



روشنی جدید در پیش‌بینی و کنترل تجربی پدیده چتر در فرایند داخل تراشی

مریم خلیلی گشنیگانی^{1,2}، منصور رفیعیان^{3*}، محمد مهدی ابوترابی⁴

1- دانشجو دکتری، دانشگاه یزد، یزد

2- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد، شهرکرد

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

* یزد، صندوق پستی 89195-741، Rafeeyan@yazd.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

پدیده چتر در فرایندهای تراشکاری به دلیل ماهیت پیچیده‌ای که دارد همواره مورد توجه محققان علم ماشین‌کاری بوده و تلاش‌های زیادی برای کنترل آن انجام گرفته است. اما به دلیل نیاز صنایع تولیدی برای افزایش بازدهی، دقت، کاهش نرخ پس‌زنی و کاهش هزینه‌های تولید، هنوز ضرورت توسعه تکنیک‌های بهتر برای این منظور از هر زمان دیگری بیشتر احساس می‌شود. اگرچه روش‌های غیرفعال کنترل ارتعاشات همیشه پایدار هستند ولی دارای عمل‌کرد محدودی هستند. روش‌های فعال کنترل ارتعاشات این قابلیت را دارا هستند که ارتعاشات را به نحو مطلوبی در شرایط مختلف میرا کنند. هدف این مقاله توسعه یک روش فعال، جدید و ارزان برای تشخیص و کنترل پدیده چتر قبل از وقوع چتر در فرایند داخل‌تراشی است که با انجام آزمایش عمل‌کرد آن بررسی می‌شود. به این منظور ابتدا روش‌های مختلف پردازش سیگنال به طور مختصر مرور و مقایسه می‌شوند تا از بین آن‌ها دو روش که زمان کمتر و دقت بیشتری برای پیش‌بینی وقوع چتر دارند، انتخاب و زمان لازم برای تبدیل از حالت پایدار به ناپایدار از روی سیگنال‌ها تعیین شود. سپس آزمون‌های زیادی با و بدون سیستم کنترلی انجام می‌شود و در آنها از سیگنال شتاب خروجی از حسگر شتاب که هر 0/1 ثانیه اندازه‌گیری می‌شود و دو روش پردازش سیگنال (تبدیل فوریه و چگالی طیفی) به عنوان شاخص وقوع چتر در لحظه اولیه استفاده می‌شود. آنگاه با استفاده از یک سیستم کنترل فعال دستور لازم برای کاهش سرعت اسپیندل ماشین تراش تولید می‌شود تا سیستم به حالت پایدار خود برگردد. آزمون‌های زیادی با روش استخراج شده برای حالت داخل‌تراشی و با پارامترهای مختلف انجام شد که در همه‌ی آزمون‌ها، اگر فرایند پایدار بود سیستم کنترلی وارد مدار نشد و اگر فرایند به مرحله ناپایداری می‌رسید، در مرحله پیش چتر قبل از شروع چتر و معیوب شدن سطح، پدیده چتر تشخیص و مهار شد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 تیر 1397
پذیرش: 31 شهریور 1397
ارائه در سایت: دی 1397

کلیدواژگان:

کنترل پدیده چتر
فرایند داخل تراشی
تشخیص پدیده چتر

The new approach to practical predicting and controlling the chatter phenomenon in the internal turning process

Maryam Khalili Geshnigani^{1,2}, Mansour Rafeeyan^{1*}, Mohammad Mehdi Abootorabi¹

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Shahrkord Branch, Shahrkord, Iran

* P.O.B 8915818411, Yazd, Iran, Rafeeyan@yazd.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 19 July 2018
Accepted 22 September 2018
Available Online January 2019

Keywords:

Chatter Phenomena Control
Internal Turning Process
Identification of Chatter

Abstract

Due to its complex nature, the chatter phenomenon in turning processes has always been important for the researchers of machine science and many efforts have been made to control it. However, due to the need of manufacturing industries to increase productivity and accuracy and reduce rejection rates and production costs, the need to develop better techniques is felt more than ever. Although the passive methods of vibration control are always stable, they have limited functionality. Active methods of vibration control have the ability to suppress the vibrations properly in different situations. This paper aims to develop a new, active and economic method for detection and controlling chatter phenomenon before it occurs in the boring process. First, various signal processing methods were briefly reviewed and compared, then two methods which are faster and more accurate in determining the occurrence of chatter were chosen, and the time required for the transition from the stable to unstable mode was determined based on the signals. Then many tests were performed with and without a control system. The accelerometer's output signal which was measured in 0.1 seconds were used in these tests. Two methods of signal processing (Fourier transform and spectral density) were also applied as indicators of the chatter occurrence at the initial moment. Then, using an active control system, the command was given to slow down the speed of the milling machine to switch the system back to its stable state. Using this control method, many tests were performed with different parameters for boring process. In all tests, when the process was stable, the control system did not enter the circuit, and when the process went into the unstable stage, the chatter phenomenon was detected and controlled in the pre-chatter stage before the surface was damaged.

Please cite this article using:

M. Khalili Geshnigani, M. Rafeeyan and M. M. Abootorabi, The new approach to practical predicting and controlling the chatter phenomenon in the internal turning process, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 56-73, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

تشخیص زودهنگام و کنترل پدیده چتر¹ به صورت عملی و آنلاین² در فرایندهای ماشین‌کاری، از دیرباز مورد توجه محققین این علم بوده است که می‌توان این تحقیقات را به دو دسته اصلی یعنی تشخیص پدیده چتر و کنترل آن تقسیم کرد. در بخش تشخیص پدیده چتر، سه روش استفاده از روش‌های پردازش سیگنال، روش‌های تحلیل براده و روش‌های هوش مصنوعی مورد استفاده قرار گرفته است [1]. در روش پردازش سیگنال، پردازش بر روی سیگنال‌های مختلف حاصل از جابجایی‌سنج، شتاب‌سنج، دینامومتر یا ارتعاش‌سنج یا بر روی سیگنال‌های صوت و آکوستیک انجام شده است. معمولاً خروجی این حسگرها بر حسب زمان است و برای داشتن نتایج دقیق‌تر باید بر روی آن‌ها روش‌های مختلف پردازش سیگنال را اعمال کرد. روش‌های مختلف پردازش، در حوزه‌های زمان، فرکانس و زمان-فرکانس انجام شده است [2].

گرایک و همکاران [3] در فرایند روتراشی، با استفاده از سیگنال نیرو و روش اندازه‌گیری نرخ آنتروپی درشت‌دانه³ (CER)، بیان داشتند که مقادیر کمتر از 0/2 نشان دهنده پدیده چتر است. مبنای این روش، همان روش آنتروپی تقریبی است. وانگ و همکاران [4] در فرایند بورینگ⁴، با استفاده از سیگنال شتاب و شبکه عصبی مصنوعی به تشخیص کمی آنلاین چتر و کنترل آن با استفاده از میراگرهای مغناطیسی پرداختند. کنترل پدیده چتر 2 ثانیه بعد از شروع چتر اتفاق می‌افتد.

چوی و همکاران [5] در فرایند تراش‌کاری و فرز‌کاری، با استفاده از سیگنال شتاب و روش موجک بسته‌ای، ضریبی به نام گامای تخمین‌زده شده⁵ را برای تشخیص کمی آنلاین و آفلاین⁶ پدیده چتر به دست آوردند که هرگاه این ضریب بیشتر از مقدار مشخصی (عدد 0/5- برای یک آزمون خاص) باشد، پدیده چتر رخ می‌دهد.

گرادیسک و همکاران [6] در فرایند سنگ‌زنی، با استفاده از سیگنال‌های صوت و دو روش آنتروپی⁷ و نرخ اطلاعات درشت‌بافت⁸ (CIR) به تشخیص کمی پدیده چتر پرداختند که در روش آنتروپی طیف دامنه نرمال شده برای یک آزمون خاص با

شروع چتر دامنه از مقدار 0/35 کمتر شده و در روش نرخ اطلاعات درشت‌بافت با شروع چتر، دامنه از 0/1 بیشتر می‌شود. گونزالز برامبیلا و همکاران [7] در سنگ‌زنی استوانه‌ای، با استفاده از نتایج یک میکروفون و تبدیل موجک به تشخیص کیفی پدیده چتر پرداختند که نشان داد تبدیل موجک می‌تواند به صورت کیفی پدیده چتر را مشخص کند. وانگ و همکاران [8] در فرایند فرز‌کاری، با استفاده از ولتاژ خروجی حسگر و توزیع احتمال⁹ در حداکثر مدول موجک گسسته¹⁰ به تشخیص کمی پدیده چتر پرداختند. زمانی که چتر رخ می‌دهد، شاخص از عدد 0/65 بیشتر می‌شود. یاوو و همکاران [9] در فرایند بورینگ، با استفاده از سیگنال شتاب و روش موجک گسسته و بسته‌های موجک به تشخیص پدیده چتر پرداختند که با دقت 95% پس از شروع، پدیده چتر را مشخص می‌کردند.

در فرایند تراش‌کاری، نیر و همکاران [10]، با استفاده از سیگنال صوت و روش آنتروپی تبدیل¹¹، پرز کانالس و همکاران [11] با استفاده از سیگنال شتاب و شاخص تصادفی آنتروپی¹²، خاساونه و مانچ [12] با استفاده از روشی به نام هماهنگی پایدار¹³ و در فرایند فرز‌کاری، تانگجیتسی‌چارئون و همکاران [13] با استفاده از سیگنال نیرو و روش موجک، لیو و همکاران [14] با استفاده از دو روش EMD¹⁴ و WPD¹⁵، به تشخیص کیفی پدیده چتر پرداختند.

نگوین و همکاران [15] با استفاده از سیگنال نیرو و یک الگوریتم مبتنی بر روش موجک در فرایند تراش‌کاری توانستند به صورت آنلاین پدیده چتر را تشخیص دهند.

کنترل و توقف چتر همواره مسئله چالش‌برانگیزی در تراش‌کاری بوده است. ضرورت توسعه تکنیک‌های بهتر برای این منظور به دلیل نیاز صنایع برای افزایش بازدهی، دقت، کاهش نرخ پس‌زنی و هزینه‌های تولید، بیشتر شده است [2]. تکنیک‌های توقف و کنترل را می‌توان در دو دسته اصلی به نام تکنیک‌های غیرفعال¹⁶ و فعال¹⁷ قرار داد. در تکنیک غیرفعال، هدف، توقف چتر با تغییر دادن رفتار سیستم یا افزایش پایداری سیستم است. این تکنیک را می‌توان با بهبود طرح ماشین ابزار یا استفاده از ابزارهای مناسب که می‌تواند انرژی اضافه را جذب

⁹ probability distribution¹⁰ Wavelet modulus maxima¹¹ Permutation entropy¹² Entropy randomness index¹³ Persistent homology¹⁴ Empirical mode decomposition¹⁵ Wavelet packets decomposition¹⁶ Passive¹⁷ Active¹ Chatter phenomena² Online³ Coarse-Grained Entropy Rate⁴ Boring⁵ Estimated Gamma⁶ Offline⁷ Entropy⁸ Coarse-grained information rate

میرایی فعال پیاده سازی شد که شامل کنترل کننده ی PID¹، الگوریتم پسخور کوچکترین میانگین مربعات فیلتر شده x^2 و کنترلر کنترل مدل داخلی³ (IMC) بود. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که دو الگوریتم ارائه شده به نسبت کنترلر PID در میرایی فعال دارای عمل کرد بهتری هستند.

