مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1395، دوره 16، شماره 12، ص‌ص 455-466

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

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 بهلوری[2]

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

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 شهریور 1395

پذیرش: 22 آبان 1395

ارائه در سایت: 28 آذر 1395

کلید واژگان:

مدولاتور پهنا و فرکانس پالس

نویز ورودی

معادلات شبه بی‌بعد

کنترل وضعیت ماهواره

چکیده

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 بی‌بعد، پارامترهای طراحی مدولاتور به 3 پارامتر کاهش 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 30% (و 10%) بالای نمودارهای معیار عملکرد، می‌باشد. نهایتاً نواحی قابل قبول پارامترها به‌صورت نمودارهایی برحسب پارامترهای بی‌بعد برای آستانه روشن شدن و هیسترزیس و پارامتر ثابت زمانی فیلتر ارائه شده است که هر کدام از این نمودارها به‌ازای یک مقدار مشخص 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

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

ABSTRACT

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.

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]. ساده‌ترین نوع کنترل روشن-خاموش، کنترل بنگ‌بنگ[1]، کنترل بنگ‌بنگ با ناحیه مرده[2] و کنترل بنگ‌بنگ با ناحیه مرده و هیسترزیس است که اصطلاحاً به آن کنترلگر اشمیت تریگر می‌گویند [2]. کلاس دیگری از کنترلگرهای دو

[1] Bang-Bang
[2] Dead Band

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

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)

وضعیتی، مدولاتورها هستند که سبب بهبود عملکرد سیستم کنترل در کاهش مصرف سوخت و کاهش ارتعاشات می‌شوند. مدولاتور پهنای پالس[1]، مدولاتور نرخ کاذب[2] و مدولاتور پهنا و فرکانس پالس[3] (PWPF) از جمله این مدولاتورها هستند [4,3]. در این میان، مدولاتور پهنا و فرکانس پالس به دلیل تنظیم همزمان پهنای پالس و فرکانس پالسِ 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. به‌طور نمونه کاربرد مدولاتور پهنا و فرکانس پالس برای کنترل وضعیت ماهواره‌های صلب در مراجع [7-9] و برای کنترل وضعیت ماهواره‌های انعطاف‌پذیر در مراجع [10-12] 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 پالس 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 می‌شود.

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 می‌توان 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 ایده‌آل و عدم اعمال محدودیت فرکانس کاری ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، 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 کنترلگر تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر، کنترل بهینه، کنترل مد لغزشی 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-مشتق‌گیر 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 محدودیت فرکانس کاری 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 بی‌بعد، کاربرد بازه‌های بدست آمده را تعمیم می‌دهد. 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 می‌تواند 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 $(0, \pm U_m)$ تبدیل می‌کند که در آن U_m مقدار حداکثر گشتاور کنترلی در بلوک اشمیت‌تریگر است. بلوک اشمیت تریگر از یک رله بنگ‌بنگ 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 می‌شود. در این مدولاتور، U_{on} و U_{off} به ترتیب آستانه شروع و خاتمه ناحیه هیسترزیس،

[1] Pulse Width Modulator
[2] Pseudo Rate
[3] Pulse Width Pulse Frequency Modulator

U سیگنال ورودی به اشمیت‌تریگر، K بهره فیلتر و T_f ثابت زمانی فیلتر است [3].

در این‌جا به منظور کاهش تعداد پارامترهای طراحی مدولاتور و همچنین فراگیر بودن بازه جواب، از روش شبه بی‌بعدسازی در "شکل 2" مطابق مرجع [17] استفاده می‌شود. در این شکل با تلفیق دو پارامتر U_m و K با سایر پارامترها، عملاً 5 پارامتر تنظیم مدولاتور به 3 پارامتر U_{on}/KU_m، U_{off}/KU_m و T_f کاهش یافته است. برای استفاده از مدولاتور کافی است این 3 پارامتر به‌طور 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 پایین‌گذر مرتبه اول عبور می‌کند. برای تحلیل اثر نویز، با توجه به غیرخطی بودن مدولاتور PWPF، از روش آماری مونت کارلو استفاده می‌شود. مقدار ثابت زمانی فیلتر نویز $T_n = 0.01$ ثانیه و مقدار چگالی طیفی توان نویز (ϕ_0) بین 0.001 تا 0.5 در نظر گرفته شده است.

3- بررسی مدولاتور PWPF با ورودی نویز خالص

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 $(E = 0)$ انجام می‌شود. همان‌طور 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) بی‌بعد اعمال می‌شود.

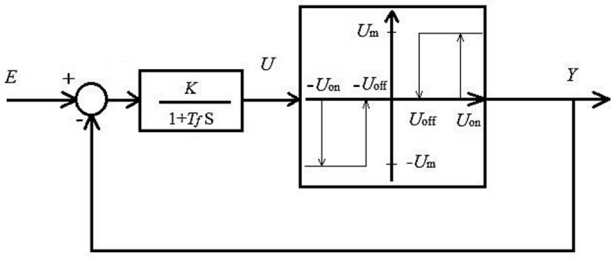

Fig. 1 PWPF modulator [3]

شکل 1 مدولاتور پهنا و فرکانس پالس [3]

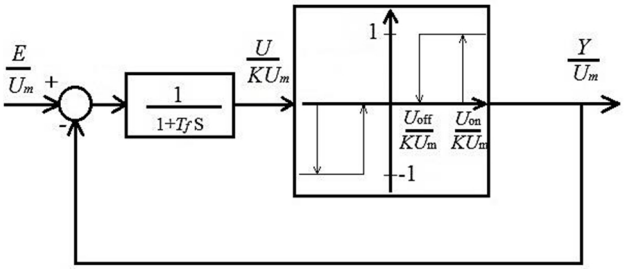

Fig. 2 Quasi-normalized PWPF modulator [17]

شکل 2 مدولاتور پهنا و فرکانس پالس شبه بی‌بعد [17]

در ادامه، حل عددی مسئله در نرم‌افزار متلب با روش اویلر و گام زمانی انتگرال‌گیری 10^{-3} 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 می‌گذارند. 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 می‌شود.

در ابتدا تعداد تکرار مورد نیاز برای شبیه‌سازی آماری برمبنای "شکل 4" تعیین می‌شود. برای این منظور، مقدار مصرف سوخت متوسط (ΔV) و معیار عملکرد متوسط دفعات روشن شدن تراستر (N) برحسب تعداد تکرار حل عددی به‌ازای ورودی نویز سفید با چگالی طیفی 0.1 و $U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.5$ 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 $T_f > 0.05$ نیز مطابق "شکل 5" معقول است.

