

Identification of Dynamic Model for an Active Boring Bar

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Fallah M.¹ PhD,

Moetakef-Imani B.^{*1} PhD

How to cite this article

Fallah M, Moetakef-Imani B. Identification of Dynamic Model for an Active Boring Bar. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8):1917-1928.

ABSTRACT

In this paper, a novel dynamic model is proposed for an actively damped boring bar equipped with electromagnetic actuator. The dynamic models of actuator and boring bar are obtained by using the suggested systematic identification approach, which is based upon the fundamental tools and techniques of system identification theory. The electro-mechanical system or the forward path is consisted of 3 basic components, i.e. linear power amplifier, electrodynamic shaker, and boring bar structure. In this paper, the dynamic models of forward path's sub-systems are simultaneously identified. The component-based identification approach has led to a remarkable finding about the source of nonlinearity in the dynamic model of forward path. According to the presented experimental observations, it has been concluded that electromagnetic actuator can be modeled as a linear dynamic system, while the boring bar structure exhibits nonlinear behavior; since the prediction accuracy of boring bar dynamic model is drastically reduced by changing the amplitude of excitation. As a result, a new parameter varying dynamic model is presented for describing the dynamic behavior of forward path in terms of both frequency and excitation level. The proposed dynamic model has a predefined representation with the least possible mathematical order. It can anticipate the time domain response of forward path due to chirp excitation with 88% accuracy. In addition, during the validation stage, the proposed model forecasts the dynamic response of system due to Gaussian white noise excitation with remarkable accuracy. Moreover, the dynamic model of electromagnetic actuator can predict the dynamic force signature of actuator with 85% accuracy.

Keywords System Identification; Dynamic Model; Active Boring Bar; Electromagnetic Actuator; Nonlinear Dynamics

¹Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Azadi Square, Mashhad, Khorasan Razavi Province, Iran.
Postal Code: 9177948974
Phone: +98 (51) 38805089
Fax: +98 (51) 38807185
imani@um.ac.ir

Article History

Received: October 09, 2018

Accepted: January 26, 2019

ePublished: August 12, 2019

CITATION LINKS

[1] Generalized dynamic model of metal cutting operations [2] Dynamics of boring processes: Part III-time domain modeling [3] Dynamic simulation of boring process [4] Identification of dynamic properties of boring bar vibrations in a continuous boring operation [5] Updating boring bar's dynamic model using particle swarm optimization [6] Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning [7] A tuned holder for increased boring bar dynamic stiffness [8] Analysis, modeling and simulation of machine tool parts dynamics for active control of tool vibration [9] Analytical prediction of stability lobes for passively damped boring bars [10] A novel magnetic actuator design for active damping of machining tools [11] System identification: Theory for the user [12] Analysis of dynamic properties of boring bars concerning different clamping conditions [13] Chatter vibration control for stability improvement in deep internal turning

شناسایی مدل دینامیکی یک ابزار داخل‌تراش میراشده فعال

محسن فلاح PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

بهنام معتکف‌ایمانی * PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

در این مقاله، یک مدل دینامیکی کارآمد برای ابزار داخل‌تراش میراشده مجهز به عملگر الکترومغناطیس ارائه شده است. مدل‌های دینامیکی عملگر و ابزار با بهره‌گیری از فرآیند شناسایی نظام‌مند ارائه شده در این مقاله به دست آمده‌اند، که مبتنی بر بهره‌گیری از ابزارها و روش‌های بنیادین محبت شناسایی سیستم است. سیستم الکترومکانیکی یا مسیر پیشرو، از سه بخش اصلی تشکیل شده که شامل تقویت‌کننده توان خطی، شیکر الکترومکانیکی و سازه ابزار داخل‌تراش است. در این مقاله، ابتدا مدل دینامیکی هر یک از زیرسیستم‌های تشکیل‌دهنده مسیر پیشرو شناسایی شده‌اند. بهره‌گیری از روش شناسایی جزء به جزء، باعث دستیابی به درک قابل‌توجهی پیرامون منشا رفتار غیرخطی در مدل دینامیکی مسیر پیشرو می‌شود. براساس مشاهدات تجربی ارائه شده، می‌توان نتیجه گرفت که عملگر الکترومغناطیس به‌صورت یک سیستم دینامیکی خطی رفتار می‌کند، اما در مقابل سازه ابزار داخل‌تراش رفتار غیرخطی از خود بروز می‌دهد؛ زیرا با تغییر دامنه تحریک ورودی، دقت تخمین مدل دینامیکی شناسایی شده برای ابزار داخل‌تراش به‌میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. در نتیجه برای توصیف رفتار دینامیکی مسیر پیشرو برحسب فرکانس و شدت تحریک ورودی، در این مقاله یک مدل دینامیکی پارامتر متغیر ارائه شده است. این مدل دارای ساختار معلوم و پایین‌ترین مرتبه ریاضی ممکن است. مدل دینامیکی ارائه شده می‌تواند پاسخ حوزه زمان مسیر پیشرو به تحریک ورودی چرپ را با ۸۸٪ دقت تخمین بزند. همچنین این مدل در مرحله اعتبارسنجی پاسخ حوزه زمان سیستم به تحریک نویز سفید گوسی را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌نماید. به‌علاوه مدل دینامیکی عملگر الکترومغناطیس، می‌تواند سیگنال نیروی دینامیکی عملگر را با دقت بسیار خوب ۸۵٪ تخمین بزند.

کلیدواژه‌ها: شناسایی سیستم، مدل دینامیکی، ابزار داخل‌تراش فعال، عملگر الکترومغناطیس، دینامیک غیرخطی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۷/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶

*نویسنده مسئول: imani@um.ac.ir

۱- مقدمه

توسعه مدل‌های نرم‌افزاری کارآمد برای شبیه‌سازی دینامیکی نیروهای برش، ارتعاشات ابزار و تخمین آستانه پایداری در فرآیندهای ماشین‌کاری، اعم از تراشکاری یا فرزکاری، نیازمند لحاظ کردن اثرات دینامیک ابزار برشی است [1]. در اکثر تحقیقات گذشته، از روش‌های تحلیلی، تجربی یا آماری برای توصیف رفتار دینامیکی ابزارهای داخل‌تراش استفاده شده، که در ادامه به نمونه‌ای از این مقالات اشاره شده است:

در برخی از تحقیقات، از روش تحلیل مودال تجربی [2] یا تئوری تیر اوپلر-برنولی [3] برای تخمین دینامیک سازه‌ای ابزار برشی استفاده شده است. این مدل‌های نرم‌افزاری با هدف شبیه‌سازی واقع‌گرایانه دینامیک برش و تخمین ارتعاشات ابزار هنگام رخداد ناپایداری دینامیکی لرزه (Chatter) در فرآیند تراشکاری داخلی توسعه یافته‌اند.

در پژوهش‌های نادر و همکاران [4] اشاره شده که بهره‌گیری از مدل تیر اوپلر-برنولی یک سرگردار با شرایط تکیه‌گاهی ایده‌آل، به تخمین بالادستی از فرکانس‌های طبیعی ابزار داخل‌تراش منجر می‌شود زیرا

در تئوری تیر اوپلر-برنولی، از اثرات تغییرشکل‌های برشی و اینرسی دورانی صرف نظر می‌شود. همچنین در شرایط واقعی، معمولاً انتهای ابزار برشی در داخل یک تکیه‌گاه استوانه‌ای با جرم محدود، توسط پیچ‌های مهاربند مقید می‌شود. بنابراین، به‌منظور شبیه‌سازی واقع‌گرایانه دینامیک ابزار داخل‌تراش، می‌توان آن را به‌صورت یک تیر اوپلر-برنولی با تکیه‌گاه دارای سفتی محدود، شامل فنرهای خطی و پیچشی، مدل‌سازی کرد [5]. با بهره‌گیری از نتایج حاصل از آزمون مودال تجربی و یک روش بهینه‌سازی کارآمد، می‌توان پارامترهای مجهول تکیه‌گاهی در مدل تحلیلی ابزار را به‌گونه‌ای انتخاب نمود که پاسخ فرکانسی ابزار داخل‌تراش واقعی و مدل ریاضی بر هم منطبق شوند.

در مطالعه سورتینو و همکاران [6]، یک مدل آماری برای تخمین نسبت طول به قطر بحرانی ابزار برشی در فرآیند تراشکاری داخلی ارائه شده است. نسبت طول به قطر بحرانی ابزار، بیان‌گر نسبت ابعادی بیشینه‌ای است که در مقادیر کمتر از آن، فرآیند تراشکاری داخلی برای اکثر شرایط برشی پایدار باشد. علت اصلی بروز ناپایداری لرزه در نسبت‌های طول به قطر بزرگ‌تر از نسبت بحرانی، کاهش چشمگیر سفتی دینامیکی ابزار برشی در مود ارتعاشی اصلی آن است. این مدل آماری، دربرگیرنده فاکتورهای مربوط به جنس ابزار داخل‌تراش (مدول الاستیسیته و میرایی)، هندسه ابزار (قطر ابزار)، جنس قطعه‌کار (ثابت برشی ماده) و هندسه لبه‌برنده (شعاع نوک) است. علاوه بر پارامترهای فوق، باید توجه داشت که پاسخ فرکانسی ابزار داخل‌تراش تحت تأثیر مستقیم مشخصات دینامیکی تکیه‌گاه آن قرار دارد. در تحقیق هوک و همکاران [7]، با استفاده از روش تنظیم جرمی، فرکانس طبیعی تکیه‌گاه ابزار تقریباً بر فرکانس اصلی ابزار برشی منطبق شده است. در این شرایط، تکیه‌گاه ابزار مشابه یک جاذب دینامیکی ارتعاش عمل کرده و با تغییردادن شکل منحنی پاسخ فرکانسی ابزار، موجب ارتقای سفتی دینامیکی و کاهش دامنه ارتعاشات آن می‌شود.

برای شبیه‌سازی و تحلیل رفتار دینامیکی فرآیندهای ماشین‌کاری، با بهره‌گیری از ابزارهای برشی دارای سیستم کنترل غیرفعال/فعال ارتعاشات، ارائه مدل‌های ریاضی واقعی و دقیق به‌منظور توصیف دینامیک مجموعه عملگر-ابزار بسیار ضروری است. با دراختیار داشتن مدل دینامیکی ابزار برشی میراشده و با بهره‌گیری از روابط حاکم بر دینامیک ماشین‌کاری، می‌توان رفتار ارتعاشی ابزار را حین فرآیند براده‌برداری تخمین زد. در مطالعه‌ای دیگر [8] از مدل اجزای محدود سه‌بعدی برای توصیف دینامیک ابزار داخل‌تراش دارای عملگر پیژوالکتریک استفاده شده است. با استفاده از مدل اجزای محدود ارائه شده، مشخصات دینامیکی ابزار داخل‌تراش میراشده فعال، شامل فرکانس‌های طبیعی، شکل‌مودهای ارتعاشی و تابع تبدیل بین ولتاژ اعمالی به عملگر و شتاب خروجی از ابزار تخمین زده شده است. سپس، نتایج مدل ارائه شده با نتایج حاصل از مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.