مزیت روش های کنترل فعال این است که وابسته به مدل پیچیده سیستم نیستند زیرا از اطلاعات حسگرها استفاده می کنند و بنابراین گزینه مناسبی برای کنترل چتر و ایجاد سیستم های پایدار هستند اما در این روش ها نیاز به استفاده از منابع ثانوی انرژی، سخت افزارها و نرم افزارهای پیچیده تری است. مونوا⁴ و همکاران [20] یک عملگر دو جهته اینرسی⁴ برای حذف ارتعاشات یک ماشین فرز عمودی ساختند. روش های مختلف کنترلی، شامل کنترل پسخور شتاب، کنترل پسخور سرعت، کنترل پسخور موقعیت و کنترل پسخور تأخیر در حذف چتر مقایسه شدند. مقایسه آن ها نشانگر این بود که کنترل پسخور سرعت مؤثرترین روش است.

چن و همکاران [21] با بهره گیری از ایده یاتاقان های مغناطیسی، عملگری مغناطیسی طراحی کردند که ارتعاشات ابزار داخل تراش را کنترل کند. عملگر طراحی شده ارتعاشات مودهای مختلف ارتعاشی ابزار را کنترل می کند.

حیاتی و همکاران [22] مکانیزمی را برای کنترل ارتعاشات ابزار داخل تراشی ارائه کردند که به صورت غیرفعال و فعال قابل استفاده است. ایده اصلی آن ها، تغییر جرم و سختی ابزار داخل تراشی با استفاده از یک هسته متحرک در داخل سوراخ محوری در بدنه ابزار بوده است. با استفاده از این روش فرکانس ابزار به نحوی انتخاب می شود که پایدارترین محدوده دیاگرام دالان پایداری منطبق بر شرایط ماشین کاری به دست آید. نتایج مدل سازی و شبیه سازی نشانگر 20% بهبود در محدوده پایداری بود. نتایج تجربی نیز نتایج مدل سازی را تأیید می کند.

آبل و همکاران [23] جاذب جرمی اینرسی مغناطیسی را برای ابزارهای بورینگ طولی ارائه کردند. این ابزار بورینگ از نوع مدولار بود که جاذب ارتعاشی برای قسمت میانی طراحی و تعبیه شده بود. عمل کرد ابزار بورینگ میراشده با استفاده از آزمون ضربه و آزمون های ماشین کاری بررسی گردید. نتایج تجربی نشان از عمل کرد خوب سیستم میرایی فعال در افزایش صلبيت دینامیکی و به بود کیفیت سطح ماشین کاری ابزار

کرده یا اثرات خودبرانگیخته را توزیع کند به دست آورد. این ابزارهای اضافه معمولاً دارای انعطاف پذیری پایین تری هستند و امکان تعدیل، کاهش و کنترل پدیده های چتر را فراهم می کنند. جاذب ارتعاش، تعدیل کننده اصطکاکی و تعدیل کننده تنظیم شده بخشی از رایج ترین ابزارهایی هستند که برای توقف غیرفعال چتر به ابزار برشی اضافه می شوند [1] اما مشکل اصلی این جاذب ها این است که چون اغلب تجهیزاتی را به ابزار اضافه می کنند، در فرایند داخل تراشی که ابزار باید داخل قطعه فرو رود، در عمل قابل کاربرد نیستند. همچنین، میراگرهای غیرفعال نسبت به تغییرات شرایط ماشین کاری حساس هستند و به دلیل اینکه فرکانس طبیعی و میرایی جاذب مقادیر ثابتی دارند، با تغییر فرایند و کاربرد بایستی دوباره تنظیم شوند [2].

روش های کنترل فعال، مزیت هایی مانند اجرای آسان، هزینه پایین و عدم نیاز به انرژی اضافه دارند اما برای عمل کرد مناسب باید به صورت دقیق تنظیم شوند که این کار دشوار است و علت آن عدم قطعیت ساختار ماشین ابزار و فرایند برش است [2].

در تکنیک های فعال، همان طور که از نام آن برمی آید، ارتعاشات چتر به صورت فعال و با نظارت پیوسته و تشخیص مراحل مختلف فرایند تراش کاری با اجرای تغییرات لازم در فرایند حذف می شود [2]. روش های فعال معمولاً به سبب اینکه انرژی بیشتری به سیستم وارد می کنند، قابلیت دستیابی به میرایی بیشتری را نسبت به روش های غیرفعال دارا هستند [16]. همچنین، این روش ها اجازه می دهند که با تنظیم پارامترهای فرایند مانند سرعت، پیشروی و عمق برش، چندین مود را همزمان میرا کرد.

الرجیب و همکاران [17] فرایندی برای انتخاب بهینه تغییر سرعت اسپیندل در فرایند تراش کاری معرفی کرده اند. این تکنیک سینوسی S^3V به منظور ایجاد اختلال در مکانیزم چتر خودبرانگیخته استفاده شده و ممکن است به راحتی کاربرد صنعتی پیدا نکند چرا که محدودیت هایی از نظر دینامیک اسپیندل دارد. آزمون های انجام شده برای تأیید این تکنیک فقط در سرعت های پایین بوده است.

گانگولی و همکاران [18] بیان کردند که سرعت متفاوت اسپیندل باعث ایجاد تغییراتی در تعدیل سیستم می شود. آن ها سیستم کنترلی را به صورت نرم افزاری و فرایند تراش را به صورت سخت افزاری شبیه سازی کردند و پدیده چتر را کنترل کردند اما آزمون واقعی انجام ندادند.

آندرن و همکاران [19] ابزار داخل تراشی را ارائه کردند که در آن عملگر پیزو جاسازی شده بود. سه الگوریتم کنترل برای

¹ proportional-integral-derivative controller

² Feedback filtered-x least mean square (LMS) algorithm

³ Internal model control

⁴ Biaxial inertial actuator

بورینگ داشت.

کشیدگی⁶، فاکتور تاجی⁷، آنتروپی تقریبی⁸ و تابع خود همبستگی⁹، در حوزه زمان وجود دارد [25]. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که برخی از این روش‌ها پدیده چتر را تشخیص می‌دهند و برخی مانند میانگین سیگنال، کشیدگی و فاکتور تاجی نمی‌توانند شروع پدیده چتر را مشخص کنند.

ژائو و گائو [24] روش کنترل فعال ضد اغتشاش¹ (ADRC) را برای حذف ارتعاشات یک سیستم دو درجه آزادی به کار بردند. آن‌ها نشان دادند که این روش به خوبی می‌تواند با غلبه بر عدم قطعیت‌های داخلی و اغتشاشات خارجی، ارتعاشات سیستم دو درجه آزادی را کنترل کند.

2-2- پردازش در حوزه فرکانس
در بسیاری از موارد، اطلاعات سودمند سیگنال‌ها در محتوای فرکانسی آن‌ها نهفته است. بنابراین روش‌های تبدیل سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس همیشه مورد توجه قرار گرفته است. تبدیل فوریه¹⁰ و چگالی طیفی¹¹ دو روش پرکاربرد در حوزه فرکانس هستند [26].

در این مقاله ابتدا آزمون‌های اولیه‌ای انجام شده است تا در آن‌ها پدیده چتر بررسی شود. در این آزمون‌ها دو حسگر شتاب عمود بر هم بر روی ابزار در راستای شعاعی نصب شد تا با استفاده از سیگنال خروجی حسگرها و روش‌های مختلف پردازش سیگنال پدیده چتر بررسی شود. روش‌های مختلف در حوزه زمان، فرکانس و زمان-فرکانس برنامه‌نویسی شد که در هر کدام حداقل داده مورد نیاز برای اجرا و زمان لازم برای اجرا و دقت روش اندازه‌گیری شد. با توجه به این پارامترها مشخص شد که روش‌ها در حوزه فرکانس برای پیش‌بینی پدیده چتر در کوتاه‌ترین زمان و به صورت آنلاین مناسب‌تر هستند. بنابراین دو روش تبدیل فوریه و چگالی طیفی انتخاب شدند. از روش‌های حوزه زمان، برای اندازه‌گیری زمان لازم برای تبدیل فرایند از حالت پایدار به حالت ناپایدار استفاده شد. با توجه به مقادیر محاسبه شده، سیستم کنترلی به گونه‌ای طراحی و ساخته شد که قبل از ناپایدار شدن فرایند را به حالت پایدار برگرداند. پس از ساخت سیستم کنترلی، با استفاده از آزمون‌های عملی، عمل کرد سیستم به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و ضرایب مورد نیاز سیستم کنترلی به نحوی انتخاب می‌شود که در کمترین زمان سیستم به حالت پایدار برگردد.

تبدیل فوریه یک تبدیل انتگرالی است که سیگنال را از حوزه زمان به حوزه فرکانس منتقل می‌کند. چگالی طیفی، روشی دیگر برای تحلیل تابع در حوزه فرکانس است که از تابع خودهمبستگی تابع، تبدیل فوریه پیوسته می‌گیرد. از آنجا که چتر، افزایش دامنه ارتعاش در یک فرکانس خاص است، این روش‌ها بسیار مفید هستند.

2-3- پردازش در حوزه زمان-فرکانس

در حوزه زمان، فرکانس سیگنال و در حوزه فرکانس، زمان سیگنال نادیده گرفته می‌شود. اما در حقیقت، سیگنال‌ها در حوزه زمان-فرکانس رخ می‌دهند. هنگامی که در تحلیل سیگنال‌ها از زمان و فرکانس در کنار هم استفاده شود، نتایج مفیدتری حاصل خواهد شد. دو روش پرکاربرد پردازش سیگنال در حوزه زمان-فرکانس، تبدیل فوریه زمان کوتاه¹² و تبدیل موجک¹³ هستند [27].

2- پردازش سیگنال

روش‌های پردازش سیگنال را می‌توان در سه حوزه زمان، فرکانس و زمان-فرکانس بررسی کرد.

با اینکه در مقالات زیادی از انواع روش‌های موجک برای تشخیص کیفی چتر استفاده شده است اما از آنجا که در سیستم کنترلی باید در فواصل کوتاه زمانی، سیگنال دریافت و تحلیل شود، روش‌های حوزه زمان-فرکانس خیلی مناسب نیستند.

