شانزدهمين كنفرانس سالانه(بين المللي) مهندسي مكانيك ISME2008
ايران، كرمان، دانشگاه شهيد باهنر كرمان، ٢٤-٢٦ ارديبهشت١٣٨٧

شناسايي عيوب ابزار برش و سيستم درايو ماشين ابزار در عمليات فرزكاري با استفاده از مفاهيم محاسبات نرم

مهدي شهاب
كارشناس ارشد- دانشگاه فردوسي، گروه مكانيک
ma_shahab@yahoo.com

مجيد معاونيان
استاديار- دانشگاه فردوسي، گروه مكانيک
moaven@um.ac.ir

محمد رضا قريب
كارشناس ارشد- دانشگاه فردوسي، گروه مكانيک
mech_gharib@yahoo.com

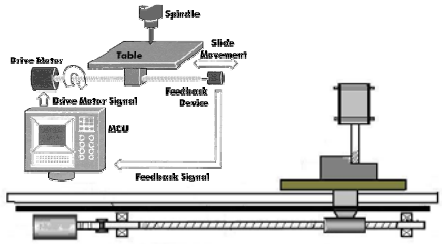
چكيده
اطلاع از وضعيت عملكرد ماشينهاي ابزار و صحت كار آنها در عمليات فرزكاري، بدليل گستره وسيع كاربرد آنها در ساخت و توليد همواره موضوع مهم و مورد توجه مهندسان بوده است. بعنوان مثال سايش و شكست ابزار بعنوان يك نوع عيب رايج از جمله وضعيتهايي است كه بايد بموقع شناسايي و رفع گردد تا از ضررهاي اقتصادي ناشي از توليد قطعات معيوب و غير استاندارد جلوگيري شود. در اين مقاله با توجه به اهميت موضوع، شناسايي و تعيين موقعيت و اندازه عيوب در ماشين CNC با استفاده از يک روش عملي و دقيق، با در نظر گرفتن مدل شبيه سازي شده از سيستم محرک ماشين ابزار (روش مدلسازي مركب) و نيروي ابزار برش، مورد بررسي قرار گرفته است. بدليل مزايا و توانايي هاي خاص شبكه هاي عصبي فازي در شناسايي الگو، از آنها در تشخيص عيب استفاده شده است. نتايج حاصل حاكي از قابليت و توان بالا در شناسايي، تفكيک، و تخمين اندازه عيوب اجزاي سيستم فوق مي باشد.

كلمات كليدي: ابزار برش، سيستم درايو ماشين ابزار، شبيه سازي، شبكه هاي عصبي- فازي، عيب ياب

مقدمه
اهميت شناسايي آسيب به سبب اينكه با شناسايي درست و بموقع آن مي توان از كاهش بازده فرآيند و توليد و يا حتي از كار افتادگي يک سيستم جلوگيري كرد، نمود خاصي مي يابد.
از ضروريا‌تي كه طراح هر سيستمي بايد به آن توجه ويژه نمايد، تشخيص بموقع هرگونه عيب در سيستم مي باشد. اين امر در مواردي كه دقت براي كاربردهاي خاصي همچون فرايند ماشينكاري از درجه اهميت بسيار بالايي برخوردار است، نمود خاصي مي يابد، بطوريكه مي توان از ضررهاي هنگفت كه در اثر كاهش دقت ماشينكاري در توليد قطعات بوجود مي آيد جلوگيري نمود. وضعيت سنجي ابزار برش در عمليات ماشينكاري قطعات و بخصوص در فرزكاري از اهميت ويژه اي برخوردار است. قطعه كار بدليل تماس مستقيم با ابزار برش از هر گونه بروز عيب در ابزار تاثير مي پذيرد و در نتيجه كيفيت آن وابستگي زيادي به وضعيت ابزار دارد. در اينجاست كه مسئله عيب يابي مقوله اي جدا از كيفيت و كميت كه شايد مهمترين خواست توليد كنندگان مي باشد نيست، زيرا به اين مهم نخواهند رسيد مگر با خطوط توليدي كه ماشين آلات آن از وظيفه معين و كاركرد مطمئن برخوردار باشند و اين امر بستگي به طراحي مهندسي جامع و كامل، ساخت دقيق و برخورداري از يک سيستم قوي و قابل اعتماد دارد. اين سيستم با توجه به اطلاعات دريافتي از سيگنالهاي خروجي دستگاه و با استفاده از روشهاي هوشمند، نوع وضعيت سيستم را از نظر صحت عملكرد و رديابي عيوب، بررسي مي كند.
محاسبات نرم با تقبل نادقيق بودن و با محور قراردادن ذهن انسان به‌پيش مي‌رود. اصل هدايت كنندهٔ محاسبات نرم بهره‌برداري از خاصيت عدم دقيق بودن جهت مهار كردن مسأله و پايين آوردن هزينهٔ راه‌حل است. محاسبات نرم را مي‌شود حاصل تلاشهاي جديد علمي دانست كه مدل‌سازي، تحليل، و در نهايت كنترل سيستم‌هاي پيچيده را با سهولت و موفقيت زيادتري امكان‌پذير مي‌سازد. به عنوان مهم‌ترين شاخه‌هاي اين محاسبات، بايد منطق فازي، شبكه‌هاي نوروني، و الگوريتم ژنتيک را نام برد. از آنجا كه روشهاي مبتني بر مفاهيم محاسبات نرم به عنوان روشهاي قدرتمندي در طراحي سيستمهاي عيب ياب محسوب ميشوند، طراحي سيستم عيب ياب فوق بر اين مبنا صورت گرفته، كه از امتيازات و ويژگيهاي خاصي برخوردار است. از جمله مي توان به مواردي همچون دقت بالا در رديابي عيوب، تعيين ساير عيوب براي ميزان اهميت و اتخاذ تصميمات لازم براي توقف يا ادامه كار و استفاده از تبديل موجک در بدست آوردن ويژگيهاي باقيمانده ها و بهبود كارايي، اشاره كرد.
سيستم Feed drive ، كه براي ايجاد حركت نسبي بين قطعه كار و ابزار برنده ماشين بكار مي‌رود، يكي از قسمتهاي اصلي هر ماشين افزار مي باشد و نقش مهمي در كيفيت محصول نهايي با تاثير گذاري بر پايداري كل سيستم، ايفا مي كند. از آنجا كه در روش مذكور، درستي و جامعيت مدل از اهميت بالايي در صحت نتايج برخوردار است، به طوريكه هر چه شبيه سازي به سيستم واقعي نزديكتر باشد، عيب يابي نيز به همان نسبت دقيقتر خواهد بود، از مدل كاملي براي سيستم drive با در نظر گرفتن غير خطي هاي موجود كه به روش مدلسازي مركب [١] و براي درايو ماشين ابزار با دقت بالا بدست آمده، به همراه نيروي برش ابزار [٢] استفاده شده است.