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 بی‌بعد $U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.3$ و $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}} = 0.2$ انتخاب شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت روند کلی مصرف سوخت با افزایش ثابت زمانی، نزولی است. از

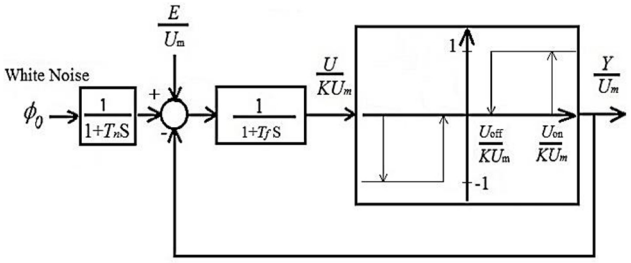

Fig. 3 Quasi-normalized PWPF modulator with noise input

شکل 3 مدولاتور پهنا و فرکانس پالس شبه بی‌بعد با اعمال ورودی نویز

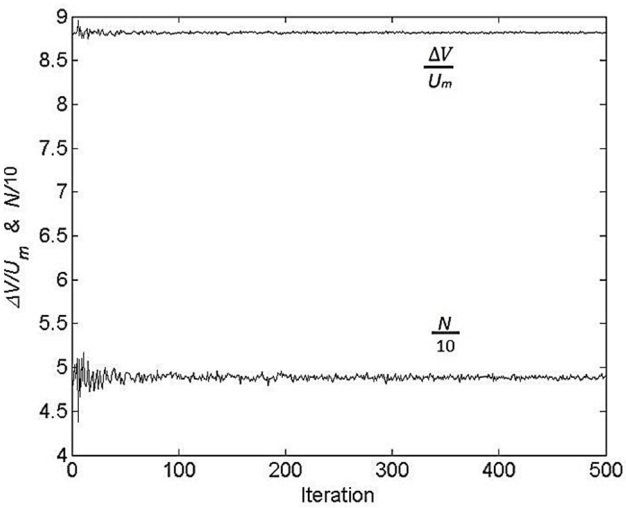

Fig. 4 Fuel consumption and thruster firings versus iterations for PSD=10^{-1} $(U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.5)$

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

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 "شکل‌های 7 و 8" نمودار مقدار متوسط مصرف سوخت به ترتیب بر حسب پارامترهای U_{on}/KU_m و $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ به‌ازای چگالی‌های طیفی مختلف نویز ورودی ترسیم شده است. مطابق این دو شکل، با افزایش آستانه روشن شدن یا آستانه خاموش‌شدن، مصرف سوخت کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش چگالی طیفی توان نویز، مقدار متوسط مصرف سوخت به‌ازای یک مقدار ثابت U_{on}/KU_m افزایش می‌یابد. در شکل‌های مذکور، ثابت زمانی فیلتر مدولاتور برابر 0.35 ثانیه انتخاب شده است. تأثیر مقدار هیسترزیس در مصرف سوخت در "شکل 9" به‌ازای چهار مقدار مختلف ϕ_0 بررسی شده است. در این شکل، ثابت زمانی فیلتر مدولاتور برابر 0.35 ثانیه و $U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.5$ انتخاب شده است.

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

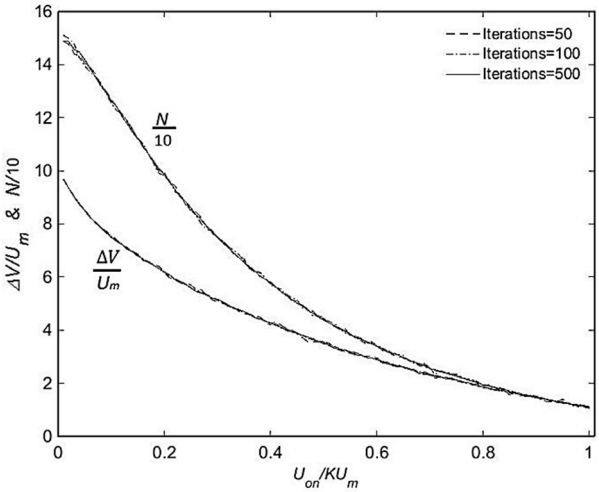

Fig. 5 Fuel consumption and thruster firings versus U_{on}/KU_m with PSD=10^{-1}, (T_f = 0.35)

شکل 5 مصرف سوخت و فعالیت تراستر برحسب U_{on}/KU_m با چگالی طیفی نویز 10^{-1} (T_f = 0.35)

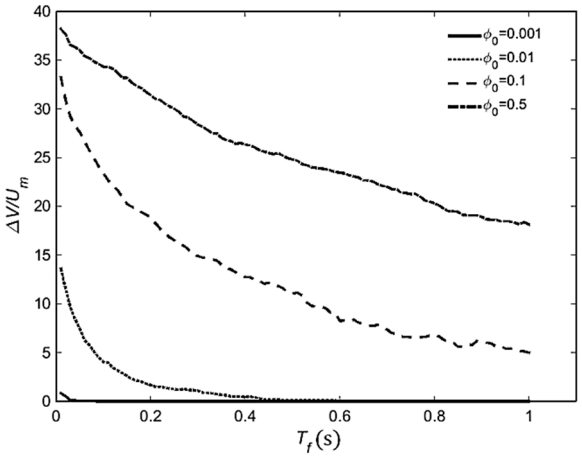

Fig. 6 Fuel consumption versus filter time constant for input noise with different PSDs (U_{on}/KU_m = 0.3, $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ = 0.2)

شکل 6 مصرف سوخت برحسب ثابت زمانی فیلتر به‌ازای ورودی نویز با چگالی‌های طیفی مختلف (U_{on}/KU_m = 0.3, $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ = 0.2)

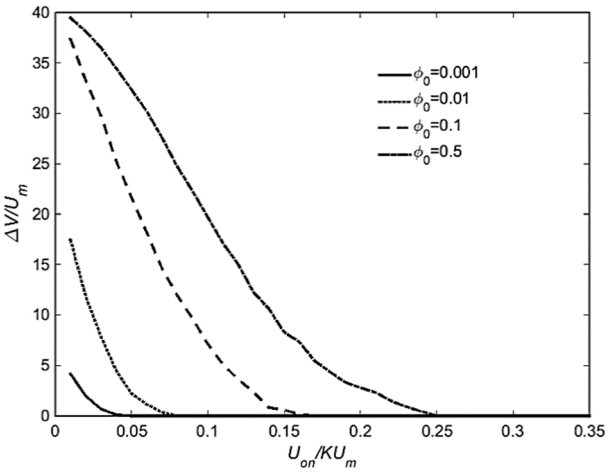

Fig. 7 Fuel consumption versus U_{on}/KU_m for input noise with different PSDs, ($U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ = 0.2, T_f = 0.35)

شکل 7 مصرف سوخت برحسب U_{on}/KU_m به‌ازای ورودی نویز با چگالی‌های طیفی مختلف ($U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ = 0.2, T_f = 0.35)

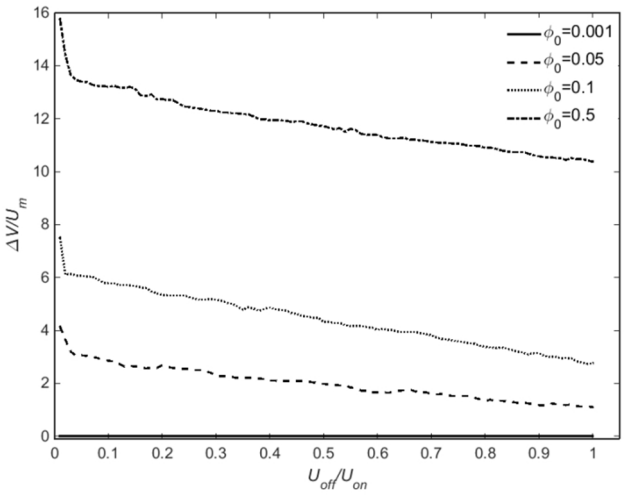

Fig. 8 Fuel consumption versus $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ for input noise with different PSDs, (U_{on} = 1, T_f = 0.35)

