

پایش وضعیت سایش ابزار براده برداری با استفاده از انتگرال حاشیه ای زمان - فرکانس سیگنال جریان موتور اسپیندل

مهدی دانش^۱، خلیل خلیلی^{۲*}

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، مرکز آموزش عالی فنی و مهندسی بوئین زهرا، بوئین زهرا، قزوین

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

kkhalili@birjand.ac.ir، ۰۷۱۳

بیرجند، صندوق پستی ۱۷ آبان

چکیده

پایش وضعیت ابزار برشی یکی از عوامل مهم در فرآیند براده برداری می‌باشد. روش‌های مختلفی برای پایش وضعیت ابزار در تراشکاری مورد استفاده قرار گرفته است. اندازه گیری جریان موتور یکی از روش‌های غیر مستقیم در پایش وضعیت سایش ابزار می‌باشد. مزیت روش اندازه گیری جریان موتور در مقایسه با سایر روش‌های پایش وضعیت ابزار، زیینه پایین سنسور آن و عدم ایجاد اختلال در فرآیند براده برداری می‌باشد. در این مقاله تاثیر سایش و شکست ابزار بر مشخصه‌های هارمونیکی جریان بررسی گردیده و در نهایت روشی بر اساس انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس جریان موتور اسپیندل جریان تناوبی جهت اندازه گیری غیر مستقیم سایش و شکست ابزار ارائه گردیده است. به منظور راستی آزمایی سیستم پیشنهادی، ارتعاشات ابزار در راستای پیشروی با استفاده از شتاب سنج نصب شده بر روی بدنه ابزار اندازه گیری شده و از سیستم بینایی جهت اندازه گیری مستقیم سایش ابزار و ردیابی وضعیت ابزار از روی بافت سطح قطعه کار استفاده شده است. سیستم پیشنهادی بر روی مواد و اینسرتهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج نشان داد سیستم پیشنهادی با دقت مناسبی در کاربردهای عملی قابل استفاده می‌باشد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۳ خرداد ۱۳۹۳

پذیرش: ۲۳ تیر ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۱۷ آبان ۱۳۹۳

گلاید و ازگان:

پایش وضعیت

سایش ابزار

جریان موتور

انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس

Tool wear condition monitoring using time-frequency marginal integral of motor current signal

Mehdi Danesh¹, Khalil Khalili^{2*}

1- Buein Zahra Technical University, Buein Zahra, Ghazvin, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

*P.O.B. 9713 Birjand, Iran, kkhalili@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 24 May 2014

Accepted 14 July 2014

Available Online 08 November 2014

Keywords:

Tool Wear

Condition Monitoring

Motor Current

Time-Frequency Marginal Integral

ABSTRACT

The condition of a cutting tool is an important factor in any metal cutting process. Several different methods have been developed to monitor the condition of tools in turning. Motor current measurement is one of the indirect tool wear monitoring methods in machining processes. The advantage of motor current measurement method over other methods for detecting malfunctions in the cutting process is that the measuring system has an acceptable cost and the measurement apparatus does not disturb the machining process. In this paper, the effect of tool wear and tool breakage on the harmonics of the AC spindle motor is investigated. Finally, a method based on time-frequency marginal integral of current signal is proposed for indirect measurement of tool wear in turning. In order to validate the proposed tool monitoring system, an accelerometer was attached to the shank of the cutting tool to measure vibrations resulting from tool wear in feed direction. A vision system was also used to measure tool wear and also traces tool state by observing the surface texture of the workpiece. Performance of the proposed system was validated against different experiments. The results showed improved robustness of the proposed system with high potential for practical application in detecting tool wear.

۱- مقدمه

عمر ابزار از موضوعات مهم در ماشینکاری می‌باشد. عمر ابزار نشان دهنده درجه پیشرفت و مفید ابزار است که بر حسب مدت زمان، از لحظه شروع برش تا یک نقطه پایانی که از روی معیار از کار افتادگی مشخص می‌شود بیان می‌گردد. اگر ابزار بعد از عمر مفید آن تعویض نشود، ممکن است قطعه کار از ترانس مجاز خارج شود و یا اینکه ابزار بشکند که این خود موجب آسیب به

Please cite this article using:

M. Danesh, K. Khalili, Tool wear condition monitoring using time-frequency marginal integral of motor current signal, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 16, pp. 181-189, 2015 (In Persian)

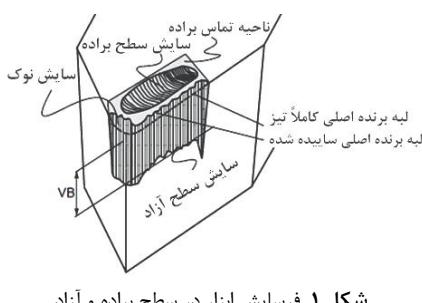
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جریان بدون بار، جریان در حین فرآیند و نرخ پیشروی به عنوان ورودی‌ها و مقدار نیروی پیشروی به عنوان خروجی در نظر گرفته شده بود [۲]. اوگدنگبه و همکارانش امکانپذیری پایش وضعیت ابزار فرزکاری میکرونی با استفاده سیگنال‌های جریان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش زمان ماشینکاری و سایش ابزار جریان موتور اسپیندل و متورهای پیشروی افزایش می‌یابد. نتایج تحلیل سیگنال در حوزه فرکانس نیز نشان داد در فرکانس مشخصی مقدار شدت فرکانس افزایش می‌یابد [۹]. بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی پایش وضعیت سایش ابزار، بر اساس اعمال فیلتر پایین گذر و سپس تحلیل سیگنال می‌باشد که این امر موجب حذف اطلاعات مربوط به هارمونیک‌ها در متورهای جریان تناوبی می‌شود. در مقاله حاضر تأثیر سایش و شکست ابزار بر تغییر شکل سیگنال جریان موتور اسپیندل در اثر تغییر هارمونیک‌های جریان بررسی گردیده سپس روشی بر اساس انترگال حاشیه ای زمان- فرکانس ارائه گردیده است. در روش پیشنهادی ابتدا تبدیل فوریه زمان کوتاه^۱ سیگنال محاسبه شده و پس از استخراج طیف نگاره زمان- فرکانس، انترگال حاشیه ای زمان- فرکانس سیگنال جریان محاسبه شده و از اختلاف این مقدار در حین برداه برداری با حالت بدون بار (قبل از درگیری ابزار با قطعه کار) مشخصه‌ای با قابلیت اطمینان بالا بدست آمده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی مواد و اینسربت‌های به کار رفته نشان داد با افزایش سایش و شکست ابزار، مشخصه پیشنهادی افزایش می‌یابد.

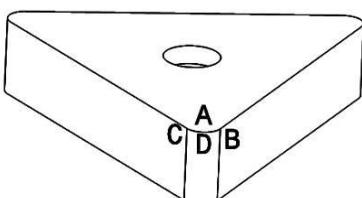
۲- اندازه گیری عمر ابزار

برای اندازه گیری عمر ابزار طبق استاندارد ایزو از یک ابزار تکله تراشکاری استفاده می‌شود. در این روش انواع مناطق فرسایش ابزار، براساس محل‌هایی که ابزار به آن‌ها تأثیر می‌گذارد، به دو ناحیه سایش سطح آزاد^۲ و سایش سطح برداه^۳ تقسیم بندی می‌شوند [۱۰]. در شکل ۱ این دو منطقه نشان داده شده است.

