



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

بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۳، kkhali@birjand.ac.ir

چکیده

پایش وضعیت ابزار برشی یکی از عوامل مهم در فرآیند براده برداری می باشد. 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 می باشد. مزیت روش اندازه گیری جریان موتور در مقایسه با سایر روشهای پایش وضعیت ابزار، هزینه پایین سنسور آن و عدم ایجاد اختلال در فرآیند براده برداری می باشد. در این مقاله تاثیر سایش و شکست ابزار بر مشخصه های 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 اینسرت های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج نشان داد سیستم پیشنهادی با دقت مناسبی در کاربردهای عملی قابل استفاده می باشد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۳ خرداد ۱۳۹۳

پذیرش: ۲۳ تیر ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۱۷ آبان ۱۳۹۳

کلید واژگان:

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, kkhali@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

قطعه و ماشین ابزار می شود. از طرف دیگر اگر ابزار قبل از رسیدن به عمر واقعی آن تعویض شود هزینه ای غیر ضروری به ماشینکاری اضافه خواهد شد. در محیط های ساخت سنتی پایش وضعیت ابزار توسط اپراتورهای ماهر با استفاده از تجربه و بازرسی چشمی مستمر از سطح ابزار به منظور ارزیابی وضعیت ابزار استفاده می کنند انجام می شود. پایش وضعیت ابزار توسط انسان، گران و در مواردی دارای خطا نیز می باشد. این خطاها می تواند موجب

عمر ابزار از موضوعات مهم در ماشینکاری می باشد. عمر ابزار نشان دهنده عمر مؤثر 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 می شود بیان می گردد. اگر ابزار بعد از عمر مفید آن تعویض نشود، ممکن است قطعه کار از تیرانس 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)

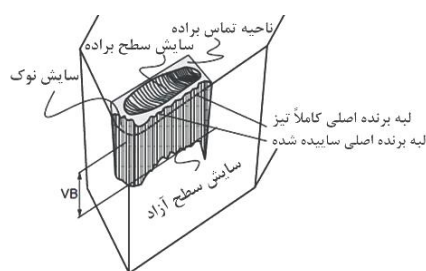
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 از سیگنال‌های جریان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش زمان ماشینکاری و سایش ابزار جریان موتور اسپیندل و موتورهای 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 پایین‌گذر و سپس تحلیل سیگنال می‌باشد که این امر موجب حذف اطلاعات مربوط به هارمونیک‌ها در موتورهای 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 انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس ارائه گردیده است. در روش پیشنهادی ابتدا تبدیل فوریه زمان کوتاه^۲ سیگنال محاسبه شده و پس از استخراج طیف نگاره زمان-فرکانس، انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس سیگنال جریان محاسبه شده و از اختلاف این مقدار در حین براده 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 اینسرت‌های به کار رفته نشان داد با افزایش سایش و شکست ابزار، مشخصه پیشنهادی افزایش می‌یابد.

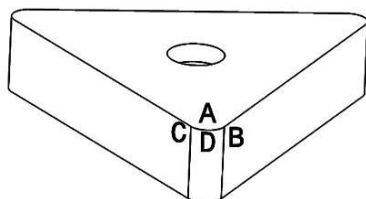
۲- اندازه‌گیری عمر ابزار

برای اندازه‌گیری عمر ابزار طبق استاندارد ایزو از یک ابزار تک‌لبه تراشکاری استفاده می‌شود. در این روش انواع مناطق فرسایش ابزار، براساس محل‌هایی که ابزار به آن‌ها تأثیر می‌گذارد، به دو ناحیه سایش سطح آزاد^۳ و سایش سطح براده^۴ تقسیم بندی می‌شوند [۱۰]. در شکل ۱ این دو منطقه نشان داده شده است.

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



شکل ۱ فرسایش ابزار در سطح براده و آزاد



شکل ۲ مناطق سایش روی اینسرت‌ها [۱۱]

