DOI: 10.67889/2181-144X-2026-3-5-13

*Mamdiyarov A., ,Egamberdiyev I., Zakiriyayeva G., Xudoyberdiyeva S*

# METALL KESUVCHI DASTGOHLAR SHPINDEL UZELI DINAMIKASI VA VIBRATSION MONITORING ASOSIDA TEXNIK HOLATNI BAHOLASH USLUBI

***Akmal Mamadiyarov*** *[1][0000-0002-8658-6166]*, ***Ilxom Egamberdiyev*** *[2][0000-0002-7549-2156]*, ***Gulruxsor Zakiriyayeva*** *[3][0009-0000-4914-7941]*, ***Sabina Xudoyberdiyeva***

*[1]Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti "Sanoat ishlab chiqarishini mahalliylashtirish" kafedrasi Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori PhD, dotsent v.b, E-mail:amamadiyarov09@gmail.com*
*[2]Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti "Sanoat ishlab chiqarishini mahalliylashtirish" kafedrasi mudiri, Texnika fanlari doktori, professor, E-mail: ilkhom12041977@mail.com*
*[3]Navoiy ilg'or kasbiy mahorat texnikumi o'qituvchisi, E-mail: gulruhsorkodirova13@gmail.com*
*[4]Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti "Sanoat ishlab chiqarishini mahalliylashtirish" kafedrasi magistranti*

***Annotatsiya.*** Maqolada metall kesuvchi dastgohlarning shpindel uzeli dinamik xususiyatlarini modellashtirish natijalari va vibratsion monitoring ma'lumotlarini yagona yondashuvga birlashtirish masalasi ko'rib chiqilgan. NT-250M stanogi shpindel uzeli misolida xususiy tebranish chastotalarini hisoblash natijalari, tebranish intensivligining aylanish chastotasiga bog'liqligi va vibratsiya parametrlarining o'sish zonalari asosida qoldiq resursni baholash tartibi keltirilgan. Taklif etilgan yondashuv rejali-ogohlantiruvchi ta'mirlashdan texnik holatga qarab xizmat ko'rsatishga o'tish imkonini beradi.

***Kalit so'zlar:*** shpindel uzeli, vibratsion monitoring, xususiy tebranishlar, rezonans, podshipnik, tishli uzatma, o'rovchi spektr, qoldiq resurs, texnik diagnostika.

***Аннотация.*** В статье рассмотрен вопрос объединения в единый подход результатов моделирования динамических характеристик шпиндельного узла металлорежущих станков и данных вибрационного мониторинга. На примере шпиндельного узла станка НТ-250М приведены результаты расчета частот собственных колебаний, зависимость интенсивности вибрации от частоты вращения, а также порядок оценки остаточного ресурса на основе зон роста параметров вибрации. Предложенный подход позволяет перейти от системы планово-предупредительного ремонта к обслуживанию по фактическому техническому состоянию.

***Ключевые слова:*** шпиндельный узел, вибрационный мониторинг, собственные колебания, резонанс, подшипник, зубчатая передача, спектр огибающей, остаточный ресурс, техническая диагностика.

***Abstract.*** The article addresses the integration of dynamic characteristics modeling results for machine tool spindle units and vibration monitoring data into a unified approach. Using the spindle unit of the NT-250M machine tool as an example, the paper presents the calculation results of natural vibration frequencies, the relationship between vibration intensity and rotational speed, and a procedure for estimating remaining useful life based on the growth zones of vibration parameters. The proposed approach enables a transition from scheduled preventive maintenance to condition-based maintenance.

***Keywords*****:** spindle assembly, vibration monitoring, natural frequencies, resonance, bearing, gear drive, envelope spectrum, residual life, technical diagnostics.

## Kirish

Metall kesuvchi dastgohlar mashinasozlik korxonalarining asosiy texnologik uskunasi hisoblanadi. Ularning texnik holati mahsulot sifatiga, unumdorlikka va ishlab chiqarish xarajatlariga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Ishlov berilgan sirtning talab etilgan sifati, odatda,

stanokning dinamik holati bilan texnologik omillarning qanchalik mos kelishiga bog‘liq. Kesish jarayonining barqarorligi buzilganda kesish zonasida yo‘l qo‘yib bo‘lmaydigan darajadagi tebranishlar uyg‘onadi va ishlov sifati pasayadi [8, 9]. Bunday tebranishlarni oldini olish uchun kesish rejimlari cheklanadi, bu esa jarayon unumdorligiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi. Dastgohning dinamik ko‘rsatkichlari yaxshilansa, ruxsat etilgan rejimlar chegarasini kengaytirish va ishlov sifatini oshirish imkoniyati paydo bo‘ladi.

Tebranish har qanday ishlayotgan mashinaning “yon mahsuloti” bo‘lib, uning darajasi mashina yoki uning tarkibiy qismi holatini bevosita aks ettiradi: tebranish darajasi qancha yuqori bo‘lsa, holat shuncha yomon, uning haddan tashqari o‘sishi esa buzilishga olib keladi [8]. Tebranish parametrlari vallarning muvozanatlanmaganligi, juftlashuvchi detallar orasidagi tirqishlarning ortishi, mexanik bog‘lanishlarning buzilishi kabi asosiy nuqsonlarga bog‘liq. O‘z navbatida tebranish intensivligining ortishi uskuna yeyilishini tezlashtiradi va ishonchlilik ko‘rsatkichlarini pasaytiradi. Shu sababli tebranish holatini nazorat qilish va monitoring qilish katta ilmiy hamda amaliy ahamiyatga ega.

