http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

مهر ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۷ ص‌ص ۴۵-۵۳

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۷/۱۲
تاریخ پذیرش ۹۱/۱۲/۶
ارائه در سایت ۹۲/٤/۳۰

مدل‌سازی یک‌پارچه مکاترونیکی و کنترل نیمه فعال ارتعاشات چَتِر در فرایند تراشکاری، به وسیلهٔ میراگر مگنتورئولوژیک

داود ساجدی پور[۱]، سعید بهبهانی[۲*]

۱- کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان
* اصفهان، صندوق پستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، behbahani@cc.iut.ac.ir

چکیده- ارتعاشات چتِر یکی از عوامل محدود کننده در افزایش نرخ براده‌برداری در فرایندهای ماشین‌کاری می‌باشد. در این مقاله، مدل‌سازی مکاترونیکی یک‌پارچه دستگاه تراش تجهیز شده به میراگر هوشمند مگنتورئولوژیک و طراحی کنترل فازی نیمه فعال برای جلوگیری از ارتعاشات چتر ارائه می‌شود. کاهش ارتعاشات چتر با تغییر دادن نیمه فعال مشخصات دینامیکی سازهٔ ماشین‌ابزار (مانند قسمت‌های حقیقی و موهومی تابع پاسخ فرکانسی) که پارامترهای اصلی مشخص کنندهٔ دیاگرام پایداری هستند حاصل می‌شود. از مدل بوک- ون اصلاح شده برای مدل‌سازی رفتار میراگر مگنتورئولوژیک استفاده شده است، که این امکان را می‌دهد که ولتاژ ورودی به دمپر به عنوان ورودی کنترلی سیستم بکار رود. از آنجا که مدل یک‌پارچه سیستم در حضور میراگر مگنتورئولوژیک غیر خطی می‌شود، روشی برای ایجاد دیاگرام پایداری با تحلیل در حوزهٔ زمان ارائه می‌شود. در طراحی کنترلر و به عنوان بازخورد از میزان وقوع چَتِر، یک شاخص جدید به نام شاخص تشخیص چَتِر ارائه شده است که در تشخیص وقوع چتر بصورت تجربی نیز کاربرد دارد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که سیستم پیشنهادی در بهبود پایداری ماشین تراش موفق بوده است.

کلیدواژگان: ماشین تراش، کنترل فازی، شاخص تشخیص چتر، پایداری.

Integrated mechatronic modeling and semi-active control of chatter vibration in turning, using MR damper

D. Sajedi Pour [1], S. Behbahani[2*]

1- MSc., Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran
2- Assis. Prof., Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran
* P.O.B. 84156-83111 Isfahan, Iran. behbahani@cc.iut..ac.ir

Abstract- Chatter vibration is one of the limiting factors in increasing the material removing rate in machining operations. In this paper, the integrated mechatronic modeling of a lathe machine equipped with MR damper, and design of a fuzzy semi-active controller are presented. To suppress chatter, the structural dynamic characteristics (i.e., real and imaginary part of the frequency response function), which are the main parameters in drawing the stability lobes, are varied semi-actively using magnetorheological damper . Modified Bouc-Wen model is employed for MR damper modeling, which enables us to account for the input voltage to the damper as the control input of the system. Since the structure becomes nonlinear in the presence of MR damper, a time-domain approach for generation of stability lobes is presented. In controller design and as a feedback of the chatter level, a novel chatter detection index (CDI) is developed, which can also be employed for experimental chatter detection. The obtained results show that the proposed system has been successful in enhancing the stability of the lathe machine.

Keywords: Lathe, Chatter Detection Index, Fuzzy Control, Stability.

۱- مقدمه

کنترل نیمه فعال ارتعاشات یک روش شناخته شده در کاهش ارتعاشات نامطلوب انواع ماشین‌آلات محسوب می‌شود؛ ولی استفاده از تجهیزات نیمه فعال در کاهش ارتعاش ماشین‌های ابزار یک روش جدید است که هنوز از نظر مدل‌سازی و طراحی کنترلر ضعف‌های عمده‌ای دارد.

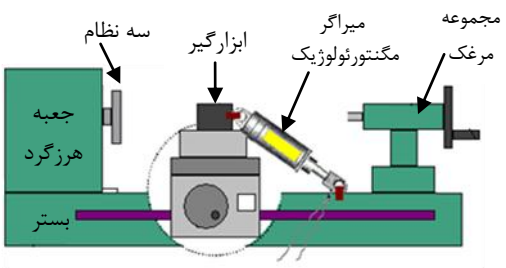
ماشین‌کاری قطعات صنعتی با سرعت زیاد و حجم بالای براده‌برداری، یکی از نیازهای شرکت‌های قطعه‌ساز می‌باشد که می‌تواند آنها را در تولید قطعات با حداقل هزینه و رقابت با سایر تولید کننده‌ها یاری کند. در این میان، ارتعاشات چتر[1] یک عامل محدود کننده بر سر راه افزایش نرخ براده‌برداری می‌باشد. چتر ارتعاش خود- تحریک نامطلوبی است که موجب مضراتی همچون سطوح نهایی نامطلوب، سایش زود هنگام ابزار، خرابی ماشین و تولید صدای ناهنجار می‌شود.