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 اثراتی که به طور مستقیم توسط سایش ابزار ایجاد می‌شوند را تحلیل می‌کنند (مانند مشاهده منطقه سایش با استفاده از بینایی ماشین و اندازه‌گیری تغییرات ابعادی قطعه کار). روش‌های غیر مستقیم روش‌هایی بر اساس اندازه‌گیری 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 براده برداری خصوصاً نیروی پیشروی ارتباط نزدیکی با سایش سطح آزاد ابزار دارند. در بسیاری از تحقیقات انجام شده بر روی پایش وضعیت سایش ابزار استفاده از اندازه‌گیری نیروهای براده برداری برای برآورد سایش ابزار پیشنهاد شده است. اما استفاده از دینامومتر برای اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری آن فرآیند ماشینکاری را مختل نمی‌کند [۳] و حتی می‌توان آن را در کنترل ماشین‌های کنترل عددی کامپیوتری به صورت یکپارچه در آورد [۴]. نتایج آزمایش‌های براده 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 شاخصی جهت برآورد سایش ابزار معرفی نمودند [۶]. سالگادو و آونسو ترکیبی از سیگنال‌های صدا و جریان موتور پیشروی را به منظور ارائه یک سیستم پایش وضعیت کم هزینه و کاربردی مورد 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 اندازه‌گیری شده، I (جریان موتور پیشروی) و I_0 جریان بدون بار می‌باشد. مقدار I در حین فرآیند اندازه‌گیری شده و مقدار I_0 تابعی از نرخ پیشروی f_r می‌باشد. سالگادو و آونسو رابطه (۲) را برای I_0 پیشنهاد نمودند:

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

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

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

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

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

1- Maximum Asymmetry

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 کاربردی می‌باشد.

۲-۲- 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:

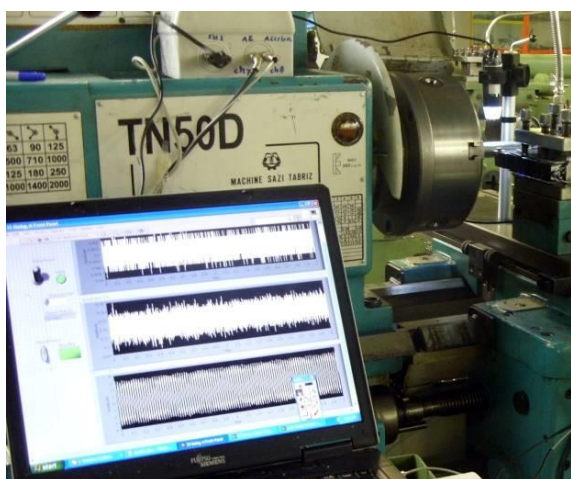
ناحیه I: ناحیه ابتدای سایش است.

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

ناحیه III: در این ناحیه فرسایش به سرعت و با شتاب افزایش می‌یابد. 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 بایستی ابزار هر چه سریعتر تعویض و یا تیز گردد، در غیر این صورت خواهد شکست.

۳- تنظیمات تجربی

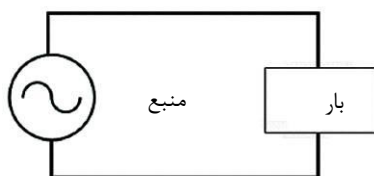
آزمایش‌های براده برداری توسط ماشین تراش تی ان ۵۰ دی و با استفاده از اینسرت‌هایی از جنس کارباید پوشش دار و سمرت بر روی قطعاتی از جنس فولاد کم کربن و فولاد سخت‌کاری شده انجام شده است. به منظور اندازه گیری جریان موتور، از میدل جریان از نوع فلوک ۸۰۰ آی-۶۰۰ استفاده شده است (شکل ۴). سیگنال جریان موتور با استفاده 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 ویو پردازش شده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج، ارتعاشات ابزار در راستای پیشروی با استفاده از شتاب سنج گلوبال تست^۲ آی‌پی ۹۸ اندازه گیری شده است. به منظور اندازه‌گیری سایش ابزار و همچنین ردیابی سایش و شکست ابزار از روی سطح قطعه کار از میکروسکوپ دیجیتال اینسایز^۳ انجام شده است.



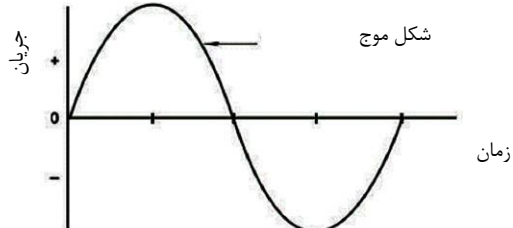
شکل ۴ تجهیزات به کار رفته در آزمایشهای تجربی