Amaldagi rejali-ogohlantiruvchi ta’mirlash tizimida ta’mirlash muddatlari kalendar bo‘yicha belgilanadi. Natijada ayrim dastgohlar resursi to‘liq ishlatilmay ta’mirlanadi, boshqalari esa rejadagi muddatgacha to‘satdan ishdan chiqadi. Bir turdagi dastgohlar resursi o'rtacha qiymat atrofida katta tarqoqlikka ega. Shu sababli ularning ish sifatini oshirishning ikkita yo'li mavjud: resurs tarqoqligini kamaytirish (konstruksiyani o'zgartirish yoki detallar sifatini oshirish, bu odatda katta kapital xarajat talab qiladi) hamda dastgohning joriy holati haqidagi axborot asosida uning imkoniyatlaridan ishlatish jarayonida oqilona foydalanish [8]. Ikkinchi yo'nalishni amalga oshirishning real vositasi - vibratsion monitoring tizimi.

**Tadqiqot maqsadi**: shpindel uzelining hisoblangan dinamik xususiyatlarini eksperimental vibratsion monitoring natijalari bilan bog‘lab, metall kesuvchi stanoklar texnik holatini baholash va qoldiq resursini bashoratlashning amaliy tartibini asoslashdan iborat. Maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar hal etildi: shpindel uzelining matematik modelini qurish va xususiy chastotalarini aniqlash; rezonans xavfini baholash; tebranish intensivligining ish rejimlariga bog‘liqligini aniqlash; podshipnik va tishli uzatmalar uchun diagnostik belgilarni tizimlashtirish; tebranish trendi asosida qoldiq resursni baholash tartibini ishlab chiqish.

## Adabiyotlar tahlili

Shpindel uzellarining dinamik xususiyatlarini hisoblash masalalari mashina dinamikasi bo‘yicha fundamental ishlarda [4], shpindel uzellarini loyihalash va tadqiq etishga bag‘ishlangan monografiyalarda [6, 7] hamda texnologik tizimlar uzellari dinamik xarakteristikalarini avtomatlashtirilgan hisoblash bo‘yicha ishlarda [3] ko‘rib chiqilgan. Hisoblash usullaridan boshlang‘ich parametrlar usuli (matritsa ko‘rinishida - o‘tish matritsalari usuli) va chekli elementlar usuli [10] keng tarqalgan. Shpindel uzeli dinamik xarakteristikalarini hisoblash uslubi O‘zbekistondagi mualliflar tomonidan ham yoritilgan [1].

Texnik holatni vibratsion usullar bilan baholash yo‘nalishida diagnostik belgilarni tanlash, ularni me’yorlash va nuqson rivojlanishini bashoratlash masalalari ishlab chiqilgan, jumladan burg‘ulash stanoklarining holatini baholash uchun vibratsion usullar taklif etilgan [2]. Metall kesuvchi uskunalar uchun vibratsion monitoringning nazariy asoslari, tishli uzatma va podshipniklarning tipik nuqsonlariga xos chastotalar hamda qoldiq resursni baholashning regression modeli e’lon qilingan [8], shpindel uzeli dinamikasining modellashtirish va eksperimental tadqiqoti esa [5, 9] ishlarda keltirilgan.

Tahlil shuni ko‘rsatadiki, mavjud ishlarda ikki yo‘nalish - loyihalash bosqichidagi modal hisoblash va ekspluatatsiya bosqichidagi vibratsion diagnostika - ko‘pincha alohida ko‘riladi. Ular o‘rtasida izchil bog‘lanish, ya’ni hisoblangan xususiy chastotalar, o‘lchangan

spektrlar va trend bo‘yicha qoldiq resurs baholarini bitta tartibda birlashtirish yetarli yoritilmagan. Mazkur maqola shu bo‘shliqni to‘ldirishga qaratilgan.

## Tadqiqot obyekti va uslubi

### 2.1. Tadqiqot obyekti

Tadqiqot obyekti sifatida NT-250M stanogining shpindel uzeli tanlandi. Hisob sxemasida old va orqa tayanchlar, shpindel vali va korpus hisobga olindi; vibratsiya esa tezliklar qutisi, orqa babka, elektrodvigatel va surish qutisida o‘lchandi. Shpindel materiali - Po‘lat 45 (ГОСТ 1050-2013): zichligi 7810 kg/m$^3$, Yung moduli 200 GPa, Puasson koeffitsiyenti 0,3, oquvchanlik chegarasi 560 MPa [9].

