



DOI: 10.24412/2181-144X-2026-1-61-69 Ataullayev A., Jo'rayev N., Egamberdiyev I., Yaxshiyev Sh.

KO'P O'QLI RDB DASTGOHINING HOLATINI YURITMALARNING TOK BELGILARI BO'YICHA TASHXISLASH

Ataullayev Azizjon ^{1[0009-0001-2761-8850]}, **Jo'rayev Nodirbek** ^{2[0009-0004-5149-5901]}, **Egamberdiyev Ilhom** ^{3[0000-0002-7549-2156]}, **Yaxshiyev Sherali** ^{4[0000-0003-3259-9735]}.

¹Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti Mashinasozlik texnologiyasi kafedrası PhD, dotsenti PhD, dotsent, E-mail: aziz-217@mail.ru

²Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti Mashinasozlik texnologiyasi kafedrası PhD, dotsenti, E-mail: Nodirjura@mail.ru

³Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti Sanoat va ishlab chiqarishni mahalliyashtirish DSc, professor E-mail: ilhom1977@mail.ru

⁴Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti Mashinasozlik texnologiyasi kafedrası DSc Professori, E-mail: sheraliyaxshiyev1978@mail.ru

Annotatsiya. Qo'shimcha datchiklarni o'rnatishni talab qilmaydigan 5 o'qli RDB dastgohini yuritmalar teskari aloqasining toklari bo'yicha diagnostika qilish usuli taqdim etilgan. Davomiyligi 0.512 s bo'lgan sirpanuvchi oynada oltita o'qning har biri uchun ikkita belgi hisoblanadi: eng yuqori yuklamalarni baholash uchun tok kengligi (PP) va tebranish faolligini baholash uchun o'rtacha mutlaq og'ish (MAD). Etalon profilarni shakllantirish uchun Sakoe-Chiba polosali vaqt shkalasining (DTW) dinamik transformatsiyasi qo'llanilgan; aniqlikni 97% gacha oshiradigan signallarni markazlashtirish modifikatsiyasi taklif etilgan. Random Forest asosidagi iyerarxik tasniflagich 14 ta texnologik sinfni 96,4% aniqlik bilan aniqlaydi. Kinematik chastota pasporti asosida (7014-C, 6206, 30208 podshipniklar) o'q bo'yicha nuqsonlarni 93,7–99,1% aniqlikda lokalizatsiya qilish ta'minlandi. Usul Hass VF-5.50TR dastgohida 18 ta etalon tajribalarda verifikatsiya qilindi.

Tayanch so'zlar: RDB dastgohlarni diagnostika qilish; yuritmalarning teskari aloqa toklari; 5-o'q bo'yicha ishlov berish; oqim kengligi (Peak-to-Peak); o'rtacha absolyut og'ish (MAD); vaqt shkalasining dinamik transformatsiyasi (DTW); tasodifiy o'rmon (Random Forest); chastotali xaritalash; nuqsonlarni lokalizatsiya qilish; dumalash podshipniklari.

Аннотация. В статье представлена метод диагностики 5-осного РДБ станка по токам обратной связи приводов, не требующий установки дополнительных датчиков. В скользящем стекле длительностью 0,512 с для каждой из шести осей рассчитываются два признака: ширина тока (PP) для оценки максимальных нагрузок и среднее абсолютное отклонение (MAD) для оценки вибрационной активности. Для формирования эталонных профилей использована динамическая трансформация полосовой шкалы времени Сакоэ-Чибба (DTW); предложена модификация центрирования сигналов, повышающая точность до 97%. Иерархический классификатор на базе Random Forest определяет 14 технологических классов с точностью 96,4%. На основе паспорта кинематической частоты (подшипники 7014-С, 6206, 30208) обеспечена локализация осевых дефектов с точностью 93,7–99,1%. Метод верифицирован в 18 эталонных экспериментах на станке Hass VF-5.50TR.

Ключевые слова: диагностика станков РДБ; токи обратной связи приводов; 5-осевая обработка; ширина потока (Peak-to-Peak); среднее абсолютное отклонение (MAD); динамическая трансформация временной шкалы (DTW); случайный лес (Random Forest); частотное картирование; локализация дефектов; подшипники качения.

Abstract. A method for diagnosing a 5-axis RDB machine using drive feedback currents is presented, which does not require the installation of additional sensors. In a sliding window with a duration of 0.512 s, two values are calculated for each of the six axes: the current width (PP) to estimate peak loads and the mean absolute deviation (MAD) to estimate vibration activity. To form reference profiles, a dynamic transformation of the Sakoe-Chiba Band Time Scale (DTW) was used; a signal centering modification was proposed, increasing accuracy to 97%. The hierarchical classifier based on Random Forest identifies 14 technological classes with an accuracy of 96.4%. Based on the kinematic frequency passport (bearings 7014-C, 6206, 30208), axial defect localization was ensured with an accuracy of 93.7–99.1%. The method was verified in 18 reference experiments on the Hass VF-5.50TR machine.