شکل 8 مصرف سوخت برحسب $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ به‌ازای ورودی نویز با چگالی‌های طیفی مختلف (U_{on} = 1, T_f = 0.35)

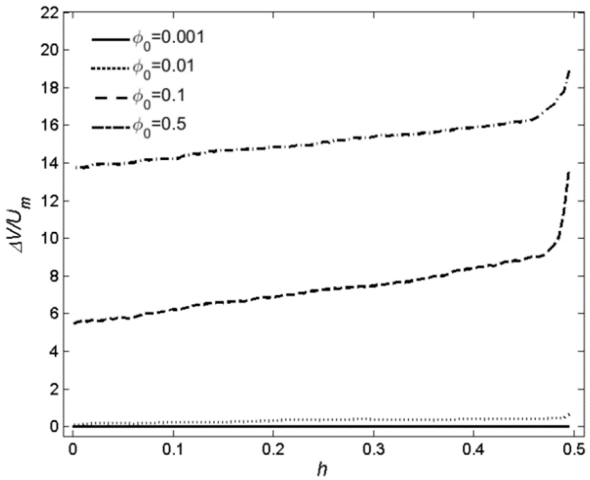

Fig. 9 Fuel consumption versus h for input noise with different PSDs, (U_{on} = 0.5, T_f = 0.35)

شکل 9 مصرف سوخت برحسب h به‌ازای ورودی نویز با چگالی‌های طیفی مختلف (U_{on} = 0.5, T_f = 0.35)

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

در "شکل 11" مقدار متوسط مصرف سوخت برحسب ثابت زمانی و پارامتر هیسترزیس بی‌بعد، $h = (U_{\mathrm{on}} - U_{\mathrm{off}})/KU_m$، بررسی شده است. نتایج این شکل به‌ازای مقادیر پارامترهای $U_{\mathrm{on}}/KU_m = 1$ و $\phi_0 = 10^{-1}$ است. روند کلی مطابق "شکل 11"، کاهش مصرف سوخت به‌ازای کاهش هیسترزیس (بی‌بعد) است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود با کاهش ثابت زمانی فیلتر، مصرف سوخت به شدت افزایش می‌یابد. در "شکل 12" تأثیر هیسترزیس بی‌بعد (h) و پارامتر U_{on}/KU_m بطور همزمان بر مصرف سوخت ملاحظه می‌شود. مطابق این شکل مقدار متوسط مصرف سوخت با افزایش h و کاهش U_{on}/KU_m، افزایش می‌یابد. "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/بی‌بعد 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 می‌شود. در "شکل 13" تعداد دفعات روشن شدن تراستر برحسب ثابت زمانی فیلتر مدولاتور به‌ازای چگالی‌های طیفی مختلف نویز ورودی مدولاتور و با فرض مقادیر $U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.3$ و $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}} = 0.2$ ترسیم شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود با کاهش T_f و یا افزایش ϕ_0 دفعات روشن شدن تراستر به شدت افزایش می‌یابد. در "شکل 14" معیار عملکرد دفعات روشن شدن تراستر برحسب دو پارامتر U_{on}/KU_m و پارامتر h، به‌ازای $\phi_0 = 0.1$ و با فرض با فرض $T_f = 0.35$ ثانیه ترسیم شده است. در این شکل با کاهش U_{on}/KU_m دفعات روشن شدن تراستر، به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. همچنین در نمودارهای مذکور، فرکانس خروجی مدولاتور به مقدار 50 هرتز محدود شده است. در ادامه بازه‌های ترجیحی پارامترهای مدولاتور

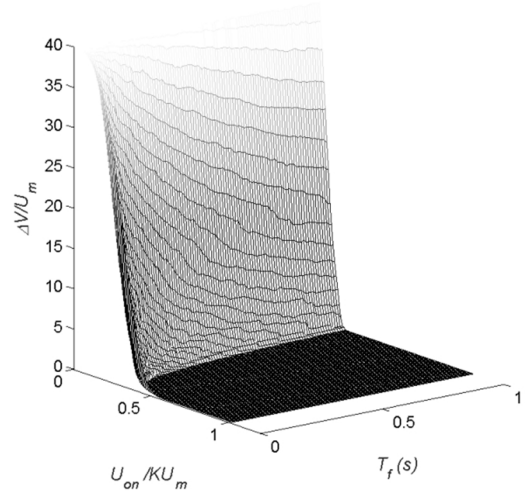

Fig. 10 Fuel consumption versus filter time constant and U_{on}/KU_m for input noise with PSD=10^{-1} ($U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}} = 0.2$)

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

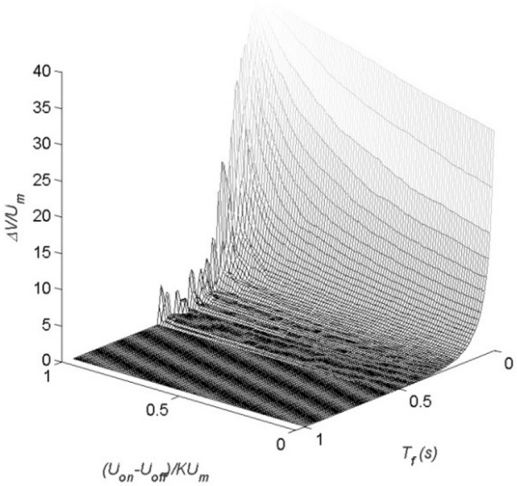

Fig. 11 Fuel consumption versus filter time constant and h for input noise with PSD=10^{-1} ($U_{\mathrm{on}}/KU_m = 1$)

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

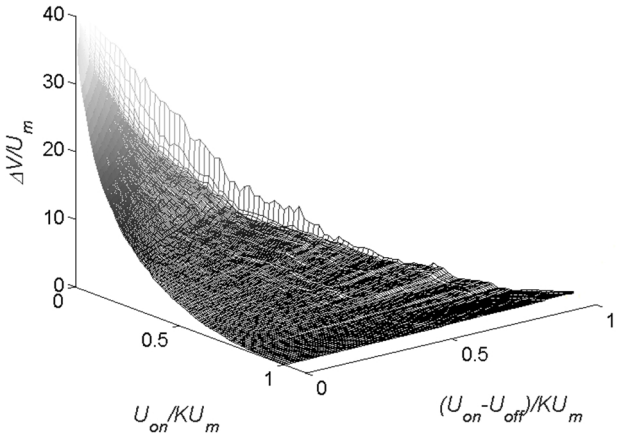

Fig. 12 Fuel consumption versus U_{on}/KU_m and h for input noise with PSD=10^{-1} ($T_f = 0.35$)