شبيه سازي سيستم درايو و نيروي برش
مدل مكانيكي شامل سيستم درايو و نيروي ابزار برش مي باشد كه در مجموع سيستم شامل موتور، بال اسكرو، كوپلينگ، ياتاقانها، راهنماي خطي، لغزنده و ابزار برش است (شكل ١). لازم به ذكر است كه سيستم درايو بدون تاثيرات نيروي برش در مقاله پيشين [٣] مورد بررسي و تحليل قرار گرفته است. از آنجا كه سيستم فوق داراي اجزايي است كه مي توانند هم به صورت گسترده و هم متمركز مدل شوند و همچنين بمنظور افزايش دقت و كارايي مدل، از روش مدلسازي مركب درشبيه سازي مكانيزم درايو آن، بهره گرفته شده است[١]. بطور كلي با استفاده از اين روش مي توان مشخصه هاي ديناميكي سيستم را به خوبي آشكار ساخت. رفتار ديناميكي سيستم، در حالت كلي غير خطي بوده و اين غير خطي بودن توسط لقي و اصطكاک كلمب موجود در سيستم بيشتر مي‌شود. ورودیهاي سيستم عبارتند از ولتاژ ورودي موتور (كه باعث حركت انتقالي ميز متناسب با سرعت چرخشي

اجزاي چرخنده در راستاي محور مربوط مي گردد) و سرعت چرخشي اسپيندل يا همان ابزار برش. بارهاي وارده بر سيستم، از جمله نيروهاي برشي اعمال شده بر قطعه كار و بار گشتاوري، مي تواند موجب تغيير شكلهاي موجود در سيستم محرک و از جمله تغيير شكل پيچ راهنما و در نتيجه ناپايداري حلقه‌هاي كنترل شود.



شكل ١ : نماي كلي سيستم درايو و نيروي برش ابزار

مدل شامل اينرسي اجزاي چرخنده (موتور و پيچ راهنما) ميز و نيز نيروهاي اعمال شده براين اجزا، اصطكاک و گشتاورهاي عكس‌العملي مي‌باشد. بعضي پارامترهاي مدل مانند لقي، ضرائب اصطكاک، سفتي، اصطكاک كلمب و غيره را مي‌توان به روشهاي تجربي نيز بدست آورد و در نهايت در سيستم اعمال نمود.

مقدار اصطكاک كلمب معادل قسمتهاي چرخنده موتور نيز با T_F بيان شده است. حركت چرخشي پيچ، موجب حركت انتقالي مهره و در نتيجه ميز بمقدار $X_\circ$ مي‌گردد. جرم سرنده و قسمتهاي متحرک آنرا با M نمايش داده و نيروي ايجاد شده توسط پيچ راهنما نيز F_D مي‌باشد كه عبارت از مجموع نيروهاي بكار رفته جهت شتاب دادن به ميز F_M و نيروي اصطكاک و F_X نيروي برشي مي‌باشد يعني :

$$F_D = F_f + F_X - F_m \qquad (١)$$

T_G نيز گشتاور ايجاد شده توسط موتور مي‌باشد. گشتاور محرک T_D توسط پيچ راهنما باعث اعمال نيروي F_D به ميز است. $\mu_1 = \rho/2\pi\xi$ عبارت از ثابت تبديل گشتاور به نيرو بوده و ρ گام پيچ و ξ نيز قابليت انتقال آن مي‌باشد.

حركت انتقالي مهره بمقدار X_1 بستگي به مشخصات دنده پيچ داشته و متناسب با حركت چرخشي پيچ، $\theta_\circ$ در مهره مربوطه $(X_1 = K_S \times \theta_\circ)$ مي باشد. براي تعيين حركت انتقالي واقعي ميز لازم است تا مقدار تغيير شكلهاي پيچشي و طولي مشخص شوند. طول واقعي پيچ راهنماي تحت تنش را مي‌توان بصورت يک متغير وابسته بمكان سرنده تعريف كرد. در اين صورت كل تغيير شكل سيستم محرک شامل تغيير شكل زاويه‌اي $\delta\theta$ و تغيير شكل محوري پيچ راهنما δX مي‌باشد.

از آنجا كه روش مدل سازي مركب، موجب مي شود سيستمهاي پيچيده ديناميكي جوابهاي دقيقتري در تحليلهاي ديناميكي ارائه كنند، از اين روش استفاده شده است. سيستمهاي داراي شفتهاي دوار، ميله ها، خطوط لوله و ... كه داراي عناصر گسترده مي باشند را مي توان با استفاده از روش مدلسازي گسترده مدل كرد. بطور كلي با استفاده از اين روش مي توان مشخصه هاي ديناميكي سيستم را به خوبي آشكار ساخت. مدلسازي و شبيه سازي چنين سيستمهايي توسط *whalley* مورد بررسي قرار گرفته است. [٤] هر عنصر مي تواند به صورت يک عنصر متمركز يا گسترده مدل شود و هيچ محدوديتي براي استفاده از اين روش در تركيب هاي سري و موازي وجود ندارد.

تاثيرات پيچش بر روي پيچ

پيچ راهنما تحت تاثير نيروي طولي و گشتاور پيچشي بمنظور حركت مير قرار دارد. نيروي پيچشي و محوري موجب كاهش طول مي گردد. اگر پيچ راهنما بعنوان يک شفت بلند و يک عنصر گسترده در نظر گرفته شود (با طول L و قطر d) مي توانيم از روش مدلسازي مركب، استفاده كنيم. براي توصيف ديناميكي پيچ راهنما از يک سري نامحدود از عناصر كوچک با طول dx استفاده شده است. المان dx در فاصله x از ياتاقان جلويي قرار گرفته است كه گشتاور ورودي و خروجي $T(t,x)$ و $T(t,x+dx)$ بر آن اعمال مي گردد. روابط بين گشتاور و سرعت ورودي T_0, ω_0 و خروجي T_1, ω_1 را با استفاده از شكل المان گسترده، بصورت زير مي توان نشان داد .

$$\begin{bmatrix} T_0(s) \\ T_1(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi w(s) & -\xi(w(s)^2-1)^{1/2} \\ \xi(w(s)^2-1)^{1/2} & -\xi w(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_0(s) \\ \omega_1(s) \end{bmatrix} \qquad (٢)$$

كه در آن ξ ، w و Γ به صورت زير تعريف مي شوند

$$\xi = \sqrt{L/C} \qquad (٣)$$

$$w(s) = \frac{(e^{2\Gamma(s)l}+1)}{(e^{2\Gamma(s)l}-1)} \qquad (٤)$$

$$\Gamma(s) = s\sqrt{LC} \qquad (٥)$$

ξ مشخصه مقاومت و Γ تابع انتقال براي پيچ راهنما تحت پيچش است. معادله گشتاور اصطكاكي بال اسكرو با رابطه زير بيان مي شود :

$$T_1(s) = R\omega_1(s) \qquad (٦)$$

در معادله بالا R ضريب اصطكاک ويسكوز متمركز، مشترک با ياتاقانهاي عقبي است. در نتيجه پارامتر متمركز _ گسترده براي پيچ راهنما تحت پيچش بوسيله معادلات زير بيان مي شود :

$$\begin{bmatrix} T_0(s) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi w(s) & -\xi(w^2(s)-1)^{1/2} \\ \xi(w^2(s)-1)^{1/2} & -\xi w(s) - R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_0(s) \\ \omega_1(s) \end{bmatrix} \qquad (٧)$$

