



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of
Space Science, Technology
& Applications (Persian)

Vol. 2, No. 2, pp.: 115-134
2022

DOI:

10.22034/jssta.2023.355411.1091

Article Info

Received: 2022-8-21
Accepted: 2023-1-16

Keywords

Hybrid dynamical systems,
Benchmark examples,
Hybrid control,
Discrete-event systems

How to Cite this article

Ali Safi, Ali Taghavian
Esmaeel Khanmirza
“A Review on Benchmark Examples for Dynamical Hybrid Systems Controller Synthesis to Facilitate Its Selection Process”. *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 2 (2), p.: 115-134, 2023. “

A Review on Benchmark Examples for Dynamical Hybrid Systems Controller Synthesis to Facilitate Its Selection Process

Ali Safi¹, Ali Taghavian², Esmaeel Khanmirza^{3*}

1. Solid Mechanics Group, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, ali_safi@alumni.iust.ac.ir
2. Solid Mechanics Group, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, ali_taghavian@alumni.iust.ac.ir
- 3*. Solid Mechanics Group, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, khanmirza@iust.ac.ir

Abstract

Due to various and complex phenomena in hybrid dynamical systems, the control of these types of systems has faced a challenge. Space systems also have hybrid dynamics due to different missions and operational modes. Therefore, to deal with these systems, we must first familiarize ourselves with the standard examples that have been studied before. Consequently, in the field of hybrid control science, various examples have been reviewed and researched. In order to improve the performance comparison of control methods or to check their comprehensiveness, some of these examples are used as benchmark examples. Therefore, this article has been tried to collect benchmark examples with different characteristics in the hybrid control field and compare them with each other. It should be noted that benchmark examples were selected based on the number of repetitions and recognition. Therefore, the performance of the developing controllers can be examined on these examples and compared with the results of other controllers. As a result, the researchers can choose their desired benchmark more accurate and efficient with the investigation and design of the controller.



مروری بر مثال‌های معیار در زمینه کنترل‌کننده سیستم‌های هیبرید دینامیکی به منظور تسهیل فرایند انتخاب آن‌ها

علی صافی^۱، علی تقویان^۲، اسماعیل خان‌میرزا^{۳*}

۱. گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
ali_safi@alumni.iust.ac.ir
۲. گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
ali_taghavian@alumni.iust.ac.ir
۳. گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
khanmirza@iust.ac.ir (نویسنده مسئول)

چکیده

به دلیل وجود پدیده‌های مختلف و پیچیده در سیستم‌های دینامیکی هیبرید، امر کنترل این نوع از سیستم‌ها با چالش مواجه شده است. سیستم‌های فضایی نیز به دلیل ماموریت‌ها و حالت‌های عملیاتی مختلف، دارای دینامیک هیبرید هستند. بنابراین، به منظور کارکردن با این سیستم‌ها ابتدا باید با نمونه‌های استاندارد که قبلاً مورد مطالعه قرار گرفته‌اند آشنا شویم. در زمینه علم کنترل هیبرید، تاکنون مثال‌های گوناگونی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. به منظور بهبود امر مقایسه عملکرد روش‌های کنترلی یا بررسی جامعیت آن‌ها، برخی از این مثال‌ها به عنوان نمونه معیار استفاده می‌شوند. به همین منظور، در این مقاله سعی شده است که نمونه معیارهایی با خصوصیات متفاوت در زمینه کنترل هیبرید گردآوری و با یکدیگر مقایسه شود. لازم به ذکر است که نمونه معیارهای انتخابی، بر اساس تعداد دفعات تکرار و به رسمیت شناخته شدن برگزیده شده‌اند. پس می‌توان عملکرد کنترل‌کننده‌های در حال توسعه را بر روی این مثال‌ها بررسی نمود و با نتایج سایر کنترل‌کننده‌ها مقایسه کرد. در نتیجه، این امر سبب می‌شود که محققان بتوانند با انتخاب دقیق‌تر و آسان‌تر نمونه معیار مورد نظر خود، امر بررسی و طراحی کنترل‌کننده را پیش بگیرند.

دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه
علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال دوم، شماره ۲، صفحه ۱۳۴-۱۱۵
پاییز و زمستان ۱۴۰۱

DOI:
10.22034/jssta.2023.355411.1091

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶

واژه‌های کلیدی

سیستم‌های دینامیکی هیبرید،
مثال‌های معیار، کنترل هیبرید،
سیستم‌های رویداد گسسته

نحوه استناد به این مقاله

علی صافی، علی تقویان، اسماعیل خان‌میرزا. "مروری بر مثال‌های معیار در زمینه کنترل‌کننده سیستم‌های هیبرید دینامیکی به منظور تسهیل فرایند انتخاب آن‌ها". *دوفصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی*، جلد دوم، شماره دوم، صفحات ۱۳۴-۱۱۵، ۱۴۰۱.

۱- مقدمه

زمینه‌های مختلف اعم از الکترونیک، شیمی، کامپیوتر و غیره را تشکیل می‌دهد. این مثال‌ها نمونه‌هایی از سیستم‌های دینامیکی هیبرید یا به بیان ساده‌تر سیستم‌های هیبرید هستند.

به دلیل پیچیدگی این سیستم‌ها، چالش‌های جدیدی در راستای تئوری‌های پلیداری یا طراحی کنترل‌کننده برای سیستم‌های هیبرید به وجود آمده است. از این چالش‌ها می‌توان به پرس ۶ در سیگنال‌ها و متغیرهای حالت، عوض شدن دینامیک سیستم، قیود^۷، حاشیه امنیت^۸، پلیداری، رؤیت پذیری^۹، کنترل‌پذیری^{۱۰}، شناسایی^{۱۱}، مقاوم‌سازی^{۱۲} و قابلیت دستیابی^{۱۳} اشاره کرد. همچنین اضافه شدن قیدهای ایمنی و ساختاری بر پیچیدگی این سیستم‌ها افزوده است. به وجود آمدن مفاهیم جدیدی همانند پرس در متغیر حالت، تعویض مود، تغییر دینامیک سیستم، تغییر تعداد متغیرها و پدیده‌هایی هم‌چون زنو^{۱۴}، سبب شده تا ابزارهای جدیدی برای مدل‌سازی، تحلیل و کنترل این سیستم‌ها طراحی و توسعه یابد. در سال‌های اخیر، به دلیل تنوع در رفتار این سیستم‌ها، مدل‌های مختلفی برای توصیف آن‌ها ارائه شده است. در بخش مدل‌سازی این سیستم‌ها، از روش‌هایی هم‌چون هیبرید اتوماتا^{۱۵}، تکه‌ای آفین^{۱۶}، دینامیک منطبق مخلوط^{۱۷}، شبکه‌های پتری^{۱۸}، حداکثر-جمع-خطی^{۱۹} و غیره استفاده شده که قوی‌ترین آن‌ها هیبرید اتوماتا است چراکه قادر به مدل‌سازی انواع پدیده‌های موجود در سیستم‌های هیبرید است. برخی از این مدل‌ها قابلیت هم‌ارزی دارند، به گونه‌ای که می‌توان آن‌ها را به یکدیگر تبدیل کرد، زیرا ممکن است استفاده از یک روش مدل‌سازی در عملیاتی به خصوص، آسان‌تر باشد.

در نتیجه، به دلیل وجود پدیده‌های مختلف و پیچیده در این سیستم‌ها، امر کنترل آن‌ها با چالش مواجه شده است. با توجه به رفتار خاص این سیستم‌ها و عدم پاسخ‌گویی کنترل‌کننده‌های سنتی همانند پی‌آی‌دی^{۲۰}، فیدبک حالت بهینه

سیستم‌های دینامیکی هیبرید^۱ حاوی دینامیکی ناهمگونی^۲ هستند که با یکدیگر تعامل دارند و رفتار آن‌ها در طول زمان تعیین می‌شود. ناهمگونی، به این معناست که این سیستم‌ها شامل دو نوع دینامیک هستند: دینامیک پیوسته و متغیر با زمان (زمان-پایه) و دینامیک گسسته متغیر با رویداد (رخداد-محور). دینامیک پیوسته به طور معمول توسط معادلات دیفرانسیل یا اختلافی توصیف می‌شود و تحولات در دینامیک گسسته به کمک قوانین و دستورات شرطی اعمال می‌شود. با ارتباط برقرار کردن این دو نوع دینامیک با یکدیگر، رفتارهای دینامیکی پیچیده ایجاد می‌شود، همانند کلید زدن^۳ یا هنگامی که مقدار یک متغیر پیوسته از یک آستانه عبور می‌کند یا پرس متغیرهای حالت هنگامی که رویداد گسسته^۴ مشخصی اتفاق می‌افتد. برای مثال، در مدارهای الکتریکی قطع و وصل شونده، ولتاژ و جریان بنابر قوانین مدارهای الکترونیکی، سیگنال‌های پیوسته هستند که رفتارهای ناپیوسته‌ای بر اساس باز و بسته کردن قسمتی از مدار از خود نشان می‌دهند. هم‌چنین، سرعت یک جسم که بنابر قانون دوم نیوتون^۵ پیوسته است؛ بر اساس اصل مومنوم در لحظه برخورد، رفتار ناپیوسته‌ای از خود نشان می‌دهد. در کاربردهای فضایی همانند ماهواره‌ها و فضاپیماها نیز پدیده‌هایی هم‌چون تغییر در مودهای عملیاتی و ماموریت‌های مختلف دیده می‌شود که سبب می‌شود این سیستم‌ها ترکیبی از رفتارهای زمان-پایه و رخداد-محور یا به عبارت دیگر هیبرید را از خود نشان دهند. هم‌چنین لازم به ذکر است که عملیات فضایی با توجه به الگوریتم‌های کنترلی امروزی و به دلیل وجود قطعات الکترونیکی و تصمیم‌گیری‌های منطقی، معمولاً شامل هر دو رفتار می‌شوند. سیستم‌های دینامیکی هیبرید علاوه بر کاربردهای فضایی، پهنه وسیعی از دینامیک‌های موجود در جهان در

11 Identification

12 Robustness

13 Reachability

14 Zeno

15 Hybrid Automata

16 PieceWise Affine

17 Mixed Logical Dynamical

18 Petri Nets

19 Max-Plus-Scaling

20 PID

1 Hybrid dynamical systems

2 Heterogeneous

3 Switch

4 Discrete Event

5 Newton's second law

6 Jump

7 Constraints

8 Safety

9 Observability

10 Controllability

بررسی قرار گرفته‌اند. در این کارگاه از ابزارهای مختلفی هم‌چون کورا^{۱۲}، اسپیس‌ای‌اکس^{۱۳}، هیلا^{۱۴}، جولیا ریج^{۱۵}، آریادنی^{۱۶}، داین‌آی‌بکس^{۱۷}، ایزابل/هول^{۱۸} و هایپدرا^{۱۹} برای بررسی قابلیت دسترسی، پایداری، حاشیه امنیت و دیگر موارد، برای این نمونه معیارها استفاده شده است. در بررسی‌های انجام شده در مقالات مختلف، اتفاق‌ها یا رخداد-محور یا زمان-پایه هستند. در این کار به جای استفاده از واژه رخداد-محور و زمان-پایه، از واژه رخداد به صورت کلی استفاده شده است که جنس آن می‌تواند از جنس ورودی، متغیر حالت یا زمان باشد. برخی از نمونه معیارهای بررسی شده در این کار، به طور ذاتی یک سیستم هیبرید نیست ولی پس از مدل‌سازی، به صورت هیبرید بررسی می‌شود. به طور مثال، در نمونه معیار آونگ معکوس، هیچ‌گونه رخدادی وجود ندارد، اما برای طراحی کنترل‌کننده چرخش رو به بالا، در برخی از روش‌های ارائه شده نیاز است که سیستم را هیبریدسازی کرد. البته نحوه مدل‌سازی نقش مهمی را در جنس رخداد ایفا می‌کند. به عنوان مثال در نمونه معیار مخزن سه‌گلنه، اگر باز و بسته شدن شیرها به صورت منفعل کنترل شود (با توجه به ارتفاع مخازن) و سیستم حلقه بسته مدنظر باشد، رخداد از جنس متغیر حالت می‌شود. ولی با در نظر گرفتن سیستم به صورت حلقه باز، رخدادهای مربوط به باز و بسته شدن شیرها از جنس ورودی است. در اینجا سعی شده که سیستم‌ها به صورت حلقه باز در نظر گرفته شوند. هم‌چنین قابل ذکر است که برخی از این نمونه معیارها را می‌توان ساده‌سازی کرد که این کار به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد. به عنوان مثال می‌توان سیستم‌های غیرخطی را با حول نقاط کاری خطی‌سازی کرد، یا یک مثال پیچیده را به چند مثال کوچک تقسیم کرد و بخش‌هایی از آن را به صورت جداگانه بررسی کرد.

