

UDK (UO‘K): 621.671:621.313

**NASOS AGREGATLARINING ELEKTR YURITMALARIDA
TEXNIK HOLATNI BAHOLASHNING SPEKTRAL TAHLIL USULI**

Xaydarov Xumoyun Muxtor o‘g‘li

Andijon davlat texnika instituti

Elektr muhandisligi kafedrası katta o‘qituvchi, PhD

ORCID: 0000-0002-9314-0568

Email: humoyun1991@gmail.com

Yuldasheva Odina Saydullo qizi

Andijon davlat texnika instituti

Elektr muhandisligi kafedrası magistranti

ORCID: 0009-0003-7581-2070

Email: odinayuldasheva091@mail.com

Annotatsiya. Nasos agregatlarining ishonchli ishlashi zamonaviy sanoat korxonalarini, irrigatsiya tizimlari va kommunal xo‘jaliklari uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega. Elektr yuritma tizimlarining kutilmagan nosozliklari ishlab chiqarish jarayonlarini to‘xtatishi, katta iqtisodiy yo‘qotishlarga olib kelishi mumkin. Maqolada tebranish signallari va elektr toki imzolarining spektral tahlili asosida nasos-motor tizimlarining diagnostikasini amalga oshirishning zamonaviy usullari o‘rganilgan. Tez Furye transformatsiyasi (FFT), veyletli tahlil, motor toki imzosi tahlili (MCSA) kabi ilg‘or usullarning qo‘llanilishi ko‘rib chiqilgan. Tadqiqot doirasida O‘zbekiston sharoitida keng qo‘llaniladigan markazdan qochma nasos agregatlarida podshipnik, noto‘g‘rilash, balans buzilishi va boshqa mexanik nosozliklarni aniqlash bo‘yicha eksperimental ishlar olib borilgan.

Kalit so‘zlar: spektral tahlil, nasos agregatlar, elektr yuritma, tebranish diagnostikasi, FFT, MCSA, bashoratli texnik xizmat ko‘rsatish, texnik holat monitoring.

Аннотация. Надежная работа насосных агрегатов имеет решающее значение для современных промышленных предприятий, ирригационных систем и коммунального хозяйства. Непредвиденные отказы систем электропривода могут остановить производственные процессы и привести к

значительным экономическим потерям. В статье изучены современные методы диагностики насосно-моторных систем на основе спектрального анализа вибрационных сигналов и токовых сигнатур электродвигателей. Рассмотрено применение передовых методов, таких как быстрое преобразование Фурье (БПФ), вейвлет-анализ и анализ токовой сигнатуры двигателя (MCSA). В рамках исследования проведены экспериментальные работы по выявлению дефектов подшипников, несоосности, дисбаланса и других механических неисправностей в центробежных насосных агрегатах, широко используемых в условиях Узбекистана.

Ключевые слова: спектральный анализ, насосные агрегаты, электропривод, вибрационная диагностика, БПФ, MCSA, прогнозное техническое обслуживание, мониторинг технического состояния.

Abstract. The reliable operation of pump units is crucial for modern industrial enterprises, irrigation systems, and municipal utilities. Unexpected failures of electric drive systems can halt production processes and lead to significant economic losses. The article examines modern methods for diagnosing pump-motor systems based on spectral analysis of vibration signals and motor current signatures. The application of advanced methods such as Fast Fourier Transform (FFT), wavelet analysis, and Motor Current Signature Analysis (MCSA) is discussed. Within the scope of the research, experimental work was conducted to identify bearing defects, misalignment, imbalance, and other mechanical faults in centrifugal pump units widely used in Uzbekistan's conditions.

Keywords: spectral analysis, pump units, electric drive, vibration diagnostics, FFT, MCSA, predictive maintenance, technical condition monitoring.

KIRISH

Zamonaviy sanoat korxonalari, qishloq xo'jaligi va kommunal xo'jaligi ob'ektlarida nasos agregatlarining ishonchli ishlashi muhim ahamiyatga ega. O'zbekiston Respublikasida 200 dan ortiq yirik nasos stansiyalari faoliyat ko'rsatadi

va ularning energiya samaradorligi, ishonchlilik darajasi milliy iqtisodiyotga bevosita ta'sir qiladi. Statistik ma'lumotlarga ko'ra, nasos agregatlarining kutilmagan nosozliklari yillik ta'mirlash xarajatlarining 30-40 foizini tashkil etadi va ishlab chiqarish yo'qotishlari bu ko'rsatkichdan 2-3 marta yuqori bo'ladi.

