



## کنترل ارتعاشات روتور جفکات نابالانس توسط جاذب مغناطیسی

حمید رضا حیدری<sup>1\*</sup>، بهنام منجزی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ملایر، ملایر

\*ملایر، صندوق پستی 65719-61446، hr.heidari@malayeru.ac.ir

## اطلاعات مقاله

## چکیده

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 11 تیر 1395  
پذیرش: 14 مرداد 1395  
ارائه در سایت: 07 شهریور 1395

کلید واژگان:

روتور

کنترل ارتعاشات

جاذب مغناطیسی

جاذب دینامیکی

نیروی ناپیوسته

منابع اصلی ارتعاش در سیستم‌های روتور دینامیک، جرم‌های نابالانس و خطاهای ساخت یاتاقان‌های به کار رفته در سیستم روتور می‌باشند. روشی که امروزه برای کاهش و کنترل ارتعاشات روتورها در صنعت به کار رفته، استفاده از جاذب‌های مغناطیسی می‌باشد که با استفاده از نیروی مغناطیسی محاسبه شده، موقعیت روتور را کنترل کرده و ارتعاشات آن را کاهش می‌دهد. در این تحقیق جاذب مغناطیسی با اعمال نیروی سیستم جاذب دینامیکی و ایجاد دو فرکانس طبیعی جدید، سیستم را از حالت تشدید خارج می‌کند. همچنین به منظور کاهش بیشتر دامنه ارتعاشات، دو نوع مختلف جاذب دینامیکی طراحی شده است که هر کدام در یک محدوده خاص فرکانس دوران روتور، توسط جاذب مغناطیسی بررسی می‌شوند. در سیستم کنترل کننده جاذب مغناطیسی نیروی پیوسته‌ای که از طرف جرم جاذب به سیستم اصلی وارد می‌شود، به صورت نیروی ناپیوسته در 16 سطح بازسازی شده است و مشاهده شده که در این حالت دامنه ارتعاشات در نواحی فرکانس‌های طبیعی سیستم، به میزان 13% نسبت به حالت شبیه‌سازی سیستم جاذب دینامیکی با نیروی پیوسته، کاهش یافته است. در این تحقیق دو نسبت جرمی متفاوت برای هر یک از دو سیستم جاذب در نظر گرفته شده است و مشاهده شده که در حالت اجرای جاذب‌های دینامیکی با نسبت جرمی بالاتر، دامنه ارتعاشات روتور و ماکزیمم دامنه نیروی سیستم جاذب دینامیکی کمتر می‌باشد که این موضوع منجر به افزایش دقت عملکرد سیستم جاذب مغناطیسی در بازسازی نیروی سیستم جاذب دینامیکی شده و همچنین کاهش مصرف انرژی الکتریکی سیستم کنترل کننده را به دنبال خواهد داشت.

## Control vibration of imbalance Jeffcott rotor by magnetic absorber

Hamid Reza Heidari<sup>\*</sup>, Behnam Monjezi

Department of Mechanical Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

\*P.O.B. 65719-61446, Malayer, Iran, hr.heidari@malayeru.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 01 July 2016  
Accepted 04 August 2016  
Available Online 28 August 2016

## Keywords:

Rotor  
Vibration Control  
Magnetic Absorber  
Dynamic Absorber  
Discontinuous Force

## ABSTRACT

Unbalance mass and imperfect bearings are the main sources of vibration in rotor dynamics systems. One way to decrease and control a rotor vibration is the use of magnetic absorbers. The magnetic absorber is used to control the position of the rotor and reduce its vibration. In this study, by applying the dynamic absorber system force and creating two new natural frequencies, the magnetic absorber brings the system out of the resonance. Moreover, in order to decrease the vibration amplitude, two different types of dynamics absorbers are designed in which they are checked by the magnetic absorber in a specific range of rotational frequency. In magnetic absorber controller system, the continuous force which is applied to the main system by mass absorber is restored in sixteen levels discontinuously. It is seen that the vibration amplitude is reduced 13% in the area of natural frequency in comparison to the magnetic absorber with discontinuous force. In this paper, two different mass ratios are considered for each one of the two absorber systems. It is observed that in the case of dynamic absorbers with higher mass ratio, rotor vibration amplitude and the maximum force amplitude of the dynamic absorber system decrease. This issue can increase the accuracy of magnetic absorber system in the renewal of the dynamic absorber system force and reduce consumed electrical energy of the control system as well.

## 1- مقدمه

تعلیق مغناطیسی فعال برای یک شفت صلب پرداختند [1]. ای اس داس و همکاران با استفاده از یاتاقان مغناطیسی فعال به کنترل ارتعاشات روتور انعطاف‌پذیر که تحت اثر تحریک تکیه‌گاه‌ها قرار داشت، پرداختند [2]. اف جی لین و همکاران با استفاده از روش کنترل مد لغزشی به کنترل یاتاقان مغناطیسی محوری فعال پرداختند [3]. ای سی ورابلسکی و همکاران به مدلسازی روتور سرعت بالا به همراه سیستم یاتاقان مغناطیسی فعال پرداختند [4]. زد سونگ و همکاران یک مدل ریاضی جدید برای توصیف

امروزه جاذب‌های مغناطیسی به‌طور گسترده در سیستم تعلیق و کنترل ارتعاشات روتورها به کار گرفته می‌شوند و در صنایع هوا فضا، ساخت و تولید و توربین‌ها و الکتروموتورهای سرعت بالا نقش مهمی را ایفا می‌کنند. از جمله سیستم‌های مغناطیسی کنترل ارتعاشات، یاتاقان‌های مغناطیسی فعال می‌باشند که تا به امروز محققین فراوانی با استفاده از آنها به کنترل ارتعاشات شفت‌های دوار پرداخته‌اند. حجت و همکاران به طراحی و ساخت سیستم

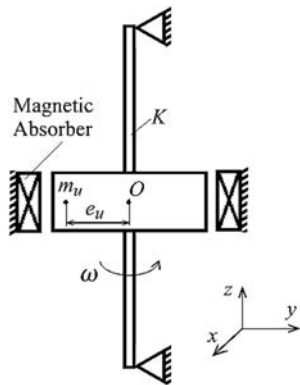


Fig. 1 Jeffcott rotor with imbalance disk and magnetic absorber

شکل 1 روتور چفکات به همراه دیسک نابالانس و جاذب مغناطیسی

$$M\ddot{x}_1 + C_x(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + K_x x_1 + k_x(x_1 - x_2) = m_u e_u \omega^2 \cos \omega t = F_0 \cos \omega t \quad (1)$$

$$m_x \ddot{x}_2 + C_x(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_x(x_2 - x_1) = 0 \quad (2)$$

با بی بعد کردن دامنه پاسخ سیستم اصلی، معادله (3) حاصل می شود.