سرعت ورودي و خروجي شفت را بر اساس گشتاور ورودي به صورت زير مي توان نوشت

$$\begin{bmatrix} \omega_0(s) \\ \omega_1(s) \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} \xi w(s) + R \\ \xi(w^2(s)-1)^{1/2} \end{bmatrix}}{\xi(w(s)R + \xi)} T_0(s) \qquad (٨)$$

با تعويض w(s) از معادله (٤) بالا، رابطه پيچش ورودي و خروجي براي پيچ راهنما مي شود

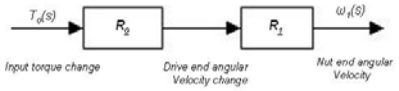
$$\omega_0(s) = \frac{(\xi+R)e^{2\Gamma(s)l} + (\xi-R)}{\xi\{(\xi+R)e^{2\Gamma(s)l} + (R-\xi)\}} T_0(s) \qquad (٩)$$

$$\omega_1(s) = \frac{2e^{2\Gamma(s)l}}{(\xi+R)e^{2\Gamma(s)l} + (R-\xi)} T_0(s) \qquad (١٠)$$

در شكل بلوک دياگرام، فرمولهاي متمركز و گسترده براي پيچ راهنما از روابط(٧) و (٨) به صورت زير بيان مي شود.

$$R_0(s) = \frac{(\xi+R)e^{2\Gamma(s)l} + (\xi-R)}{\xi\{(\xi+R)e^{2\Gamma(s)l} + (R-\xi)\}} \qquad (١١)$$

$$R_1(s)=\frac{2\xi e^{2\Gamma(s)l}}{(\xi+R)e^{2\Gamma(s)l}+(\xi-R)} \qquad (۱۲)$$



شکل ۲ . بلوک دیاگرام مربوط به تاثیرات پیچش

تاثیرات نیرو در راستاي محور[1]

براي بدست آوردن معادلات حاکم براي پیچ راهنما تحت تاثیرات طولي، پیچ راهنما بعنوان شفتي بلند با قطر d و طول L در نظر گرفته شده است. المان dx در فاصله x از یاتاقان جلویي تحت تاثیر ورودي σ و ε (تنش و کرنش) قرار دارد. براي هر المان کوچک، ضریب القاء معادل L و Ω *(shunt_capacitance)* تعریف مي شود که در این مورد $\Lambda=\rho$ و $\Omega=1/E$ است. حل عمومي براي معادله به صورت زیر است

$$\begin{bmatrix}\sigma_0(s)\\ \sigma_1(s)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\bar{\xi}\bar{w}(s) & -\bar{\xi}(\bar{w}^2(s)-1)^{1/2}\\ \bar{\xi}(\bar{w}^2(s)-1)^{1/2} & -\bar{\xi}w(s)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_0(s)\\ v_1(s)\end{bmatrix} \qquad (۱۳)$$

$$\bar{\xi}=\sqrt{\frac{\Lambda}{\Omega}}=\sqrt{\rho\mathrm{E}}, \qquad (۱٤)$$

$$\bar{\Gamma}(s)=s\sqrt{\Lambda\Omega}=s\sqrt{\frac{\rho}{\mathrm{E}}} \qquad (۱۵)$$

پارامترهاي R,ξ,Γ مربوط به تاثیرات پیچش و $\bar{R},\bar{\xi},\bar{\Gamma}$ مربوط به تاثیرات کشش در محور مي باشند. اگر حالا معادله نهایي به صورت $\sigma_1(s)=\bar{R}v_1(s)$ باشد ، معادله (۱۳) مي شود

$$\begin{bmatrix}\sigma_0(s)\\ 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\bar{\xi}\bar{w}(s) & -\bar{\xi}(\bar{w}^2(s)-1)^{1/2}\\ \bar{\xi}(\bar{w}^2(s)-1)^{1/2} & -\bar{\xi}\bar{w}(s)-\bar{R}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}v_0(s)\\ v_1(s)\end{bmatrix} \qquad (۱٦)$$

$$\bar{w}(s)=\frac{(e^{2\bar{\Gamma}(s)l}+1)}{(e^{2\bar{\Gamma}(s)l}-1)} \qquad (۱۷)$$

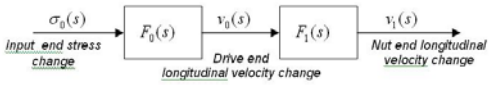
با جایگذاري معادله ۱۷ براي $\bar{w}$ و معکوس کردن، معادلات به شکل زیر بدست مي آیند

$$\begin{bmatrix}v_0(s)\\ v_1(s)\end{bmatrix}=\frac{\begin{bmatrix}(\bar{\xi}+\bar{R})e^{2\bar{\Gamma}(s)l}+(\bar{\xi}-\bar{R})\\ 2\bar{\xi}e^{\bar{\Gamma}(s)l}\end{bmatrix}}{\bar{\xi}\{(\bar{\xi}+\bar{R})e^{2\bar{\Gamma}(s)l}+(\bar{R}-\bar{\xi})\}}\sigma_0(s) \qquad (۱۸)$$

ازمعادله فوق بلوک دیاگرام براي پیچ راهنما تحت کشش بدست مي آید که در آن

$$F_0(s)=\frac{(\bar{\xi}+\bar{R})e^{2\bar{\Gamma}(s)l}+(\bar{\xi}-\bar{R})}{\bar{\xi}\{(\bar{\xi}+\bar{R})e^{2\bar{\Gamma}(s)l}+(\bar{R}-\bar{\xi})\}} \qquad (۱۹)$$

$$F_1(s)=\frac{2\bar{\xi}e^{2\bar{\Gamma}(s)l}}{(\bar{\xi}+\bar{R})e^{2\bar{\Gamma}(s)l}+(\bar{\xi}-\bar{R})} \qquad (۲۰)$$



شکل ۳ : بلوک دیاگرام مربوط به کشش پیچ راهنما

نمایش تابع انتقال گسترده- متمرکز پیچ راهنما در پیچش و کشش بوسیله معادلات ۱۱ و ۱۲ و همچنین ۱۹ و ۲۰ بدست مي آید. این معادلات به یک شکل با تفاوت در $\bar{\xi},\xi$ و $\bar{\Gamma},\Gamma$ و $\bar{R},R$ هستند .[۱]

مهره[2] تحت بارگذاري جانبي

درایو موتور تحت تاثیر اختلاف تغییرات طولي بین ابتدا و انتهاي پیچ راهنما و اختلاف جابجایي مهره و سرنده قرار دارد که این عوامل موجب تغییرات در بارگذاري جانبي مهره مي شود. این تغییرات وقتي در سختي مهره k_p ضرب شود، تغییرات نیروي بارگذاري عرضي به صورت زیر بدست مي آید

$$\left[\delta_x+\left(\frac{v_0(s)-v_1(s)}{s}\right)\right]k_p=f(s) \qquad (۲۱)$$