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

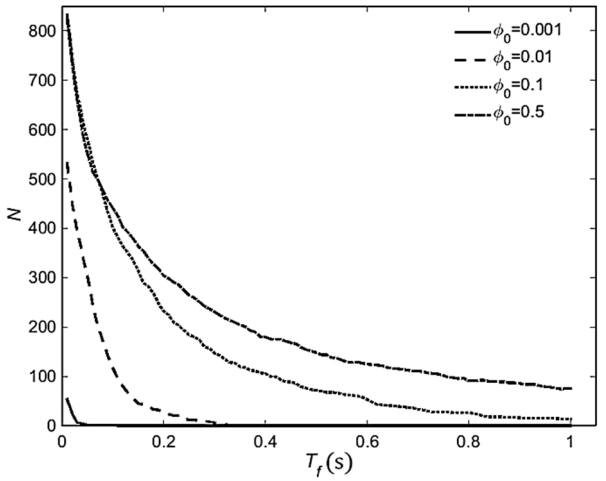

Fig. 13 Thruster firings versus T_f for input noise with different PSDs, ($U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.3, U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}} = 0.2$)

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

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 ذکر است که این بازه‌ها تنها به‌ازای تحلیل با ورودی اصلی صفر (E=0) است.

4- تحلیل استاتیکی

در تحلیل استاتیکی، تحلیل عملکرد به‌ازای اعمال ورودی ثابت به مدولاتور صورت می‌پذیرد. به منظور تعیین ناحیه قابل قبول پارامترهای 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 می‌شود. معیارهای عملکرد با تغییر سه پارامتر U_{on}/KU_m، $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ و T_f به‌صورت دو به دو، بررسی می‌شود. در این‌جا مقدار ورودی برابر 0.5 (وسط بازه ورودی که بین 0 تا 1 است) لحاظ می‌شود. این ورودی با نویز گوسی مشابه نویز گوسی در بخش قبل، جمع جبری شده و مطابق "شکل 3" به مدولاتور اعمال می‌شود. مقدار چگالی طیفی نویز در محدوده 10^{-4} تا 10^{-2} در نظر گرفته شده و روش حل عددی مسئله، گام انتگرال‌گیری 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

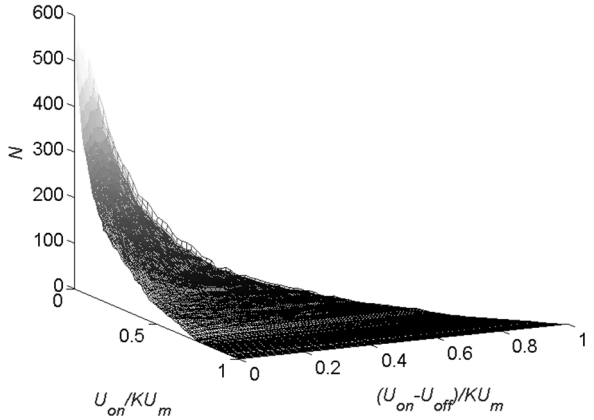

Fig. 14 Thruster firings versus U_{on}/KU_m and h for input noise with PSD=10^{-2} (T_f = 0.35)

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

جدول 1 ناحیه قابل قبول پارامترهای مدولاتور در حالت E=0 برمبنای مصرف سوخت

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

$U_{\mathrm{on}}-U_{\mathrm{off}}/KU_m$	U_{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

$U_{\mathrm{on}}-U_{\mathrm{off}}/KU_m$	U_{on}/KU_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

می‌توانند روشن-خاموش شوند، در مطالعه حاضر، فرکانس خروجی مدولاتور به مقدار 50 هرتز محدود شده است. تحلیل با استفاده از روش مونت کارلو با 100 بار اجرا انجام شده و معیارهای عملکرد مذکور محاسبه و نمودارهای مربوطه ترسیم می‌شود. نمونه‌ای از نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی در "شکل 11" ترسیم شده است. در این شکل، نمودار فعالیت تراستر به ازای پارامتر U_{on}/KU_m و ثابت زمانی فیلتر مدولاتور مشاهده می‌شود. همان‌طور که از این شکل مشابه نتایج بخش قبل، نتیجه‌گیری می‌شود، 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% (یا 70%) پایین معیار عملکرد 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_{on}/KU_m در تحلیل استاتیکی برحسب چگالی طیفی نویز ورودی به‌ازای دو معیار 70% و 90% و با فرض $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ = 0.1 در "شکل 16" ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، ناحیه قابل قبول به‌ازای معیار 70% باید وسیع‌تر از ناحیه 90% باشد. علت انتخاب دو معیار 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 وسیع‌تری برای هر پارامتر بدست می‌دهد که در نهایت احتمال وجود اشتراک در سه تحلیل مذکور افزایش می‌یابد.

در "شکل 17" ناحیه قابل قبول برای پارامتر $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ 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 U_{on}/KU_m = 0.48 استخراج شده است. با استفاده از نتایج این شکل،

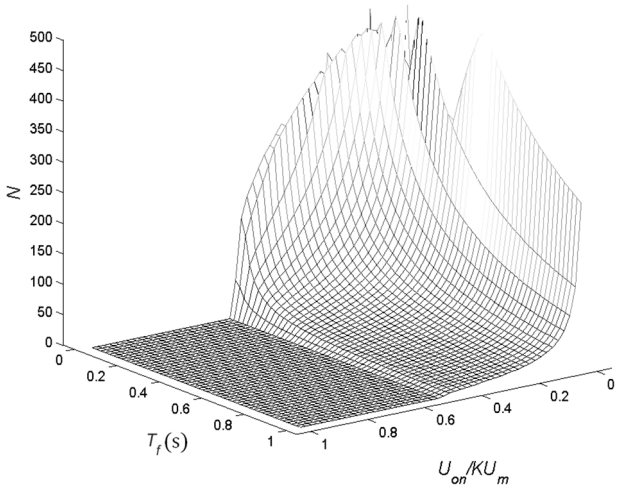

Fig. 15 Thruster firings versus filter time constant and U_{on}/KU_m for input noise with PSD=10^{-1} ($U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ = 0.1)

شکل 15 فعالیت تراستر برحسب ثابت زمانی فیلتر مدولاتور و U_{on}/KU_m با چگالی طیفی نویز 10^{-1} ($U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ = 0.1)

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

در "شکل 18" نیز ناحیه قابل قبول برای هیسترزیس بی‌بعد (h) به‌ازای $U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48$ ملاحظه می‌شود. البته در این شکل، ناحیه واقع در زیر خطوط، ناحیه قابل قبول پارامتر h است. همچنان که از این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی طیفی نویز، ناحیه قابل قبول پارامتر h کاهش می‌یابد. در ادامه، مقادیر قابل قبول برای ثابت زمانی فیلتر مدولاتور برحسب چگالی طیفی نویز ورودی به‌ازای $U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48$ و $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}} = 0.1$ در "شکل 19" ترسیم شده است. مشابه نتایج بدست آمده از بخش قبل، با افزایش چگالی طیفی نویز، ناحیه قابل قبول ثابت زمانی مدولاتور محدودتر می‌شود.