۴- پایش وضعیت سایش ابزار با استفاده از اندازه گیری جریان موتور

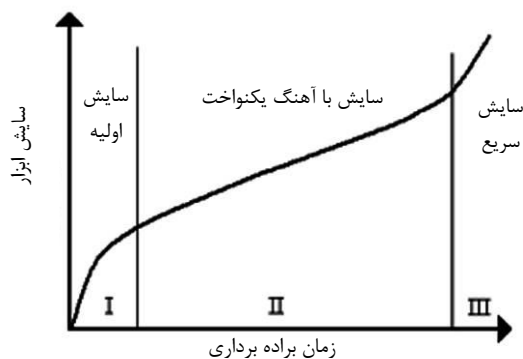
یک سیستم قدرت با منبع جریان تناوبی و بار را در نظر بگیرید (شکل ۵). نوع بار اعمال شده بر کیفیت قدرت سیستم تاثیر می‌گذارد. علت این امر شکل موج جریان حاصل از نوع بار اعمال شده می‌باشد. بارهای خطی ذاتاً دارای جریانی سینوسی می‌باشند و در نتیجه شکل موج آن‌ها دارای اعوجاج نمی‌باشد (شکل ۶). بارهای غیر خطی جریانی 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]

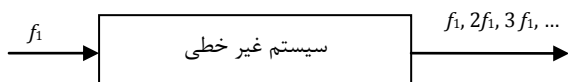


شکل ۶ شکل موج سینوسی ایده آل [۱۳]

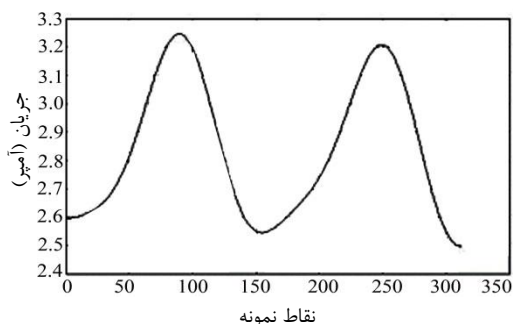


شکل ۳ منحنی سایش ابزار بر حسب زمان [۱۲]

1- Advantech
2- Global Test
3- Insize

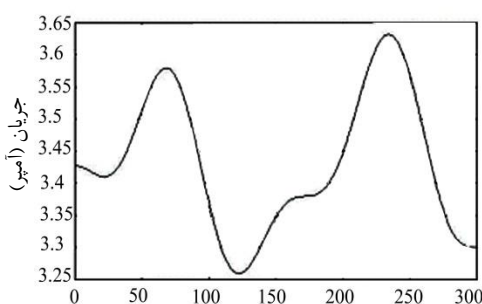


شکل ۸ هارمونیک‌ها در سیستم غیر خطی [۱۴]



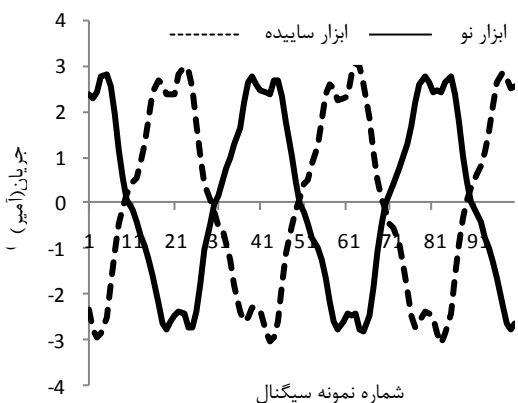
نقاط نمونه

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



نقاط نمونه

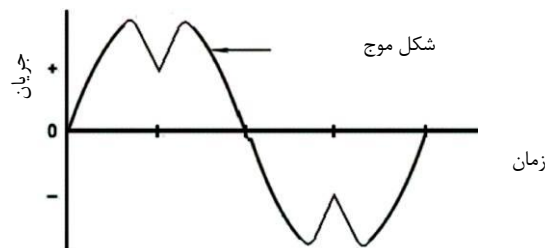
شکل ۱۰ بخشی از سیگنال جریان موتور اسپیندل در براده برداری با ابزار ساییده شده [۶]



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 پیش رونده^۳ و شکست ابزار بر هارمونیک‌ها و اعوجاج سیگنال



شکل ۷ شکل موج دارای اعوجاج [۱۳]

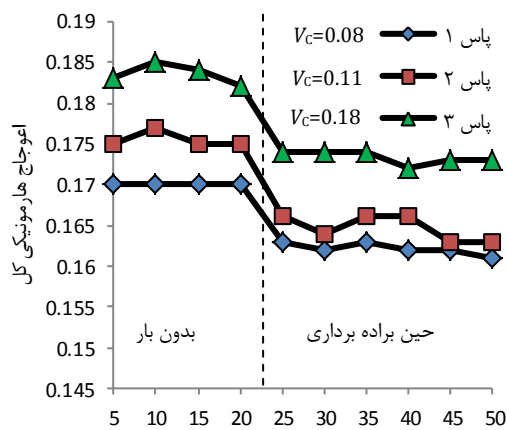
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود اعوجاج شکل موج به طور موثری شکل سینوسی را تغییر می‌دهد. در واقع این موضوع ربطی به پیچیدگی موج اصلی ندارد بلکه ناشی از ترکیب شکل موج‌های هارمونیک‌ها می‌باشد. هارمونیک‌ها دارای فرکانسی‌هایی با مضارب صحیح فرکانس اصلی شکل موج می‌باشد. به عنوان مثال برای شکل موج با فرکانس 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 ایده آل 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 بیشتری خواهد بود و بالعکس [۱۴].

