عیب‌یابی ترکیبی بیرینگ غلتشی با دور ناپایدار با استفاده از روش تحلیلی دوگانه

مجید شاه‌قلی1\*، میلاد زرچی2

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

\* تهران، majid.shahgholi@sru.ac.ir

چکیده

بیرینگ غلتشی بحرانی‌ترین جزء ماشین دوار در صنایع مختلف محسوب می‌شود. بیرینگ‌ها معمول‌ترین علت خرابی و توقف ماشین‌آلات دوار می‌باشند. طبق آمارهای ارائه شده، حدود هفتاد درصد آسیب‌دیدگی و توقف سیستم دوار در نتیجه بیرینگ‌های معیوب ایجاد می‌شود. از این رو عیب‌یابی آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. با توجه به ناپایداری در شرایط کاری تجهیز دوار، این ماشین دوار در یک تجهیز صنعتی تحت شرایط دور متغیر کار می‌کند. از طرفی در شرایط واقعی حالت خرابی این ماشین بصورت ترکیبی در المان‌های مختلف آن وجود دارد. تکنیک‌های تحلیلی جهت شناسایی عیوب مختلف بیرینگ استفاده می‌گردد که برمبنای تاریخچه داده به دو دسته معین و نامعین تقسیم‌بندی می‌گردد. از طرفی برمبنای عملکرد آنها به دو شکل مشاهده‌ای و داده‌کاوی تعریف می‌گردند. در این مقاله از تکنیک جدیدی به‌نام تکنیک تحلیلی دوگانه برمبنای عملکردهای هم‌زمان استفاده می‌گردد. برای اعتبارسنجی این روش از یک بیرینگ غلتشی تحت تاریخچه داده معین بهره گرفته می‌شود. بدین شکل نشان داده می‌شود که استفاده از این روش دوگانه قابلیت اجرا و اثربخشی بالایی نسبت به روش‌های مشابه قبلی بر مبنای تکنیک‌های یگانه معین و نامعین دارد.

**کلی**د‌واژگ**ان**

عیب‌یابی بیرینگ غلتشی، روش تحلیلی دوگانه، حالت خرابی ترکیبی با دور متغیر

Combined diagnostics of rolling bearing with unstable speed using dual analytical method

Majid Shahgholi1\*, Milad Zarchi2

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

\*Tehran, Iran, majid.shahgholi@sru.ac.ir

Abstract

Rolling bearing are the most critical component of rotary machines in various industries. The bearings are the most common cause of breakdown and stop of rotating machines. According to the statistics provided, about seventy percent of breakdown of the rotating system are caused by defective bearings. Therefore, its diagnostics is very important. Due to the instability in the working conditions of the rotating equipment, this rotating machine works in an industrial equipment under variable speed conditions. On the other hand, in real conditions, the failure mode of this machine exists in a combination of its various elements. Analytical techniques are used to identify various defects in bearings, which are divided into definite and indefinite categories based on data history. On the other hand, based on their performance, they are defined in two forms: observation-based and data mining-based approaches. In this paper, a new technique called dual analytical technique based on simultaneous performances is used. To validate this method, a rolling bearing under a certain data history is used. Thus, it is shown that the usage of this dual method has high applicability and effectiveness compared to previous similar methods based on determinate and indeterminate single techniques.

Keywords

Rolling Bearings Diagnostics, Dual Analytical Method, Variable Speed Combined Failure Mode

