدل واقعی نزدیکتر شود) و به مدولاتور (شبه) بی بعد اعمال میشود.





شكل 1 مدولاتور پهنا و فركانس پالس [3]



Fig. 2 Quasi-normalized PWPF modulator [17] شكل 2 مدولاتور پهنا و فركانس پالس شبه بىبعد [17]

در ادامه، حل عددی مسئله در نرمافزار متلب با روش اویلر و گام زمانی انتگرال گیری ³³10 ثانیه تا زمان نهایی t_f **= 20** ثانیه انجام میشود. بهعلاوه، فرکانس خروجی مدولاتور به 50 هرتز محدود شده است.

در طراحی ماهوارهها، مصرف سوخت و فعالیت تراستر از جمله عواملی هستند که بر طول عمر ماهواره تأثیر می گذارند. بنابراین، در اینجا مقدار مصرف سوخت و تعداد دفعات روشن شدن تراستر به عنوان معیار عملکرد انتخاب شده است. مقدار مصرف سوخت متناسب با انتگرال قدر مطلق خروجی مدولاتور در طی زمان میباشد که در اینجا به اختصار همان مصرف سوخت گفته می شود.

در ابتدا تعداد تکرار مورد نیاز برای شبیه سازی آماری برمبنای "شکل 4" تعیین می شود. برای این منظور، مقدار مصرف سوخت متوسط (ΔV) و معیار عملکرد متوسط دفعات روشن شدن تراستر (N) برحسب تعداد تکرار حل $U_{\rm on}/KU_m = 0.5$ و 0.1 و $J_{\rm on}/KU_m$ عددی بهازای ورودی نویز سفید با چگالی طیفی 1.0 و 0.1 تیرار مطابق ترسیم شده است. با توجه به دقت و بار محاسباتی، تعداد 100 تکرار مطابق "شکل 4" منظور شده است. انتخاب مذکور با تغییر پارامترهای مدولاتور بهازای T_f در T_f

در ادامه، مقدار مصرف سوخت متوسط (ΔV) برحسب ثابت زمانی فیلتر مدولاتور در "شکل 6" بهازای نویز سفید گوسی با چهار مقدار مختلف ϕ_0 نمایش داده شده است. در این شکل، مقدار پارامترهای بی عبعد است داده شده است. همانطور که $U_{\rm off}/U_{\rm on} = 0.2$ انتخاب شده است. همانطور که انتظار می رفت روند کلی مصرف سوخت با افزایش ثابت زمانی، نزولی است. از



Fig. 3 Quasi-normalized PWPF modulator with noise input شکل 3 مدولاتور پهنا و فرکانس پالس شبه بی بعد با اعمال ورودی نویز



Fig. 4 Fuel consumption and thruster firings versus iterations for $PSD=10^{-1}$ ($U_{on}/KU_m = 0.5$)

شکل 4 مصرف سوخت و فعالیت تراستر برحسب تکرار برنامه با چگالی طیفی نویز $U_{
m on}/KU_m$ = 0.5) 10^{-1}

طرفی با افزایش مقدار نویز، مصرف سوخت نیز افزایش مییابد. نمودارهای شکل مذکور به وضوح نشان میدهد که علیرغم صفر بودن سیگنال اصلی، ورود نویز به مدولاتور میتواند بهطور مکرر سبب روشن و خاموش شدن مدولاتور شود.

در "شكلهاى 7 و 8" نمودار مقدار متوسط مصرف سوخت به ترتيب بر حسب پارامترهاى $U_{\rm on}/KU_m$ و $U_{\rm off}/U_{\rm on}$ بهازاى چگالىهاى طيفى مختلف نويز ورودى ترسيم شده است. مطابق اين دو شكل، با افزايش آستانه روشن شدن يا آستانه خاموش شدن، مصرف سوخت كاهش مىيابد. همچنين با افزايش چگالى طيفى توان نويز، مقدار متوسط مصرف سوخت بهازاى يک مقدار ثابت $U_{\rm on}/KU_m$ افزايش مىيابد. در شكلهاى مذكور، ثابت زمانى فيلتر مدولاتور برابر 0.35 ثانيه انتخاب شده است. تأثير مقدار هيسترزيس در مصرف سوخت در "شكل 9" بهازاى چهار مقدار مختلف ϕ بررسى شده است. در اين شكل، ثابت زمانى فيلتر مدولاتور برابر 0.35 ثانيه و 20.5 ثانيه و

به منظور ارزیابی دقیقتر، میزان مصرف سوخت بهصورت سه بعدی در



Fig. 5 Fuel consumption and thruster firings versus U_{on}/KU_m with PSD=10⁻¹, ($T_f = 0.35$)





Fig. 6 Fuel consumption versus filter time constant for input noise with different PSDs ($U_{\rm on}/KU_m = 0.3, U_{\rm off}/U_{\rm on} = 0.2$) شکل 6 مصرف سوخت برحسب ثابت زمانی فیلتر بهازای ورودی نویز با چگالیهای

 $(U_{\rm on}/KU_m = 0.3, U_{\rm off}/U_{\rm on} = 0.2)$ طيفي مختلف



Fig. 7 Fuel consumption versus U_{on}/KU_m for input noise with different PSDs, $(U_{off}/U_{on} = 0.2, T_f = 0.35)$

شکل 7 مصرف سوخت برحسب $U_{
m on}/KU_m$ بهازای ورودی نویز با چگالیهای طیفی



Fig. 8 Fuel consumption versus U_{off}/U_{on} for input noise with different PSDs, ($U_{on} = 1, T_f = 0.35$)