با اضافه‌کردن دینامیک عملگر غیرفعال به مدل دینامیکی ابزار برشی انعطاف‌پذیر، یا افزودن دینامیک بلوک کنترلر به مدل ابزار برشی دارای عملگر فعال، می‌توان پایداری سیستم برشی حلقه‌بسته را تخمین زد. با هدف ارتقای پایداری فرآیند برش (بیشینه‌کردن عمق برش متناظر با آستانه پایداری)، می‌توان پارامترهای عملگر غیرفعال را (مانند میراگر جرمی تنظیم‌شده)، به‌صورت بهینه تنظیم نمود [9]. همچنین، با هدف کمینه‌کردن دامنه ارتعاشات ابزار برشی، از طریق تحلیل کارایی و پایداری سیستم کنترل حلقه‌بسته در حوزه‌های زمان و فرکانس، می‌توان مقدار مطلوب برای پارامترهای

سیستم را به زبان ریاضی بیان نمود. در فرآیند شناسایی، به‌صورت مستقیم از سیگنال‌های ورودی و خروجی سیستم، که در آزمایش‌های تجربی اندازه‌گیری شده‌اند، استفاده می‌شود و در نهایت با تحلیل داده‌های حاصل از مشاهدات تجربی، یک مدل ریاضی کارآمد توسعه می‌یابد. در دیدگاه عمل‌گرایانه، به‌منظور انتخاب مدل ریاضی مناسب برای یک سیستم دینامیکی، به کارآمد بودن مدل بیشتر از واقعی بودن آن اهمیت داده می‌شود. زیرا تمام جنبه‌های یک سیستم فیزیکی واقعی را نمی‌توان دقیقاً با توصیف ریاضی همان سیستم انطباق داد^[1].

در آزمون‌های شناسایی سیستم، می‌توان انواع داده‌های زمانی مشاهده‌پذیر را در سه دسته سیگنال‌های ورودی u ، خروجی y و اغتشاش d طبقه‌بندی کرد. سیگنال‌های خروجی، شامل داده‌های قابل‌اندازه‌گیری مورد نیاز برای توصیف رفتار سیستم هستند. سیگنال‌های ورودی، شامل تحریک‌های ورودی مستقل از هم بوده که توسط مشاهده‌گر قابل اندازه‌گیری هستند. سایر سیگنال‌هایی که به‌صورت ناخواسته از محیط پیرامون به سیستم دینامیکی وارد می‌شوند، به‌عنوان اغتشاش شناخته شده و در دو دسته اغتشاشات قابل اندازه‌گیری w و اغتشاشات قابل مشاهده v قرار می‌گیرند. مقدار سیگنال خروجی از سیستم در هر لحظه، به مقدار سیگنال تحریک ورودی در همان لحظه و لحظات گذشته بستگی دارد و معمولاً از بررسی اثرات اغتشاش بر خروجی سیستم صرف نظر می‌شود.

هدف از شناسایی سیستم، تعیین مدل دینامیکی مطلوب برای توصیف رابطه ریاضی بین متغیرهای وابسته y و متغیرهای مستقل u در سیستم است. معمولاً با توجه به تجربه گذشته مشاهده‌گر درباره سیستم و هدف وی از طراحی آزمون‌های شناسایی، تعدادی از (یا همه) سیگنال‌های ورودی و خروجی سیستم، به‌عنوان سیگنال‌های مطلوب برای مشاهده و اندازه‌گیری انتخاب می‌شوند. برای مشاهده سیگنال‌های ورودی و خروجی مطلوب باید از سنسورهای با نوع مناسب و دارای بیشترین نسبت سیگنال به نویز بهره برد، تا دقت و صحت اندازه‌گیری در بالاترین سطح ممکن باشد^[1].

۲-۱- بستر آزمایشگاهی ابزار داخل‌تراش با عملگر الکترومغناطیس

در شکل ۱، مجموعه مونتاژی شیکر الکترومغناطیس به‌همراه ابزار داخل‌تراش نشان داده شده است. باید توجه داشت که عملگر الکترومغناطیس از دو بخش شیکر الکترومغناطیس و تقویت‌کننده توان خطی تشکیل می‌شود. تقویت‌کننده توان خطی، که سیگنال‌های ولتاژ و جریان الکتریکی مورد نیاز برای تحریک شیکر را تامین می‌کند، در شکل ۱ نمایش داده نشده است. هدف از اجرای آزمون‌های شناسایی سیستم، تعیین یک مدل دینامیکی کارآمد برای مجموعه عملگر الکترومغناطیس- ابزار داخل‌تراش یا همان شناسایی تابع تبدیل مسیر پیشرو (Forward Path) است. در حالت کلی، تابع تبدیل مسیر پیشرو شامل دینامیک تمام اجزائی است که، در مسیر انتقال سیگنال ولتاژ تولید شده (توسط کارت اکتساب داده خروجی) تا سیگنال شتاب ثبت شده (توسط کارت اکتساب داده ورودی) قرار دارند. این اجزا شامل مبدل دیجیتالی به آنالوگ، تقویت‌کننده توان خطی، شیکر الکترومغناطیس، سازه مکانیکی ابزار داخل‌تراش حدفاصل محل نصب شیکر تا سنسور، شتاب‌سنج و مبدل آنالوگ به دیجیتالی هستند.

برای شناسایی دینامیک مسیر پیشرو، می‌توان از روش شناسایی یکپارچه استفاده کرد. در این روش، مجموعه شیکر- ابزار- سنسور، به‌عنوان یک سیستم دینامیکی واحد فرض می‌شود. ابتدا تابع

الگوریتم کنترلی را (مانند ضرایب بهره در کنترلر تناسبی- انتگرال‌گیر- مشتقی) انتخاب نمود^[10].

در این مقاله، به فرآیند گام‌به‌گام شناسایی توابع تبدیل بیانگر دینامیک ابزار داخل‌تراش میراشده با عملگر الکترومغناطیس اشاره شده است. اگرچه در آزمون‌های شناسایی سیستم، ظاهراً از عملگر الکترومغناطیس به‌عنوان وسیله تحریک‌کننده دینامیک سازه‌ای ابزار استفاده می‌شود، اما در واقع هدف اصلی از کاربرد آن، کنترل فعال ارتعاشات سازه ابزار حین فرآیند تراشکاری داخلی است. بنابراین، مجموعه مونتاژی عملگر الکترومغناطیس- ابزار داخل‌تراش، به‌عنوان بخش تحت کنترل از یک سیستم کنترل فعال ارتعاشات بوده و باید علاوه بر دینامیک ابزار، دینامیک عملگر نیز در تابع تبدیل شناسایی شده برای این سیستم لحاظ شود.

شناسایی توابع تبدیل اجزای مختلف این سیستم، یک گام بسیار ارزشمند در راستای مدل‌سازی دقیق و تحلیل رفتار دینامیکی ابزار داخل‌تراش میراشده است. اگر در آزمون‌های شناسایی سیستم، ساختار، مرتبه مدل دینامیکی و بازه فرکانسی تحریک به‌درستی انتخاب شوند، بدون نیاز به اجرای آزمایش‌های تجربی وقت‌گیر، می‌توان از مدل دینامیکی شناسایی شده برای شبیه‌سازی دقیق رفتار سیستم در حوزه زمان بهره برد. همچنین، فرآیند طراحی و ارزیابی کارایی الگوریتم کنترل فعال ارتعاشات، نیازمند آرایه یک مدل دینامیکی کارآمد برای مجموعه عملگر الکترومغناطیس- ابزار داخل‌تراش است تا با اضافه‌کردن دینامیک بلوک کنترلر به مدل دینامیکی آرایه شده، بتوان رفتار سیستم کنترل حلقه‌بسته را با دقت شبیه‌سازی کرد.

ساختار مقاله آرایه شده به‌صورت زیر است: در بخش دوم مقاله بستر آزمایشگاهی تحقیق، شامل مجموعه مونتاژی عملگر- ابزار و مشخصات سنسورهای به‌کاررفته برای اندازه‌گیری سیگنال‌های ورودی و خروجی سیستم، معرفی شده است. در این بخش، یک الگوریتم نظام‌مند برای شناسایی دینامیک سیستم الکترومکانیکی مورد بحث آرایه شده و شاخص‌های تعیین مدل دینامیکی کارآمد انتخاب شده‌اند. در بخش بعدی، دینامیک هر یک از زیرسیستم‌های تشکیل‌دهنده ابزار داخل‌تراش میراشده، با بهره‌گیری از روش شناسایی جزیه‌جزمی‌سازی شده‌اند. همچنین، خطی یا غیرخطی بودن رفتار زیرسیستم‌های دینامیکی، برحسب دامنه تحریک ورودی، مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. در بخش چهارم مقاله، یک مدل دینامیکی پارامتر متغیر برای تخمین رفتار دینامیکی مجموعه مونتاژی عملگر الکترومغناطیس- ابزار داخل‌تراش پیشنهاد شده است. این مدل دربرگیرنده دینامیک خطی عملگر و دینامیک غیرخطی ابزار است. در ضابطه تابع تبدیل آرایه شده، تغییرات موقعیت قطب‌های غالب سیستم برحسب دامنه تحریک ورودی لحاظ شده‌اند. در بخش پنجم، با انجام آزمون‌های اعتبارسنجی، کارایی و دقت بالای مدل‌های دینامیکی آرایه شده برای عملگر الکترومغناطیس و ابزار داخل‌تراش میراشده تایید شده است. در بخش آخر نیز، نتایج و دستاوردهای این مقاله جمع‌بندی شده‌اند.

۲-۲- آزمون‌های شناسایی سیستم

در مبحث شناسایی سیستم، به‌دنبال ایجاد مدل ریاضی مناسب برای توصیف رفتار یک سیستم دینامیکی، بر پایه داده‌های قابل مشاهده از آن هستیم. این مدل دینامیکی، باید دربرگیرنده روابط مفروض بین سیگنال‌های مشاهده شده از سیستم باشد. به‌کمک مدل دینامیکی، می‌توان روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته

(۱- الف)

$$\bar{V}(t) = \bar{V}_0 \cos(\psi(t) + \varphi_0)$$

(۱- ب)

$$\psi(t) = 2\pi \left(f_0 + \left(\frac{f_i(t_g) - f_0}{t_g} \right) t \right)$$

که $\bar{V}_0$ دامنه ثابت سیگنال، φ_0 مقدار اولیه فاز و $\psi(t)$ عبارت فاز متغیر سیگنال در هر لحظه است. در آزمون‌های شناسایی، فرکانس سیگنال هارمونیک کسینوسی در مدت زمان t_g ثانیه، به صورت خطی بین دو مقدار f_0 و $f_i(t_g)$ تغییر می‌کند. پارامترهای ولتاژ تحریک چرپ در جدول ۱ ارائه شده‌اند. علت بهره‌گیری از تحریک چرپ در مقایسه با تحریک ضربه، قابل تنظیم بودن پارامترهای مقدار دامنه و بازه فرکانسی سیگنال تحریک و همچنین تکرارپذیری و دقت بالای آن است. برای افزایش شدت تحریک کافی است مقدار دامنه سیگنال تحریک چرپ را افزایش داد، و مجدداً این سیگنال تحریک را در بازه فرکانسی ثابت به سیستم اعمال نمود.

جدول ۱) پارامترهای سیگنال تحریک چرپ

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
دامنه ولتاژ	$\bar{V}_0$	[V]	۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲
فرکانس اولیه	f_0	[Hz]	۵۰
فرکانس هدف	$f_i(t_g)$	[Hz]	۱۲۵۰
زمان هدف	t_g	[s]	۴۰

برای تعیین بازه فرکانسی دربرگیرنده فرکانس‌های طبیعی اول و دوم ابزار داخل‌تراش، ابتدا تعدادی آزمون مودال تجربی انجام شده است. سپس، آزمون‌های شناسایی در بازه فرکانسی ۱۲۵۰-۵۰ هرتز اجرا شده‌اند. مشاهدات تجربی اولیه نشان می‌دهند که در بازه فرکانسی زیر ۲۰۰۰ هرتز، علاوه بر دو مود ارتعاشی مربوط به ابزار داخل‌تراش، یک مود سازه‌ای دیگر مربوط به شیکر الکتروپنیامیک وجود دارد (بالاتر از فرکانس دوم ابزار). برای جلوگیری از آسیب‌رسیدن به شیکر، حد بالای فرکانس سیگنال ورودی، براساس فرکانس طبیعی دوم ابزار تعیین شده است. آزمون‌های شناسایی در چهار دامنه تحریک مختلف در بازه ۰/۲۵ ولت تا ۲ ولت اجرا شده‌اند تا وجود یا عدم وجود رفتار غیرخطی در دینامیک هر یک از زیرسیستم‌های مورد شناسایی بررسی شود.