### 2.2. Dinamik model

Shpindel uzeli qovushoq dempfirlashga ega elastik tayanchlardagi pog‘onali balka sifatida ifodalandi. Dempfirlash kuchi tebranish tezligiga proporsional deb olindi. Balka diametr (inersiya momenti) o‘zgarishi, tayanch, jamlangan massa va tashqi jamlangan yuk bilan chegaralangan uchta uchastkaga bo‘linadi; har bir uchastkada taqsimlangan massa $m_i$ va eguvchi bikrlik $EJ_i$ o‘zgarmas hisoblanadi [6, 9]. Shpindelning ikki uchiga o‘rnatilgan detallar (tezliklar qutisi va keskich) massasi $\mu_i$ va inersiya momenti $J_{ix}$ bo‘lgan jamlangan yuklar sifatida kiritildi. Tayanch tugunlari tebranishlari tenglamasi matritsa ko‘rinishida quyidagicha yoziladi:

$$[M] \cdot \Delta'' + [B] \cdot \Delta' + [K] \cdot \Delta = F(t), \quad (1)$$

bunda [M], [B], [K] - massa, dempfirlash va bikrlik matritsalari (3n×3n), Δ - tugunlar ko'chishlari vektori, F(t) - tugunlardagi dinamik yuklar vektori, n - hisob sxemasidagi tugunlar soni. Elastik tizimga kirish ta'siri sifatida elektrodvigatel tomonidan P(t) kuch (burovchi moment) va keskich tomonidan o'zgaruvchan yuk δ(t) kiritiladi. Masalaning chiziqli ifodalanishi superpozitsiya prinsipini qo'llash va tugun xarakteristikalarini barcha ta'sirlar bo'yicha ketma-ket aniqlash imkonini beradi. Barqaror garmonik qo'zg'atishda $F(t) = F_0 e^{i\omega t}$ bo'lsa, yechim kompleks amplitudalar usulida $\Delta(t) = \Delta(t) = \Delta_0 e^{i\omega t}$ ko'rinishda izlanadi:

$$([K] - \omega^2[M] + i\omega[B]) \cdot \Delta_0 = F_0. \quad (2)$$

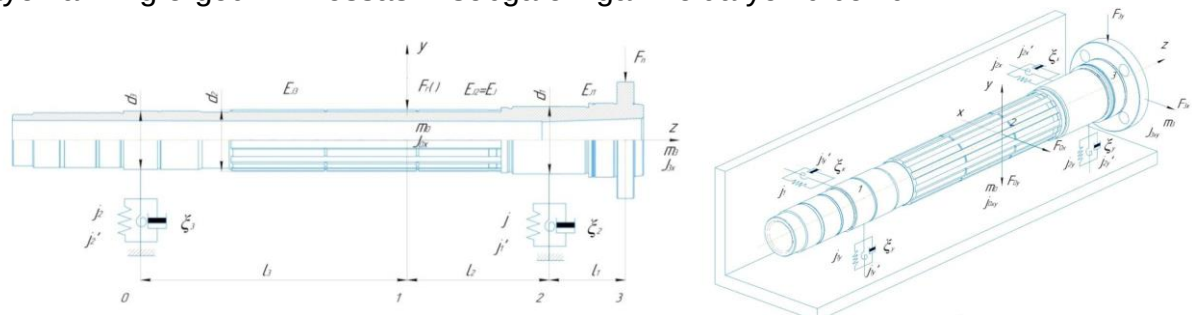
Tayanchlardagi dempfirlash kuchlari elastik kuchlarga proporsional (ω[B] = η[K]) deb qabul qilinganda, modal matritsa [V] ning ortogonallik xossalari ($[V]^T[M][V] = [E]$, $[V]^T[K][V] = diag[\omega_j^2]$) hisobga olingan holda majburiy tebranishlar amplitudalari xususiy shakllar bo‘yicha qatorga yoyiladi:

$$\Delta 0 = [V] \cdot diag[1 / ((1 + i\eta)\omega j^2 - \omega^2)] \cdot [V]^T \cdot F_0, \quad (3)$$

bunda $\omega_j$ - j-chi xususiy chastota. Yechimning (3) ko‘rinishi to‘g‘ridan-to‘g‘ri (2) tenglamani yechishga nisbatan hisoblash tezligini sezilarli oshiradi, ayniqsa tayanch tugunining faqat quyi 3–5 ta shakli hisobga olinganda [6, 9]. Korpus absolyut qattiq jism deb olinib, bolt biriktirmalari joylarida uch o‘q bo‘yicha ko‘chishlar nolga tenglashtirildi. Shpindel uzelida markazlash uchun ikkita aniq diametr bo‘lgani sababli, shu sirtlarda X va Z o‘qlari bo‘yicha ko‘chishlar nolga teng, Y o‘qi bo‘yicha esa cheklanmagan deb qabul qilindi. Dinamik hisoblash uzelning dinamik sifat ko‘rsatkichlarini, ya’ni chidamlilik va texnik holatni baholash uchun zarur kattaliklarni aniqlash maqsadida bajarildi.

Vibratsion signallar VIBXPERT II analizatori yordamida aniqlandi; o‘lchov zanjiri datchik (pyezoakselerometr), tahlil qurilmasi va vibromonitoring dasturlar paketi o‘rnatilgan kompyuterdan iborat. Pyezoakselerometr 5 Hz dan 25 kHz gacha chastota diapazonida ishlaydi, uning massasi tadqiq etilayotgan obyekt massasiga nisbatan kichik bo‘lgani uchun tebranish xarakteristikalariga ta’sir qilmaydi deb qabul qilindi. Datchik magnit yordamida shpindel babkasi korpusiga, tayanchlarga yaqin joyda, vertikal va gorizontal yo‘nalishlarda o‘rnatildi ($D_{x1}$, $D_{x2}$, $D_{z1}$, $D_{z2}$ nuqtalari). Axborotga uzluksizlik, to‘liqlik, ishonchlilik va bir jinslilik

talablari qo‘yildi; bir xil sharoitda ishlovchi uzellar ma’lumotlari kesish jarayoni tasodifiy jarayonlarining ergodiklik xossasi hisobga olingan holda yozib borildi.