Fig. 9 Fuel consumption versus *h* for input noise with different PSDs, $(U_{on} = 0.5, T_f = 0.35)$

شکل 9 مصرف سوخت برحسب h بهازای ورودی نویز با چگالیهای طیفی مختلف (U₀n **= 0.5**, T_f **= 0.35**)

"شكل 10" برحسب پارامتر بي بعد آستانه روشن شدن و پارامتر ثابت زماني فیلتر به ازای ورودی نویز با چگالی طیفی ¹⁻¹0 ترسیم شده است. روند کلی مطابق این شکل، افزایش مقدار متوسط مصرف سوخت بهازای افزایش و یا کاهش T_f را نشان میدهد. $U_{
m on}/KU_m$

در "شكل 11" مقدار متوسط مصرف سوخت برحسب ثابت زماني و پارامتر هیسترزیس بیبعد، h = ($U_{\rm on} - U_{\rm off}$)/KU_m، بررسی شده است. $\phi_0 = \mathbf{10}^{-1}$ و $U_{\mathrm{on}}/KU_m = \mathbf{1}$ و U_{on}/KU_m و U_{on}/KU_m و U_{on}/KU_m (است. روند کلی مطابق "شکل 11"، کاهش مصرف سوخت بهازای کاهش هیسترزیس (بی بعد) است. همان طور که از این شکل مشاهده می شود با كاهش ثابت زمانی فیلتر، مصرف سوخت به شدت افزایش می یابد. در "شكل 12" تأثير هيسترزيس بيبعد (h) و پارامتر Uon/KU_m بطور همزمان بر مصرف سوخت ملاحظه مىشود. مطابق اين شكل مقدار متوسط مصرف سوخت با افزایش h و کاهش $U_{
m on}/KU_m$ ، افزایش می یابد. "شکل 12" به خوبی تأثیر پارامترهای بیبعد آستانه روشنشدن و هیسترزیس در مصرف سوخت را نشان میدهد. اگر چه رفتار مصرف سوخت برحسب سه پارامتر با بعد/ییبعد تا حدودی از قبل قابل پیشبینی بود، اما انتخاب مقادیر مناسب این پارامترها تنها از بررسی نمودارها میسر خواهد شد. در "شکل 12"، مقدار ثابت زمانی فیلتر مدولاتور برابر $T_f = 0.35$ انتخاب شده است.

در اینجا معیار عملکرد متوسط دفعات روشن شدن تراستر (N) بهازای نویز ورودی، در دو "شکل 13 و 14" بررسی می شود. در "شکل 13" تعداد دفعات روشن شدن تراستر برحسب ثابت زمانى فيلتر مدولاتور بهازاى چگالیهای طیفی مختلف نویز ورودی مدولاتور و با فرض مقادیر و $U_{\rm off}/U_{\rm on}$ = 0.2 و $U_{\rm on}/KU_m$ = 0.3 و $U_{\rm on}/KU_m$ این شکل مشاهده می شود با کاهش T_f و یا افزایش ϕ_0 دفعات روشن شدن تراستر به شدت افزایش می یابد. در "شکل 14" معیار عملکرد دفعات روشن $\phi_0 = 0.1$ شدن تراستر برحسب دو پارامتر $U_{
m on}/KU_m$ و پارامتر h ، بهازای و با فرض با فرض **5.0 = T_f ثانیه ترسیم شده است. در این شکل با کاهش** دفعات روشن شدن تراستر، بهطور قابل ملاحظهای افزایش $U_{
m on}/KU_m$ مییابد. همچنین در نمودارهای مذکور، فرکانس خروجی مدولاتور به مقدار 50 هرتز محدود شده است. در ادامه بازههای ترجیحی پارامترهای مدولاتور



Fig. 10 Fuel consumption versus filter time constant and U_{on}/KU_m for input noise with $PSD=10^{-1}$ ($U_{off}/U_{on} = 0.2$)

شکل 10 مصرف سوخت برحسب ثابت زمانی و $U_{
m on}/KU_m$ بهازای نویز با چگالی $(U_{\rm off}/U_{\rm on} = 0.2) \ 10^{-1}$ طيفي





Fig. 11 Fuel consumption versus filter time constant and h for input noise with $PSD=10^{-1} (U_{on}/KU_m = 1)$

mکل 11 مصرف سوخت برحسب ثابت زمانی فیلتر و h با چگالی طیفی نویز $^{10^{-1}}$ ، $(U_{on}/KU_m = 1)$



Fig. 12 Fuel consumption versus $U_{on} I K U_m$ and h for input noise with $PSD=10^{-1} (T_f = 0.35)$

شکل 12 مصرف سوخت برحسب پارامترهای $U_{
m on}/KU_m$ و h با چگالی طیفی نویز $(T_f = 0.35) 10^{-1}$, $T_f = 0.35$



Fig. 13 Thruster firings versus T_f for input noise with different PSDs, $(U_{\rm on}/KU_m = 0.3, U_{\rm off}/U_{\rm on} = 0.2)$

شکل 13 فعالیت تراستر برحسب T_f بهازای ورودی نویز با چگالیهای طیفی مختلف $(U_{\rm on}/KU_m = 0.3, U_{\rm off}/U_{\rm on} = 0.2)$

459

بهازای چند چگالی طیفی مشخص برای نویز با حذف 30% نواحی بالای نمودارهای معیار عملکرد (مصرف سوخت و فعالیت تراستر)، مطابق جداول 1 و 2 استخراج شده است. لازم به ذكر است كه اين بازهها تنها بهازاى تحليل با ورودی اصلی صفر (E=0) است.