۲-۳- انتخاب سیگنال خروجی

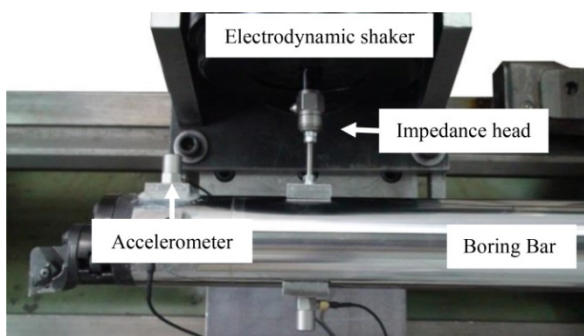
انتخاب سیگنال خروجی از سیستم، به دیدگاه مشاهده‌گر برای شناسایی دینامیک مجموعه عملگر الکترومغناطیس- ابزار داخل‌تراش بستگی دارد. در روش شناسایی یکپارچه، سیگنال شتاب خروجی از شتاب‌سنج نصب‌شده در نوک ابزار، به عنوان سیگنال خروجی سیستم لحاظ می‌شود. اما در روش شناسایی جزیه‌جز، سیگنال خروجی براساس نوع زیرسیستم مورد بررسی انتخاب می‌شود. در جدول ۲، مشخصات سنسورهای به‌کاررفته برای اندازه‌گیری سیگنال خروجی در هر یک از اجزای بستر آزمایشگاهی ارائه شده‌اند. در پشت دستگاه تقویت‌کننده خطی مدل LA-200، درگاهی برای اندازه‌گیری سیگنال جریان ارسالی به شیکر الکتروپنیامیک لحاظ شده است. با اندازه‌گیری این کمیت، می‌توان تابع تبدیل بین سیگنال جریان I خروجی از تقویت‌کننده توان خطی و سیگنال ولتاژ $\bar{V}$ تولیدشده توسط کارت داده‌برداری را تعیین کرد.

پاسخ فرکانسی تجربی شتاب خروجی (از سنسور نصب‌شده روی نوک ابزار) به ولتاژ تحریک ورودی (به تقویت‌کننده توان خطی) اندازه‌گیری شده، و سپس تابع تبدیل ریاضی متناظر با آن محاسبه می‌شود.

طی فرآیند شناسایی سیستم، ممکن است هم عملگر الکترومغناطیس و هم ابزار داخل‌تراش رفتار دینامیکی غیرخطی از خود بروز دهند. منشا این رفتار غیرخطی باید به درستی شناسایی شده و حتی‌الامکان در ضابطه تابع تبدیل مسیر پیشرو لحاظ شود. به علت پیچیدگی‌های ذاتی سیستم الکترومکانیکی مورد بحث، در صورت بهره‌گیری از روش شناسایی یکپارچه، تشخیص علت و سرچشمه رفتار غیرخطی در دینامیک مسیر پیشرو چندان آسان نخواهد بود. بنابراین به منظور کسب درک دقیق درباره رفتار دینامیکی عملگر و ابزار، می‌توان مسیر پیشرو را به چند زیرسیستم مجزا تقسیم نموده، و سپس دینامیک هر بخش را به صورت جداگانه شناسایی نمود [11].

مطابق شکل ۲، مجموعه دینامیکی عملگر الکترومغناطیس- ابزار داخل‌تراش به سه زیرسیستم مجزا، شامل تقویت‌کننده توان خطی، شیکر الکتروپنیامیک و ابزار داخل‌تراش قابل تفکیک است. در فرآیند شناسایی جزیه‌جز، سیگنال‌های خروجی از هر بخش به عنوان سیگنال ورودی برای بخش بعدی در نظر گرفته می‌شود. باید توجه داشت که همه اجزای مورد بررسی، به صورت سیستم‌های دینامیکی تک‌ورودی-تک‌خروجی (SISO) بوده و حین فرآیند شناسایی، باید سیگنال‌های ورودی و خروجی هر یک از این زیرسیستم‌ها، به صورت مجزا و همزمان با هم اندازه‌گیری شوند.

مطابق شکل ۱، قطر ابزار داخل‌تراش برابر ۶۰ میلی‌متر و طول آویز آن برابر ۴۸۰ میلی‌متر است (نسبت طول به قطر ۸). همچنین جنس بدنه ابزار از فولاد است. سنسور شتاب‌سنج در فاصله ۳۹۰ میلی‌متری از تکیه‌گاه ابزار نصب و شیکر در فاصله ۳۰۰ میلی‌متر از تکیه‌گاه به بدنه ابزار متصل شده است. فرکانس داده‌برداری از سیگنال‌های ورودی و خروجی برابر ۲۰ کیلوهرتز است.



شکل ۱) مجموعه مونتاژی شیکر الکتروپنیامیک- ابزار داخل‌تراش

۲-۲- مشخصات سیگنال تحریک ورودی

سیگنال ولتاژ تولیدشده توسط کارت داده‌برداری، به عنوان تنها سیگنال ورودی به سیستم است که قابلیت مشاهده‌پذیری و کنترل‌پذیری دارد. برای تحریک سیستم از سیگنال چرپ (Chirp) استفاده می‌شود، که با بهره‌گیری از آن می‌توان دینامیک سیستم را به صورت کاملاً یکنواخت در بازه فرکانسی دلخواه تحریک نمود. ضابطه تحریک ورودی، به صورت یک سیگنال هارمونیک کسینوسی با دامنه ثابت و فرکانس متغیر برحسب زمان است. تغییرات فرکانس تحریک برحسب زمان به صورت خطی است. ضابطه ریاضی سیگنال ولتاژ تحریک به صورت زیر است:

فرکانسی تجربی $h(s)$ ، باید بتوان خطای بین مدل ریاضی و داده‌های تجربی را کمینه کرد. تا در نهایت، مقادیر ضرایب بهینه $\{b, a\}$ برای چندجمله‌ای‌های صورت و مخرج تعیین شوند:

(۲)

$$H(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{b_1 s^n + b_2 s^{n-1} + \dots + b_{n+1}}{a_1 s^d + a_2 s^{d-1} + \dots + a_{d+1}}$$

خطای بین مدل ریاضی و نقاط واقع بر منحنی تجربی، به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود:

(۳)

$$E = \sum_{k=1}^m |h(k)D(\omega(k)) - N(\omega(k))|^2$$

که $D(\omega(k))$ و $N(\omega(k))$ تبدیل فوریه چندجمله‌ای‌های مخرج و صورت تابع تبدیل ریاضی در $\omega(k)$ بوده و $h(k)$ بیانگر مقدار تجربی منحنی پاسخ فرکانسی سیستم در $\omega(k)$ است. پس از محاسبه ضرایب مجهول تابع تبدیل، می‌توان دقت مدل دینامیکی شناسایی‌شده را برای تخمین نتایج آزمایشگاهی در حوزه زمان و فرکانس ارزیابی کرد. برای این منظور، باید تعریفی از معیار شایستگی ارائه داد.

برای محاسبه دقت تخمین تابع تبدیل $H(s)$ در حوزه فرکانس یا η_s ، از معیار میانگین مربعات خطای نرمال شده استفاده می‌شود:

(۴)

$$\eta_s = 100 \left(1 - \frac{\|h(s) - H(s)\|^2}{\|h(s) - \text{mean}(h(s))\|^2} \right)$$

همچنین، برای محاسبه دقت تخمین تابع تبدیل در حوزه زمان یا η_t ، به‌طور مشابه از معیار میانگین مربعات خطای نرمال شده استفاده می‌شود:

(۵)

$$\eta_t = 100 \left(1 - \frac{\|y(t) - \hat{y}(t)\|^2}{\|y(t) - \text{mean}(y(t))\|^2} \right)$$

که $y(t)$ سیگنال خروجی اندازه‌گیری‌شده (ناشی از تحریک ورودی به سیستم) بوده و $\hat{y}(t)$ تخمین پاسخ خروجی سیستم با بهره‌گیری از تابع تبدیل ریاضی $H(s)$ است. در روابط (۴) و (۵)، $\|\cdot\|^2$ بیانگر نرم ۲ سیگنال است.

باید توجه داشت که در فرآیند شناسایی سیستم، معمولاً تمام پارامترهای ورودی و خروجی تأثیرگذار بر پاسخ سیستم اندازه‌گیری نمی‌شوند. همچنین، اکثر سیستم‌های واقعی دارای رفتارهای غیرخطی بوده و بنابراین ایده خطی بودن رفتار سیستم، صرفاً یک فرض ایده‌آل ریاضی است. بنابراین در عمل نمی‌توان انتظار داشت که دقت تخمین مدل دینامیکی شناسایی‌شده در حالت ایده‌آل برابر ۱۰۰٪ باشد. از طرف دیگر، هدف از بررسی عملکرد سیستم در آزمون‌های شناسایی و اعتبارسنجی، ارائه یک مدل دینامیکی کارآمد با دقت تخمین کافی، به‌منظور توصیف رفتار سیستم واقعی مورد نظر است. بنابراین با توجه به معیارهای پیشنهادی برای انتخاب مدل دینامیکی، حداقل میزان دقت پاسخ سیستم در آزمون‌های شناسایی و اعتبارسنجی، به‌ترتیب برابر ۸۰٪ و ۶۰٪

جدول ۲) سنسورهای به‌کاررفته در آزمون‌های شناسایی سیستم

نوع سنسور	کمیت	دامنه اندازه‌گیری	ضریب حساسیت
شتاب‌سنج	A	۵۰ [g]	۹۸/۱ [mV/g]
امپدانس‌هد	F	۱۰۰۰ [N]	۴/۲۶ [mV/N]
آمپرسنج	I	۱۷ [A]	۳۰ [mV/A]

سنسور امپدانس‌هد، سیگنال نیروی خروجی از عملکرد را اندازه‌گیری می‌کند و به کمک آن می‌توان تابع تبدیل بین سیگنال نیروی F خروجی از عملکرد و سیگنال جریان I ورودی به عملکرد را تعیین کرد. امپدانس‌هد مورد استفاده از مدل TL504AF0 بوده و ساخت شرکت تِن‌لی (TENLEE) است. این سنسور قابلیت اندازه‌گیری نیرو در محدوده فرکانسی کمتر از ۵۵ کیلوهرتز را داراست. مطابق اطلاعات ارائه‌شده توسط شرکت سازنده، میزان غیرخطی بودن سنسور در سرتاسر بازه اندازه‌گیری آن کمتر از ۱٪ است.

برای اندازه‌گیری سیگنال شتاب خروجی نوک ابزار، از شتاب‌سنج مدل TL122A100 ساخت شرکت تِن‌لی استفاده شد. تا بتوان تابع تبدیل بین سیگنال شتاب A خروجی از ابزار و سیگنال نیروی F ورودی به ابزار را تعیین کرد. براساس اطلاعات ارائه‌شده توسط شرکت سازنده، پاسخ فرکانسی شتاب‌سنج در محدوده فرکانسی زیر ۵۰۰۰۰ هرتز کاملاً خطی است. به‌کمک آچار گشتاورسنج، تمام پیچ‌های اتصال تکیه‌گاه ابزار با گشتاور ۵۰ نیوتن‌متر بسته شده‌اند. برای کاهش اثرات نویزهای محیطی و اطمینان از تکرارپذیری نتایج، با ثابت نگاه‌داشتن سایر شرایط بستر آزمایشگاهی، آزمون‌های شناسایی سیستم هفت مرتبه تکرار و سپس نتایج حاصل از اندازه‌گیری سیگنال‌های ورودی و خروجی میانگین‌گیری شده‌اند.