به علت اهمیت کاهش چتر، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است. منابع تحقیقاتی موجود در این زمینه، می‌توانند به سه گروه تقسیم‌بندی شوند. گروه اول مربوط به تحقیقاتی است که از روش‌های غیر فعال برای رفع این مشکل استفاده کرده‌اند. در این تحقیقات تلاش می‌شود که با بهبود طرح سازه‌ای ابزار یا ماشین، تا حد امکان شرایط چتر کاهش داده شود. به طور مثال، افزایش صلبیت سیستم، تغییر شکل هندسی ابزار براده‌برداری [۱]، قرار دادن جاذب‌های ارتعاشات [۲]، و بکارگیری میراگرهای ضربه‌ای [۳]، نمونه‌هایی از روش‌های مورد استفاده می‌باشند. عدم هوشمندی و انعطاف-پذیری و در نتیجه طراحی غیر بهینه برای ماشین‌های مختلف در شرایط براده‌برداری متفاوت، ضعف عمدهٔ این گونه سیستم‌ها می‌باشد. دومین گروه، مربوط به تحقیقاتی است که از روش-های فعال برای جلوگیری از ارتعاشات چتر استفاده می‌کنند. در این روش‌ها، معمولاً از عملگرهایی استفاده می‌شود که با سرعت بالا قادر به پاسخ‌گویی به سیستم می‌باشند و مستقیماً نیروی کنترلی را با فرکانس بالا به سیستم وارد می‌آورند. در این زمینه می‌توان به بکارگیری عملگرهای پیزوالکتریک [۴] و مگنتواستریکتیو [۵] در کنترل فعال اشاره کرد. این روش‌ها انعطاف‌پذیری بالایی را برای تطابق با شرایط مختلف عملیات در سیستم‌های گوناگون، در کاهش ارتعاشات چتر فراهم می‌کنند، اما نسبت به روش‌های دیگر کنترلی گران‌تر می‌باشند که این عامل به هزینهٔ عملگرهای هوشمند و میزان انرژی مصرفی در بکارگیری فعال آنها مربوط می‌شود. گروه سوم از روش‌های جلوگیری از چتر مربوط به کاهش چتر با استفاده از روش‌های نیمه فعال است. در این روش، خواص دینامیکی برخی اجزاء ماشین می‌توانند به منظور دستیابی به پایداری بیشتر، با فرکانس محدودی تغییر داده شوند. قرار دادن میراگرهای متغیر در سیستم، یکی از رایج‌ترین اقدامات در این زمینه است. میراگرهای مگنتورئولوژیک نمونهٔ مناسبی از میراگرهای متغیر هستند که خواص میرایی آنها با تغییر ولتاژ اعمال شده به میراگر، قابل تغییر است. مزیت این روش این است که ضمن اینکه میراگر بطور دائم تاثیر میراکنندگی در سیستم دارد، تغییر خواص آن در فرکانسی پایین‌تر از فرکانس ارتعاش سیستم صورت میگیرد. منابع تحقیقاتی فراوانی در راستای بکارگیری میراگرهای مگنتورئولوژیک برای کاهش ارتعاشات در سیستم‌های با فرکانس پائین و متوسط از جمله ساختمآنها، پل‌های کابلی، سیستم تعلیق وسایل نقلیه و فونداسیون ماشین لباس‌شویی موجود می‌باشند، ولی مطالعات قابل توجهی در زمینهٔ بکارگیری میراگرهای مگنتورئولوژیک در سیستم‌های با فرکانس بالا مشاهده نشده است.

منابع تحقیقاتی بسیار اندکی در زمینهٔ کنترل نیمه فعال چتر در دست است. استفاده از سیالات الکترورئولوژیک، سرآغاز استفاده از این روش می‌باشد [۶]. استفاده از سیال مگنتورئولوژیک به جای سیال الکترورئولوژیک برای کاهش ارتعاشات چتر در عملیات داخل‌تراشی [۷]، تازه‌ترین کار تحقیقاتی گزارش شده می‌باشد که نتایج آن حاکی از عملکرد بهتر سیال مگنتورئولوژیک حول میله متهٔ داخل تراشی، برای تغییر سختی مته است. هرچند این تأثیر مثبت، بیشتر مربوط به سرعت‌های پایین اسپیندل بوده و در سرعت‌های بالاتر، به علت نیاز به افزایش خیلی زیاد سختی، این ابزار به تنهایی پاسخگو نمی‌باشد. میراگر مگنتورئولوژیک به علت توانایی در تغییر میرایی سیستم می‌تواند ابزاری در جهت رفع این نیاز باشد. تأثیر مثبت احتمالی استفاده از این میراگر در سیستم ماشین‌ابزار، با انجام آزمایشات گزارش شده است [۸]. در این آزمایش‌ها، با اعمال یک ولتاژ ثابت به میراگر تعبیه شده در سیستم ماشین‌ابزار در یک فرایند داخل‌تراشی، بهبود نتایج پایداری مشاهده شده، ولی هیچ گونه کار تحلیلی در مورد

1. Chatter

ارتعاشات چتر، مدل‌سازی، شبیه‌سازی و کنترل در این پژوهش ارائه نشده است. به طور قطع موارد مذکور، نیازهای اساسی بکارگیری میراگرهای مگنتورئولوژیک در کنترل ارتعاشات چتر می‌باشند که در این مقالهٔ به آنها پرداخته شده است. در کار حاضر یک مدل یک‌پارچه از ماشین تراش مجهز به میراگر مگنتورئولوژیک که شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است، ارائه می‌شود تا اثر میراگر در پایداری ماشین‌کاری نسبت به شرایط چتر بررسی شود و صحت مدل ارائه شده در پیش‌بینی نتایج در مقایسه با کار تجربی ذکر شده، روشن شود. بدیهی است که استفاده از ولتاژ ثابت، همیشه نمی‌تواند به عنوان یک روش بهینه مورد استفاده قرار گیرد. لذا در مرحلهٔ بعد، با آنالیز پارامترهای تأثیرگذار گوناگون، یک کنترلر فازی طراحی می‌شود، تا در هر لحظه مناسب‌ترین ولتاژ برای میراگر مگنتورئولوژیک فراهم شود. کنترلر پیشنهادی یک کنترلر نیمه فعال می‌باشد که در مقایسه با دیگر روش‌های کنترلی، انرژی بسیار کمتری صرف می‌کند. همچنین این سیستم، راه حل مطمئن‌تری نسبت به کنترلرهای فعال ارائه می‌کند، زیرا در صورتی که اشکالی در منبع انرژی یا سیستم کنترلی ایجاد شود، میراگر مگنتورئولوژیک به یک میراگر غیر فعال تبدیل می‌شود، که همواره می‌تواند در افزایش پایداری سیستم مؤثر باشد. در کار پیش رو، یک روش جدید نیز برای شناسایی روی خط چتر، بر اساس تعریف معیاری به نام شاخص شناسایی چتر (CDI)[1] ارائه می‌شود که بر پایهٔ آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی سیستم استوار است.