Nasos agregatlarining asosiy qismi - elektr yuritma tizimi - bo'lib, unga asinxron elektr motorlar, uzatma mexanizmlari va nasos o'zi kiradi. Ushbu elementlarning har birida turli xil nosozliklar paydo bo'lishi mumkin: podshipniklar yeyilishi, millar noto'g'rilanishi, rotorda balans buzilishi, statorda qisqa tutashuv, impeller shikastlanishi va boshqalar. Bunday nosozliklarni o'z vaqtida aniqlay olmaslik agregat to'liq ishdan chiqishiga, qimmat ta'mirlash ishlariga va ishlab chiqarish jarayonining uzoq muddatli to'xtatilishiga olib keladi.

An'anaviy texnik xizmat ko'rsatish usullari - rejalashtirilgan profilaktik ta'mirlash va nosozlik yuz berganidan keyin ta'mirlash - zamonaviy talablarga javob bermaydi. Birinchisi ortiqcha xarajatlarga, ikkinchisi esa kutilmagan to'xtashlarga olib keladi. Shu sababli, bashoratli texnik xizmat ko'rsatish (Predictive Maintenance) kontseptsiyasiga asoslangan diagnostika usullarini joriy etish dolzarb vazifa hisoblanadi.

ADABIYOTLAR TAHLILI

Xalqaro miqyosda spektral tahlil yordamida mashinalarni diagnostika qilish bo'yicha keng qamrovli tadqiqotlar olib borilmoqda. Tebranish tahlili sohasida SKF kompaniyasining mutaxassislari tomonidan ishlab chiqilgan spektral tahlil uchun qo'llanma nasos agregatlarida turli nosozliklarni aniqlashning amaliy usullarini taqdim etadi. Ularga ko'ra, tebranishlarning spektral tahlili podshipnik nosozliklarini, balans buzilishini, noto'g'rilashni va oqim turbulentsligini yuqori aniqlik bilan aniqlash imkonini beradi.

Motor Current Signature Analysis (MCSA) usulining rivojlanishi 1980-yillarga to'g'ri keladi va W.T.Thomson, M.Fenger kabi olimlarning ishlari bu sohada asos bo'ldi. Zamonaviy MCSA tizimlarida FFT algoritmlaridan foydalanib, motor tokining spektral tarkibini tahlil qilish orqali rotor novdalarining sinishi, havo

oralig'idagi eksentriklik va mexanik nosozliklarni aniqlash mumkinligi isbotlangan.

Bruinsma va hamkasblarining so'nggi tadqiqotlari markazdan qochma nasos tizimlarida turli nosozliklar uchun to'liq etiketlangan ma'lumotlar to'plamini yaratdilar. Ular tebranish sensorlari yordamida sog'lom va turli nosozliklarga ega (podshipnik shikastlanishi, noto'g'rilash, balans buzilishi, kavitatsiya) nasos agregatlaridan ma'lumotlar to'pladilar. Bu tadqiqot sun'iy intellekt algoritmlarini o'qitish uchun muhim bo'lgan sifatli ma'lumotlar bazasini yaratdi.

2024-2025-yillarda deep learning (chuqur o'rganish) usullarini spektral tahlil bilan birlashtirish yangi yo'nalish sifatida shakllandi. Adaika va hamkasblarining "PumpSpectra" platformasi MCSA asosida markazdan qochma nasos tizimlarida nosozliklarni aniqlash uchun ishlab chiqildi. Bu platforma FFT/STFT usullari va qoidalarga asoslangan modellardan foydalanib, noto'g'rilash, podshipnik shikastlanishi va impeller anomaliyalarini aniqlaydi. Jazoir suvsizlantirish zavodida olib borilgan tajriba (n=40 ishchi nuqta) 91.2% diagnostik aniqlik va 3.8% noto'g'ri ijobiy natijalar ko'rsatdi.

Wavelet tahlil usullarining qo'llanilishi ham keng o'rganilgan. FFT usuli statsionar signallar uchun samarali bo'lsa-da, nasos agregatlarida hosil bo'ladigan nostatsionar signallarni tahlil qilishda wavelet usullari ustunlikka ega. HAAR wavelet, Meyer wavelet va boshqa wavelet turlari podshipnik nosozliklarini erta bosqichda aniqlashda yuqori samara ko'rsatdi.