در شکل ۲ مناطق اصلی سایش روی لبه اینسربتها نشان داده شده است. (A) سطح برداه، (B) سطح آزاد پیشرو، (C) سطح آزاد پسرو و (D) شعاع نوک می‌یاشد.



شکل ۱ فرسایش ابزار در سطح برداه و آزاد



شکل ۲ مناطق سایش روی اینسربتها [۱۱]

2- Short-Time Fourier Transform
3- Flank wear
4- Crater wear

آسیب قابل توجهی به قطعه و ماشین ابزار شود. بنابر این نیاز به سیستمی جهت پایش وضعیت سایش ابزار با قابلیت اطمینان بالا می‌باشد. تکنیک‌های پایش وضعیت ابزار به دو دسته اصلی روش‌های مستقیم و روش‌های غیر مستقیم تقسیم می‌شوند. روش‌های مستقیم آن‌هایی هستند که اثرا نی که به طور مستقیم توسعه سایش ابزار ایجاد می‌شوند. روش‌های غیر مستقیم روش‌هایی بر اساس اندازه گیری تغییرات مشاهده منطقه سایش با استفاده از بینایی ماشین و اندازه گیری ابعادی قطعه کار. روش‌های غیر مستقیم روش‌هایی بر اساس اندازه گیری پارامترهایی هستند که به عنوان نتیجه فرعی سایش ابزار تغییر می‌کنند (مانند توان و جریان موتور، ارتعاشات و نیروها در حین ماشینکاری) [۱]. در فرآیند ماشینکاری، نیروهای برداه برداری خصوصاً پیشروی ارتباط نزدیکی با سایش سطح آزاد ابزار دارند. در بسیاری از تحقیقات انجام شده بر روی پایش وضعیت سایش ابزار استفاده از اندازه گیری نیروهای برداه برداری برای برآورد سایش ابزار پیشنهاد شده است. اما استفاده از دینامومتر برای اندازه گیری نیروهای ماشینکاری دارای هزینه بالایی است و علاوه بر این نیاز به نصب یک وسیله جانبی اضافی در قسمت ابزار گیر ماشین افزار می‌باشد. هزینه بالای سنسورهای نیرو، کاربرد آن‌ها در کاربردهای عملی (که هزینه سیستم پایش وضعیت ابزار در آنها ملاک اصلی می‌باشد) را نا صرفه می‌سازد. برای رفع این مشکل مطالعات مختلفی بر روی برآورد نیروی برشی با استفاده از سیگنال‌های جریان موتور ماشین افزار انجام شده است نتایج این تحقیقات نشان داده است همبستگی خوبی بین نیروهای برشی و جریان موتور وجود دارد که در نتیجه آن می‌توان سایش ابزار را تخمین زد [۲]. علاوه بر این استفاده از توان و جریان موتور جهت پایش وضعیت ابزار دارای این مزیت است که وسایل اندازه گیری آن فرآیند ماشینکاری را مختلط نمی‌کند [۳] و حتی می‌توان آن را در کنترل ماشین‌های کنترل عددی کامپیوتری به صورت یکپارچه در آورد [۴]. نتایج آزمایش‌های برداه برداری منان و همکارانش در فرآیندهای تراشکاری، فرزکاری و سوراخکاری نشان داد با افزایش سایش و شکست ابزار مقدار جریان موتور اسپیندل و پیشروی افزایش می‌یابد [۵]. کاسکا و همکارانش نامتقارنی^۱ در سیگنال جریان اسپیندل موتور را به عنوان شخصی جهت برآورد سایش ابزار معرفی نمودند [۶]. سالگادو و آلونسو ترکیبی از سیگنال‌های صدا و جریان موتور پیشروی را به منظور ارائه یک سیستم پایش وضعیت کم هزینه و کاربردی موردن استفاده قرار دادند [۷]. نیروی پیشروی ابزار را می‌توان تابعی از جریان موتور و پیشروی ابزار در نظر گرفت (رابطه (۱)) [۸]:

$$F_f = \Phi(\Delta I, f_r) \quad (1)$$

که در آن ΔI اختلاف بین جریان کلی اندازه گیری شده، I (جریان موتور پیشروی) و I_0 جریان بدون بار می‌باشد. مقدار I در حین فرآیند اندازه گیری شده و مقدار I_0 تابعی از نرخ پیشروی f_r می‌باشد. سالگادو و آلونسو رابطه (۲) را برای I_0 پیشنهاد نمودند:

$$I_0 = -0.0007f_r + 0.3378 \quad (2)$$

علاوه بر این نرخ پیشروی رابطه ای خطی با فرکانس سیگنال جریان دارد (رابطه (۳)):

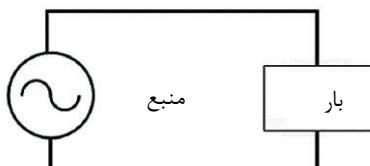
$$f_r = 0.3488f \quad (3)$$

سالگادو و همکارانش در کار دیگری به جای سیگنال صدا از سیگنال ارتعاشات استفاده نموده و به جای روابط (۲) و (۳) از شبکه عصبی مصنوعی جهت محاسبه نیروی پیشروی و در نهایت سایش ابزار استفاده نمودند. مقدار

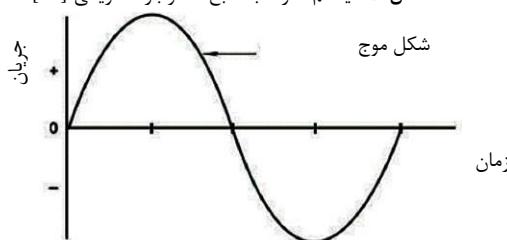


شکل ۴ تجهیزات به کار رفته در آزمایش‌های تجربی

۴- پایش وضعیت سایش ابزار با استفاده از اندازه گیری جریان موتور
یک سیستم قدرت با منبع جریان تناوبی و بار را در نظر بگیرید (شکل ۵). نوع بار اعمال شده بر کیفیت قدرت سیستم تاثیر می‌گذارد. علت این امر شکل موج جریان حاصل از نوع بار اعمال شده می‌باشد. بارهای خطی ذاتاً دارای جریانی سینوسی می‌باشند و در نتیجه شکل موج آن‌ها دارای اعوجاج نمی‌باشد (شکل ۶). بارهای غیر خطی جریانی را ترسیم می‌کنند که کاملاً سینوسی نیست (شکل ۷). از آنجایی که شکل موج جریان نسبت به موج سینوسی دارای انحراف می‌باشد، اعوجاج‌هایی در شکل موج جریان ایجاد می‌شود.



شکل ۵ سیستم قدرت با منبع AC و بار الکتریکی [۱۳]



شکل ۶ شکل موج سینوسی ایده‌آل [۱۳]

۱-۲- سایش در سطح براده
در سرعت‌های برشی بالا عامل تعیین کننده عمر ابزار، سایش در سطح براده می‌باشد. از آنجایی که هنگام براده برداری، حرکت براده بصورت مداوم روی سطح براده وجود دارد لذا مقداری از ذرات سطح براده در اثر این حرکت از روی ابزار جدا می‌شوند که نتیجه آن تشکیل حفره‌ای به نام گودال فرسایش می‌باشد. عمق گودال فرسایش معیار عمر ابزار برای ابزارهای کاربیدی می‌باشد.