4- تحليل استاتيكي

در تحليل استاتيكي، تحليل عملكرد بهازاى اعمال ورودى ثابت به مدولاتور صورت مى پذيرد. به منظور تعيين ناحيه قابل قبول پارامترهاى مدولاتور، نمودارهای معیار عملکرد مصرف سوخت و همچنین تعداد دفعات روشنشدن مدولاتور ترسیم شده و بازه نامطلوب (بازهای که معیار عملکرد در آن مقادیر بزرگی دارد) حذف می شود. معیارهای عملکرد با تغییر سه پارامتر و T_f به صورت دو به دو، بررسی می شود. در این جا $U_{
m off}/U_{
m on}$ ، $U_{
m on}/KU_m$ مقدار ورودی برابر 0.5 (وسط بازه ورودی که بین 0 تا 1 است) لحاظ می شود. این ورودی با نویز گوسی مشابه نویز گوسی در بخش قبل، جمع جبری شده و مطابق "شکل 3" به مدولاتور اعمال می شود. مقدار چگالی طیفی نویز در محدوده $^{+}10^{-4}$ تا $^{-10}$ در نظر گرفته شده و روش حل عددی مسئله، گام انتگرال گیری زمانی و زمان نهایی، مانند بخش 3 انتخاب شده است.

از آنجایی که عملگرهای دو وضعیتی شامل رلهها، شیرهای برقی، شیرهای پنوماتیکی و به خصوص تراسترها با فرکانس کاری محدودی



Fig. 14 Thruster firings versus U_{on} / KU_m and h for input noise with $PSD=10^{-2} (T_f = 0.35)$

شکل 14 فعالیت تراستر برحسب پارامترهای $U_{
m on}/KU_m$ و h با چگالی طیفی نویز $(T_f = 0.35) 10^{-2}$ برابر

Table 1 Preferred regions of modulator parameters when E=0 regarding fuel consumption

$U_{\rm on} - U_{\rm off} / K U_m$	$U_{\rm on}/KU_m$	T_f	ϕ_0 (PSD)
< 0.98	>0.02	>0.03	0.001
< 0.95	>0.03	>0.05	0.01
< 0.9	>0.05	>0.12	0.1
< 0.48	>0.1	>0.4	0.5

جدول 2 ناحیه قابل قبول پارامترهای مدولاتور در حالت E=0 برمبنای فعالیت تراستر Table 2 Preferred regions of modulator parameters when E=0 regarding thruster firings

$U_{\rm on} - U_{\rm off} I K U_m$	$U_{\rm on} / K U_m$	T_{f}	ϕ_0 (PSD)
< 0.99	>0.02	>0.02	0.001
< 0.97	>0.03	>0.04	0.01
< 0.92	>0.04	>0.05	0.1
< 0.72	>0.06	>0.05	0.5

می توانند روشن -خاموش شوند، در مطالعه حاضر، فرکانس خروجی مدولاتور به مقدار 50 هرتز محدود شده است. تحليل با استفاده از روش مونت كارلو با 100 بار اجرا انجام شده و معیارهای عملکرد مذکور محاسبه و نمودارهای مربوطه ترسیم می شود. نمونه ای از نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی در "شکل 11" ترسیم شده است. در این شکل، نمودار فعالیت تراستر به ازای پارامتر و ثابت زمانی فیلتر مدولاتور مشاهده می شود. همان طور که از $U_{
m on}/K U_m$ این شکل مشابه نتایج بخش قبل، نتیجه گیری می شود، روند کلی فعالیت تراستر با کاهش مقدار ثابت زمانی و کاهش مقدار آستانه روشنشدن، افزایشی است. پس از ترسیم نمودارهای متعدد و مقایسههای دو به دو، نتایج نهایی تحلیل استاتیکی، در "شکلهای 16 تا 19" آمده است. در این شکلها ناحیه قابل قبول پارامترهای مدولاتور برحسب مقدار چگالی طیفی توان نویز، مشخص شده است. روال انتخاب بازه پارامترهای مدولاتور براساس حذف 10% (یا 30%) بالای معیار عملکرد است که به ترتیب در نمودارهای آتی با 90% (یا 70%) نمایش داده شده است. به عبارت دیگر، در این نمودارها محدوده 90% (يا 70%) پايين معيار عملكرد به عنوان محدوده قابل قبول انتخاب شده است. این روال برای هر دو معیار عملکرد مصرف سوخت و فعالیت تراستر اعمال شده است. مطابق این روال، ناحیه قابل قبول برای پارامتر $U_{
m on}/KU_m$ در تحلیل استاتیکی برحسب چگالی طیفی نویز ورودی بهازای دو معیار 70% و 90% و با فرض **0.1 = U**off/Uon در "شکل 16" ارائه شده است. همان طور که انتظار می رود، ناحیه قابل قبول بهازای معیار 70% بايد وسيعتر از ناحيه 90% باشد. علت انتخاب دو معيار 70% و 90% این است که در صورتی که تنها معیار 70% ممکن است در نهایت با اشتراک بازههای مطلوب در سه تحلیل استاتیکی، دینامیکی و سیستمی محدوده قابل قبول بسیار کوچک شده و یا اصلاً اشتراکی نداشته باشند. لذا انتخاب معیار 90% بازه وسيعترى براى هر پارامتر بدست مىدهد كه در نهايت احتمال وجود اشتراک در سه تحلیل مذکور افزایش می یابد.