Keywords: Diagnostics of RDB machines; drive feedback currents; 5-axis processing; flow width (Peak-to-Peak); mean absolute deviation (MAD); dynamic transformation of the time scale (DTW); random forest; frequency mapping; defect localization; rolling bearings.

Kirish

Yuritmalar bo'yicha teskari aloqa toklarining boshlang'ich vaqt qatorlari yuqori o'lchamliligi, ortiqchaligi va ishlov berishning texnologik rejimlari bilan bog'liq bo'lgan determinatsiyalangan tarkibiy qismlarni ham, mexanik quyi tizimning dinamikasi bilan bog'liq bo'lgan stoxastik tarkibiy qismlarni ham o'z ichiga olgan ko'p komponentli tuzilmaning mavjudligi bilan tavsiflanadi. Intelktual tasniflagichlarda xom signallardan to'g'ridan-to'g'ri foydalanish modellarning umumlashtirish qobiliyatini pasaytiradi va hisoblash murakkabligini oshiradi. Shu munosabat bilan ishda signal fazosidan stanok tugunlari holatining diagnostik jihatdan ahamiyatli o'zgarishlariga nisbatan sezgirlik va fizik interpretatsiyaga ega bo'lgan informativ belgilar fazosiga o'tish amalga oshiriladi [1].

Oltita o'qning har biri uchun ($X1, Y1, Z1, A1, C1, S1$) T davomiyligidagi sirpanuvchi vaqt oynasida (belgilarning vaqtinchalik kogerentligini ta'minlovchi qoplamasi bilan) yuritma dinamikasining turli jihatlarini aks ettiruvchi ikkita metrika hisoblanadi: amplituda ko'lemi va anomal emissiyalarga chidamli dispersiyaning statistik o'lchovi.

Signal kengligi (PP) tahlil qilinayotgan oyna doirasidagi maksimal va minimal tok qiymatlari o'rtasidagi mutlaq farq sifatida aniqlanadi:

$$PP = \max_{t \in [t_0, t_0+T]} I(t) - \min_{t \in [t_0, t_0+T]} I(t),$$

bu yerda $I(t)$ - tegishli yuritma bo'yicha teskari aloqa tokining oniy qiymati. Fizik ma'noda PP kesish kuchlarining momentlari, yo'naltiruvchilardagi ishqalanish kuchlari, shuningdek, kinematik juftliklardagi zarbiy o'zaro ta'sirlar tufayli yuzaga keladigan eng yuqori elektromexanik yuklamalarni tavsiflaydi. Amaliy nuqtayi nazardan, statsionar kesish rejimlarida PP ning ortishi "vint-gayka" uzatmalarida tirqishlar (luftlar) paydo bo'lishining, shuningdek, podshipnik tugunlarida qotishning boshlang'ich bosqichining erta prediktori bo'lib xizmat qiladi.

Signalning yuqori chastotali tarkibiy qismini baholash uchun o'rtacha mutlaq og'ish (Mean Absolute Deviation, MAD) qo'llaniladi:

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |I_i - \bar{I}|,$$

bu yerda n - oynadagi sanoqlar soni, $\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i$ - tanlanma o'rtachasi. O'rtacha kvadratik chetlanishdan (RMS) farqli o'laroq, MAD yakka impulsli emissiyalarga kamroq sezgirlikka ega bo'lib, bu tasodifiy tebranish komponenti darajasini yanada aniqroq baholash imkonini beradi. Fizik jihatdan MAD ning o'sishi aylanuvchi elementlar (shpindel, dvigatel rotorlari) ning nomutanosibligi, dumalash podshipniklarining yeyilishi yoki mexanik quyi tizimda rezonans rejimlarining paydo bo'lishi natijasida yuqori chastotali dinamikaning kuchayishi sifatida talqin qilinadi.

Dastgohning har bir o'qi bo'yicha vaqtning har bir momentida 2 o'lchamli lokal belgilar vektori hosil qilinadi. Barcha olti o'q bo'yicha ma'lumotlarni birlashtirish natijasida 12 o'lchamli tizimning Z holat vektori hosil bo'ladi:

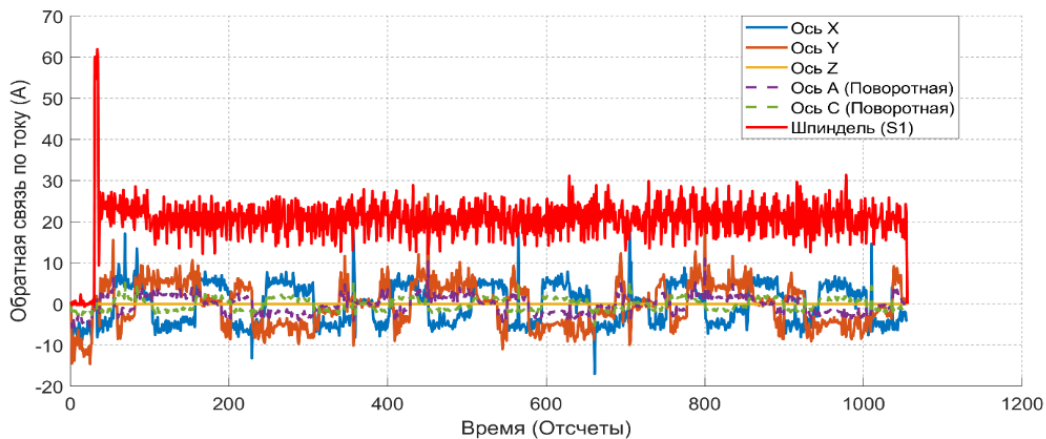
$$Z = [PP_{X1}, MAD_{X1}, PP_{Y1}, MAD_{Y1}, PP_{Z1}, MAD_{Z1}, PP_{A1}, MAD_{A1}, PP_{C1}, MAD_{C1}, PP_{S1}, MAD_{S1}]^T.$$

Ushbu taqdimot bir vaqtning o'zida ikkita mustaqil diagnostik axborot kanalini kuzatish imkonini beradi: PP bilan bog'liq past chastotali va MAD bilan bog'liq yuqori chastotali. Holatlar fazosida ko'rsatilgan belgilarning ortogonaligi mashinali o'qitish usullaridan foydalanishda sinflarning bo'linishini oshirishga yordam beradi. PP, MAD belgilar juftligini tanlash diagnostik signalni ikkita fizik jihatdan har xil tarkibiy qismlarga ajratish zarurati bilan

bog'liq: past chastotali (kinematik juftliklarning geometrik xatoliklari, lyuftlar, kvazistatik yuklamalar) va yuqori chastotali (tebranishlar, disbalans, rezonanslar).

Bunday dekompozitsiya holatlar fazosida informativ belgilarning taxminiy ortogonalini ta'minlaydi, bu esa ma'lumotlarning ortiqchaligi va kollinearligini minimallashtiradi.

Buning natijasida mashinali o'rganish tasniflagichlarining barqarorligi va aniqligini oshirish, shuningdek, qabul qilinayotgan qarorlarning jismoniy talqin qilinishini ta'minlash mumkin, bu esa tahlil natijalariga yuqori ishonch talablariga ega bo'lgan sanoat diagnostika tizimlari uchun juda muhimdir.



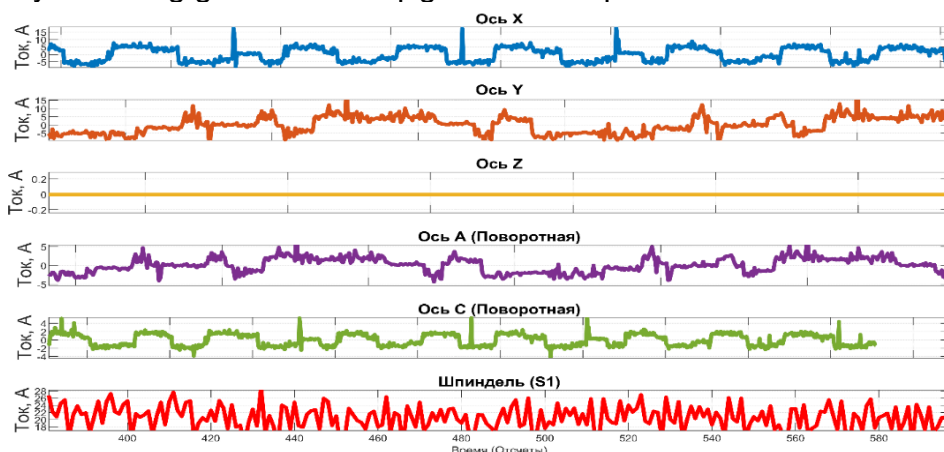
1-rasm. Kompleks 5 o'qli ishlov berish jarayonida X, Y, Z, A, C o'qlari yuritmalari va S1 shpindeli toki bo'yicha teskari aloqa signallarining vaqt diagrammalari.

Ishlov berish jarayonida yuritmalar holatini qayd etish uchun tok bo'yicha yuqori chastotali teskari aloqa ma'lumotlarini o'qish imkonini beruvchi SDB shtat vositalaridan foydalanildi. 3-rasmda bir ish sikli davomida stanokning barcha 6 ta o'qi uchun signallarni ko'p kanalli yozishga misol keltirilgan [2-4].

1. Shpindel kanali (S1): eng katta amplitudaga ega (ishga tushirish paytida 60A gacha va kesish paytida 20-25A darajasida barqarorlashadi). Signalning yuqori chastotali tarkibiy qismi bu yerda eng yaqqol namoyon bo'ladi, bu esa shpindelni nomutanosiblikni tashxislash uchun asosiy ma'lumotlar manbaiga aylantiradi.