۲- سایش در سطح آزاد یا کناری ابزار
چون در سطح آزاد ابزار، بین سطح تازه تراشیده شده و این سطح تماس دائم وجود دارد، لذا ابزار در اثر اصطکاک شروع به سایش نموده که مقدار این سایش یکی از معیارهای مهم عمر ابزار در سرعت‌های برشی پایین می‌باشد. در شکل ۳ نمودار سایش ابزار در سطح آزاد بر حسب زمان نشان داده شده است.

در این منحنی‌ها سه ناحیه مشاهده می‌شود:

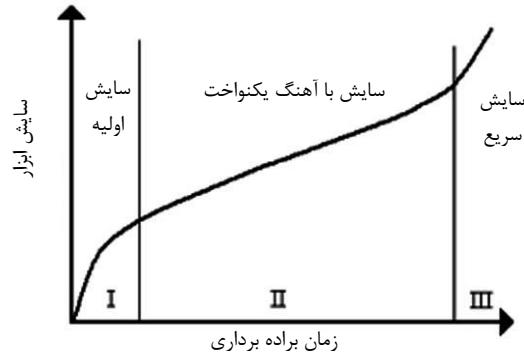
ناحیه I: ناحیه ابتدای سایش است.

ناحیه II: در این ناحیه فرسایش با نرخ یکنواخت ادامه پیدا می‌کند.

ناحیه III: در این ناحیه فرسایش به سرعت و با شتاب افزایش می‌باشد. شتاب در سایش ابزار در این ناحیه همراه با نیروهای برشی بالا، افزایش توان و جریان مصرفی موتور، دمای زیاد و ارتعاشات شدید همراه است که باستثنی ابزار هر چه سریعتر تعویض و یا تیز گردد، در غیر این صورت خواهد شکست.

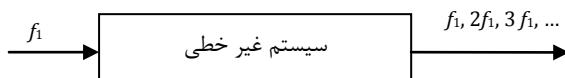
۳- تنظیمات تجربی

آزمایش‌های براده برداری توسط ماشین تراش تی ان ۵۰ دی و با استفاده از اینسیرت‌هایی از جنس کارباید پوشش دار و سرمت بر روی قطعاتی از جنس فولاد کم کربن و فولاد سخت‌کاری شده انجام شده است. به منظور اندازه گیری جریان موتور، از مبدل جریان از نوع فلوکه ۸۰۰- آی-۶۰۰ استفاده شده است (شکل ۴). سیگنال جریان موتور با استفاده از سیستم داده برداری ادونتک^۱ ۴۷۰۴ با نرخ ۴۰۰۰ نمونه در ثانیه نمونه برداری شده و با استفاده از برنامه‌نویسی انجام شده در نرم افزار لب و پو پردازش شده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج، ارتعاشات ابزار در راستای پیشروی با استفاده از شتاب سنج گلوبال تست^۲ ای‌پی ۹۸ اندازه گیری شده است. به منظور اندازه گیری سایش ابزار و همچنین ردیابی سایش و شکست ابزار از روی سطح قطعه کار از میکروسکوپ دیجیتال اینسایز^۳ انجام شده است.

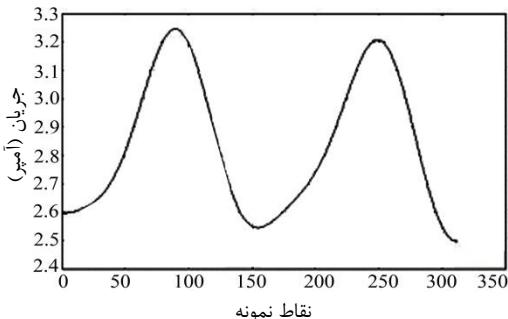


شکل ۳ منحنی سایش ابزار بر حسب زمان [۱۲]

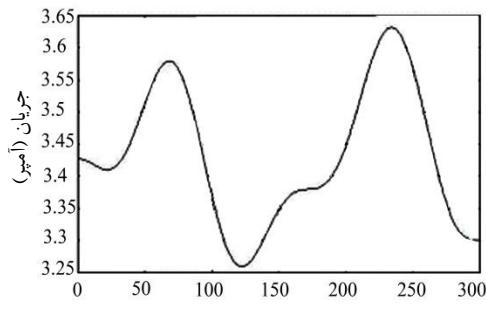
- 1- Advantech
- 2- Global Test
- 3- Insize



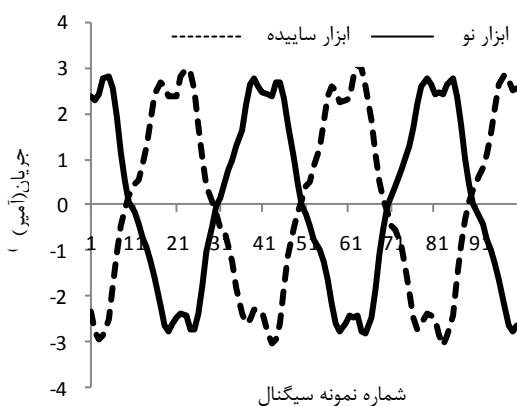
شکل ۸ هارمونیک‌ها در سیستم غیر خطی [۱۴]



شکل ۹ بخشی از سیگنال جریان موتور اسپیندل در براده برداری با ابزار نو [۶]



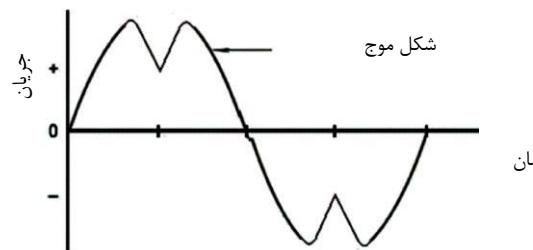
شکل ۱۰ بخشی از سیگنال جریان موتور اسپیندل در براده برداری با ابزار ساییده شده [۶].



شکل ۱۱ بخشی از سیگنال جریان موتور اسپیندل در حالت‌های ابزار نو و ساییده

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ طیف فرکانسی سیگنال‌های شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به طیف فرکانسی می‌توان تغییر شکل سیگنال پس از سایش ابزار را به افزایش هارمونیک‌ها در اثر غیر خطی تر شدن سیستم با سایش ابزار نسبت داد.