یکی از معیارهای اعوجاج سیگنال تناوبی، اعوجاج هارمونیک 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 هارمونیک کلی از سیگنال جریان را نشان می‌دهد. هر چه قدر این مقدار بالاتر باشد مقدار اعوجاج در سیگنال اصلی بالاتر خواهد بود. اعوجاج هارمونیک 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 مطالب 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.



زمان بر حسب ثانیه (افزایش سایش ابزار)

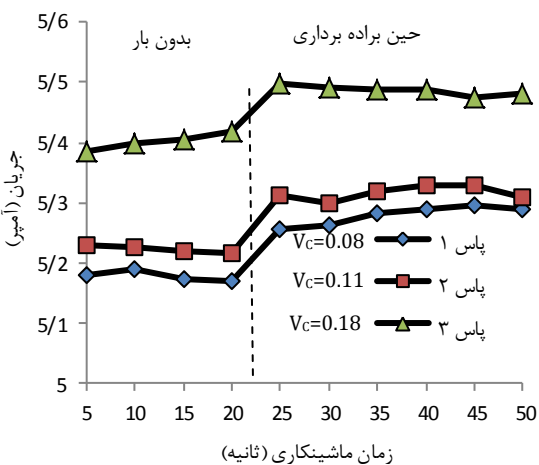
شکل ۱۵ تغییرات اعوجاج هارمونیک کلی سیگنال جریان موتور اسپیندل بر حسب زمان براده برداری

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 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 از افزایش ذاتی جریان در اثر افزایش دمای موتور می‌باشد.

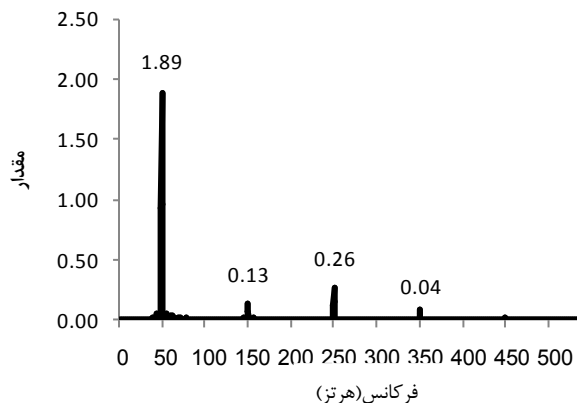
۵- پایش وضعیت سایش ابزار با استفاده از انتگرال حاشیه ای زمان- فرکانس سیگنال جریان

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

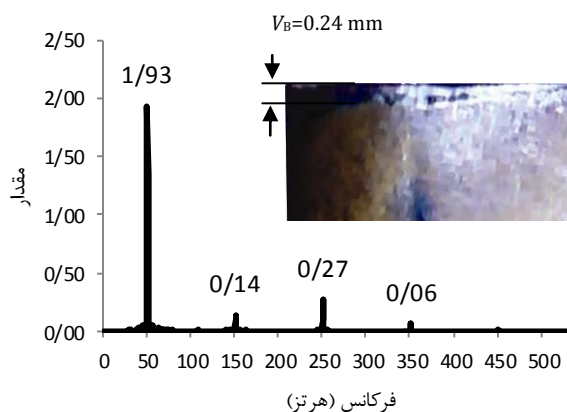


زمان ماشینکاری (ثانیه)

شکل ۱۶ تغییرات جریان موتور اسپیندل با زمان براده برداری



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

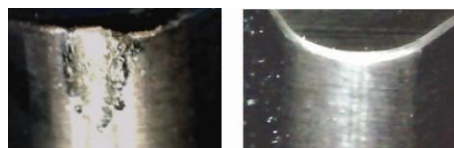


شکل ۱۳ طیف فرکانسی سیگنال جریان موتور اسپیندل (ابزار ساییده)

جریان موتور و ارائه روشی کاربردی جهت برآورد وضعیت ابزار، آزمایش‌های براده برداری با ابزارها و قطعاتی از جنس‌های مختلف ادامه یافت. شکل ۱۴ سایش پیش رونده ابزاری از جنس سمرت 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 بر خلاف تصور 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 بر خلاف THD افزایش می‌یابد و با افزایش سایش ابزار در هر پاس بر مقدار جریان موتور افزوده می‌شود. بنابراین مقدار THD شاخص مناسبی جهت تشخیص سایش ابزار نمی‌باشد.