**1-rasm. Shpindel uzeli qayishqoq-dempferli elementlarining sxematik tasviri.**

### 2.3. Eksperimental uslub

Har bir tajriba 10 ta chiziqli o‘rtachalash bilan o‘tkazildi. Har bir o‘lchovda vibroko‘chish, vibrotezlik va vibrotezlanishning umumiy darajasi, uning pik qiymati va o‘rtacha kvadratik og‘ishi, shuningdek ularning o‘rtachalangan spektri aniqlandi. Shpindel aylanish chastotasi real ish sharoitiga mos ravishda 40 dan 2500 ayl/min gacha o‘zgartirildi, o‘lchovlar salt yurish va ish yurishida bajarildi.

### 2.4. Diagnostik chastotalar

Podshipnik nuqsonlari spektrdagi xarakterli chastotalar orqali aniqlanadi. Ular podshipnik elementlarining kinematik nisbatlaridan hisoblanadi. Ichki halqa val bilan aylanganda, tashqi halqa qo‘zg‘almas bo‘lganda: separator aylanish chastotasi $f_c = (f_{vr}/2)(1 - (d/D_m)\cos\alpha)$; tashqi halqa bo‘ylab g‘ildirak tanalarining ustidan o‘tish chastotasi $f_t = Z \cdot f_c$; ichki halqa bo‘ylab ustidan o‘tish chastotasi $f_i = Z \cdot (f_{vr} - f_c)$. Bu yerda $f_{vr}$ — val aylanish chastotasi, Z — g‘ildirak tanalari soni, d — g‘ildirak tanasi diametri, $D_m$ — o‘rtacha diametr, α — kontakt burchagi. Hisoblangan natijalar 2-jadvalda keltirilgan.

Tishli uzatmada asosiy diagnostik belgi — tishlar chastotasi $f_z = z_1 f_{r1} = z_2 f_{r2}$ ($z_1$, $z_2$ — tishlar soni, $f_{r1}$, $f_{r2}$ — g‘ildiraklarning aylanish chastotalari). Ilashish qadamining o‘zgaruvchan xatosi va o‘qlar nomarkazligi val aylanish chastotalarida ($k \cdot f_r$) hamda modulyatsiya chastotalarida ($m \cdot f_z \pm n \cdot f_r$) tebranish keltirib chiqaradi [8]. Normal ishlayotgan tishli uzatma ham ilashish fazasida tishlar bikrligining davriy o‘zgarishi tufayli sezilarli vibratsion faollikka ega bo‘ladi, shuning uchun tahlil bazaviy («pasport») spektr bilan taqqoslab olib boriladi.

## Natijalar va muhokama

### 3.1. Xususiy chastotalar va rezonans xavfi

Modal tahlil natijasida shpindel uzelining dastlabki o‘nta xususiy tebranish chastotasi aniqlandi (1-jadval). Ularning eng quyisi 1327 Hz, eng yuqorisi 4290 Hz ni tashkil etadi. Juft chastotalarning (1327 va 1327,6; 2039 va 2039,8 Hz va h.k.) bir-biriga yaqinligi uzelning aylanma simmetriyasi (ikki o‘zaro perpendikulyar tekislikdagi egilish shakllari) bilan izohlanadi. Shpindel aylanish chastotasi 40 dan 2500 ayl/min gacha o‘zgarganda qo‘zg‘atuvchining asosiy chastotasi (n/60) taxminan 0,67 Hz dan 42 Hz gacha o‘zgaradi. Demak, eng quyi xususiy chastota qo‘zg‘atuvchining eng yuqori chastotasidan taxminan 32 marta katta va ishchi rejimlarda asosiy chastota bo‘yicha rezonans yuzaga kelmaydi. Tayanchlardagi tebranishlarning o‘lchangan chastotasi 12–25 Hz, amplitudasi esa 0,01 mm dan oshmadi; xususiy chastotalar spektrlarining hisoblangan va o‘lchangan qiymatlari qoniqarli mos keldi [5, 9].

**1-jadval**.

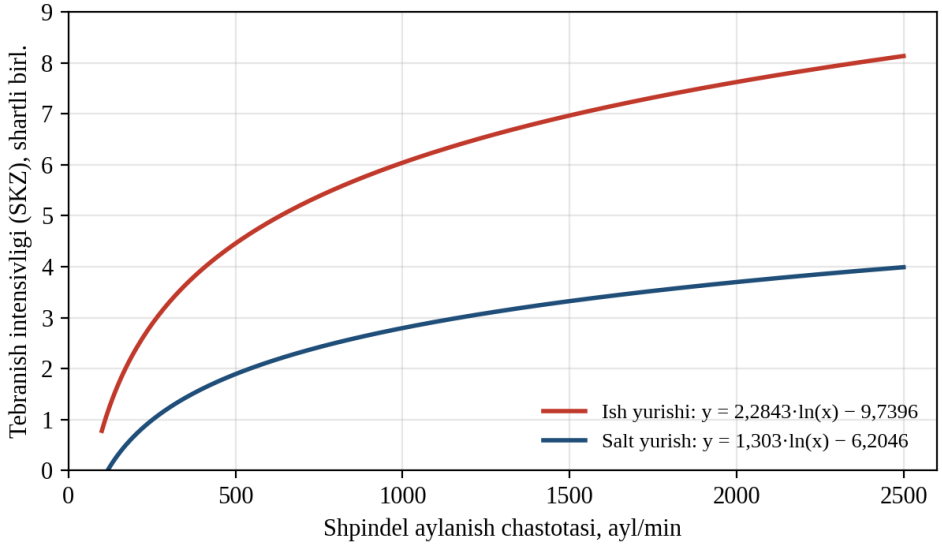
**Shpindel uzelining hisoblangan xususiy tebranish chastotalari**