در "شکل 17" ناحیه قابل قبول برای پارامتر $U_{
m off}/U_{
m on}$ برحسب چگالی طیفی نویز ورودی ترسیم شده است. در این شکل نیز ناحیه بالای نمودارها ناحیه قابل قبول برای هر یک از معیارها میباشد. این شکل با فرض ، استخراج شده است. با استفاده از نتایج این شکل $U_{\rm on}/KU_m = 0.48$



Fig. 15 Thruster firings versus filter time constant and U_{on}/KU_m for input noise with PSD= 10^{-1} ($U_{off}/U_{on} = 0.1$) شکل 15 فعالیت تراستر برحسب ثابت زمانی فیلتر مدولاتور و $U_{
m on}/KU_m$ با چگالی

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-19

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.63.8



Fig. 18 Preferred region of h parameter versus PSD, $(U_{on}/KU_m = 0.48)$

شکل 18 ناحیه قابل قبول پارامتر h بر حسب چگالی طیفی توان نویز (Uon/KUm = 0.48)



Fig. 19 Preferred region of T_f parameter versus PSD ($U_{on}/KU_m = 0.48, U_{off}/U_{on} = 0.1$)

(U_{on} شکل 19 ناحیه قابل قبول پارامتر T_f برحسب چگالی طیفی توان نویز U_{on} ($U_{on} = 0.48, U_{off}$) ($KU_m = 0.48, U_{off}/U_{on} = 0.1$

جدول 3 ناحیه قابل قبول پارامترهای مدولاتور در تحلیل استاتیکی بهازای %90 معیار عملکرد

 Table 3 Preferred regions of modulator parameters in static analysis for

 90% Performance Index

h	$U_{\rm off}/U_{\rm on}$	$U_{\rm on}/KU_m$	T_f	ϕ_0 (PSD)	
< 0.46	>0.02	>0.12	>0.15	0.0001	
< 0.45	>0.03	>0.15	>0.17	0.0005	
< 0.43	>0.035	>0.19	>0.18	0.001	
< 0.42	>0.04	>0.23	>0.20	0.005	
< 0.41	>0.05	>0.34	>0.22	0.01	

جدول 4 ناحیه قابل قبول پارامترهای مدولاتور در تحلیل استاتیکی بهازای %70 معیار عملکرد

Table 4 Preferred regions of modulator parameters in static analysis for 90% Performance Index

/ 0 / 0					
h	$U_{\rm off}/U_{\rm on}$	$U_{\rm on} I K U_m$	T_f	ϕ_0 (PSD)	
< 0.43	>0.04	>0.28	>0.15	0.0001	
< 0.42	>0.05	>0.32	>0.17	0.0005	
< 0.41	>0.06	>0.35	>0.18	0.001	
< 0.4	>0.07	>0.38	>0.20	0.005	
< 0.39	>0.08	>0.58	>0.22	0.01	

پارامتر آستانه خاموش شدن مدولاتور براساس تحلیل استاتیکی با توجه به چگالی طیفی نویز تعیین میشود.

در "شكل 18" نيز ناحيه قابل قبول براى هيسترزيس بى بعد (h) بهازاى $U_{\rm on}/KU_m = 0.48$ ملاحظه مى شود. البته در اين شكل، ناحيه واقع در $U_{\rm on}/KU_m = 0.48$ زير خطوط، ناحيه قابل قبول پارامتر h است. همچنان كه از اين شكل مشاهده مى شود، با افزايش چگالى طيفى نويز، ناحيه قابل قبول پارامتر h است. همچنان كه از اين بر كل مشاهده مى شود، با افزايش چگالى طيفى نويز، ناحيه قابل قبول پارامتر h رحسب چگالى طيفى نويز ورودى بهازاى $U_{\rm on}/KU_m = 0.48$ ورودى بهازاى $U_{\rm on}/KU_m = 0.48$ رامتر $U_{\rm on}/KU_m = 0.48$ مى شده است زمانى فيلتر مدولاتور برحسب چگالى طيفى نويز ورودى بهازاى $U_{\rm on}/KU_m = 0.48$ رامتر ماتور اين مى مى برحسب چگالى طيفى نويز ميازى مى شده است. مشابه نتايج بدست آمده از بخش قبل، با افزايش چگالى طيفى نويز، ناحيه قابل قبول ثابت زمانى مدولاتور محدولاتور محدودتر مى شود.

نواحی قابل قبول پارامترهای مدولاتور در تحلیل استاتیکی برای هر دو معیار عملکرد مقدار متوسط مصرف سوخت و دفعات روشن شدن تراستر بهازای معیار 90% در جدول 3 و بهازای معیار 70% در جدول 4 آمده است.

5- تحليل ديناميكي

با توجه به این که در سیستم های کنترل حلقه بسته و در محدوده



Fig. 16 Preferred region of U_{on}/KU_m parameter versus PSD $(U_{off}/U_{on} = 0.1)$

شکل 16 ناحیه قابل قبول پارامتر *U*on/KU_m برحسب چگالی طیف توان نویز (U_{off}/U_{on} **= 0.1)**



Fig. 17 Preferred region of U_{off}/U_{on} parameter versus PSD ($U_{on}/KU_m = 0.48$)

شکل 17 ناحیه قابل قبول پارامتر *U*_{off}/*U*on برحسب چگالی طیف توان نویز (U_{on}**/**KU_m **= 0.48**)