در این کار سعی شده، مثال‌هایی که به عنوان نمونه معیار در چندین مقاله ذکر شده و به عنوان مثالی برای طراحی کنترل

حالت^۱، پیش‌فاز^۲، پس‌فاز^۳ و غیره، نسل جدیدی از کنترل‌کننده‌ها همانند کنترل نظارتی^۴، کنترل بر پایه توابع لیاپانوف^۵، کنترل بر پایه نابرابری ماتریس‌های خطی^۶، کنترل افق پیش‌بین^۷، کنترل پیش‌بین مدل هیبرید^۸، شبکه‌های پتری^۹ و کنترل‌کننده ترکیبی محاسباتی^{۱۰} ارائه شده و توسعه یافته‌اند. در برخی از این کنترل‌کننده‌ها، از مفاهیم پلایه‌ای متعلق به کنترل‌کننده‌های سنتی و در برخی دیگر از ادبیات کاملاً جدیدی استفاده شده است. با این حال، هم‌چنان در بحث کنترل این سیستم‌ها خلل‌هایی وجود دارد. طراحی کنترل‌کننده جامعی که قابلیت کنترل انواع مسائل هیبرید را داشته باشد امری دور از واقعیت است. به همین دلیل این موضوع به عنوان یک موضوع لبه علم مورد توجه محققان قرار گرفته است.

به طور معمول، مساله‌ها و مشکلاتی در مورد یک سیستم به وجود می‌آید که سبب می‌شود آن سیستم مورد بررسی قرار گیرد. در این موارد هدف اصلی، حل مساله مربوط به آن سیستم به‌خصوص است ولی هنگامی که هدف، حل مساله‌ای برای کلاسی از سیستم‌ها است، باید سیستم‌های معینی وجود داشته باشد که جنبه‌های مختلفی از آن کلاس را پوشش دهند. در زمینه کنترل سیستم‌های هیبرید تاکنون مثال‌های گوناگونی مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته‌اند، اما وجود مثال‌های معین برای بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌های جدید ارائه شده و ایجاد امکان مقایسه آن‌ها امری حائز اهمیت است. این مثال‌های معین را نمونه معیار می‌نامند. هر نمونه معیار از پیچیدگی و خصوصیات خاصی برخوردار است. در نتیجه، محققان می‌توانند با استفاده از این نمونه‌های معین، از صحت روش خود اطمینان حاصل کنند. هم‌چنین امکان مقایسه روش‌ها نیز امری ساده‌تر و مطمئن‌تر می‌شود.

بسیاری از این نمونه معیارها در کارگاه آموزشی صحنه‌گذاری کاربردی برای سیستم‌های پیوسته و هیبرید^{۱۱} معرفی و مورد

11 Workshop on Applied Verification for Continuous and Hybrid systems
12 CORA
13 SpaceX
14 Hylaa
15 JuliaReach
16 Ariadne
17 DynIbex
18 Isabelle/HOL
19 HyDRA

1 LQR
2 Lead
3 Lag
4 Supervisory Control
5 CLF-Based Control
6 LMI-Based Control
7 Receding Horizon Control
8 Hybrid Model Predictive Control
9 Petri Nets
10 Computational Hybrid Controller

است و در صورتی که $x_1 < 0$ باشد، معادله حاکم بر سیستم به صورت

$$x(k+1) = 0.8 \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k)$$

است. همچنین، باید توجه داشت که در این سیستم هیبرید، زیر سیستم‌ها دارای دینامیک خطی و زمان گسسته هستند. بر روی ورودی و خروجی این سیستم، قیود تعریف می‌شود. معمولاً هدف در استفاده از این نمونه معیار، طراحی کنترل‌کننده‌های هیبرید است. در این نمونه معیار، رخداد از جنس متغیر حالت است. همچنین سیستم به صورت تکه‌ای خطی^۲ قابل مدل‌سازی است و پرش در متغیرهای حالت وجود ندارد. به عبارت دیگر، ریست مپ^۳ به صورت همانی است.

۲-۲- قرار ملاقات فضاپیما^۴

یکی از حرکات بنیادی در عملیات فضایی، قرار ملاقات است. به گونه‌ای که یک فضاپیما به سمت فضاپیمای دیگری با هدف رسیدن به آن حرکت می‌کند (شکل ۱). فضاپیما باید با رعایت قیود مشخص شده، خود را به هدفی که به صورت منفعلانه در حال دوران است نزدیک کند و در صورت عدم موفقیت عملیات، از برخورد با هدف اجتناب کند. به طور کلی، دینامیک این سیستم کاملاً پیوسته است و از معادلات دیفرانسیل غیرخطی پیروی می‌کند، اما دینامیک خطی‌سازی شده نیز برای این نمونه معیار ارائه شده است. سیستم دارای ۳ مود کاری نزدیک شدن، ملاقات و لغو عملیات است که مودهای نزدیک شدن و ملاقات، به فاصله فضاپیما با هدف بستگی دارند ولی مود لغو عملیات به زمان بستگی دارد.

کننده مورد بررسی قرار گرفته‌اند، انتخاب شوند. همچنین، توضیحات کلی نمونه معیارها به همراه برخی از خصوصیات جزئی ذکر شده است. در انتها برای مقایسه بهتر، اطلاعات مربوط به همه نمونه معیارها در جدول ۴ ارائه شده و پیشنهاد شده که چه کسانی از چه نمونه معیاری استفاده کنند. معادلات و نحوه مدل‌سازی این نمونه معیارها به دلیل حجم زیاد، به صورت صریح ذکر نشده، بلکه ارجاع داده شده است. با جستجو در مقالات مرجع می‌توان فایل‌های شبیه‌سازی این سیستم‌ها را یافت و از آن‌ها استفاده کرد.

۲- نمونه معیارها

۱-۲- نمونه معیار بمپراد-موراری^۱

مثالی که توسط بمپراد و موراری در سال ۱۹۹۹ ارائه شده است [۱] به عنوان یک نمونه معیار در بسیاری از مقالات به منظور طراحی کنترل‌کننده یا بررسی سیستم‌های هیبرید به کار رفته است [۲، ۳]. معادلات حاکم بر این نمونه معیار در رابطه (۱) قابل مشاهده است.

$$x(k+1) = 0.8 \begin{bmatrix} \cos(\alpha(k)) & -\sin(\alpha(k)) \\ \sin(\alpha(k)) & \cos(\alpha(k)) \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k)$$

$$\alpha(x(k)) = \begin{cases} \frac{\pi}{3}, & \text{if } [1 \ 0]x(k) \geq 0 \\ -\frac{\pi}{3}, & \text{if } [1 \ 0]x(k) < 0 \end{cases}$$

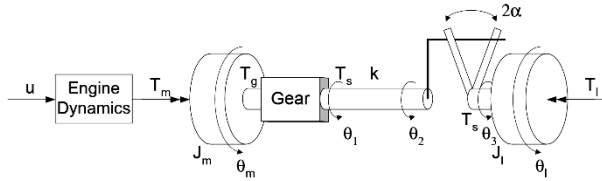
$$x(k) \in [-10, 10] \times [-10, 10],$$

$$u(k) \in [-1, 1]. \quad (1)$$

این مثال دارای دو متغیر حالت، یک ورودی و ۲ مود کاری است. به عبارت دیگر، هنگامی که $x_1 \geq 0$ باشد، سیستم در مود اول از مودهای کاری قرار دارد. در این حالت دینامیک حاکم بر سیستم به صورت

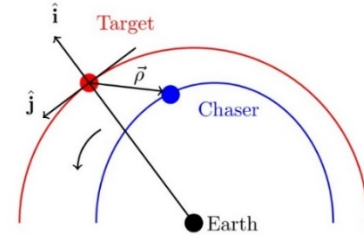
$$x(k+1) = 0.8 \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k)$$

درک قوی و درستی در رابطه با نحوه کارکرد سیستم دارد و در بهترین حالت، عملکرد به نسبت خوبی در حوالی نقاط کاری سیستم از خود نشان می‌دهد. ولی به منظور دستیابی به عملکرد بهینه در همه حالات سیستم، نیاز به کنترل حلقه بسته است که هیبرید بودن مساله، این کار را با مشکلاتی مواجه ساخته است. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، ورودی سیستم ابتدا وارد دینامیک موتور می‌شود که این دینامیک با یک سیستم مرتبه اول با ثابت زمانی τ_{eng} تقریب زده می‌شود. گشتاور، ممان اینرسی و زاویه خروجی موتور به ترتیب با T_m ، J_m و θ_m نمایش داده می‌شود.



شکل ۲: انتقال قدرت خودرو به همراه لقی [۶]

گشتاور ورودی به جعبه دنده و خروجی از آن به ترتیب T_g و T_s است. θ_1 ، θ_2 و نیز زوایای مشخص شده در شکل ۲ هستند. 2α مقدار لقی و T_l ، J_l و θ_l به ترتیب گشتاور، ممان اینرسی و زاویه بار هستند. ضریب سفتی محور انتقال قدرت k است. این سیستم دارای ۳ مود کاری است. هر مود سیستم توسط معادلات دیفرانسیل خطی معمولی شبیه‌سازی می‌شود. در نتیجه می‌توان آن را به شکل تکه‌ای خطی مدل‌سازی کرد. توضیحات کامل مربوط به این نمونه معیار در کار لاگربگ^۴ یافت می‌شود [۶]. همچنین، در این مقاله، ۴ نوع قید برای مساله در نظر گرفته شده است. قید برخورد صریح، قید برخورد تقریبی، روش دو فازی و کاهش نوسانات که تنها یکی از سه قید اول باید در نظر گرفته شود، اما قید چهارم را می‌توان همراه با قید انتخابی در نظر گرفت. آلفوف و کرو^۵ مدل توسعه یافته این نمونه معیار که در آن تعداد زوایه‌ها و بارهای خروجی افزایش یافته و سفتی محورهای اضافه شده است را در کار خود در نظر گرفته‌اند [۷]. در این مرجع، هدف بررسی قابلیت دستیابی سیستم است. بسلمان و همکاران نمونه معیار مشابهی مطرح کرده‌اند که علاوه بر مدل‌سازی لغزش



شکل ۱: قرار ملاقات فضاپیما [۴]

وارد شدن به مودهای نزدیک شدن و ملاقات، بلافاصله پس از رخداد اتفاق می‌افتد. اما وارد شدن به مود لغو عملیات، در بازه زمانی محدودی رخ می‌دهد که زمان دقیق آن مشخص نیست. پس از ورود به مود لغو عملیات، امکان ورود به مودهای دیگر وجود ندارد. در مود نزدیک شدن و ملاقات، نیروهای پیش‌ران به عنوان ورودی سیستم هستند ولی در مود لغو عملیات، ورودی وجود ندارد. این فضاپیما دارای ۴ متغیر حالت $[x, \dot{x}, y, \dot{y}]$ و دو ورودی F_x, F_y است که قید حداکثر و حداقل برای آن‌ها تعریف شده است. در مود ملاقات، بر روی سرعت فضاپیما قید تعریف شده است. مدل دقیق سیستم به همراه توضیح کامل قیود و مودها توسط چن و میترا^۱ ارائه شده است [۴]. همچنین، یک کنترل‌کننده هیبرید فیدبک حالت بهینه برای کنترل فضاپیما طراحی شده و نواحی امن سیستم مشخص شده است. برای توضیحات تکمیلی نیز می‌توان به کار آلفوف^۲ و همکاران مراجعه کرد [۵]. در این مدل، علاوه بر مودهای کاری اصلی، یک مود خطا وجود دارد که باید از ورود به آن اجتناب شود.