۴-۲- معیارهای انتخاب مدل دینامیکی کارآمد

انتخاب مدل دینامیکی کارآمد برای هر یک از اجزای سیستم، نیازمند ارزیابی و مقایسه بین همه (یا تعدادی از) مدل‌های ریاضی سیستم است. این موضوع، می‌تواند رابطه مستقیمی با تجربه آزمایشگاهی فرد در حوزه شناسایی سیستم‌های دینامیکی داشته باشد. در این مقاله، ارزیابی و انتخاب نهایی تابع تبدیل معرف دینامیک عملکرد و ابزار، براساس معیارهای پیشنهادی زیر انجام پذیرفته است. این معیارها به‌عنوان شرایط لازم و کافی برای انتخاب تابع تبدیل کارآمد لحاظ شده‌اند:

۱) درجه صورت تابع تبدیل شناسایی‌شده، کوچک‌تر یا مساوی با درجه مخرج تابع تبدیل باشد (تابع تبدیل ممکن یا Feasible باشد).

۲) تابع تبدیل شناسایی‌شده، صفر سمت راست نداشته باشد (تابع تبدیل مجاز یا Admissible باشد).

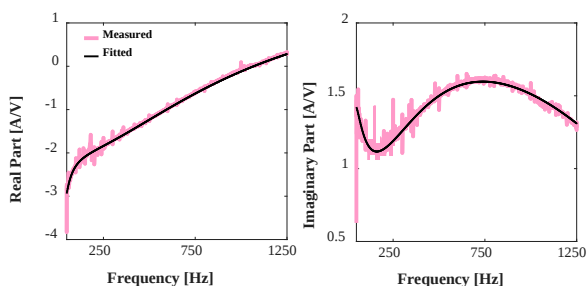
۳) در مرحله شناسایی، تابع تبدیل سیستم باید بتواند داده‌های آزمایشگاهی را در حوزه‌های زمان و فرکانس، با معیار شایستگی (Goodness of fit) بزرگ‌تر یا مساوی ۸۰٪ تخمین بزند.

۴) در مرحله اعتبارسنجی، تابع تبدیل سیستم باید بتواند داده‌های آزمایشگاهی را در حوزه زمان، با معیار شایستگی بزرگ‌تر یا مساوی ۶۰٪ تخمین بزند.

در آزمون‌های شناسایی، با دراختیارداشتن سیگنال‌های ورودی و خروجی بر حسب زمان، می‌توان به‌راحتی تابع پاسخ فرکانسی تجربی سیستم را از تقسیم تبدیل فوریه گسسته سیگنال خروجی، بر تبدیل فوریه گسسته سیگنال ورودی محاسبه نمود. این تابع تبدیل، در بازه فرکانسی تعریف‌شده برای آزمون‌های شناسایی معتبر بوده و بیانگر رفتار دینامیکی سیستم در حوزه فرکانس است. برای انطباق دادن منحنی تابع تبدیل ریاضی $H(s)$ بر منحنی پاسخ

شناسایی شده محاسبه می‌شود:
(۶)

$$\frac{I(s)}{\bar{V}(s)} \Big|_{\text{avg}} = \frac{-2.0646 \times 10^{12}}{(s + 231.3)(s + 5250)(s + 489.6)} \times \frac{1}{(s^2 + 1.444 \times 10^4 s + 1.792 \times 10^8)}$$



نمودار ۱) مقایسه بین منحنی پاسخ فرکانسی تجربی و تابع تبدیل شناسایی شده برای تقویت‌کننده توان خطی

۲-۳- شناسایی تابع تبدیل شیکر الکترودینامیک

سیگنال ورودی به شیکر الکترودینامیک جریان I بوده و سیگنال خروجی از آن نیرو F است. برای تخمین تابع تبدیل نیرو به جریان، تمام مدل‌های ریاضی ممکن مجاز، که دارای حداکثر ۸ صفر و ۸ قطب باشند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. براساس معیارهای انتخاب مدل دینامیکی کارآمد، برای توصیف دینامیک شیکر الکترودینامیک، تابع تبدیل $F(s)/I(s)$ باید دارای چهار صفر و شش قطب باشد. صفر و قطب‌های این تابع تبدیل، نماینده دینامیک اجزای الکترومکانیکی شیکر، به‌همراه اثرات متقابل دینامیک موده‌های سازه‌ای ابزار بر شیکر است. با انجام آزمون‌های شناسایی جداگانه در هر یک از دامنه‌های $\bar{V}_0 = \{0.25, 0.5, 1, 2\}$ ، چهار تابع تبدیل مختلف برای شیکر، با حداقل دقت تخمین $\eta_t = 86/63$ درصد (در حوزه زمان) شناسایی شده‌اند. مقادیر η_t برای هر یک از این توابع تبدیل، در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴) مقادیر دقت تخمین η_t برای توابع تبدیل شیکر الکترودینامیک

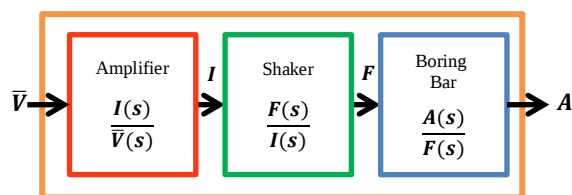
$\bar{V}_0$	$\frac{F}{I} \Big _{\bar{V}_0=0.25}$	$\frac{F}{I} \Big _{\bar{V}_0=0.5}$	$\frac{F}{I} \Big _{\bar{V}_0=1}$	$\frac{F}{I} \Big _{\bar{V}_0=2}$
۰/۲۵	۸۶/۶۳	۸۶/۰۱	۸۴/۶۸	۷۸/۹۰
۰/۵	۸۶/۷۶	۸۶/۸۹	۸۶/۰۹	۸۰/۰۰
۱	۸۵/۷۸	۸۶/۶۴	۸۶/۹۸	۸۱/۱۲
۲	۸۷/۶۱	۸۹/۱۲	۹۰/۹۲	۸۶/۹۵

برای تمامی این توابع تبدیل، تغییرات مقدار η_t برحسب شدت تحریک اندک است. در هر یک از دامنه‌های تحریک، اختلاف دقت تخمین بین توابع تبدیل شناسایی‌شده مختلف، کمتر از $\Delta\eta_t = 7/11$ درصد بوده که قابل صرف‌نظر کردن است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که پاسخ دینامیکی شیکر الکترودینامیک مستقل از شدت جریان ورودی است. عدم وابستگی دقت تخمین تابع تبدیل شناسایی‌شده به دامنه تحریک ورودی، مویده خطی بودن رفتار شیکر الکترودینامیک است. در نمودار ۲، توابع تبدیل تجربی و

لحاظ شده است. همچنین، برای تعیین کمی دقت مدل از معیار میانگین مربعات خطای نرمال‌شده استفاده شد، که یک معیار رایج برای ارزیابی دقت تخمین سیستم‌های دینامیکی است [11].

۳- تخمین جزیه‌ج‌ز مدل دینامیکی مسیر پیشرو

همان‌طور که اشاره شد، مطابق شکل ۲ سیگنال‌های I ، F و A به‌عنوان سیگنال‌های خروجی از زیرسیستم‌های دینامیکی مختلف، در برابر سیگنال تحریک ورودی $\bar{V}$ هستند. بنابراین با انجام یک آزمون شناسایی سیستم، می‌توان به‌صورت همزمان پاسخ دینامیکی تقویت‌کننده، شیکر و ابزار را مشاهده کرد. بر پایه مشاهدات تجربی انجام‌شده و با بهره‌گیری از معیارهای ارائه‌شده در بخش ۲-۴، می‌توان یک مدل ریاضی کارآمد برای تخمین دینامیک مسیر پیشرو ارائه نمود.



شکل ۲ زیرسیستم‌های دینامیکی تشکیل‌دهنده مسیر پیشرو

۳-۱- شناسایی تابع تبدیل تقویت‌کننده توان خطی

سیگنال ورودی به تقویت‌کننده توان خطی ولتاژ $\bar{V}$ بوده و سیگنال خروجی از آن جریان I است. برای تخمین تابع تبدیل جریان به ولتاژ، تمام مدل‌های ریاضی ممکن مجاز، که دارای حداکثر ۸ صفر و ۸ قطب باشند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. براساس معیارهای انتخاب مدل دینامیکی کارآمد، برای توصیف دینامیک تقویت‌کننده توان خطی، تابع تبدیل $I(s)/\bar{V}(s)$ باید دارای یک صفر و چهار قطب باشد. صفر و قطب‌های این تابع تبدیل، نماینده دینامیک سریع مدارهای الکتریکی تقویت‌کننده است. با انجام آزمون‌های شناسایی جداگانه در هر یک از دامنه‌های $\bar{V}_0 = \{0.25, 0.5, 1, 2\}$ ، چهار تابع تبدیل مختلف برای تقویت‌کننده، با حداقل دقت تخمین $\eta_t = 89/70$ درصد (در حوزه زمان) شناسایی شده‌اند. مقادیر η_t برای هر یک از این توابع تبدیل، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳) مقادیر دقت تخمین η_t برای توابع تبدیل تقویت‌کننده توان خطی

$\bar{V}_0$	$\frac{I}{\bar{V}} \Big _{\bar{V}_0=0.25}$	$\frac{I}{\bar{V}} \Big _{\bar{V}_0=0.5}$	$\frac{I}{\bar{V}} \Big _{\bar{V}_0=1}$	$\frac{I}{\bar{V}} \Big _{\bar{V}_0=2}$
۰/۲۵	۸۹/۷۰	۸۹/۶۴	۸۹/۴۳	۹۲/۹۰
۰/۵	۹۰/۰۰	۸۹/۹۶	۸۹/۷۷	۹۳/۴۷
۱	۹۰/۲۲	۹۰/۲۱	۹۰/۰۹	۹۴/۰۷
۲	۸۵/۷۸	۸۵/۸۰	۸۵/۷۶	۹۰/۱۳

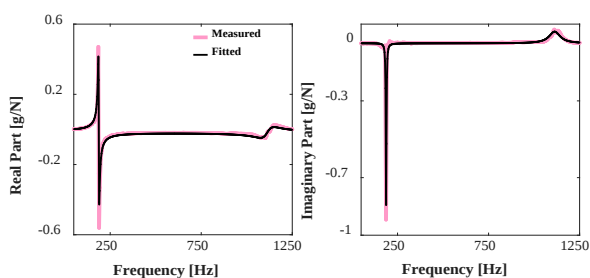
برای تمامی این توابع تبدیل، تغییرات مقدار η_t برحسب شدت تحریک بسیار ناچیز است. در هر یک از دامنه‌های تحریک، اختلاف دقت تخمین بین توابع تبدیل شناسایی‌شده مختلف، کمتر از $\Delta\eta_t = 4/25$ درصد بوده که می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که پاسخ دینامیکی تقویت‌کننده توان خطی مستقل از شدت ولتاژ ورودی است. عدم وابستگی دقت تخمین تابع تبدیل شناسایی‌شده به دامنه تحریک ورودی، بیانگر خطی بودن رفتار تقویت‌کننده توان خطی است. توابع تبدیل تجربی و ریاضی تقویت‌کننده، در نمودار ۱ با هم مقایسه شده‌اند. در نهایت، تابع تبدیل تقویت‌کننده با میانگین‌گیری از چهار تابع تبدیل

موثر بر دینامیک ابزار در صفحه مختلط جابه‌جا می‌شود. در نتیجه، دقت تخمین تابع تبدیل با تغییر شدت تحریک ورودی کاهش می‌یابد. تابع تبدیل تجربی و ریاضی ابزار در نمودار ۳ با هم مقایسه شده‌اند. تابع تبدیل متوسط ابزار با میانگین‌گیری از چهار تابع تبدیل شناسایی شده محاسبه می‌شود:

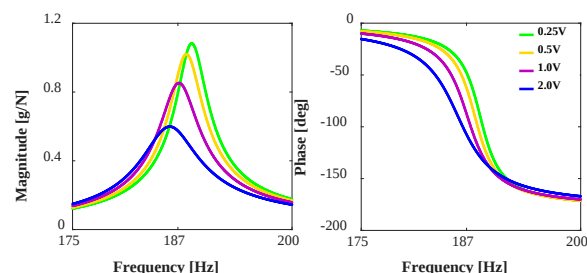
$$\left. \frac{A(s)}{F(s)} \right|_{\text{avg}} = \frac{-0.015797s^2}{(s^2 + 27.79s + 1.387 \times 10^6)}$$

$$\times \frac{(s^2 + 463.9s + 6.124 \times 10^7)}{(s^2 + 469.8s + 4.894 \times 10^7)}$$

مطابق نمودار ۴، مشاهده می‌شود که شکل منحنی‌های پاسخ فرکانسی تجربی ابزار داخل تراش در مجاورت مود اصلی، بر حسب دامنه تحریک ورودی (شدت تحریک) تغییر می‌کند. با افزایش دامنه تحریک، به تدریج دامنه قله تشدید و فرکانس غالب متناظر با مود ارتعاشی اصلی ابزار کاهش می‌یابد. این مشاهدات، در انطباق کامل با نتایج تجربی ارائه شده در مطالعه /کسون و همکاران [12] است. باید توجه داشت که همین تغییر اندک در مقدار دامنه و فرکانس، تاثیر چشمگیری بر کاهش دقت تخمین تابع تبدیل ابزار در حوزه زمان دارد. به عنوان مثال، مطابق نتایج مندرج در جدول ۵، دقت تابع تبدیل شناسایی شده در حضور تحریک چرپ با دامنه ۲ ولت، برای تخمین سیگنال شتاب خروجی از ابزار برابر $\eta_t = 80/32$ درصد است. در حالی که همین تابع تبدیل، سیگنال شتاب خروجی از ابزار را در حضور تحریک چرپ با دامنه ۰/۲۵ ولت، با دقت پایین تحریک‌های ورودی با دامنه‌های مختلف، نمی‌توان رفتار دینامیکی ابزار داخل تراش را فقط با بهره‌گیری از یک تابع تبدیل، مشابه رابطه (۸)، توصیف نمود.



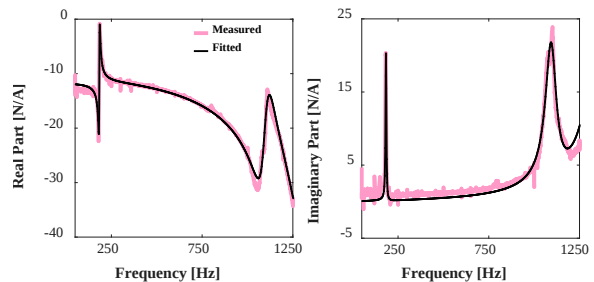
نمودار ۳) مقایسه بین منحنی پاسخ فرکانسی تجربی و تابع تبدیل شناسایی شده برای ابزار داخل تراش فولادی



نمودار ۴) نمایش نحوه تغییر شکل منحنی‌های پاسخ فرکانسی ابزار بورینگ در مجاورت مود ارتعاشی اصلی به دلیل تغییر در شدت تحریک (دامنه ولتاژ) ورودی

ریاضی شیکر باهم مقایسه شده‌اند. در نهایت، تابع تبدیل شیکر با میانگین‌گیری از چهار تابع تبدیل شناسایی شده محاسبه می‌شود:

$$\left. \frac{F(s)}{I(s)} \right|_{\text{avg}} = \frac{-8.9287 \times 10^8}{(s^2 + 782.8s + 8.258 \times 10^7)} \times \frac{(s^2 + 31s + 1.383 \times 10^6)(s^2 + 417.9s + 4.962 \times 10^7)}{(s^2 + 33.82s + 1.315 \times 10^6)(s^2 + 456.4s + 4.731 \times 10^7)}$$



نمودار ۵) مقایسه بین منحنی پاسخ فرکانسی تجربی و تابع تبدیل شناسایی شده برای شیکر الکترو دینامیک

۳-۳- شناسایی تابع تبدیل ابزار داخل تراش

سیگنال ورودی به ابزار داخل تراش نیروی F بوده و سیگنال خروجی از آن شتاب A است. برای تخمین تابع تبدیل شتاب به نیرو، تمام مدل‌های ریاضی ممکن مجاز، که دارای حداکثر ۸ صفر و ۸ قطب باشند، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. براساس معیارهای انتخاب مدل دینامیکی کارآمد، برای توصیف دینامیک ابزار داخل تراش، تابع تبدیل $A(s)/F(s)$ باید دارای چهار صفر و چهار قطب باشد. قطب‌های این تابع تبدیل، نماینده دینامیک مودهای ارتعاشی اول و دوم ابزار در راستای شعاعی است. با انجام آزمون‌های شناسایی جداگانه در هر یک از دامنه‌های تحریک $\bar{V}_0 = \{0/25, 0/5, 0/1, 0/2, 0/3\}$ ، چهار تابع تبدیل مختلف برای ابزار، با حداقل دقت تخمین $\eta_t = 80/32$ درصد (در حوزه زمان) شناسایی شده‌اند. مقادیر η_t برای هر یک از این توابع تبدیل، در جدول ۵ گزارش شده است.

جدول ۵) مقادیر دقت تخمین η_t برای توابع تبدیل ابزار داخل تراش

$\bar{V}_0$	$\left. \frac{A}{F} \right _{\bar{V}_0=2}$	$\left. \frac{A}{F} \right _{\bar{V}_0=1}$	$\left. \frac{A}{F} \right _{\bar{V}_0=0.5}$	$\left. \frac{A}{F} \right _{\bar{V}_0=0.25}$
۰/۲۵	۴۵/۰۲	۶۴/۴۶	۸۱/۱۱	۸۶/۱۱
۰/۵	۶۰/۲۱	۷۸/۳۰	۸۴/۳۲	۷۸/۳۶
۱	۷۸/۱۲	۸۲/۰۳	۷۱/۰۵	۶۲/۴۶
۲	۸۰/۳۲	۶۳/۳۴	۵۰/۲۳	۴۲/۹۶

برای تمامی این توابع تبدیل، تغییرات مقدار η_t بر حسب شدت تحریک بسیار قابل توجه است. در هر یک از دامنه‌های تحریک، دقت تخمین توابع تبدیل شناسایی شده مختلف، می‌تواند تا میزان $\Delta\eta_t = 43$ درصد کاهش پیدا کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که پاسخ دینامیکی ابزار داخل تراش، به شدت به دامنه نیروی تحریک ورودی وابسته است. وابستگی دقت تخمین تابع تبدیل به دامنه تحریک ورودی، بیانگر غیرخطی بودن دینامیک ابزار است. باید توجه داشت که شکل منحنی پاسخ فرکانسی ابزار، تابعی از موقعیت قطب‌های متناظر با مودهای سازه‌ای آن است. با تغییر دامنه نیروی تحریک اعمال شده به ابزار، موقعیت قطب‌های غالب

تابع تبدیل میانگین شناسایی شده برای مسیر پیشرو، دارای ۱۴ قطب و ۹ صفر است. برخی از صفر و قطب‌های این مدل دینامیکی زائد بوده، و با حذف آنها می‌توان مرتبه مدل دینامیکی را کاهش داد. در رابطه (۱۰)، از مدل‌سازی رفتار غیرخطی ابزار صرف نظر شده است.

۴- تخمین یکپارچه مدل دینامیکی مسیر پیشرو

در روش شناسایی یکپارچه، مجموعه عملگر الکترومغناطیس- ابزار داخل تراش به عنوان یک سیستم دینامیکی واحد محسوب شده، و اطلاعات ارزشمندی که در بخش ۳ پیرامون هر یک از زیرسیستم‌های تشکیل دهنده این مدل دینامیکی ارایه شد، در تخمین مدل دینامیکی مسیر پیشرو مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو سؤال مهم درباره مدل دینامیکی مسیر پیشرو قابل طرح است:

الف) آیا امکان کاهش مرتبه مدل دینامیکی مسیر پیشرو، در عین حفظ دقت تخمین پاسخ آن در حوزه زمان وجود دارد؟ به عبارت دیگر چگونه می‌توان بدون کاهش دقت تخمین، از قطب‌ها و صفرهای زائد موجود در ضابطه تابع تبدیل مسیر پیشرو صرف نظر کرد؟

ب) آیا امکان لحاظ کردن رفتار غیرخطی ابزار در ضابطه یک مدل دینامیکی پارامتر متغیر وجود دارد؟ به عبارت دیگر، چگونه می‌توان وابستگی موقعیت قطب‌های متناظر با مودهای ارتعاشی ابزار به دامنه تحریک ورودی را، به صورت ضرایب متغیر در ضابطه تابع تبدیل مسیر پیشرو لحاظ کرد؟

با انتخاب ساختار و مرتبه مناسب برای مدل دینامیکی مسیر پیشرو، اعمال قیود فیزیکی به مدل و تفکیک قطب‌های حساس یا غالب از سایر قطب‌ها و صفرهای مدل، می‌توان خواسته‌های مطرح شده در دو سؤال فوق را برآورده نمود. به عبارت دیگر، انتخاب ساختار و مرتبه مناسب برای تابع تبدیل مسیر پیشرو، نقش بسزایی در کاهش مرتبه مدل و حفظ دقت تخمین آن دارد.

۴-۱- ساختار پیشنهادی برای مدل دینامیکی

با بررسی جداگانه تابع تبدیل به دست آمده برای هر یک از زیرسیستم‌ها (تقویت کننده توان خطی، شیکر الکترو دینامیک و ابزار داخل تراش) در روش شناسایی جزیه جزیه، صفر و قطب‌های حساس هر یک از این توابع تبدیل شناسایی شده‌اند. سپس با اعمال کردن قیود مناسب، یک ضابطه تابع تبدیل کارآمد برای توصیف دینامیک مسیر پیشرو ارایه شده است. باید توجه داشت که ضابطه تابع تبدیل ارایه شده در رابطه (۱۱)، دارای کمترین مرتبه ممکن برای توصیف سیستم دینامیکی پیچیده مورد نظر (ابزار داخل تراش مجهز به عملگر الکترومغناطیس) است و در عین حال انتظار داریم که دقت تخمین آن نیز در بالاترین حد ممکن باشد. با توجه به مشاهدات تجربی انجام شده در بخش ۳، برای لحاظ کردن همزمان دینامیک خطی عملگر و رفتار غیرخطی ابزار در تابع تبدیل مسیر پیشرو، باید از تابع تبدیلی با حداقل ۵ صفر و ۸ قطب استفاده کرد که دارای ساختار ریاضی زیر باشد:

(۱۱)

$$\frac{A(s)}{\bar{V}(s)} = \frac{s^2(s-z_2)(s-\bar{z}_2)}{(s-p_1)(s-\bar{p}_1)(s-p_2)(s-\bar{p}_2)} \times \frac{K(s-z_1)}{(s-p_3)(s-\bar{p}_3)(s-p_4)(s-\bar{p}_4)}$$

باید توجه کرد که ضابطه تابع تبدیل مسیر پیشرو در رابطه (۱۱)،

رفتار غیرخطی ذاتی ابزار داخل تراش با تغییر دامنه سیگنال ورودی تحریک شده و به صورت تغییراتی در شکل منحنی پاسخ فرکانسی ابزار، پیرامون مودهای سازه‌ای آن، بازتاب می‌یابد. به عبارت دیگر، موقعیت قطب‌های غالب دینامیک ابزار داخل تراش، به صورت تابعی از دامنه تحریک ورودی تغییر می‌کنند. این رفتار غیرخطی، از تأثیر شرایط تکیه‌گاهی بر دینامیک ابزار نشأت می‌گیرد. در مطالعه /کسون و همکاران^[12] اشاره شده که، بهره‌گیری از اتصالات پیچی برای ثابت کردن بدنه ابزار در داخل تکیه‌گاه استوانه‌ای، موجب بروز رفتار غیرخطی در دینامیک ابزار داخل تراش می‌شود. همچنین نشان داده شده که، با تغییر گشتاور پیش‌بار پیچ‌های تکیه‌گاه ابزار یا مقدار دامنه تحریک ورودی، شکل منحنی تابع پاسخ فرکانسی ابزار (دامنه قله تشدید و فرکانس اصلی آن)، می‌تواند به میزان چشمگیری تغییر کند. براساس یافته‌های گزارش شده در این مطالعه^[12]، تغییر مقدار گشتاور پیش‌بار پیچ‌های تکیه‌گاهی در مقایسه با تغییر دامنه تحریک ورودی، تأثیر بیشتری بر بروز رفتار غیرخطی در دینامیک ابزارهای برشی دارد. بنابراین مطابق یافته‌های مقاله پیش‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که با بروز کوچک‌ترین تفاوت در شکل منحنی تابع پاسخ فرکانسی ابزار داخل تراش، خواه این تفاوت ناشی از تغییر دامنه تحریک ورودی باشد یا تغییر مقدار گشتاور پیش‌بار، دقت تخمین مدل دینامیکی شناسایی شده به شدت کاهش خواهد یافت که این موضوع موید شدت غیرخطی بودن رفتار ابزار داخل تراش است.