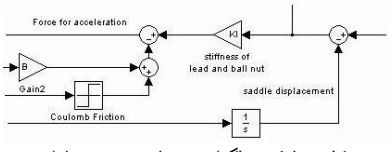
δ_x اختلاف جابجایي مهره و سرنده است. v_0 سرعت ورودي و v_1 سرعت خروجي است که در نتیجه تغییرات گشتاور T_b (مخالف با گشتاور موتور) مي شود

$$\left[\delta_x+\left(\frac{v_0(s)-v_1(s)}{s}\right)\right]k_p\mu=T_b \qquad (۲۲)$$

انتهاي پیچ و مهره و یاتاقانها مي تواند بعنوان عناصر سري مدل شود. سختي مرکب اجزاء ، شامل سختي K_L است که براي راندن قطعه کار بکار مي رود. اگر دنباله پیچ سختي K_t داشته باشد و ترکیب مهره و یاتاقانها سختي K_N باشد داریم :

$$\frac{1}{k_L}=\frac{1}{k_t}+\frac{1}{k_N} \qquad (۲۳)$$

با در نظر گرفتن جزء اصطکاک غیر خطي، بلوک دیاگرام مربوطه بصورت زیر نشان داده مي شود [۱]



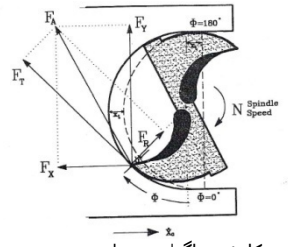
شکل٤. بلوک دیاگرام مربوط به سختي طولي

فرآیند برش

براي مدلسازي نیروي برش از روشي که توسط *Gygax* و *Tlusty* ارائه گردیده، استفاده شده است که دقت قابل قبولي با فرایند عملي در ماشینکاري دارد. دیاگرام نیرو براي ابزار دو دندانه در طول برش در شکل ۵ نمایان است. [۲]

1- longitudinal excitation

2- ball nut lateral loading



شكل۵. دياگرام مربوط به نيروي برش

در اين شكل φ موقعيت زاويه اي لحظه اي لبه برنده است. برش از $\varphi = 0$ شروع شده و ضخامت تراشه در $\varphi = 90$ به بيشترين مقدار مي رسد. بيشترين مقدار x_t نرخ پيشروي در هر دندانه است و به صورت زير بدست مي آيد.

$$X_t = \frac{f}{NT} \qquad (۲۴)$$

$f(^{mm}/_{min})$ نرخ پيشروي، N سرعت چرخش ابزار $(^{r}/_{min})$ و T تعداد دندانه بر روي ابزار است.

$$h = X_t \sin\varphi \qquad (۲۵)$$

h ضخامت لحظه اي تراش است. نيروهاي نشان داده شده در شكل نيروهايي هستند كه از طرف ابزار بر قطعه كار اعمال مي شوند.

ورودي به اين قسمت، سرعت ميز و سرعت زاويه اي ابزار و خروجي نيرو در جهت x مي باشد. F_A نيروي كل و F_T و F_R نيرو در جهت مماسي و شعاعي ابزار و F_x و F_y مولفه هاي F_A در صفحه x و y ميز دستگاه هستند

$$F_T = kbh \qquad (۲۶)$$

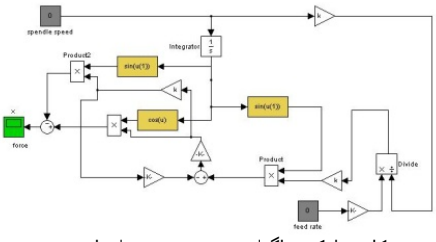
نيروي مماسي F_T تابعي از ضخامت تراشه است. b عمق برش مي باشد و k سختي ويژه برش ثابتي است كه به جنس قطعه كار و هندسه ابزار بستگي دارد.

$$F_R = \mu F_T \qquad (۲۷)$$

μ (نسبت نيرو) براي شرايط خاص برش ثابت فرض مي شود. μ و k معمولا از آزمايشهاي برش در حالت پايدار تعيين مي شوند. از دياگرام نيرو داريم

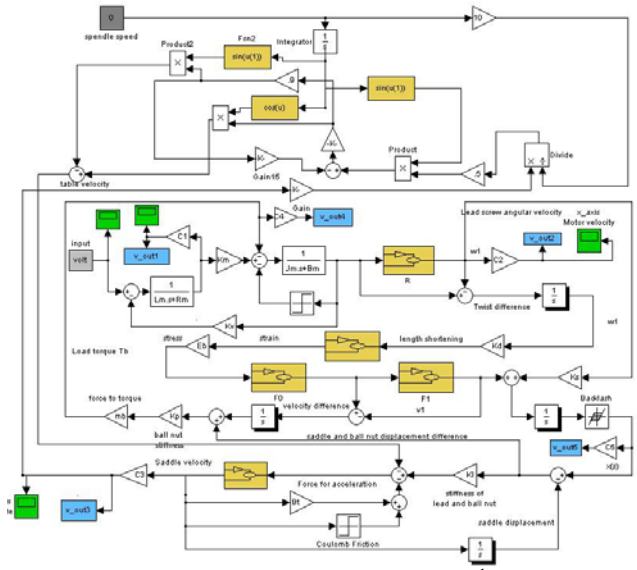
$$F_x = F_T \cos\varphi - F_R \sin\varphi$$
$$F_y = F_T \sin\varphi - F_R \cos\varphi \qquad (۲۸)$$

در شكل دياگرام جعبه اي مدل نيرو نشان داده مي شود. ورودي اين سيستم، سرعت ميز و سرعت زاويه اي ابزار و خروجي نيرو در جهت x مي باشد



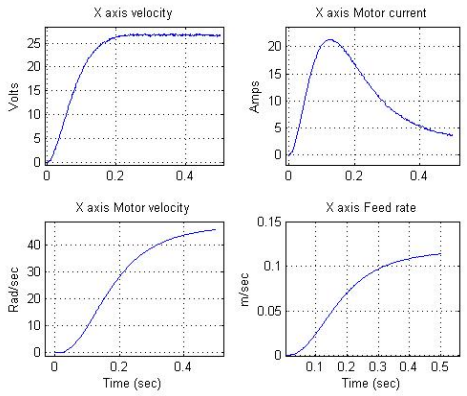
شكل٦. بلوک دياگرام نيروي برش در راستاي محورx

در اين تحقيق، عمل شبيه سازي و اجراي مدل با استفاده از جعبه ابزار simulink متعلق به نرم افزار MATLAB انجام شده است. با توجه به مطالب و توضيحات گفته شده، مدل دياگرام جعبه اي سيستم راه انداز و نيروي برش استفاده شده درعيب يابي، در شكل ۷ نشان داده شده است.