ابزار ساییده

ابزار نو

شکل ۱۴ سایش در سطح آزاد C ابزار از جنس سمرت بدون پوشش بر روی

قطعه‌ای از جنس فولاد سخت (عمق ۰/۵، دور ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و پیشروی ۰/۱۲ میلیمتر بر دور)

جریان موتور اسپیندل، از انتگرال حاشیه‌ای 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، انتگرال گیری در راستای زمان و سپس در راستای فرکانس انجام شده است. تبدیل فوریه زمان کوتاه با لغزاندن تابع پنجره در راستای محور زمان، تغییرات مولفه‌های فرکانسی در فواصل زمانی مختلف را محاسبه می‌کند. تعریف ریاضی تبدیل فوریه زمان کوتاه به صورت رابطه (۵) می باشد:

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

که در آن $x(t)$ سیگنال، $w(t)$ تابع پنجره و τ شاخص 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.

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

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

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

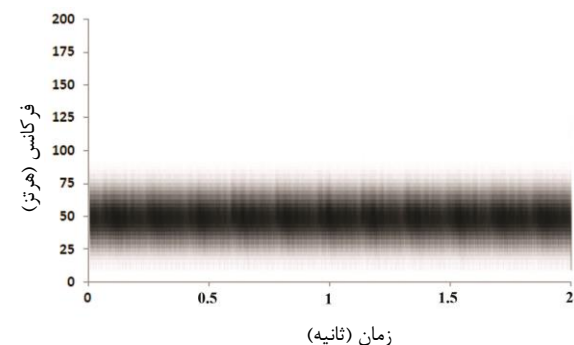
که در آن $SP(t, \omega)$ ، طیف نگاره سیگنال است. با انتگرال گیری از FMI در راستای فرکانس شاخص جدیدی برای سیگنال جریان بدست آید که اطلاعات زمان و فرکانس سیگنال جریان را تماماً دارا می باشد(رابطه(۸)):

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

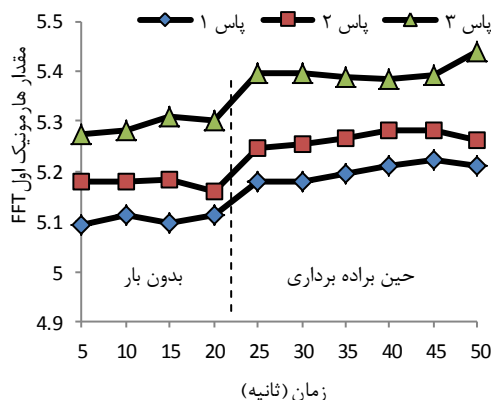
با کسر کردن مقدار پارامتر فوق در حالت بدون بار در ابتدای هر پاس (I_{FMIO}) از مقدار آن در حین براده فرآیند (I_{FMI}) از خطای ناشی از افزایش جریان در اثر افزایش ذاتی دما در موتور کاسته می شود(رابطه(۹)):

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

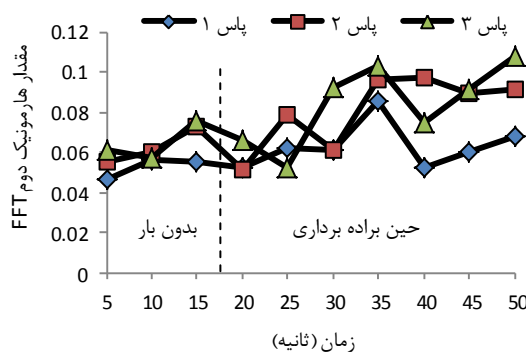
دلیل استفاده از انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس، پراکنده بودن فرکانس جریان در فرکانس اصلی ۵۰ هرتز می باشد. همانطور که در شکل ۲۱ مشاهده شد سیگنال جریان علاوه بر فرکانس اصلی ۵۰ هرتز دارای مولفه هایی در اطراف ۵۰ هرتز نیز می باشد. در مورد هارمونیک‌های غیر اصلی نیز این پراکنده‌گی وجود دارد.