1-2- پردازش در حوزه زمان

سیگنال‌های دریافتی از حسگرها اغلب در حوزه زمان هستند. بنابراین می‌توان برای تفسیر این سیگنال‌ها از روش‌های مختلف پردازش سیگنال در این حوزه استفاده کرد. روش‌هایی مانند میانگین سیگنال²، جذر میانگین مربعات³، انحراف معیار⁴، قله⁵،

3- آزمون‌های عملی اولیه

قبل از طراحی و ساخت سیستم کنترلی، آزمایش‌های اولیه‌ای

⁶ Kurtosis

⁷ Crest factor

⁸ Approximate entropy

⁹ Autocorrelation

¹⁰ Furrier transform

¹¹ Spectral density

¹² Short-Time Fourier Transform

¹³ Wavelet Transform

¹ Active disturbance rejection control

² Mean of signal

³ Root mean square

⁴ Standard deviation

⁵ Peak

جدول 1 مشخصات ابزارها

| شماره 3 | شماره 2 | شماره 1 | شماره |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| VORGEN-S20R SDUCL 11 | VORGEN-S16Q SDUCL 11 | VORGEN-S12K SDUCL 07 | مدل ابزارگیر |
| 190 | 180 | 125 | طول کل ابزار (mm) |
| 20 | 16 | 12 | قطر بدنه ابزار (mm) |
| 146 | 135 | 93 | فاصله نوک ابزار تا هولدر (mm) |
| 42 | 31/5 | 23 | فاصله حسگرها تا هولدر، s (mm) |
| STORM DCGT11T304 AL H01 | STORM DCGT11T304 AL H01 | STORM DCGT070202- H01 | مدل تیغچه |
| لوزی شکل | لوزی شکل | لوزی شکل | هندسه تیغچه |
| 0/8 | 0/4 | 0/2 | شعاع نوک تیغچه (mm) |

جدول 2 مشخصات قطعه کار

| طول (mm) | قطر خارجی (mm) | جنس |
|----------|----------------|---------------|
| 80 | 80 | آلومینیم 7075 |

جدول 3 خواص مکانیکی ابزار [28]

| ضریب پواسون | مدول یانگ (N/mm ²) | چگالی (kg/m ³) | جنس | نوع |
|-------------|--------------------------------|----------------------------|------------------|----------|
| 0/3 | 2/09×10 ⁵ | 7850 | Alloy Steel | ابزارگیر |
| 0/28 | 2/09×10 ⁵ | 15800 | Tungsten carbide | تیغچه |

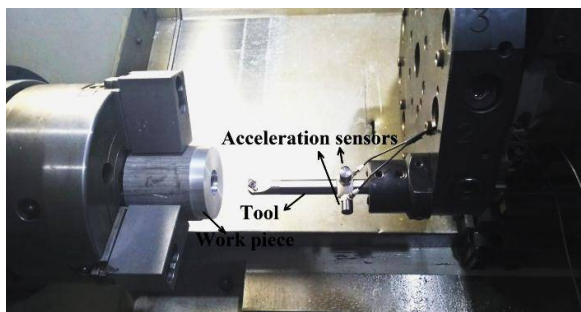


Fig. 4 Positions of the accelerometer and tool in machine

شکل 4 موقعیت شتابسنج و ابزار بر روی ماشین تراش

3-3- طرح ریزی آزمون های اصلی

آزمون های داخل تراشی زیادی (264 آزمون) با ابزارهای جدول 1 و پارامترهای متغیر جدول 4 انجام شده است که برای جلوگیری از طولانی شدن مطالب، فقط نتایج یک آزمون با مشخصات جدول 5 که در ابتدا فرایند پایدار بوده و سپس پدیده چتر شروع شده است، برای نمایش در این بخش انتخاب شده است. همه

انجام شد تا پدیده چتر در آن ها بررسی و پارامترهای مورد نیاز استخراج شود.

3-1- تجهیزات مورد استفاده در آزمون ها

حسگر شتابسنج مورد استفاده در آزمون های تحقیق حاضر AP2037 No:5111 ساخت شرکت AP tech آمریکاست، شکل 1، که شتاب را در راستای عمودی اندازه گیری می کند. دستگاه ارتعاشسنج پالس، مدل 3560-B-020 ساخت شرکت B&K دانمارک، رابط بین حسگرها و محیط نرم افزار است (شکل 2). نرم افزار دریافت داده ها، نرم افزار Time Data Recorder است که برای دریافت و ذخیره سازی سیگنال به شکل های مختلف می توان از آن استفاده کرد. ماشین تراش CNC مدل TCN 10 که ساخت شرکت ماشین سازی تبریز است (شکل 3). مشخصات ابزارهای استفاده شده در این تحقیق در جدول 1 آورده شده اند.

مشخصات عمومی قطعه کارهای استفاده شده در این تحقیق که به شکل استوانه هستند، در جدول 2 داده شده اند. ابزار از دو قسمت بدنه ابزار و تیغچه تشکیل شده است. خواص مکانیکی مربوط به این دو قسمت در جدول 3 آمده اند.

3-2- مراحل انجام آزمون

پس از نصب دو حسگر شتاب عمود بر هم بر روی ابزار داخل تراشی، مطابق شکل 4، ابزار بر روی ابزارگیر و ابزارگیر بر روی ماشین نصب می شود. با شروع هر آزمون داخل تراشی، به طور خودکار داده های هر دو حسگر شتاب بر حسب زمان ثبت می شوند.



Fig. 2 Pulse



Fig. 1 Accelerometer

شکل 2 دستگاه پالس

شکل 1 شتابسنج



Fig. 3 CNC Machine

شکل 3 ماشین تراش CNC

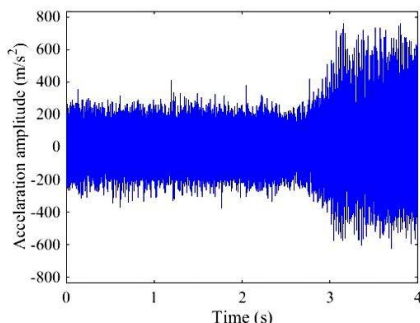


Fig. 6 Acceleration signal (sampling rate of 65536 Hz)
شکل 6 سیگنال شتاب بر حسب زمان (نرخ نمونه برداری 65536 هرتز)

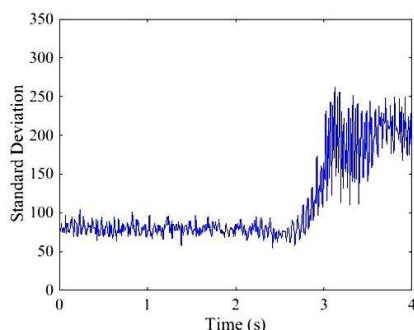


Fig. 7 The value of standard deviation of signal
شکل 7 مقادیر انحراف معیار سیگنال شتاب

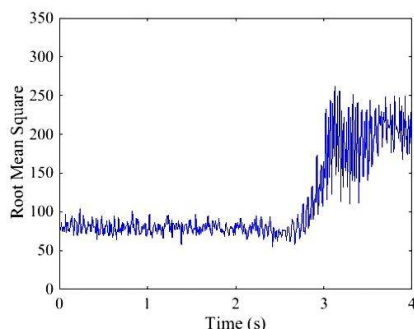


Fig. 8 The value of root mean square of signal
شکل 8 مقادیر جذر میانگین مربعات سیگنال شتاب

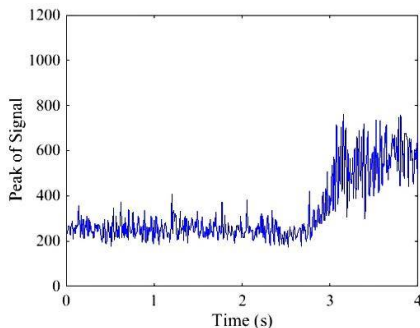


Fig. 9 The value of maximum peak of signal
شکل 9 مقادیر حداکثر قله سیگنال شتاب

آزمون‌هایی که در آن‌ها چتر رخ داده است، در ابتدای شروع، نتایج بیان شده در این بخش از مقاله را تأیید می‌کنند. شکل 5 سطح مقطع قطعه کار که در ابتدای فرایند پایدار بوده و سپس پدیده چتر رخ می‌دهد را نشان می‌دهد.

3-4- نتایج حاصل از آزمون‌های اولیه

سیگنال خروجی از حسگر شتاب نصب شده در پشت ابزار برای روش‌های مختلف پردازش سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرد. این در حالی است که بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیگنال‌های شتاب حسگر دوم نیز همین نتایج را تصدیق می‌کند. در این بخش نتایج حاصل از روش‌های پردازش سیگنالی که پدیده چتر را تشخیص نمی‌دهند، آورده نشده است.

در شکل‌های 6 تا 11 روش‌های مختلف پردازش سیگنال در حوزه زمان برای آزمون مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌ها نشان می‌دهد که همه این روش‌ها به صورت کیفی و کمی پدیده چتر را مشخص می‌کند. با اینکه تعداد داده‌های مورد نیاز برای این روش‌ها کم است اما از آنجا که در نتایج پردازش‌ها نوسانات زیاد است و دقت آن‌ها کم است برای استفاده در سیستم کنترلی خیلی مناسب نیستند.

جدول 4 مقادیر پارامترهای متغیر آزمون‌ها

| مقادیر | پارامتر |
|---|---------------------|
| .1200, .1100, .1000, .900, .800, .700, .600, .500 | سرعت اسپیندل (rpm) |
| 1500, .1400, .1300 | نرخ پیشروی (mm/rev) |
| .0/175, .0/150, .0/125, .0/100, .0/75, .0/05, .0/025 | عمق برش (mm) |
| 2/00, .1/75, .1/50, .1/25, .1/00, .0/75, .0/50, .0/25 | |

جدول 5 پارامترهای متغیر آزمون پردازش سیگنال

| شماره آزمون | سرعت برشی (m/s) | نرخ پیشروی (mm/rev) | عمق برش (mm) | قطر داخلی (mm) |
|-------------|-----------------|---------------------|--------------|----------------|
| 1 | 1/1623 | 0/05 | 0/25 | 18/5 |

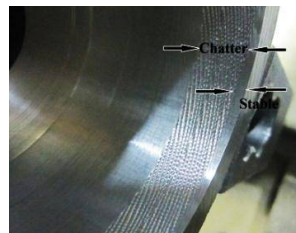


Fig. 5 The surface of workpiece test in table 5
شکل 5 سطح مقطع قطعه کار در آزمون جدول 5