۴-۳- تخمین مدل‌های دینامیکی عملگر و مسیر پیشرو

در روش شناسایی جزیه جزیه، مدل دینامیکی هر یک از زیرسیستم‌های مسیر پیشرو تخمین زده شد و ضابطه توابع تبدیل میانگین استخراج شدند. مطابق مشاهدات گزارش شده در بخش‌های ۱-۳ و ۲-۳، توابع تبدیل شناسایی شده برای تقویت کننده توان خطی و شیکر الکترو دینامیک دارای رفتاری کاملاً خطی بوده، و دقت تخمین مدل دینامیکی آنها مستقل از شدت تحریک ورودی است. اما در بخش ۳-۳ مشاهده شد که، تابع تبدیل شناسایی شده برای ابزار داخل تراش دارای رفتاری غیرخطی است. روش شناسایی جزیه جزیه، ضمن ایجاد درک خوبی درباره زیرسیستم‌های مسیر پیشرو، توابع تبدیل قابل قبولی را برای توصیف دینامیک هر بخش ارایه می‌کند.

مدل دینامیکی عملگر، بیانگر رابطه بین سیگنال نیروی خروجی از شیکر و سیگنال ولتاژ ورودی به تقویت کننده است. روش شناسایی جزیه جزیه این امکان را فراهم می‌سازد تا، بتوان تخمینی از تابع تبدیل عملگر ارایه کرد:

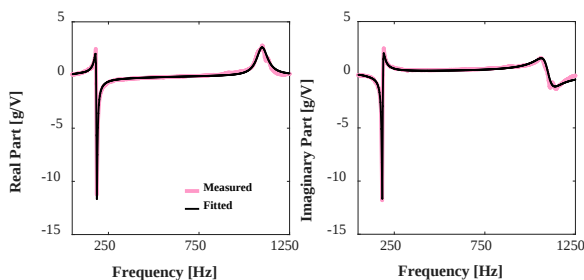
(۹)

$$\left. \frac{F(s)}{\bar{V}(s)} \right|_{avg} = \left. \frac{I(s)}{\bar{V}(s)} \right|_{avg} \times \left. \frac{F(s)}{I(s)} \right|_{avg}$$

تابع تبدیل میانگین شناسایی شده برای عملگر دارای ۱۰ قطب و ۵ صفر است. همچنین، مدل دینامیکی مسیر پیشرو بیانگر رابطه بین سیگنال شتاب خروجی از ابزار و سیگنال ولتاژ ورودی به تقویت کننده است. بنابراین با ضرب کردن توابع تبدیل میانگین شناسایی شده برای زیرسیستم‌های دینامیکی، می‌توان تابع تبدیل مسیر پیشرو را تخمین زد:

(۱۰)

$$\left. \frac{A(s)}{\bar{V}(s)} \right|_{avg} = \left. \frac{I(s)}{\bar{V}(s)} \right|_{avg} \times \left. \frac{F(s)}{I(s)} \right|_{avg} \times \left. \frac{A(s)}{F(s)} \right|_{avg}$$



نمودار ۵) مقایسه بین منحنی پاسخ فرکانسی تجربی و تابع تبدیل شناسایی شده برای مسیر پیشرو

۳-۴- استخراج ضرایب مدل دینامیکی پارامتر متغیر

ضابطه مدل دینامیکی پارامتر متغیر برای تخمین رفتار مسیر پیشرو، در رابطه (۱۴) ارائه شده است:

$$\left. \frac{A(s)}{\bar{V}(s)} \right|_{avg} = \frac{-2.2758 \times 10^{10} s^2}{(s - p_1)(s - \bar{p}_1)(s - p_2)(s - \bar{p}_2)} \times \frac{(s^2 + 1097s + 6.785 \times 10^5)(s + 3.141 \times 10^4)}{(s^2 + 1.279 \times 10^4 s + 4.088 \times 10^7)(s^2 + 652.6s + 3.38 \times 10^5)}$$

دو جفت از زوج قطب‌های مختلط، شامل $\{p_1, \bar{p}_1\}$ و $\{p_2, \bar{p}_2\}$ ، بیانگر مدهای سازه‌ای ابزار داخل تراش بوده و به عنوان قطب‌های غالب تابع تبدیل مسیر پیشرو، دربرگیرنده رفتار غیرخطی ابزار نیز هستند. سایر قطب‌ها و صفرهای مدل، غالباً مربوط به دینامیک تقویت‌کننده و شیکر هستند. چون مدل‌های دینامیکی اجزای عملگر الکترومغناطیس تابعی از شدت تحریک ورودی نیستند، از ضرایب ثابت مدل دینامیکی میانگین (رابطه (۱۳))، برای تعیین مقدار صفرها و قطب‌های غیرحساس استفاده شده است.

فرآیند شناسایی ضرایب مدل دینامیکی پارامتر متغیر، در قالب یک مساله بهینه‌سازی ثانویه انجام می‌شود، با این تفاوت که در این مرحله، فقط ضرایب بخش‌های حقیقی و موهومی قطب‌های متناظر با مدهای ارتعاشی اول و دوم ابزار به عنوان بردار مجهولات هستند. برای تحریک ولتاژی با دامنه ثابت، خطای تخمین مدل دینامیکی به عنوان تابع شایستگی مساله بهینه‌سازی انتخاب شده و با کمینه‌کردن خطای تخمین مدل، موقعیت بهینه قطب‌های غالب (در مدل دینامیکی پارامتر متغیر) محاسبه شده است.

برای مدل دینامیکی پارامتر متغیر، ترسیم مکان هندسی ریشه‌ها در نمودار ۶ نشان داده شده است. با افزایش دامنه تحریک ورودی، قطب‌های غالب دینامیک مسیر پیشرو، به تدریج از سمت راست به چپ صفحه مختلط جابه‌جا می‌شوند. اگرچه میزان جابجایی قطب‌های غالب در صفحه مختلط اندک به نظر می‌رسد، اما همین جابه‌جایی کم، تاثیر بسزایی بر دقت تخمین پاسخ شتاب خروجی از سیستم دارد. به عبارت دیگر، دقت تخمین تابع تبدیل مسیر پیشرو، به شدت به موقعیت قطب‌های متناظر با مدهای ارتعاشی ابزار وابسته است.

مطابق نمودار ۷، مقادیر بهینه بخش‌های حقیقی و موهومی قطب‌های غالب، برحسب دامنه تحریک در صفحه مختلط جابه‌جا می‌شوند. می‌توان نشان داد که بهره‌گیری از یک مدل ریاضی خطی، برای توصیف تغییر مکان قطب‌های غالب کافی است و داریم:

به صورت حاصلضرب دو عبارت کسری ریاضی مجزا ارائه شده است. به طور کلی، چهار صفر و چهار قطب معرفی شده در عبارت اول دربرگیرنده دینامیک ابزار داخل تراش بوده، و صفر و چهار قطب معرفی شده در عبارت دوم دربرگیرنده دینامیک عملگر الکترومغناطیس (مجموعه تقویت‌کننده توان خطی و شیکر الکترومغناطیس) هستند.

فرآیند شناسایی سیستم در دو گام متوالی انجام می‌شود. گام اول، شامل شناسایی بهترین مکان برای صفرها و قطب‌های تابع تبدیل میانگین، به منظور تخمین شتاب خروجی ناشی از تحریک ولتاژ ورودی در دامنه‌های مختلف است. گام دوم، شامل ثابت فرض کردن موقعیت صفرها و قطب‌های غیرحساس تابع تبدیل در مقدار متوسط آنها، و تعیین مکان دقیق قطب‌های حساس مدل برحسب شدت تحریک ورودی است تا مدل دینامیکی پارامتر متغیر بتواند در هر دامنه از ولتاژ تحریک ورودی، پاسخ شتاب خروجی را با بیشترین دقت ممکن تخمین بزند. در آزمون‌های شناسایی تجربی، سیگنال ورودی به سیستم، سیگنال ولتاژ $\bar{V}$ اعمال شده به تقویت‌کننده توان خطی بوده و سیگنال خروجی از آن، سیگنال شتاب نوک ابزار A است.

۲-۴- استخراج ضرایب مدل دینامیکی میانگین

فرآیند شناسایی ضرایب مدل دینامیکی میانگین، در قالب یک مساله بهینه‌سازی انجام شده که در آن مقادیر ضریب بهره K ، صفرها z_i و قطب‌های p_i مدل دینامیکی در رابطه (۱۱)، به عنوان بردار مجهولات هستند. موقعیت یک زوج صفر در مبدا مختصات مقید شده است. بنابراین، تعداد ضرایب مجهول مدل دینامیکی برابر ۱۲ است. در فرآیند بهینه‌سازی، میانگین خطای تخمین مدل در حوزه زمان، به عنوان تابع شایستگی مساله بهینه‌سازی انتخاب شده است. با محاسبه ضرایب بهینه برای مدل دینامیکی میانگین، مقدار تابع شایستگی θ کمینه خواهد شد:

$$\theta(K, z_i, p_i) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (100 - \text{sgn}(\eta_{t_i}) \eta_{t_i})$$

η_{t_i} بیانگر دقت تخمین مدل دینامیکی برحسب درصد است. اندیس شمارنده i به دامنه ولتاژ تحریک ورودی اشاره دارد. مقادیر ۱ تا ۴ به ترتیب نماینده دامنه ولتاژ ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ ولت هستند. در نهایت، ضرایب مدل دینامیکی میانگین، حاصل از روش شناسایی یکپارچه، به صورت زیر است:

(۱۳)

$$\left. \frac{A(s)}{\bar{V}(s)} \right|_{avg} = \frac{-2.2758 \times 10^{10} s^2 (s^2 + 1097s + 6.785 \times 10^5)}{(s^2 + 37.48s + 1.35 \times 10^6)(s^2 + 479.6s + 4.762 \times 10^7)} \times \frac{(s + 3.141 \times 10^4)}{(s^2 + 1.279 \times 10^4 s + 4.088 \times 10^7)(s^2 + 652.6s + 3.38 \times 10^5)}$$

در نمودار ۵، توابع تبدیل تجربی و ریاضی ارائه شده برای توصیف دینامیک مسیر پیشرو با هم مقایسه شده‌اند. چون موقعیت قطب‌های مربوط به دینامیک سازه‌ای ابزار داخل تراش برحسب دامنه تحریک ورودی تغییر می‌کند، باید مقادیر بخش‌های حقیقی و موهومی متناظر با این قطب‌ها، تابعی از شدت تحریک ورودی باشند.