1. مقدمه

ابزارهای مختلف تشخیصی برای شناسایی آسیب در ماشین آلات وجود دارد که متداول ترین آنها ابزارهای مبتنی بر ارتعاش هستند. با استفاده از داده های جمع آوری شده از لرزش اجزای معیوب، الگوریتم هایی برای تشخیص زمان وقوع آسیب ایجاد شده اند. در طول 25 سال گذشته ، الگوریتم های متعدد مبتنی بر ارتعاش برای شناسایی عیوب ایجاد شده است. متأسفانه، تا به امروز، یک پایگاه داده کامل از الگوریتم‌های ارتعاش موجود به همراه قابلیت‌ها و محدودیت‌های آنها دردسترس نیست. یک بررسی مناسب از روش های اندازه گیری ارتعاش برای تشخیص نقص در اجزای دوار ارائه شده است [1]. روشهای مانیتورینگ اعمال شده بر روی سیستم های دوار به روشهای مختلفی قابل دستیابی است [2] ، استفاده از بعضی از روشها ساده است و سایر روشها نیاز به پردازش سیگنال پیچیده دارند. شوک ها معمولاً در حضور ضربه ایجاد می شوند و می توانند در حوزه زمان تجزیه و تحلیل شوند [3] و دامنه حداکثر اوج سطح ارتعاش ، فاکتور کرست و کورتوسیس ، تشخیص امواج شوک و روش جولین [4] ، آماری پارامترهای اعمال شده به سیگنال زمان ، کپستروم یا در دامنه فرکانس (تجزیه و تحلیل طیفی در اطراف فرکانسهای نقص) [5] ، طیف فرکانس در دامنه فرکانس بالا ، انرژی[6] ، تخریب مجدد فرکانس بالا [7] ، انتشار صوتی [8] ، فیلتر تطبیقی ​​، شبکه های عصبی مصنوعی ، فرکانس زمانی [9] و غیره. کاربرد شبکه عصبی مصنوعی ها در زمینه شناسایی خودکار عیب و تشخیص ماشین آلات چرخان اهمیت یافته است [10-14]. شبکه های عصبی از مزایای یادگیری تطبیقی ​​، تعمیم غیرخطی ، تحمل خطا ، مقاومت در برابر داده های پر سر و صدا و توانایی های محاسبه موازی برخوردار هستند[15-17].

در روش پیشنهادی در این مقاله، از داده های مربوط به عیوب ترکیبی بیرینگ غلتشی تحت دور کاری متغیر بعنوان داده های ارتعاشی در شرایط واقعی استفاده شده است. همچنین از تکنیک تحلیلی دوگانه شامل روش تحلیلی برمبنای مشاهده و داده کاوی بطور همزمان برای بالابردن دقت الگوی تشخیص به عنوان نوآوری اصلی پژوهش نسبت به روش های پیشین بهره گرفته شده است.

1. تحلیل خرابی بیرینگها

بیرینگ ها معمول ترین علت خرابی و توقف ماشین آلات دوار می باشند. طبق آمارهای ارائه شده، حدود هفتاد درصد آسیب دیدگی و توقف سیستم دوار در نتیجه بیرینگ های معیوب ایجاد می شود. تاریخچه تجزیه و تحلیل طیف فرکانسی ارتعاش بیرینگ ها به مطالعات معروف و موفق مک فادنز برای عیب یابی اجزای بیرینگ بر میگردد. بطور کلی تغییر سطح ارتعاشات کلی بیرینگ ها در مراحل اولیه خرابی غیرقابل تشخیص است، اما خصوصیات فرکانس ارتعاشی منحصر به فرد هر یک از اجزای بیرینگ، تجزیه و تحلیل اسپکتروم طیف فرکانس ارتعاشی را به دو منظور تشخیص زودهنگام عیب و تجزیه و تحلیل عیب به ابزار موثری تبدیل کرده است. هنگامی که یک عیب در سطوح تماس بوجود می آید، ضربه هایی به مجموعه وارد می نماید. این ضربه ها به طور متناوب تولید می شوند و فرکانس تولیدی آنها، فرکانس مشخصه عیب نامیده می شود که با دانستن ابعاد و سرعت چرخشی آن جزء، خواه رینگ داخلی یا خارجی و خواه قفسه و رولرها مشخص می گردد. اسپکترام منحنی طیف فرکانسی ارتعاش یک بیرینگ معیوب معمولا پیک هایی در BPFI, BPFO, BSF, FTF دارد. تحلیل درست خرابی بیرینگ به تحلیل گر کمک می کند تا درباره تعویض و یا ادامه کار بیرینگ تصمیم گیری کند. در صورت هرگونه عیب، در اسپکترام طیف فرکانسی مربوط به بیرینگ معیوب، قله های مربوط به فرکانس های عیب بیرینگ و همچنین هارمونیک های آن مشاهده خواهد شد.