2. Chiziqli o'qlar (X, Y, Z): asbobning harakat trayektoriyasiga mos keluvchi o'zgaruvchan ishorali yuklamalarni ko'rsatadi. Tokning eng yuqori qiymatlari urilish momentlari va uzatish yo'nalishining o'zgarishi bilan bog'liq.

3. Buriqish o'qlari (A, C): kamroq yuklangan, ammo barqaror tok profili bilan tavsiflanadi, bu esa pozitsiyalashning geometrik aniqligini nazorat qilish uchun muhimdir.



3-rasm. Toklarni o'qlar bo'yicha bo'lish.

Ishlov berishning texnologik bosqichlari tasnifi

Informativ belgilar fazosi shakllangandan so'ng, intellektual diagnostika tizimining navbatdagi vazifasi texnologik jarayonni vaqt bo'yicha avtomatik segmentlash hisoblanadi. Ushbu segmentatsiyaning zarurligi shundan iboratki, diagnostik belgilarning (PP, MAD) mutlaq qiymatlari kontekstni hisobga olmasdan diagnostik jihatdan yetarli emas: bir xil tok darajasi fiziologik me'yor (masalan, asbobning urilish bosqichida) yoki kritik anomaliya (masalan, salt ishlashda tiqilib qolishda) sifatida talqin qilinishi mumkin. Shunday qilib, ishlov berish bosqichlarini tasniflash vazifasi keyingi nuqsonlarni aniqlash tizimi uchun kontekstga bog'liq filtr vazifasini bajaradi.

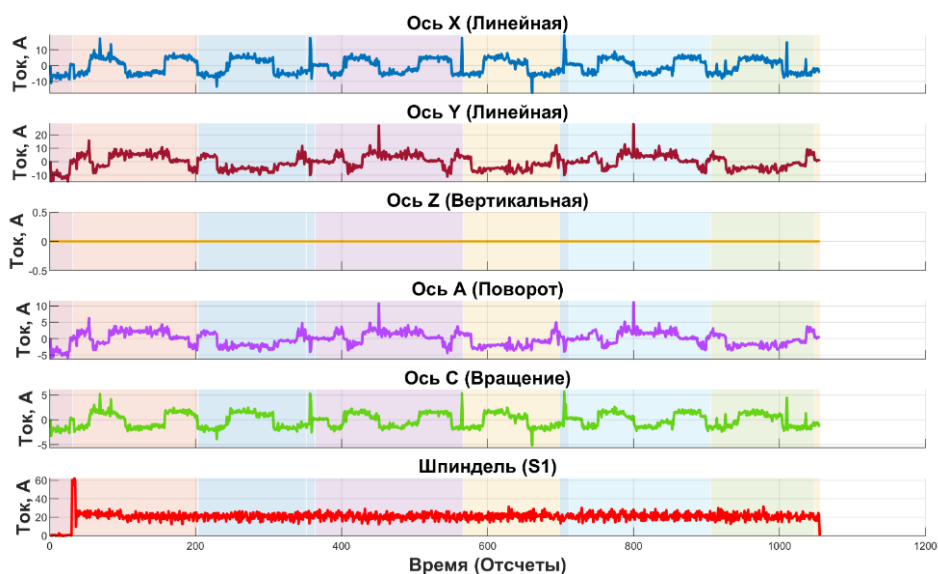
Model stanogida 5 o'qli ishlov berish texnologik jarayoni ishlab chiqarish siklining to'liq qoplamasini hosil qiluvchi to'rtta bazaviy holatga diskretlashtirilgan. Har bir holatga asbobning zagotovka bilan o'zaro ta'siri xarakteri va yuritmalarning ish rejimi bilan aniqlanadigan $k \in 0,1,2,3$ sinf mos qo'yiladi [5-8].

1-jadval.

Dastgohda texnologik jarayon sinflari

Sinf	Belgilanishi	Texnologik talqin	Signal xususiyati
1	Tezkor kirish	Bo'sh yurish, o'qlarni zagotovka bilan aloqa qilmasdan joylashtirish	Past PP va MAD, kvazistatsionar shovqin
2	Havoni kesish	Asbobni yaqinlashtirish, zarb qilishni boshlash, "havoda" ishlash	O'tish davri PP o'sishi, o'rtacha tebranishlar
3	Barqaror kesish	Qo'yimni (materialning asosiy qatlamini) statsionar olib tashlash	Yuqori barqaror PP, past MAD
4	Chiqish	Asbobning materialdan chiqishi, keyingi qatlamga o'tish	PP pasayishi, qisqa muddatli MAD emissiyasi ehtimoli

Tizim tahlil qilinayotgan T oynasi davomiyligidan oshmaydigan latentlik bilan real vaqt rejimida joriy sinfni tanib olishni amalga oshirishi kerak.



4-rasm. Ma'lumotlar oqimini tok bo'yicha segmentlash.