$$\left| \frac{X_1 K_x}{m_u e_u \omega^2} \right| = \left| \frac{X_1 K_x}{F_0} \right| = \left| \frac{X_1}{X_{st}} \right|$$

$$= \sqrt{\frac{(2\zeta\lambda)^2 + (\beta^2 - \lambda^2)^2}{[1 - (1 + \mu)\lambda^2]^2 (2\zeta\lambda)^2 + [(1 - \lambda^2)(\beta^2 - \lambda^2) - \mu\beta^2\lambda^2]^2}} \quad (3)$$

پارامترهای موجود در رابطه (3) به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\beta = \sqrt{\frac{k}{\frac{m}{K}}} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{K}{m}}} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{M}{m} \quad (6)$$

$$\zeta = \frac{C}{2\sqrt{km}} \quad (7)$$

## 2-2- معادلات دینامیکی روتور به همراه جاذب نوع دوم

در شکل 3 نمای بالای روتور به همراه سیستم جاذب نوع دوم نشان داده شده است. معادلات (8) و (9) روابط دینامیکی حاکم بر سیستم را در راستای  $x$  بیان می کنند.

$$M\ddot{x}_1 + K_x x_1 + k_x(x_1 - x_2) = m_u e_u \omega^2 \cos \omega t = F_0 \cos \omega t \quad (8)$$

$$m_x \ddot{x}_2 + C_x \dot{x}_2 + k_x(x_2 - x_1) = 0 \quad (9)$$

با بی بعد کردن دامنه پاسخ سیستم اصلی، معادله (10) حاصل می شود.

$$\left| \frac{X_1 K_x}{m_u e_u \omega^2} \right| = \left| \frac{X_1 K_x}{F_0} \right| = \left| \frac{X_1}{X_{st}} \right|$$

$$= \sqrt{\frac{(2\zeta\lambda)^2 + (\beta^2 - \lambda^2)^2}{(1 + \mu\beta^2 - \lambda^2)^2 (2\zeta\lambda)^2 + [(1 - \lambda^2)(\beta^2 - \lambda^2) - \mu\beta^2\lambda^2]^2}} \quad (10)$$

## 3- بررسی پاسخ فرکانسی روتور به همراه جاذب های دینامیکی

در شکل 4 نمودارهای پاسخ فرکانسی روتور به همراه سیستم های جاذب

یاتاقان مغناطیسی فعال به همراه شفت قابل انعطاف ارائه کردند [5]. آر تیواری و همکاران یک الگوریتم متفاوت برای محاسبه پارامترهای دینامیکی یاتاقان مغناطیسی به همراه شفت قابل انعطاف ارائه دادند [6]. ال دانگ و همکاران با استفاده از روش کنترل تطبیقی به کنترل یاتاقان مغناطیسی فعال خطی سازی شده، پرداختند [7]. در این مقاله جاذب مغناطیسی، جایگزین جاذب دینامیکی شده است. در زمینه جاذب های دینامیکی نیز محققین فراوانی فعالیت کرده اند. سی جی جی و همکاران به وسیله جاذب های دینامیکی فعال به کنترل و خنثی نمودن ارتعاشات سیستمی که تحت تحریک هارمونیک بود، پرداختند [8]. اس ام کیم و همکاران به محاسبه پارامترهای بهینه جاذب پیزوالکتریک جهت کاهش ارتعاشات سیستم یک درجه آزادی، پرداختند [9]. اف وبر با استفاده میراگر مگنتورئولوژیک به کنترل نیمه فعال سیستم جاذب دینامیکی پرداخت [10]. اس کرنک و همکاران با استفاده از جاذب دینامیکی به کنترل ارتعاشات سیستم چند درجه آزادی پرداختند [11]. بختیاری نژاد و همکاران به طراحی جاذب دینامیکی بهینه برای تیر اوپلر برنولی ترک دار پرداختند [12]. جانی زاده و همکاران به کمک سیستم برداشت انرژی مغناطیسی به جذب انرژی ارتعاشی از یک تیر غیرخطی تیموشنکو که تحت تحریک تکیه گاهی قرار داشت، پرداختند [13]. علیقلی زاده و همکاران به کنترل فعال ارتعاشات تیر یک سرگیردار به وسیله عملگرهای پیزو الکتریک بهینه شده از نظر طول و مکان، پرداختند [14]. در تحقیق حاضر جاذب مغناطیسی با اعمال نیروی سیستم جاذب دینامیکی و ایجاد دو فرکانس طبیعی جدید، روتور را از حالت تشدید خارج می کند. به این منظور در سیستم کنترل کننده جاذب مغناطیسی، نیروی پیوسته ای که از طرف جرم جاذب به سیستم اصلی وارد می شود، به صورت نیرویی ناپیوسته در 16 سطح بازسازی شده است. همچنین جهت کاهش بیشتر دامنه ارتعاشات، دو نوع مختلف جاذب دینامیکی با سختی و میرایی بهینه طراحی شده که هر کدام در یک محدوده خاص فرکانسی، توسط سیستم جاذب مغناطیسی بازسازی و اجرا می شوند. مقادیر سختی و میرایی بهینه با استفاده از روش دو نقطه ثابت، برای هر دو سیستم جاذب دینامیکی و برای هر کدام در دو حالت نسبت جرمی متفاوت، محاسبه شده است. در انتها نتایج عملکرد سیستم جاذب مغناطیسی در بازسازی جاذب های دینامیکی و کاهش دامنه ارتعاشات روتور، با حالت شبیه سازی سیستم جاذب دینامیکی با نیروی پیوسته، مقایسه شده است.

## 2- معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم روتور

در شکل 1 روتور چفکات و دیسک نابالانس و جاذب مغناطیسی نشان داده شده است که به علت میرایی ناچیز شفت، از ضریب میرایی آن صرف نظر شده است و از آنجا که یاتاقان های به کار رفته در دو انتهای روتور، از نوع بلبرینگ با لقی بسیار کم بوده، بنابراین تکیه گاه ها به صورت مفصل فرض شده است و به همین دلیل مد ارتعاشی صلب در روتور ایجاد نخواهد شد و همچنین به علت اینکه روتور در نواحی فرکانس بحرانی خود دوران می کند بنابراین روتور قابل انعطاف در نظر گرفته شده است [15] و با توجه به عمود بودن روتور، معادلات دینامیکی در هر دو راستای  $x$  و  $y$  مشابه خواهند بود.

## 2-1- معادلات دینامیکی روتور به همراه جاذب نوع اول

در شکل 2 نمای بالای روتور به همراه سیستم جاذب نوع اول نشان داده شده است. معادلات (1) و (2) روابط دینامیکی حاکم بر سیستم را در راستای  $x$  بیان می کنند.