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- تحلیل دینامیکی

با توجه به این‌که در سیستم‌های کنترل حلقه بسته و در محدوده

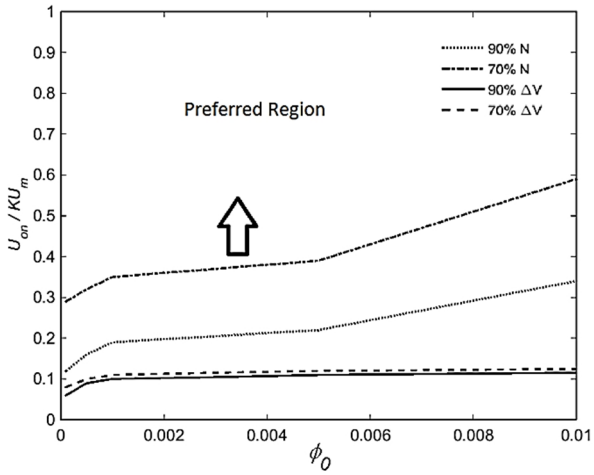

Fig. 16 Preferred region of U_{on}/KU_m parameter versus PSD $(U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}} = 0.1)$

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

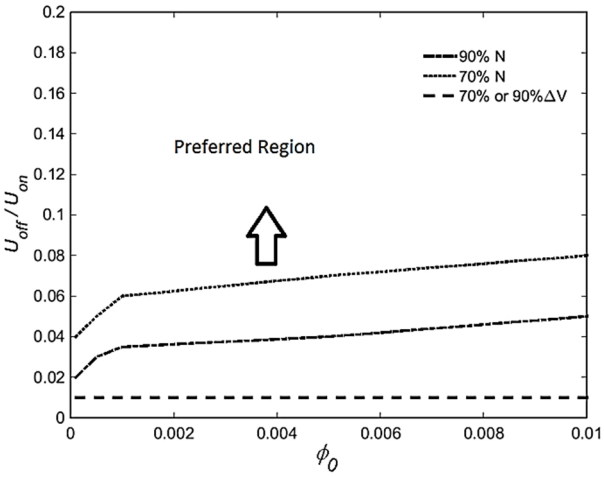

Fig. 17 Preferred region of $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ parameter versus PSD $(U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48)$

شکل 17 ناحیه قابل قبول پارامتر $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ برحسب چگالی طیف توان نویز $(U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48)$

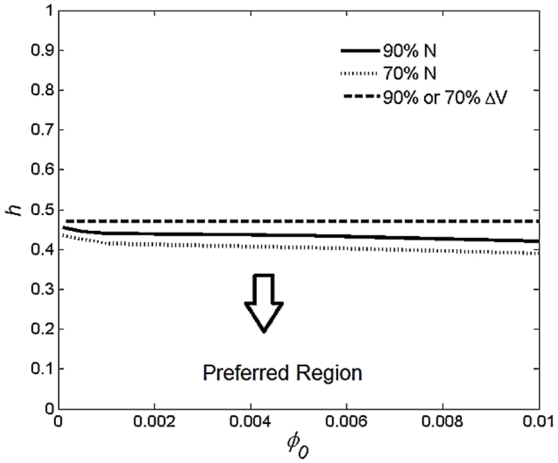

Fig. 18 Preferred region of h parameter versus PSD, $(U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48)$

شکل 18 ناحیه قابل قبول پارامتر h بر حسب چگالی طیفی توان نویز $(U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48)$

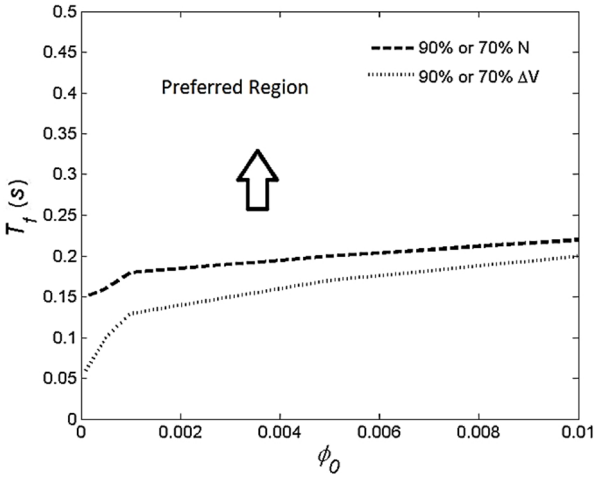

Fig. 19 Preferred region of T_f parameter versus PSD $(U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48, U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}} = 0.1)$

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

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	$U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$	U_{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

h	$U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$	U_{on}/KU_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

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 می‌شود. در تحلیل دینامیکی، معیار عملکرد برحسب فرکانس ورودی اعمالی به مدولاتور و مقادیر پارامترهای U_{on}/KU_m، U_{off}/KU_m و T_f بررسی می‌شود. بدین منظور، سیگنال ورودی سینوسی با دامنه واحد و فرکانس بین 1 تا 150 رادیان بر ثانیه مطابق "شکل 3" به مدولاتور اعمال شده و معیارهای عملکرد بررسی می‌شود. 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 جبری شده و به مدولاتور اعمال می‌شود. روال انتخاب نواحی قابل قبول همانند تحلیل استاتیکی، ترسیم نمودارهای سه‌بعدی معیار عملکرد به‌صورت دو به دو برحسب پارامترهای مدولاتور و چگالی طیفی نویز ورودی می‌باشد. معیار انتخاب نواحی قابل قبول نیز همان 70% و 90% بخش پایین مقادیر معیار عملکرد در نمودارهای سه‌بعدی مذکور است. در این‌جا به منظور اختصار تنها نتایج نهایی تحلیل دینامیکی ارائه می‌شود. نواحی قابل قبول پارامترهای مدولاتور بر مبنای تحلیل دینامیکی به‌ازای دو معیار عملکرد مصرف سوخت و فعالیت تراستر در "شکل‌های 20 تا 23" ملاحظه می‌شود. در "شکل 20" ناحیه قابل قبول برای پارامتر U_{on}/KU_m برحسب چگالی طیفی نویز ورودی و به‌ازای دو معیار عملکرد فعالیت تراستر و مصرف سوخت با فرض انتخاب مقادیر $T_f = 0.1$ و $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}} = 0.1$ ترسیم شده است که ناحیه بالای خطوط، ناحیه قابل قبول می‌باشد.