شکل ۱ شماتیک سیستم پیشنهادی

۲- ارتعاشات چتر و دیاگرام پایداری

چتر در ماشین‌کاری، ارتعاش مضری است که در نتیجهٔ مکانیزم خود- تحریک، هنگام تولید براده رخ می‌دهد. دو منشأ اصلی چتر، اثر امواج احیا شونده و کوپل شدن مودها می‌باشند. در اغلب فرایندهای ماشین‌کاری، چتر نوع احیا شونده زودتر از کوپل شدن مودها اتفاق می‌افتد [۹]. این نوع چتر نتیجهٔ اختلاف فاز به وجود آمده بین دو موج ارتعاشی متوالی روی سطح قطعه‌کار است (شکل ۲). این اختلاف فاز باعث به وجود آمدن ضخامت برادهٔ متغیری می‌شود که می‌تواند به صورت نمایی رشد کرده و به خرابی ابزار یا قطعه‌کار منجر شود. مدل‌های مختلفی برای توصیف چتر در فرایند تراشکاری به وسیلهٔ محققان ارائه شده، که در اغلب آنها از تئوری و مدل‌های خطی استفاده شده است [۹]، و در برخی نیز مدل‌های غیر خطی ترجیح داده شده است [۱۰].

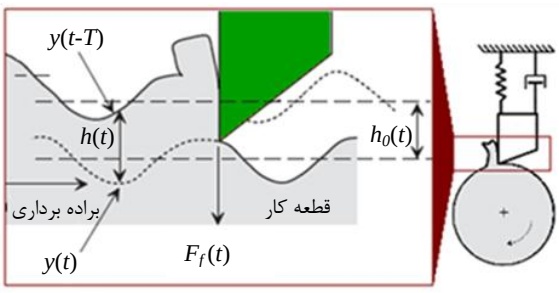
فرض می‌شود که مؤلفه‌ای از نیروی براده‌برداری که موجب ارتعاش نسبی می‌شود تنها در جهت شعاعی وارد می‌شود و جابجایی نسبی بین ابزار و قطعه‌کار، در این راستا اتفاق می‌افتد (شکل ۲)، ضخامت دینامیکی نهایی براده می‌تواند به صورت رابطه (۱) بیان شود.

$$h(t)=h_0-[y(t)-y(t-T)] \qquad (۱)$$

که در آن، h_0 ضخامت برادهٔ مورد انتظار، یعنی نرخ پیش‌روی ابزار ماشین‌کاری، $y(t)$ جابجایی نسبی ابزار- قطعه‌کار در زمان جاری و در راستای نیروی ماشین‌کاری مذکور (عمود بر سطح قطعه‌کار)، و $y(t-T)$ جابجایی نسبی در دور قبلی براده‌برداری می‌باشد. همچنین T دوره تناوب یک دور اسپیندل است که عامل اصلی روی دادن چتر نوع احیا شونده می‌باشد. بر اساس این تئوری، معادله ارتعاش سیستم می‌تواند به این صورت رابطه (۲) شود:

$$m\ddot{y}(t)+c\dot{y}(t)+ky(t)=F_f(t) \qquad (۲)$$

که در آن، m ، c ، و k به ترتیب جرم، میرایی، و سختی معادل سیستم بوده و $F_f(t)$ نیروی ماشین‌کاری در زمان حاضر است که با رابطهٔ (۳) قابل بیان است.



شکل ۲ نمای شماتیک مکانیزم چتر امواج احیا شونده.

1. Chatter Detection Index (CDI)

$$F_f(t)=K_f a h(t)=K_f a\left[h_0+y(t-T)-y(t)\right] \quad (۳)$$

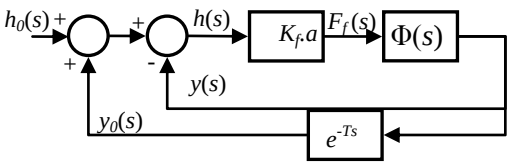
k_f ثابت برشی نیروی ماشین‌کاری و a عمق محوری براده‌برداری را بیان می‌کند. با استفاده از تبدیل لاپلاس، ضخامت دینامیکی براده در حوزهٔ لاپلاس به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود.

$$h(s)=h_0-y(s)+e^{-sT}y(s)=h_0+\left(e^{-sT}-1\right)y(s),$$
$$y(s)=F_f(s)\Phi(s)=K_f a h(s)\Phi(s) \quad (۴)$$

که در آن $\Phi(s)$ تابع تبدیل سیستم می‌باشد. بنابراین دیاگرام بلوکی ارتعاشات چتر می‌تواند به صورتی که در شکل ۳ نشان داده شده است، بیان شود.

در این تئوری، دیاگرام پایداری[1] سیستم که گویای حداکثر عمق محوری براده‌برداری مجاز در شرایط پایدار به ازای هر سرعت دورانی اسپیندل می‌باشد، قابل ترسیم است. فرایند ایجاد دیاگرام پایداری در مرجع [۹] شرح داده شده است که مبتنی بر تحلیل سیستم در حوزه لاپلاس است و فقط درصورتی قابل استفاده است که معادله دیفرانسیل سازه‌ای سیستم خطی باشند.