شكل۷: بلوک دياگرام مدل سيستم درايو به همراه تاثيرات نيروي برش ابزار

لازم به ذكر است كه مقادير پارامترهاي سيستم قابل تغيير و اعمال براي ماشينهاي ابزار مجهز به بال اسكرو با ساختار مشابه مي باشند. ولتاژ ورودي به موتور و سرعت چرخشي اسپيندل به عنوان ورودیها و سرعت موتور، جريان موتور و نرخ تغذيه، سه خروجي سيستم محسوب مي‌شوند. سيگنالهاي ورودي و خروجي كه از مدل شبيه سازي شده بدست آمده اند و معرف رفتار سيستم سالم هستند، در شكل زير آورده شده است.



شكل ۸ : ولتاژ موتور، جريان موتور، سرعت موتور و سرعت پيشروي ميز

بررسي عيوب و تاثيرات آنها

عيوب را مي توان به دسته هاي مختلفي تقسيم كرد، مثل عيوب در اثر تماس و سايش، ترک محور، ناميزاني، خميدگي محور، عدم هم محوري، لقي و غيره. بعنوان مثال در توربو ماشينها عيوب ناميزاني (عدم هم محوري در محل كوپلينگ)، خميدگي محور (در اثر عدم گرمايش يكنواخت، نيروي زياد، ناميزاني زياد و نصب انقباضي) و ترک محور سه عيب اساسي شمرده مي شوند. تغيير در پارامترهاي مختلف مي تواند به نوعي بيانگر عيوب در اجزاء دستگاه باشند كه هر يک تعابير خاص خود را دارند. بعنوان مثال، تغيير در پارامتر بک لش كه موجب تغيير دقت دستگاه مي گردد، مي تواند بيانگر افزايش لقي در سيستم، در اثر سايش و يا عوامل ديگر باشد. پارامترهاي CF, M_t, B_t به نوعي بيانگر افزايش اصطكاک و مانع در

حرکت روان سرنده محسوب مي شوند. K_p به معيوب بودن مهره مربوط مي شود. L_b به عدم هم محوري و يا خمش بال اسکرو دلالت دارد. از عيوب ديگر قابل رديابي، مي توان به ترک محور اشاره کرد. تشخيص وجود ترک در ماشينهاي دوار از اهميت بالايي برخوردار است زيرا در اثر وجود ترک و ناپيوستگي در شافت، مقاومت در برابر خستگي و شکست در شافت بسيار پايين آمده و طول عمر مفيد اين ماشينها به شدت کاهش مي يابد.

در مورد شکست ابزار و تاثير آن در معادلات نيروي برشي مـي تـوان گفـت، مولفه هاي لحظه اي در جهت عمودي و مماسي بصورت معـادلات ٢٦ و ٢٧ هستند و در فرزکاري با چند لبه داريم

$$F_x = \sum_{i=1}^{T} \delta(i) F_x(\varphi_i) \qquad \delta(i) = 1 \quad if \quad \varphi_s \le \varphi \le \varphi_e$$
$$F_y = \sum_{i=1}^{T} \delta(i) F_y(\varphi_i) \qquad 0 \qquad otherwise \qquad (٢٩)$$

شکست در دو حالت کلي و جزئي رخ مي دهد. در حالت شکسـت کلـي بـه دليل قطع تماس ابزار و قطعه کار، مقدار نيروي برش به صفر مـي رسـد. در اين حالت $F_x = F_y = 0$ مي باشد.

اگر ابزار به طور جزيي دچار شکست شود.(يکي از دندانه ها شکسته گـردد) ميانگين نيرو تغيير مي کند که بستگي بـه شـدت درگيـري و سـاييدگي در وجوه ابزار دارد. به هنگام شکست يک دندانه، به علت کوتاه تـر شـدن لبـه، مقدار براده برداشته شده کمتر از ساير لبه هاست و نيرو کاهش مي يابد. در سيکل بعدي بار براده برداري بيشتر است زيرا مقداري براده از سـيکل قبـل باقي مانده است در نتيجه نيرو افزايش مي يابد. براده برداري تا رسـيدن بـه سيکل بعدي لبه شکسته شده به طور پايدار ادامه پيـدا مـي کنـد. لـذا لبـه شکسته شده مرتبا حالت پايدار نيرو را به هم مي زند. [٢] تاثير شکست بـه صورت زير در مدل نيرو وارد مي گردد

$$h = x_t \sin(\varphi) + (r_i - r_{i-1}) + h_i \quad if \quad x_t \sin(\varphi) + (r_i - r_{i-1}) > 0 \qquad (٣٠)$$

$$h = 0 \quad if \quad x_t \sin(\varphi) + (r_i - r_{i-1}) \le 0 \qquad (٣١)$$

$$h_i = \sum_{j=1}^{k} x_t \sin(\varphi) + r_{i-j} - r_{i-j-1} \quad if \quad x_t \sin(\varphi) + (r_{i-k} - r_{i-k-1}) < 0 \qquad (٣٢)$$

که در نتيجه براي نيرو در جهت x در حالت معيوب داريم

$$F_x = kb \sum_{i=1}^{T} \delta(i)(x_t \sin(\varphi) + r_i - r_{i-1} + h_i)(\cos\varphi_i - \sin\varphi_i)$$
$$\delta(i) = 1 \qquad \varphi_s \le \varphi \le \varphi_e$$
$$\delta(i) = 0 \qquad otherwise \qquad (٣٣)$$

نظر به اينکه بروز شکست و سايش در ابزار مستقيما بر نيروي برش تاثير مي گذارند، لذا سيگنال نيروي برش در سيستم درايو دچار تغييـر مـي شـود. از آنجا که نيروهاي لبه اي به هنگام بروز سايش قابل ملاحظه مـي باشـند. در واقع اثر سايش بصورت نيروي لبه اي آشکار مي شود در ايـن حالـت رابطـه نيرو با سايش به شکل معادله زير در مي آيد:

$$F_t = kbX_t \sin(\varphi) + bC_w V_B$$
$$F_K = \mu F_t \qquad (٣٤)$$

که در اين رابطه F_t نيروي برشي مماسي، V_B پهناي ناحيـه سـايش و C_w ثابت نيروي لبه اي مي باشد. يادآوري مي شود کـه Vb ، سـايش ميـانگين است و T تعداد دندانه هاي ابزار مي باشد.

$$V_B = {}^{1}/_{T} \sum_{i=1}^{T} V_B(i) \qquad (٣٥)$$

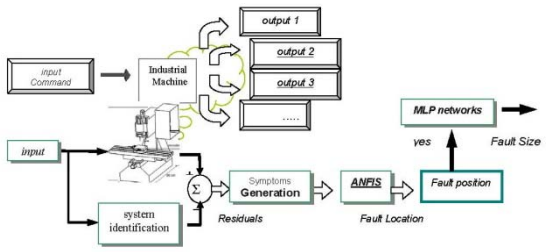
عيب يابي

استفاده از روشهاي جديد عيب يابي و مونيتورينگ، تاثير بسزايي در کـاهش هزينه ها براي تعميرات ماشـين آلات مختلـف از موتورهـاي ديـزل ناوگـان حمل و نقل ريلي و دريايي تا توربينهاي گازي و... را در بر دارد. در سيسـتم پيشنهاد شده، داده ها از طريق شبکه داخلـي کارخانـه مـي تواننـد منتقـل گردند و در نرم افزاري براي مديريت و آرشيو و تعبير اين اطلاعات در جهت اتخاذ تدابير نگهداري و تعميرات لازم براي ماشـينهاي ابـزار و روانکـار آنهـا مورد استفاده قرار گيرند.