۴-۴- مقایسه دقت مدل‌های ارائه‌شده برای تخمین دینامیک

مسیر پیشرو

به کمک مدل دینامیکی میانگین حاصل از روش شناسایی جزیه جز (رجوع کنید به رابطه (۱۰))، می‌توان پاسخ دینامیکی مسیر پیشرو به تحریک‌های ورودی با دامنه مختلف را، با دقت متوسط $\eta_t = 68\%$ درصد تخمین زد. در حالی که برای مدل دینامیکی پارامتر متغیر حاصل از روش شناسایی یکپارچه (رجوع کنید به روابط (۱۵-۱۴))، دقت متوسط تخمین پاسخ سیستم برابر $\eta_t = 88\%$ درصد است. بنابراین، با انتخاب ساختار و مرتبه مناسب برای مدل دینامیکی مسیر پیشرو، و لحاظ کردن تغییر موقعیت قطب‌های غالب سیستم برحسب دامنه تحریک ورودی، نه تنها مرتبه مدل دینامیکی به میزان چشمگیری کاهش یافته، بلکه دقت تخمین مدل نیز تا 20% افزایش پیدا کرده است. در عین حال باید توجه داشت که، بهره‌گیری از روش شناسایی جزیه جز، در تعیین منشا رفتار غیرخطی در دینامیک مسیر پیشرو بسیار راهگشا بوده است. همچنین مدل دینامیکی عملگر الکترومغناطیس با استفاده از این روش شناسایی شده است.

۵- آزمون‌های اعتبارسنجی مدل‌های دینامیکی

یکی از رایج‌ترین روش‌های اعتبارسنجی مدل‌های دینامیکی (حاصل از آزمون‌های شناسایی تجربی)، بهره‌گیری از تحریک نویز سفید گوسی فیلترشده است [11]. در آزمون‌های اعتبارسنجی مدل‌های دینامیکی، ولتاژ تحریک اعمال شده به سیستم از نوع نویز سفید گوسی بوده و دارای مقدار میانگین صفر و واریانس 4 ولت مربع است. با توجه به این که آزمون‌های شناسایی در بازه فرکانسی 50 تا 1250 هرتز انجام شده‌اند، بنابراین در آزمون‌های اعتبارسنجی نیز، باید محتوی فرکانسی ولتاژ اعمال شده به سیستم دقیقاً در همین بازه باشد. برای این منظور، از یک فیلتر دیجیتال به عنوان فیلتر بالاگذر- پایین‌گذر استفاده می‌کنیم، تا محتوی فرکانسی تحریک نویز سفید گوسی، در بازه کمتر از 50 هرتز و بیشتر از 1250 هرتز، فیلتر شود. برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج، آزمون‌های اعتبارسنجی هفت مرتبه تکرار شده‌اند.

۵-۱- دقت تخمین مدل دینامیکی عملگر

برای محاسبه پاسخ حوزه زمان عملگر به تحریک نویز سفید گوسی فیلترشده، از مدل دینامیکی ارائه‌شده در رابطه (۹) استفاده کنیم. در نمودار ۸، پاسخ حوزه زمان این تابع تبدیل، با سیگنال نیروی خروجی از عملگر مقایسه شده است. این تابع تبدیل، می‌تواند پاسخ حوزه زمان عملگر را با دقت بسیار خوب $\eta_t = 85\%$ درصد تخمین بزند. این موضوع، موید کارآمد بودن مدل دینامیکی ارائه‌شده برای عملگر است زیرا با تغییر نوع تحریک ورودی در مرحله اعتبارسنجی، دقت تخمین تابع تبدیل شناسایی شده، تفاوت چندانی با آزمون‌های شناسایی اولیه نکرده است.

۵-۲- دقت تخمین مدل دینامیکی مسیر پیشرو

برای محاسبه پاسخ حوزه زمان مسیر پیشرو به تحریک نویز سفید گوسی فیلترشده، از مدل دینامیکی میانگین ارائه‌شده در رابطه (۱۳) استفاده کنیم. در نمودار ۹، پاسخ حوزه زمان این تابع تبدیل، با سیگنال شتاب خروجی از ابزار مقایسه شده است. این تابع تبدیل، می‌تواند پاسخ حوزه زمان مسیر پیشرو را با دقت قابل قبول $\eta_t = 72\%$ درصد تخمین بزند. اگر به جای مدل دینامیکی شناسایی شده به روش یکپارچه، از مدل دینامیکی میانگین ارائه‌شده در رابطه (۱۰) استفاده کنیم، دقت تخمین پاسخ حوزه زمان مدل دینامیکی به کمتر از $\eta_t = 60\%$ درصد کاهش می‌یابد.

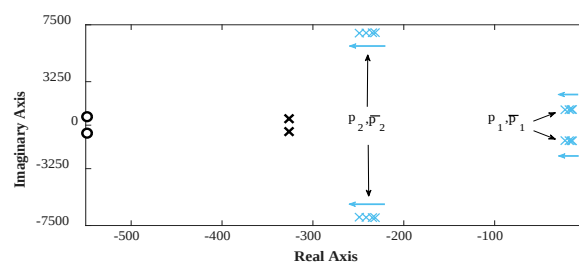
$$\alpha_1(\bar{V}_0) = a_{11}\bar{V}_0 + a_{12}$$

$$\beta_1(\bar{V}_0) = b_{11}\bar{V}_0 + b_{12}$$

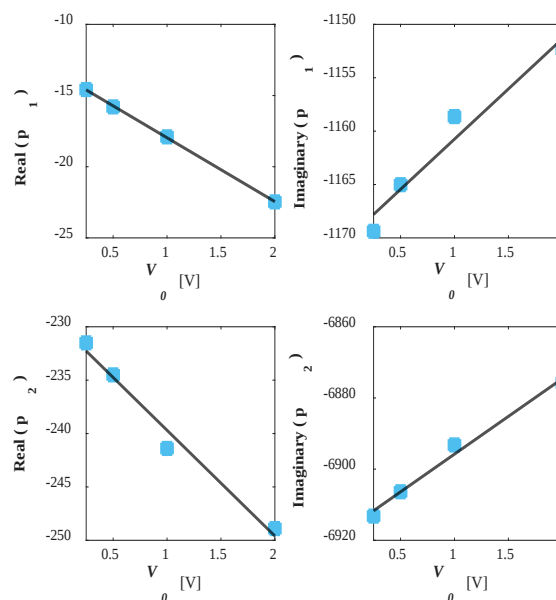
$$\alpha_2(\bar{V}_0) = a_{21}\bar{V}_0 + a_{22}$$

$$\beta_2(\bar{V}_0) = b_{21}\bar{V}_0 + b_{22}$$

با انجام یک تحلیل رگرسیون خطی، می‌توان ضرایب مجهول مدل دینامیکی پارامتر متغیر را به دست آورد (رابطه (۱۵)). این ضرایب در جدول ۶ ارائه شده‌اند. در تمام تحلیل‌های رگرسیون، مقادیر ضرایب قطعیت بالاتر از 95% بوده است. که معیاری از خطی بودن رابطه بین مقادیر حقیقی و موهومی قطب‌های غالب، برحسب دامنه ولتاژ تحریک ورودی است.



نمودار ۶ مکان هندسی ریشه‌های مدل دینامیکی پارامتر متغیر برای مسیر پیشرو



نمودار ۷ مقادیر بهینه برای بخش‌های حقیقی و موهومی قطب‌های غالب سیستم

جدول ۶ ضرایب مدل دینامیکی پارامتر متغیر ارائه‌شده برای مسیر پیشرو

بخش حقیقی	مُد ارتعاشی اول	مُد ارتعاشی دوم
a_{11}	$-4/4803$	$-9/8994$
a_{12}	$-13/4816$	$-229/7962$
b_{11}	$9/3993$	$21/2013$
b_{12}	$-1170/1003$	$-6916/9881$

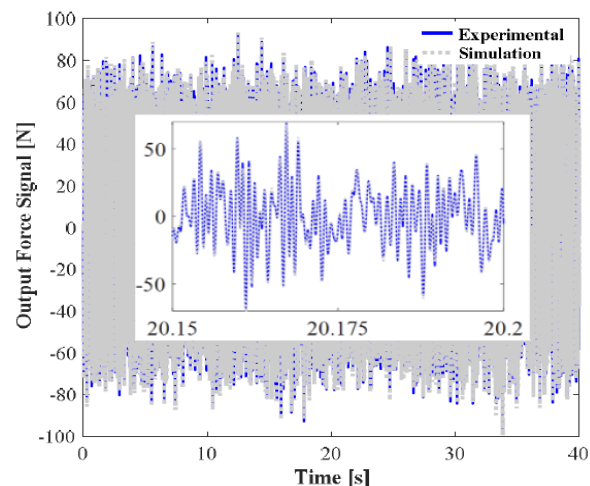
برای کمینه‌کردن دامنه پاسخ فرکانسی تابع تبدیل سیستم کنترل حلقه‌بسته (در مجاورت فرکانس‌های طبیعی ابزار) استفاده شده است، تا مقدار ضریب بهره بهینه برای این کنترلر محاسبه شود.

در روش شناسایی جزیه‌ج‌ز، تشخیص دینامیک خطی عملکرد در کنار دینامیک غیرخطی ابزار و مجزا کردن توابع تبدیل این دو بخش از یکدیگر امکان‌پذیر است. روش شناسایی جزیه‌ج‌ز، این امکان را فراهم می‌کند تا در یک فرآیند چند مرحله‌ای، به بررسی رفتار دینامیکی هر یک از زیرسیستم‌ها بپردازیم و درباره خطی یا غیرخطی بودن دینامیک آنها در بازه فرکانسی مورد نظر، اطلاعات ارزشمندی را کسب نماییم. اما در عین حال، مدل دینامیکی ارایه‌شده برای مسیر پیشرو دارای قطب‌ها و صفرهای زائد بوده و مرتبه ریاضی آن به‌مراتب بالاتر از مدل شناسایی‌شده به روش یکپارچه است. به‌علاوه این‌که، دقت تخمین آن در حوزه زمان تا حدود ۲۰٪ کمتر است.

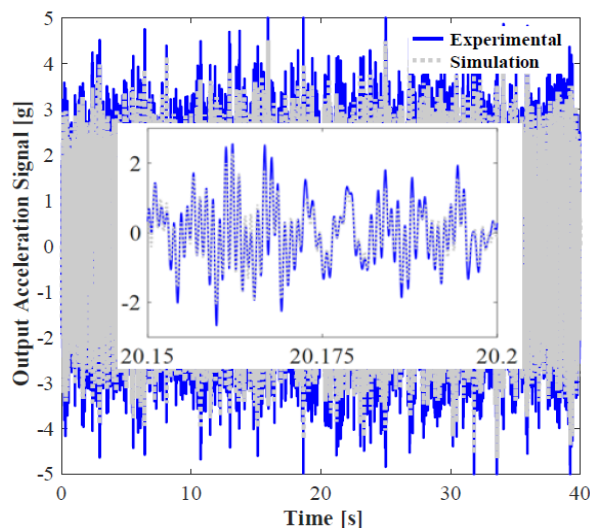
هدف از روش شناسایی یکپارچه، تعیین تابع تبدیل بین سیگنال‌های خروجی (شتاب) و ورودی (ولتاژ) سیستم، بدون توجه به تاثیر رفتار هر یک از زیرسیستم‌ها بر دینامیک مسیر پیشرو است. در این روش شناسایی، اگر به اندازه کافی به ماهیت دینامیکی زیرسیستم‌ها توجه نشود، امکان دارد که در مرحله اعتبارسنجی، مدل دینامیکی مسیر پیشرو دقت و اعتبار خود را از دست بدهد. زیرا صفر و قطب‌های تاثیرگذار بر تابع تبدیل یک سیستم الکترومکانیکی، از دینامیک حاکم بر رفتار آن سیستم سرچشمه می‌گیرند و اگر طی فرآیند شناسایی، اثرات قطب‌های غالب توصیف‌کننده دینامیک یک سیستم در تابع تبدیل آن لحاظ نشود، قطعاً دقت تخمین مدل در مرحله اعتبارسنجی بسیار پایین خواهد بود.