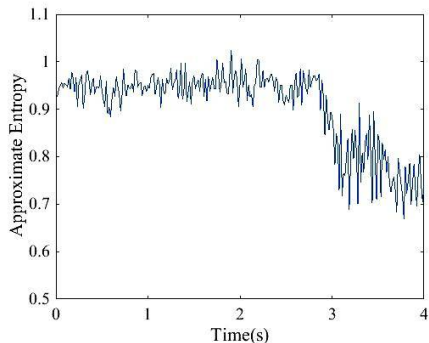


Fig. 12 Approximate Entropy of the signal

شکل 12 تابع آنتروپی تقریبی سیگنال شتاب

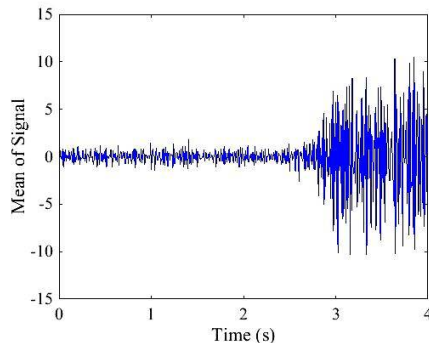


Fig. 10 The value of mean of signal

شکل 10 مقادیر میانگین سیگنال شتاب

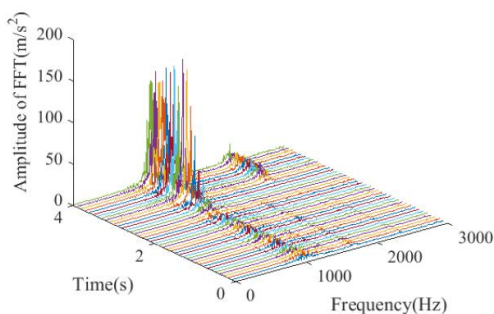


Fig. 13 Fast Fourier transform of the signal for each time

شکل 13 تبدیل فوریه سریع سیگنال شتاب در هر بازه زمانی

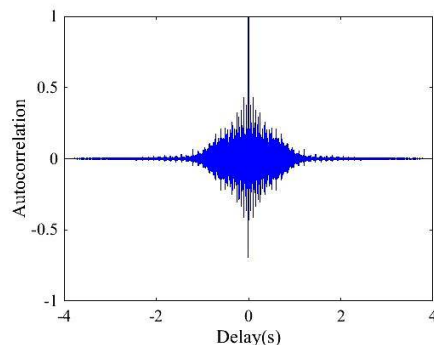


Fig. 11 Autocorrelation of the signal

شکل 11 تابع خودهمبستگی سیگنال شتاب

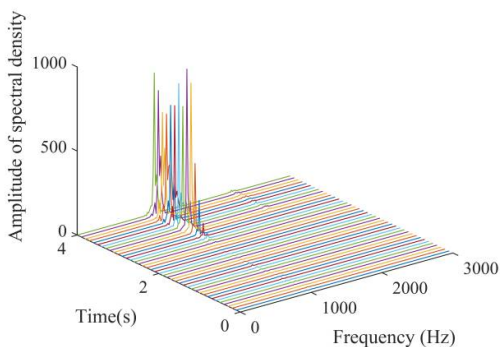


Fig. Spectral density of the signal for each time

شکل 14 چگالی طیفی سیگنال شتاب در هر بازه زمانی

دامنه نشان داده شده در شکل های 13 و 14 در یک فرکانس خاص (1091 هرتز) افزایش چشمگیری پیدا می کند که این فرکانس بسیار نزدیک به فرکانس طبیعی اول مجموعه ماشین و ابزار (1008 هرتز) است. زمانی که پدیده چتر شروع می شود، دامنه در این فرکانس خاص شروع به افزایش می کند. همان طور که از شکل 14 مشخص است، نمودار چگالی طیفی نیز به خوبی شروع چتر و فرکانس تشدید آن را نشان می دهد.

آنتروپی تقریبی یک روش آماری است که برای تعیین تصادفی بودن و یا غیرمنظم بودن یک دنباله از اعداد به کار می رود و یکی از روش های پرکاربرد در زمینه تشخیص پدیده چتر در حوزه زمان است [3, 6, 10, 11 و 14]. با اینکه این روش پدیده چتر را به خوبی تشخیص می دهد اما زمان لازم برای اجرای برنامه زیاد است و بنابراین برای سیستم کنترلی که محدودیت زمان دارد مناسب نیست. نمونه ای از نتایج آن در شکل 12 دیده می شود.

عدد یک نشان دهنده نامنظم بودن سیگنال است که با شروع پدیده چتر سیگنال منظم تر شده و مقدار آنتروپی کاهش می یابد.

پردازش سیگنال در حوزه فرکانس، برای تشخیص پدیده چتر بسیار مناسب هستند. شکل های 13 و 14 نتایج حاصل از مقادیر تبدیل فوریه و چگالی طیفی را نشان می دهد. همان طور که شکل ها نشان می دهند، در لحظه شروع حداکثر مقدار تبدیل فوریه 1/6 برابر و چگالی طیفی 2 برابر می شود. اندازه گیری ها هر 0/1 ثانیه انجام شده است. از طرفی زمان لازم برای اینکه فرایند از حالت پایدار وارد منطقه چتر شود، حداقل 0/3 ثانیه و در برخی موارد بیشتر است.

4- کنترل پدیده چتر

نسبت به بارهای ضربه‌ای و کاهش پاسخ تشدید سیستم نسبت به تحریک ثابت با دامنه وسیع است. روش‌های کنترل فعال ارتعاشات را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد [30]:

- کنترل پسخور (حلقه بسته): در این روش‌ها پاسخ سازه اندازه‌گیری می‌شود و برای محاسبه نیروی کنترلی استفاده می‌شود.

- کنترل پیشخور (حلقه باز): در این روش‌ها نیروی تحریک اندازه‌گیری می‌شود و برای محاسبه نیروی کنترلی به کار می‌رود.

- کنترل پیشخور-پسخور: در این روش‌ها هم پاسخ سازه و هم نیروی تحریک اندازه‌گیری می‌شود و برای محاسبه نیروی کنترلی به کار می‌رود.

در بیشتر سازه‌ها اندازه‌گیری نیروی تحریک مشکل و یا امکان پذیر نیست. به همین دلیل بیشتر روش‌های کنترل ارتعاشات برپایه استفاده از پسخور هستند.

تأخیرهای زمانی³ در سیستم‌های کنترلی متداول هستند به خصوص در زمانی که از فیلترها استفاده می‌شود. نشان داده شده است اگر در سیستمی تنها پسخورهای شتاب و تغییر مکان در حلقه کنترل با تأخیر زمانی اعمال شود، اثر تأخیر زمانی به میزان قابل توجهی میرایی سیستم را تغییر خواهد داد. در این حالت اثرات این ضرایب در حضور تأخیر زمانی ممکن است منجر به ناپایداری سیستم گردد.

در تحقیق حاضر، برای تشخیص و کنترل پدیده چتر، از یک سیستم کنترلی پسخور با تأخیر زمانی، مطابق شکل 16، استفاده شده است که سیگنال شتاب خروجی از حسگر شتاب را در 0/1 ثانیه اندازه‌گیری کرده، حداکثر مقدار تابع چگالی طیفی آن را اندازه می‌گیرد و نتیجه آن را با نتیجه مرحله قبل مقایسه می‌کند، اگر مقدار آن از دوبرابر مقدار مرحله قبل بیشتر شده بود سیستم کنترلی وارد مدار می‌شود و فرایند را به حالت پایدار برمی‌گرداند و در غیر اینصورت سیستم کنترلی وارد مدار نمی‌شود و فرایند ادامه پیدا می‌کند.

4-3- سیستم کنترل PD⁴

هدف از استفاده از کنترل‌کننده PD افزایش پایداری سیستم با بهبود کنترل است. کنترل‌کننده PD از دو قسمت مجزای تناسبی⁵ و مشتق‌گیر⁶ تشکیل شده است. ضوابط و نحوه کار آن

برای تجاری‌سازی سیستم کنترلی که از پدیده چتر جلوگیری کند باید کم‌هزینه‌ترین و سریع‌ترین سیستم کنترلی که دقت قابل قبولی داشته باشد را انتخاب نمود چون شروع پدیده چتر حتی به مدت زمان کوتاهی باعث خرابی سطح و در اغلب موارد معیوب شدن قطعه می‌شود.

4-1- دینامیک فرایند داخل تراشی

از آنجا که مکانیزم براده‌برداری در تراش کاری عمودی و داخل تراشی مشابه یکدیگر است، در این بخش معادلات برای فرایند داخل تراشی عمودی بازنویسی می‌شوند. ابزار داخل تراش را می‌توان به صورت سیستم یک درجه آزادی، جرم-فنر-میراگر، در راستای x در نظر گرفت. معادله حرکت سیستم را می‌توان به صورت رابطه (1) نوشت [29].

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_c = K_c b h \quad (1)$$

$$= K_c b (h_0 + (x(t - \tau) - x(t)))$$

که در آن F_c نیروی برش، K_c ضریب برشی، b پهنای برش یا عرض براده¹، h ضخامت براده‌ی تغییر شکل نیافته²، m جرم جرم مودال، c ضریب میرایی، k سختی مودال، x تغییر مکان نوک ابزار و τ دوره تناوب اسپیندل که به سرعت اسپیندل (N) با رابطه (2) وابسته است.

$$\tau = \frac{60}{N} \quad (2)$$

با لاپلاس گرفتن از رابطه (1) نمودار جعبه‌ای دینامیک فرایند داخل تراشی به صورت شکل 15 می‌شود. دینامیک سه بعدی تراشکاری در مرجع [30] بیان شده است.

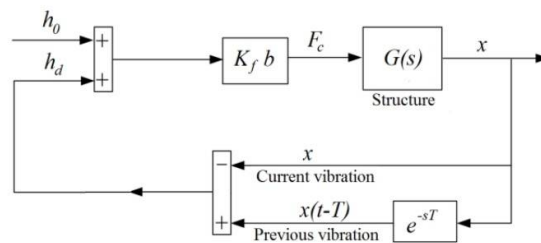


Fig. 15 Block diagram of boring process [29]

شکل 15 نمودار جعبه‌ای فرایند داخل تراشی [29]

4-2- الگوریتم‌های کنترل ارتعاشات

کنترل ارتعاشات به معنی افزایش میرایی در سیستم است. نقش میرایی در سیستم‌ها کاهش زمان نشست پاسخ گذرای سیستم

³ Time delay

⁴ Proportional-derivative controller

⁵ Proportional

⁶ Derivative

¹ Width of cut

² Uncut chip thickness

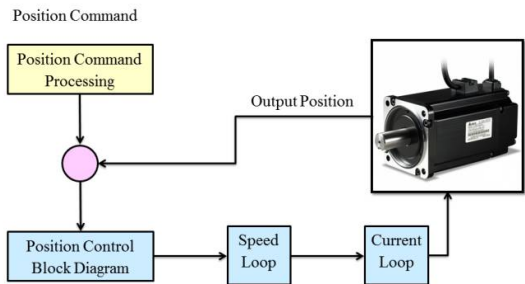


Fig. 18 Block diagram of Servo motor controller

شکل 18 نمودار جعبه‌ای کنترل کننده سرو موتور

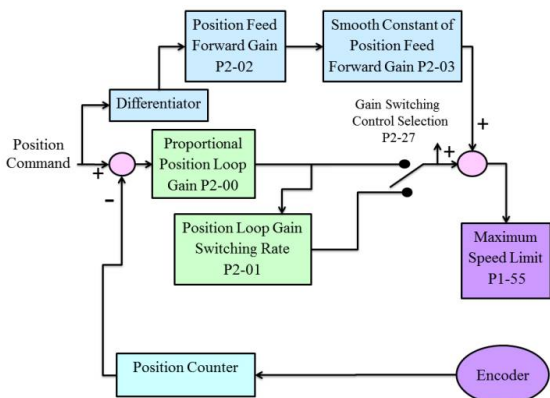


Fig. 19 Block diagram of PD Controller

شکل 19 نمودار جعبه‌ای کنترل کننده PD

شکل 19 نشان می‌دهد که نقطه مبنای این سیستم، فرمان موقعیت داده شده به سروموتور است. این فرمان با موقعیت فعلی موتور که از انکودر¹ (تجهیزی که حرکت مکانیکی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند) گرفته شده، مقایسه می‌شود تا مقدار خطا اندازه‌گیری شود. خطا وارد کنترل کننده‌های تناسبی و مشتق‌گیر می‌شود و ضرایب این دو کنترل کننده مطابق جدول 6 به‌گونه‌ای تعیین شده است که حداقل مقدار خطا را داشته باشد و در نهایت مقدار سرعت موتور تعیین می‌شود. پارامترهای کنترلی مجموعه به همراه دیگر پارامترهای مورد نیاز از اطلاعات سرو موتور یا از پیش فرض‌های نرم‌افزار استفاده شده است.