روش دیگر ترسیم منحنی‌های پایداری، رسم نقطه به نقطه، با تحلیل ارتعاشات سیستم در شرایط مختلف ماشین‌کاری است. برای تشخیص مرز پایداری در هر سرعت دورانی اسپیندل، باید مقدار عمق محوری براده‌برداری به تدریج افزایش داده شود تا با بررسی همگرایی یا واگرایی سیگنال‌های ارتعاشی، مرز بین شرایط ماشین‌کاری پایدار و ناپایدار در آن سرعت دورانی، شناسایی شود. این فرایند برای سرعت‌های دورانی مختلف تکرار می‌شود و به این ترتیب نمودار پایداری رسم می‌شود. در این پژوهش، به دلیل وجود جزء غیر خطی میراگر مگنتورئولوژیک و کنترلر غیر خطی و عدم امکان تحلیل در حوزهٔ لاپلاس، از این روش استفاده شده است.



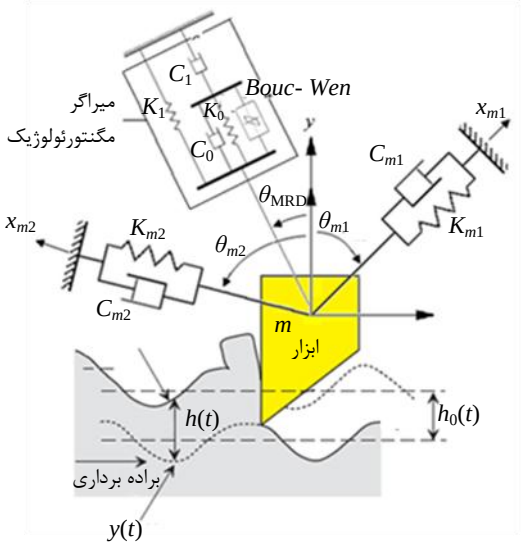
شکل ۳ دیاگرام بلوکی چتر نوع احیا شونده.

مسألهٔ مورد مطالعه در پژوهش حاضر، مربوط به یک ماشین تراش با دو درجه آزادی غالب با فرکانس‌های طبیعی ۱۵۰ و ۲۵۰ هرتز است که برای بررسی صحت نتایج، همانند سیستم بررسی شده در مرجع [۹] انتخاب شده است.

۳- مدل‌سازی یک‌پارچه سیستم

مطالعهٔ چتر در یک ماشین‌ابزار معمولاً با بررسی دیاگرام پایداری آن انجام می‌گیرد. بررسی فرایند رسم این دیاگرام [۹] نشان می‌دهد که چتر نتیجهٔ تقابل شرایط ماشین‌کاری و مشخصات دینامیکی سازهٔ ماشین‌ابزار می‌باشد. دینامیک سازه‌ای ماشین‌ابزار، در قالب تابع پاسخ فرکانسی بین نیرو و جابجایی نسبی نوک ابزار و قطعه‌کار، قابل بیان است. قسمت‌های حقیقی، موهومی و فاز تابع پاسخ فرکانسی، پارامترهای اصلی مؤثر در دیاگرام پایداری می‌باشند. آشکار است که تغییر مشخصه‌های سازه‌ای ماشین‌ابزار با ابزاری خارجی می‌تواند بر روی دیاگرام پایداری تأثیرگذار باشد، که ایدهٔ استفاده از میراگر مگنتورئولوژیک به این منظور می‌باشد.

به منظور مطالعهٔ اثر میراگر مگنتورئولوژیک بر پایداری ماشین تراش، معادلات حاکم باید به صورت کوپل با یکدیگر حل شوند. شکل ۴ نشان دهندهٔ نمای شماتیک مدل پیشنهاد شده می‌باشد که در آن θ_{MRD} زاویهٔ بین محور طولی میراگر و جهت ارتعاش نسبی بین ابزار و قطعه‌کار می‌باشد، که در این‌جا صفر در نظر گرفته شده است.



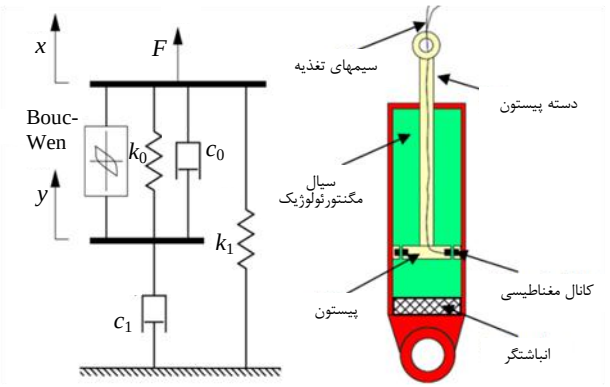
شکل ۴ شماتیک مدل پیشنهادی بکارگیری میراگر در ماشین تراش

1. Stability Lobes Diagram

جرم m و فنر- دمپرهای قرار گرفته در دو راستای دیگر، منعکس کننده رفتار ارتعاشی خود سازهٔ ماشین ابزار و تابع تبدیل آن $\Phi(s)$ میباشند.

کاملاً روشن است که سیستم تحت مطالعه یک سیستم مکاترونیکی است که اجزای آن شامل ماشین ابزار، میراگر مگنتورئولوژیک، مکانیزم امواج احیا شونده و کنترلر بر هم تأثیرگذاری دینامیکی دارند. بنابراین، تحلیل سیستم نیازمند ارائه یک مدل یک‌پارچه مکاترونیکی از سیستم است که بتواند رفتار ارتعاشی سیستم را تحت ولتاژهای مختلف اعمالی به میراگر پیش‌بینی کند. لازم به ذکر است که مدل‌سازی یک‌پارچه و تحلیل چتر در حضور میراگر مگنتورئولوژیک در مقالات موجود نبوده و از نوآوری‌های این مقاله محسوب می‌شود. مدل و روش تحلیل چتر ارائه شده در این پژوهش با مقایسه نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی موجود در کارهای قبلی [۸] صحه‌گذاری می‌شود.