با مقایسه طیف فرکانسی سیگنال جریان موتور اسپیندل در براده برداری با ابزار نو و ابزار ساییده در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ می‌توان دریافت با سایش ابزار شدت فرکانس در هارمونیک‌های فرد افزایش می‌یابد. به منظور بررسی تأثیر سایش پیش‌رونده^۳ و شکست ابزار بر هارمونیک‌ها و اعوجاج سیگنال



شکل ۷ شکل موج دارای اعوجاج [۱۳]

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود اعوجاج شکل موج به طور موثری شکل سینوسی را تغییر می‌دهد. در واقع این موضوع بطبیعت پیچیدگی موج اصلی ندارد بلکه ناشی از ترکیب شکل موج‌های هارمونیک‌ها می‌باشد. هارمونیک‌ها دارای فرکانسی‌هایی با مضارب صحیح فرکانس اصلی دارند. به عنوان مثال برای شکل موج با فرکانس اصلی ۵۰ هرتز دومین، سومین، چهارمین و پنجمین مولفه‌های هارمونیک به ترتیب ۱۰۰ هرتز، ۱۵۰ هرتز، ۲۰۰ هرتز و ۲۵۰ هرتز می‌باشد. بنا بر این اعوجاج هارمونیک، میزان انحراف شکل موج از مقادیر سینوسی خالص در نتیجه مجموع همه این عناصر هارمونیک است. یک موج سینوسی ایده‌آل دارای مولفه‌های هارمونیک صفر می‌باشد. هنگامی که سیگنال $x(t)$ با فرکانس مشخص (به عنوان مثال f_1) از یک سیستم غیر خطی عبور می‌کند خروجی سیستم علاوه بر فرکانس ورودی (f_1) شامل هارمونیک‌های آن ($f_2 = 2f_1, f_3 = 3f_1, f_4 = 4f_1, \dots$) نیز می‌شود (شکل ۸). تعداد هارمونیک‌ها و مقدار آن‌ها به درجه غیر خطی بودن سیستم بستگی دارد. به طور کلی هر چه میزان غیر خطی بون بیشتر باشد فرکانس‌های هارمونیک بیشتر خواهد بود و بالعکس [۱۴].

یکی از معیارهای اعوجاج سیگنال تناوبی، اعوجاج هارمونیکی کلی^۱ می‌باشد. این معیار مجموع مولفه‌های فرکانسی شکل موج جریان در مقایسه با مولفه اصلی جریان می‌باشد(رابطه (۴)) [۱۳].

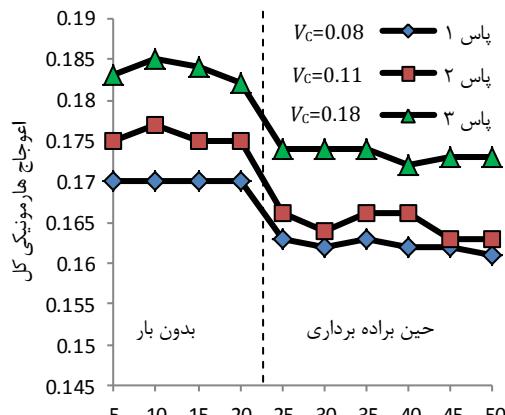
$$THD = \frac{\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2)}}{I_1} \times 100 \quad (4)$$

رابطه (۴) محاسبه اعوجاج هارمونیکی کلی از سیگنال جریان را نشان می‌دهد. هر چه قدر این مقدار بالاتر باشد مقدار اعوجاج در سیگنال اصلی بالاتر خواهد بود. اعوجاج هارمونیکی اثرات مخربی بر تجهیزات الکتریکی دارد. گاسکا و همکارانش بدون اشاره به تأثیر هارمونیک‌ها بر اعوجاج سیگنال، نامتقارنی^۲ در سیگنال جریان اسپیندل موتور را به عنوان شاخصی جهت برآورد سایش ابزار در فرآیند سوراخکاری معرفی نمودند [۶]. مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ اعوجاج بسیار زیاد شکل موج جریان پس از سایش ابزار در فرآیند سوراخکاری را نشان می‌دهد.

با توجه به مطلب ذکر شده، نامتقارنی یا اعوجاج سیگنال در شکل ۱۰ مربوط به هارمونیک‌های غیر اصلی در اثر افزایش بار غیر خطی ناشی از سایش ابزار می‌باشد. شکل ۱۱ سیگنال جریان موتور اسپیندل برای ابزار نو و ابزار ساییده شده در فرآیند تراشکاری قطعه ای از جنس فولاد کم کربن با استفاده از اینسرت از جنس کارباید پوشش دار را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود شکل این دو سیگنال هر چند دارای تشابه زیادی با یکدیگر است اما تفاوت‌هایی در قله سیگنال‌ها وجود دارد.

1- total harmonic distortion

2- maximum asymmetry



زمان بر حسب ثانیه (افزایش سایش ابزار)

شکل ۱۵ تغییرات اعوجاج هارمونیک کلی سیگنال جریان موتور اسپیندل بر حسب زمان براده برداری

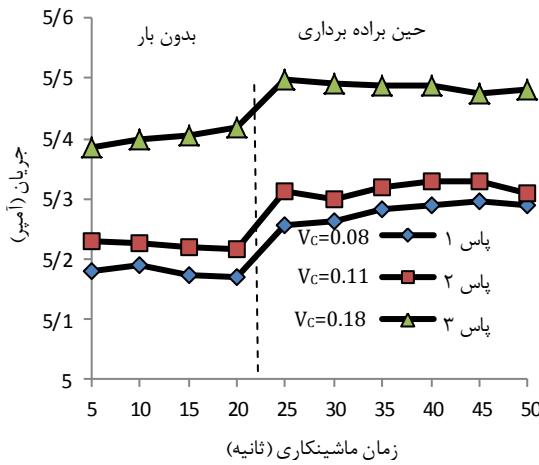
با توجه به رابطه ۴ و شکل ۱۵ کاهش مقدار THD را می‌توان به افزایش بیشتر هارمونیک اول جریان در مقایسه با سایر هارمونیک‌ها نسبت داد. در شکل ۱۷ تغییرات هارمونیک اول نشان داده شده است. با درگیری ابزار و سایش تدریجی ابزار مقدار هارمونیک اول جریان افزایش می‌یابد. شکل‌های ۱۸ تا ۲۰ تغییرات هارمونیک‌های غیر اصلی را نشان می‌دهد. همانطور در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌شود هارمونیک‌های دوم و سوم بر خلاف هارمونیک اول، تغییرات هارمونیک‌های غیر اصلی را نشان می‌دهند و در هارمونیک چهارم (شکل ۲۰)، تغییرات منظمی نسبت به سایش ندارند و در هارمونیک

چهارم (شکل ۲۰)، تغییراتی دیده نمی‌شود.

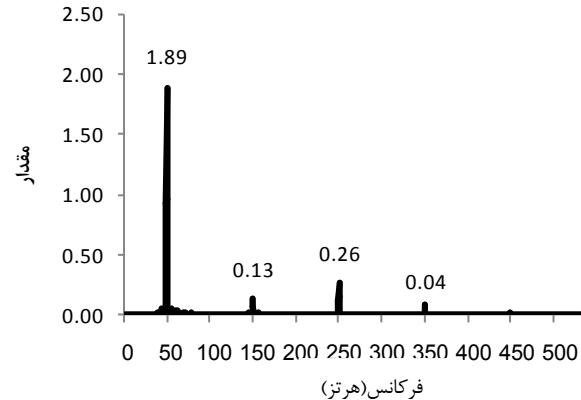
نکته قابل توجه در شکل‌های ۱۵ تا ۲۰ افزایش THD ، جریان و هارمونیک‌های جریان در قبل از شروع براده برداری (حالت بدون بار) در هر پاس در مقایسه با پاس قبلی می‌باشد. این امر قابلیت اطمینان سیستم پایش وضعیت ابزار بر اساس جریان موتور را کاهش می‌دهد زیرا این افزایش ناشی از سایش ابزار نیست بلکه ناشی افزایش ذاتی جریان در اثر افزایش دمای موتور می‌باشد.