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| f, Hz | 1327 | 1327,6 | 2039 | 2039,8 | 2862 | 3090 | 3091 | 3502 | 3503 | 4290 |

Shu bilan birga, rezonansning yo‘qligi faqat g‘alayonning asosiy chastotasi bo‘yicha baholangan. Yuqori garmonikalar va tishli ilashish chastotalari ancha yuqori bo‘lishi mumkin. Masalan, z = 32 tishli g‘ildirak 2500 ayl/min da aylansa, ilashish chastotasi $z \cdot f_r \approx 1333$ Hz bo‘ladi va u 1327 Hz li xususiy chastotaga juda yaqin keladi. Shuning uchun amaliy tadbiqda uzatmalar tishlari soni bo‘yicha ilashish chastotalari va ularning garmonikalarini xususiy chastotalar bilan solishtirib chiqish tavsiya etiladi.

### 3.2. Tebranish intensivligining rejimga bog‘liqligi

Tajribalar tebranish intensivligi (o‘rtacha kvadratik qiymat, SKZ) shpindel aylanish chastotasi ortishi bilan o‘sishini ko‘rsatdi (2-rasm).




**2-rasm. Shpindel uzeli tebranish intensivligining aylanish chastotasiga bog‘liqligi.**

Bog‘liqlik ikki rejim uchun logarifmik regressiya bilan yaxshi tavsiflanadi: ish yurishida y = 2,2843·ln(x) − 9,7396; salt yurishda y = 1,303·ln(x) − 6,2046, bunda x — aylanish chastotasi, ayl/min [5, 9]. Tenglamalar bo‘yicha hisoblanganda 1000 ayl/min da intensivlik ish yurishida taxminan 6,0, salt yurishda 2,8; 2500 ayl/min da esa mos ravishda 8,1 va 4,0 ni tashkil etadi. Ya’ni ish yurishida tebranish salt yurishga nisbatan taxminan ikki baravar yuqori. Logarifmik funksiya hosilasi 1/x ga proporsional bo‘lgani uchun yuqori aylanishlarda o‘sish sur’ati sekinlashadi: 1000 dan 2500 ayl/min gacha ish yurishida intensivlik taxminan 2,1 birlikka, salt yurishda 1,2 birlikka ortadi.

Aylanish chastotasi oshganda dinamik yuklar umumiy dispersiyasida yuqori chastotali tashkil etuvchilar ulushi ortadi va stanokning umumiy tebranish darajasi sezilarli oshadi. Kesish rejimlari ta’sirida ham farq kuzatildi: o‘q va radial kesish kuchlari ortganda tebranish intensivligi kamaydi, kesish tezligi va chuqurligi ortganda esa oshdi. Amaliy xulosa shuki, davriy o‘lchovlar natijalari faqat bir xil rejim va yuklanishda olingandagina o‘zaro taqqoslanadi; aks holda ularni holat o‘zgarishini aniqlashda ishlatib bo‘lmaydi.

### 3.3. Podshipnik tayanchlarini diagnostika qilish

NT-250M tayanchlaridagi podshipniklar uchun hisoblangan xarakterli chastotalar 2-jadvalda keltirilgan.

**2-jadval.**

**NT-250M podshipniklarining xarakterli chastotalari**

| Podshipnik belgisi | Z, dona | $f_{vr}$, Hz | $f_c$, Hz | $f_t$ (tashqi halqa), Hz | $f_i$ (ichki halqa), Hz |
|---|---|---|---|---|---|
| 2-697920Л2 | 26 | 40 | 6,8 | 176 | 864 |
| 4-7716Л1 | 14 | 40 | 10,4 | 144,8 | 415,2 |
| 7308 | 12 | 33 | 7,9 | 94,2 | 301,8 |
| 36208 | 9 | 33 | 5,9 | 54,2 | 242,9 |
| 36209 | 9 | 33 | 6,3 | 57,4 | 239,6 |
| 112 | 12 | 33 | 5,9 | 72,3 | 323,7 |

$f_{vr}$ — val aylanish chastotasi; $f_c$ — separator; $f_t$, $f_i$ — g‘ildirak tanalarining tashqi va ichki halqa ustidan o‘tish chastotalari.