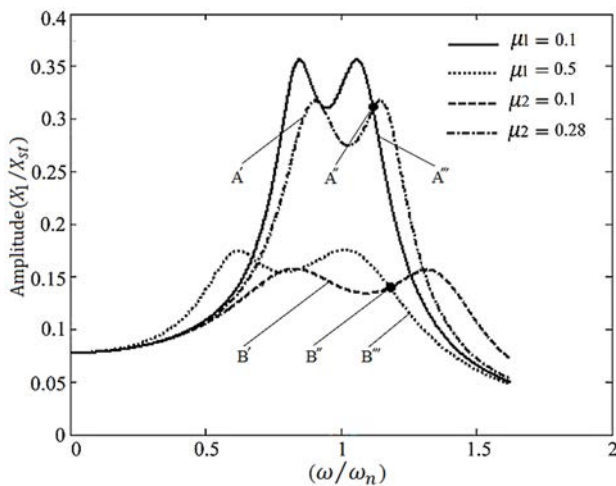


Fig. 4 Frequency response of the rotor with first and second type of the dynamic absorbers

شکل 4 پاسخ فرکانسی روتور، به همراه جاذب‌های دینامیکی نوع اول و دوم

معادلات (13) و (14) مقادیر بهینه پارامترهای سیستم جاذب نوع دوم را بیان می‌کنند.

$$\beta_{opt} = \sqrt{\frac{1}{1-\mu}} \quad (13)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1-0.5\mu)}} \quad (14)$$

#### 4- شبیه‌سازی و مدل‌سازی جاذب دینامیکی توسط جاذب مغناطیسی

در این بخش سیستم جاذب مغناطیسی جایگزین جاذب جرم و فنر و میراگر، شده است. به منظور محاسبه نیروی مغناطیسی متناسب با نوع سیستم جاذب دینامیکی از روابط (15) و (16) استفاده شده است. برای سیستم جاذب دینامیکی نوع اول معادله نیروی جاذب عبارت است از:

$$C_{x,opt}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_{x,opt}(x_2 - x_1) = -m_x \ddot{x}_2 = f_{abs} \quad (15)$$

و برای سیستم جاذب دینامیکی نوع دوم:

$$k_{x,opt}(x_2 - x_1) = -m_x \ddot{x}_2 - C_{x,opt} \dot{x}_2 = f_{abs} \quad (16)$$

در شکل 5 دامنه نیرویی که از طرف جرم جاذب به روتور اعمال می‌شود، برای دو مسیر A و B، نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای شکل 5 ماکزیمم مقدار دامنه نیرو در هر دو مسیر A و B بدست خواهد آمد و مقدار پله نیرو با استفاده از معادله (17) محاسبه خواهد شد.

$$f_s = \frac{f_{max}}{8} \quad (17)$$

با استفاده از معادله (18) دامنه مثبت و منفی نیروی جاذب دینامیکی

در 16 سطح، بازسازی خواهد شد که در آن نیروی  $f_0$ ، نیروی متناسب با جریان بایاس  $i_0$  سیستم کنترل‌کننده جاذب مغناطیسی می‌باشد.

$$f_{\pm sn} = f_0 \pm \frac{(2n-1)f_s}{2}, \quad n = 1, \dots, 8 \quad (18)$$

#### 4-1- معادلات حاکم بر جاذب مغناطیسی

در شکل 6 نمایی از جاذب مغناطیسی نشان داده شده است. نیروی اثرکننده به روتور که تابعی از جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها و موقعیت مکانی روتور می‌باشد، توسط معادله (19) بیان می‌شود [18].

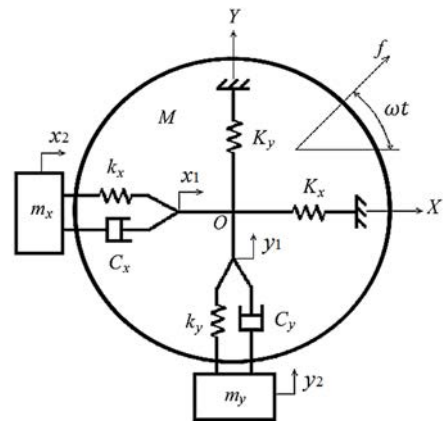


Fig. 2 Top view of the rotor with the first type absorber system

شکل 2 نمای بالای روتور به همراه سیستم جاذب نوع اول

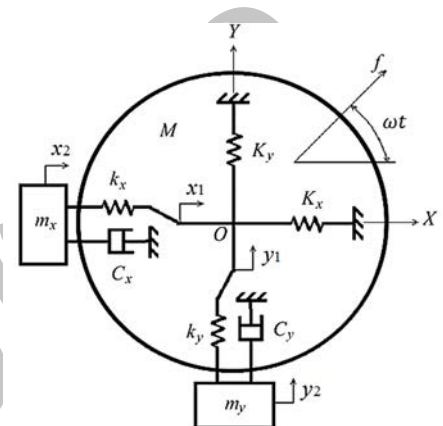


Fig. 3 Top view of the rotor with the second type absorber system

شکل 3 نمای بالای روتور به همراه سیستم جاذب نوع دوم

دینامیکی نوع اول و دوم، با دو نسبت جرمی متفاوت برای هر سیستم جاذب، به صورت بی‌بعد و مستقل از سرعت زاویه‌ای روتور، نشان داده شده است و با استفاده از روش دو نقطه ثابت [16]، مقادیر سختی و میرایی بهینه برای هر کدام محاسبه شده است. همچنین در مراحل تست عملی سیستم جهت مستقل نمودن دامنه نیروی گریز از مرکز، از سرعت زاویه‌ای روتور، با افزایش سرعت زاویه‌ای، مقدار جرم نابالانس طوری کاهش داده شده است که مقدار دامنه نیرو ثابت باقی بماند. همانطور که در شکل 4 نشان داده شده است دو مسیر  $(A'-A''-A''')$  و  $(B'-B''-B''')$  برای پاسخ فرکانسی سیستم تعیین شده است که هر مسیر ترکیبی از سیستم جاذب نوع اول و دوم می‌باشد. در مسیر A، به محض رسیدن فرکانس دوران روتور به فرکانس نقطه  $A''$ ، سیستم جاذب مغناطیسی از حالت جاذب نوع دوم به جاذب نوع اول تبدیل می‌شود و در مسیر B، به محض رسیدن فرکانس دوران روتور به فرکانس نقطه  $B''$ ، سیستم جاذب مغناطیسی از حالت جاذب نوع دوم به جاذب نوع اول تبدیل خواهد شد.