پایداری آنها بهطور معمول ورودی کنترلگر بهصورت نوسانی خواهد بود، لذا تحلیل عملکرد بهازای اعمال ورودی سینوسی با فرکانسهای مختلف توصیه میشود. این نوع تحلیل در مدولاتورهای پهنا و فرکانس پالس اصطلاحاً «تحلیل دینامیکی» گفته می شود. در تحلیل دینامیکی، معیار عملکرد برحسب فرکانس ورودی اعمالی به مدولاتور و مقادیر پارامترهای و T_f و $U_{
m off}/KU_m$ ، $U_{
m on}/KU_m$ ورودى سينوسى با دامنه واحد و فركانس بين 1 تا 150 راديان بر ثانيه مطابق "شکل 3" به مدولاتور اعمال شده و معیارهای عملکرد بررسی می شود. به منظور بررسی اثر نویز در تحلیل دینامیکی، مشابه تحلیل استاتیکی، یک نویز گوسی سفید بعد از عبور از یک فیلتر مرتبه اول با ورودی سینوسی مذکور جمع جبرى شده و به مدولاتور اعمال مى شود. روال انتخاب نواحى قابل قبول همانند تحليل استاتيكي، ترسيم نمودارهاي سهبعدي معيار عملكرد بهصورت دو به دو برحسب پارامترهای مدولاتور و چگالی طیفی نویز ورودی میباشد. معيار انتخاب نواحي قابل قبول نيز همان %70 و %90 بخش پايين مقادير معیار عملکرد در نمودارهای سهبعدی مذکور است. در اینجا به منظور اختصار تنها نتايج نهايى تحليل ديناميكى ارائه مىشود. نواحى قابل قبول پارامترهای مدولاتور بر مبنای تحلیل دینامیکی بهازای دو معیار عملکرد مصرف سوخت و فعالیت تراستر در "شکلهای 20 تا 23" ملاحظه می شود. در "شكل 20" ناحيه قابل قبول براى پارامتر $U_{
m on}/KU_m$ برحسب چگالى طیفی نویز ورودی و بهازای دو معیار عملکرد فعالیت تراستر و مصرف سوخت با فرض انتخاب مقادير $T_f = 0.1$ و $U_{\rm off}/U_{\rm on} = 0.1$ ترسيم شده است که ناحیه بالای خطوط، ناحیه قابل قبول میباشد.

در ادامه، ناحیه قابل قبول پارامتر U_{off}/U_{on} برحسب چگالی طیفی نویز و با فرض مقادير T_f = **0.1** و U_{on}/KU_m = **0.48** و با فرض مقادير "شكل 21" ترسيم شده است. در این شکل، ناحیه قابل قبول برای معیار 70% با پیش زمینه خاکستری متمایز شده است. همچنین، ناحیه قابل قبول بهازای معیار %90 ناحیه بین دو خط پایین و بالای زمینه خاکستری مذکور است. همان طور که از "شكل 21" ملاحظه مى شود، با افزايش چگالى طيفى نويز، نواحى قابل قبول هم از طرف پایین خطچین و هم از طرف بالای خطچین محدودتر ϕ_0 = 0.05 مىشود. در صورتى كه مقدار چگالى طيفى نويز حدوداً برابر باشد، دو خط حدى بالا و پايين ناحيه قابل قبول بهازاى معيار 70% همديگر $\phi_0 > 0.05$ را قطع می کند. به عبارت دیگر، اگر چگالی طیفی نویز بزرگتر از باشد، ناحیه قابل قبولی بهازای شرایط مفروض وجود نخواهد داشت. اما محدوده قابل قبول بهازاى معيار 90% بهطور قابل ملاحظهاى وسيعتر است. در "شکل 23" ناحیه قابل قبول پارامتر h برحسب چگالی طیفی نویز در تحلیل دینامیکی با فرض $U_{
m on}/KU_m = 0.48$ ارائه شده است. در این شکل نیز ناحیه متمایز شده به رنگ خاکستری، ناحیه قابل قبول پارامتر h بهازای معيار 70% است. ناحيه بين دو خط ديگر در اين شكل محدوده قابل قبول بهازای معیار %90 را نشان میدهد. در "شکل 23" ناحیه قابل قبول پارامتر $U_{\rm on}/KU_m = 0.48$ ثابت زمانی فیلتر مدولاتور بهازای ارائه شده است. در این شکل، ناحیه قابل قبول، ناحیه $U_{\rm off}/U_{\rm on} = 0.1$ بالای خطوطِ ترسیم شده است.

6- تجميع نتايج تحليل استاتيكي و ديناميكي

به منظور تنظیم پارامترهای مدولاتور، در این مرحله نتایج تحلیل استاتیکی (با ورودی صفر و ورودی 0.5) و دینامیکی توأمان لحاظ می شود. به عبارت



Fig. 20 Preferred region of U_{on}/KU_{m} parameter versus PSD ($U_{off}/U_{on} = 0.1$, $T_f = 0.1$)

شکل 20 ناحیه قابل قبول پارامتر *U*on/KU برحسب چگالی طیف توان نویز (U_{off}/U_{on} = **0.1,** T_f = **0.1)**



Fig. 21 Preferred region of $\mathbf{U}_{off}/\mathbf{U}_{on}$ parameter versus PSD $(U_{on}/KU_m = 0.48, T_f = 0.1)$

شکل 21 ناحیه قابل قبول پارامتر $U_{
m on}/KU_m$ برحسب چگالی طیف توان نویز $U_{
m on}/KU_m$ = 0.48, T_f = 0.1)



Fig. 22 Preferred region of h parameter versus PSD ($U_{on}/KU_m = 0.48$)

شکل 22 ناحیه قابل قبول پارامتر h برحسب چگالی طیفی توان نویز **/** (*KU_m* = 0.48)