۲-۳- نمونه معیار انتقال قدرت خودرو به همراه لقی

وجود لقی در سیستم انتقال قدرت باعث ایجاد ناحیه مرده^۳ می‌شود که این ناحیه یک عامل غیرخطی است که باعث هیبرید شدن سیستم می‌شود. در نظر گرفتن این لقی بسیار حائز اهمیت است چراکه در رفتار سیستم، نحوه انتقال قدرت و عمر قطعات مکانیکی در هنگام برخورد اجزا به یکدیگر تاثیر دارد. روش‌های کنترلی متعددی برای جلوگیری از آسیب‌رسانی این لقی به عملکرد سیستم ارائه شده که برخی از آن‌ها حلقه باز بوده و برخی دیگر حلقه بسته‌اند. روش‌های حلقه‌باز در کنترل این مثال نیاز به

4 Lagerberg
5 Althoff and Krogh

1 Chan and Mitra
2 Althoff
3 Dead-Zone

است. به طور معمول در این مبدل‌ها برای رسیدن به ولتاژ خروجی مورد نظر، معمولاً از کنترل حلقه‌باز برای باز و بسته کردن کلید S با چرخه کار مشخص استفاده می‌شود که نیازی به مقایسه ولتاژ خروجی V_o با ولتاژ مورد نظر V_{ref} ندارد. اما برای دستیابی به خروجی دلخواه با در نظر گرفتن ولتاژ ورودی V_s متغیر یا عوامل تاثیرگذار دیگر در رفتار مبدل همانند اغتشاش، به کنترل‌کننده حلقه بسته نیاز است. بزرگ‌ترین چالش کنترل‌کننده حلقه بسته سرعت کنترل‌کننده است. همچنین در هنگام کنترل ولتاژ، ضروری است که حاشیه امنیت سیستم در دو مرحله راه‌اندازی و حالت ماندگار بررسی شود. برای دستیابی به مدل دقیق و توضیحات بیشتر درباره این مبدل‌ها به کار نگوین و جانسون^۲ مراجعه شود [۹]. در اکثر مواقع مدل‌سازی این سیستم به صورت تکه‌ای خطی است. روش‌های کنترلی متعددی برای کنترل این مبدل‌ها ارائه شده که می‌توان به روش‌هایی هم‌چون کنترل بهینه مقید، کنترل پیش‌بین مدل و لیاپانوف به ترتیب در [۱۰-۱۲] اشاره کرد.

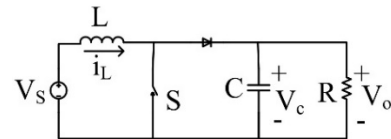
۲-۵- نمونه معیار مبدل جریان مستقیم به مستقیم با ترانسفورماتور جداشده

این مدل از مبدل‌های دی‌سی-دی‌سی، به دو نوع اصلی مبدل‌های برگشتی و رو به جلو تقسیم می‌شوند. هر دو سیستم به وسیله هیبرید اتوماتا با دینامیک پیوسته با معادلات دیفرانسیل معمولی خطی مدل‌سازی می‌شود. در هر دو مدل نمایش داده شده در شکل ۴، یک ورودی ولتاژ مستقیم V_{in} و یک کلید S وجود دارد [۱۳]. مدل برگشتی دارای ۲ مود کاری است که در اثر باز و بسته شدن کلید S ایجاد می‌شود. متغیرهای حالت این مدل، جریان i_{Lm} و ولتاژ v_L است. مدل رو به جلو دارای ۵ مود کاری اصلی است که در اثر باز و بسته شدن کلید و رفتار دیودها در مدل است. متغیرهای حالت این مدل، جریان i_{Lm} ، جریان i_L و ولتاژ v_L است. در این مدل، علاوه بر مودهای کاری اصلی، یک مود خطا وجود دارد که باید از ورود به آن اجتناب شود. در هر دو مثال، ولتاژ ورودی می‌تواند متغیر یا ثابت با زمان باشد یا با اغتشاش همراه باشد. مدل‌سازی این سیستم به صورت تکه‌ای خطی است.

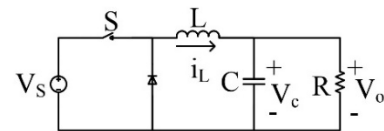
باتاقان‌ها، نمونه آزمایشگاهی نیز برای آن ساخته شده است [۸]. همچنین به مباحثی چون شناسایی پارامترها، طراحی رویت‌گر و کنترل‌کننده نیز پرداخته شده است.

۲-۴- مبدل جریان مستقیم به مستقیم

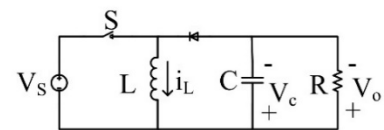
نمونه معیار مبدل جریان مستقیم به مستقیم یک مثال در حوزه الکترونیک قدرت است که به وسیله هیبرید اتوماتا با دینامیک پیوسته با معادلات دیفرانسیل معمولی خطی مدل‌سازی می‌شود. وظیفه یک مبدل دی‌سی-دی‌سی، تبدیل ولتاژ از یک سطح به سطح دیگر است که این کار با باز و بسته شدن پی‌پی یک کلید در مدار اتفاق می‌افتد (معمولاً با سرعت کیلوهرتز). به طور معمول، ۳ نوع نمونه معیار از یک مبدل دی‌سی-دی‌سی وجود دارد: مبدل افزایشی، مبدل کاهش‌دهنده و مبدل افزایشی-کاهش‌دهنده، که در شکل ۳ ترتیب مشاهده می‌شوند.



(آ) : مبدل افزایشی



(ب) : مبدل کاهش‌دهنده



(ج) : مبدل افزایشی-کاهش‌دهنده

شکل ۳. انواع مبدل‌های جریان مستقیم به مستقیم [۹]

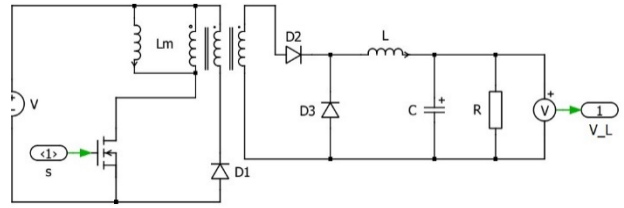
متغیرهای پیوسته هر سه نمونه معیار، ولتاژ دو سر مقاومت R و جریان سلف L هستند که به ترتیب با V_o و i_L نمایش داده می‌شوند. مدل هیبرید اتوماتای این نمونه معیار دارای دو مود کاری

با تعریف آستانه‌های دما به منظور خاموش یا روشن شدن هر هیتر و همچنین در نظر گرفتن امکان جابه‌جایی آن‌ها در اتاق‌ها، یک سیستم هیبرید ایجاد می‌شود. در معادله (۲)، دینامیک این نمونه معیار مشاهده می‌شود که در آن دمای اتاق u نام، دمای هوای بیرون، h_i یک متغیر بولین که مقدار آن ۱ (برای روشن بودن) و ۰ (برای خاموش بودن) است. ضرایب انتقال حرارت بین هر دو اتاق $a_{i,j}$ است. همچنین مقدار گرمای ورودی توسط هر هیتر c_i است. تعداد متغیرهای حالت برابر با تعداد اتاق‌ها است. در این مثال، (\vec{r}_h) حالت برای جابه‌جایی هیترها در اتاق‌ها وجود دارد که r تعداد اتاق‌ها و h تعداد هیترها است. هر هیتر می‌تواند خاموش یا روشن باشد، که 2^h حالت ایجاد می‌کند. در نتیجه $2^h \cdot r$ مود کاری در سیستم وجود دارد. ساده‌ترین نوع این نمونه معیار، با فرض وجود یک اتاق و یک هیتر است که در این صورت سیستم دارای یک متغیر حالت و یک ورودی و دو مود کاری وابسته به روشن یا خاموش بودن هیتر است.

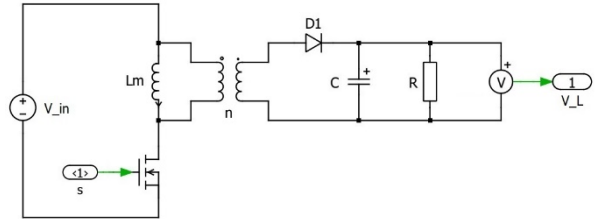
$$\dot{x}_i = c_i h_i + b_i (u - x_i) + \sum_{i \neq j} a_{i,j} (x_j - x_i) \quad (2)$$

۲-۷- همکاری تحت شبکه ردیفی از خودروها

در این نمونه معیار همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، چند خودرو که به صورت ردیفی پشت سر یکدیگر حرکت می‌کنند و خودرو پیشرویی را دنبال می‌کنند. هدف رعایت قیود ایمنی، حفظ فاصله مورد نظر و همچنین پیروی از خودروی پیشرو است. فرض بر این است که این خودروها موقعیت و سرعت نسبی، (نسبت به فاصله مشخص بین دو خودرو) و شتاب خود را در اختیار کنترل کننده قرار می‌دهند. اما با از دست رفتن ارتباط بین یک یا چند خودرو، توپولوژی ارتباطی تغییر می‌کند. این تغییر در توپولوژی ارتباطی را می‌توان به شکل یک سیستم هیبرید مدل‌سازی کرد. در این مثال، رخداد از جنس زمان معلوم یا نامعلوم است. معادلات حاکم بر این سیستم را می‌توان در مقاله ماشو^۱ و همکاران و مخلوف^۲ و همکاران یافت [۱۵، ۱۶]. با اضافه شدن هر خودرو سه متغیر حالت و یک ورودی به سیستم اضافه خواهد شد. شتاب رفرنس خودرو پیشرو نیز به عنوان یک ورودی



(آ) : مبدل رو به جلو



(ب) : مبدل بازگشتی

شکل ۴: مبدل جریان مستقیم به مستقیم با ترانسفورماتور جدا شده [۱۳]

۲-۶- نمونه معیار دمای اتاق

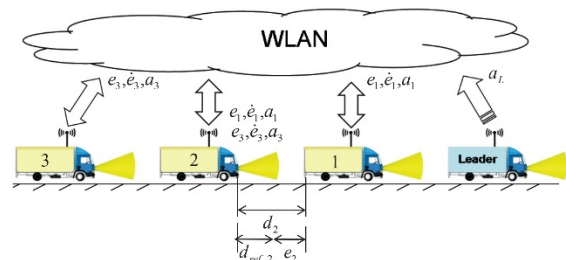
یکی از مثال‌های ساده برای سیستم هیبرید نمونه معیار، دمای اتاق است. در کتاب‌ها و مقالات بسیاری می‌توان انواع مختلف این نمونه معیارها را یافت که در اینجا به یکی از جامع‌ترین آن‌ها اشاره خواهد شد. به طور کلی این نمونه معیار از چند اتاق تشکیل شده که هدف، کنترل دمای هر اتاق به دمای دلخواه است. این اتاق‌ها با یکدیگر تبادل حرارت دارند. همچنین تبادل حرارت از این اتاق‌ها به فضای بیرون نیز ممکن است. در برخی از این اتاق‌ها، یک منبع حرارتی همانند یک هیتر وجود دارد. نرخ حرارت تولید شده تمامی هیترها یکسان است و قابل تنظیم نیست. هیترها را می‌توان صرفاً خاموش یا روشن کرد یا از اتاقی به اتاق دیگر برد. در هر اتاق می‌توان حداکثر یک هیتر قرار داد. همچنین، باید توجه داشت که ضرایب انتقال حرارت بین اتاق‌ها و محیط بیرون می‌تواند متفاوت باشد [۱۴]. از دیدگاه طراحی کنترل کننده، ورودی‌های سیستم دستورات خاموش یا روشن کردن یا جابه‌جا کردن این هیترها از اتاقی به اتاق دیگر (متغیرهای گسسته) هستند، و هدف کنترلی رساندن دمای اتاق‌ها (متغیرهای پیوسته) به مقادیر مطلوب است. در این دیدگاه، رخداد از جنس ورودی است و در هر مود، سیستم دارای دینامیک خطی و پیوسته است.