روش عيب يابي مذکور بر پايه زير است :

- مدل کردن وضعيت نرمال سيستم (در غياب هرگونه عيب)
- توليد باقيمانده، يعني اختلاف سيگنالهاي مربوط به سيستم واقعي و مدل اسمي سيستم، که اين سيگنالها مي توانند خروجي سيستم، متغيرهاي حالت، پارامترهاي سيستم و يا ترکيبي از آنها باشند.
- اعلام بروز عيب در صورت مشاهده اختلاف قابل توجه
- تشخيص محل وقوع، زمان وقوع و اندازه عيب

وضعيت نرمال سيستم با استفاده از مدل شبيه سازي شده، تعيين مي گردد. براي تعيين موقعيت و اندازه عيب از سيستم تصميم‌گيري عصبي _ فازي ANFIS استفاده شده است. ساختار FDI طراحي شده قادر به تشخيص عيوب پارامترهاي موجود در اجزاء سيستم درايو و ابزار برش، با قابليت بالا در رديابي آنها را دارا مي‌باشد. شکل (٩) شماي کلي سيستم طراحي شده را به نمايش مي‌گذارد.



شکل ٩ : شماي کلي روش سيستم عيب ياب طراحي شده

همچنانکه گفته شد در مدل بکار رفته، ولتاژ موتور و سرعت زاويه اي ابزار به عنوان ورودي، و سـرعت موتـور، جريـان موتـور و نـرخ تغذيـه خروجيهـاي سيستم محسوب مي‌شوند (سيگنالهاي فوق از آنجهت که بوسيله سنسـورها براحتي قابل اندازه گيري هستند انتخاب شده اند) که در صورت امکان مـي توان از سيگنالهاي مربوط به جابجايي و نيـروي ميـز و گشـتاور موتـور نيـز استفاده کرد. تعداد خروجي هاي سيستم و اينکـه کـداميک از آنهـا تعيـين شوند بستگي به عواملي مانند شکل سيگنالهاي باقيمانده، امکانات و شـرايط اندازه گيـري سـيگنالها و غيـره دارد. اسـتفاده از نمونـه هـاي سـيگنالهاي باقيمانده، (بدون تغيير) به عنوان ديتاي ورودي به شبکه، باعث حجيم شدن شبکه، طولاني شدن مراحل آموزش شبکه، وابستگي شديد نتايج بـه دامنـه سيگنال وحساسيت زياد نتايج بـه نـويز ميباشـد، بـه همـين منظـور، بـراي تشخيص عيوب در پارامترهاي سيستم، از ويژگيهاي برجسته هرسيگنال، به عنوان علائم عيوب از هر باقيمانده استخراج مي‌شود. اين ويژگيها که نسـبت به بقيه تاثير بيشتري دارند، عبارتند از :

- مقدار بيشينه هر باقيمانده

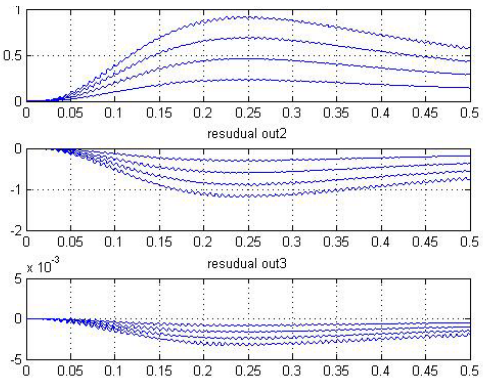
- مقدار كمينه هر باقيمانده
- مقدار ميانگين باقيمانده
- انحراف معيار سيگنال
- چوليدگي[1] سيگنال باقيمانده
- كشيدگي[2] سيگنال
- استفاده از جعبه ابزار موجک و مشخصه هاي فركانسي سيگنال (اين انتخاب براي بالا بردن ميزان دقت سيستم انجام گرفته شده است.) [٥،٦]

در مورد نحوه انتخاب ويژگيهاي سيگنالها، مي توان از سيگنالهاي باقيمانده براي هر يک از پارامترها و توابع عضويت فازي براي سيستم تصميم گير بهره گرفت. با داشتن سيگنالهاي باقيمانده مربوط به خروجي هاي فرآيند و بسته به تعداد ويژگيهاي گرفته شده از هر سيگنال، تعداد ويژگيهاي براي هر كدام از پارامترهاي سيستم مشخص مي شود که در مرحله بعد از آنها براي ساخت سيستم تصميم گير و تشيخص عيوب استفاده مي‌كنيم.

براي تشخيص موقعيت و اندازه عيوب، با استفاده از خروجي قسمت قبل (يعني علائم عيوب) يك سيستم مبتني بر قوانين عصبي- فازي براي تخمين موقعيت عيوب طراحي شده است. در دهه گذشته شبكه هاي عصبي مصنوعي بطور گسترده براي شناسايي و جداسازي آسيب در سيستم هاي پيچيده بكار گرفته شده است. از زماني كه شبكه هاي عصبي توانايي خود را در زمينه شناسايي الگو (مانند پردازش تصوير و شناسايي صدا) نشان داد، به عنوان يک روش كارا براي شناسايي آسيب و جداسازي آن بكار گرفته شد.

با توجه به اينكه باقيمانده ها را بگونه اي كاملا ساختار يافته و مقاوم نمي توان از فرايند هاي راستين به دست آورد، بايد از روشهاي پيچيده براي ارزيابي آنها بهره جست. آسيب هاي همسان شايد نشانه هاي گوناگوني بر روي باقيمانده ها داشته باشند در اين حالت نشانه ها بايد به حالتهاي گوناگون يک آسيب بستگي داشته باشند. اين نارسايي را مي توان با بكارگيري از روشهاي پيشرفته دسته بندي مانند دسته بندي هاي مبتني بر منطق فازي و شبكه هاي عصبي بر طرف نمود.

وجود سايش در فرز كاري مضر محسوب مي شود و به عنوان يک عيب ابزار بروز مي كند. نظر به اينكه بروز شكست و سايش در ابزار مستقيما بر نيروي برش تاثير مي گذارند، لذا سيگنال نيروي برش در سيستم درايو دچار تغيير مي شود و اين تغييرات در سيگنالهاي خروجي مدل نمايانگر خواهند شد.



شكل ١٠: سيگنالهاي باقيمانده براي سه خروجي جريان موتور، سرعت موتور و نرخ پيشروي كه نشان دهنده سايش ابزار مي باشند.

با توجه به موارد فوق، سيستم عيب ياب قادر به رديابي عيوب در پارامترهاي مربوط به سيستم درايو از جمله BL (لقي)، K_p (سختي مهره)، K_L (سختي پيچ و مهره)، L (طول محور)، B (ضريب اصطكاک ميز) و همچنين شناسايي سايش و شكست در ابزار و تفكيک و جداسازي عيوب فوق را دارا مي باشد. بعنوان نمونه شكل ١٠ سيگنالهاي باقيمانده در پارامتر مربوط به سايش با مقادير مختلف را نشان مي دهد.