نمای شماتیک یک میراگر مگنتورئولوژیک در شکل ۵- الف ارائه شده است. روغن مورد استفاده در این میراگر، حاوی ذرات بسیار ریز مغناطیسی قابل قطبی شدن می‌باشد. بنابراین ویسکوزیتهٔ ظاهری آن هنگام قرار گرفتن در یک میدان مغناطیسی، قابل تغییر است. در این میراگر از یک سیم‌پیچ حاوی جریان برای تولید میدان مغناطیسی استفاده می‌شود. بر این اساس، میرایی میراگر می‌تواند به صورت تابعی از ولتاژ اعمال شده به این سیم‌پیچ، متغیر باشد.



شکل ۵ الف- نمای شماتیک میراگر مگنتورئولوژیک، ب- سیستم مکانیکی معادل آن در مدل بوک-ون اصلاح شده.

مدل‌های متعددی در منابع تحقیقاتی برای توصیف رفتار میراگر مگنتورئولوژیک ارائه شده است [۱۲،۱۱]. در این پژوهش از مدل بوک-ون اصلاح شده که در مرجع [۱۱] معرفی شده است، بهره گرفته شد. دلیل این انتخاب، تطابق بهتر نتایج شبیه‌سازی این مدل و نتایج تجربی است که در مرجع مذکور گزارش شده است. همچنین با در نظر گرفتن این مسأله که چتر معمولاً در فرکانس‌های بالا اتفاق می‌افتد، مدل مورد استفاده برای میراگر، باید قابلیت در نظر گرفتن انواع بازه‌های فرکانسی و دامنه‌های ارتعاشی را دارا باشد، که مدل بوک-ون اصلاح شده در مقایسه با سایر مدل‌ها، بهتر پاسخگوی این نیاز می‌باشد. قسمت شکل ۵- ب سیستم مکانیکی معادل مورد استفاده در مدل بوک-ون اصلاح شده را نمایش می‌دهد.

معادلات حاکم بر این مدل، به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$F=\alpha z+c_0\left(\dot{x}-\dot{y}\right)+k_0\left(x-y\right)+k_1\left(x-x_0\right) \quad (۵)$$

$$z=-\gamma\left|\dot{x}-\dot{y}\right|z\left|z\right|^{n-1}-\beta\left(\dot{x}-\dot{y}\right)\left|z\right|^{n}+\delta\left(\dot{x}-\dot{y}\right) \quad (۶)$$

$$\dot{y}=\frac{1}{c_0+c_1}\left[\alpha z+c_0\dot{x}+k_0\left(x-y\right)\right] \quad (۷)$$

که در آن، F نیروی تولید شده به وسیلهٔ میراگر است، z متغیر تحولی پسماند می‌باشد که برای در نظر گرفتن تاریخچهٔ زمانی پاسخ منظور می‌شود، k_1 سختی انباشتگر، c_0 میرایی لزجی می‌باشد که در سرعت‌های بالاتر مشاهده می‌شود و c_1 اثر میرایی است که در آزمایش‌های مربوط به سرعت‌های پایین در میراگر مشاهده شده است [۱۱]. در این مدل، وابستگی پارامترها به ولتاژ القایی، با روابط زیر قابل بیان است.

$$\alpha=\alpha(u)=\alpha_a+\alpha_b u$$
$$c_1=c_1(u)=c_{1a}+c_{1b}u$$
$$c_0=c_0(u)=c_{0a}+c_{0b}u \quad (۸)$$

که در آن u از رابطهٔ (۹) پیروی می‌کند.

$$\dot{u}=-\eta\left(u-v\right) \quad (۹)$$

v ولتاژ اعمال شده به میراگر است. مقادیر عددی ۱۴ پارامتر مربوط به مدل بوک-ون برای میراگر مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ بیان شده‌اند [۱۱]. این میراگر در حالت باز شده، دارای طول تقریبی ۲۱/۵ سانتی‌متر و کورس ۲/۵± سانتی‌متر می‌باشد.

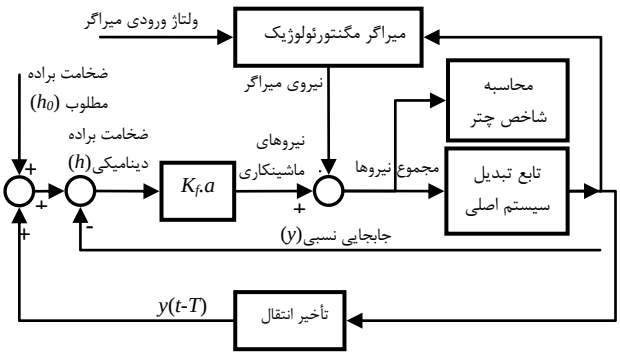
بر اساس معادلات حرکت میراگر مگنتورئولوژیک و معادلات حرکت ارتعاشی در فرایند تراشکاری، یعنی روابط (۲) تا (۷)، معادله حرکت کلی سیستم به شکل رابطه (۱۰) بیان می‌شود.