سیستم که مقدار پیوسته دارد و هم‌چنین ترتیب تعویض دنده الزامی است. چند نمونه مدل‌سازی برای این سیستم در مقاله کرونا و دی شوتر^۱ معرفی شده است [۱۹]. این مدل‌سازی‌ها با تقریب زدن خطی و تکیه‌ای خطی نیروی اصطکاک یا در نظر گرفتن مقادیر غیرخطی آن صورت گرفته است. در این نمونه معیار، خودروبی شش دنده در نظر گرفته شده که با این فرض دارای شش مود کاری با دینامیک غیرخطی است. هم‌چنین با فرض تقریب تکه‌ای خطی اصطکاک می‌توان دینامیک غیرخطی را به خطی و تعداد مودهای کاری را افزایش داد. مدل‌سازی انجام شده با فرض در نظر گرفتن دینامیک غیرخطی، سیستم دارای دو متغیر حالت پیوسته، یک ورودی پیوسته و سه متغیر گسسته است که شش مود مختلف را تشکیل می‌دهد. اما با تقریب خطی دنده و تقریب تکه‌ای خطی اصطکاک، این سیستم دارای دو متغیر حالت پیوسته و یک ورودی پیوسته با دو مود کاری است که این حالت را می‌توان به عنوان نمونه معیار ساده در نظر گرفت [۲۰].

۲-۹- نمونه معیار تعویض دنده موتور

این نمونه معیار، جایگزین مناسبی برای سیستم انتقال قدرت موتور در موتورهای الکترونیکی است. وجود چرخ دنده و تعویض دنده در این نمونه معیار بدون استفاده از عمل کلاچ‌گیری انجام می‌شود. استفاده نکردن از کلاچ برای درگیر کردن دنده‌های مختلف، باعث افزایش راندمان سیستم می‌شود. اما از طرف دیگر برخورد چرخ دنده‌ها با یکدیگر عملیاتی حساس است چراکه کلاچ در این سیستم وجود ندارد و اگر چرخ دنده‌ها در موقعیت نامناسبی به یکدیگر برسند، باعث وقفه در عملیات انتقال قدرت و حتی ایجاد شرایط بدتری می‌شود [۲۱، ۲۲]. به همین دلیل، وجود کنترل‌کننده مناسب در زمان تعویض دنده الزامی است. هدف معادلات نوشته شده در این نمونه معیار، بررسی نحوه برخورد و همگام‌سازی چرخ دنده راننده با راننده شده است. متغیرهای این سیستم، سرعت نسبی طولی و عرضی و موقعیت طولی و عرضی در راستای محور مختصات تعریف شده هستند. دو مود اصلی کاری به نام درگیر و آزاد وجود دارد که در مود درگیر، سرعت‌های نسبی برابر با صفر و موقعیت‌های نسبی ثابت است. لحظه تعویض دنده می‌تواند نامشخص باشد. ورودی کنترلی، گشتاور خروجی مطلوب

وارد معادلات می‌شود. مخلوف و همکاران با استفاده از طراحی ماتریس پس‌خورد حالت برای توپولوژی‌های ارتباط کامل خودروها با یکدیگر و قطع ارتباط آن‌ها، سیستم را به شکل هیبرید مدل‌سازی کردند [۱۷]. ابزارهای تحقیق و تست این مدل در دیگر مقاله مخلوف و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است [۱۸]. برای مدل‌سازی اطلاعات از دست رفته، از جایگزین کردن صفر در ماتریس پس‌خورد استفاده شده است. برای طراحی کنترل‌کننده پس‌خورد حالت از پایدارسازی سیستم حلقه بسته به روش نابرابری ماتریس‌های خطی و نرم بی‌نهایت استفاده شده است. تعداد متغیرهای حالت برابر با $3n$ است که n تعداد خودروها است. معمولاً ۲ توپولوژی ارتباطی برای این نمونه معیار در نظر گرفته می‌شود که دو مود را تشکیل می‌دهد، در صورتی که می‌توان توپولوژی‌های احتمالی مختلف را بررسی کرد. شتاب هر خودرو به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شود و سیستم را می‌توان به صورت تکه‌ای خطی مدل‌سازی کرد.

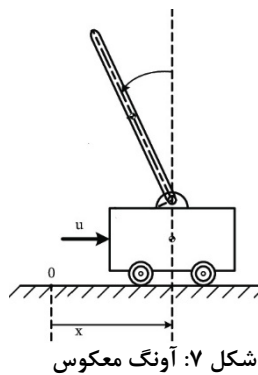


شکل ۵: همکاری تحت شبکه ردیفی از خودروها [۱۸]

۲-۸- کنترل‌کننده کروز تطبیقی

هدف کروز کنترل تطبیقی، حفظ ایمنی و راحتی مسافری در طول مسیر است. در این نمونه معیار، چند خودرو به صورت ردیفی در پشت سر هم حرکت می‌کنند. (برای سادگی نمونه معیار، تنها از دو خودرو استفاده شده است) که خودروی جلویی پیشرو و بقیه پیرو هستند. فقط معادلات دینامیکی خودروهای پیرو مورد بررسی قرار گرفته است. طراحی کنترل‌کننده برای این نمونه معیار به دلیل وجود دینامیک‌های غیرخطی اصطکاک و نیروی پیشران و هم‌چنین رفتار هیبرید چرخ‌دنده‌ها چالش برانگیز است. متغیرهای این سیستم موقعیت و سرعت خودرو، پیرو هستند. رعایت قیود بر روی فاصله بین دو خودرو، سرعت و شتاب خودرو به علاوه ورودی

امکان پذیر نیست. متغیرهای سیستم، زاویه و سرعت زاویه‌ای آونگ، مکان و سرعت خطی پایه آونگ هستند. ورودی کنترلی معمولاً نیروی وارد شده به پایه یا ولتاژ اعمالی به عملگر است. شکل ۷، شماتیک دستگاه را نشان می‌دهد. در نمونه ساده‌تری از سیستم آونگ معکوس، ورودی کنترلی شتاب پایه آونگ و متغیرهای حالت تنها زاویه و سرعت زاویه‌ای آونگ خواهند بود [۲۶، ۲۷]. در کنترل حلقه بسته در صورت وجود رخداد، رخداد از جنس ورودی است.



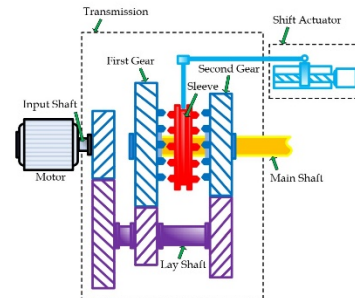
شکل ۷: آونگ معکوس

روبات خودمتعادل‌ساز دو چرخ نیز مدل پیچیده‌تر از یک پاندول معکوس است. هدف کنترلی در این نمونه معیار، متعادل نگه داشتن ربات و همچنین طی کردن مسیر مطلوب است. سیستم دارای شش متغیر حالت به صورت:

$$x = [\theta \ \dot{\theta} \ \psi \ \dot{\psi} \ \phi \ \dot{\phi}]^T$$

چرخش چرخ راست و چپ است. ψ و ϕ بیانگر حرکت پیچ ۲ و ۳ هستند [۲۸]. این سیستم دو ورودی کنترلی از نوع گشتاور با دینامیک حاکم بر موتورهای دی‌سی در داخل چرخ‌ها دارد. این سیستم بسیار شبیه به پاندول معکوس است، از این‌رو، دینامیک آن به طور مشابه غیرخطی است. همچنین در این نمونه معیار، هیچ پرش یا ریست شدن متغیرها مشاهده نمی‌شود. به دلیل وجود اشباع برای عملگرها این سیستم را می‌توان مطابق شکل ۸ به صورت یک سیستم هیبرید مدل‌سازی نمود [۲۸]. بنابراین، مودها بر حسب ورودی هستند.

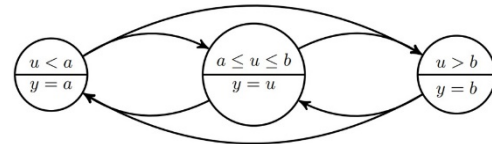
موتور الکتریکی است به طوری که چرخ دنده‌ها به خوبی با یکدیگر درگیر شده و اثرات مخرب برخورد در کم‌ترین حالت خود قرار بگیرند. در هنگام طراحی کنترل کننده، رعایت قیود مساله و حاشیه امنیت‌ها الزامی است. همچنین، رخداد از جنس متغیر حالت است. معادلات دینامیکی برخورد به صورت تقریبی، خطی در نظر گرفته شده است. امکان مدل‌سازی به صورت تکه‌ای خطی وجود دارد. در نتیجه این نمونه معیار دارای دینامیک خطی است. همچنین، در متغیرهای حالت پرش وجود دارد. در کار چن و میترا^۱ می‌توان معادلات سیستم به همراه یک نمونه از طراحی کنترل کننده برای این نمونه معیار را مشاهده کرد [۲۲]. شکل ۶، شماتیک این دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۶: نمونه معیار تعویض دنده موتور [۲۲]

۲-۱۰- آونگ معکوس با پایه متحرک و روبات خودمتعادل‌ساز دو چرخ

نمونه معیار آونگ معکوس دارای دینامیک غیرخطی و کوپل شده‌ای است. این بدین معنی است که متغیرهای اصلی حالت سیستم با یکدیگر تعامل دارند و بر روی هم اثر می‌گذارند. در اینجا ایجاد نوسانات بر روی یکی از اجزای سیستم باعث ایجاد حرکت و یا نوسان بر روی دیگری می‌شود. به همین علت در زمینه کنترل بسیار مورد بررسی قرار می‌گیرد. تعاریف متعددی از دینامیک این سیستم وجود دارد که در مقالات متعددی می‌توان به آن‌ها دسترسی داشت [۲۳-۲۵]. اما اصول دستیابی به دینامیک در همه این مقالات یکی هست. در زمینه هیبرید، هدف کنترل زاویه آونگ، تحت هر شرایط اولیه با قیود تعریف شده بر روی متغیرها و ورودی است که این کار توسط کنترل کننده‌های معمولی،



شکل ۸. قید اشباع برای عملگر ربات خودمتعادل‌ساز دارای دو چرخ [۲۸]

۲-۱۱- نمونه معیار کوادروتور

نمونه معیار کوادروتور دارای دینامیک غیرخطی و کوپل شده‌ای است به گونه‌ای که ایجاد نوسان بر روی یکی از زاویه‌های آن، سبب ایجاد حرکت یا نوسان بر روی موقعیت کوادروتور می‌شود.