ساختار سيستم عصبي - فازي

بمنظور استفاده از توانايي هاي شبكه هاي عصبي در آموزش سيستم و قابليت هاي سيستم فازي در استدلال تقريبي، از سيستمهاي فازي- عصبي ANFIS و تكنيكهاي خوشه سازي فازي، در طراحي سيستم عيب ياب استفاده شده است [٧]. مهمترين مزيت اين شبكه، قوانين تركيبي يادگيري آن و خروجي صريح آن است كه آن را از ساير روشها كاراتر نمود است. ابتدا بايد يک مجموعه قانون معرفي شوند تا سيستم در طول آموزش، شكل توابع عضويت در قسمت فرض و نيز پارامترهاي قسمت نتيجه قوانين را بهينه كند. مسئله اي كه در روش ANFIS بايستي مورد توجه گيرد، يافتن داده هاي مورد نياز مناسب براي سيستم مي باشد تا بتوان توابع عضويت مناسب و قوانين اگر – آنگاه مناسب براي آن انتخاب نمود. علائم مشخصه عيب كه در مرحله قبل بدست آمده است به عنوان ورودي اين سيستمهاي تصميم‌گيري محسوب مي‌شوند. درصورت تعلق اين مشخصه‌ها به يك كلاس از عيوب، خروجي سيستم عددي كه نمايانگر عيب مربوطه است را مشخص خواهد كرد.[٨،٩]

براي تخمين اندازه عيوب كه بعد از شناسايي هرگونه عيب انجام مي شود، از شبكه‌هاي عصبي MLP استفاده شده است. در اين قسمت بدليل بالا بردن دقت و سرعت در عيب يابي، فقط براي پارامتر معيوب شبكه تصميم گيري با استفاده از مقادير ذخيره شده قسمت قبل، دوباره و با ساختاري متفاوت كه تعيين كننده اندازه عيب مي باشد ساخته مي شود. نتايج شبيه‌سازي، حاكي از تخمين درست اندازه پارامترهاي معيوب توسط اين شبكه‌ها مي‌باشند. از آنجا كه عيوب سيستم بسته به نوع پارامترهاي مسئله و ماهيت آن، داراي انداره هاي متفاوت هستند، بازه تغييرات در آنها بايد متفاوت باشد.

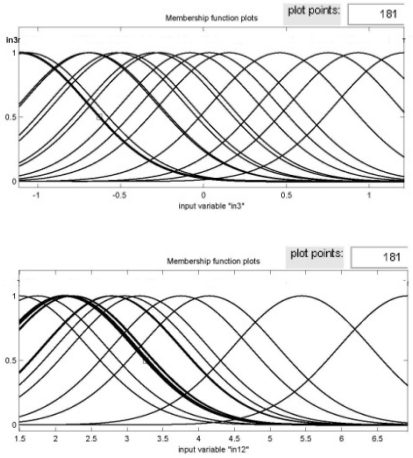
همچنان كه گفته شد، گاهي اوقات و در بعضي از شرايط، انتخاب نوع توابع عضويت در سيستم هاي فازي بسيار مشكل است، از طرفي شكل توابع عضويت به پارامترهايي وابسته است و با تغيير اين پارامترها شكل توابع عضويت تغيير خواهد كرد كه استفاده از تكنيكهاي يادگيري عصبي تطبيقي مي تواند در انتخاب توابع عضويت بهينه بسيار مفيد باشد. اين روش يادگيري بسيار شبيه شبكه هاي عصبي است و با عبور داده هاي آموزشي از سيستم بهينه توابع عضويت براي جور شدن با شكل داده ها و مدل كردن رفتار داده ها بدست مي آيد. بعد از تشكيل توابع عضويت و قوانين اگر – آنگاه فرضي مربوط به سيستم، شبكه آموزش داده مي شود. آموزش شبكه تا وقتي ادامه مي يابد كه خطاي حاصل مقدار كمي گردد و سيستم به فرم مناسبي بهينه شود. معمولاً با افزايش تعداد تكرارها، خطاي كاهش مي يابد.

تعداد ورودیهاي سيستم تصميم گير، با توجه به تعداد ويژگيهاي استخراج شده از سيگنالها و تعداد خروجي هاي تعيين شده براي سيستم، مشخص مي شوند كه با توجه به ورودیهاي مسئله فوق اين تعداد به ١٨ورودي مي رسد. تعداد توابع عضويت[3] نيز با توجه به تعداد پارامترهاي مسئله و بازه تغييرات اعمال شده براي هر يک از پارامترها، تعيين مي گردد. بعنوان

1- skewness
2- kurtosis

1- membership function

نمونه، ساختار توابع عضويت، براي ورودي اول و دوم به صورت شكل (۱۱) است.



شكل ۱۱: توابع عضويت فازي براي ورودي اول و دوم

با توجه به توابع عضويت رسم شده، تداخل توابع عضويت براي ورودي دوم كه مربوط به سايش است موجب كاهش دقت در رديابي خواهد شد. مي توان گفت كه هر چه تفكيک توابع عضويت در نمودارهاي ورودي به سيستم بيشتر باشد، فرايند تصميم گيري مناسبتر و احتمال خطا در نتايج كمتر مي باشد. بهتر است ويژگي استفاده شده براي سيگنالهايي كه نمودارهاي رسم شده براي توابع عضويت آنها مناسب نيستند، استفاده نگردد. اين امر بستگي به نوع مدل و خروجي مورد نظر نيز دارد. نتايج تست سيستم براي رد يابي عيوب در اجزاء سيستم براي تعدادي از پارامترها در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱ دقت تخمين زده شده مربوط به پارامترهاي سيستم

	# of data	*# of correct classifications*	*Performance*
parameter (Kp)	110	89	80.90%
parameter (μ)	110	93	84.54%
parameter (Rm)	125	122	97.6%
parameter (Bm)	100	95	95%
parameter (Jm)	110	87	79.09%
parameter (K1)	150	132	88.0%
parameter (Lm)	100	97	97%
parameter (BL)	100	99	99%
parameter (de)	110	107	97.27%
parameter (Kd)	120	115	95.8%
parameter (Mt)	100	91	91%
parameter (lb)	120	114	95.0%
parameter (Km)	110	108	98.1%
parameter (Cb)	110	108	98%
parameter (Ks)	100	73	73%
parameter (Kv)	110	104	94.54%
parameter (Kv)	110	103	93.63%
parameter (b)	110	97	88.18%
total performance = 89.93%			

لازم به ذكر است كه ساختار سيستم عصبي كه از نوع سيستم فازي *TSK* مي باشد، به صورت يک ساختار شبكه اي پيشرو در ۵ لايه مي باشد. لايه ها به ترتيب عبارتند از لايه ورودي، لايه اشتراكي مربوط به تعيين ميزان فعاليت هر قانون، لايه نرمال سازي، لايه خروجي هر قانون و لايه تركيب.