جدول 6 ناحیه قابل قبول پارامترهای مدولاتور در تحلیل دینامیکی با معیار عملکرد 70%

Table 6 The range of modulator parameters in dynamic analysis with

 70% performance index

h	$U_{\rm off}/U_{\rm on}$	$U_{\rm on} I K U_m$	T_f	ϕ_0 (PSD)
0.295	<0.9 & >0.3	>0.33	>0.16	0.0001
0.259	<0.86 & >0.34	>0.36	>0.165	0.0005
0.220	<0.84 & >0.38	>0.38	>0.17	0.001
0.130	<0.7 & >0.43	>0.51	>0.175	0.005
0.068	<0.6 & >0.47	>0.62	>0.18	0.01



Fig. 24 Preferred region of U_{on}/KU_m parameter versus PSD, $(U_{off}/U_{on} = 0.1, T_f = 0.1)$

شکل 24 ناحیه قابل قبول پارامتر $U_{
m on}/K U_m$ برحسب چگالی طیف توان نویز، $(U_{
m off}/U_{
m on}$ = 0.1, T_f = 0.1)

با میانیابی قابل حصول است. لازم به ذکر است که مقدار دقیق پارامترها پس از تحلیل سیستمی (در حلقه کامل سیستم کنترل) بدست میآید.

7- بررسی نتایج به ازای تغییر فرکانس خروجی مدولاتور

همان طور که قبلاً اشاره شد، در عمل فرکانس روشن و خاموش شدن عملگرهای دو وضعیتی محدود است. این محدودیت با توجه به ویژگیهای ساخت اجزای این عملگرها مانند رله، شیر برقی/پنوماتیک و مکانیزم احتراق در تراسترها، ایجاد می شود. در مطالعه حاضر، مقدار فرکانس خروجی مدولاتور که سیگنال اعمالی به تراستر است، به مقدار 50 هرتز محدود شده است تا نتایج به واقعیت نزدیک باشد. همان طور که در بخش مقدمه ذکر شد، در مراجع [18,14,13] تحلیلهای استاتیکی و دینامیکی بدون محدودیت در فرکانس مدولاتور انجام شده است.

به منظور افزایش دید در طراحی و مشاهده تأثیر فرکانس در استخراج نواحی قابل قبول پارامترها، نتایج حاصل بهازای دو فرکانس دیگر (20 و 500 هرتز) در "شکلهای 26 و 27" مقایسه شده است. همانطور که از "شکل 26" ملاحظه میشود، در فرکانس 500 هرتز (که برای عملگر تراستر، با فناوری حاضر، غیر ممکن است)، ناحیه قابل قبول پارامتر $U_{\rm on}/KU_m$ نازای تغییر چگالی طیفی نویز، تغییر محسوسی نداشته و حد پایین آن بهازای تغییر چگالی طیفی نویز، تغییر محسوسی نداشته و حد پایین آن مرتز، مشابه فرکانس 50 هرتز است، اما ناحیه قابل قبول برای فرکانس 20 هرتز، مشابه فرکانس 50 هرتز است، اما ناحیه قابل قبول برای فرکانس 50 نویز بزرگتر، محدودتر میشود. در "شکل 23" نیز ناحیه قابل قبول پارامتر نویز بزرگتر، محدودتر میشود. در "شکل 23" نیز ناحیه قابل قبول پارامتر مروز که مروز که میشود، به میشود و چگالی طیفی محدوده پارامتر (U_{on}f/U_{on})، چندان قابل ملاحظه نیست و همانطور که





 $KU_m = 0.48, U_{\rm off}/U_{\rm on} = 0.1$)

دیگر، اشتراک نواحی برای دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی باید استخراج شود. تجمیع نتایج استاتیکی و دینامیکی برای مقادیر قابل قبول پارامتر *سود. تجمیع نتایج استاتیکی و دینامیکی برای مقادیر منتج شده است.*

بازه زیر نمودار، بازه نامطلوب و بازه بالای نمودار بازه مناسب برای انتخاب پارامتر برحسب چگالی طیفی نویز می باشد. این شکل با مفروضاتی که در تحلیلهای استاتیکی و دینامیکی ذکر شد، تجمیع شده است. ناحیه قابل قبول ثابت زمانی فیلتر، حاصل از تجمیع نتایج در دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی در "شکل 25" ارائه شده است. ناحیه قابل قبول پارامتر دیامیکی در "شکل 25" ارائه شده است. ناحیه قابل قبول پارامتر را ارائه می دهد.

همان طور که از نمودارهای "شکلهای 24 و 25" مشاهده می شود، نواحی قابل قبول برای پارامترهای مدولاتور بهازای مقادیر مفروض سایر پارامترها استخراج شده است. اگر چه این نمودارها به خوبی رفتار پارامترها و روند تعیین محدوده قابل قبول را نشان می دهد، اما برای طراح نمودارهای قابل استفاده و کاربردی فراهم نمی کند. بدین منظور نمودارها باید بهازای مقادیر مختلف سه پارامتر مدولاتور ترسیم شده باشد. این کار بهازای یک مقدار مشخص چگالی طیفی نویز میسر می شود. در پیوست، نمودارهای طراحی بهازای پنج مقدار مختلف چگالی طیفی نویز برای معیار 70% آمده است. لذا طراح به صورت کاربردی و با توجه به مقادیر مورد نظر، می تواند از این نمودارها برای تنظیم پارامترهای مدولاتور استفاده نماید. نکته قابل ملاحظه این است که تعیین نواحی قابل قبول به صورت جداول 5 و 6 در صورتی معنادار است که خطوط ترسیم شده در شکلهای نواحی قابل قبول به صورت افقی باشد، در غیر این صورت بخشی از ناحیه حذف شده است. مزیت نمودارهای کاربردی پیوست شده این است که نواحی قابل قبول را با