معادلات (11) و (12) مقادیر بهینه پارامترهای سیستم جاذب دینامیکی

را که با استفاده از روش دو نقطه ثابت بدست آمدند، برای سیستم جاذب نوع اول بیان می‌کنند [17]:

$$\beta_{opt} = \frac{1}{1+\mu} \quad (11)$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (12)$$

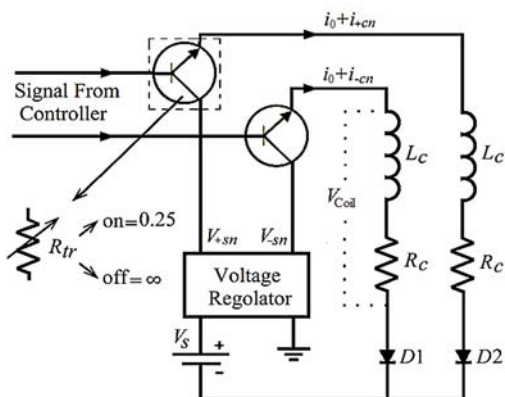


Fig.7 The equivalent circuit of activate path for coil of the absorber  
شکل 7 مدار معادل با مسیر فعال سازی سیم پیچ های جاذب مغناطیسی

#### 4-2- شبیه سازی سیستم کنترل کننده جاذب مغناطیسی

در شکل 8 دامنه تغییرات ولتاژ سیستم کنترل کننده جاذب مغناطیسی نشان داده شده است. دو مسیر A و B<sub>1</sub>، در نقاط ماکزیمم خود، اختلاف ولتاژی برابر با  $\Delta V_{peak}$  نسبت به هم دارند و با توجه به اینکه ماکزیمم ولتاژ، متناسب با ماکزیمم نیروی هر مسیر می باشد بنابراین با توجه به معادلات (17) و (18)، این کمتر بودن ماکزیمم ولتاژ مسیر B<sub>1</sub>، باعث افزایش کیفیت بازسازی ولتاژ و نیروی این مسیر، توسط سیستم کنترل کننده جاذب مغناطیسی خواهد شد. همچنین با مقایسه این دو مسیر مشاهده می شود که در یک ولتاژ بایاس ثابت برای سیستم کنترل کننده، در حالت شبیه سازی جاذب های دینامیکی با نسبت جرمی بیشتر، توان الکتریکی مصرفی سیستم، در نواحی فرکانس های طبیعی، کمتر می باشد.

در مسیر B<sub>2</sub>، ولتاژ بایاس سیستم نسبت به مسیر B<sub>1</sub>، به اندازه  $\Delta V_{peak}$  کاهش داده شده است و حد پایین مسیر B<sub>2</sub>، برابر با حد پایین مسیر A، قرار گرفته است. در واقع ولتاژ بایاس سیستم در مسیر B<sub>2</sub>، تا اندازه ای کاهش داده شده است که کمترین نیروی جاذب مغناطیسی، که متناسب با کمترین ولتاژ این مسیر است، در ناحیه خطی باقی بماند و با توجه به این کاهش ولتاژ، توان مصرفی سیستم کنترل کننده در این مسیر، نسبت به مسیر B<sub>1</sub> و

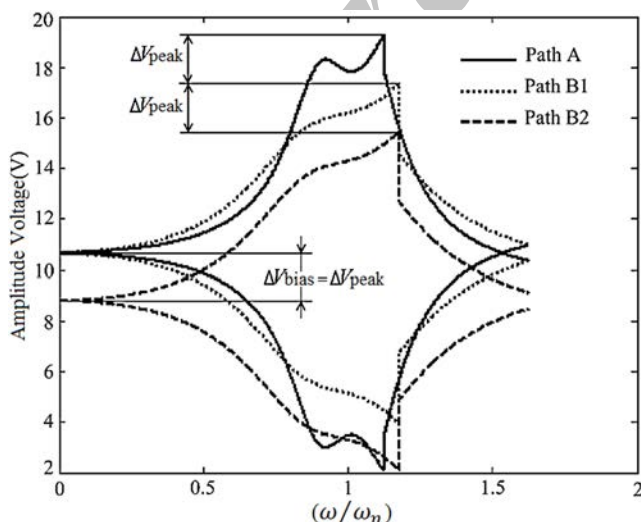


Fig.8 Voltage amplitude of the Magnetic absorber controller for A, B<sub>1</sub> and B<sub>2</sub> paths

شکل 8 دامنه ولتاژ سیستم کنترل کننده جاذب مغناطیسی در مسیرهای A و B<sub>1</sub> و B<sub>2</sub>

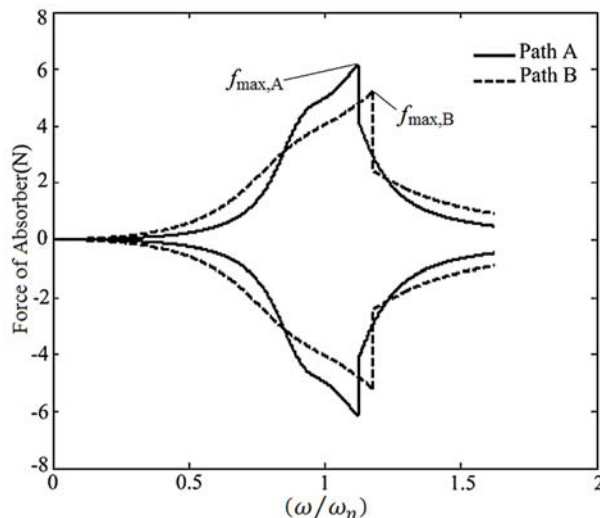


Fig.5 Amplitude of The force exerted by the first and second absorber to the rotor in A and B path

شکل 5 دامنه نیروی وارد شده از طرف سیستم جاذب به روتور، در دو مسیر A و B

$$f_{abs(n)} = f_{+sn} - f_{-sn} = G \left( \frac{(i_0 + i_{cn})^2}{(s_0 - x_1)^2} - \frac{(i_0 - i_{cn})^2}{(s_0 + x_1)^2} \right) \cos \alpha, n = \pm 1, \dots, 8 \quad (19)$$

$$G = \mu_0 N^2 A_a \quad (20)$$

با در نظر گرفتن  $x_1 \ll s_0$  و خطی سازی نمودن معادله (19)، مجدداً به صورت معادله (21) بازنویسی خواهد شد [18].

$$f_{abs(n)} = \frac{4k_1 i_0}{s_0^2} \cos \alpha i_{cn} - \frac{4k_1 i_0^2}{s_0^3} \cos \alpha x_1 = k_i i_{cn} - k_s x_1, n = \pm 1, \dots, 8 \quad (21)$$

در شکل 7 مدار معادل با مسیر فعال سازی یک جفت سیم پیچ از جاذب مغناطیسی، نشان داده شده است و معادله (22) قانون ولتاژ را برای آن بیان می کند.

$$V_{sn} = (i_0 + i_{cn})(R_c + R_{tr}) + V_D + L_c \frac{di_{cn}}{dt}, n = \pm 1, \dots, 8 \quad (22)$$

با جایگذاری 16 سطح نیروی بدست آمده از معادله (18)، در معادله (21)، جریان های کنترل کننده  $i_c$  بدست می آیند و با جایگذاری در معادله (22)، 16 سطح ولتاژ کنترل کننده حاصل می شود.