۵- پایش وضعیت سایش ابزار با استفاده از انگرال حاشیه ای زمان- فرکانس سیگنال جریان

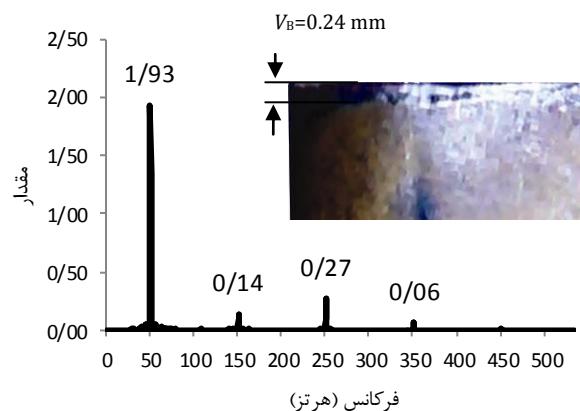
در این تحقیق به منظور پایش وضعیت سایش ابزار با استفاده از اندازه گیری



شکل ۱۶ تغییرات جریان موتور اسپیندل با زمان براده برداری



شکل ۱۲ طیف فرکانسی سیگنال جریان موتور اسپیندل (ابزار نو)



شکل ۱۳ طیف فرکانسی سیگنال جریان موتور اسپیندل (ابزار ساییده)

جریان موتور و ارائه روشهای کاربردی جهت برآورد وضعیت ابزار، آزمایش‌های براده برداری با ابزارها و قطعاتی از جنس‌های مختلف ادامه یافت. شکل ۱۴ سایش پیش‌رونده ابزاری از جنس سرمت بدون پوشش که بر روی قطعه ای از جنس فولاد سخت انجام شده را نشان می‌دهد همانطور که مشاهده می‌شود ابزار در سطح آزاد C دچار سایش شکافی شده است.

شکل ۱۵ تأثیر سایش ابزار بر اعوجاج هارمونیک کلی سیگنال جریان موتور اسپیندل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌شود پس از درگیری ابزار با قطعه کار، مقدار THD برخلاف تصویر قبلی به جای افزایش به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. با ادامه ماشینکاری و سایش تدریجی ابزار تغییرات چندانی در مقدار THD مشاهده نمی‌شود اما در ابتدای هر پاس مقدار THD بیشتر از مقدار آن در پاس قبلی می‌باشد.

شکل ۱۶ تغییرات جریان موتور با افزایش سایش ابزار را نشان می‌دهد. با درگیری ابزار، مقدار جریان مصرفی برخلاف THD افزایش می‌یابد و با افزایش سایش ابزار در هر پاس بر مقدار جریان موتور افزوده می‌شود. بنابرین مقدار THD شاخص مناسبی جهت تشخیص سایش ابزار نمی‌باشد.



ابزار ساییده ابزار نو

شکل ۱۴ سایش در سطح آزاد C ابزار از جنس سرمت بدون پوشش بر روی قطعه‌ای از جنس فولاد سخت (عمق ۵/۰، دور ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و پیشروی ۱۱۲ میلیمتر بر دور)

جریان موتور اسپیندل، از انگرال حاشیه ای زمان- فرکانس سیگنال جریان استفاده شده است. ابتدا تبدیل فوریه زمان کوتاه^۱ سیگنال محاسبه شده و پس از استخراج طیف نگاره زمان- فرکانس^۲، انگرال گیری در راستای زمان و سپس در راستای فرکانس اجام شده است. تبدیل فوریه زمان کوتاه با لغزاندن تابع پنجه در راستای محور زمان، تغییرات مولفه های فرکانسی در فواصل زمانی مختلف را محاسبه می کند. تعریف ریاضی تبدیل فوریه زمان کوتاه به صورت رابطه (۵) می باشد:

$$\text{STFT}\{x(t)\} = X(\tau, w) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t-\tau)e^{-j\omega t} dt \quad (5)$$

که در آن $x(t)$ سیگنال، $w(t)$ تابع پنجه و τ شخص زمانی می باشد.
با استفاده از طیف نگاره زمان- فرکانس توزیع انرژی درجه دوم سیگنال طبق رابطه (۶) در حوزه زمان- فرکانس محاسبه می شود. شکل ۲۱ طیف نگاره سیگنال جریان موتور را نشان می دهد.

$$\text{Sp}\{x(t)\} = |X(\tau, \omega)|^2 \quad (6)$$

انگرال حاشیه ای فرکانس نتیجه انگرال گیری طیف نگاره در راستای زمان می باشد. رابطه (۷) انگرال حاشیه ای را بیان می کند:

$$FMI = \int_{-\infty}^{+\infty} SP(t, w) dt \quad (7)$$

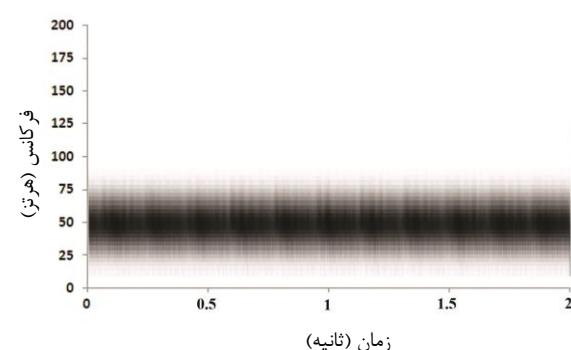
که در آن $SP(t, w)$ طیف نگاره سیگنال است.
با انگرال گیری از FMI در راستای فرکانس شاخص جدیدی برای سیگنال جریان بدست آید که اطلاعات زمان و فرکانس سیگنال جریان را توانما دارا می باشد(رابطه (۸)):

$$I_{FMI} = \int_{-\infty}^{+\infty} FMI(w) dw \quad (8)$$

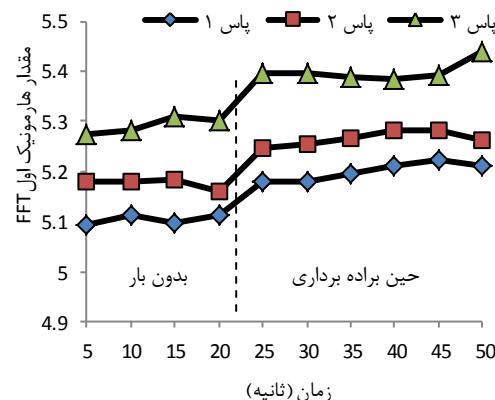
با کسر کردن مقدار پارامتر فوق در حالت بدون بار در ابتدای هر پاس از مقدار آن در حین براده فرآیند (I_{FMI0}) از خطای ناشی از افزایش جریان در اثر افزایش ذاتی دما در موتور کاسته می شود(رابطه (۹)):

$$\Delta I_{FMI} = I_{FMI} - I_{FMI0} \quad (9)$$

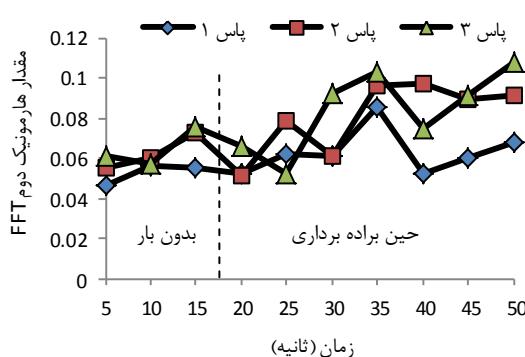
دلیل استفاده از انگرال حاشیه ای زمان فرکانس، پراکنده بودن فرکانس جریان در فرکانس اصلی ۵۰ هرتز می باشد. همانطور که در شکل ۲۱ مشاهده شد سیگنال جریان علاوه بر فرکانس اصلی ۵۰ هرتز دارای مولفه هایی در اطراف ۵۰ هرتز نیز می باشد. در مورد هارمونیک های غیر اصلی نیز این پراکنگی وجود دارد.