Jadvaldan ko‘rinadiki, har bir podshipnik o‘ziga xos “chastota imzosi”ga ega. Masalan, 2-697920Л2 podshipnik uchun tashqi halqa nuqsoni spektrda 176 Hz va uning garmonikalarida, ichki halqa nuqsoni esa 864 Hz atrofida namoyon bo‘lishi kutiladi. Ichki halqa nuqsonida bu tashkil etuvchi val aylanish chastotasi bilan modulyatsiyalanadi, ya’ni yon polosalar ($f_i \pm f_{vr}$) paydo bo‘ladi. Podshipnik nuqsonlarining dastlabki belgilari odatda umumiy daraja o‘zgarishidan oldin yuqori chastotali signalning o‘rovchi spektrida ko‘rinadi. Shuning uchun podshipnik tayanchlarida tebranishlarning sabablarini aniqlashda o‘rovchi spektr asosiy rol o‘ynaydi [5, 8, 9].

### 3.4. Tishli uzatmalar va diagnostik belgilar chastota diapazoni

Diagnostik belgi sifatida bitta mutlaq ko‘rsatkich (masalan, standart chastota polosasidagi tebranish tezligining o‘rtacha kvadratik qiymati), ko‘p o‘lchovli kattaliklar (turli chastotalardagi garmonika amplitudalari) yoki turli parametrlar kombinatsiyasi ishlatilishi mumkin. Belgi nazorat qilinayotgan obyekt sifatiga eng ko‘p ta’sir qiladigan parametrlarga sezgir, boshqa omillarga (rejimlar, tashqi sharoit, tasodifiy g‘alayonlar) esa invariant bo‘lishi kerak [8]. Ishlab chiqarish nuqsonlari, balanslash xatolari va yig‘ish nuqsonlarini aniqlash uchun aylanish chastotasining (0,5…5)·f diapazonidagi past chastotali tebranishlar qulay. Bunday diagnostika ishlab chiqaruvchida yoki qabul nazoratida o‘tkazilishi va muhim mahsulotlarga spektral xarakteristikalarning vibratsion pasporti ilova qilinishi maqsadga muvofiq. Ekspluatatsiya jarayonida yeyilish va boshqa qaytmas jarayonlar tufayli rivojlanuvchi nuqsonlar uchun esa 10…15 kHz gacha yuqori chastotali tebranishlar sezgirroq. Ular moylash xususiyatining yomonlashuvi, ishqalanish va yeyilish, podshipnik elementlarining charchoq shikastlanishi hamda gidrotizimlardagi kavitatsiyaga sezgir. Bundan tashqari, yuqori chastotali tebranish tarqalishida kuchli so‘nadi, bu esa turli podshipniklar va tayanch uzellari manbalarini bir-biridan ajratishni osonlashtiradi va signal/shovqin nisbatini oshiradi.

Tishli uzatmalar bo‘yicha turli nuqson turlariga mos chastotalar 3-jadvalda tizimlashtirilgan. Tishli uzatma signali yuklanishga kuchli bog‘liq: salt yurishda u juda zaif, kuch ortishi bilan ilashishdan tebranish ko‘payadi, shuning uchun o‘lchovlar bir xil, imkon qadar katta yuklanishda bajarilishi kerak. Tishlar chastotasi orasidagi oraliq chastotali tashkil etuvchilar ($f_m$) nuqsonning dastlabki sezgir ko‘rsatkichi bo‘lishi mumkin, biroq ularning amplitudasi ish sharoiti va yuklanishga nochiziqli va beqaror bog‘langani uchun ularni qoldiq resursni baholashning yagona parametri sifatida ishlatish har doim to‘g‘ri emas [8]. Mahalliy yeyilish rivojlanishi bilan spektrdagi shovqin tashkil etuvchisining dispersiyasi o‘zgaradi: ishqalanib moslashish jarayonida kamayadi, normal ishlashda uzoq vaqt deyarli

o‘zgarmaydi va jadal yeyilishda eksponensial o‘sadi; bu belgi ayniqsa tezkor ko‘paytirgichlarda tishlar ilashish chastotasi emas, balki uzatma elementlarining xususiy rezonans chastotalari bo‘yicha diagnostika qilishni talab qiladi.

**3-jadval**.

**Tishli uzatma nuqsonlariga xos diagnostik chastotalar**

| Nuqson turi | Spektr va o‘rovchi spektrdagi chastotalar | Nuqson guruhi |
|---|---|---|
| Muvozanatlanmaganlik | $f_r$ | Ishlab chiqarish |
| Ilashish qadamining doimiy xatosi | $f_z$ | Ishlab chiqarish |
| Ilashish qadamining o‘zgaruvchan xatosi | $k \cdot f_{r1}$, $k \cdot f_{r2}$ ($k$ = 1, 2, kamdan-kam 3, 4); $m \cdot f_z \pm n \cdot f_r$ | Ishlab chiqarish |
| O‘qlar nomarkazligi | $k \cdot f_{r1}$, $k \cdot f_{r2}$; $m \cdot f_z \pm n \cdot f_r$ | Yig‘ish |
| G‘ildiraklar orasida yon tirqishning ortishi | $k \cdot f_r$, $k$ = 1, 2…20 va undan yuqori | Yig‘ish |
| Abraziv yeyilish | $k \cdot f_z$, $k \cdot f_r$, shovqin o‘sishi; $m \cdot f_m \pm n \cdot f_r$ | Yeyilish |
| Tishlarning uvalanishi | $k \cdot f_r$, $m \cdot f_z \pm n \cdot f_r$, $m \cdot f_m \pm n \cdot f_r$ (amplituda tebranishi, $n$ = 0, 1, 2…) | Yeyilish |
| Yoriqlar va/yoki tishlarning sinishi | Yuqoridagilar va shovqin tashkil etuvchisining o‘sishi | Yeyilish |