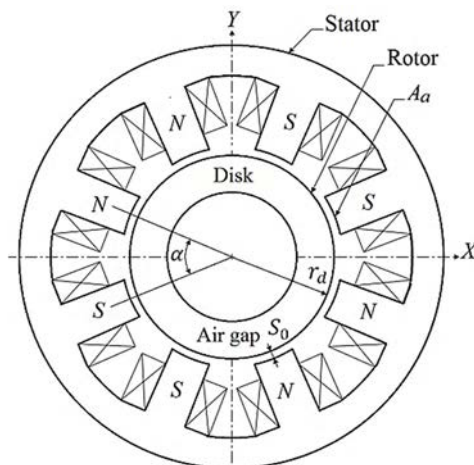


Fig.6 Stator and rotor of the magnetic absorber [19]

شکل 6 استاتور و روتور جاذب مغناطیسی [19]

در جدول 1 مقادیر پارامترهای روتور، سیستم جاذب دینامیکی نوع اول با دو نسبت جرمی 0.1 و 0.5 و سیستم جاذب نوع دوم با دو نسبت جرمی 0.1 و 0.28 و سیستم کنترل کننده جاذب مغناطیسی نشان داده شده است.

در قسمت شبیه سازی سیستم جاذب دینامیکی، با استفاده از سیگنال سنسورهای جابجایی و با مشتق گیری از آن و با فرض شرایط اولیه صفر، برای موقعیت، سرعت و شتاب جرم جاذب دینامیکی، نیرویی که از طرف فنر  $k_x$  و میراگر  $c_x$ ، در هر لحظه به جرم جاذب اعمال می شود را محاسبه نموده و در طی دو مرحله انتگرال گیری از شتاب جرم جاذب، موقعیت و سرعت آن را در هر لحظه، به صورت مجازی محاسبه کرده و با استفاده از آن نیرویی که از طرف فنر و میراگر سیستم جاذب دینامیکی به جرم سیستم اصلی وارد می شود را توسط سیستم جاذب مغناطیسی به روتور اعمال می کند.

در شکل 11 مدل آزمایشگاهی ساخته شده روتور چفکات به همراه سیستم کنترل کننده جاذب مغناطیسی، نشان داده شده است. در این سیستم شبیه سازی جاذب دینامیکی، توسط برنامه لب ویوو 2013 در لبتاب انجام شده است که با استفاده از دو درگاه یو اس بی با کارت های ورودی و خروجی ارتباط برقرار می کند. سنسورهای جابجایی به کار رفته در سیستم کنترل کننده از نوع القایی با خروجی ولتاژ آنالوگ و به شماره IPS-305-AV-18-N ساخت شرکت تبریز پژوه می باشند. کارت ورودی مبدل آنالوگ به دیجیتال با دقت 12 بیت با فرکانس نمونه برداری 20 کیلوهرتز و کارت خروجی سیستم از نوع خروجی دیجیتال با 16 بیت موازی و با فرکانس تازه سازی 20 کیلوهرتز می باشند. همچنین با در نظر گرفتن کارت صدای کامپیوتر سمت چپ به عنوان کارت ورودی سیگنال و با استفاده از نرم افزار ساند کارد اسیلوسکوپ نسخه 1.46 با فرکانس نمونه برداری 44.1 کیلوهرتز و دقت 16 بیت و ماکزیمم ولتاژ ورودی 2 ولت، از این کامپیوتر به

جدول 1 مقادیر پارامترهای سیستم روتور، جاذب دینامیکی و سیستم کنترل کننده جاذب مغناطیسی

پارامتر	واحد	مقدار
$C_{x(1,\mu=0.1)}$	N · S/m	3.4218
$C_{x(1,\mu=0.5)}$	N · S/m	24.0252
$C_{x(2,\mu=0.1)}$	N · S/m	4.2694
$C_{x(2,\mu=0.28)}$	N · S/m	23.955
$F_0$	N	4.9
$G$	(wb · m)/(A · T)	$6.8085 \times 10^{-6}$
$K_x$	N/m	31484.28
$k_{x(1,\mu=0.1)}$	N/m	2602.2
$k_{x(1,\mu=0.5)}$	N/m	6996.5
$k_{x(2,\mu=0.1)}$	N/m	3497.588
$k_{x(2,\mu=0.28)}$	N/m	12427
$k_s$	N/m	-17191.34
$k_i$	N/A	20.78
$L_c$	H	0.0068
$M$	kg	0.33
$N$	turn	220
$r_d$	mm	23
$R_c$	$\Omega$	11
$R_{tr}$	$\Omega$	0.25
$S_0$	mm	1
$V_D$	V	0.7
$V_{bias,A}$	V	10.7
$V_{bias,B1}$	V	10.7
$V_{bias,B2}$	V	8.9

A، کاهش خواهد یافت. با رسم ولتاژ سیستم کنترل کننده بر حسب نیروی جاذب مغناطیسی، نمودار شکل 9 بدست می آید.

در شکل 9، ماکزیمم دامنه تغییرات نیروی مسیره های A و B که در شکل 5 نشان داده شده است، به 16 محدوده تقسیم شده و سیستم کنترل کننده، مقدار میانگین نیرو را در هر محدوده محاسبه کرده و ولتاژ متناسب با آن را به سیستم یاتاقان مغناطیسی ارسال می کند. با توجه به اینکه مقدار ماکزیمم دامنه نیرو در مسیر B، که نسبت جرمی بیشتری هم نسبت به مسیر A دارد، کمتر می باشد بنابراین دقت سیستم کنترل کننده در بازسازی نیروی این مسیر، نسبت به مسیر A، افزایش خواهد یافت.

## 5- بررسی مدل آزمایشگاهی سیستم جاذب مغناطیسی

شکل 10 نمای کلی از سیستم کنترل کننده و روتور چفکات را نشان می دهد. در سیستم کنترل کننده با استفاده از روش عبور از صفر سیگنال جابجایی، فرکانس دورانی روتور محاسبه می شود و در هر محدوده فرکانسی متناسب با فرکانس دورانی روتور، سیستم جاذب دینامیکی نوع اول یا دوم، با سختی و میرایی بهینه، بازسازی می شوند.