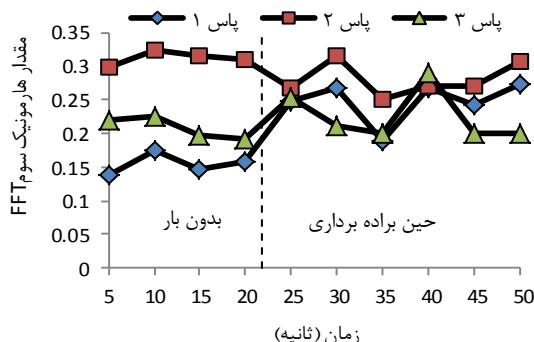
1- Short-Time Fourier Transform
2- Time Frequency Spectrogram



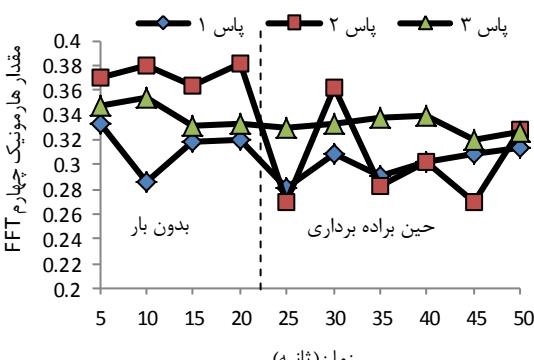
شکل ۱۷ تغییرات هارمونیک اول جریان موتور اسپیندل با زمان براده برداری



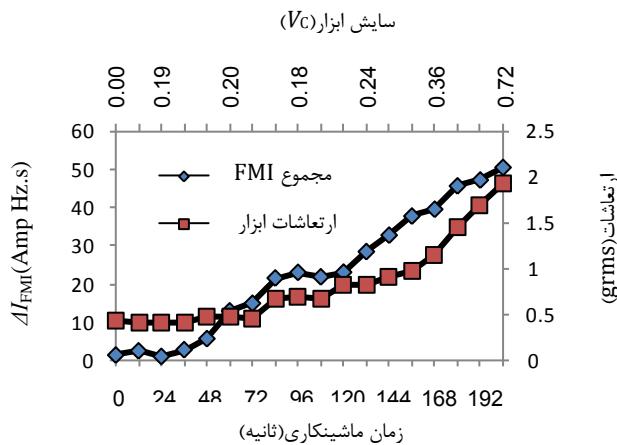
شکل ۱۸ تغییرات هارمونیک دوم جریان موتور اسپیندل با زمان براده برداری



شکل ۱۹ تغییرات هارمونیک سوم جریان موتور اسپیندل با زمان براده برداری



شکل ۲۰ تغییرات هارمونیک چهارم جریان موتور اسپیندل با زمان براده برداری

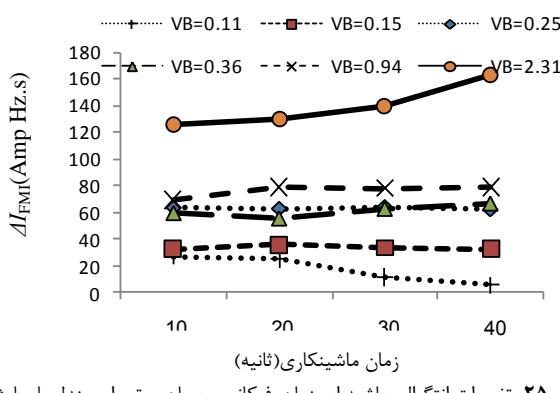


شکل ۲۴ تأثیر سایش ابزار بر انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس جریان موتور اسپیندل و ارتعاشات ابزار

روی قطعه ای از جنس فولاد کم کریں انجام شد. شکل ۲۵ تغییرات انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس جریان موتور اسپیندل با سایش ابزار در هر یک از اینسرت‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سایش ابزار افزایش ابزار انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس با افزایش سایش ابزار افزایش یافته است. علاوه بر این هر چه مقدار سایش ابزار بیشتر باشد مقدار تغییرات انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد.

۵- تشخیص شکست ابزار با استفاده از انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس شکل ۲۶ تغییرات ارتعاشات ابزار و اعواج هارمونیکی کل سیگنال جریان موتور اسپیندل در اثر شکست ابزار کاربایدی پوشش دار در تراشکاری قطعه فولادی سخت کاری شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با شکست ابزار ارتعاشات ابزار و اعواج هارمونیکی کل سیگنال به طور ناگهانی افزایش یافته و پس از شکست ابزار به دلیل تغییر هندسه ابزار، بار موتور دچار تغییراتی می‌شود. تصویر نشان داده شده بر روی نمودار، تصویر یافته سطح قطعه کار را نشان می‌دهد. در اثر شکست ابزار هندسه نوک ابزار تغییر کرده و در نتیجه آن علائم پیشروی ابزار بر روی سطح قطعه کار نیز تغییر می‌کند و بی نظم تر می‌شود. در اثر شکست ابزار عمق برش نیز کاهش یافته و مقدار جریان مصرفی موتور پس از شکست ابزار کاهش می‌یابد.

افزایش ناچیز در اعواج هارمونیکی کل سیگنال جریان در هنگام شکست ابزار مربوط به افزایش هارمونیک‌های غیر اصلی می‌باشد. شکل ۲۷ تغییرات جریان موتور و هارمونیک اول را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه



شکل ۲۵ تغییرات انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس جریان موتور اسپیندل با سایش ابزار

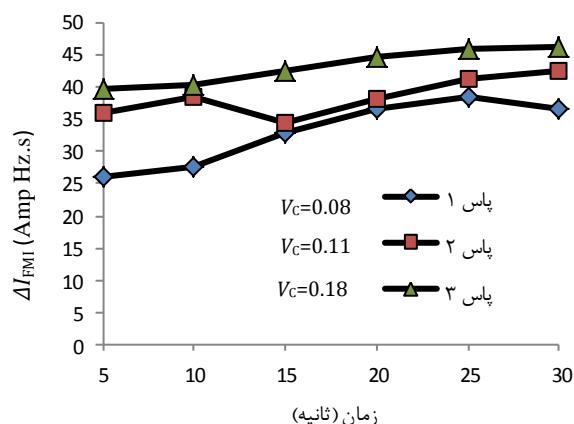
۵-۱- پایش وضعیت سایش ابزار با استفاده از انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس سیگنال جریان

شکل ۲۲ تأثیر سایش ابزار بر انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس سیگنال جریان موتور اسپیندل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان برداهی و سایش ابزار در هر پاس، مقدار انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس افزایش می‌یابد.