جدول 6 پارامترهای متغیر سیستم کنترل PD

Table 6 The variable parameter of PD controller

| شماره پارامتر | P2-03 | P2-02 | P2-01 | P2-00 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|
| P1-55 | 5 | 50 | 100 | 35 |
| مقدار | 3000 | | | |

4-4- آزمون‌های عملی برای محاسبه خواص دینامیکی ابزار از آنجا که در پدیده چتر، دامنه فرکانسی نزدیک به فرکانس

آن در شکل 17 نشان داده شده است. کنترل کننده‌های تناسبی و مشتق‌گیر سیگنال خطا را به عنوان ورودی گرفته و عملیاتی را روی آن انجام می‌دهند و در نهایت خروجی‌شان با هم جمع می‌شود. خروجی این مجموعه که همان خروجی کنترل کننده است برای اصلاح خطا به سیستم فرستاده می‌شود. این عملیات تا به حداقل رساندن خطا با تنظیم ورودی‌های کنترل فرایند ادامه پیدا می‌کند.

تابع تبدیل یک کنترل کننده PD به شکل رابطه (3) است:

$$G_c = K_p + K_d s \quad (3)$$

در این تحقیق سیستم کنترلی سرو موتور که به صورت تعیین موقعیت است، در شکل 18 نشان داده شده است. در این سیستم ابتدا موقعیت جدید موتور از خروجی برنامه نرم‌افزار متلب مشخص می‌شود. این فرمان موقعیت با موقعیت فعلی موتور مقایسه می‌شود و مشخص می‌کند که موتور به چه مقدار چرخش داشته باشد تا به موقعیت مورد نظر برسد، در این بین سرعت لازم برای رسیدن به موقعیت جدید نیز برای سیستم تعیین می‌شود و در نهایت با توجه به دو پارامتر موقعیت و سرعت، جریان ورودی به موتور محاسبه و به موتور داده می‌شود تا موتور به موقعیت جدید برسد.

سیستم کنترل PD نصب شده برای سرو موتور در شکل 19 نشان داده شده است.

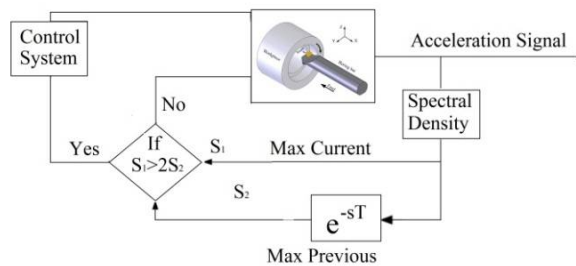


Fig. 16 Block diagram of close loop controller with time delay

شکل 16 نمودار جعبه‌ای سیستم کنترلی پسخور با تاخیر زمانی

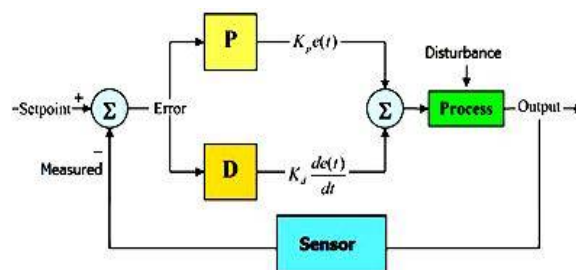


Fig. 17 Block diagram of PD controller

شکل 17 نمودار جعبه‌ای کنترل کننده PD

¹ Encoder

جدول 7 خواص ارتعاشی ابزارها

Table 7 Vibration specification of tools

| شماره ابزار | فرکانس عرضی طبیعی با میرایی اول (Hz) | نرخ میرایی |
|-------------|---|------------|
| 1 | 1008 | 0/45 |
| 2 | 584 | 0/29 |
| 3 | 560 | 0/34 |

4-5-5- آزمون‌های عملی برای کنترل پدیده چتر

یکی از مشکلات اصلی سیستم‌های کنترلی فعال و غیر فعال قبلی اجزایی است که به ابزار اضافه می‌کنند و باعث می‌شود در فرایند داخل تراشی، ابزار نیاز به فضای بیشتر داخل قطعه داشته باشد و بنابراین مجبور می‌شوند از ابزار با قطر کوچکتر استفاده کنند که خود باعث ناپایداری سیستم می‌شود ولی در این تحقیق هیچ تجهیزاتی به نوک ابزار یا طول ابزار اضافه نمی‌شود بلکه حسگر شتاب به ابزار گیر یا انتهای ابزار نصب می‌شود.

4-5-1- تجهیزات مورد استفاده در آزمون‌ها

کارت-DAQ مدل USB-6009 یکی از کارت‌های پرکاربرد شرکت National Instrument است که دارای 8 ورودی آنالوگ با نرخ 48 کیلو نمونه بر ثانیه و رزولوشن 14 بیت است که دقت لازم برای جمع‌آوری فرکانس مورد نیاز در این آزمون‌ها را دارد. از آنجایی که این کارت توسط شرکت خالق نرم‌افزار LabView تولید شده است، بنابراین به سادگی با این نرم‌افزار توانمند ارتباط برقرار می‌کند (شکل 21).

- تقویت کننده حسگر شتاب بطور خاص برای این تحقیق سفارش داده و ساخته شده است (شکل 22).

- از یک لپ تاپ مدل PCG-21416L ساخت شرکت Sony که بر روی آن نرم‌افزارهای LabView و Matlab نصب است، برای اتصال بین حسگر و موتور استفاده شده است (شکل 23).



Fig. 22 Amplifier

شکل 22 تقویت کننده



Fig. 21 DAQ cart

شکل 21 کارت داده‌برداری

- سروموتور مدل ECMA-C20807RS ساخت شرکت Delta است که شامل موتوری با دور 3000 rpm، گشتاور 2.39

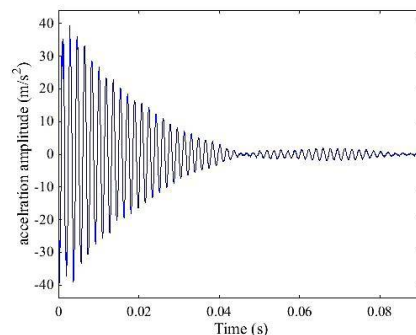
طبیعی ابزار، افزایش پیدا می‌کند، لذا دانستن فرکانس طبیعی ابزار کمک زیادی می‌کند. ابتدا آزمون‌هایی برای تعیین فرکانس طبیعی و نرخ میرایی ابزارها انجام می‌شود. برای این کار، حسگر شتاب بر روی ابزار نصب می‌شود. در چند مرحله، ضربه‌هایی به ابزار وارد و سیگنال‌های شتاب دریافتی از شتاب‌سنج‌ها ذخیره می‌شود. با استفاده از تبدیل فوریه این سیگنال، می‌توان فرکانس با میرایی مجموعه ماشین و ابزار را به دست آورد [28].

همچنین با داشتن کاهش لگاریتمی دامنه می‌توان نرخ میرایی را برای این ابزار محاسبه کرد. برای کاهش خطاهای اندازه‌گیری، هر آزمون چندین بار تکرار شده است. یک نمونه از سیگنال‌های دریافتی در شکل 20 برای ابزار شماره 3 در حوزه زمان و فرکانس نشان و نتایج به دست آمده در جدول 7 ارائه شده‌اند.

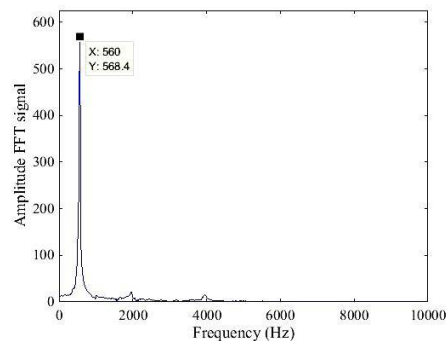
برای محاسبه نرخ میرایی از رابطه (4) استفاده شده است [28].

$$\ln\left(\frac{x_{i+1}}{x_i}\right) = -\xi\omega_n(t_{i+1} - t_i) \quad (4)$$

x_i دامنه قله موج i ام، ξ ضریب میرایی و t_i زمان قله موج i ام می‌باشد.



الف- در حوزه زمان



ب- در حوزه فرکانس

Fig. 20 The acceleration signal of impact test for tool No. 3

شکل 20 سیگنال شتاب آزمون ضربه برای ابزار شماره 3

استفاده شده است. این مود، موقعیت، شتاب و سرعت را به حافظه‌های داخلی درایور منتقل می‌کند که در این تحقیق مقادیر موقعیت، شتاب و سرعت، از طریق نرم‌افزار و با ورودی‌های دیجیتال کابل CNI (کابل ورودی‌ها و خروجی‌ها) دستور حرکت به درایور صادر می‌شود.

4-5-3- طرح‌ریزی آزمون‌های اصلی

آزمون‌های داخل تراشی زیادی با ابزارها و پارامترهای مختلف انجام شد اما نتایج حاصل شده یکسان بود. در فرایندهای داخل تراشی پایدار، سیستم کنترلی وارد مدار نشد، اما زمانی که پدیده چتر در حال وقوع بود در 0/1 ثانیه پدیده پیش‌بینی و با ورود سیستم کنترلی در مدار، سرعت اسپیندل کاهش می‌یافت تا پدیده چتر متوقف شود. بنابراین در بخش نتایج، فقط چهار آزمون با مشخصات جدول 8، برای نمایش انتخاب شده است.

همه آزمون‌های انجام شده که در حدود 90 آزمون بوده است، نتایج بیان شده در این مقاله را تأیید می‌کنند. شماتیکی از اتصال اجزاء سخت افزاری سیستم کنترلی در شکل 25 نشان داده شد است.

5- نتایج و بحث

در شکل 26 سطح مقطع قطعه کار برای سه فرایند پایدار، ناپایدار کنترل نشده و ناپایدار کنترل شده نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، زمانی که فرایند کنترل می‌شود سطح مقطع کار قبل از وقوع چتر و معیوب شدن مجدداً به حالت اولیه برمی‌گردد.

جدول 8 پارامترهای متغیر آزمون کنترل

| Table 8 The variable parameter of control tests | | | | |
|---|--------|-----------------------------|---------------------------------|---|
| شماره آزمون | 1 | 2 | 3 | 4 |
| سرعت برشی (m/s) | 1/728 | 3/168 | 1/440 | 2/388 |
| نرخ پیشروی (mm/rev) | 0/20 | 0/075 | 0/025 | 0/05 |
| عمق برش (mm) | 0/25 | 0/25 | 0/25 | 0/25 |
| قطر داخلی ابزار (mm) | 27/5 | 27/5 | 27/5 | 19 |
| شماره ابزار | 3 | 3 | 3 | 1 |
| حالت برش | پایدار | ابتدا پایدار و سپس ناپایدار | از ابتدا ناپایدار اما کنترل شده | ابتدا پایدار و سپس ناپایدار اما کنترل شده |

N.m و قدرت 750 W به همراه یک درایور است. مدل‌های A2 قابلیت تغییر موقعیت با استفاده از حافظه‌های داخلی را دارند و به همین دلیل، این مدل انتخاب شده است. (شکل 24).

- حسگر شتاب شکل 1 و ماشین تراش CNC شکل 3 و ابزارها و قطعه کار جدول‌های 1 و 2 نیز در این آزمون‌ها استفاده شده‌اند.