### 3.5. Texnik holatni bashoratlash va qoldiq resursni baholash

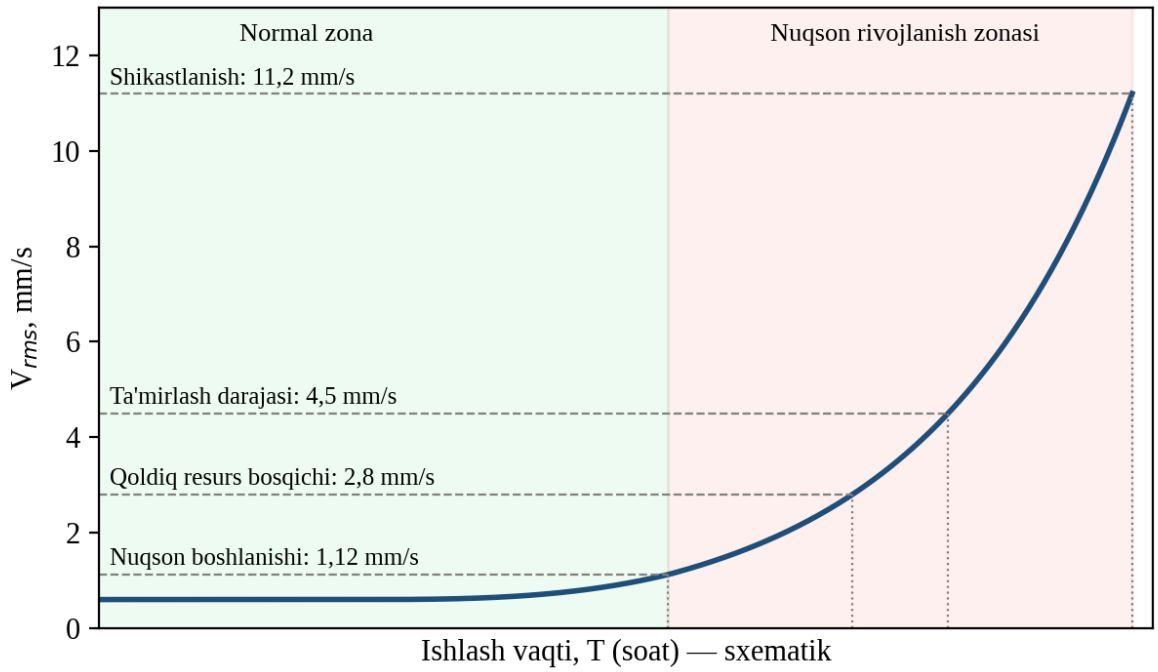
Bashoratlash - obyekt holatini kelgusi vaqt momentida yoki holat o‘zgarmaydigan vaqt oralig‘ida oldindan aytish. Eng ko‘p qo‘llaniladigan usul - ekspluatatsiya sharoitida vibratsion monitoring orqali olingan retrospektiv ma’lumotlarni ekstrapolyatsiya qilish, ya’ni trend tahlili. Diagnostik parametr Y(t) ning $t_1$, $t_2$, …, $t_m$ momentlardagi o‘lchovlari bo‘yicha regressiya funksiyasi ko‘phad bilan approksimatsiya qilinadi:

$$Y(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + \ldots + b_m t^m, \quad (4)$$

bunda $b_0$, …, $b_m$ - o‘lchov natijalaridan eng kichik kvadratlar usuli bilan aniqlanadigan koeffitsiyentlar [8]. Regressiya funksiyasini tanlash trend ekstrapolyatsiyasi natijasini asosan belgilaydi. Topilgan $Y(t_j)$ bo‘yicha obyekt normal yoki nuqsonli holatga tegishliligi to‘g‘risida xulosa chiqariladi.

3-rasmda tebranish tezligining o‘rtacha kvadratik qiymati $V_{rms}$ ning ishlash vaqtiga bog‘liqligi (ikkinchi darajali ko‘phad bilan chiziqlilashtirilgan) sxematik ko‘rsatilgan. Dastlabki davrda ishlash barqaror. $T_1$ momentda nuqson boshlanadi ($V_{rms} \approx 1{,}12$ mm/s), radial tirqish ortishi tufayli yeyilish tezligi o‘sadi. So‘ngra qoldiq resurs bosqichiga o‘tiladi (≈ 2,8 mm/s), keyin ta’mirlash darajasi (≈ 4,5 mm/s) va nihoyat shikastlanish (≈ 11,2 mm/s) yuzaga keladi. Tishli g‘ildiraklarda bu jarayon tishlarning charchoq shikastlanishi va o‘rovchi spektrdagi chastota tashkil etuvchilarining ko‘payishi bilan birga kechadi.