1. روش تحلیلی بر مبنای مشاهده و داده کاوی

در این پژوهش از روشهای تحلیلی مشاهده ای در حوزه زمان و همچنین حوزه زمان – فرکانس استفاده شده است. از طرفی با توجه به خصوصیات دینامیکی عیب بیرینگ غلتشی، از ویژگی های زیر برای داده کاوی در این پژوهش بهره گرفته شده است:

1. ویژگی های آماری شامل ماکزیموم، میانگین، جذر میانگین مربعات، انحراف معیار، انرژی، آنتروپی، کرتوسیس، چولگی، فاکتور قله، و فاکتور ضربه
2. ویژگی های موجک شامل فیلترهای مرتبه پنجم
3. روش تحلیلی بر مبنای تکنیک دوگانه

در این پژوهش از تکنیک جدید تحلیلی دوگانه به عنوان رویکرد تشخیص الگو استفاده میگردد بطوریکه از ترکیب ویژگی های آماری و موجک در کنار روشهای مشاهده ای جهت شناسایی عیوب بیرینگ غلتشی بهره گرفته می شود.

1. ستاپ آزمایشگاهی

مطابق شکل 1، داده‌ها شامل سیگنال‌های ارتعاشی جمع‌آوری شده از بیرینگ‌ها با شرایط سلامت مختلف تحت شرایط سرعت چرخشی متغیر زمانی می باشد. در کل شصت مجموعه داده وجود دارد. برای هر مجموعه داده، دو تنظیم آزمایشی وجود دارد: شرط سلامت بیرینگ و شرط سرعت متغیر. شرایط سلامت بیرینگ شامل موارد زیر است:

1. سالم
2. معیوب با خرابی رینگ داخلی
3. معیوب با خرابی رینگ خارجی
4. معیوب با خرابی ساچمه
5. معیوب با خرابی ترکیبی

شرایط سرعت چرخشی عملیاتی به قرار زیر است:

1. سرعت افزایشی
2. سرعت کاهشی
3. سرعت افزایشی سپس کاهشی
4. سرعت کاهشی سپس افزایشی

بنابراین بیست مورد مختلف برای مطالعه بر حسب تنظیم‌های مختلف آزمایشی وجود دارد. جهت اطمینان از صحت داده‌ها، برای هر تنظیم آزمایشگاهی 3 مرتبه نمونه‌برداری شده است که منجر به شصت مجموعه داده در کل می‌گردد. هر مجموعه داده شامل دو کانال است. کانال 1 داده ارتعاشی اندازه‌گیری شده بوسیله شتاب‌سنج و کانال 2 داده سرعت چرخشی اندازه‌گیری شده توسط انکودر می باشد. فرکانس نمونه برداری کلیه داده‌ها 200 کیلوهرتز و طول نمونه‌برداری 10 ثانیه در نظر گرفته شده است. تعداد سیکل‌ها در هر چرخش برای انکودر 1024 است.

|  |
| --- |
| Diagram  Description automatically generated |
| شکل 1: تست ریگ آزمایشگاهی برای عیوب ترکیبی بیرینگ غلتشی |

1. نتایج تحلیلی بر مبنای مشاهده در حوزه زمان جهت شناسایی عیوب بیرینگ غلتشی

در شکل های 2 تا 6، نمودارهای مشاهده ای در حوزه زمان جهت شناسایی عیوب پنچگانه بیرینگ غلتشی تحت دور کاری افزاینده، کاهنده، افزاینده و سپس کاهنده و نیز کاهنده و سپس افزاینده نمایش ارائه شده است.

|  |
| --- |
| Chart  Description automatically generated |
| شکل 2: نمودار زمانی ارتعاشات برای بیرینگ سالم تحت سرعت چهارگانه |

|  |
| --- |
| Chart  Description automatically generated |
| شکل 3: نمودار زمانی ارتعاشات برای عیب ساچمه بیرینگ تحت سرعت چهارگانه |

|  |
| --- |
| Chart  Description automatically generated |
| شکل 4: نمودار زمانی ارتعاشات برای عیب رینگ داخلی بیرینگ تحت سرعت چهارگانه |

|  |
| --- |
| Chart  Description automatically generated |
| شکل 5: نمودار زمانی ارتعاشات برای عیب رینگ خارجی بیرینگ تحت سرعت چهارگانه |

|  |
| --- |
| Chart  Description automatically generated |
| شکل 6: نمودار زمانی ارتعاشات برای عیب ترکیبی بیرینگ تحت سرعت چهارگانه |

همانطور که نتایج نشان می دهد، طبقه بندی کلاس های خرابی بر مبنای تکنیک مشاهده ای در حوزه زمان تحلیلی دارای عملکردی پایینی می باشد.