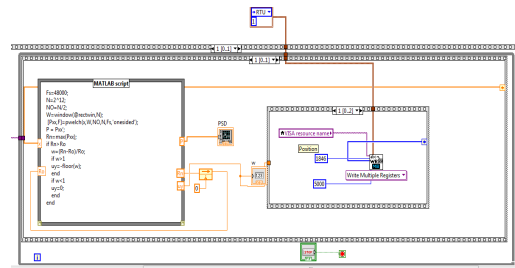


Fig. 23 Lab view software

شکل 23 نرم‌افزار Lab View



Fig. 24 Servo motor

شکل 24 سرو موتور

4-5-2- مراحل انجام آزمون

به این منظور حسگر اندازه‌گیری شتاب بر روی ابزار داخل تراشی و در نزدیکی انتهای ابزار نصب می‌شود تا شتاب بدنه ابزار که حاصل از فرایند داخل تراشی است را اندازه‌گیری کند. خروجی حسگر به یک تقویت‌کننده متصل می‌شود تا فرکانس آن در محدوده قابل قبول برای کارت داده‌برداری قرار گیرد. اطلاعات تقویت شده حاصل از حسگر به کارت داده‌برداری و سپس به طور آنلاین به نرم‌افزار LabView وارد می‌شوند. با استفاده از نرم‌افزار متلب، نتایج پردازش شده و در صورتی که پدیده چتر تشخیص داده شود، فرمان لازم توسط نرم‌افزار LabView به درایور موتور داده شده و موتور سرعت اسپیندل را کاهش می‌دهد و این فرایند تا زمانی که پدیده چتر کاملاً متوقف شود ادامه می‌یابد. پس از آنکه فرایند پایدار شد موتور کم‌کم سرعت اسپیندل را افزایش می‌دهد تا در بهینه‌ترین حالت فرایند ادامه یابد.

برای تغییر موقعیت سروموتور از روش مود کنترل موقعیت¹

¹ Position (PR) Control Mode

به خوبی پدیده چتر را کنترل می‌کند که از دیگر مزایای این سیستم است، چون قطعات اضافی بر روی ابزاری که قرار است داخل‌تراشی انجام شود اضافه نمی‌شود و به راحتی برای تراش سوراخ‌ها با قطر خیلی کم قابل کاربرد است.

برای بهتر دیده شدن نتایج حاصل از آزمون‌ها، سیگنال حاصل از شتاب‌سنج و نتایج حاصل از پردازش این سیگنال در فایل‌های جداگانه‌ای ذخیره شده است تا بتوان آن‌ها را بهتر ارائه کرد. برای چهار آزمون، یک آزمون پایدار، یک آزمون ناپایدار کنترل نشده و برای دو آزمون ناپایدار کنترل شده نتایج به صورت زیر آمده است. در آزمون‌ها، اندازه‌گیری‌ها هر 0/1 ثانیه در یک فایل ذخیره شده است ولی در این قسمت نتایج حاصل از آن‌ها به صورت پیوسته برای 1/5 ثانیه در یک شکل برای هر آزمون نشان داده شده تا کاملاً قابل تشخیص باشد و حجم زیادی در مقاله نداشته باشد. برای آزمون‌هایی که در آن‌ها فرایند داخل‌تراشی پایدار است، سیستم کنترلی وارد مدار نمی‌شود و تغییری در نتایج ایجاد نمی‌شود. سیگنال خروجی از حسگر که هر 0/1 ثانیه اندازه‌گیری شده است به همراه نتایج فوریه سریع و چگالی طیفی برای یک نمونه از آزمون‌های پایدار (آزمون شماره 1) در شکل 27 نشان داده شده است.

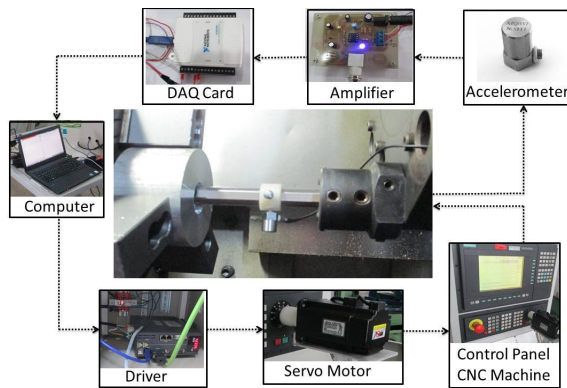


Fig. 25 Hardware architecture of experimental setup

شکل 25 اجزاء حلقه سخت‌افزاری سیستم کنترل چتر

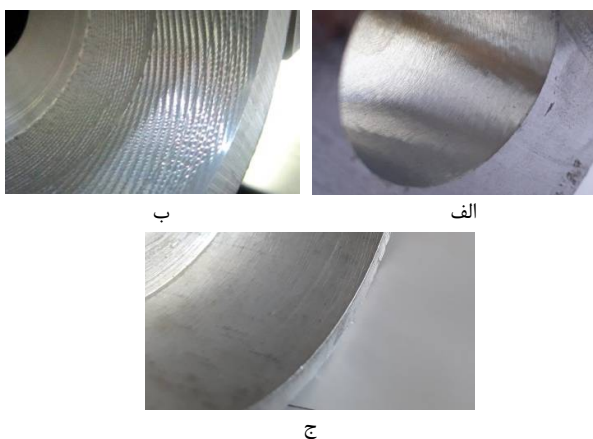
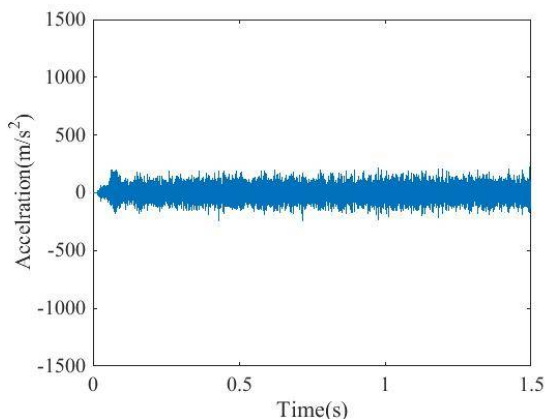
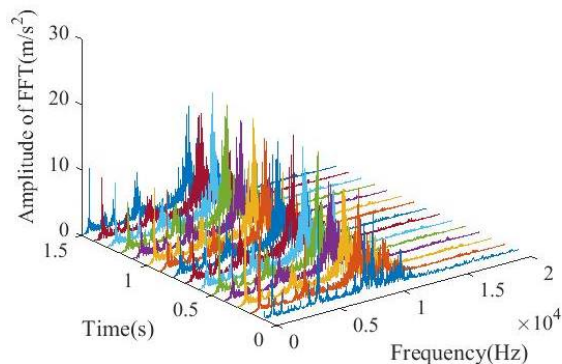


Fig. 26 The surface of workpiece in three tests. A-Stable. B- Chatter without controller. C- chatter with controller

شکل 26 سطح قطعه‌کار در سه آزمون داخل‌تراشی الف- فرایند پایدار ب- فرایند ناپایدار کنترل نشده. پ- فرایند ناپایدار کنترل شده



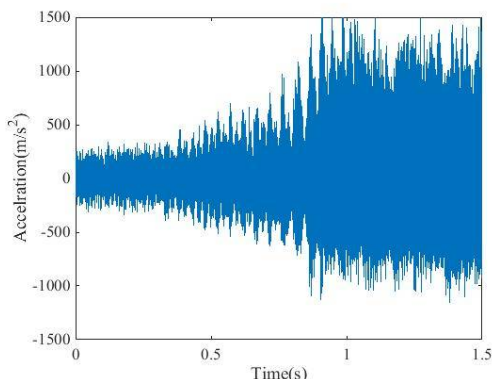
الف - سیگنال اصلی در حوزه زمان



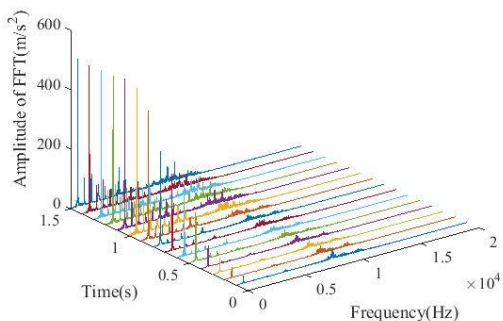
ب- تبدیل فوریه در هر یک دهم ثانیه

مهم‌ترین نتیجه این تحقیق، کنترل پدیده چتر قبل از شروع پدیده یعنی مرحله پیش‌چتر و معیوب شدن سطح است که به خوبی با بررسی سطح ابزار در آزمون‌ها قابل مشاهده است و نمونه‌ای از آن در شکل 21 نشان داده شده است. از مزایای این سیستم نسبت به سیستم‌های قبلی، سرعت بالای تشخیص و کنترل پدیده چتر است که در 0/1 ثانیه پدیده تشخیص داده می‌شود و در حدود 0/2 ثانیه اثرات پدیده چتر از بین می‌رود. همچنین این سیستم با کاهش آنی و زیاد سرعت اسپیندل پس از حذف پدیده چتر، مجدداً سرعت اسپیندل را به صورت پله‌ای افزایش می‌دهد تا زمان لازم برای انجام فرایند کاهش یابد. این سیستم قابل نصب در سخت افزار و نرم‌افزار ماشین تراش است که با اضافه کردن فقط یک حسگر اندازه‌گیری شتاب به ماشین‌تراش و برنامه‌نویسی‌های لازم به راحتی کاربردی می‌شود. زمانی که حسگر شتاب روی ابزارگیر نیز نصب شود این سیستم

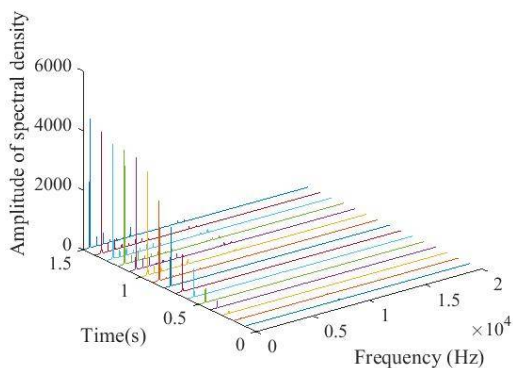
در آزمون شماره 2 نمونه‌ای از آزمون‌هایی است که در آن پس از گذشت مدت زمانی از شروع فرایند، پدیده چتر رخ می‌دهد اما سیستم کنترلی وجود ندارد. نتایج حاصل از این آزمون در شکل 28 نشان داده شده است.



الف - سیگنال اصلی در حوزه زمان



ب - تبدیل فوری در هر یک دهم ثانیه

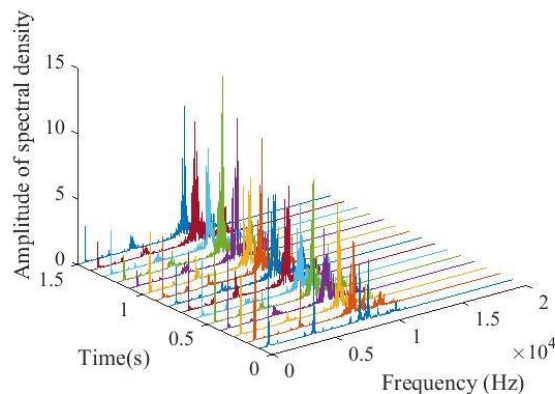


پ - تابع چگالی طیفی سیگنال در هر یک دهم ثانیه

Fig. 28 Acceleration signals measured in test No. 2 A.-In time domain B- FFT of the signal C- Spectral density of the signal

شکل 28 سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده در آزمون شماره 2

از این آزمون و تعداد زیادی آزمون‌های مشابه برای اندازه‌گیری



پ - تابع چگالی طیفی سیگنال در هر یک دهم ثانیه

Fig. 27 Acceleration signals measured in test No. 1. A-In time domain B- FFT of the signal C- Spectral density of the signal

شکل 27 سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده در آزمون شماره 1

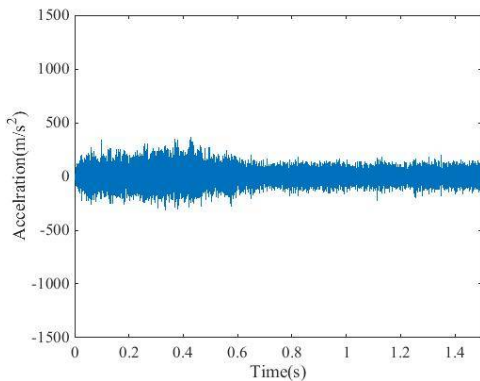
در جدول 9 نتایج حاصل از حداکثر مقدار تبدیل فوری و چگالی طیفی در هر گام از اندازه‌گیری آزمون شماره 1 نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل 27 و جدول 9 مشخص است، در فرایندهای پایدار در هیچ مرحله‌ای دامنه تغییرات حداکثر مقدار تبدیل فوری سریع و یا چگالی طیفی از دو برابر مرحله قبل بیشتر نشده است و بنابراین سیستم کنترلی فعال نمی‌شود. این شرایط برای همه آزمون‌هایی که فرایند پایدار است، تکرار می‌شود.