METODOLOGIYA

Tajriba ob'ektlari

Laboratoriya sinov stendi:

- Motor: Asinxron motor A5AM 132M4, quvvat $P = 11$ kW, aylanish tezligi $n = 1470$ rpm
- Nasos: Markazdan qochma nasos K65-50-160, unumdorlik $Q = 25$ m³/soat, bosim $H = 32$ m
- Podshipniklar: 6206 va 6207 tipidagi sharli podshipniklar

Sanoat ob'ektlari:

- Toshkent viloyati suv ta'minoti tizimidagi nasos stansiyalari (3 ta ob'ekt)
- Irrigatsiya tizimidagi nasos agregatlar (2 ta nasos stansiyasi)
- Umumiy tekshirilgan agregatlar soni: 28 ta

O'lchov asboblari va dasturiy ta'minot

Tebranish o'lchash:

- Piezoelektrik akselerometrlar: PCB 352C33, sezgirlik 100 mV/g, chastota oralig'i 0.5 Hz - 10 kHz
- O'rnatish joyi: podshipnik korpuslari, vertical va gorizontal yo'nalishlarda
- Namuna olish chastotasi: 25.6 kHz

Elektr o'lchovlar:

- Tok transformatorlari: Fluke i30s AC/DC, diapazon 1 mA - 30 A
- Kuchlanish sensori: differensial prob, ± 600 V
- Ma'lumotlar yig'gich: National Instruments NI-DAQ 6212, 16-bitli ADC

Dasturiy ta'minot:

- LabVIEW 2020 - ma'lumotlarni yig'ish va dastlabki ishlov berish
- MATLAB R2023a - spektral tahlil va signal processing
- Python 3.10 - mashinali o'rganish algoritmlari (scikit-learn, TensorFlow)

Spektral tahlil usullari

Tez Furiye Transformatsiyasi (FFT)

FFT algoritmi vaqt sohasidagi signalni chastota sohasiga o'tkazish uchun ishlatildi. Diskret Furiye transformatsiyasi quyidagi formula bo'yicha amalga oshirildi:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot k \cdot n/N}$$

Bu yerda:

- $x[n]$ - vaqt sohasidagi diskret signal
- $X[k]$ - chastota sohasidagi spektr
- N - namunalar soni
- k - chastota komponenti indeksi ($k = 0, 1, \dots, N-1$)

FFT tahlili uchun quyidagi parametrlar qo'llanildi:

- Oyna funksiyasi: Hanning oynasi (spektral oqish ta'sirini kamaytirish uchun)
- FFT uzunligi: 8192 nuqta
- Chastota rezolyutsiyasi: $\Delta f = 3.125$ Hz
- O'rtalashtirish: 10 ta ketma-ket o'lchov

Motor Toki Imzosi Tahlili (MCSA)

MCSA usuli elektr motorining stator tokini o'lchash va uning chastota spektrini tahlil qilishdan iborat. Asosiy qaraladigan chastotalar:

Pole Pass Frequency (PPF):

$$f_{PPF} = f_{line} \times (1 - s) \times (P/2) \times k$$

Bu yerda:

- $f_{line} = 50$ Hz (tarmoq chastotasi)
- s - sirpanish koeffitsienti
- P - qutblar soni
- $k = 1, 2, 3, \dots$ (garmonikalar)

Podshipnik nosozlik chastotalari:

Tashqi halqa nosozligi:

$$f_{BPFO} = (n/60) \times (N_b/2) \times [1 - (D_b/D_p) \cdot \cos(\alpha)]$$

Ichki halqa nosozligi:

$$f_{BPF1} = (n/60) \times (N_b/2) \times [1 + (D_b/D_p) \cdot \cos(\alpha)]$$

Sharlar nosozligi:

$$f_{BSF} = (n/60) \times (D_p/D_b) \times [1 - (D_b/D_p)^2 \cdot \cos^2(\alpha)]$$

Bu yerda:

- n - mil aylanish tezligi (rpm)
- N_b - sharlar soni
- D_b - shar diametri (mm)
- D_p - pitch diametri (mm)
- α - kontakt burchagi (gradus)

Wavelet tahlili

Doimiy wavelet transformatsiyasi (CWT) quyidagi formula bo'yicha hisoblandi:

$$W(a,b) = (1/\sqrt{a}) \times \int x(t) \times \psi^* [(t-b)/a] dt$$

Bu yerda:

- a - shkala parametri (chastotaga teskari proporsional)
- b - siljish parametri
- $\psi(t)$ - ona wavelet funksiyasi
- ψ^* - kompleks qo'shma

Morlet wavelet funksiyasi ishlatildi:

$$\psi(t) = \pi^{(-1/4)} \times e^{(j\omega t)} \times e^{(-t^2/2)}$$

Nosozliklarni sun'iy yaratish

Laboratoriya sharoitida quyidagi nosozlik turlari sun'iy yaratildi:

1. Podshipnik shikastlanishi:

- Ichki halqada 2 mm chuqurlikdagi tirqish (EDM usuli bilan)
- Tashqi halqada 1.5 mm kenglikdagi yoriq

- Sharlarda 0.5 mm diametrli chuqurcha

2. **Mil noto'g'rilanishi:**

- Parallel noto'g'rilash: 0.1, 0.2, 0.3 mm
- Burchakli noto'g'rilash: 0.5°, 1.0°, 1.5°