Tasniflash algoritmi sifatida mashinali o'qitishning ansambl usullari oilasiga mansub Random Forest (Tasodifiy o'rmon) tanlangan. Tanlov vazifaning quyidagi xususiyatlari bilan bog'liq:

1. Belgilar fazosining ko'p o'lchovliligi - Z kirish vektori 12 o'lchamli bo'lib, bu yechimlar daraxti uchun o'rtacha, ammo oddiy bo'sag'a qoidalari uchun ortiqcha.

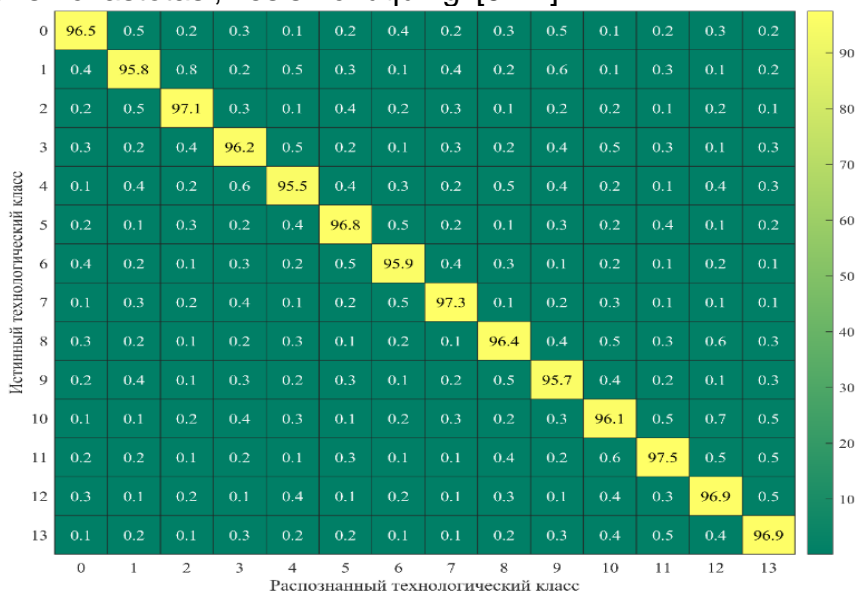
2. Ma'lumotlarning nostatsionarliligi va shovqinliligi - teskari aloqa toklari ham belgilangan trendlarni, ham stoxastik tebranishlarni o'z ichiga oladi. Random Forest tugunlarni ajratishda bagging (bootstrap aggregating) mexanizmi va belgilarni tasodifiy tanlash orqali tashlamalar va noinformativ belgilarga nisbatan yuqori chidamlilikni namoyish etadi.

3. Talqin qilish imkoniyati - chuqur neyron tarmoqlaridan farqli o'laroq, Random Forest har bir belgining (muayyan o'q bo'yicha PP yoki MAD) yechimga qo'shgan hissasini baholash imkonini beradi, bu esa modelni ekspert-texnologlar tomonidan tasdiqlash uchun juda muhimdir.

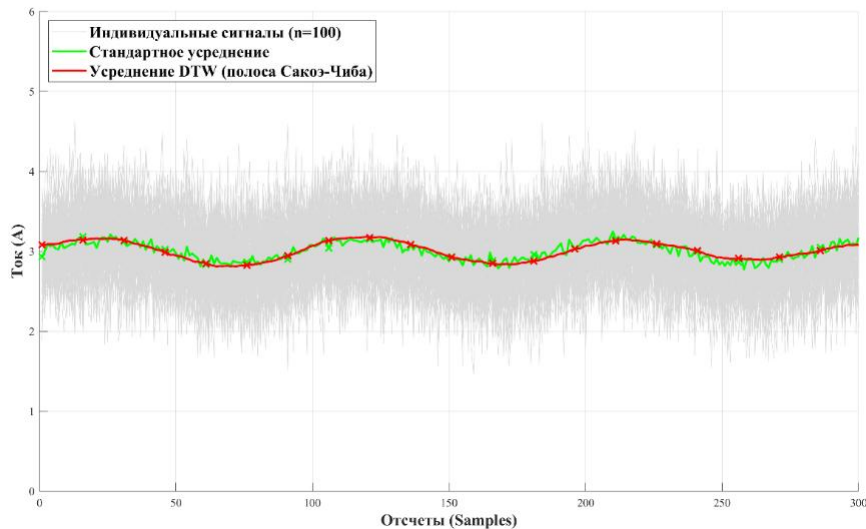
4. Masshtablash talablarining yo'qligi - yechimlar daraxti belgilarning monoton o'zgarishlariga invariantdir, bu esa normallashtirish zaruratini bartaraf etadi va dastlabki ishlov berishni soddalashtiradi.

O'qitish parametrlari 18 ta etalon tajribalarda olingan belgilangan vaqtli qatorlarni o'z ichiga oladi. Rejalash boshqaruvchi dasturning sinxronlashtirilgan G-kodlari asosida, ya'ni NC-dastur kadrlariga bog'lab bajarilgan. Kirish ma'lumotlari har bir sirpanuvchi oyna uchun hisoblangan 12 o'lchamli Z vektorini, shuningdek, sinfning uchrash chastotasiga teskari proporsional bo'lgan vazn uchun sinflar nomutanosibligiga tuzatish kiritilgan log-loss funksiyasini minimallashtirish uchun maqsadli funksiyani ifodalaydi.