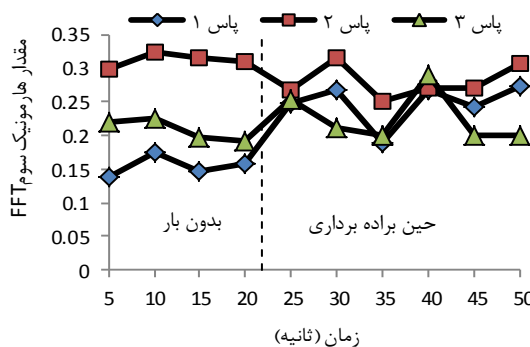
شکل ۲۱ طیف نگاره سیگنال جریان موتور اسپیندل



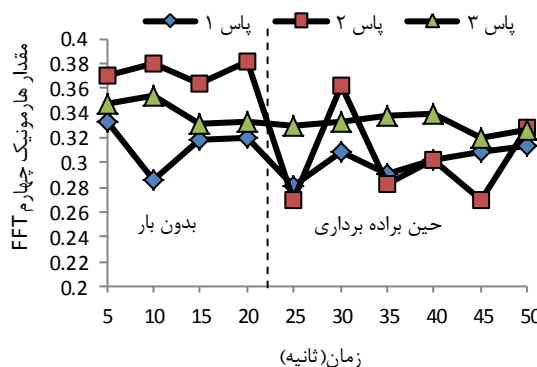
شکل ۱۷ تغییرات هارمونیک اول جریان موتور اسپیندل با زمان براده برداری



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

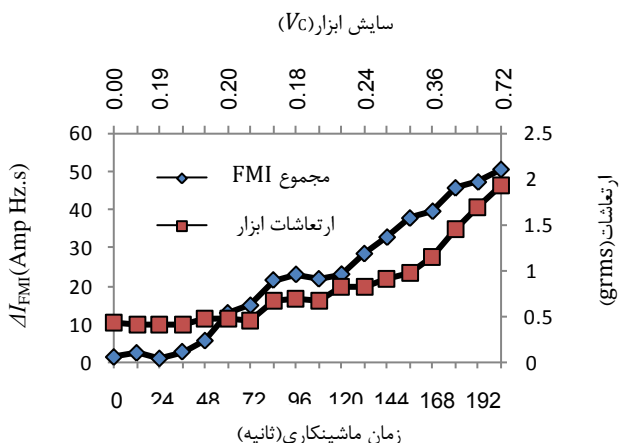


شکل ۱۹ تغییرات هارمونیک سوم جریان موتور اسپیندل با زمان براده برداری



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

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

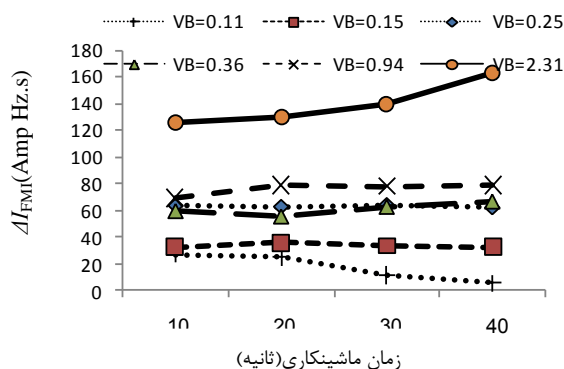


شکل ۲۲ تأثیر سایش ابزار بر انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس جریان موتور اسپیندل و ارتعاشات ابزار

روی قطعاتی از جنس فولاد کم کربن 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 مقدار انتگرال حاشیه‌ای 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.

۲-۵- تشخیص شکست ابزار با استفاده از انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس شکل ۲۶ تغییرات ارتعاشات ابزار و اعوجاج هارمونیک کل سیگنال جریان موتور اسپیندل در اثر شکست ابزار کاربیدی پوشش‌دار در تراشکاری قطعه فولادی سخت کاری شده را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با شکست ابزار ارتعاشات ابزار و اعوجاج هارمونیک 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 بافت 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 اعوجاج هارمونیک 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

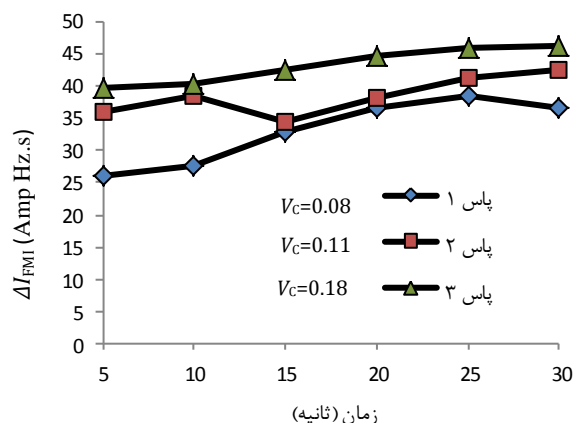
۱-۵- پایش وضعیت سایش ابزار با استفاده از انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس سیگنال جریان

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 براده برداری و سایش ابزار در هر پاس، مقدار انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس افزایش می‌یابد.