معمولا برای کنترل این سیستم، می‌توان آن را حول نقاط کاری خطی‌سازی کرد. این سیستم دارای ۱۲ متغیر حالت و ۴ ورودی است که در بعضی از مقالات ورودی‌ها نیروی پیشرانش موتورها و در برخی دیگر سرعت دورانی پروانه‌ها است. تعاریف متعددی برای معادلات دینامیکی این نمونه معیار وجود دارد که اصول به دست آوردن همه آن‌ها مشابه است. این نمونه معیار در حالت عادی هیبرید نیست اما به دلیل وجود مناطق امن و غیر امن در مسیر حرکت کوادروتور (اجتناب از قرارگیری در نواحی هوایی ممنوع) و همچنین مانورهای گسترده‌ای که برای یک کوادروتور وجود دارد، این سیستم را به عنوان یک نمونه معیار برای سیستم‌های هیبرید در نظر می‌گیرند. چراکه کنترل این سیستم با روش‌های متداول کنترلی در مانورهای خاص، دشوار و در مواردی غیرممکن است. معادلات این دستگاه را می‌توان در کار ایملر^۱ و همکاران مشاهده کرد [۲۹]. همچنین مانور برداشتن جسمی از روی زمین با کابل را می‌توان در کارهای کرووز^۲ و همکاران مشاهده کرد [۳۰، ۳۱].

۲-۱۲- نمونه معیار ترمز هوایی قطار

در این نمونه معیار، دینامیک قطار از معادله غیرخطی (۳) پیروی می‌کند که در آن هر کدام از نیروهای پیشرانش f و ترمزی b دارای دینامیک هیبرید هستند. نیروی پیشرانش وابسته به توان خروجی از موتور p و سرعت قطار v است. توان خروجی از موتور

وابسته به ورودی کنترلی u_d است. نیروی مقاومت حرکت $\mu(|v|)$ و زاویه شیب مسیر θ است که به مسیر ξ وابسته است. M نیز جرم قطار است. نیروی ترمزی نیز دارای دینامیک هیبرید است که از سه مود درجا، ترمز و رهاسازی تشکیل شده است. ورودی کنترلی u_b است که مقدار آن، شدت ترمزگیری و علامت آن انتقال از مود درجا به مود ترمز یا از مود ترمز به مود رهاسازی را شکل می‌دهد.

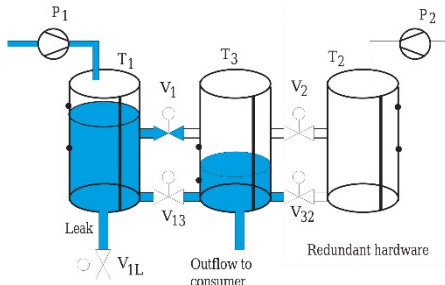
$$\xi = v$$

$$\dot{v} = \frac{1}{M}(f(p, v) - \text{sgn}(v)(\mu(|v|) + b) - g \sin(\theta(\xi))) \quad (3)$$

در نهایت با تلفیق دینامیک‌های پیوسته و گسسته، یک دینامیک ضربه‌ای برای این سیستم طراحی شده که دارای ۵ متغیر پیوسته و یک متغیر گسسته است. متغیرهای پیوسته نمونه معیار، مکان و سرعت قطار، توان موتور، نیروی ترمزی و حداکثر نیروی ترمزی هستند و متغیر گسسته بیانگر مود ترمزی است. در مساله کنترل قطار هدف، بهینه‌سازی توان مصرفی برای رسیدن به مقصد است که در مسیر باید قطار همواره بر روی پروفیل سرعت مورد نظر حرکت کند و قیود ایمنی را رعایت کند. این قیود ایمنی می‌تواند حداکثر یا حداقل سرعت قطار، تنش بین واگن‌ها و دیگر موارد باشد. برای مشاهده دقیق معادلات و قیود مساله می‌توان به مقاله پارولینی^۳ و همکاران مراجعه کرد [۳۲]. با مدل‌سازی ذکر شده، در متغیرهای این سیستم پرسش وجود دارد.

۲-۱۳- نمونه معیار مخزن سه‌گانه

هدف کنترلی در این مساله، کنترل سطح آب موجود در مخازن است به گونه‌ای که جریان خروجی از مخزن ۳ برای مشتری تقریبا ثابت باشد. در این سیستم، مطابق شکل ۹ سه مخزن حاوی سیال موجود است که هر مخزن توسط شیرهای $(V_1, V_{13}, V_2, V_{32})$ دوحالتی، به صورت باز یا بسته در ارتفاع‌هایی ثابت نسبت به یکدیگر متصل شده‌اند. همچنین شیر (V_{1L}) برای مدل‌سازی نشت سیال و دو پمپ سیال به عنوان ورودی‌های سیستم (P_1, P_2) که قابلیت برنامه‌ریزی و کنترل دارند بر روی مخزن ابتدا و انتهای قرار گرفته‌اند. متغیرهای حالت سیستم



شکل ۹: مخزن سه گانه [۳۴]

۲-۱۴- یخچال فروشگاه

این نمونه معیار به بررسی یخچال‌های ایستاده بدون درب که اغلب به صورت چندین یخچال در کنار هم و در فروشگاه‌های بزرگ قابل رویت هستند، می‌پردازد. هدف کنترلی از این نمونه معیار، تنظیم دمای داخل هر یک از یخچال‌ها بر روی دمای دلخواه و همچنین کمینه کردن تعداد خاموش و روشن شدن کمپرسور و در نتیجه کاهش هزینه است. در ابتدا مروری بر عملکرد یک یخچال می‌کنیم. یک یخچال از چهار بخش عمده کمپرسور، کندانسور، شیر انبساط و اواپراتور تشکیل شده است [۳۷]. عملکرد هر بخش به صورت جدول ۱ است.

جدول ۱: وظیفه هر یک از المان‌های نمونه معیار یخچال فروشگاه

وظیفه	المان
با انجام کار بر روی ماده مبرد فشار و دما را بالا می‌برد.	کمپرسور
با تبادل حرارت دمای مبرد اندکی کاهش می‌یابد.	کندانسور
فرایند شکسته شدن فشار در این بخش روی می‌دهد. به دلیل مثبت بودن ضریب ژول-تامسون برای سیالات مبرد با کاهش فشار دما نیز به صورت چشم‌گیری کاهش می‌یابد. در این بخش، دمای مبرد تا دمایی پایین‌تر از محیط سرد پایین می‌آید.	شیر انبساط
با تبادل حرارتی میان مبرد و محیط سرد، دمای مبرد بالاتر رفته و دمای محیط سرد کاهش می‌یابد.	اواپراتور

به وسیله تبادل حرارت میان اواپراتور و هوای یخچال، یک پرده از هوای سرد میان مواد داخل یخچال و هوای بیرون از یخچال شکل می‌گیرد که باعث سرمايش مواد داخل یخچال می‌شود. همچنین تبادل حرارت میان پرده هوای سرد و محیط خارج به صورت یک بار حرارتی و به عنوان اغتشاش مدل‌سازی

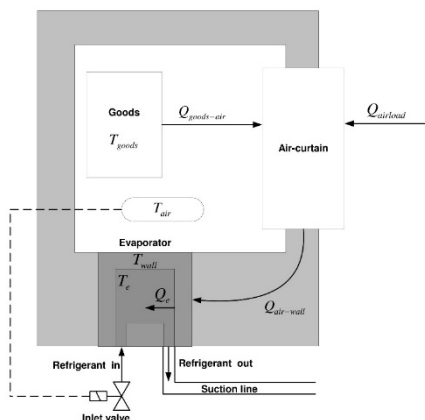
ارتفاع سیال در هر مخزن به صورت $x = [h_1 \ h_2 \ h_3]$ است. همچنین معادله عبور سیال از میان شیر با قانون توریسلی مدل‌سازی می‌شود:

$$Q = kA \text{sign}(h_i - h_j) \sqrt{2g|h_i - h_j|} \text{Pos}(V) \quad (4)$$

در معادله بالا k ضریب اصلاح کننده، A سطح مقطع شیر، $\text{Pos}(V)$ بیانگر حالت باز یا بسته بودن شیر است. به دلیل رابطه (۴)، سیستم غیرخطی است. با توجه به ارتفاع سیال موجود در هر مخزن h_i ، حالت ممکن برای معادلات سیستم روی می‌دهد. با حذف تابع علامت از رابطه (۴)، تعداد موده‌های سیستم به ۱۷ افزایش می‌یابد [۳۳] (این مقدار در صورت نصب شیرهای متصل کننده مخزن وسط به دو مخزن دیگری در ارتفاع‌های متفاوت افزایش می‌یابد).
با نوشتن قانون بقای جرم:

$$A_i \dot{h}_i = \sum_{j=1}^n Q_{input} + \sum_{k=1}^m Q_{output} \quad (5)$$

و جای‌گذاری میزان دبی از رابطه توریسلی، معادلات نهایی حاصل می‌شود. این نمونه معیار به دلیل وابسته بودن عمل کردن شیرها به ارتفاع سطح آب در مخزن (وابستگی معادله حاکم به متغیرهای حالت) باید به صورت هیبرید بررسی شوند. معادلات حاکم بر مساله و همچنین موده‌های آن‌ها در کار هیمینگ و لونزه^۱ قابل مشاهده است [۳۴]. هاریپراساد و بهارتیا^۲ در مقاله خود یک کنترل کننده پیش‌بین مدل برای این نمونه معیار طراحی کرده‌اند [۳۳]. همچنین از مدل چهار مخزنی این نمونه معیار نیز استفاده می‌شود [۳۵، ۳۶]. لازم به ذکر است که پرش در متغیرهای حالت این سیستم وجود ندارد.



شکل ۱۰: دیاگرام برش خورده یخچال فروشگاه [۳۸]

۲-۱۵- حلقه قفل کننده فاز

از این مدار به طور گسترده در پروژه‌های مخابراتی، الکترونیکی، کلاک^۴ کامپیوترها و برای اتصال تولید کننده‌های انرژی همانند انرژی‌های تجدیدپذیر به خط انتقال برق استفاده می‌شود. شکل ۱۱ نمای یک قفل کننده فاز نوع دوم دو مسیره را نشان می‌دهد. قفل کننده فاز، یک مدار کاملاً کنترلی است. هدف از این مدار، یکسان‌سازی فاز و فرکانس سیگنال خروجی با سیگنال ورودی است. اما در شکل ۱۱، به دلیل وجود بلوک تقسیم کننده فرکانس، فرکانس خروجی N برابر می‌شود. در این حالت، فرکانس سیگنال ورودی از حدود MHz و فرکانس سیگنال خروجی از حدود GHz است. به اختصار می‌توان وظیفه هر یک از المان‌ها را به صورت جدول ۲ بیان نمود.