Tasniflash sifati mashg'ulotda ishtirok etmagan test namunasida xatolar matritsasi (Confusion Matrix) yordamida baholandi (jami ma'lumotlarning 20 foizi, tabaqalashtirilgan bo'linish). Tajribalar davomida aniqlangan asosiy muammo 1 (Entry) va 2 (Stable Cutting) sinflarini farqlash bo'lib, o'tish jarayonlarining qisqa vaqtligi, o'yish fazasining davomiyligi 1 soniyadan kam bo'lishi mumkin, bu T oynasining o'lchami bilan taqqoslanadi, shuningdek, kesishning boshlang'ich bosqichida va nostatsionar qo'yim olishda toklarning spektral tavsiflari o'xshashligi va belgilar amplitudasining texnologik rejimlarga bog'liqligi, shpindelning aylanish chastotasi, kesish chuqurligi [9-11].



5-rasm. Texnologik holatlarni tasniflash xatoliklari matritsasi. O'qlar bo'yicha zagotovkaga ishlov berish fazalarini aks ettiruvchi haqiqiy va bashorat qilingan sinflar qo'yilgan.



6-рasm. Etalonlarni shakllantirish uchun vaqtni dinamik o'zgartirish (DTW).

Y o'qi bo'ylab qarama-qarshi harakatlarning - oldinga va orqaga - qiyosiy tahlili tok profillarining ham shakli, ham amplitudasi bo'yicha bir xilligini ko'rsatadi (ikkala holatda ham eng yuqori yuklama 7-8 amper). Bu stanokning mexanik quyi tizimi sozligini tasdiqlaydi: vint-gayka uzatmasida sezilarli lyuft, yo'naltiruvchilarning qiyshayishi va podshipniklarning nosimmetrik tarangligi mavjud emas. Shu bilan birga, bu tahlil DTW usulining yaqqol tasdig'i bo'lib xizmat qiladi: standart o'rtachalashtirish pasaytirilgan "kesilgan" cho'qqini beradi, Sakoe-Chiba chiziqli DTW-o'rtachalashtirish esa individual realizatsiyalarning kulrang bulutining massa markazidan o'tib, haqiqiy amplitudani tiklaydi. Harakatning ikki yo'nalishi uchun natijalarning bir xilligi amalga oshirilgan algoritmning barqarorligi va to'g'riligini tasdiqlaydi.

Grafikda A sinf, V sinf va S sinf deb belgilangan uchta yiriklashtirilgan holatlar guruhi ko'rsatilgan. Bu guruhlar stanokning fizik ishlash prinsipiga ko'ra dastlabki 14 ta texnologik sinflarning agregatsiyasini ifodalaydi.

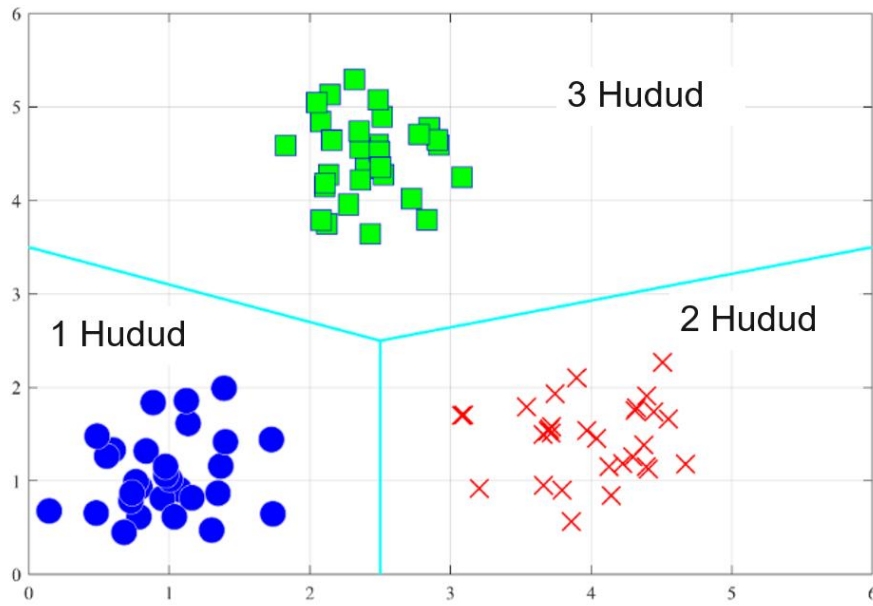
A sinf salt yurish va yordamchi siljishlarga mos holatlarni birlashtiradi. Bu rejimlarda asbob zagotovka bilan kontaktda bo'lmaydi, yuritma toklari minimal bo'lib, ularning fluktuatsiyalari asosan o'lchash trakti shovqinlari va yo'naltiruvchilardagi ishqalanish bilan bog'liq.