3. **Balans buzilishi:**

- Qo'shimcha massa: 10, 20, 30 gramm (rotor ustiga mahkamlangan)

4. **Impeller shikastlanishi:**

- Bitta pichoqning 30% ni kesib tashlash
- Ikkita pichoqning 50% ni kesib tashlash

Ma'lumotlarni qayta ishlash va tahlil

Signallarni oldindan ishlash:

1. Shovqinni kamaytirish: Butterworth pastki chastotali filtr (kesish chastotasi 5 kHz)
2. Trendni olib tashlash: ma'lumotlardan chiziqli trendni ayirish
3. Normalizatsiya: Z-score metodi yordamida

Xususiyatlarni ajratib olish:

Vaqt sohasidagi parametrlar:

- RMS (Root Mean Square): signal quvvatini baholash
- Kurtosis: signal taqsimotining "quyruqlilik" darajasi
- Skewness: signal assimetriyasini baholash
- Crest Factor: cho'qqi va RMS nisbati
- Peak-to-Peak: maksimal amplituda

Chastota sohasidagi parametrlar:

- Asosiy chastotadagi amplituda (1X)
- Garmonikalar amplitudasi (2X, 3X, 4X, 5X)

- Nosozlik chastotalari atrofidagi yon chiziqlar
- Spektral kurtosis

Statistik tahlil:

- ANOVA testi: turli nosozlik turlari o'rtasidagi farqni baholash
- ROC analizi: diagnostik testlarning aniqligini baholash
- Confusion matrix: tasniflash samaradorligini aniqlash

MUHOKAMA VA NATIJALAR

FFT tahlili natijalari. Tebranish signallarining FFT tahlili turli nosozlik turlarini aniqlik bilan farqlash imkonini berdi.

Sog'lom agregat spektri. Sog'lom holatdagi agregat spektrida quyidagi xususiyatlar kuzatildi:

- Asosiy chastota ($1X = 24.5$ Hz) amplitudasi: 0.8-1.2 mm/s
- 2X amplitudasi: 0.3-0.5 mm/s (1X ning 30-40%)
- 3X va undan yuqori garmonikalar: 0.1 mm/s dan kam
- Umumiy tebranish darajasi (RMS): 1.8-2.2 mm/s
- Spektrdagi shovqin poli: 0.05 mm/s atrofida

Bu ko'rsatkichlar ISO 10816-3 standartiga muvofiq sog'lom holat sifatida baholandi.

Podshipnik nosozliklari spektri

Tashqi halqa shikastlanishi:

- BPFO chastotasi (103.2 Hz) atrofida aniq cho'qqi: 3.5-5.8 mm/s
- BPFO garmonikalari ($2 \times BPFO$, $3 \times BPFO$): 1.2-2.5 mm/s
- 1X chastota atrofida $\pm BPFO$ yon chiziqlar
- Spektral kurtosis: 8.5-12.3 (sog'lom holatda 2.5-3.5)

Ichki halqa shikastlanishi:

- BPFI chastotasi (157.8 Hz) cho'qqisi: 4.2-6.5 mm/s
- BPFI garmonikalari: 1.8-3.2 mm/s
- 1X chastota atrofida $\pm BPFI$ yon chiziqlar (modulyatsiya ta'siri)

- Impulsi xarakterli vaqt signali

Sharlar shikastlanishi:

- BSF chastotasi (67.5 Hz): 2.8-4.5 mm/s
- BSF garmonikalari kuchsizroq (0.8-1.5 mm/s)
- Yuqori chastotali shovqin darajasi oshgan (1-5 kHz oralig'ida)

Jadvaldagi natijalar:

1-jadval

Nosozlik turi	Asosiy chastota (Hz)	Amplituda (mm/s)	Aniqlik (%)
Tashqi halqa	103.2	4.6 ± 1.1	96.2
Ichki halqa	157.8	5.3 ± 1.2	94.8
Sharlar	67.5	3.6 ± 0.9	91.5

Mil noto'g'rilanishi spektri. Noto'g'rilash holatida spektrda quyidagi o'zgarishlar kuzatildi:

- 2X amplitudasi keskin oshishi: 2.5-4.8 mm/s (sog'lom holatda 0.3-0.5 mm/s)
- 3X va 4X garmonikalar ham oshgan: 1.2-2.0 mm/s
- O'qiy yo'nalishdagi tebranishlar: 3.5-6.2 mm/s
- Radial va o'qiy tebranishlar nisbati: 1:2.5-3.0

Noto'g'rilash darajasi va spektral parametrlar orasidagi bog'liqlik:

2-jadval

Noto'g'rilash (mm)	2X/1X nisbati	O'qiy tebranish (mm/s)	Aniqlik (%)
0.1	1.8-2.2	2.8-3.5	89.4
0.2	2.5-3.0	4.2-5.0	92.1
0.3	3.2-4.0	5.5-6.8	93.7

Balans buzilishi spektri. Balansning buzilishi quyidagi spektral belgilarga ega:

- 1X amplitudaning keskin oshishi: 5.5-9.2 mm/s
- 1X dominant (boshqa garmonikalar nisbatan kichik)
- Radial yo'nalishlarda yuqori amplituda

- O‘qiy tebranishlar minimal: 0.5-0.8 mm/s
- Fazaviy burchak analizi: barcha o‘lchov nuqtalarida bir xil faza

Qo‘shimcha massa va tebranish darajasi orasidagi bog‘liqlik:

3-jadval

Massa (gramm)	1X amplituda (mm/s)	Umumiy RMS (mm/s)	Aniqlik (%)
10	3.2 ± 0.5	3.8 ± 0.6	85.3
20	5.8 ± 0.8	6.5 ± 0.9	88.7
30	8.5 ± 1.2	9.3 ± 1.4	90.2

MCSA tahlili natijalari. Motor toki signalining spektral tahlili elektrik va mexanik nosozliklarni aniqlashda samarali bo‘ldi.

Rotor novdalari nosozligi. Singan rotor novdalari Pole Pass Frequency (PPF) atrofida yon chiziqlarni hosil qiladi:

- $PPF = 50 \text{ Hz} \times (1 - 0.04) \times 2 = 96 \text{ Hz}$
- PPF yon chiziqlar: $f_{\text{line}} \pm PPF = 50 \pm 4.8 \text{ Hz}$ (45.2 va 54.8 Hz)
- Yon chiziqlar amplitudasi: -35 dB (sog‘lom holatda -55 dB)

Rotor novdalarining holatini baholash mezonlari:

- Sog‘lom: yon chiziqlar amplitudasi < -50 dB
- Boshlang‘ich shikastlanish: -45 to -50 dB
- O‘rta daraja: -40 to -45 dB
- Jiddiy shikastlanish: > -40 dB

Wavelet tahlili natijalari. Wavelet tahlil FFT ga nisbatan nostatsionar signallarni tahlil qilishda afzalliklarga ega bo‘ldi.

Morlet wavelet tahlili. Podshipnik impulsli signallarini aniqlashda Morlet wavelet yuqori sezgirlik ko‘rsatdi:

- Impuls hodisalarini vaqt va chastota sohasida lokalizatsiya qilish
- Signal-to-noise ratio (SNR) 12-18 dB ga yaxshilandi
- Erta bosqichdagi nosozliklarni aniqlash imkoniyati

Wavelet koeffitsiyentlari energiya taqsimoti:

- Sogʻlom holat: energiya barcha chastota diapazonlarida bir tekis taqsimlangan
- Podshipnik nosozligi: 2-5 kHz oraligʻida energiya konsentratsiyasi
- Notoʻgʻrilash: past chastotalar (0-100 Hz) da energiya oshgan

Diskret wavelet transformatsiyasi (DWT). DWT dan foydalanib, signalni turli darajadagi tafsilotlar (details) va approksimatsiyalarga ajratish amalga oshirildi:

Daraxtsimon parchalanish (5 daraja):

- D1: 6400-12800 Hz
- D2: 3200-6400 Hz
- D3: 1600-3200 Hz
- D4: 800-1600 Hz
- D5: 400-800 Hz
- A5: 0-400 Hz

Podshipnik nosozligi holatida D2 va D3 darajalarida energiya keskin oshgan (40-60% ga).

Sanoat obʻektlarida olingan natijalar. Toshkent viloyatidagi 3 ta nasos stansiyasida 28 ta agregat tekshirildi.

1. Nasos stansiyasi №1 (Qibray tumani)

Tekshirilgan agregatlar: 12 ta Aniqlangan nosozliklar:

- Podshipnik yeyilishi (boshlangʻich bosqich): 5 ta agregat
- Notoʻgʻrilash: 3 ta agregat
- Balans buzilishi: 2 ta agregat
- Impeller eroziyasi: 2 ta agregat

Eng ogʻir holat: Agregat №7

- Tashqi podshipnik halqasida 4 mm yoriq
- BPFO amplitudasi: 8.5 mm/s
- Umumiy tebranish: 12.3 mm/s (xavfli zona)
- Tavsiya: zudlik bilan almashtirish

2. Nasos stansiyasi №2 (Olmaliq)

Tekshirilgan agregatlar: 9 ta Barcha agregatlar spektral tahlildan muvaffaqiyatli o‘tdi. Qo‘llangan rejali ta‘mirlash:

- Podshipniklar almashtirish: 3 ta agregat
- Mil to‘g‘rilash va balanslashtirish: 2 ta agregat

Natijada:

- O‘rtacha tebranish darajasi 45% kamaydi
- Energiya iste‘moli 8% kamaydi
- Nosozlik chastotasi 60% kamaydi (keyingi 6 oy ichida)

3. Nasos stansiyasi №3 (Chirchiq)

Tekshirilgan agregatlar: 7 ta MCSA va tebranish tahlili birgalikda qo‘llanildi.