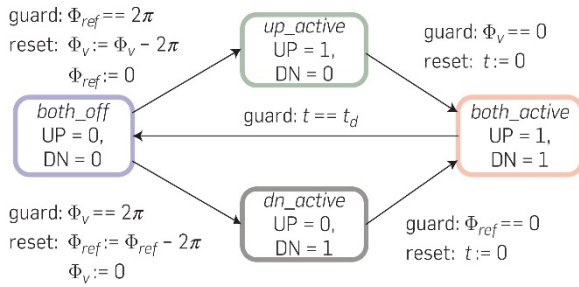
جدول ۲. وظیفه هر یک از المان‌های نمونه معیار حلقه قفل کننده فاز

وظیفه	المان
وظیفه تشخیص میزان اختلاف فاز سیگنال مرجع با سیگنال تولیدی را دارد و متناسب با آن ولتاژ ایجاد می‌کند.	آشکارساز فاز
تامین جریان i_p و i_n را برعهده دارد.	پمپ شارژ
به وسیله یک نگاهت، فرکانس سیگنال خروجی را با توجه به میزان ولتاژ سیگنال ورودی به آن تغییر می‌دهد.	نوسان کننده کنترل شده با ولتاژ
فرکانس سیگنال ورودی را تقسیم بر N می‌کند.	تقسیم کننده فرکانس

می‌شود. با نصب یک سنسور دما در محیط داخلی یخچال می‌توان یک معیار غیرمستقیم از دمای محصولات داخل یخچال داشت. در یخچال‌ها، قلب سیستم کمپرسور است که اغلب از چند کمپرسور به صورت موازی استفاده می‌شود و با توجه به فشار مورد نیاز برای مکش تعدادی از کمپرسورها روشن و تعدادی خاموش هستند. به صورت متداول، کنترل در این سیستم به صورت غیرمرکزی و برای هر یخچال، متشکل از دو کنترل کننده است. کنترل کننده اول به صورت هیستریزس و به منظور کنترل دمای داخل یخچال و با کلیدزنی روی دریچه ورودی ماده مبرد به داخل اواپراتور هر یخچال صورت می‌گیرد و کنترل کننده PI با ناحیه مرده به منظور تنظیم فشار مکش کمپرسور، به وسیله تنظیم روشن بودن تعدادی از کمپرسورها صورت می‌گیرد. مزایا و معایب این روش کنترلی توسط لارسن^۱ و همکاران مورد بحث قرار گرفته است [۳۸]. هم‌چنین در کارهای دیگری همانند لارسن ریکر^۲ و همکاران یا سونتاک^۳ و همکاران از کنترل پیش‌بین مدل برای کنترل این سیستم نیز استفاده شده است [۳۹، ۴۰].

این سیستم غیرخطی است و مطابق انتظار برای مدل‌سازی این فرایند باید هر یک از زیرسیستم‌ها مدل‌سازی شوند [۳۸]. به دلیل کلیدزنی روی ورودی‌ها (باز و بسته بودن شیر یا خاموش و روشن شدن کمپرسورها)، باید این سیستم، به عنوان یک سیستم هیبرید مدل‌سازی شود. هم‌چنین در این سیستم، مودها بر حسب متغیرهای حالت (دمای مطلوب و فشار مکش) عوض می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در مدل کلی و برای مدل‌سازی مانیفولد مکش، یک متغیر حالت به صورت فشار مکش P_{suc} ، دو ورودی به صورت دبی حجمی خارج شده به وسیله مانیفولد مکش توسط کمپرسورها \dot{V}_{comp} و مجموع جرم ماده مبرد خارج شده از یخچال‌ها به سمت مانیفولد مکش m_i در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین هر یخچال دارای چهار متغیر حالت به صورت دمای کالاهای یخچال T_{goods} ، دمای دیواره اواپراتور T_{wall} ، دمای هوای سرد T_{air} و جرم مبرد مایع شده در اواپراتور M_{ref} و دو ورودی به صورت فشار مکش P_{suc} و هم‌چنین موقعیت شیر (باز یا بسته) است. ضمناً دو اغتشاش به صورت تبادل حرارت با فضای اطراف $Q_{airload}$ و دبی جرمی مدل نشده به سمت مانیفولد مکش $\dot{m}_{ref,cons}$ نیز برای این مدل قابل تصور است.

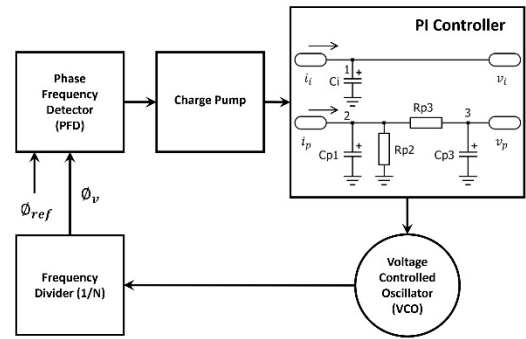
متغیرها نیز دیده می‌شود. هم‌چنین نمودار سیستم هیبرید اتوماتا را می‌توان به صورت شکل ۱۲ در نظر گرفت.



شکل ۱۲. نمودار هیبرید اتوماتای مدار قفل کننده فاز [۴۲]

۲-۱۶- نمونه معیار کنترل سرعت درجا

این نمونه معیار در واقع کنترل سرعت سیستم انتقال قدرتی است که در حالت درجا قرار دارد. کنترل سرعت درجا موتور یک نمونه معیار پیچیده اما بسیار نزدیک به واقعیت است [۴۳]. هدف از این نمونه معیار، طراحی کنترل کننده‌های کارآمد برای سیستم‌های هیبرید، با قابلیت پیاده‌سازی در واقعیت است. این سیستم دارای چهار زیرسیستم اعم از منیفولد، سیلندرها، جرقه‌زنی و سیستم انتقال قدرت است که هر کدام از این زیرسیستم‌ها دارای دینامیک هیبرید، پیوسته یا گسسته هستند. در نتیجه، این زیرسیستم‌ها در کنار یکدیگر، یک سیستم پیچیده را ایجاد می‌کنند. هر سیلندر در زیرسیستم سیلندرها نیز دارای یک دینامیک هیبرید است. هدف از کنترل سرعت درجا، نزدیک نگه داشتن سرعت موتور n به پایین‌ترین سرعت ممکن است که در آن چرخ دنده خلاص است و از خاموش شدن موتور اجتناب می‌شود. یکی از اغتشاش‌های وارد شده بر این سیستم، گشتاوری است که بر روی میل‌لنگ اعمال می‌شود T_l و دیگری تغییر دینامیک میل‌لنگ در اثر حرکت کلاچ است. به صورت دقیق‌تر، هدف نگه داشتن سرعت میل‌لنگ در بازه مشخص $n_0 + \Delta_n$ است. ورودی‌های کنترلی، زاویه پیشبرد جرقه مطلوب $\tilde{\varphi}$ و موقعیت شیر دریچه هوا مطلوب $\tilde{\alpha}$ هستند. قیود و دینامیک حاکم بر سیستم نیز باید در نظر گرفته شوند. خروجی سیستم نیز موقعیت شیر دریچه هوا α ، فشار منیفولد p و سرعت موتور n است. مدل‌سازی‌های جدید انجام شده در این نمونه معیار، این امکان را فراهم می‌سازد که تاثیر هر جرقه و گشتاورهای ناپیوسته ایجاد



شکل ۱۱. مدار یک قفل کننده فاز [۴۱]

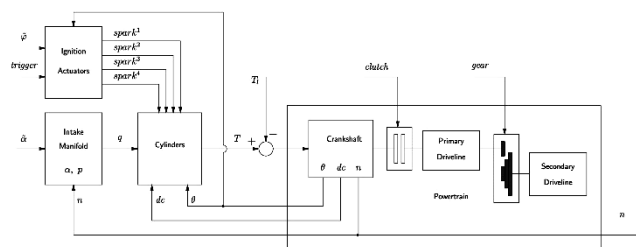
در حالت کلی، کنترل این مدار به صورت آنالوگ بوده و مقادیر مقاومت و خازن‌ها مشخص کننده ضرایب کنترل کننده PI در این مدار هستند. این سیستم مطابق شکل ۱۲ دارای چهار مود کاری است. این مودها شامل فقط بالا فعال، فقط پایین فعال، هر دو فعال و هر دو غیرفعال است. وابسته به مود کاری فعال، پمپ شارژ مقدار ثابتی جریان الکتریکی مخصوص هر مود کاری را در مدار تزریق می‌کند. مود بالا فعال در حالت عقب بودن فاز سیگنال خروجی از سیگنال مرجع فعال می‌شود. به این ترتیب که با تزریق جریان توسط پمپ جریان با مقداری خصوص [۴۲] و افزایش ولتاژ ورودی به VCO فرکانس سیگنال خروجی افزایش می‌یابد. و اختلاف فاز جبران می‌شود. به همین صورت حالت پایین فعال در صورت جلوتر بودن فاز سیگنال خروجی از سیگنال مرجع فعال می‌شود. مود هر دو فعال به دلیل در نظر گرفتن تاخیر مورد نیاز برای گذار به مود هر دو غیرفعال در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین در مود هر دو غیرفعال، هیچ ورودی به سیستم از پمپ شارژ وارد نمی‌شود. وابسته به این که آیا سیگنال خروجی و مرجع هم فاز شده باشند، روند کلیدزنی ادامه می‌یابد تا اختلاف فاز به مقداری بسیار کم در حدود $\Delta\Phi = [-0.1^\circ, 0.1^\circ]$ برسد. روند استخراج معادلات در مقاله بگ^۱ و همکاران نشان داده شده است [۴۱]. هم‌چنین معادلات فضای حالت سیستم در کار آلتوف^۲ و همکاران به دست آمده است [۴۲]. این سیستم دارای پنج متغیر حالت به صورت $x = [V_1 \ V_2 \ V_3 \ \Phi_{output} \ \Phi_{ref}]$ و هم‌چنین دو ورودی از نوع جریان از پمپ شارژ است. در این مدار پمپ در

به طور مثال از روی جدول شماره ۴ می‌توان دریافت که نمونه معیار شماره ۴ که مبدل جریان مستقیم به مستقیم است، دارای ۲ مود کاری، ۲ متغیر حالت، ۱ ورودی باینری و یک ورودی به عنوان اغتشاش است. همچنین هر دو نوع رخداد اعم از زمان مشخص و نامشخص در آن وجود دارد. به علاوه، پرش نیز در متغیرهای حالت وجود ندارد (ریست مپ همانی است). در آخر نیز می‌توان دریافت که این سیستم دارای زیرسیستم‌های خطی است.

جدول ۳. تعریف مخفف‌های استفاده شده در جدول ۴

بخش	علامت	توضیحات
متغیرها و ورودی‌ها	c	سیگنال‌های زمان-پیوسته یا زمان-گسسته
	b	متغیر باینری
	i	متغیر عدد صحیح
	w	اغتشاش
نوع رخداد	o	خروجی
	I	وابسته به ورودی
	S	وابسته به متغیر حالت
	T	زمان-پایه
دینامیک	dd	مشخص ^۱
	nd	نامشخص ^۲
	L	خطی
علامت‌ها	N	غیر خطی
		یا
	&	و
	*	برای توضیحات بیشتر به متن مراجعه شود

شده توسط موتور به همراه دینامیک پیوسته سیستم انتقال قدرت، دینامیک پیوسته هوا و همچنین تغییرات ناپیوسته سیستم انتقال قدرت به خوبی مشاهده شود. برای بررسی حرکات مختلف می‌توان گشتاور اغتشاشی را در بازه محدود تغییر داد و عملکرد کنترل کننده را مورد بررسی قرار داد. شکل ۱۳، نحوه ارتباط زیرسیستم‌ها و متغیرهای ورودی و خروجی سیستم را نشان می‌دهد. در سیستم حلقه بسته، رخدادها از هر سه جنس زمان، متغیر حالت و ورودی هستند. هر زیرسیستم دارای مودهای کاری مربوط به خود است. زیرسیستم سیلندرهای دارای ۳ مود کاری و هر سیلندر دارای ۶ مود کاری است. زیرسیستم انتقال قدرت نیز دارای ۲ مود کاری است. زیرسیستم منیفولد دارای دینامیک پیوسته و زیرسیستم جرقه‌زنی دارای ۵ مود کاری است. وجود پرش در متغیرهای حالت این سیستم نیز حائز اهمیت است.