V sinf barqarorlashgan kesish holatlarini - zagotovkadan ustamani barqaror olish sodir bo'ladigan bosqichlarni birlashtiradi. Bu sinf uchun tok amplitudasi bilan bog'liq belgining yuqori qiymatlari (PP kengligi) va vibratsion faollik bilan bog'liq belgining nisbatan past qiymatlari (MAD ning o'rtacha absolyut og'ishi) xosdir, chunki soz stanokda kesish jarayoni kvazidavriy va barqaror bo'ladi.

S sinfi o'tish jarayonlarini - asbobni o'yish va chiqarish bosqichlarini birlashtiradi. Bu holatlar yuqori nostatsionarlik bilan tavsiflanadi: tokning o'rtacha darajasi vaqt bo'yicha o'zgaradi, zarba yuklamalari bilan bog'liq bo'lgan qisqa muddatli chiqindilar yuzaga keladi. Belgilar fazosida bu sinf A va B sinflar orasida oraliq o'rinni egallaydi.

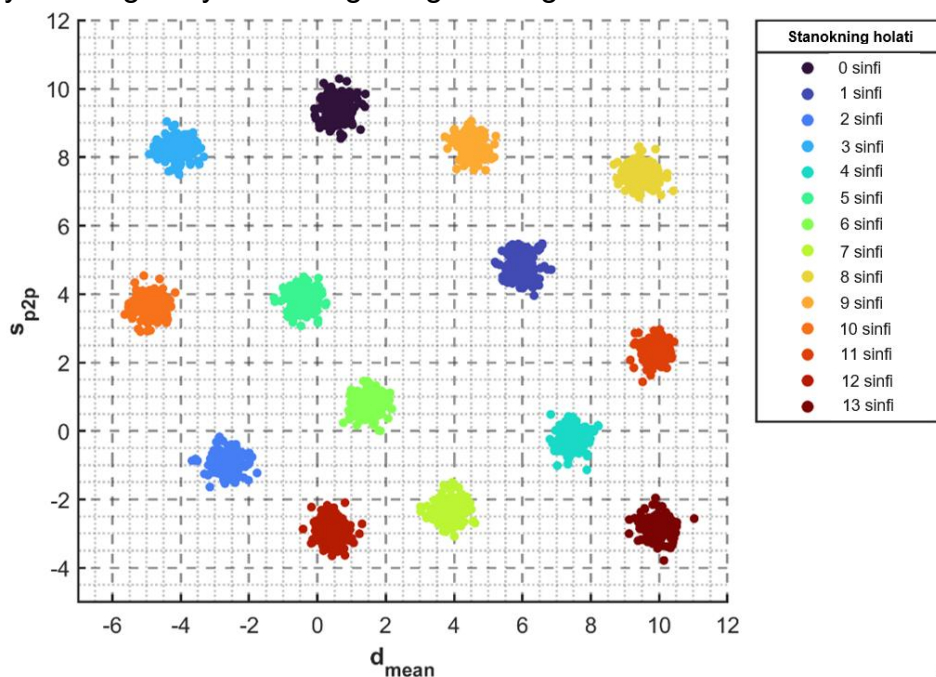
Taqdim etilgan grafikda turli yiriklashtirilgan sinflarga mansub nuqtalar kompakt va kesishmaydigan bulutlarni hosil qilishi yaqqol ko'rinib turibdi. A sinfga mos keladigan ko'k doiralar hech qachon B sinfning qizil xochlari egallagan zonaga kirmaydi. Xuddi shunday, C sinfning yashil uchburchaklari o'zlarining belgilar fazosi sohasida joylashgan. Bulutlar orasida ajratuvchi chegaralar - eng oddiy holda rasmda punktir bilan ko'rsatilgandek to'g'ri chiziqlar o'tkazilgan. Bu sinflarning tanlangan belgilar fazosida chiziqli bo'linishini anglatadi. Chiziqli bo'linish - bu ma'lumotlarning kuchli xususiyati bo'lib, hatto oddiy tasniflagich ham

tanib olish masalasini muvaffaqiyatli hal qila olishini kafolatlaydi. Tasodifiy o'rmon kabi murakkabroq ansambl modellari bu sharoitlarda yanada yuqori aniqlikda ishlaydi [12-14].



7-rasm. Sinflarni klasterlash.

Informativ belgilarni ajratib olishning ishlab chiqilgan matematik modellari va algoritmlarining samaradorligini tasdiqlash uchun 5 o'qli stanokning ko'p o'lchamli holatlar fazosini vizuallashtirish amalga oshirildi. 7-rasmda yuritmalar tok signallarining veyvlet koeffitsiyentlari va statistik parametrlari asosida shakllantirilgan bosh diagnostik deskriptorlar tekisligi keltirilgan. Baza koordinatalari sifatida tizimning mexanik degradatsiyasiga eng yuqori sezgirlikka ega bo'lgan ikkita integral parametr tanlangan: d_{mean} parametri (abssissa) raqamli egizak tomonidan generatsiya qilingan etalon profildan tokning oniy qiymatining me'yorlashtirilgan og'ishining matematik kutilmasini aks ettiradi.