1. نتایج تحلیلی بر مبنای مشاهده در حوزه زمان – فرکانس جهت شناسایی عیوب بیرینگ غلتشی

در شکل های 7 تا 11، نمودارهای مشاهده ای در حوزه زمان – فرکانس جهت شناسایی عیوب پنچگانه بیرینگ غلتشی تحت دور کاری افزاینده، کاهنده، افزاینده و سپس کاهنده و نیز کاهنده و سپس افزاینده نمایش داده شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 7: نمودار زمان – فرکانس ارتعاشات برای بیرینگ سالم تحت سرعت چهارگانه |

|  |
| --- |
| Graphical user interface, chart, bar chart  Description automatically generated |
| شکل 8: نمودار زمان – فرکانس ارتعاشات برای عیب ساچمه بیرینگ تحت سرعت چهارگانه |

|  |
| --- |
| Chart, bar chart  Description automatically generated |
| شکل 9: نمودار زمان – فرکانس ارتعاشات برای عیب رینگ داخلی بیرینگ تحت سرعت چهارگانه |

|  |
| --- |
| Graphical user interface, chart, bar chart  Description automatically generated |
| شکل 10: نمودار زمان – فرکانس ارتعاشات برای عیب رینگ خارجی بیرینگ تحت سرعت چهارگانه |

|  |
| --- |
| Graphical user interface, chart, bar chart  Description automatically generated |
| شکل 11: نمودار زمان – فرکانس ارتعاشات برای عیب ترکیبی بیرینگ تحت سرعت چهارگانه |

همانطور که نتایج نشان می دهد، طبقه بندی کلاس های خرابی بر مبنای تکنیک مشاهده ای در حوزه زمان – فرکانس تحلیلی دارای عملکردی پایینی می باشد.

1. نتایج تحلیلی بر مبنای داده کاوی با استفاده از ویژگی های آماری و موجک جهت شناسایی عیوب بیرینگ غلتشی

در شکل های 12 تا 26، نمودارهای تحلیلی برمبنای داده کاوی در حوزه زمان جهت شناسایی عیوب پنچگانه بیرینگ غلتشی تحت دور کاری افزاینده، کاهنده، افزاینده و سپس کاهنده و نیز کاهنده و سپس افزاینده نمایش داده شده است.

|  |
| --- |
|  |
| شکل 12: نمودار تغییرات ویژگی آماری crest برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 13: نمودار تغییرات ویژگی آماری energy برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 14: نمودار تغییرات ویژگی آماری entropy برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 15: نمودار تغییرات ویژگی آماری impulse برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 16: نمودار تغییرات ویژگی آماری kurtosis برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 17: نمودار تغییرات ویژگی آماری max برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 18: نمودار تغییرات ویژگی آماری mean برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 19: نمودار تغییرات ویژگی آماری rms برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 20: نمودار تغییرات ویژگی آماری skewness برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 21: نمودار تغییرات ویژگی آماری std برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 22: نمودار تغییرات ویژگی آماری fw1 برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 23: نمودار تغییرات ویژگی آماری fw2 برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 24: نمودار تغییرات ویژگی آماری fw3 برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 25: نمودار تغییرات ویژگی آماری fw4 برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

|  |
| --- |
|  |
| شکل 26: نمودار تغییرات ویژگی آماری fw5 برای عیوب پنجگانه تحت دور کاری متغیر |

همانطور که نتایج نشان می دهد، طبقه بندی کلاس های خرابی بر مبنای تکنیک داده کاوی در حوزه زمان دارای عملکردی پایینی می باشد.