جدول ۱ پارامترهای مدل بوک-ون اصلاح شده

پارامتر	مقدار	واحد
c_{oa}	۲۱	N.sec/cm
c_{ob}	۳/۵	N.sec/cm.V
k_o	۴۶/۹	N/cm
c_{1a}	۳۸۳	N.sec/cm
c_{1b}	۲/۹۵	N.sec/cm.V
k_1	۵	N/cm
x_0	۱۴/۳	cm
α_a	۱۴۰	N/cm
α_b	۶۹۵	N/cm.V
Γ	۳۶۳	cm^{-2}
B	۳۶۳	cm^{-2}
A	۳۰۱	-
N	۲	-
H	۱۹۰	Sec^{-1}

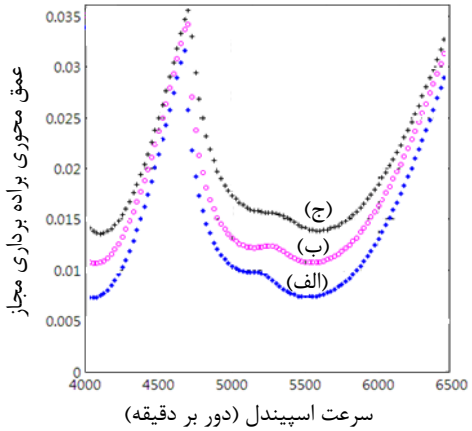
$$m\ddot{y}(t)+c\dot{y}(t)+ky(t)= K_f a[h_0+y(t-T)+y(t)]-F_{MRD}(t) \quad (۱۰)$$

که در آن F_{MRD} نیروی اعمال شده به وسیلهٔ میراگر است که همواره در جهت خلاف ارتعاش نسبی به ابزار وارد می‌شود. شکل ۶ بلوک دیاگرام سیستم یک‌پارچه حاصل را نمایش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که منحنی‌های پایداری حتی تحت ولتاژ به سمت بالا منتقل می‌شوند (شکل ۷) که به معنی بهبود پایداری در مقابل چتر می‌باشد.



شکل ۶ بلوک دیاگرام سیستم یک‌پارچه ماشین تراش و میراگر مگنتورئولوژیک جهت مطالعه چتر

این نتایج با مشاهدات تجربی گزارش شده در مرجع [۸] تطابق دارد، در حالی که در این مرجع هیچ تحلیلی برای توجیه این امر ارائه نشده بود.



شکل ۷ جابجایی دیاگرام پایداری با اعمال ولتاژ ثابت به میراگر الف- بدون میراگر؛ ب- تحت ولتاژ صفر؛ ج- تحت ولتاژ ۲/۵

۴- شاخص شناسایی چتر

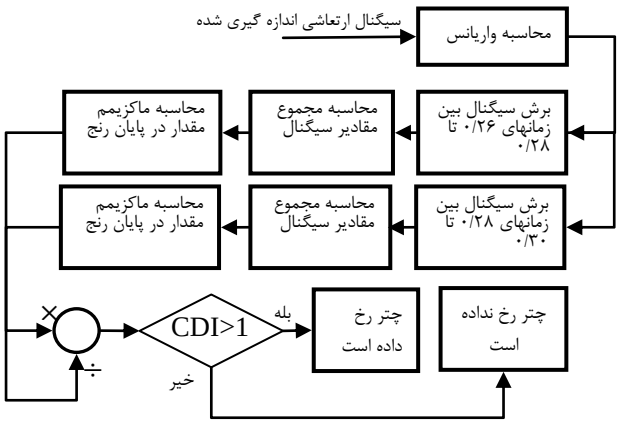
در این‌جا روش تازه‌ای برای شناسایی چتر بر اساس معرفی مفهومی به نام شاخص شناسایی چتر ارائه می‌شود که برای شناسایی چتر در فرایندهای واقعی به صورت روی خط و همچنین تشخیص وقوع چتر و رسم نمودارهای پایداری در مدل‌سازی‌ها، قابل استفاده می‌باشد. این در حالی است که یکی از روش‌های معمول مشاهده شده در پژوهش‌های پیشین در زمینهٔ شناسایی روی خط چتر، تحلیل سیگنال‌های صوتی سیستم می‌باشد [۱۳]. نمودار گردش کار روش پیشنهادی در شکل ۸ نشان داده شده است. در ابتدا واریانس سیگنال مورد نظر در طول زمان یک گام (۰/۳ ثانیه) محاسبه می‌شود، سپس محتویات سیگنال به دو فاصلهٔ زمانی تفکیک می‌شود که اولین بازه بین ۰/۲۶ ثانیه و ۰/۲۸ ثانیه، و دومین بازه بین ۰/۲۸ ثانیه و ۰/۳ ثانیه می‌باشد. هر یک از این دو شاخه سیگنال وارد بلوکی می‌شود که جمع تمامی مقادیر آن در طول بازه محاسبه شود. سپس شاخص شناسایی چتر با تقسیم کردن دو مقدار به دست آمده بر یکدیگر ایجاد می‌شود. مقدار این شاخص در زمان ۰/۳ ثانیه نشان دهندهٔ وقوع، عدم وقوع و میزان فاصله از شرایط چتر می‌باشد.

۵- کنترل نیمه فعال

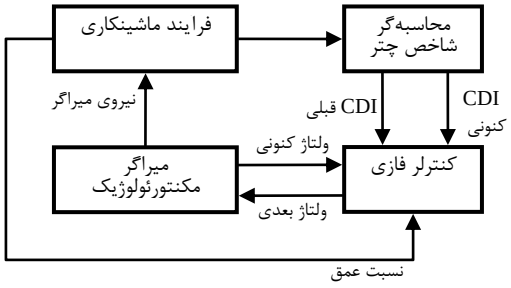
طراحی یک سیستم کنترلی فازی که وقوع چتر را تشخیص دهد و ولتاژ مناسب را به میراگر مگنتورئولوژیک اعمال کند در

این قسمت بیان می‌شود. فرایند محاسبهٔ ولتاژ مناسب (نمودار گردش کار شکل ۹) به این صورت می‌باشد که برای هر شرایط ماشین‌کاری خاص، یک مقدار به عنوان شاخص شناسایی چتر، بر اساس تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی سیستم محاسبه می‌شود. ورودی‌های کنترلر فازی شامل مقدار محاسبه شدهٔ شاخص شناسایی چتر در گام فعلی و گام قبلی، ولتاژ کنونی میراگر، و شرایط ماشین‌کاری (مانند نسبت عمق محوری در گام فعلی به گام قبلی) می‌باشند. خروجی کنترلر فازی نیز مقدار ولتاژی است که باید در گام بعد به میراگر اعمال شود.