در ادامه، ناحیه قابل قبول پارامتر $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}}$ برحسب چگالی طیفی نویز و با فرض مقادیر $T_f = 0.1$ و $U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48$ در "شکل 21" ترسیم 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. همان‌طور که از "شکل 21" ملاحظه می‌شود، با افزایش چگالی طیفی نویز، نواحی قابل قبول هم از طرف پایین خط‌چین و هم از طرف بالای خط‌چین محدودتر می‌شود. در صورتی که مقدار چگالی طیفی نویز حدوداً برابر $\phi_0 = 0.05$ باشد، دو خط حدی بالا و پایین ناحیه قابل قبول به‌ازای معیار 70% همدیگر را قطع می‌کند. به عبارت دیگر، اگر چگالی طیفی نویز بزرگتر از $\phi_0 > 0.05$ باشد، ناحیه قابل قبولی به‌ازای شرایط مفروض وجود نخواهد داشت. اما محدوده قابل قبول به‌ازای معیار 90% به‌طور قابل ملاحظه‌ای وسیع‌تر است. در "شکل 23" ناحیه قابل قبول پارامتر h برحسب چگالی طیفی نویز در تحلیل دینامیکی با فرض $U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48$ ارائه شده است. در این شکل نیز ناحیه متمایز شده به رنگ خاکستری، ناحیه قابل قبول پارامتر h به‌ازای معیار 70% است. ناحیه بین دو خط دیگر در این شکل محدوده قابل قبول به‌ازای معیار 90% را نشان می‌دهد. در "شکل 23" ناحیه قابل قبول پارامتر ثابت زمانی فیلتر مدولاتور به‌ازای $U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48$ و $U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}} = 0.1$ ارائه شده است. در این شکل، ناحیه قابل قبول، ناحیه بالای خطوطِ ترسیم شده است.

6- تجمیع نتایج تحلیل استاتیکی و دینامیکی

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

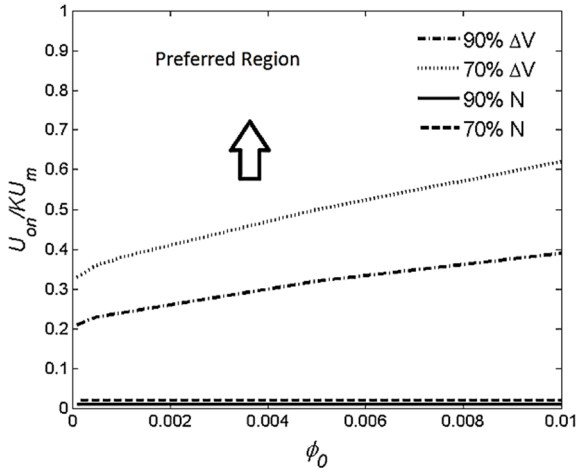

Fig. 20 Preferred region of $U_{\mathrm{on}}/KU_{\mathrm{m}}$ parameter versus PSD ($U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}} = 0.1,\ T_f = 0.1$)

شکل 20 ناحیه قابل قبول پارامتر $U_{\mathrm{on}}/KU_{\mathrm{m}}$ برحسب چگالی طیف توان نویز ($U_{\mathrm{off}}/U_{\mathrm{on}} = 0.1,\ T_f = 0.1$)

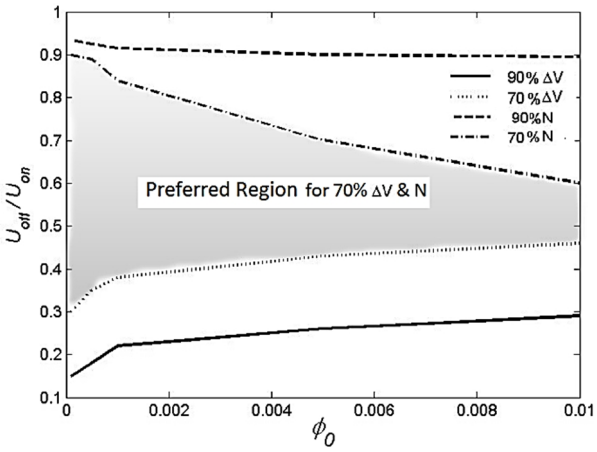

Fig. 21 Preferred region of $\mathrm{U_{off}/U_{on}}$ parameter versus PSD ($U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48, T_f = 0.1$)

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

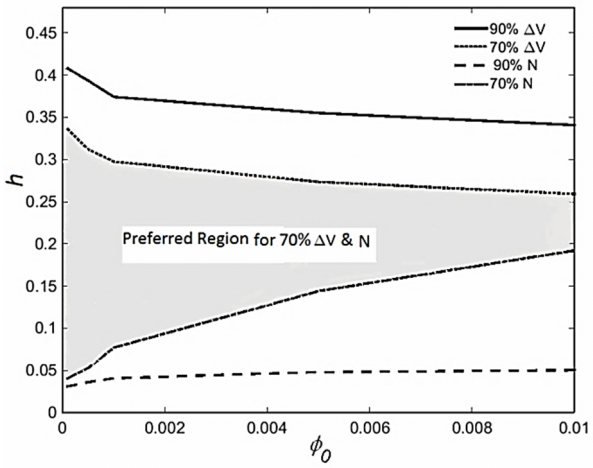

Fig. 22 Preferred region of h parameter versus PSD ($U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48$)

شکل 22 ناحیه قابل قبول پارامتر h برحسب چگالی طیفی توان نویز ($U_{\mathrm{on}}/KU_m = 0.48$)

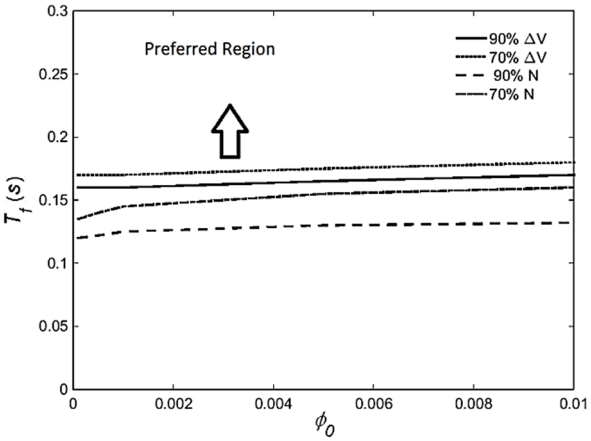

Fig. 23 Preferred region of T_f parameter versus PSD ($U_{\rm on}/KU_m$ = 0.48, $U_{\rm off}/U_{\rm on}$ = 0.1)

شکل 23 ناحیه قابل قبول پارامتر T_f برحسب چگالی طیفی توان نویز ($U_{\rm on}/KU_m$ = 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 $U_{\rm on}/KU_m$ در "شکل 24" برحسب چگالی طیفی نویز منتج شده است.

بازه زیر نمودار، بازه نامطلوب و بازه بالای نمودار بازه مناسب برای انتخاب پارامتر برحسب چگالی طیفی نویز می‌باشد. 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 $U_{\rm off}/U_{\rm on}$حاصل از هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی، همان "شکل 21" را ارائه می‌دهد.