Har bir yangi o‘lchovdan so‘ng Y(t) qayta aniqlanadi va $V_{rms}$ ning 2,8 hamda 4,5 mm/s ga yetish momentlari ekstrapolyatsiya qilinadi. Ta’mirlash 4,5 mm/s ga yetishidan oldin, ya’ni bashorat qilingan muddat ichida rejalashtiriladi. Shuni ta’kidlash lozimki, jadal yeyilish bosqichida o‘sish eksponensial xarakterga yaqin; shu sababli ikkinchi darajali ko‘phad cheklangan bashorat gorizontida yetarli aniqlik beradi, uzoq muddatga ekstrapolyatsiya esa xatoni oshiradi.




**3-rasm. Diagnostik parametrning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi va qoldiq resursni baholash sxemasi**

### 3.6. Birlashtirilgan tartib va cheklovlar

Olingan natijalarga asosan texnik holatni baholashni quyidagi izchillikda tashkil etish tavsiya etiladi: (1) loyihalash bosqichida modal tahlil bilan xususiy chastotalarni aniqlash va rezonans zonasini istisno qilish; (2) yangi yoki ta’mirdan chiqqan stanokda bazaviy vibratsion pasport olish; (3) bir xil rejim va yuklanishda davriy o‘lchovlar o‘tkazish; (4) spektr va o‘rovchi spektr bo‘yicha nuqson turini 2- va 3-jadvallar asosida aniqlash; (5) $V_{rms}$ trendi asosida qoldiq resursni baholash va ta’mirni rejalashtirish. Bunday tizimni joriy etish xarajatlari nisbatan kichik, uning natijasi esa to‘satdan to‘xtashlar va ta’mirlash xarajatlarining kamayishi, xavfsizlik darajasining oshishi hamda dastgohni qisman ajratmasdan holatini baholash imkoniyatini beradi.

## Xulosa

1. NT-250M dastgohi shpindel uzelining elastik tayanchlardagi pog‘onali balka ko‘rinishidagi matematik modeli ishlab chiqildi. Modal tahlilda dastlabki o‘nta xususiy chastota 1327–4290 Hz oralig‘ida aniqlandi; ular ishchi aylanishlarda (40–2500 ayl/min) qo‘zg‘atuvchining asosiy chastotasidan (0,67–42 Hz) kamida 30 marta katta, ya’ni asosiy chastota bo‘yicha rezonans xavfi yo‘q.

2. Tebranish intensivligi shpindel aylanish chastotasiga logarifmik bog‘liq bo‘lib, ishchi yurishida salt yurishga nisbatan taxminan ikki baravar yuqori. (Diagnostik o‘lchovlarni taqqoslash uchun rejim va yuklanish bir xil bo‘lishi shart).

3. Past chastotali tebranishlar ishlab chiqarish va yig‘ish nuqsonlarini, yuqori chastotali tebranishlar va o‘rovchi spektr esa ekspluatatsiya jarayonidagi yeyilish va podshipnik nuqsonlarini aniqlashda samarali ekanligini ko‘rsatdi hamda podshipniklar va tishli uzatmalar uchun diagnostik chastotalar tizimlashtirildi.

4. $V_{rms}$ ning vaqt bo‘yicha trendiga asoslangan bashorat (ko‘phad regressiyasi) qoldiq resursni baholash va kalendar bo‘yicha ta’mirlashdan texnik holatga ko‘ra xizmat ko‘rsatishga o‘tish imkonini beradi.

**Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:**

**[1]** Ataullayev A.O., Yaxshiyev Sh.N., Mamadiyarov A.J. Metodika rascheta dinamicheskix xarakteristik shpindelnogo uzla // Fan va texnologiyalar taraqqiyoti ilmiy-texnikaviy jurnal. Buxoro muhandislik-texnologiya instituti, 2020. № 1. B. 47.

**[2]** Egamberdiyev I.P., Ostrovskiy M.S. Issledovanie vibratsionnix metodov otsenki texnicheskogo sostoyaniya burovix stankov // Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten‘. 2007. № 9. S. 93–97.

**[3]** Xanov A.M. i dr. Avtomatizirovanniy raschet dinamicheskix xarakteristik uzlov texnologicheskix sistem // Perspektivnie texnologii i materiali: sb. materialov mejdunarodnoy nauchno-texnicheskoy konferentsii. Perm: Perm. gos. texn. un-t, 2008. S. 463–471.

**[4]** Kudinov V.A. Dinamika stankov. M.: Mashinostroenie, 1967. 359 s.

**[5]** Mamadiyarov A.J. Study of spindle unit dynamics metal cutting machine // ISJ Theoretical & Applied Science. 2020. № 10 (90). P. 325–331. DOI: 10.15863/TAS.

**[6]** Push A.V., Zverev I.A. Shpindelnie uzli: proektirovanie i issledovanie. M.: Stankin, 2000. 197 s.

**[7]** Push V.E. Metallorejushie stanki. M.: Mashinostroenie, 1985. 256 s.

**[8]** Yakhshiev Sh., Egamberdiev I., Mamadiyarov A., Saibov M., Karimova N. Development of technology and methodology for monitoring the technical condition of metalcutting machines // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 525, 05021. DOI: 10.1051/e3sconf/202452505021.

**[9]** Yaxshiyev Sh.N., Ashurov Kh.Kh., Mamadiyarov A.J. Dynamics of spindle assembly of metal-cutting machine // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2020. Vol. 9, Issue 3. P. 3121–3125. DOI: 10.35940/ijeat.C6119.029320.

**[10]** Zenkevich O. Metod konechnix elementov v texnike. M.: Mir, 1985. 542 s.