شکل ۳. کنترل سرعت درجا [۴۳]

۳- مقایسه

در این بخش، نمونه معیارهای ارائه شده در جدول ۴ آورده شده‌اند و برخی از خصوصیات آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. لازم به ذکر است که داده‌های موجود در جدول زیر وابستگی شدیدی به نحوه مدل‌سازی و فرضیات دارد که سعی شده کلی‌ترین حالت آن‌ها در نظر گرفته شود. در ستون (نمونه معیارها) نام نمونه معیار، در ستون (مودها) تعداد مودهای مختلف سیستم، در ستون (متغیرها) تعداد متغیرها و جنس آن‌ها، در ستون (ورودی‌ها) تعداد ورودی‌ها و جنس آن‌ها، در ستون (نوع رخداد) جنس رخدادها، در ستون (پرش) بررسی وجود پرش در متغیرهای حالت، در نهایت در ستون (دینامیک)، نوع دینامیک آورده شده است. علائم اختصاری موجود در جدول ۴، در جدول ۳ شرح داده شده‌اند.

جدول ۴. نمونه معیارها

شماره	نمونه معیار	پرش	نوع رخداد	ورودی‌ها	متغیرها	مودها	دینامیک
۱	بمپوراد - موراری	خیر	S	c/1	c/2	۲	L
۲	قرار ملاقات فضاپیما	خیر	S & T (dd nd)	c/2	c/4	۳	N/L*
۳	انتقال قدرت خودرو به همراه لقی	خیر	S	c/1	c/4	۳	L
۴	مبدل جریان مستقیم به مستقیم	خیر	I T	b/1, w/1	c/2	۲	L
۵-الف	مبدل جریان مستقیم به مستقیم با ترانسفورماتور جداشده (بازگشتی)	خیر	I T	b/1, w/1	c/2	۲	L
۵-ب	مبدل جریان مستقیم به مستقیم با ترانسفورماتور جداشده (رو به جلو)	خیر	S & (I T)	b/1, w/1	c/2	۵	L
۶	دمای اتاق*	خیر	I	b/	c/n		L
۷	همکاری تحت شبکه ردیفی از خودروها*	خیر	T(dd nd)	c/n, r/	c/n3	۲	L
۸-الف	کنترل کننده کروز تطبیقی	خیر	S	c/1	c/2	۲	L
۸-ب	کنترل کننده کروز تطبیقی (حالت ۲)*	بله	S	c/1	c/2, b/3	۵	N
۹	نمونه معیار تعویض دنده موتور	بله	S	c/1	c/4	۲	L
۱۰-الف	آونگ معکوس با پایه‌ی متحرک	خیر	-	c/1	c/4	۱	N
۱۰-ب	روبات خود متعادل ساز دو چرخ	خیر	I	c/2	c/6	۳	N
۱۱	کوادروپتور	خیر	-	c/4	c/12	۱	N
۱۲	ترمز هوایی قطار	بله	S & I	c/2	c/5, i/1	۳	N
۱۳	مخزن سه‌گانه	خیر	S & I	b/4, c/2	c/3	*۱۷	N/L*
۱۴	حلقه قفل کننده فاز	بله	S	c/2	c/5	۴	L
۱۵	یخچال فروشگاه*	خیر	S & I	b/n, i/1	c/(1+n4)	n+1	N
۱۶	کنترل سرعت درجا*	بله	S & I & T	b/1, w/1, c/3	o/1	*	N

طبقه‌بندی کرده و مثال‌های ۸-ب تا ۱۶ را جزو مثال‌های پیچیده ارزیابی نمود.

ساده‌ترین نمونه معیار در سیستم‌های هیبرید نمونه معیار بمپوراد-موراری است. از این نمونه معیار می‌توان برای کنترل کننده‌های زمان گسسته استفاده کرد. این نمونه معیار بیش‌تر جنبه‌آشنایی با بحث کنترل سیستم‌های هیبرید را دارد و صرفاً یک مثال ریاضی است و جنبه عملی ندارد. نمونه معیار قرار ملاقات فضاپیما یکی از نمونه معیارهای مهم در سیستم‌های هیبرید است چرا که نوع رخداد آن هم به زمان و هم به متغیرهای حالت بستگی دارد و همچنین با توجه به حساسیت سیستم‌های فضایی و دینامیک غیرخطی نیاز به کنترل کننده‌ای است که شرایط ذکر شده را برآورده کند. یکی از نمونه معیارهایی که جنبه عملی دارد، نمونه معیار انتقال قدرت خودرو به همراه لقی است. این نمونه معیار دارای دینامیکی سریع است و نیاز به کنترل کننده‌ای دارد

انتخاب یک نمونه معیار مناسب بسیار وابسته به هدف طراح از نحوه به چالش کشیدن یک الگوریتم کنترلی و آشکارسازی نقاط قوت و ضعف آن دارد. از این‌رو، انتخاب نمونه معیار مناسب به صورت کلی بر عهده طراح کنترل کننده است. این امر با مطالعه دقیق ویژگی‌های نمونه معیار صورت می‌گیرد. بر این اساس، در ادامه مروری کلی بر نمونه معیارهای ارائه شده و چالش‌های طراحی کنترل کننده برای نمونه معیارهای ذکر شده در جدول ۴، ارائه می‌شود.

در جدول ۴، می‌توان نمونه معیارها را از حیث تعداد متغیرهای حالت و تعداد ورودی‌ها و سایر موارد مورد توجه قرار داد و بر این اساس یک مثال مناسب را انتخاب نمود و کنترل کننده مورد نظر را بر روی آن پیاده‌سازی کرد. از این‌رو، با توجه به جدول ۴ می‌توان به صورت کلی مثال‌های ۱ تا ۸-الف را جزو مثال‌های ساده

روی لحظه دقیق تعویض دنده است چراکه در غیر این صورت اثرات مخرب بر روی عمر چرخ دنده‌ها برجا می‌گذارد. نمونه معیار آونگ معکوس با پایه متحرک، ربات خود متعادل ساز و کوادروتور از جمله سیستم‌های تحریک ناقص^۱ و غیرخطی هستند که به خودی خود یک سیستم هیبرید نیستند اما با در نظر گرفتن قیودی هم‌چون اشباع یا قیود ایمنی می‌توان آنها را به یک مساله هیبرید تبدیل کرد. در نتیجه باید برای آن‌ها کنترل‌کننده‌ای که قابلیت پیاده‌سازی بر روی سیستم‌های غیرخطی با قیود متفاوت را دارد، طراحی شود. نمونه معیار ترمز هوایی قطار به دلیل وابستگی نوع رخداد به ورودی و متغیرهای حالت هم‌چنین دینامیک غیرخطی و وجود پرش و تغییر ناگهانی متغیرهای حالت یک نمونه معیار نسبتاً پیچیده است. وجود متغیرهای حالت عدد صحیح نیز به دشواری کنترل این سیستم افزوده است. در نتیجه باید کنترل‌کننده‌ای برای این سیستم طراحی شود که قابلیت در نظر گرفتن نکات ذکر شده در آن وجود داشته باشد. نمونه معیار مخزن سه گانه به دلیل وجود تعداد مودهای زیاد و هم‌چنین وابستگی نوع رخداد به ورودی و متغیرهای حالت نمونه معیار پیچیده‌ای است چراکه ورودی‌های باینری در حالت‌های مختلف سبب وارد شدن به مودهای متفاوت می‌شوند. زیرسیستم‌های این نمونه معیار را می‌توان به صورت غیرخطی یا ساده شده آن (به صورت خطی) در نظر گرفت. نمونه معیار حلقه قفل‌کننده فاز به دلیل وجود پرش و تغییر ناگهانی متغیرهای حالت دارای پیچیدگی‌های خاص خود است در نتیجه، کنترل‌کننده طراحی شده برای این نمونه معیار باید قابلیت در نظر گرفتن تغییر ناگهانی متغیرهای حالت را داشته باشد. یکی از سخت‌ترین نمونه معیارها مثال یخچال فروشگاه است چراکه هم ورودی باینری و هم ورودی عدد صحیح دارد. هم‌چنین می‌توان تعداد متغیرهای حالت سیستم را به دلخواه افزایش داد که این امر سبب افزایش در تعداد مدها و ورودی‌های سیستم می‌شود. هم‌چنین این سیستم دارای دینامیکی غیرخطی است در نتیجه کنترل‌کننده مورد استفاده برای این مساله باید قابلیت در نظر گرفتن همه موارد را داشته باشد. نمونه معیار کنترل سرعت درجا یک مساله نزدیک به واقعیت است که علاوه بر آن یکی از سخت‌ترین مساله‌ها در زمینه کنترل سیستم‌های هیبرید است. چراکه علاوه بر ورودی باینری و پیوسته، دارای یک ورودی

که سرعت تصمیم‌گیری بالایی داشته باشد. اما از لحاظ تعداد متغیرها و دینامیک زیرسیستم‌ها نمونه معیار نسبتاً ساده‌ای است. از دیگر نمونه معیارهایی که جنبه عملی دارند و نیاز به سرعت بالا در تصمیم‌گیری دارند می‌توان به نمونه معیارهای ۴ و ۵-الف اشاره کرد که علاوه بر ورودی کنترلی، یک ورودی اغتشاشی نیز دارند و همین امر سبب پیچیده‌تر کردن مساله کنترلی می‌شود. دینامیک زیرسیستم‌های این نمونه معیارها خطی است و جنس رخدادها هم از نوع ورودی و هم وابسته به زمان است. به عبارت دیگر ورودی باینری یا یک اتفاق در زمان، سبب تغییر مود می‌شوند. اما در نمونه معیار ۵-ب، نوع رخداد می‌تواند از جنس متغیر حالت نیز باشد. بدین معنی که اگر متغیرهای حالت از یک محدوده مشخص خارج شوند، مد سیستم نیز تغییر پیدا می‌کند در نتیجه نیاز به کنترل‌کننده پیچیده‌تری نسبت به نمونه معیارهای ۴ و ۵-الف است. نمونه معیار دمای اتاق از لحاظ دینامیک زیرسیستم‌ها و نوع رخداد که فقط از جنس ورودی است، نمونه معیار نسبتاً ساده‌ای است. اما به دلیل امکان طرح مساله پیچیده با افزایش تعداد متغیرهای حالت و تعداد ورودی‌ها (تعداد اتاق‌ها و تعداد هیترها) می‌توان این مساله را به یک مساله پیچیده تبدیل کرد. در نتیجه کنترل‌کننده باید قابلیت تعریف تعداد زیادی مودکاری، متغیرهای حالت و ورودی‌های باینری را داشته باشند. مثال همکاری تحت شبکه ردیفی از خودروها همانند نمونه معیار دمای اتاق می‌تواند دارای تعداد دلخواهی از متغیرهای حالت باشد که یکی از چالش‌های اصلی این سیستم است. نمونه معیار کنترل‌کننده کروز تطبیقی در حالت ۸-الف مساله ساده‌ای است اما با در نظر گرفتن این نمونه معیار به صورت حالت ۸-ب می‌توان این مساله را پیچیده‌تر کرد چراکه علاوه بر دو متغیر حالت پیوسته سه متغیر حالت گسسته نیز به مساله اضافه می‌شود و هم‌چنین دینامیک غیرخطی سیستم سبب پیچیده‌تر شدن آن می‌شود. باید توجه شود که در این مساله، پرش در متغیرهای حالت وجود دارد. در نتیجه باید کنترل‌کننده‌ای طراحی شود که علاوه بر امکان تعریف متغیرهای حالت باینری و در نظر گرفتن دینامیک غیرخطی، تغییر ناگهانی متغیرهای حالت را نیز در نظر بگیرد. نمونه معیار تعویض دنده موتور یکی از نمونه معیارهایی است نیاز به سرعت بالا در تصمیم‌گیری و هم‌چنین لحاظ قیود مختلف بر