در این مقاله با بهره‌گیری از تجربیات حاصل از آزمون‌های شناسایی به روش جزیه‌ج‌ز، ابتدا ساختار و مرتبه مناسب برای تابع تبدیل مسیر پیشرو انتخاب شد. سپس ضرایب ثابت و متغیر این مدل دینامیکی، با هدف کمینه‌کردن خطای تخمین، محاسبه شدند. نشان داده شد که در مرحله شناسایی یکپارچه، می‌توان یک مدل دینامیکی کارآمد با مرتبه پایین‌تر و در عین حال دارای دقت تخمین بالاتر ارایه نمود. مدل دینامیکی پارامتر متغیر ارایه‌شده، می‌تواند پاسخ دینامیکی مسیر پیشرو به تحریک ورودی چرخ را با دقت متوسط $\eta_t = 88\%$ درصد تخمین بزند. در مرحله اعتبارسنجی، مدل دینامیکی میانگین قادر است تا پاسخ دینامیکی مسیر پیشرو به تحریک نویز سفید گوسی فیلترشده را با دقت $\eta_t = 72\%$ درصد تخمین بزند. به‌علاوه مدل دینامیکی عملکرد الکترومغناطیس، سیگنال نیروی دینامیکی اعمال‌شده از طرف عملکرد به ابزار را، با دقت بسیارخوب $\eta_t = 85\%$ درصد پیش‌بینی می‌کند. درنهایت، مدل دینامیکی پارامتر متغیر ارایه‌شده در این مقاله، می‌تواند در طراحی بهینه کنترلرهای مدل-پایه مورد استفاده قرار بگیرد.

یکی از دستاوردهای مهم این مقاله، نمایش رفتار خطی عملکرد الکترومغناطیس برحسب دامنه تحریک ورودی است. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که در بسیاری از عملگرهای فعال، پدیده‌های غیرخطی موجود در رفتار دینامیکی عملکرد، فرآیند طراحی سیستم کنترل فعال (برای ابزار برشی میراشده) را دشوار می‌سازد. به‌عنوان مثال در سیستم‌های کنترل فعال مبتنی بر عملگرهای پیزوالکتریک، به‌دلیل وجود هیستریزس غیرخطی، فرآیند طراحی کنترلر بهینه پیچیده می‌شود یا معمولاً محدودبودن پهنای باند فرکانسی در سیستم‌های کنترل فعال دارای عملکرد الکتروهیدرولیک، از غیرخطی بودن پاسخ فرکانسی سیلندر



نمودار ۸) مقایسه سیگنال‌های شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده نیروی عملکرد الکترومغناطیس در پاسخ به تحریک نویز سفید گوسی فیلترشده



نمودار ۹) مقایسه سیگنال‌های شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده شتاب مسیر پیشرو در پاسخ به تحریک نویز سفید گوسی فیلترشده

۶- بحث و جمع‌بندی

در مبحث شناسایی سیستم، همواره به‌دنبال تخمین معادلات ریاضی حاکم بر دینامیک یک سیستم واقعی در حوزه فرکانس، از طریق اندازه‌گیری پاسخ تجربی آن سیستم به یک تحریک ورودی مشخص در حوزه زمان هستیم. بنابراین، هنگام شناسایی سیستم‌های دینامیکی، توسعه یک الگوریتم شناسایی سریع و کارآمد، که در نهایت منجر به تعیین یک مدل دینامیکی دقیق و با مرتبه ریاضی پایین شود، بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، به فرآیند نظام‌مند شناسایی مدل دینامیکی یک ابزار داخل‌تراش میراشده‌ی مجهز به عملکرد الکترومغناطیس اشاره شده است. این سیستم الکترومکانیکی، شامل سه بخش تقویت‌کننده خطی، شیکرالکترومکانیک و ابزار داخل‌تراش است. برای شناسایی دینامیک مسیر پیشرو از دو روش شناسایی جزیه‌ج‌ز و یکپارچه استفاده شده است. در یک مطالعه^[13]، از مدل دینامیکی شناسایی‌شده برای ابزار داخل‌تراش میراشده فعال، به‌منظور طراحی یک کنترلر انتگرالگیر بهینه (با پاسخور مستقیم سرعت و ضریب بهره ثابت) بهره برده شده است. با دراختیارداشتن مدل دینامیکی مسیر پیشرو و معلوم بودن تابع تبدیل کنترلر، از معیار بهینه‌سازی H_∞

u	سیگنال ورودی به سیستم دینامیکی
v	اغتشاش ورودی به سیستم دینامیکی (قابل مشاهده)
$\bar{V}$	ضابطه سیگنال ولتاژ تحریک ورودی [V]
$\bar{V}_0$	دامنه سیگنال ولتاژ تحریک ورودی [V]
w	اغتشاش ورودی به سیستم دینامیکی (قابل اندازه‌گیری)
y	سیگنال خروجی از سیستم دینامیکی (تجربی)
$\hat{y}$	تخمین پاسخ خروجی از سیستم دینامیکی
z	صفر تابع تبدیل
علامه یونانی	
η_s	دقت تخمین تابع تبدیل در حوزه فرکانس (%)
η_t	دقت تخمین تابع تبدیل در حوزه زمان (%)
θ	تابع شایستگی مدل دینامیکی میانگین
φ_0	فاز اولیه سیگنال تحریک ورودی [rad]
ψ	فاز متغیر سیگنال تحریک ورودی [rad]
ω	فرکانس [rad/s]

منابع

- Altintas Y, Kilic ZM. Generalized dynamic model of metal cutting operations. CIRP Annals. 2013;62(1):47-50.
- Lazoglu I, Atabey F, Altintas Y. Dynamics of boring processes: Part III-time domain modeling. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2002;42(14):1567-1576.
- Moetakef Imani B, Zarif Yussefian N. Dynamic simulation of boring process. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2009;49(14):1096-1103.
- Andrén L, Håkansson L, Brandt A, Claesson I. Identification of dynamic properties of boring bar vibrations in a continuous boring operation. Mechanical Systems and Signal Processing. 2004;18(4):869-901.
- Fallah M, Moetakef Imani B. Updating boring bar's dynamic model using particle swarm optimization. Modares Mechanical Engineering. 2017;16(12):479-489. [Persian]
- Sortino M, Totis G, Prosperi F. Development of a practical model for selection of stable tooling system configurations in internal turning. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012;61:58-70.
- Houck III L, Schmitz TL, Scott Smith K. A tuned holder for increased boring bar dynamic stiffness. Journal of Manufacturing Processes. 2011;13(1):24-29.
- Smirnova T. Analysis, modeling and simulation of machine tool parts dynamics for active control of tool vibration [Dissertation]. Karlskrona: Blekinge Institute of Technology; 2010.
- Fallah M, Moetakef Imani B. Analytical prediction of stability lobes for passively damped boring bars. Journal of Mechanics. 2017;33(5):641-654.
- Chen F, Lu X, Altintas Y. A novel magnetic actuator design for active damping of machining tools. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2014;85:58-69.
- Ljung L. System identification: Theory for the user. 2nd Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall; 1999.
- Åkesson H, Smirnova T, Håkansson L. Analysis of dynamic properties of boring bars concerning different clamping conditions. Mechanical Systems and Signal Processing. 2009;23(8):2629-2647.
- Fallah M. Chatter vibration control for stability improvement in deep internal turning [Dissertation]. Mashhad: Ferdowsi University of Mashhad; 2018. [Persian]

هیدرولیک و دینامیک شیر سروو نشات می‌گیرد. که این موضوع باید حتماً در طراحی سیستم کنترل لحاظ شود. بنابراین، به‌منظور کنترل فعال ارتعاشات در ابزارهای داخل‌تراش، بهره‌گیری از عملگرهای الکترومغناطیس با رفتار دینامیکی خطی می‌تواند فرآیند طراحی کنترلر را تسهیل نماید. به‌خصوص که مطابق مشاهدات تجربی ارائه‌شده در این مقاله، دینامیک سازه‌ای ابزارهای داخل‌تراش شدیداً غیرخطی است و این رفتار غیرخطی می‌تواند با شدت بیشتری در هنگام فرآیند براده‌برداری نیز بروز نماید. درنهایت، دستاوردهای مقاله پیش‌رو را می‌توان در قالب موارد زیر خلاصه کرد:

- ارایه یک روش نظام‌مند برای شناسایی و اعتبارسنجی مدل دینامیکی یک سیستم الکترومکانیکی پیچیده (ابزار داخل‌تراش میراشده‌ی مجهز به عملگر الکترومغناطیس)
- نمایش اهمیت بهره‌گیری از روش شناسایی جزیه‌جز در تشخیص خطی یا غیرخطی‌بودن رفتار دینامیکی هر یک از زیرسیستم‌های تشکیل‌دهنده مسیر پیش‌رو و تسهیل فرآیند انتخاب صفرها و قطب‌های حساس مدل (مربوط به هر یک از زیرسیستم‌های دینامیکی)
- شناسایی رفتار غیرخطی ابزار داخل‌تراش و لحاظ‌کردن آن در ضابطه تابع تبدیل پارامتر متغیر ارائه‌شده برای توصیف دینامیک مسیر پیش‌رو، به‌گونه‌ای که در مقایسه با سایر مدل‌های پیشنهادی، مرتبه مدل کمینه و دقت تخمین آن بیشینه باشد.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

تأییدیه اخلاقی: دستاوردها و نتایج این مقاله، از متن رساله دکتری نویسنده اول استخراج و ارایه شده است.

تعارض منافع: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: محسن فلاح (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪); بهنام معتکف‌ایمانی (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪)

منابع مالی: گرنت پژوهشی مرتبط با این مقاله، توسط معاونت پژوهشی دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد تأمین شده است.

۷- پی‌نوشت

a	ضرایب چندجمله‌ای مخرج تابع تبدیل
$A(s)$	شتاب خروجی از ابزار داخل‌تراش [g]
b	ضرایب چندجمله‌ای صورت تابع تبدیل
d	درجه چندجمله‌ای مخرج تابع تبدیل
$D(s)$	عبارت مخرج تابع تبدیل
E	خطای بین تابع تبدیل و منحنی پاسخ فرکانسی
f_0	فرکانس اولیه در سیگنال تحریک [Hz]
$f_i(t_g)$	فرکانس هدف در سیگنال تحریک [Hz]
$F(s)$	نیروی خروجی از شیر الکترومکانیک [N]
$h(s)$	منحنی پاسخ فرکانسی تجربی سیستم دینامیکی
$H(s)$	تابع تبدیل ریاضی سیستم دینامیکی
$I(s)$	جریان خروجی از تقویت‌کننده توان خطی [A]
K	ضریب بهره تابع تبدیل
n	درجه چندجمله‌ای صورت تابع تبدیل
$N(s)$	عبارت صورت تابع تبدیل
p	قطب تابع تبدیل
s	متغیر مختلط فرکانسی [rad/s]
t	متغیر زمان [s]
t_g	زمان هدف در سیگنال تحریک [s]