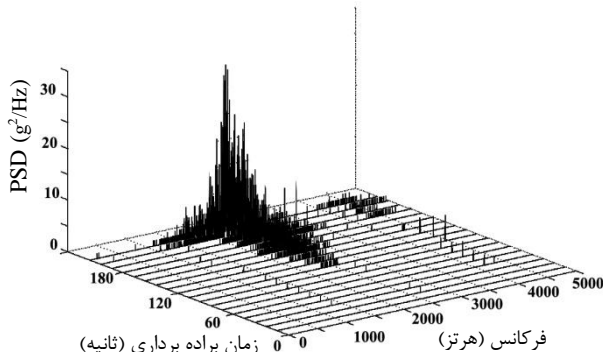
به منظور ارزیابی قابلیت روش پیشنهادی در تشخیص نقطه بحرانی سایش ابزار (ابتدای منطقه سوم سایش در شکل ۳)، آزمایش براده برداری مجدداً با استفاده از اینسرتی از جنس سمرت بدون پوشش بر روی فولاد سخت انجام شد نمودار آبشاری شکل ۲۳ افزایش ارتعاشات ناشی از سایش ابزار را نشان می‌دهد. در شکل ۲۳ سیگنال ارتعاشات ابزار 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 براده برداری با استفاده از اینسرت‌هایی از جنس کارباید پوشش دار که دارای درجات مختلفی از سایش در سطح آزاد B اینسرت بودند بر

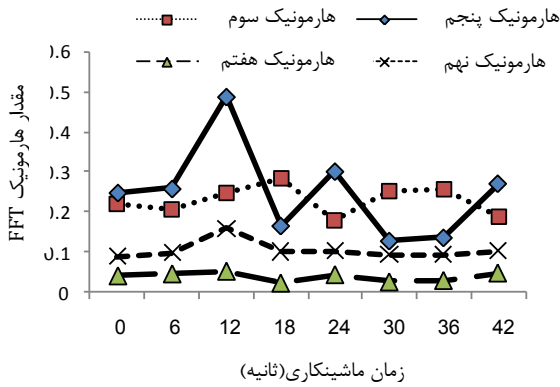


شکل ۲۴ تأثیر سایش ابزار بر انتگرال حاشیه ای زمان-فرکانس جریان موتور اسپیندل

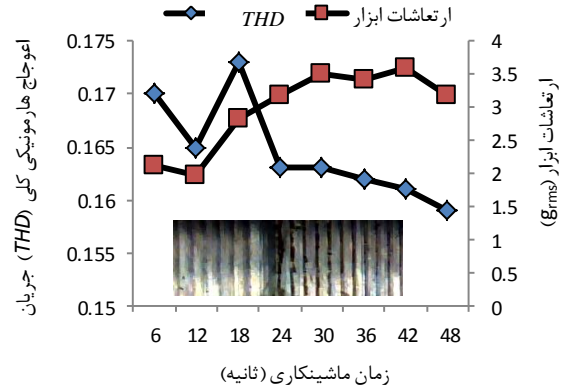


شکل ۲۳ نمودار چگالی طیف توان سیگنال ارتعاشات ابزار در راستای پیشروی (عمق ۰٫۲، دور اسپیندل ۱۰۰۰ دور بر دقیقه و پیشروی ۰٫۱۲ میلیمتر بر دور)

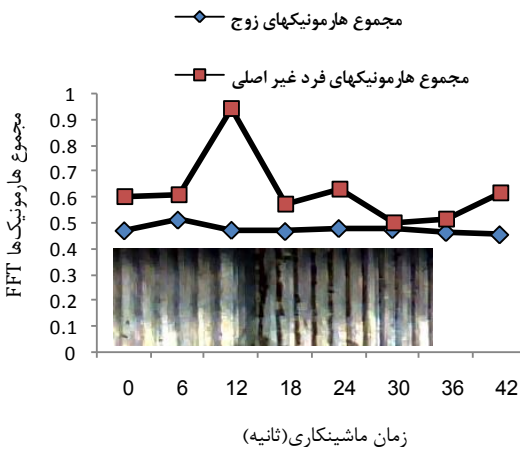
1- Power Spectral Density



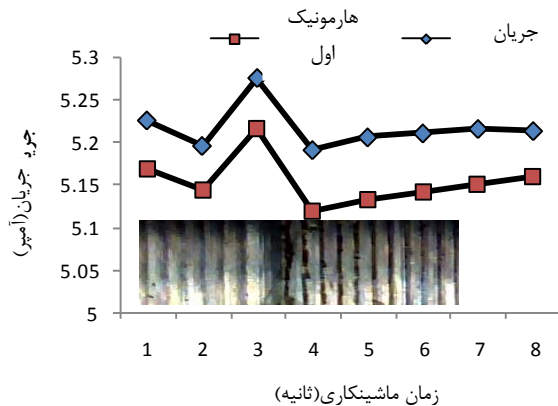
شکل ۲۹ تغییرات هارمونیکهای جریان موتور با شکست ابزار