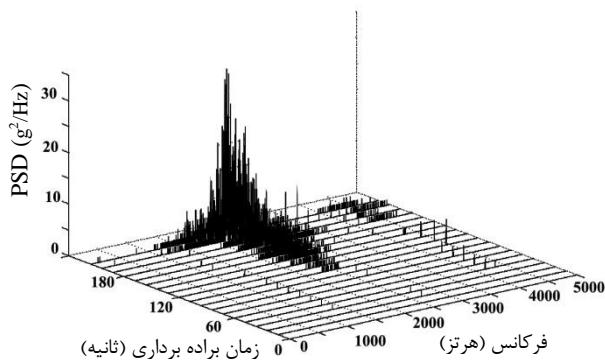
به منظور ارزیابی قابلیت روش پیشنهادی در تشخیص نقطه بحرانی سایش ابزار (ابتداً منطقه سوم سایش در شکل ۳)، آزمایش برداهی جریان مجدد با استفاده از اینسرتوی از جنس سرمت بدون پوشش بر روی فولاد سخت انجام شد نمودار آبشاری شکل ۲۳ افزایش ارتعاشات ناشی از سایش ابزار را نشان می‌دهد. در شکل ۲۳ سیگنال ارتعاشات ابزار در حوزه فرکانس نشان داده شده است. چگالی طیفی توان^۱ یک سیگنال تصادفی، چگونگی توزیع توان یک سیگنال در فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد.

شکل ۲۴ تغییرات ارتعاشات ابزار و انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس جریان موتور اسپیندل با افزایش سایش ابزار را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود سه ناحیه مجزای مربوط به سایش در هر دو نمودار قابل تفکیک است.

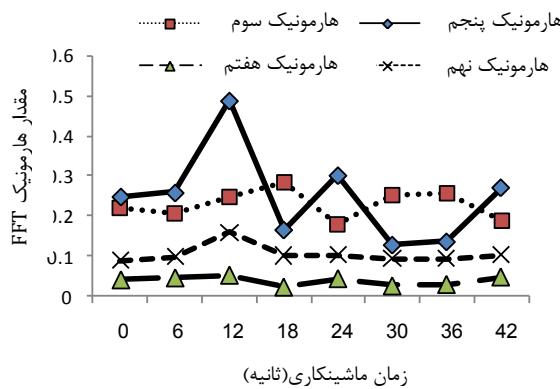
به منظور اطمینان از عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص سایش ابزار، آزمایش‌های برداهی با استفاده از اینسرتوهایی از جنس کارباید پوشش دار که دارای درجات مختلفی از سایش در سطح آزاد B اینسرت بودند بر



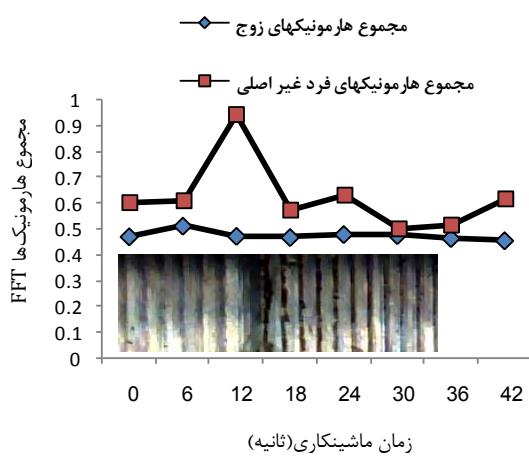
شکل ۲۲ تأثیر سایش ابزار بر انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس جریان موتور اسپیندل



شکل ۲۳ نمودار چگالی طیفی توان سیگنال ارتعاشات ابزار در راستای پیشروی (عمق ۰/۲، دور اسپیندل ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و پیشروی ۰/۱۲ میلیمتر بر دور)

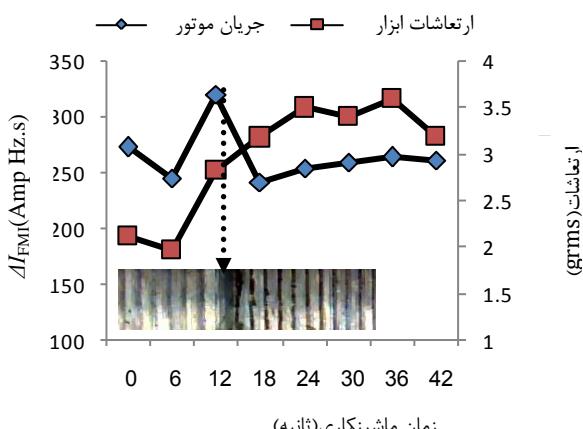


شکل ۲۹ تغییرات هارمونیکهای جریان موتور با شکست ابزار

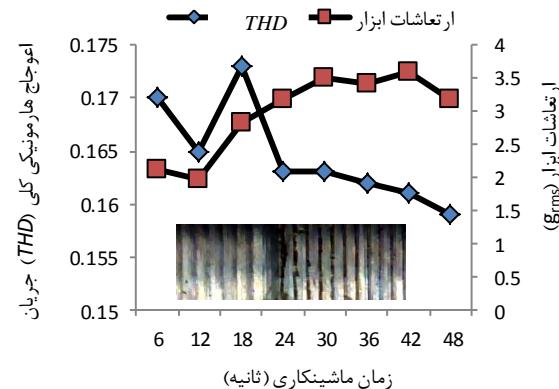


شکل ۳۰ تغییرات مجموع هارمونیکهای زوج و فرد جریان موتور با شکست ابزار

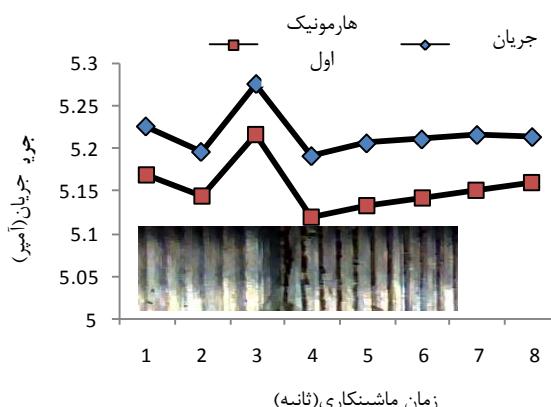
شکل ۳۱ تغییرات انگرال حاشیه ای زمان- فرکانس جریان با شکست ابزار را نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود مقدار انگرال حاشیه ای زمان- فرکانس جریان و ارتعاشات ابزار پس از درگیری اولیه ابزار با قطعه کار به دلیل شرایط پایدار تر فرآیند برداشت برداری کاهش یافته و پس از شکست ابزار به صورت ناگهانی افزایش یافته است. پس از شکست ابزار مقدار انگرال حاشیه ای زمان- فرکانس با شبیه ملایم افزایش یافته و ارتعاشات ابزار نیز همچنان افزایش می یابد.