1. **نتيجه‌گيری**

بطور کلی تغییر سطح ارتعاشات کلی بیرینگ ها در مراحل اولیه خرابی غیرقابل تشخیص است، اما خصوصیات فرکانس ارتعاشی منحصر به فرد هر یک از اجزای بیرینگ، تجزیه و تحلیل اسپکتروم طیف فرکانس ارتعاشی را به دو منظور تشخیص زودهنگام عیب و تجزیه و تحلیل عیب به ابزار موثری تبدیل کرده است. در این مقاله از تکنیک جدید تحلیلی دوگانه بصورت ترکیبی و همزمان به عنوان نوآوری اصلی این پژوهش جهت تشخیص خرابی بیرینگ غلتشی بعنوان بحرانی ترین سیستم در ماشین آلات دوار تحت دور متغیر با عیوب ترکیبی در شرایط واقعی استفاده گردید. نتایج نشان داد که استفاده از این تکنیک یکپارچه در مقایسه با تکنیک های قبلی عملکرد شناسایی خطا را به شکل قابل توجهی بالاتر برده و باعث بهبود دقت فرآیند تشخیص الگوی عیب می گردد.

1. **مراجع**
2. N. Tandon and A. Choudhury, *A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings*, Journal of Tribology International, 32, 1999, pp. 469-480.
3. M. Thomas, Fiabilite, *maintenance predictive et vibration de machines*, ETS, Montreal, Qc, Can, 2003, 616 p.
4. J. Archambault, R. Archambault et M. Thomas, *Time domain descriptors for rolling-element bearing fault detection,* Proceedings of the 20th seminar on machinery vibration, CMVA, Québec, 2002, 10 pages.
5. M. Thomas, R. Archambault, J. Archambault, *Modified Julien index as a shock detector: its application to detect rolling element bearing defect*, Proceedings of the 21st seminar on machinery vibration, CMVA, Halifax (N.S.), October 2003, 21.1-21.12.
6. D. Gluzman, *The use of log scales to analyze bearing failures*, Vibrations, Vol. 16, No 3, 2000, pp. 3-5.
7. J.C.M. De Priego, *The relationship between vibration spectra and spike energy spectra for an electric motor bearing defect*, Vibrations, Vol. 17, No 1, 2001, pp. 3-5.
8. R.M. Jones, *Enveloping for bearing analysis*, Sound and Vibration, Vol. 30, No 2, 1996, pp.10-15.
9. J. Shiroishi et al, *Bearing condition diagnosis via vibration and acoustic emission measurements*, Mechanical systems and signal processing, 11 (5), 1997, pp. 693-705.
10. M.S. Safizadeh, A.A. Lakis, and M. Thomas, *Time-Frequency distributions and their Application to Machinery Fault Detection*, International Journal of Condition Monitoring and Diagnosis Engineering Management, 5 (2), 2002, pp. 41-56.
11. A. C. McCormick, A. K. Nandi, *“Classification of the rotating machine condition using artificial neural networks,”* Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part C, vol. 211, 1997, pp. 439-450.
12. A. C. McCormick, A. K. Nandi, *"Real-time classification of rotating shaft loading conditions using artificial neural networks,"* IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 8, 1997, pp. 748-756.
13. B. A. Paya, I.L. Esat, M.N.M. Badi, *“Artificial neural network based fault diagnosis of rotating machinery using wavelet transforms as a preprocessor,”* Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 11(5), 1997, pp. 751-765.
14. D.T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri, S. Rahim, M. Zaidi, 2006. *“The Bees Algorithm. A novel tool for complex optimization problems”*. In Proceedings of the 2nd International Virtual Conference on Intelligent production machines and systems (IPROMS 2006) pp. 454–459 (Elsevier, Oxford), see also URL http://www.iproms.org/
15. B. Samanta, K. R. Al-balushi, *“Artificial neural network based fault diagnostics of rolling element bearings using time-domain features,”* Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 17(2), 2003, pp. 317-328.
16. S. Abbasion, A. Rafsanjani, A. Farshidianfar, N. Irani, *“Rolling element bearings multi-fault classification based on the wavelet denoising and support vector machine,”* Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 21, 2007, pp. 2933-2945.
17. S. Sassi, B. Badri, M. Thomas, *"TALAF" and "THIKAT" as innovative time domain indicators for tracking BALL bearings*, Proceedings of the 24th Seminar on machinery vibration, Canadian Machinery Vibration Association, éditeur M. Thomas, Montréal, Canada, 2006, pp.404-419, ISBN 2-921145-61-8.

[17] Gareth Forbes, Inner, and Outer Race Bearing Fault Vibration Measurements, 2012, Curtin University, available from http://data-acoustics.com/measurements/bearing-faults/bearing-1/.