شکل ۲۶ تغییرات ارتعاشات ابزار و اعوجاج هارمونیک کل سیگنال جریان موتور اسپیندل در اثر شکست ابزار



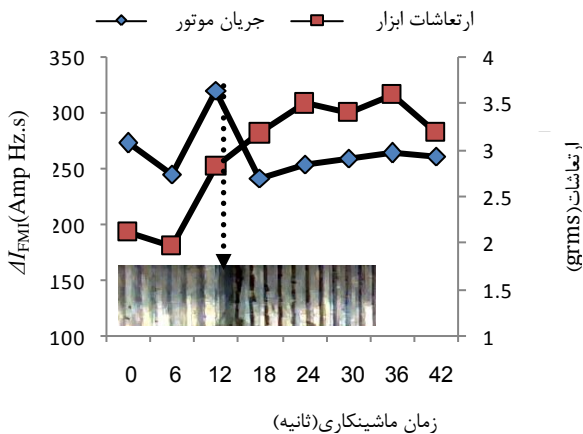
شکل ۳۰ تغییرات مجموع هارمونیکهای زوج و فرد جریان موتور با شکست ابزار



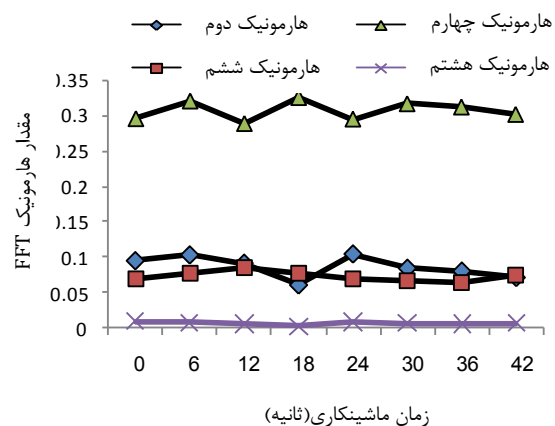
شکل ۲۷ تغییرات جریان و هارمونیک اول جریان موتور با شکست ابزار

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

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



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



شکل ۲۸ تغییرات هارمونیکهای جریان موتور با شکست ابزار

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 می‌شود. افزایش اعوجاج هارمونیک سیگنال جریان موتور که در سیستم‌های قدرت به عنوان معیاری برای افزایش بار غیر خطی موتور مورد استفاده قرار می‌گیرد در تشخیص سایش ابزار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داد پارامتر اعوجاج هارمونیک کل جریان پس از درگیری ابزار در قطعه کار بر خلاف تصور به جای افزایش، کاهش می‌یابد و با افزایش سایش ابزار تغییرات چندانی در مقدار *THD* مشاهده نمی‌شود. بررسی دقیق تر هارمونیک‌های جریان نشان داد با افزایش سایش ابزار هارمونیک اول جریان در مقایسه با سایر هارمونیک‌ها به طور محسوس افزایش می‌یابد و همین امر موجب کاهش مقدار *THD* پس از درگیری ابزار می‌شود. علاوه بر این افزایش سایر هارمونیک‌ها همزمان با افزایش هارمونیک اول موجب عدم تغییر در مقدار *THD* می‌شود. لذا پارامتر *THD* معیار مناسبی جهت تشخیص سایش ابزار نمی‌باشد. نتایج بدست آمده نشان داد با استفاده از انتگرال حاشیه ای زمان- فرکانس سیگنال جریان می‌توان سایش ابزار را به خوبی تشخیص داد. در روش پیشنهادی ابتدا تبدیل فوری 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 آزمایش‌ها بر روی مواد و اینسرت‌های به کار رفته نشان داد با افزایش سایش ابزار، مشخصه پیشنهادی افزایش می‌یابد. از مزایای روش سیستم پیشنهادی در تشخیص سایش ابزار، در نظر گرفتن مشخصه‌های سیگنال در حوزه زمان- فرکانس و کاهش تأثیر عوامل غیر مرتبط با سایش ابزار مانند افزایش ذاتی جریان موتور در اثر افزایش دما می‌باشد. 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

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. 347-350, 1989.
- [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. Salgado, F. J. Alonsob, 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 J.T.* 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.