مجموعه‌ای از قوانین فازی برای محاسبهٔ ولتاژ خروجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که وقوع چتر تشخیص داده شود، در گام بعدی (یعنی ۰/۳ ثانیهٔ بعد)، اصلاح ولتاژ برای خروج از شرایط چتر انجام می‌گیرد.



شکل ۸ نمودار گردش کار روش پیشنهادی برای شناسایی روی خط چتر



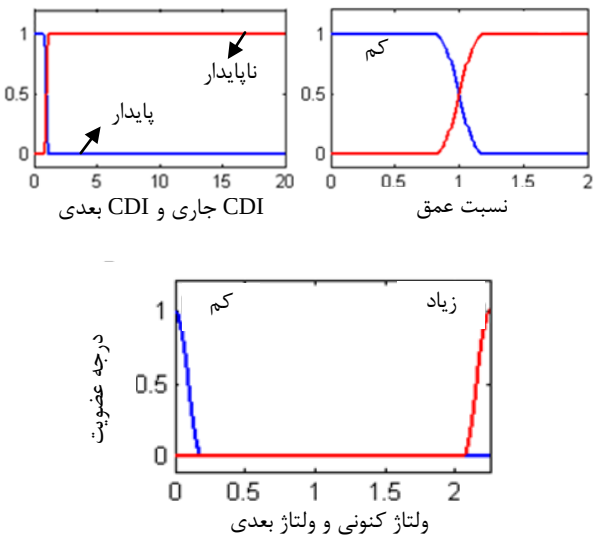
شکل ۹ فرایند محاسبهٔ ولتاژ مورد نیاز در سیستم کنترلی

این نرخ تغییر ولتاژ نباید از محدودیت‌های پهنای باند میراگر مگنتورئولوژیک تجاوز کند. مزیت دیگر کنترلر پیشنهادی این است که حتی در صورت تغییر نوع ماشین‌ابزار یا مشخصه‌های سازه‌ای آن و یا مشخصه‌های میراگر مگنتورئولوژیک، کنترلر به خوبی قادر به تطابق با شرایط جدید خواهد بود. علت این است که کنترلر بر اساس شاخص شناسایی چتر پایه‌ریزی شده است، که معیاری از وقوع یا دوری و نزدیکی به شرایط چتر می‌باشد و دیگر ورودی‌های کنترلر نیز فقط به شرایط ماشین‌کاری وابسته‌اند.

توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی کنترلر فازی در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. دو تابع عضویت S- شکل و Z- شکل برای هر ورودی و خروجی در نظر گرفته شده است. بر اساس دانش شهودی در مورد دینامیک سیستم و وظیفهٔ کنترلر، یک پایگاه قوانین فازی مطابق جدول ۲ ارائه شد.

جدول ۲ قوانین فازی بکار رفته برای کنترل نیمه فعال چتر

ولتاژ بعدی (خروجی)	ولتاژ کنونی	نسبت عمق	CDI قبلی	CDI کنونی
کم	کم	--	پایدار	پایدار
کم	--	کم	ناپایدار	پایدار
زیاد	--	زیاد	ناپایدار	پایدار
زیاد	--	--	--	ناپایدار
کم	زیاد	کم	پایدار	پایدار
زیاد	زیاد	زیاد	پایدار	پایدار



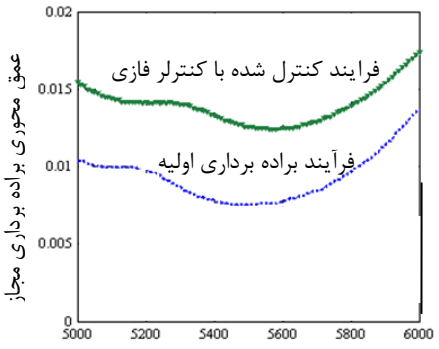
شکل ۱۰ توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی کنترلر فازی

۶- بحث و تحلیل نتایج

با اضافه کردن میراگر مگنتورئولوژیک به سیستم ماشین تراش،

نمودارهای پایداری آن به سمت بالا و مقداری به راست انتقال می‌یابند. این به معنی عمق براده‌برداری مجاز بیشتر در هر سرعت دورانی، یعنی بهبود پایداری است. به دلیل وجود میراگر، نسبت میرایی معادل سیستم (ζ) افزایش می‌یابد، بنابراین قسمت حقیقی تابع پاسخ فرکانسی کاهش یافته و موجب افزایش پهنای مجاز می‌شود و نمودارها به سمت بالا انتقال می‌یابند. حرکت اندک نمودارها به سمت راست، به دلیل افزایش کم فرکانس طبیعی سیستم به علت افزایش سختی معادل، به واسطهٔ وجود میراگر مگنتورئولوژیک می‌باشد. چون فرکانس چتر نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم، اما اندکی بیشتر از آن است [۹]، f_c نیز افزایش می‌یابد که موجب حرکت اندک نمودارهای پایداری به سمت راست می‌شود. این اثرات با افزایش ولتاژ میراگر، مقداری تشدید می‌شوند.