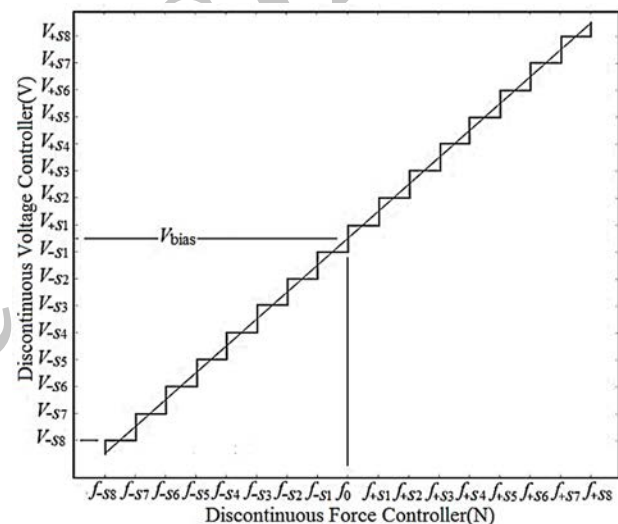


Fig. 9 Discontinuous voltage of the magnetic absorber respect the discontinuous force of the dynamic absorber

شکل 9 ولتاژ ناپیوسته جاذب مغناطیسی بر حسب نیروی ناپیوسته جاذب دینامیکی

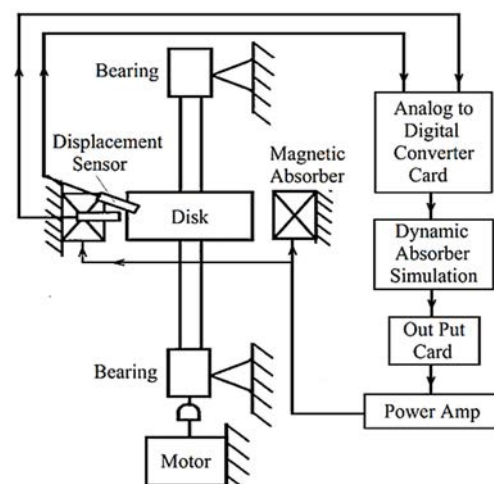


Fig. 10 View of the Jeffcott rotor with magnetic absorber system

شکل 10 نمای کلی از روتور چفکات به همراه سیستم جاذب مغناطیسی



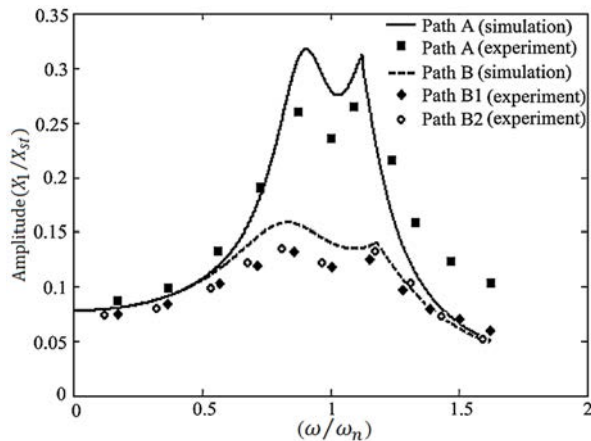


Fig. 12 Comparison experimental results and simulation of the dynamic absorber in two A and B paths

شکل 12 مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی جاذب دینامیکی در دو مسیر A و B

دینامیکی کمتر می‌باشد که این موضوع منجر به افزایش دقت عملکرد سیستم جاذب مغناطیسی در بازسازی نیروی سیستم جاذب دینامیکی شده و همچنین کاهش مصرف انرژی الکتریکی سیستم کنترل کننده را به دنبال خواهد داشت.

با توجه به مسیرهای  $(A'-A''-A''')$  و  $(B'-B''-B''')$  تعریف شده در شکل 4، که هر کدام ترکیبی از جاذب‌های دینامیکی نوع اول و دوم می‌باشند، مشاهده می‌شود که در این مسیرها، دامنه ارتعاشات کاهش بیشتری نسبت به حالت ثابت بودن یک نوع جاذب دینامیکی، دارند

همچنین مشاهده شده که در حالت اجرای جاذب‌های دینامیکی با نسبت جرمی بالاتر، دامنه ارتعاشات روتور و ماکزیمم دامنه نیروی سیستم جاذب دینامیکی کمتر می‌باشد که این موضوع منجر به افزایش دقت عملکرد سیستم جاذب مغناطیسی در بازسازی نیروی سیستم جاذب دینامیکی شده و همچنین کاهش مصرف انرژی الکتریکی سیستم کنترل کننده را به دنبال خواهد داشت.

همچنین با توجه به نمودار شکل 8 ملاحظه می‌شود که در مسیر  $B_1$ ، در نواحی فرکانس‌های طبیعی سیستم، ماکزیمم دامنه ولتاژ سیستم کنترل کننده جاذب مغناطیسی نسبت به مسیر A کمتر بوده است و این کمتر بودن ماکزیمم ولتاژ، باعث کاهش مصرف انرژی الکتریکی در این ناحیه فرکانسی شده و همچنین افزایش کیفیت بازسازی نیروی این مسیر را به دنبال خواهد داشت. همچنین در نمودار مسیر  $B_2$  واقع در شکل 8 ولتاژ بایاس سیستم نسبت به مسیر  $B_1$ ، تا حد ممکن کاهش داده شده و با مقایسه نتایج تجربی دو حالت  $B_1$  و  $B_2$ ، واقع در شکل 12، ملاحظه می‌شود که تغییری در کنترل دامنه ارتعاشات ایجاد نشده اما در عین حال انرژی الکتریکی مصرفی سیستم نسبت به مسیر  $B_1$  کاهش یافته است. همچنین با توجه به شکل 12 و مقایسه نمودارهای شبیه‌سازی با نتایج تجربی مسیرهای A و B مشاهده می‌شود که در نواحی فرکانس‌های طبیعی، سیستم جاذب مغناطیسی با نیروی ناپیوسته، دامنه ارتعاشات را نسبت به حالت شبیه‌سازی جاذب دینامیکی با نیروی پیوسته، به میزان 13% کاهش داده است و به علت بیشتر بودن ماکزیمم دامنه نیرو در مسیر A، دقت بازسازی نیرو در این مسیر کاهش یافته و در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس‌های طبیعی، انحراف نتایج عملی و شبیه‌سازی در این مسیر بیشتر شده و باعث افزایش دامنه ارتعاشات شده است.

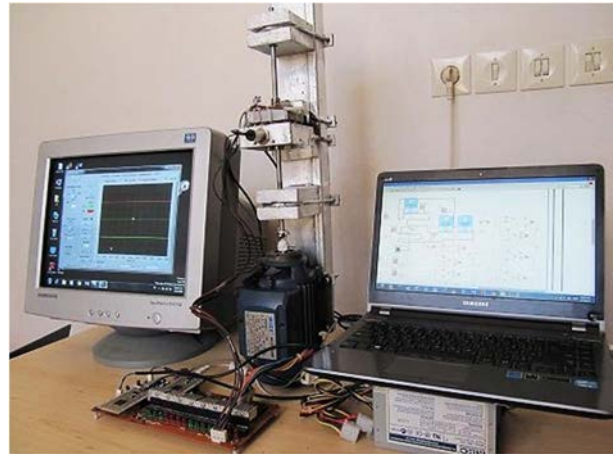


Fig. 11 A view of the controller system for the Jeffcott rotor

شکل 11 نمایی از سیستم کنترل کننده ساخته شده برای روتور چفکات

عنوان یک اسیلوسکوپ دو کاناله، جهت نمایش ارتعاشات روتور استفاده شده است. در سیستم تقویت کننده توان الکتریکی با توجه به اینکه سیگنال کنترل کننده جاذب مغناطیسی تنها در یک مرحله تقویت می‌شود لذا طراحی و عیب‌یابی آن نسبت به سیستم‌های تقویت کننده آنالوگ، ساده‌تر بوده و همچنین افزایش تعداد طبقات بازسازی ولتاژ، جهت افزایش دقت عملکرد سیستم، امکان پذیر می‌باشد.