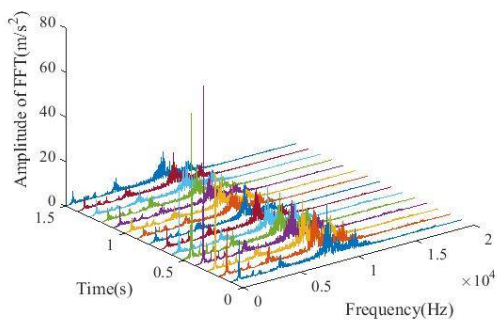
جدول 9 حداکثر مقادیر تبدیل فوری و چگالی طیفی در هر مرحله برای آزمون شماره 1

Table 9 Max FFT and Spectral density for test 1

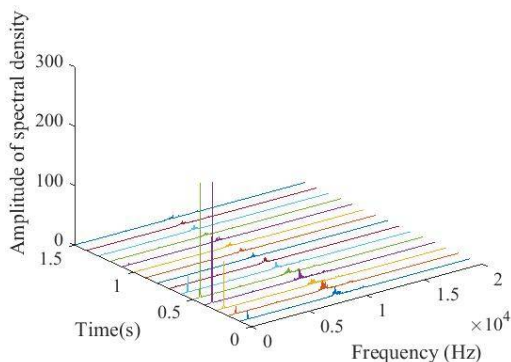
| Max spectral Density | Max FFT | Time |
|----------------------|---------|------|
| 11/2929 | 24/7691 | 0/1 |
| 7/3718 | 14/6085 | 0/2 |
| 8/0547 | 13/7156 | 0/3 |
| 5/6306 | 16/6243 | 0/4 |
| 8/8138 | 17/5688 | 0/5 |
| 6/5052 | 17/5721 | 0/6 |
| 7/4203 | 18/2572 | 0/7 |
| 6/3800 | 16/4721 | 0/8 |
| 10/1972 | 16/0622 | 0/9 |
| 6/6857 | 18/0953 | 1 |
| 10/7330 | 16/8152 | 1/1 |
| 13/5739 | 18/2634 | 1/2 |
| 7/5944 | 19/3793 | 1/3 |
| 9/2235 | 15/2156 | 1/4 |
| 9/8902 | 15/2960 | 1/5 |



الف - سیگنال اصلی در حوزه زمان



ب - تبدیل فوریه در هر یک دهم ثانیه



پ - تابع چگالی طیفی سیگنال در هر یک دهم ثانیه

Fig. 29 Acceleration signals measured in test No. 3. A-In time domain B- FFT of the signal C- Spectral density of the signal
شکل 29 سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده در آزمون شماره 3

در جدول 11 نتایج حاصل از حداکثر مقدار تبدیل فوریه و چگالی طیفی در هر گام از اندازه‌گیری فرایند نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل 29 و جدول 11 مشخص است تا زمان 0/2 ثانیه فرایند پایدار است و پس از آن تا زمان 0/5 ثانیه یا بیشتر پدیده در حال تغییر وضعیت از حالت پایدار به حالت ناپایدار است که در زمان 0/3 ثانیه پدیده چتر توسط سیستم

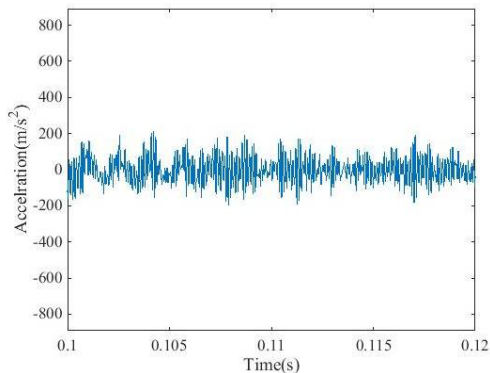
زمان لازم برای شروع پدیده چتر، بررسی نحوه تغییرات حداکثر مقدار تبدیل فوریه و چگالی طیفی استفاده شده است که مشخص شد اگر مقادیر چگالی طیفی 2 برابر و تبدیل فوریه 1/6 برابر در نظر گرفته شود در 98% درصد آزمون‌ها قبل از شروع پدیده چتر فرایند کنترل شده و در 2% باقیمانده در دوره‌های ابتدایی پدیده چتر فرایند کنترل شده و پایدار می‌شود. در جدول 10 نتایج حاصل از حداکثر مقدار تبدیل فوریه و چگالی طیفی در هر گام از اندازه‌گیری آزمون شماره 2 نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل 28 و جدول 10 مشخص است بین مرحله 3 تا 4 مقدار حداکثر چگالی طیفی دو برابر شده است، بنابراین اگر سیستم کنترلی نصب باشد، زمان 0/4 ثانیه را زمان شروع پیش چتر تشخیص می‌دهد. تا زمان 0/3 ثانیه فرایند پایدار است و پس از آن تا زمان 0/6 ثانیه پدیده در حال تغییر وضعیت از حالت پایدار به حالت ناپایدار است و پس از آن فرایند ناپایدار می‌شود و سطح قطعه کار غیر قابل قبول خواهد شد. برنامه طوری نوشته شده است که قبل از شروع پدیده چتر از وقوع آن جلوگیری کند.

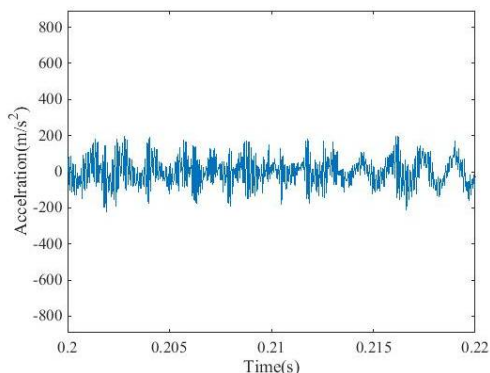
آزمون شماره 3، نمونه‌ای از آزمون‌هایی است که در آن از ابتدای فرایند پدیده چتر رخ داده است اما سیستم کنترلی روشن است و اجازه نمی‌دهد پدیده چتر شروع شود و سطح را معیوب کند. سیگنال‌های حاصل از این آزمون در شکل 29 نشان داده شده است.

جدول 10 حداکثر مقادیر تبدیل فوریه و چگالی طیفی برای آزمون شماره 2

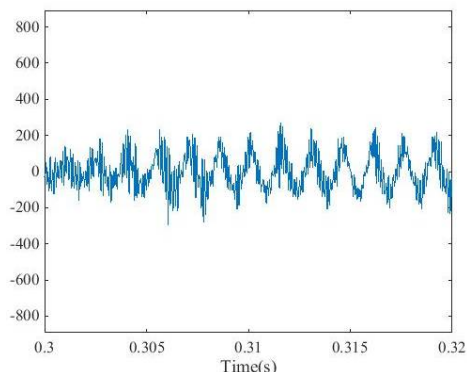
| Max spectral Density | Max FFT | Time |
|----------------------|----------|------|
| 31/3 | 31/1785 | 0/1 |
| 46/2 | 35/5106 | 0/2 |
| 91/9 | 47/9356 | 0/3 |
| 218/1 | 70/2438 | 0/4 |
| 468/4 | 163/9219 | 0/5 |
| 955/5 | 244/9719 | 0/6 |
| 1244/3 | 258/0144 | 0/7 |
| 1986/1 | 313/8325 | 0/8 |
| 2674/3 | 433/9933 | 0/9 |
| 3457/9 | 490/3226 | 1 |
| 3757/7 | 503/7481 | 1/1 |
| 3830/2 | 496/2826 | 1/2 |
| 3848/3 | 493/5748 | 1/3 |
| 4065/6 | 494/7550 | 1/4 |
| 4325/5 | 496/3210 | 1/5 |



الف - در فرایند پایدار



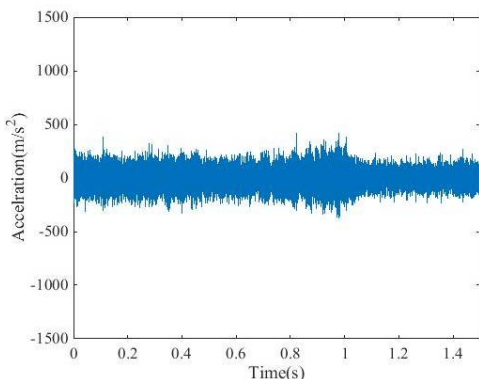
ب - تغییر از حالت پایدار به نا پایدار



پ - شروع ناپایداری فرایند

Fig. 30 Magnifier acceleration signals measured in test No.3

شکل 30 بزرگ‌نمایی شده سیگنال شتاب در آزمون شماره 3



الف - سیگنال اصلی در حوزه زمان

کنترلی تشخیص داده می‌شود و سیستم کنترلی شروع به کار کرده و در طی 0/2 ثانیه فرایند را قبل از شروع چتر پایدار می‌کند. از آنجایی که تشخیص سریع است، قبل از معیوب شدن سطح سیستم به حالت پایدار بر می‌گردد.

در شکل 30 سیگنال شتاب در سه زمان بزرگ‌نمایی شده است. دامنه در هر سه قسمت الف تا ج در شکل تقریباً یکسان است؛ اما در قسمت الف که فرایند پایدار است، سیگنال نامنظم است. در قسمت ب، که لحظه‌ای قبل از شروع پدیده چتر است، بخشی از سیگنال نامنظم و دیگر قسمت‌ها به صورت موج هارمونیک شده است و در قسمت ج که فرایند وارد حالت میانی یا پیش چتر می‌شود، سیگنال کاملاً هارمونیک می‌شود و بنابراین با اینکه دامنه سیگنال افزایش نمی‌یابد، اما دامنه تبدیل فوریه و چگالی طیفی آن افزایش چشمگیری دارد. با شروع چتر، دامنه سیگنال نیز افزایش می‌یابد.

آزمون شماره 4 نمونه‌ای از آزمون‌هایی است که در آن پس از گذشت مدت زمانی از شروع فرایند، پدیده چتر رخ می‌دهد اما سیستم کنترلی روشن است و اجازه نمی‌دهد پدیده چتر شروع شود و سطح را معیوب کند. سیگنال‌های حاصل از این آزمون در شکل 31 نشان داده شده است.