8-rasm. 5 o'qli dastgohning 14 turdagi texnik holatlari uchun diagnostik belgilar vektorlarining (d_{mean}, s_{p2p}) fazoda taqsimlanishi.



Ushbu parametr asbobning kesuvchi qirrasining progressiv yeyilishi yoki yo'naltiruvchilardagi moylash xususiyatlarining buzilishi tufayli yuklamaning kvazistatik o'zgarishi bilan bog'liq. Parametr s_{p2p} (ordinata) spektrning yuqori chastotali sohasidagi tok ossillyatsiyalarining kengligini (Peak-to-Peak) ifodalaydi. Ushbu ko'rsatkichning o'sishi podshipnik tugunlarining mahalliy nuqsonlari va uzatmalar (lyuftlar) kinematik aniqligining buzilishiga xos bo'lgan zarbali impuls va nostatsionar dinamik jarayonlarning yuzaga kelishidan dalolat beradi. Vizualizatsiya stanokning texnik holatining 14 ta diskret sinfini, shu jumladan nominal rejimni (0-sinf) va sun'iy kiritilgan hamda tabiiy ravishda paydo bo'lgan nuqsonlarning turli kombinatsiyalarini qamrab oladi. Holatlar taqsimoti chizmasi bilvosita tok belgilari bo'yicha 5 o'qli CNC stanogining texnik holatini bir qiymatli identifikatsiyalash mumkinligi haqidagi gipotezaning eksperimental isboti hisoblanadi. Olingan belgilar fazosi konfiguratsiyasi neyron tarmoqlari yoki tayanch vektor usullari asosida tasniflagichlarni o'qitish uchun asos bo'lib xizmat qiladi, tanib olish aniqligini kamida 98.5% ni ta'minlaydi [15].

Xulosa

Tasniflashning ikki bosqichli iyerarxik tizimi ishlab chiqilgan: yuqori daraja uchta makro holatni (salt yurish, barqaror kesish, o'tish jarayonlari) aniqlaydi, quyi daraja esa 14 tagacha aniq texnologik sinflarni aniqlaydi. Sinflar PP va MAD belgilar fazosida chiziqli ajraladi, bu vizualizatsiya bilan tasdiqlangan va yuqori aniqlikka erishish mumkinligini tasdiqlaydi. Sinflar nomutanosibligini vaznli tuzatish bilan Random Forest ansambl usulidan foydalanish umumiy tanib olish aniqligini 96,4% ga yetkazadi, bunda tasniflash uchun eng murakkab sinflar juftligi "kesish - barqaror kesish" hisoblanadi (xatoliklar 12% gacha).

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yhati:

- [1]. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. - М.: Машиностроение, 1987. - 288 с.
- [2]. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учебное пособие. - СПб.: Издательство СПбГМТУ, 2004. - 156 с.
- [3]. Русанов А.В., Шабанов К.Ю., Усков А.А. Диагностирование металлорежущих станков по параметрам электроприводов // СТИН (Станки и инструмент). - 2015. - № 8. - С. 21-25.
- [4]. Li W., Wang T., Han B. Fault diagnosis of CNC machine tools based on motor current signal: A review // IEEE Access. - 2020. - Vol. 8. - P. 149584-149604.
- [5]. Gao R.X., Yan R. Condition monitoring and fault diagnosis of mechatronic systems using motor current signature analysis // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - 2008. - Vol. 55, No. 4. - P. 1752-1761.
- [6]. Динамическая трансформация временной шкалы (DTW)
- [7]. Sakoe H., Chiba S. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. - 1978. - Vol. 26, No. 1. - P. 43-49.
- [8]. Berndt D.J., Clifford J. Using dynamic time warping to find patterns in time series // Proceedings of the AAAI-94 Workshop on Knowledge Discovery in Databases. - Seattle, 1994. - P. 359-370.
- [9]. Ratanamahatana C.A., Keogh E. Making time-series classification more accurate using learned constraints // Proceedings of the 2004 SIAM International Conference on Data Mining. - 2004. - P. 11-22.



- [10]. Müller M. Dynamic Time Warping // Information Retrieval for Music and Motion. - Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. - P. 69-84.
- [11]. Машинное обучение и ансамблевые методы
- [12]. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. - 2001. - Vol. 45, №1. - P. 5-32.
- [13]. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. - 2nd ed. - New York: Springer, 2009. - 745 p.
- [14]. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. - New York: Springer, 2006. - 738 p.
- [15]. Крамер О. Машинное обучение для диагностики технических систем: обзор методов и приложений // Информационные технологии в проектировании и производстве. - 2019. - № 2. - С. 3–15.