مراجع

- [1] A. Bemporad and M. Morari, "Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints," *Automatica*, vol. 35, no. 3, pp. 407-427, 1999.
- [2] F. A. Cuzzola and M. Morari, "An LMI approach for H_∞ analysis and control of discrete-time piecewise affine systems," *International Journal of Control*, Article vol. 75, no. 16, pp. 1293-1301, 2002.
- [3] M. Baotić, F. J. Christophersen, and M. Morari, "Constrained optimal control of hybrid systems with a linear performance index," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Article vol. 51, no. 12, pp. 1903-1919, 2006.
- [4] N. Chan and S. J. a. p. a. Mitra, "Verifying safety of an autonomous spacecraft rendezvous mission," in *4th International Workshop on Applied Verification of Continuous and Hybrid Systems (ARCH)*, 2017.
- [5] M. Althoff et al., "Arch-comp19 category report: Continuous and hybrid systems with linear continuous dynamics," in *6th International Workshop on Applied Verification for Continuous and Hybrid systems (ARCH)*, , vol. 61, pp. 14-40, 2019.
- [6] A. Lagerberg, "A Benchmark on Hybrid Control of an Automotive Powertrain with Backlash," Department of Signals and Systems, Chalmers University of Technology, Göteborg1403266X (ISSN), 2007, Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hj:diva-6031>.
- [7] M. Althoff and B. H. Krogh, "Avoiding geometric intersection operations in reachability analysis of hybrid systems," in *15th ACM international conference on Hybrid Systems: Computation and Control*, 2012, pp. 45-54.
- [8] T. Besselmann, P. Rostalski, M. Baric, A. Lagerberg, and M. Morari, "A Benchmark on Hybrid Control of a Mechanical System with Backlash," *Automatic Control Laboratory, ETH, Zürich*, 2007, Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hj:diva-6037>.
- [9] L. V. Nguyen and T. T. Johnson, "Benchmark: DC-to-DC Switched-Mode Power Converters (Buck Converters, Boost Converters, and Buck-Boost Converters)," in *6th International Workshop on Applied Verification for Continuous and Hybrid systems (ARCH)*, 2014, pp. 19-24.
- [10] T. Geyer, G. Papafotiou, R. Frasca, and M. Morari, "Constrained optimal control of the step-down dc-dc converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Article vol. 23, no. 5, pp. 2454-2464, 2008.
- [11] T. Geyer, G. Papafotiou, and M. Morari, "Hybrid model predictive control of the step-down DC-DC converter," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Article vol. 16, no. 6, pp. 1112-1124, 2008.
- [12] T. A. F. Theunisse, J. Chai, R. G. Sanfelice, and W. P. M. H. Heemels, "Robust Global Stabilization of the DC-DC

اغتاشی نیز است. هم‌چنین پرس و تغییر ناگهانی در متغیرهای حالت وجود دارد و دینامیک زیرسیستم‌ها غیرخطی و پیچیده است. نوع رخدادها نیز هم از جنس ورودی هم متغیر حالت و هم وابسته به زمان است. در نتیجه کنترل کننده طراحی شده باید همه موارد ذکر شده را در نظر گیرد. رسیدن به درک درستی از این مساله نیز دشواری‌های خاص خود را دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این کار سعی شد تا نمونه معیارهای مختلف موجود در زمینه هیبرید مورد بررسی قرار گیرند. انتخاب نمونه معیارها بر اساس تعداد دفعات تکرار، به رسمیت شناخته شده بودن و امکان استفاده از آنها در مسائل طراحی کنترل کننده است. همان‌طور که در جداول به دست آمده مشاهده می‌شود، مشخصات هر یک از نمونه معیارهای ارائه شده، اعم از تعداد مودهای کاری، تعداد و نوع متغیرها، تعداد و نوع ورودی‌ها، جنس رخدادها، وجود پرس در متغیرهای حالت، نوع دینامیک آنها ذکر شده است. در نتیجه، به صورت کلی پیشنهاد می‌شود کسانی که به دنبال ابداع روش کنترلی جدید هستند یا قصد یادگیری و آشنایی با چالش‌های کنترل هیبرید را دارند از نمونه معیارهای ساده‌تر مانند شماره‌های ۱ تا ۸-الف که در جدول ۳ آورده شده است، استفاده کنند و کسانی که قصد توسعه روش‌های کنترلی موجود را دارند یا درصدد از بین بردن خلل‌های موجود در علم کنترل سیستم هیبرید هستند، از نمونه معیارهای پیچیده‌تر همانند شماره‌های ۸-ب تا ۱۶ استفاده کنند. البته لازم به ذکر است محققان می‌توانند با رعایت اصول و با در نظر گرفتن فرضیه‌های درست، این نمونه معیارها را ساده‌سازی کنند و از آنها استفاده کنند.

تعارض منافع

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است."

- Continuous and Hybrid systems (ARCH), 2019, vol. 61, pp. 103-119.
- [24] L. Rodrigues and J. P. How, "Observer-based control of piecewise-affine systems," *International Journal of Control*, Article vol. 76, no. 5, pp. 459-477, 2003.
- [25] A. Safi and E. Khanmirza, "A Criticism of Position Control of the Inverted Pendulum with Biased Angle Measurements Using Double-Loop PID," in *2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, 2020, pp. 1-5.
- [26] A. Girard and S. Martin, "Synthesis for constrained nonlinear systems using hybridization and robust controllers on simplices," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Article vol. 57, no. 4, pp. 1046-1051, 2012, Art. no. 6024442.
- [27] T. Takahashi, K. Furuta, S. Hatakeyama, S. Suzuki, and A. Sugiki, "SWING-UP CONTROL OF INVERTED PENDULUM BY PERIODIC INPUT," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 35, no. 1, pp. 283-286, 2002.
- [28] T. Heinz, J. Oehlerking, and M. Woehrl, "Benchmark: Reachability on a model with holes," in *1st and 2nd International Workshop on Applied verification for Continuous and Hybrid Systems (ARCH)*, 2015, pp. 31-36.
- [29] F. Immler et al., "Arch-comp19 category report: Continuous and hybrid systems with nonlinear dynamics," in *6th International Workshop on Applied Verification for Continuous and Hybrid systems (ARCH)*, 2019, vol. 61, pp. 41-61.
- [30] P. J. Cruz, M. Oishi, and R. Fierro, "Lift of a cable-suspended load by a quadrotor: A hybrid system approach," in *American Control Conference (ACC)*, 2015, pp. 1887-1892.
- [31] P. J. Cruz and R. Fierro, "Cable-suspended load lifting by a quadrotor UAV: hybrid model, trajectory generation, and control," (in English), *Autonomous Robots*, Article vol. 41, no. 8, pp. 1629-1643, 2017.
- [32] L. Parolini, S. Schuler, and A. Anta, "Benchmark problem: an air brake model for trains," in *1st and 2nd International Workshop on Applied verification for Continuous and Hybrid Systems (ARCH)*, 2015, pp. 43-48.
- [33] K. Hariprasad and S. Bhartiya, "A computationally efficient robust tube based MPC for linear switched systems," *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, vol. 19, pp. 60-76, 2016.
- [34] B. Heiming and J. Lunze, "Definition of the three-tank benchmark problem for controller reconfiguration," in *European Control Conference (ECC)*, 1999, pp. 4030-4034, 1999.
- [35] K. H. Johansson and J. L. R. Nunes, "A multivariable laboratory process with an adjustable zero," in *Proceedings of the 1998 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.98CH36207)*, 1998, vol. 4, pp. 2045-2049 vol.4.
- Boost Converter via Hybrid Control," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 62, no. 4, pp. 1052-1061, 2015.
- [13] O. A. Beg, A. Davoudi, and T. T. Johnson, "Reachability Analysis of Transformer-Isolated DC-DC Converters (Benchmark Proposal)," in *4th International Workshop on Applied Verification for Continuous and Hybrid Systems Workshop (ARCH)*, 2017.
- [14] A. Fehnker and F. Ivančić, "Benchmarks for hybrid systems verification," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* vol. 2993, R. Alur and G. J. Pappas, Eds., ed: Springer Verlag, 2004, pp. 326-341.
- [15] J. P. Maschuw, G. C. Keßler, and D. Abel, "LMI-based control of vehicle platoons for robust longitudinal guidance," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 41, no. 2, pp. 12111-12116, 2008.
- [16] I. B. Makhlof, J. P. Maschuw, P. Hänsch, H. Diab, S. Kowalewski, and D. Abel, "Safety Verification of a Cooperative Vehicle Platoon with Uncertain Inputs Using Zonotopes*," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 9769-9774, 2011.
- [17] I. B. Makhlof, H. Diab, and S. Kowalewski, "Safety Verification of a Controlled Cooperative Platoon Under Loss of Communication Using Zonotopes," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 45, no. 9, pp. 333-338, 2012.
- [18] I. B. Makhlof and S. Kowalewski, "Networked Cooperative Platoon of Vehicles for Testing Methods and Verification Tools," in *1st and 2nd International Workshop on Applied verification for Continuous and Hybrid Systems (ARCH)*, 2014, pp. 37-42.
- [19] D. Corona and B. De Schutter, "Adaptive cruise control for a SMART car: A comparison benchmark for MPC-PWA control methods," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 365-372, 2008.
- [20] D. Corona and B. De Schutter, "ADAPTIVE CRUISE CONTROLLER DESIGN: A COMPARATIVE ASSESSMENT FOR PWA SYSTEMS," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 39, no. 5, pp. 253-258, 2006.
- [21] H. Chen, S. Mitra, and G. Tian, "Motor-Transmission Drive System: a Benchmark Example for Safety Verification," in *1st and 2nd International Workshop on Applied Verification for Continuous and Hybrid Systems (ARCH)*, 2014, pp. 9-18.
- [22] H. Chen and S. Mitra, "Synthesis and verification of motor-transmission shift controller for electric vehicles," in *International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS)*, 2014, pp. 25-35.
- [23] D. M. Lopez et al., "Arch-comp19 category report: Artificial intelligence / neural network control systems (ainncs) for continuous and hybrid systems plants," in *6th International Workshop on Applied Verification for*

- [36] B. Schürmann, R. Vignali, M. Prandini, and M. Althoff, "Set-based control for disturbed piecewise affine systems with state and actuation constraints," *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, vol. 36, p. 100826, 2020.
- [37] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach 6th Edition (SI Units)*. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2007.
- [38] L. F. S. Larsen, R. Izadi-Zamanabadi, and R. Wisniewski, "Supermarket refrigeration system - Benchmark for hybrid system control," in *9th European Control Conference (ECC)*, 2007, pp. 113-120: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [39] N. Lawrence Ricker, "Predictive hybrid control of the supermarket refrigeration benchmark process," (in English), *Control Engineering Practice*, Article vol. 18, no. 6, pp. 608-617, 2010.
- [40] S. C. Sonntag, A. Devanathan, S. Engell, and O. Stursberg, "Hybrid nonlinear model-predictive control of a supermarket refrigeration system," in *2007 IEEE International Conference on Control Applications*, 2007, pp. 1432-1437: IEEE.
- [41] O. Beg, A. Davoudi, and T. T. J. E. S. i. C. Johnson, "Charge Pump Phase-Locked Loops and Full Wave Rectifiers for Reachability Analysis," in *3rd International Workshop on Applied Verification for Continuous and Hybrid Systems (ARCH)*, 2017, vol. 43, pp. 27-35.
- [42] M. Althoff, S. Yaldiz, A. Rajhans, X. Li, B. H. Krogh, and L. Pileggi, "Formal verification of phase-locked loops using reachability analysis and continuization," in *IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD)*, 2011, pp. 659-666.
- [43] A. Balluchi, L. Benvenuti, M. D. Di Benedetto, T. Villa, and A. L. Sangiovanni-Vincentelli, "Idle speed control - a benchmark for hybrid system research," in *Analysis and Design of Hybrid Systems 2006*: Elsevier Ltd, 2006, pp. 259-264.



COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)