#### 6- مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی

در شکل 12 نمودار پاسخ فرکانسی روتور در حالت شبیه‌سازی جاذب دینامیکی با نیروی پیوسته و با دو نسبت جرمی متفاوت، در دو مسیر A و B نشان داده شده است. با توجه به نتایج تجربی دو مسیر  $A_1$  و  $B_1$ ، مشاهده می‌شود که در حالت بازسازی جاذب دینامیکی توسط جاذب مغناطیسی با نیروی ناپیوسته، در نواحی فرکانس‌های طبیعی، نسبت به حالت شبیه‌سازی با نیروی پیوسته، به مقدار 13% در ارتعاشات روتور کاهش دامنه دیده می‌شود و همچنین به علت کمتر بودن نسبت جرمی در مسیر A، ماکزیمم دامنه نیرو در این مسیر نسبت به مسیر B بیشتر بوده و دقت بازسازی نیرو در این مسیر کاهش یافته است و در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس‌های طبیعی، انحراف نتایج عملی و شبیه‌سازی در این مسیر بیشتر شده و باعث افزایش دامنه ارتعاشات شده است.

همچنین با مقایسه نتایج تجربی دو مسیر  $B_1$  و  $B_2$  مشاهده می‌شود که کاهش ولتاژ بایاس در مسیر  $B_2$ ، تاثیری در نتایج عملکرد سیستم کنترل کننده نسبت به حالت  $B_1$  ندارد. اما در عین حال مصرف انرژی الکتریکی سیستم در این حالت کاهش یافته است.

#### 7- بحث و نتیجه‌گیری

منابع اصلی ارتعاش در سیستم‌های روتور دینامیک، جرم‌های نابالانس و خطاهای ساخت یا تاقان‌های به کار رفته در سیستم روتور می‌باشند. در این تحقیق جاذب مغناطیسی با اعمال نیروی سیستم جاذب دینامیکی سیستم را از حالت تشدید خارج می‌کند. همچنین به منظور کاهش بیشتر دامنه ارتعاشات، دو نوع مختلف جاذب دینامیکی طراحی شد. در ادامه دو نسبت جرمی متفاوت برای هر یک از دو سیستم جاذب در نظر گرفته شده است و مشاهده شده که در حالت اجرای جاذب‌های دینامیکی با نسبت جرمی بالاتر، دامنه ارتعاشات روتور و ماکزیمم دامنه نیروی سیستم جاذب

از دیگر مزایای بازسازی جاذب دینامیکی توسط جاذب مغناطیسی می‌توان به کاهش وزن سیستم به علت حذف جرم جاذب اشاره نمود. علاوه بر این سیستم جاذب مغناطیسی قابلیت تغییر چیدمان و مقدار جرم و فنر و میراگر را به صورت مجازی دارد. همچنین با توجه به اینکه در سیستم تقویت‌کننده توان الکتریکی، سیگنال کنترل‌کننده جاذب مغناطیسی تنها در یک مرحله تقویت می‌شود، لذا طراحی و عیب‌یابی آن نسبت به سیستم‌های تقویت‌کننده آنالوگ، ساده‌تر بوده و همچنین افزایش تعداد طبقات بازسازی ولتاژ، جهت افزایش دقت عملکرد سیستم، امکان‌پذیر می‌باشد.	$O$	مرکز روتور
با توجه به نکات ذکر شده می‌توان بیان داشت که در بازسازی جاذب دینامیکی توسط جاذب مغناطیسی، انتخاب نسبت جرمی بالاتر برای سیستم جاذب، منجر به کاهش بیشتر دامنه ارتعاشات خواهد شد و چنانچه بعد از فرکانس‌های تشدید، سیستم جاذب بازسازی شده توسط جاذب مغناطیسی، به سیستم جاذب نوع اول تغییر داده شود، دامنه ارتعاشات کاهش بیشتری خواهد داشت. مشاهده شده است که در حالت اعمال نیروی سیستم کنترل‌کننده به صورت ناپیوسته، دامنه ارتعاشات کاهش بیشتری نسبت به حالت اعمال نیروی پیوسته خواهد داشت. همچنین مشاهده شده است که، کاهش ولتاژ بایاس سیستم کنترل‌کننده، تا اندازه‌ای که کمترین نیروی جاذب مغناطیسی در ناحیه خطی باقی بماند تأثیری در نتایج کنترل ارتعاشات سیستم نخواهد داشت اما در عین حال باعث کاهش مصرف انرژی الکتریکی سیستم کنترل‌کننده خواهد شد.	$r_d$	شعاع دیسک (m)
	$R_c$	مقاومت سیم‌پیچ ( $\Omega$ )
	$R_{tr}$	مقاومت معادل ترانزیستور ( $\Omega$ )
	$S_0$	فاصله هوایی روتور و استاتور (m)
	$t$	زمان (sec)
	$V_D$	افت ولتاژ دو سر دیود (V)
	$V_{sn}$	ولتاژ سطح $n$ ام منبع تغذیه (V)
	$V_{bias}$	ولتاژ بایاس سیستم کنترل‌کننده (V)
	$V_{coil}$	ولتاژ دو سر سیم‌پیچ جاذب مغناطیسی (V)
	$V_{peak}$	ماکزیمم ولتاژ هر مسیر (V)
	$x_1$	جابجایی جرم سیستم اصلی (m)
	$x_2$	جابجایی جرم سیستم جاذب (m)
	$X_1$	ماکزیمم دامنه جابجایی جرم سیستم اصلی (m)
	$X_2$	ماکزیمم دامنه جابجایی جرم سیستم جاذب (m)
	$X_{st}$	جابجایی استاتیکی سیستم اصلی (m)