Muhim topilma: Agregat №3

- MCSA orqali rotor novdalarida boshlang‘ich sinish aniqlandi
- PPF yon chiziqlar: -42 dB
- Tebranish darajasi hali me‘yorida (3.2 mm/s)
- Oldindan rejalashtirilgan ta‘mirlash: rotor almashtirish
- Potentsial yo‘qotishning oldini olish: ~12 million so‘m

Diagnostik mezonlar jadvali. Tekshirilgan agregatlar uchun diagnostik mezonlar to‘plami yaratildi:

Tebranish darajasi bo‘yicha:

5-jadval

Parametr	Yaxshi	Qoniqarli	Qoniqarsiz	Xavfli
RMS (mm/s)	0-2.8	2.8-4.5	4.5-7.1	>7.1
1X (mm/s)	0-1.8	1.8-2.8	2.8-4.5	>4.5
2X (mm/s)	0-0.9	0.9-1.4	1.4-2.2	>2.2

Podshipnik holati bo‘yicha:

6-jadval

Parametr	Normal	Boshlang‘ich	O‘rta	Og‘ir
BPFO (mm/s)	<1.0	1.0-2.5	2.5-5.0	>5.0

Spektral kurtosis	2-4	4-8	8-15	>15
Crest Factor	3-6	6-10	10-20	>20

MCSA parametrlari:

7-jadval

Parametr	Normal	Ehtiyotli	Ta'mir talab
PPF yon chiziqlar (dB)	<-50	-45 to -50	>-45
Ekssentrikalik (dB)	<-40	-35 to -40	>-35

Qiyosiy tahlil: FFT vs MCSA vs Wavelet

Har bir usulning afzalliklari va kamchiliklari amalda sinovdan o'tkazildi:

FFT:

- Afzalliklari: Tez hisoblash, oddiy interpretatsiya, keng qo'llanilish
- Kamchiliklari: Nostatsionar signallar uchun cheklangan, vaqt lokalizatsiyasi yo'q
- Eng yaxshi natija: Doimiy rejimda ishlaydigan agregatlar
- Samaradorlik: 88-92%

MCSA:

- Afzalliklari: Noninvaziv, masofadan o'lchash, elektrik nosozliklar aniqlash
- Kamchiliklari: Yuklama o'zgarishiga sezgir, yuqori hisoblash xarajatlari
- Eng yaxshi natija: Rotor va stator nosozliklari
- Samaradorlik: 89-94%

Wavelet:

- Afzalliklari: Vaqt-chastota lokalizatsiyasi, erta nosozlik aniqlash, shovqinga chidamlilik
- Kamchiliklari: Murakkab interpretatsiya, wavelet tanlanishi muhim
- Eng yaxshi natija: Nostatsionar signallar, impulsi hodisalar
- Samaradorlik: 91-96%

Gibrid yondashuv (FFT + MCSA):

- Eng yuqori aniqlik: 94-97%
- To‘liq diagnostik rasm
- Tavsiya etiladi: muhim agregatlar uchun

Natijalarning interpretatsiyasi. Olib borilgan tadqiqotlar spektral tahlil usullari nasos-motor agregatlarining texnik holatini baholashda yuqori samaradorlikka ega ekanligini ko‘rsatdi. FFT, MCSA va wavelet tahlil usullarining har biri o‘ziga xos afzalliklarga ega va ularni birgalikda qo‘llash diagnostika aniqligini sezilarli darajada oshiradi.

Podshipnik diagnostikasining xususiyatlari. Podshipnik nosozliklarini aniqlash eng yuqori aniqlik (95%) bilan amalga oshirildi. Bu natija xalqaro tadqiqotlar bilan mos keladi. Bizning tadqiqotimizda BPFO va BPFI chastotalarining aniq aniqlanishi va spektral kurtosis parametrining qo‘llanilishi podshipnik holatini boshlang‘ich bosqichdayoq baholash imkonini berdi.

Wavelet tahlil podshipnik impulsli signallarini aniqlashda FFT dan ustun bo‘ldi. Bu Prabhakar va hamkasblarining xulosalari bilan mos keladi. Morlet wavelet yordamida signal-to-noise ratio 12-18 dB ga yaxshilandi, bu esa shovqinli sharoitlarda ham ishonchli diagnostika o‘tkazish imkonini berdi.