جدول 5 ناحیه قابل قبول پارامترهای مدولاتور در تحلیل دینامیکی با معیار عملکرد 90%

Table 5 The range of modulator parameters in dynamic analysis with	th
90% performance index	

h	$U_{\rm off}/U_{\rm on}$	$U_{\rm on} I K U_m$	T_f	ϕ_0 (PSD)
0.377	<0.94 & >0.15	>0.21	>0.16	0.0001
0.357	<0.93 & >0.2	>0.23	>0.165	0.0005
0.333	<0.92 & >0.22	>0.25	>0.17	0.001
0.307	<0.9 & >0.27	>0.35	>0.175	0.005
0.289	<0.89 & >0.3	>0.38	>0.18	0.01



Fig. 25 Preferred region of T_f parameter versus PSD, $(U_{on}/KU_m = 0.48, U_{off}/U_{on} = 0.1)$

(U_{on} / شکل 25 ناحیه قابل قبول پارامتر T_f برحسب چگالی طیف توان نویز، KU_m = 0.48, U_{off}/U_{on} = 0.1)



Fig. 26 Preferred region of U_{on}/KU_m parameter versus PSD in different frequency $(U_{off}/U_{on} = 0.1, T_f = 0.1)$

شکل 26 ناحیه قابل قبول پارامتر $U_{
m on}/KU_m$ برحسب چگالی طیف توان نویز در فرکانسهای مختلف ($U_{
m off}/U_{
m on}$ = 0.1, T_f = 0.1



Fig. 27 Preferred region of U_{off}/U_{on} parameter versus PSD in different frequency $(U_{on}/KU_m = 0.48)$

شکل 27 ناحیه قابل قبول پارامتر $U_{
m off}/U_{
m on}$ برحسب چگالی طیف توان نویز در فرکانس های مختلف ($U_{
m on}/KU_m = 0.48$)

ملاحظه میشود، فرکانس بالاتر محدودهای محافظه کارانهتر برای پارامتر U_{off}/U_{on} بدست میآید. لازم به ذکر است نواحی قابل قبول برای پارامترهای بابعد (آستانه روشن شدن و آستانه خاموش شدن) با تغییر قابل ملاحظهای دارد.

8- نتیجه گیری

در این مطالعه، نواحی قابل قبول پارامترهای مدولاتور پهنا و فرکانس پالس با در نظر گرفتن اثر نویز در تحلیلهای ورودی صفر (تنها با اعمال نویز)، استاتیکی و دینامیکی استخراج شده است. برای فراگیر بودن نتایج، ابتدا معادلات مدولاتور (شبه) بی بعدسازی شده و تعداد پارامترها از 5 به 3 پارامتر كاهش يافته است. از اين 3 پارامتر، ثابت زماني فيلتر مدولاتور با بُعد بوده و 2 پارامتر دیگر بی بعد است. بعلاوه، کاهش تعداد پارامترها به 3، قابلیت نمایش گرافیکی و انتخاب نواحی قابل قبول را میسر ساخته است. برای تحلیل اثر نویز، از اجراهای مکرر و روش شبیهسازی مونت کارلو استفاده شده است. نکته کاربردی دیگر، اعمال محدودیت در فرکانس خروجی مدولاتور است. به منظور تعیین نواحی قابل قبول پارامترهای مدولاتور، دو معیار عملکرد مصرف سوخت متوسط و متوسط تعداد روشن شدن های تراستر در نظر گرفته شده است. روند استخراج نواحي قابل قبول بر مبناي حذف مقدار 30% (و 10%) قسمت بالای نمودارهای معیار عملکرد بهازای چگالیهای مختلف طیفی نویز است. اگرچه همان گونه که انتظار میرفت با افزایش مقدار چگالی طیفی نویز، این نواحی محدودتر می شود، اما انتخاب مقادیر پارامترها (و تعیین حدود نواحی قابل قبول) تنها از طریق نمودارها میسر است. در ادامه، نواحی قابل قبول بهازای سه تحلیل حالت صفر، استاتیکی و دینامیکی تجمیع شده است. البته به عبارت دقيق، اشتراک نواحي قابل قبول استخراج شده است. در پايان، به منظور کاربرد عملی نتایج در انتخاب پارامترهای مدولاتور، هیسترزیس بی ُبعد برحسب آستانه روشنشدن بی ُبعد بهازای مقادیر مختلف چگالی طیفی نویز ورودی و مقدار ثابت زمانی فیلتر ترسیم شده است. البته مقدار دقیق پارامترها پس از تحلیل سیستمی (در حلقه کامل سیستم کنترل) بدست مىآيد.

9- پيوست

0.1 0.09 $T_{f} = 0.1$ $- - T_f = 0.2$ 0.08 $T_{c} = 0.3$ 0.07 $-... T_f = 0.4$ 0.06 0.04 0.03 0.02 Preferred Region 0.01 0 0.05 0.06 0.07 0.08 0.09 0.01 0.02 0.03 0.04 0.1 U_/KU_

نمودارهای طراحی برمبنای سه تحلیل ورودی صفر، استاتیکی و دینامیکی بهازای چگالیهای طیفی مختلف نویز ورودی در "شکلهای 28 تا 32" ارائه

Fig. 28 Preferred region of PWPF parameters for input noise with PSD= 10^{-3}

شکل 28 ناحیه قابل قبول انتخاب پارامترهای مدولاتور بهازای ³⁻PSD=10



Fig. 32 Preferred region of PWPF parameters for input noise with PSD=0.5

شکل 32 ناحیه قابل قبول انتخاب پارامترهای مدولاتور بهازای PSD=0.5

دفعات روشن شدن تراستر و حذف %30 نواحی بالای نمودارهای معیار عملکرد استخراج شده است. طراح میتواند متناظر با چگالی طیفی مورد نظر، بازه قابل قبول برای انتخاب دو پارامتر بی *بعد U*on/KUm و *U*off/KU و پارامتر با بعد ثابت زمانی فیلتر مدولاتور از این نمودارها استفاده نماید. نمودارهای مذکور با اعمال محدودیت فرکانس 50 هرتز در خروجی مدولاتور و پهنای باند 100هرتز برای نویز ورودی است.