در جدول 12 نتایج حاصل از حداکثر مقدار تبدیل فوریه و چگالی طیفی در هر گام از اندازه‌گیری نشان داده شده است.

جدول 11 حداکثر مقادیر تبدیل فوریه و چگالی طیفی برای آزمون شماره 3
Table 11 Max FFT and Spectral density for test 3

| Max spectral Density | Max FFT | Time |
|----------------------|---------|------|
| 15/1526 | 23/2194 | 0/1 |
| 15/4458 | 19/9212 | 0/2 |
| 78/9117 | 43/6143 | 0/3 |
| 203/4170 | 79/7822 | 0/4 |
| 192/3662 | 65/3156 | 0/5 |
| 26/6651 | 33/6133 | 0/6 |
| 8/2325 | 15/7834 | 0/7 |
| 7/0163 | 15/8065 | 0/8 |
| 5/9663 | 13/7011 | 0/9 |
| 5/6389 | 14/0774 | 1 |
| 5/8116 | 12/5806 | 1/1 |
| 4/1916 | 12/8929 | 1/2 |
| 8/5153 | 13/3284 | 1/3 |
| 6/8774 | 14/6989 | 1/4 |
| 4/5645 | 12/4050 | 1/5 |

می‌شود با این تفاوت که در آزمون شماره 4 تا زمان 0/7 ثانیه فرایند پایدار است و پس از آن تا زمان 1 ثانیه یا بیشتر پدیده در حال تغییر وضعیت از حالت پایدار به حالت ناپایدار است که در زمان 0/8 ثانیه پدیده چتر تشخیص داده می‌شود و سیستم کنترلی شروع به کار کرده و در طی 0/2 ثانیه فرایند را قبل از شروع چتر پایدار می‌کند.

آزمون‌ها نشان داد که تابع چگالی طیفی دقیق‌تر شروع ناپایداری را نشان می‌دهد، بنابراین تبدیل فوریه از برنامه حذف شد تا سرعت برنامه افزایش یابد.

6- نتیجه‌گیری

در قسمت اول این تحقیق مشخص شد که بهترین روش تشخیص پدیده چتر در مراحل اولیه روش‌های در حوزه فرکانس است، که بین دو روش تبدیل فوریه و چگالی طیفی روش چگالی طیفی سریع‌تر و دقیق‌تر شروع ناپایداری را مشخص می‌کرد.

در قسمت دوم با استفاده از یک سیستم کنترلی پسخور و با تأخیر زمانی که شامل یک کنترلر PD است، با دقت بسیار خوبی پدیده چتر، قبل از خرابی سطح، کنترل و مهار می‌شود. از مزیت‌های این سیستم کنترلی می‌توان موارد زیر را نام برد:

1- هیچ تجهیز اضافه‌ای به نوک ابزار یا روی طول ابزار اضافه نمی‌شود و تنها حسگر شتاب به ابزارگیر یا انتهای ابزار نصب می‌شود؛ بنابراین با ابزار با قطر بیشتر و طول کمتر می‌توان داخل‌تراشی را انجام داد که به نوبه خود پایداری سیستم را افزایش می‌دهد.

2- مجموعه ابزار، قبل از شروع پدیده چتر و معیوب شدن سطح، پایدار می‌شود.

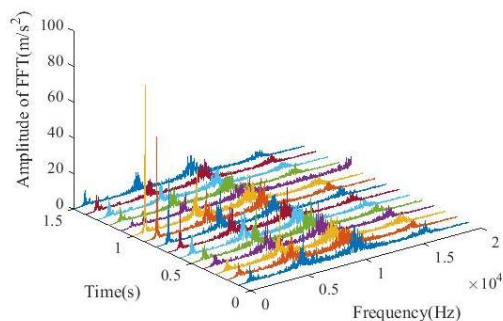
3- ضرایب کنترلی به‌گونه‌ای تعیین شده است که مجموعه در حداقل زمان ممکن پایدار شود.

4- پس از کنترل پدیده چتر این سیستم به صورت پله‌ای سرعت سیستم را تا 90% سرعت اولیه افزایش می‌دهد.

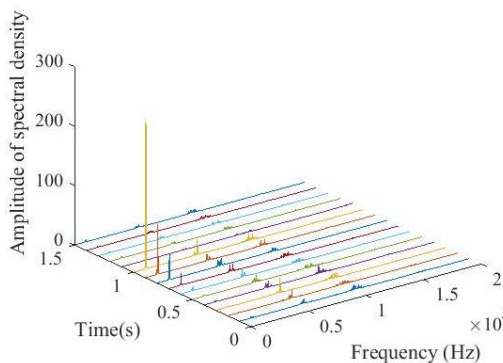
5- این سیستم کنترلی بسیار کوچک بوده و قابل حمل و نقل و نصب بر روی هر ماشین‌تراش مشابهی است.

7- مراجع

[1] G. Quintana and J. Ciurana, Chatter in machining processes: A review, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 51, pp. 363-376, 2011.
 [2] M. Siddhpura and R. Paurobally, A review of chatter



ب- تبدیل فوریه در هر یک دهم ثانیه



پ- تابع چگالی طیفی در هر یک دهم ثانیه

Fig. 31 Acceleration signals measured in test No. 4. A-In time domain B- FFT of the signal C- Spectral density of the signal

شکل 31 سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده در آزمون شماره 4

جدول 12 حداکثر مقادیر فوریه سریع و چگالی طیفی برای آزمون شماره 4

| Max spectral Density | Max FFT | Time |
|----------------------|---------|------|
| 9/2201 | 20/0613 | 0/1 |
| 12/9056 | 17/0745 | 0/2 |
| 24/8202 | 26/5199 | 0/3 |
| 13/1478 | 21/3528 | 0/4 |
| 11/3798 | 20/7967 | 0/5 |
| 12/4227 | 17/6322 | 0/6 |
| 19/7832 | 25/4482 | 0/7 |
| 44/8682 | 36/7489 | 0/8 |
| 83/4891 | 56/9329 | 0/9 |
| 248/3024 | 83/1616 | 1 |
| 3/2085 | 10/6349 | 1/1 |
| 4/8302 | 11/6523 | 1/2 |
| 4/8093 | 12/2308 | 1/3 |
| 4/7872 | 12/6912 | 1/4 |
| 6/0859 | 12/1341 | 1/5 |

همان‌طور که از شکل 31 و جدول 12 مشخص است در آزمون شماره 4 نیز مانند آزمون شماره 3 پدیده چتر کنترل

- The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Accepted Manuscript, pp. 1-10, 2017.
- [15] V. Nguyen, S. Melkote, A. Deshamudre, M. Khanna and D. Walker, Comparison of on-line chatter detection algorithms in turning, *Proc. of International Symposium on Flexible Automation (ISFA)*, pp. 87-94, 2016.
- [16] B. Muhammad, M. Wan, J. Feng and W. H. Zhang, Dynamic damping of machining vibration: a review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, Issue 9-12, pp. 2935-2952, 2017.
- [17] E. Al-Regib, J. Ni, S. H. Lee, Programming spindle speed variation for machine tool chatter Suppression, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 1229-1240, 2003.
- [18] A. Ganguli, *Chatter reduction through active vibration damping*, Ph.D. dissertation, Université libre de Bruxelles, 2005.
- [19] L. Andrén and L. Hakansson, *Active Vibration Control of Boring Bar Vibrations*, Sweden, 2004.
- [20] J. Munoa, I. Mancisidor, N. Loix, L. G. Uriarte, R. Barcena and M. Zatarain, Chatter suppression in ram type travelling column milling machines using a biaxial inertial actuator, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 62, Issue 1, pp. 407-410, 2013.
- [21] F. Chen, X. Lu and Y. Altintas, A novel magnetic actuator design for active damping of machining tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 85, pp. 58-69, 2014.
- [22] S. Hayati, M. Hajaliakbari, Y. Rajabi and S. Rasae, Chatter reduction in slender boring bar via a tunable holder with variable mass and stiffness, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, <https://doi.org/10.1177/0954405417690554>.
- [23] E. Abele, M. Haydn and T. Grosch, Adaptronic approach for modular long projecting boring tools, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 65, pp. 393-396, 2016.
- [24] S. Zhao and Z. Gao, An Active Disturbance Rejection Based Approach to Vibration Suppression in Two-Inertia Systems, *Asian Journal of Control*, Vol. 15, Issue 2, pp. 350-362, 2013.
- [25] K. Shin, and J. K. Hammond, *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2008.
- [26] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer and J. R. Buck, *Discrete time signal processing, second edition*, Published by Prentice-Hall, Inc., New jersey, 1999.
- vibration research in turning, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 61, pp. 27-47, 2012.
- [3] I. Grabec, J. GradiSek and E. Govekar, A new method for chatter detection in turning, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 48, pp. 29-32, 1999.
- [4] Wang. M, Fei. R, On line chatter detection and control in boring based on an electro rheological fluid, *Mechatronics*, Vol. 11, pp. 779-792, 2001.
- [5] T. Choi and Y. C. Shin, On-Line chatter detection using wavelet-based parameter estimation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 125, pp. 21-28, 2003.
- [6] J. Gradisek, A. Baus, E. Govekar, F. Klocke and I. Grabec, Automatic chatter detection in grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 1397-1403, 2003.
- [7] O. González-Brambila, E. Rubio, J. Jauregui and G. Herrera-Ruiz, Chattering detection in cylindrical grinding processes using the wavelet transform, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, Issue 15, pp. 1934-1938, 2006.
- [8] L. Wang and M. Liang, Chatter detection based on probability distribution of wavelet modulus maxima, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 25, Issue 6, pp. 989-998, 2009.
- [9] Yao. Zh, Mei. D, Chen. Z, On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 713-719, 2010.
- [10] U. Nair, B. M. Krishna, V. N. N. Namboothiri and V. P. N. Nampoori, Permutation entropy based real-time chatter detection using audio signal in turning process, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 46, pp. 61-68, 2010.
- [11] D, P. Canales, L. V. Martynez, J. C. Corre and J. A. Ramirez, Analysis of the entropy randomness index for machining chatter detection, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 62, pp. 39-45, 2012.
- [12] F.A. Khasawneh, and E. Munch, Chatter detection in turning using persistent homology, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 70-71, pp. 527-541, 2016.
- [13] S. Tangjitsitcharoen, T. Saksri and S. Ratanakuakangwan, Advance in chatter detection in ball end milling process by utilizing wavelet transform, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 26, No. 3, pp. 485-499, 2015.
- [14] C. Liu, L. Zhu and C. Ni, The chatter identification in end milling based on combining EMD and WPD,

- and control of an active boring bar using VCA actuator, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 88-96, 2017 (in Persian)
- [30] Y. Altintas, *Manufacturing Automation*, Cambridge University Press, 32 Avenue of the Americas, New York, NY 10013-2473, USA, 2012.
- [31] A. Preumont, *Vibration Control of Active Structures: An Introduction*, Third Edition, Springer Netherlands, 2011.
- [27] D. E. Newland, *An introduction to random vibrations, spectral and wave analysis, third edition*, Manufacture in the United States of America, Dover publications, Inc., Mineola, New York, 2005.
- [28] M. Khalili, M. Rafeeyan, M. M. Abootorabi, Quantitative analysis of forces in boring process and providing a new formula for calculation of tool-tip force, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 10-23, 2018. (in Persian)
- [29] P. Naeemi Amini, B. Moetakef Imani, Identification