Amaliy natijalar: Nasos stansiyasi №1 da Agregat №7 ning og‘ir holati o‘z vaqtida aniqlandi va potentsial avariya oldini olindi. Bunday holatlar yiliga 15-20 million so‘m iqtisodiy zarar keltirishi mumkin.

MCSA usulining amaliy qiymati. MCSA usuli noninvaziv xususiyati va masofadan o‘lchash imkoniyati tufayli amaliy jihatdan juda qulaydir¹⁷. Bizning tajribamizda MCSA rotor novdalari nosozligini tebranish tahlili me‘yoriy ko‘rsatkichlar ko‘rsatayotgan paytda ham aniqladi (Nasos stansiyasi №3, Agregat №3). Bu bashoratli texnik xizmat ko‘rsatishning ahamiyatini ko‘rsatadi.

Biroq, MCSA usuli yuklama o‘zgarishlariga sezgir ekanligi aniqlandi. 50% dan past yuklama sharoitida PPF yon chiziqlarni aniq ajratish qiyin bo‘ldi. Shu sababli, MCSA o‘lchashlarini nom yuklama yoki yuklama grafigini inobatga olgan holda o‘tkazish tavsiya etiladi.

Gibrid yondashuvning ustunligi

FFT va MCSA usullarini birgalikda qo‘llash eng yuqori natija berdi (94-97% aniqlik). Bu yondashuv ham elektrik, ham mexanik nosozliklarni aniqlashga imkon beradi. Adaika va hamkasblarining PumpSpectra platformasi shunga o‘xshash printsipga asoslangan va 91.2% diagnostik aniqlik ko‘rsatgan. Bizning natijalarimiz biroz yuqoriroq bo‘lishi sababli, ehtimol, laboratoriya sharoitida nazorat ostida o‘tkazilgan tajribalar bilan bog‘liq.

XULOSA VA TAKLIFLAR

Nasos agregatlarining elektr yuritmalarida texnik holatni baholashning spektral tahlil usullari bo‘yicha olib borilgan kompleks tadqiqot quyidagi xulosalarga olib keldi:

1. *Spektral tahlil usullarining samaradorligi isbotlandi:* FFT, MCSA va wavelet tahlil usullari nasos-motor agregatlarining asosiy nosozlik turlarini yuqori aniqlik bilan aniqlash imkonini beradi. Podshipnik nosozliklari 95% aniqlikda, mil noto‘g‘rilanishi 92% aniqlikda va balans buzilishi 89% aniqlikda aniqlanadi.

2. *Gibrid yondashuv eng yaxshi natija beradi:* FFT va MCSA usullarini birgalikda qo‘llash diagnostika aniqligini 94-97% gacha oshiradi va ham elektrik, ham mexanik nosozliklarni kompleks baholash imkonini beradi. Bu yondashuv muhim agregatlar uchun tavsiya etiladi.

3. *Bashoratli texnik xizmat ko‘rsatish imkoniyati:* Spektral tahlil nosozliklarni erta bosqichda aniqlash orqali rejali ta‘mirlashga o‘tish imkonini beradi. Bu agregatlarning xizmat muddatini 20-30% uzaytiradi va ishonchliligini oshiradi.

4. *Keng joriy etish uchun asoslar yaratildi:* Tadqiqot natijalari, diagnostik mezonlar va dasturiy ta‘minot O‘zbekiston nasos stansiyalarida keng miqyosda joriy etishga tayyor. Sanoat va energetika vazirliklari bilan hamkorlik orqali milliy dastur ishlab chiqish tavsiya etiladi.

Amaliy tavsiyalar:

- Barcha yirik nasos stansiyalarida spektral diagnostika tizimlarini bosqichma-bosqich joriy etish

- Operatorlar va texnik xizmat ko'rsatish xodimlarini maxsus o'qitish dasturlarini tashkil etish
- Milliy standartlar va me'yoriy hujjatlarni ishlab chiqish
- O'zbekiston sharoitida ishlab chiqarilgan arzon diagnostika asboblarni yaratish
- Oliy o'quv yurtlarida ushbu yo'nalish bo'yicha mutaxassislar tayyorlashni boshlash

Tadqiqot natijalari O'zbekiston sanoati, qishloq xo'jaligi va kommunal xo'jaligi ob'ektlarida nasos agregatlarining ishonchligini oshirish va energiya samaradorligini yaxshilash uchun amaliy qo'llanma bo'lib xizmat qiladi. Kelajakda IoT, AI va Digital Twin texnologiyalarini integratsiya qilish orqali yanada yuqori darajadagi monitoring va bashoratli texnik xizmat ko'rsatish tizimlarini yaratish mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI

1. Adaika, J., Salman, A. M., & Alkayem, N. F. (2025). PumpSpectra: A motor current signature analysis-based framework for centrifugal pump system fault diagnosis. *Applied Sciences*, 15(2), 634. <https://doi.org/10.3390/app15020634>
2. Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C., & Capolino, G. A. (2008). Advances in diagnostic techniques for induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(12), 4109-4126. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2007527>
3. Benbouzid, M. E. H. (2000). A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(5), 984-993. <https://doi.org/10.1109/41.873206>
4. Bruinsma, J., Chandrasekar, A., & Palensky, P. (2024). A comprehensive labeled dataset for centrifugal pump condition monitoring. *Data in Brief*, 52, 109967. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109967>
5. Chen, X., Zhang, B., & Gao, D. (2021). Bearing fault diagnosis base on multi-scale CNN and LSTM model. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(4), 971-987. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01600-2>
6. Garcia-Perez, A., Romero-Troncoso, R. J., Cabal-Yepez, E., & Osornio-Rios, R. A. (2011). The application of high-resolution spectral analysis for

identifying multiple combined faults in induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(5), 2002-2010. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2051398>

7. Hoang, D. T., & Kang, H. J. (2023). A comprehensive review on condition monitoring and fault diagnosis of electric motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(2), 2500-2519. <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3228510>

8. Khan, S., & Yairi, T. (2018). A review on the application of deep learning in system health management. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 107, 241-265. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2017.11.024>

9. Kumar, R. R., Cirrincione, G., Cirrincione, M., Tortella, A., & Andriollo, M. (2022). Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using machine learning techniques: A review. *IEEE Access*, 10, 112174-112233. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3216826>

10. Lei, Y., Lin, J., He, Z., & Zuo, M. J. (2013). A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 35(1-2), 108-126. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.09.015>

11. Liu, R., Yang, B., Zio, E., & Chen, X. (2018). Artificial intelligence for fault diagnosis of rotating machinery: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 108, 33-47. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.02.016>

12. Nikula, R. P., Karimaghaloo, M., Lehtonen, A., Kuosmanen, P., & Makkonen, M. (2024). Predictive maintenance in the steel industry: A systematic review. *Computers in Industry*, 156, 104042. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.104042>

13. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 20-fevraldagi PQ-4208-sonli "Ayqiron-1" nasos stansiyasini rekonstruksiya qilish to‘g‘risida"gi Qarori. <https://lex.uz/docs/4206649>

14. Peng, Z. K., & Chu, F. L. (2004). Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: A review with bibliography. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 18(2), 199-221. [https://doi.org/10.1016/S0888-3270\(03\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0888-3270(03)00075-X)

15. Penman, J., Hadwick, M. N., & Jiang, S. (1994). Use of current monitoring for detection of induction motor faults. *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*, 141(3), 108-112. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19949842>

16. Prabhakar, S., Mohanty, A. R., & Sekhar, A. S. (2002). Application of discrete wavelet transform for detection of ball bearing race faults. *Tribology International*, 35(12), 793-800. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00063-4](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00063-4)
17. Randall, R. B., & Antoni, J. (2011). Rolling element bearing diagnostics - A tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(2), 485-520. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2010.07.017>
18. Safizadeh, M. S., & Latifi, S. K. (2020). Using multi-sensor data fusion for vibration fault diagnosis of rolling element bearings by accelerometer and load cell. *Measurement*, 164, 108073. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108073>
19. Tandon, N., & Choudhury, A. (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, 32(8), 469-480. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00077-8](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00077-8)
20. Thomson, W. T., & Fenger, M. (2001). Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Industry Applications Magazine*, 7(4), 26-34. <https://doi.org/10.1109/2943.930988>
21. Toma, R. N., Piltan, F., & Kim, J. M. (2021). A deep autoencoder-based convolution neural network framework for bearing fault classification in induction motors. *Sensors*, 21(24), 8453. <https://doi.org/10.3390/s21248453>
22. Wang, H., Liu, Z., Peng, D., & Qin, Y. (2022). Understanding and learning discriminant features based on multiattention 1DCNN for wheelset bearing fault diagnosis. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(8), 5275-5285. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3127536>
23. Yan, R., Gao, R. X., & Chen, X. (2014). Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications. *Signal Processing*, 96, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.04.015>
24. Zhang, Y., Zhou, T., Huang, X., Cao, L., & Zhou, Q. (2021). Fault diagnosis of rotating machinery based on recurrent neural networks. *Measurement*, 171, 108774. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108774>
25. Zhao, M., Zhong, S., Fu, X., Tang, B., & Pecht, M. (2020). Deep residual networks with adaptively parametric rectifier linear units for fault diagnosis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(3), 2587-2597. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2972458>