10- مراجع

- [1] R. Wertz, Spacecraft Attitude Determination and Control, pp. 206-210, Boston: Kluwer Academic Publisher, 1978.
- [2] A. E. Bryson, Applied optimal control: optimization, estimation and control, Florida: CRC Press, 1975.
- [3] M. J. Sidi, Spacecraft Dynamics and Control, A Practical Engineering Approach, First Edition, pp. 260-273, Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [4] T. C. Anthony, B. Wie, S. Carroll, Pulse-modulated control synthesis for a flexible spacecraft, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 13, No. 6, pp. 1014–1022, 1990.
- [5] B. Wie, Space vehicle dynamics and control. pp. 451-457, Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998.
- [6] R. S. McClelland, Spacecraft Attitude Control System Performance Using Pulse-Width Pulse-Frequency Modulated Thrusters, Master Thesis, Naval Postgraduate School Monterey CA, 1994.
- [7] M. P. Topland, Nonlinear attitude control of the micro-satellite ESEO, 55th International Astronautical Congress, Vancouver, Canada, 2004.
- [8] G. Arantes, L. S. Martins-Filho, A. C. Santana, Optimal on-off attitude control for the Brazilian multi mission platform satellite, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2009, No. 1, pp. 1- 17, 2009.
 [9] S. Moghadaszadeh Bazaz, V. Bohlouri, S. H. Jalali Naini, Attitude Control of
- [9] S. Moghadaszadeh Bazaz, V. Bohlouri, S. H. Jalali Naini, Attitude Control of Rigid Satellite with Pulse-Width Pulse-Frequency Modulation Using Observer-based Modified PID Controller, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 139-148, 2016 (in Persian ناری).
- [10] G. Song, B. N. Agrawal, Vibration Suppression of Flexible Spacecraft During Attitude Control, *Acta Astronautica*, Vol. 49, No. 2, pp. 73-83, 2001.
- [11] Q. Hu and G. Ma, Flexible spacecraft vibration suppression using PWPF modulated input component command and sliding mode control, Asian Journal of Control, Vol. 9, No. 1, pp. 20–29, 2007.
- [12] B. N. Agrawal, R. S. Mcclelland, and G. Song, Attitude control of flexible spacecraft using pulse-width pulse-frequency modulated thrusters, *Space Technology-Kedlington*, Vol. 17, No. 1, pp. 15–34, 1997.
- [13] G. Song, N. Buck, B. N. Agrawal, Spacecraft Vibration Reduction Using Pulse-width Pulse-Frequency Modulated Input Shaper, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 22, No. 3, pp. 433-440, 1999.
- [14] T. Krovel, Optimal Tuning of PWPF Modulator for Attitude Control, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2005.
 [15] M. Navabi, H. Rangraz, Comparing optimum operation of Pulse Width-Pulse
- [15] M. Navabi, H. Rangraz, Comparing optimum operation of Pulse Width-Pulse Frequency and Pseudo-Rate modulators in spacecraft attitude control subsystem employing thruster, 6th International Conference in Recent Advances in Space Technologies, pp. 625–630, 2013.
- [16] S. H. Jalali Naini, Normalizing the Single-Axis Spacecraft Attitude Control Equations with Pulse-Width Pulse-Frequency Modulator, *The 13 th Iranian*

شده است. این نمودارها براساس دو معیار عملکرد متوسط مصرف سوخت و



Fig. 29 Preferred region of PWPF parameters for input noise with $\mbox{PSD}{=}10^{-2}$

 $PSD=10^{-2}$ ناحیه قابل قبول انتخاب پارامترهای مدولاتور بهازای $PSD=10^{-2}$



Fig. 30 Preferred region of PWPF parameters for input noise with PSD=0.05

شكل 30 ناحيه قابل قبول انتخاب پارامترهای مدولاتور بهازای PSD=0.05



Fig. 31 Preferred region of PWPF parameters for input noise with PSD=0.1

شكل 31 ناحيه قابل قبول انتخاب پارامترهای مدولاتور بهازای PSD=0.1

cycle fuel consumption of a spinning symmetric drag - free satellite, Technical Report, 1996.

- [19] A. Bellar, M. K. Fellah, M. Arezki, A Cold Gas Thruster Microsatellite Attitude Control. Revue Roumaine des Science Techniques-Series Electro technique et Energetique, Vol. 58, No.4, pp. 395-404, 2013.
 [20]L. Wilfried, K. Wittmann, W. Hallmann, Handbook of space technology, Vol.
- 22, pp. 332-361, New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [21] M. M. Abid, Spacecraft sensors, pp. 95-135, New York: John Wiley & Sons, 2005.

Aerospace Society Conference, Tehran, Iran, March 1-3, 2014. (in (فارسی Persian

- [17] S. H. Jalali Naini, Sh. Ahmadi Darani, Parametric Optimization of Spacecraft Attitude Control with Pulse-Width Pulse-Frequency Modulator Using Quasi-Normalized Equations, The 13 th Iranian Aerospace Society Conference, Tehran, Iran, March 1-3, 2014. (in Persian فارسى)
- [18] R. Farquhar, S. U. Aeronautics, S. Astronautics, Analog studies of the limit-