## علائم یونانی

زاویه بین دو قطب مجاور (درجه)	$\alpha$
نسبت فرکانس طبیعی سیستم جاذب به فرکانس طبیعی سیستم اصلی	$\beta$
نسبت بهینه فرکانس طبیعی سیستم جاذب به فرکانس طبیعی سیستم اصلی	$\beta_{opt}$
سرعت زاویه‌ای روتور ( $\text{rads}^{-1}$ )	$\omega$
فرکانس طبیعی سیستم روتور چفکات ( $\text{rads}^{-1}$ )	$\omega_n$
قابلیت هدایت مغناطیسی هوا ( $\text{Hm}^{-1}$ )	$4\pi \times 10^{-7}$
نسبت جرم جاذب نوع اول به جرم سیستم اصلی	$\mu_1$
نسبت جرم جاذب نوع دوم به جرم سیستم اصلی	$\mu_2$
نسبت فرکانس دوران به فرکانس طبیعی روتور	$\lambda$
نسبت میرایی	$\zeta$
نسبت میرایی بهینه	$\zeta_{opt}$

## 9- مراجع

- [1] Y. Hoojjat, M. Morad Sheykhi, H. Mosavi Harandi, R. Ali. Mohamahdi, Design and manufacture magnetic suspension active, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 37, pp. 153-160, 2009. (in Persian)
- [2] A. S. Das, J. K. Dutt, K. Ray, Active vibration control of unbalanced flexible rotor-shaft systems parametrically excited due to base motion, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, No. 9, pp. 2353-2369, 2010.
- [3] F. J. Lin, S. Y. Chen, M. S. Huang, Adaptive complementary sliding-mode control for thrust active magnetic bearing system, *Control Engineering Practice*, Vol. 19, No. 7, pp. 711-722, 2011.
- [4] A.C. Wroblewski, J.T. Sawicki, A.H. Pesch, Rotor model updating and validation for an active magnetic bearing based high-speed machining spindle, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 134, No. 12, pp. 122509, 2012.
- [5] Z. Sun, He. Ying, J. Zhao, Z. Shi, L. Zhao, S. Yu, Identification of active magnetic bearing system with a flexible rotor, *Mechanical Systems And Signal Processing*, Vol. 49, No. 1, pp. 302-316, 2014.
- [6] R. Tiwari, A. Chougale, Identification of bearing dynamic parameters and unbalance states in a flexible rotor system fully levitated on active magnetic bearings, *Mechatronics*, Vol. 24, No. 3, pp. 274-286, 2014.
- [7] L. Dong, S. You, Adaptive control of an active magnetic bearing with external disturbance, *ISA Transactions*, Vol. 53, No. 5, pp. 1410-1419, 2014.
- [8] C. J. Ji, N. Zhang, Suppression of the primary resonance vibrations of a forced nonlinear system using a dynamic vibration absorber, *Journal of Sound And Vibration*, Vol. 392, No. 11, pp. 2044-2056, 2010.

## 8- فهرست علائم

$A_a$	سطح مقطع هر قطب ( $\text{m}^2$ )
$C$	ضریب میرایی سیستم جاذب دینامیکی ( $\text{Nsm}^{-1}$ )
$C_{opt}$	ضریب میرایی بهینه سیستم جاذب دینامیکی ( $\text{Nsm}^{-1}$ )
$e_u$	مقدار انحراف جرم نابالانس از مرکز هندسی روتور (m)
$f_{abs(n)}$	نیروی سطح $n$ ام جاذب مغناطیسی (N)
$f_s$	اختلاف نیروی هر طبقه نیرو با طبقه بعد (N)
$f_{+sn}$	نیروی افزایش یافته سیم‌پیچ (N)
$f_{-sn}$	نیروی کاهش یافته سیم‌پیچ (N)
$f_{max}$	ماکزیمم نیروی جاذب دینامیکی (N)
$F_0$	ماکزیمم دامنه نیروی جرم نابالانس (N)
$G$	ضریب ثابت
$i_{cn}$	جریان سطح $n$ ام سیستم کنترل‌کننده (A)
$i_0$	جریان بایاس سیم‌پیچ (A)
$k$	سختی جرم سیستم جاذب ( $\text{Nm}^{-1}$ )
$k_{opt}$	سختی بهینه جرم سیستم جاذب ( $\text{Nm}^{-1}$ )
$k_s$	شیب نمودار تغییرات نیرو نسبت به تغییر مکان روتور حول مرکز روتور ( $\text{Nm}^{-1}$ )
$k_i$	شیب نمودار تغییرات نیرو نسبت به تغییر جریان سیم‌پیچ
	یاتاقان حول جریان بایاس ( $\text{NA}^{-1}$ )
$K$	سختی جرم سیستم اصلی ( $\text{Nm}^{-1}$ )
$m$	جرم جسم سیستم جاذب (kg)
$M$	جرم معادل روتور (سیستم اصلی) (kg)
$m_u$	جرم جسم نابالانس (kg)
$N$	تعداد دورهای سیم پیچ

- control of the clamped beam with length and location optimized piezoelectric patches, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 11-22, 2015. (in Persian فارسی)
- [15] Y. Ishida, T. Yamamoto, *Linear And Nonlinear Rotordynamics: a modern treatment with applications*, Second Edition, pp. 1-2, New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [16] J. P. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, Courier Corporation, Third Edition, pp. 119-132, New York: McGraw-Hill, 1947.
- [17] M. Z. Ren, A variant design of the dynamic vibration absorber, *Journal of Sound And Vibration*, Vol. 245, No. 4, pp. 762-770, 2001.
- [18] Y. Hojjat, M. Mohamadi moqadam, M. Morad Sheykhi, H. Mosavi Harandi, Investigate the effective parameters experimentally and numerically active magnetic bearing system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 10. No. 1, pp. 51-62, 2010. (in Persian فارسی)
- [19] H. Chang, S. C. Chung, Integrated design of radial active magnetic bearing systems using genetic algorithms, *Mechatronics*, Vol. 12, No. 1, pp. 19-36, 2002.
- [9] S. M. Kim, S. Wang, M. J. Brennan, Dynamic analysis and optimal design of a passive and an active piezo-electrical dynamic vibration absorber, *Journal of Sound And Vibration*, Vol. 330, No. 4, pp. 603-614, 2011.
- [10] F. Weber, Semi-active vibration absorber based on real-time controlled MR damper, *Mechanical Systems And Signal Processing*, Vol. 46, No. 2, pp. 272-288, 2014.
- [11] S. Krenk, J. Hogsberg, Tuned mass absorber on a flexible structure, *Journal of Sound And Vibration*, Vol. 333, No. 6, pp. 1577-1595, 2014.
- [12] F. Bakhtiari Nejad, A. Mirzabeigy, Optimum absorber design for beam subjected to a moving oscillator and effect of crack occurrence on absorber performance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 163-171, 2015. (in Persian فارسی)
- [13] B. Janizade, M. Dardel, M.H. Pashaei, R. Akbari Alashti, Investigation of energy harvesting from vibrating nonlinear timoshenko beam under base oscillating with electromagnetic energy harvester, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 131-140, 2015. (in Persian فارسی)
- [14] S. Aligholizadeh, M.A. Hamed, R. Hassannejad Qadim, Active vibration

Archive of SID