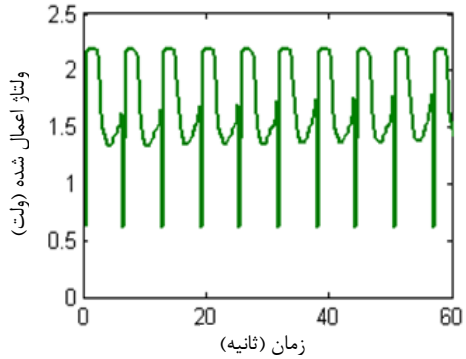
شکل ۱۱ قسمتی از دیاگرام پایداری سیستم اولیه و سیستم کنترل شده را پس از طراحی کنترلر فازی، و شکل ۱۲ ولتاژ اعمال شده به میراگر را در حالت کنترل شده، در یک دقیقه از زمان شبیه‌سازی نشان می‌دهد. نتایج گویای این مطلب است که کنترلر پیشنهادی، اثر مثبت قابل توجهی بر مشخصه‌های پایداری سیستم و نمودارهای پایداری آن، با مصرف انرژی ناچیز داشته است. شکل ۱۳ شبیه‌سازی ارتعاشات در حوزهٔ زمان برای شرایط ویژه‌ای است که ابتدا در حالت ناپایدار قرار داشته و با تشخیص کنترلر و توقف رشد ارتعاشات، به شرایط پایدار تبدیل شده است.



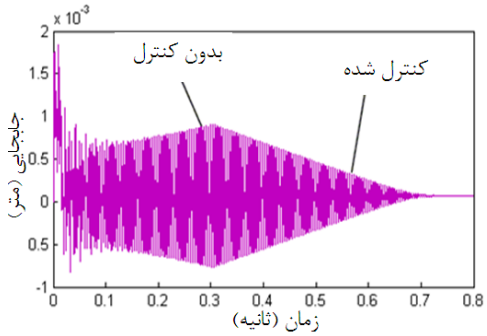
شکل ۱۱ دیاگرام پایداری سیستم اولیه و سیستم کنترل شده

۷- نتیجه‌گیری

بکارگیری یک میراگر مگنتورئولوژیک در سیستم ماشین تراش با کنترلر فازی مناسب، در پژوهش حاضر ارائه شد.



شکل ۱۲ ولتاژ اعمال شده به میراگر در حالت کنترل شده، در یک دقیقه از زمان شبیه‌سازی



شکل ۱۳ نمودار ارتعاشات نسبی برای شرایط ناپایدار اولیه و کنترل شده

مدل‌سازی و ابزارهای تحلیلی برای آنالیز و طراحی کنترلر مورد بررسی قرار گرفت و نتایج شبیه‌سازی، نتایج تجربی مربوط به ایدهٔ مقدماتی استفاده از این میراگر در کاهش ارتعاشات چتر ماشین‌ابزار را تأیید کرد. یک کنترلر فازی به منظور محاسبهٔ ولتاژ مورد نیاز میراگر، بر اساس رفتار ارتعاشی سیستم طراحی شد و با بکاگیری آن، مشخصه‌های پایداری سیستم به طور قابل توجهی بهبود یافت. نتایج به دست آمده نشان دهندهٔ عملکرد موفق ایدهٔ پیشنهادی، در بهبود پایداری در فرایند تراشکاری، با حداقل مصرف انرژی می‌باشند.

۸- مراجع

[1] Stone, B. J., "The Effect on the Chatter Behavior of Machine Tools of Cutters with Different Helix Angles on Adjacent Teeth", *Proc. 11th MTDR*, University of Birmingham, Vol. A, 1970, pp. 169-180.

[2] Tarng, Y. S., Kao, J. Y., and Lee, E. C., "Chatter Suppression in Turning Operations with Tuned Vibration Absorber", *J. of Materials Proc. Tech.*, Vol. 105, No. 1, 2000, pp. 55-60.
[3] Ema, S., and Marui, E., "Suppression of Chatter Vibration of Boring Tools Using Impact Dampers", *Int. J. Machine Tools & Manuf.*, Vol. 40, No. 8, 2000, pp. 1141-1156.
[4] Mei, C., Cherng, J. G., and Wang, Y., "Active Control of Regenerative Chatter during Metal Cutting Process", *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 128, No. 1, 1970, pp. 246-349.
[5] Song, S., 1998., *Intelligent Machining Control for Turning Process*, PhD Thesis, Fac. Grad. School Univ. Texas, Austin.
[6] Wang, B., and Fei, R., "On-line Chatter Detection and Control in Boring Based on an Electrorheological Fluid", *J. Mechatronics*, Vol. 11, No. 7, 2001, pp. 779-792.
[7] Mei, D., Kong, T., Shih, A. J., and Chen, Z., "Magnetorheological Fluid-controlled Boring Bar for Chatter Suppression", *J. Materials Processing Tech.*, Vol. 209, 2009, pp. 1861-1870.
[8] Sathianarayanan, D., Karunamoorthy, L., Srinivasan, J., Kandasami, G. S., and Palanikamur, K., "Chatter Suppression in Boring Operation Using Magnetorheological Fluid Damper", *Materials & Manuf. Processes*, Vol. 23, No. 4, 2008, pp. 329-335.
[9] Altintas, Y., *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000..
[10] Tlusty, J., and Ismail, F., "Basic Nonlinearity in Machining Chatter", *Annals of the CIRP*, Vol. 30, No. 1, 1981, pp. 21-25.
[11] Spencer, B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., and Carlson, J. D., "Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers", *J. Eng. Mech.*, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 230-238.
[12] Liao, W. H., and Lai, C. Y., "Harmonic Analysis of a Magnetorheological Damper for Vibration Control", *J. Smart Mater. Structural*, Vol. 11, 2002, pp. 288-296.
[13] Altintas, Y., and Chan, P. K., "In Process Detection and Suppression of Chatter in Milling", *J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 32, No. 3, 1992, pp. 329-347.