همان‌طور که از نمودارهای "شکل‌های 24 و 25" مشاهده می‌شود، 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 می‌دهد، اما برای طراح نمودارهای قابل استفاده و کاربردی فراهم نمی‌کند. بدین منظور نمودارها باید به‌ازای مقادیر مختلف سه پارامتر مدولاتور ترسیم شده باشد. این کار به‌ازای یک مقدار مشخص چگالی طیفی نویز میسر می‌شود. در پیوست، نمودارهای طراحی به‌ازای پنج مقدار مختلف چگالی طیفی نویز برای معیار 70% آمده است. لذا طراح به‌صورت کاربردی و با توجه به مقادیر مورد نظر، می‌تواند از این نمودارها برای تنظیم پارامترهای مدولاتور استفاده نماید. نکته قابل ملاحظه این است که تعیین نواحی قابل قبول به‌صورت جداول 5 و 6 در صورتی معنادار است که خطوط ترسیم شده در شکل‌های نواحی قابل قبول به‌صورت 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 تغییر این پارامترها نتیجه می‌دهد. به‌علاوه، نتایج به‌ازای مقادیر مفروض دیگر،

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 90% performance index

h	$U_{\rm off}/U_{\rm on}$	$U_{\rm on}/KU_m$	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

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	$U_{\rm off}/U_{\rm on}$	$U_{\rm on}/KU_m$	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

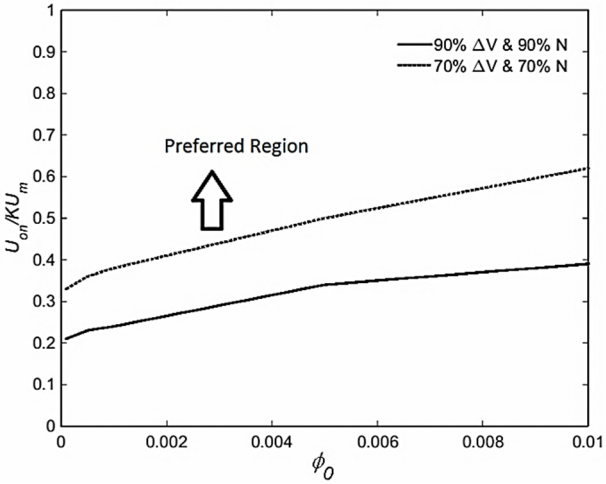

Fig. 24 Preferred region of $U_{\rm on}/KU_m$ parameter versus PSD, ($U_{\rm off}/U_{\rm on}$ = 0.1, T_f = 0.1)

شکل 24 ناحیه قابل قبول پارامتر $U_{\rm on}/KU_m$ برحسب چگالی طیف توان نویز، ($U_{\rm off}/U_{\rm on}$ = 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

همان‌طور 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 می‌شود. 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. همان‌طور 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 $U_{\rm on}/KU_m$ به‌ازای تغییر چگالی طیفی نویز، تغییر محسوسی نداشته و حد پایین آن تقریباً مقداری ثابت است. اگرچه رفتار نمودار حد پایین به‌ازای فرکانس 20 هرتز، مشابه فرکانس 50 هرتز است، اما ناحیه قابل قبول برای فرکانس 50 هرتز همان‌طور که در "شکل 26" ملاحظه می‌شود، به‌ویژه در چگالی طیفی نویز بزرگتر، محدودتر می‌شود. در "شکل 23" نیز ناحیه قابل قبول پارامتر $U_{\rm off}/U_{\rm on}$ به ازای سه فرکانس مذکور ترسیم شده است. البته تغییر محدوده پارامتر $U_{\rm off}/U_{\rm on}$، چندان قابل ملاحظه نیست و همان‌طور که

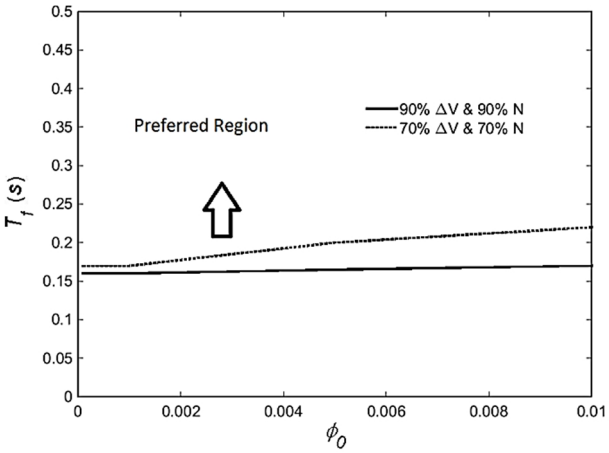

Fig. 25 Preferred region of T_f parameter versus PSD, ($U_{\rm on}/KU_m$ = 0.48, $U_{\rm off}/U_{\rm on}$ = 0.1)

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

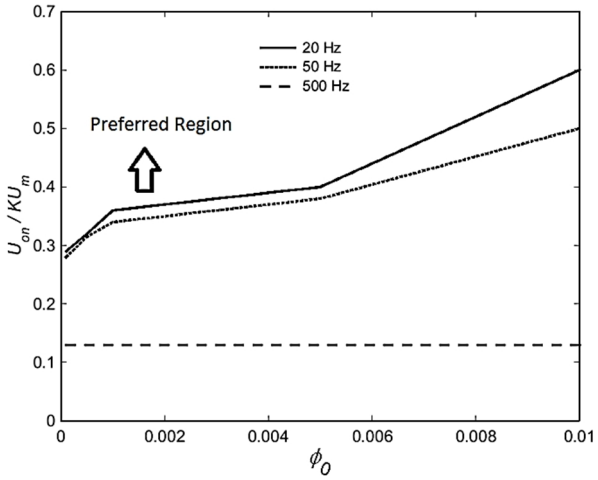

Fig. 26 Preferred region of $U_{\rm on}/KU_m$ parameter versus PSD in different frequency ($U_{\rm off}/U_{\rm on}$ = 0.1, T_f = 0.1)

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

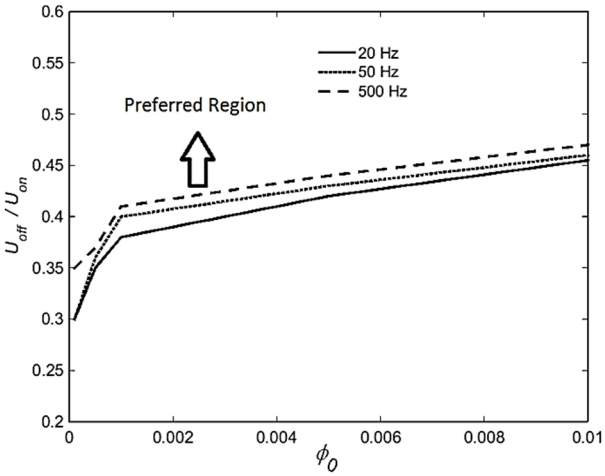

Fig. 27 Preferred region of $U_{\rm off}/U_{\rm on}$ parameter versus PSD in different frequency ($U_{\rm on}/KU_m$ = 0.48)

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

ملاحظه می‌شود، فرکانس بالاتر محدوده‌ای محافظه‌کارانه‌تر برای پارامتر $U_{\rm off}/U_{\rm on}$ 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- نتیجه‌گیری

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) بی‌بعدسازی شده و تعداد پارامترها از 5 به 3 پارامتر کاهش یافته است. از این 3 پارامتر، ثابت زمانی فیلتر مدولاتور با بُعد بوده و 2 پارامتر دیگر بی‌بعد 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 شدن‌های تراستر در نظر گرفته شده است. روند استخراج نواحی قابل قبول بر مبنای حذف مقدار 30% (و 10%) قسمت بالای نمودارهای معیار عملکرد به‌ازای چگالی‌های مختلف طیفی نویز است. اگرچه همان‌گونه که انتظار می‌رفت با افزایش مقدار چگالی طیفی نویز، این نواحی محدودتر می‌شود، 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 دقیق، اشتراک نواحی قابل قبول استخراج شده است. در پایان، به منظور کاربرد عملی نتایج در انتخاب پارامترهای مدولاتور، هیسترزیس بی‌بُعد برحسب آستانه روشن‌شدن بی‌بُعد 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 می‌آید.