شکل ۳۱ تغییرات انگرال حاشیه ای زمان- فرکانس جریان موتور با شکست ابزار

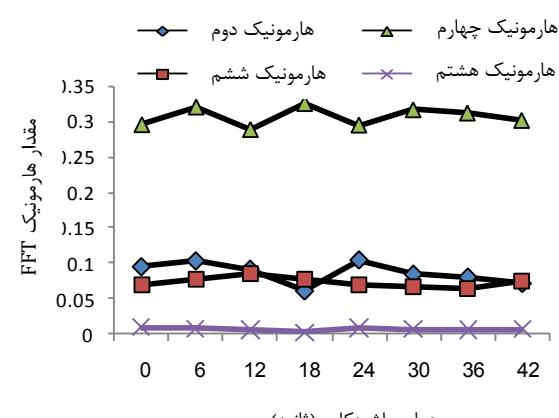


شکل ۲۶ تغییرات ارتعاشات ابزار و اعوаж اعوچ (THD) کل سیگنال جریان موتور اسپیندل در اثر شکست ابزار



شکل ۲۷ تغییرات جریان و هارمونیک اول جریان موتور با شکست ابزار

می شود به هنگام شکست ابزار، مقدار جریان و هارمونیک اول جریان افزایش یافته است. شکل های ۲۸ و ۲۹ تغییرات هارمونیکهای غیر اصلی را نشان می دهد. بر خلاف هارمونیکهای زوج هارمونیکهای فرد به هنگام شکست ابزار افزایش یافته است. در شکل ۳۰ مجموع هارمونیکهای زوج و فرد به صورت جداگانه نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود به هنگام شکست ابزار تنها هارمونیکهای فرد افزایش یافته و در مجموع هارمونیکهای زوج تغییری مشاهده نمی شود.



شکل ۲۸ تغییرات هارمونیکهای جریان موتور با شکست ابزار

با شبیه ملایمی افزایش می یابد . افزایش بیشتر هارمونیکهای فرد غیر اصلی در مقایسه با هارمونیک اصلی موجب افزایش THD در لحظه شکست ابزار می شود. نتایج مشابهی در مورد انتگرال حاشیه ای زمان- فرکانس سیگنال بدست آمد. با استفاده از انتگرال حاشیه ای زمان- فرکانس سیگنال جریان موتور اسپیندل می توان سایش و شکست ابزار را به خوبی تشخیص داد.

۷- مراجع

- [1] R. Teti, K. Jemielniak, G. Donnell, D. Dornfeld , Advanced monitoring of machining operations , *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 59, pp. 717-739, 2010.
- [2] D. R. Salgado, I. Cambero, J. M. H. Olivenza, J. G. Sanz-Calcedo, P. J. N. Lopez, E. G. Plaza, Tool wear estimation for different workpiece materials using the same monitoring system. *Procedia Engineering*, vol. 63, pp. 608-615, 2013.
- [3] G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, W. Ko" nig, R. Teti , Tool condition monitoring – The status of research and industrial application, *CIRP Annals*, Vol. 44, No.2, pp. 541-567, 1995.
- [4] R. T. R. Jesus, H. R. Gilberto, T. V. Ivan, J. C. J. Carlos, Driver current analysis for sensorless tool breakage monitoring of CNC milling machines, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* , pp. 1529–1534, Vol. 43, 2003.
- [5] M. A. Mannan, S. Broms and B. Lindstrom, "Monitoring and adaptive control of cutting process by means of motor power and current measurements, *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, Vol. 38, No. 1 , pp. 347-3501989.
- [6] L. A. Franco-Gasca, G. Herrera-Ruiz, R. Peniche-Vera, R. J. Romero-Troncoso, W. Leal-Tafolla, Sensorless tool failure monitoring system for drilling machines, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 3, pp. 381-386, 2006.
- [7] D. R. Salgadoa, F. J. Alonso, An approach based on current and sound signals for in-process tool wear monitoring, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.47, pp. 2140–2152, 2007.
- [8] X. Li, Development of current sensor for cutting force measurement in turning, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 54 (2005), pp. 289–296
- [9] T. I. Ogedengbe, R. Heinemann and S. Hinduja, Feasibility of tool condition monitoring on micro-milling using current signals, *AU JT*. 14(3), pp. 161-172, 2011.
- [10] International Organization for Standardization, *Tool-life testing with single-point turning tools*, ISO 3685,1993.
- [11] SANDVIK Coromant, Technical Editorial dept, *Modern Metal Cutting - A Practical Handbook*, Sweden, pp. 231-232, 1994.
- [12] M. H. Sadeghi, *Metal Cutting Principles*, Abed Publication, Tehran, pp. 184-185, 2011 (in Persian).
- [13] Total harmonic distortion and effects in electrical power systems - Associated Power Technologies.
- [14] M. L. Chugani, A. R. Samant, M. Cerna, *LabVIEW signal processing*, Pearson Education, pp 145- 148, 1998.

۶- نتیجه گیری

نتایج بررسی تشخیص سایش و شکست ابزار براده برداری با استفاده از تحلیل سیگنال جریان موتور اسپیندل جریان تناوبی نشان داد با افزایش سایش و شکست ابزار هارمونیکهای جریان موتور دچار تغییر می شود. افزایش اعوجاج هارمونیکی سیگنال جریان موتور که در سیستم های قدرت به عنوان معیاری برای افزایش بار غیر خطی موتور مورد استفاده قرار می گیرد در تشخیص سایش ابزار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش های تجربی نشان داد پارامتر اعوجاج هارمونیکی کل جریان پس از درگیری ابزار در قطعه کار برخلاف تصور به جای افزایش، کاهش می یابد و با افزایش سایش ابزار تغییرات چندانی در مقدار THD مشاهده نمی شود. بررسی دقیق تر هارمونیکهای جریان نشان داد با افزایش سایش ابزار هارمونیک اول جریان در مقایسه با سایر هارمونیکها به طور محسوسی افزایش می یابد و همین امر موجب کاهش مقدار THD پس از درگیری ابزار می شود. علاوه بر این افزایش سایر هارمونیکها هم‌زمان با افزایش هارمونیک اول موجب عدم تغییر در مقدار THD می شود. لذا پارامتر THD معیار مناسی جهت تشخیص سایش ابزار نمی باشد. نتایج بدست آمده نشان داد با استفاده از انتگرال حاشیه ای زمان- فرکانس سیگنال جریان می توان سایش ابزار را به خوبی تشخیص داد. در روش پیشنهادی ابتدا تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) سیگنال محاسبه شده و پس از استخراج طیف نگاره زمان- فرکانس، انتگرال حاشیه ای فرکانس سیگنال جریان با انتگرال گیری از طیف نگاره در راستای زمان محاسبه شده پس از انتگرال گیری مجدد در راستای فرکانس، از اختلاف این مقدار در حین براده برداری با حالت بدون بار (قبل از درگیری ابزار با قطعه کار) مشخصه ای با قابلیت اطمینان بالا بدست آمده است. نتایج آزمایش ها بر روی مواد و اینسیرت های به کار رفته نشان داد با افزایش سایش ابزار، مشخصه پیشنهادی افزایش می یابد. از مزایای روش سیستم پیشنهادی در تشخیص سایش ابزار، در نظر گرفتن مشخصه های سیگنال در حوزه زمان- فرکانس و کاهش تأثیر عوامل غیر مرتبط با سایش ابزار مانند افزایش ذاتی جریان موتور در اثر افزایش دما می باشد. نتایج تحلیل سیگنال جریان موتور اسپیندل در تشخیص شکست ابزار نیز نشان داد در لحظه شکست ابزار، مقدار هارمونیک اصلی و هارمونیکهای فرد به طور ناگهانی افزایش یافته و پس از کاهش اولیه