همانطور كه مشاهده مي شود، رديابي عيوب در پارامترهاي مهمي همچون K_p (سختي مهره)، K_L (سختي پيچ و مهره)، L (طول محور)، BL (لقي)، B (ضريب اصطكاک ميز) قابل قبول مي باشد.

با مشاهده اندازه خطاها در جدول (۲)، بر مي آيد كه سيستم فازي- عصبي استفاده شده در مقايسه با شبكه هاي عصبي كارايي بيشتري از خود نشان مي دهد.

جدول ۲ مقايسه مقدار خطا در رديابي عيب، براي شبكه هاي عصبي و عصبي_فازي

نوع شبكه	روش تنظيم توابع عضويت	خطاي سيستم
ANFIS	Back propagation	8.7%
شبكه عصبي	شبكه شعاعي RBF	12.3%
	شبگه پرسپترون چند لايه MLP	15.2%

افزايش تعداد خروجي هاي سيستم با مشكلاتي مانند اندازه گيري سيگنالها، افزايش زمان و غيره همراه است، به همين دليل ترجيح داده مي شود تا از سيگنالهاي خروجي كمتري، تا حدي كه انتظار مطلوب از سيستم برآورده شود، استفاده گردد. همچنين با افزايش تعداد پارامترهاي سيستم، بخاطر گسترده تر شدن شبكه ها، احتمال بروز خطا در نتايج افزايش مي يابد.

با افزايش تعداد پارامترها، دقت و كارايي سيستم به طور چشمگيري كاهش مي يابد كه اگر اين اثر بوسيله افزايش تعداد خروجي هاي سيستم و ويژگيهاي سيگنال، بازه تغييرات اعمالي و يا تغيير پارامترهاي سيستم تصميم گير، جبران نگردد، خطا در نتايج، افزايش يافته و نتايج عيب يابي غير قابل اطمينان خواهند بود.

نتيجه گيري

از آنجا كه مانيتورينگ ابزار از نيازهاي ضروري و كاربردي در صنعت بوده و بيشتر عيوب احتمالي در اين قسمت مي باشد، همچنين با توجه به اهميت ماشينكاري و گستره استفاده آن، در اين مقاله شناسايي عيوب ابزار برش و سيستم درايو ماشين ابزار در عمليات فرزكاري مورد بررسي و مطالعه قرار گرفته است.

برنامه عيب ياب قادر است با خطاي ناچيز، عيوب را در سيستم درايو و ابزار شناسايي و اندازه گيري نمايد و مانع از توليد قطعات معيوب يا غير استاندارد شود. نتايج حاصله، كارايي اين سيستم را در اعلام عيوب در سيستم درايو و ابزار برش تاييد مي كند. عوامل مختلف، از جمله تعداد پارامترها، تعداد خروجيهاي سيستم، ويژگيهاي سيگنال و شبكه هاي مختلف بر روي كارايي سيستم تاثير بسزايي دارند. استفاده از مدل مناسب و كامل با ملاحظه تاثيرات پارامترهاي موثر سيستم، امر رديابي عيوب در قسمتهاي مختلف ماشين ابزار *cnc* را محقق مي سازد. دقت بالا در رديابي عيوب، تعيين ساير عيوب براي ميزان اهميت مشكل و اتخاذ تصميمات لازم براي توقف يا ادامه كار، استفاده از قابليت بالا و مطمئن شبكه هاي عصبي در عيب يابي سيستمها. استفاده از موجک در افزايش كارايي سيستم، از مزيتهاي سيستم مي باشد.

رديابي عيب در پارامترهاي مختلف مربوط به سيستم درايو و ابزار برش مخصوصا پارامترهاي مهمي همچون $L, K_p, K_L L, BL, B$ استفاده از اين روش را نسبت به ساير روش عيب يابي از جمله بررسي ارتعاشي، آناليز روغن و ... برتري مي بخشد.

فهرست علائم

b	عمق برش ابزار mm
N	سرعت چرخش ابزار (اسپیندل) mm/min
μ	نسبت نیرو در برش
k	سختي ويژه ابزار برش N/mm^2
B_m	ضريب اصطكاك ويسكوز موتور، $Nm/(rad/sec)$
B	ضريب اصطكاك ويسكوز ميز، $N/(mm/sec)$
BL	بك لش، mm
CF	اصطكاك كلمب ميز، N
d	قطر بال اسكرو، m
E	مدول الاستيسيته بال اسكرو، N/m^2
J_m	اينرسي موتور، kg^2m
I_t	اينرسي ميز، kg^2m
b_t	ارتفاع ميز، m
K_s	رابطه جابجايي خطي ميز و جابجايي زاويه‌اي بال اسكرو rad/m
k_L	سختي مهره و بال اسكرو، N/m
K_p	سختي طولي مهره، N/m
K_m	رابطه گشتاور موتور با جريان موتور، $volt/(rad/sec)$
k_v	رابطه $em.f$ با سرعت موتور، Nm/A
K_t	سختي $slide\ pad$، N/m
L	اينرسي بال اسكرو، kg^2m
L_m	ضريب القا موتور، H
M	جرم ميز، kg
R_m	مقاومت الكتريكي موتور، ohm
l	طول بال اسكرو، m
μ	ثابت تبديل نيرو به گشتاور، m
W_t	فاصله $slide\ pad$، m

مراجع

1. R. Whalley, M. Ebrahimi, A.A.Abdul-Ameer, 2005, Hybrid modelling of machine tool axis drives, j.ijmachtools.2005.03.002

2. Y.Altintas, 2000 , Manufacturing Automation:"Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Calibrations, and CNC Design", Cambridge University Press.

۳. مهدي شهاب، مجيد معاونيان، ۱۳۸۶، "طراحي يک سيستم عيب ياب براي درايو ماشين ابزار با سرعت بالا مبتني بر مفاهيم محاسبات نرم" پانزدهمين كنفرانس سالانه (بين المللي) مهندسي مكانيك، تهران، دانشگاه صنعتي اميركبير

4. R. Whalley, 1990, Interconnected spatially distributed systems, Trans. Inst.M C 12 (5) 260–270

5. H. Bartlett, R.Whalley, 1998 , Analogue solution to the modling and simulation of distributed – lumped parameter system, Proc. Instn Mech. Engrs, Part 1, journal of Systems and Control Engineering, 212 (12),99-114,

6. C.K Sung,, C.W.Chen ,2000 ,Locating Defects of a Gear System by the Technique of Wavelet Transform, Mechanism and Machine Theory, New York, McGraw-Hill

7 M. sushmita, H. Yoichi, 2000, Neuro-Fuzzy Rule generation : survery in soft computing framework, IEEE transations on neural networks, vol.11, No.3

8. Roger Jang, Jyh-shing, 1993, Anfis : Adaptive – Network – Based Fuzzy inference system, IEEE transactions on systems, Man, and cybernetics, vol 23, No.3

9 Detlef Nauck, Frank Klawonn, Rudolf Kruse, 1997, Foundations of Neuro-Fuzzy systems, John wiley and sons Ltd