9- پیوست

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

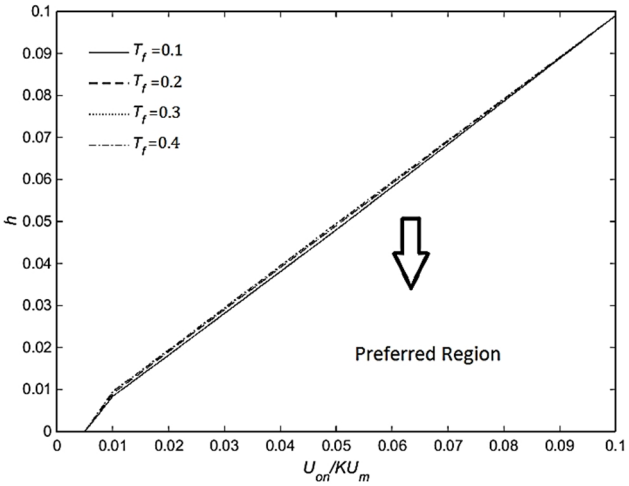

Fig. 28 Preferred region of PWPF parameters for input noise with PSD=10^{-3}

شکل 28 ناحیه قابل قبول انتخاب پارامترهای مدولاتور به‌ازای PSD=10^{-3}

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

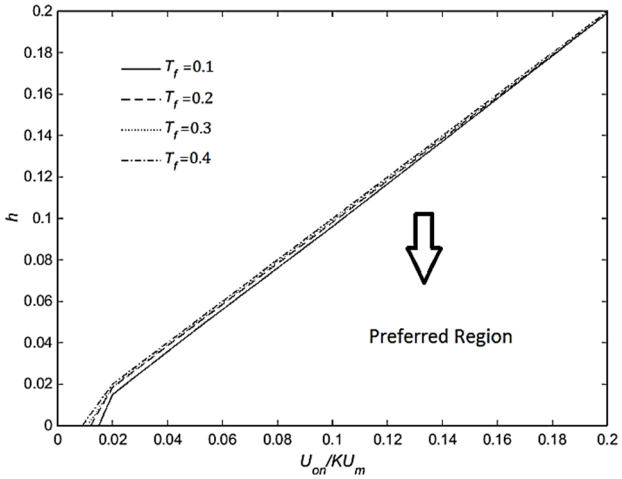

Fig. 29 Preferred region of PWPF parameters for input noise with PSD=10^{-2}

شکل 29 ناحیه قابل قبول انتخاب پارامترهای مدولاتور به‌ازای PSD=10^{-2}

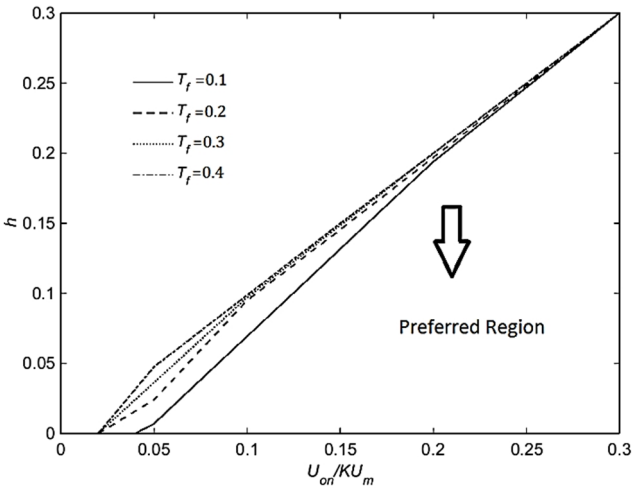

Fig. 30 Preferred region of PWPF parameters for input noise with PSD=0.05

شکل 30 ناحیه قابل قبول انتخاب پارامترهای مدولاتور به‌ازای PSD=0.05

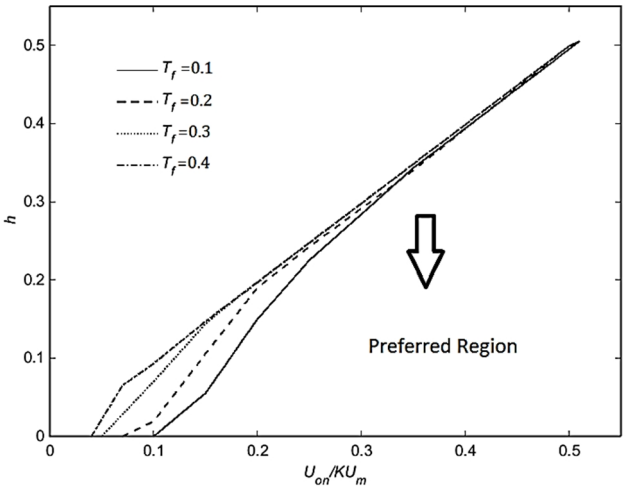

Fig. 31 Preferred region of PWPF parameters for input noise with PSD=0.1

شکل 31 ناحیه قابل قبول انتخاب پارامترهای مدولاتور به‌ازای PSD=0.1

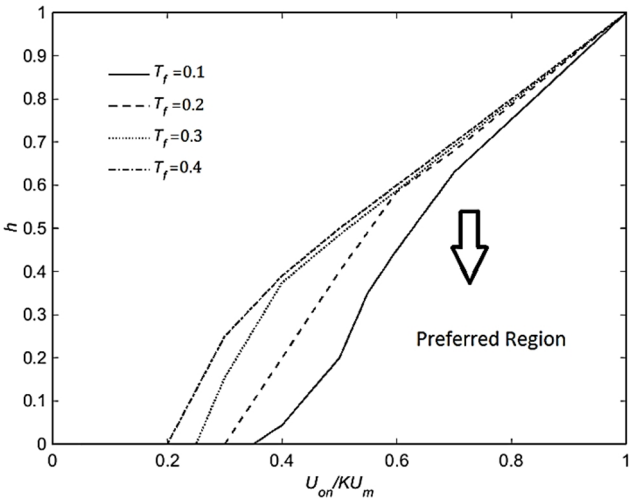

Fig. 32 Preferred region of PWPF parameters for input noise with PSD=0.5

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 بی‌بُعد U_{on}/KU_m و U_{off}/KU_m و پارامتر با بُعد 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 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 فارسی).
[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 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*

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

[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 فارسی)

[18] R. Farquhar, S. U. Aeronautics, S. Astronautics, Analog studies of the limit-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.