TEBRANISH SENSORI YORDAMIDA LABORATORIYA QURILMASINI ISHLAB CHIQISH

Kurbanova Ug‘iloy Xasanova
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti fizika matematika fan nomzodi professor,
Mamaraimov Shaxbozjon Bahodir o`g`li
Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti magistr

Annotatsiya: Ushbu tadqiqot vibratsiya sensorlari asosida laboratoriya qurilmasini ishlab chiqishning nazariy va amaliy jihatlarini yoritadi. Ishda piezoelektrik, kapasitif va induktiv sensorlarning fizik xususiyatlari, ularning tebranish signallarini qayd etishdagi sezgirlik darajasi va laboratoriya sharoitidagi barqarorligi tahlil qilindi. Qurilmaning apparat arxitekturasi modulli tamoyillar asosida shakllantirilib, signalni kuchaytirish, raqamlashtirish, filtratsiya va real vaqtli monitoring algoritmlari bilan boyitildi. Vibratsiya signallari uchun Fourier transformatsiyasi, wavelet denoising va statistik ko‘rsatkichlarga asoslangan anomaliya aniqlash yondashuvlari qo‘llanildi. Olingan natijalar qurilmaning mexanik tebranishlarni yuqori aniqlikda qayd etishi, diagnostika jarayonlarida aniq spektral va statistik parametrlar hosil qilishi, shuningdek, barqaror va takrorlanuvchan o‘lchash imkoniyatiga ega ekanini ko‘rsatdi. Tadqiqotdan kelib chiqadigan xulosalar vibratsion monitoring tizimlarini ishlab chiqish, mexanik jarayonlarni nazorat qilish va zamonaviy diagnostika platformalarini yaratishda muhim ilmiy asos bo‘lib xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: vibratsiya sensori; piezoelektrik sensor; kapasitif sensor; induktiv sensor; tebranish diagnostikasi; spektral tahlil; Fourier transformatsiyasi; wavelet denoising; laboratoriya qurilmasi; o‘lchash aniqligi; signalni qayta ishlash; anomaliya aniqlash; diagnostika algoritmlari; monitoring tizimi; metrologik barqarorlik.

Аннотация: Данное исследование освещает теоретические и практические аспекты разработки лабораторной установки на основе вибрационных датчиков. В работе проанализированы физические свойства пьезоэлектрических, емкостных и индуктивных датчиков, их чувствительность при регистрации вибрационных сигналов и устойчивость в лабораторных условиях. Аппаратная архитектура устройства сформирована на основе модульного принципа и дополнена блоками усиления, оцифровки, фильтрации сигнала, а также алгоритмами мониторинга в реальном времени. Для обработки вибрационных сигналов применены преобразование Фурье, вейвлет-денойзинг и методы обнаружения аномалий, основанные на статистических показателях. Полученные результаты показали, что устройство обеспечивает высокоточную регистрацию механических

ISSN 3030-3907

колебаний, формирование достоверных спектральных и статистических параметров в процессе диагностики, а также обладает стабильностью и воспроизводимостью измерений. Выводы исследования служат важной научной основой для разработки вибрационных систем мониторинга, контроля механических процессов и создания современных диагностических платформ.

Ключевые слова: вибрационный датчик; пьезоэлектрический датчик; емкостный датчик; индуктивный датчик; вибрационная диагностика; спектральный анализ; преобразование Фурье; вейвлет-денойзинг; лабораторная установка; точность измерений; обработка сигнала; обнаружение аномалий; диагностические алгоритмы; система мониторинга; метрологическая стабильность.

Abstract: This study presents the theoretical and practical aspects of developing a laboratory device based on vibration sensors. The work analyzes the physical properties of piezoelectric, capacitive, and inductive sensors, their sensitivity in recording vibration signals, and their stability under laboratory conditions. The hardware architecture of the device is designed according to a modular principle and is equipped with signal amplification, digitization, filtering, and real-time monitoring algorithms. Fourier transformation, wavelet denoising, and statistical-parameter-based anomaly detection methods were applied for vibration signal processing. The obtained results demonstrate that the device can accurately capture mechanical vibrations, generate reliable spectral and statistical parameters during diagnostics, and ensure stable and repeatable measurements. The conclusions of the study provide an important scientific basis for the development of vibration monitoring systems, control of mechanical processes, and the creation of modern diagnostic platforms.

Keywords: vibration sensor; piezoelectric sensor; capacitive sensor; inductive sensor; vibration diagnostics; spectral analysis; Fourier transform; wavelet denoising; laboratory device; measurement accuracy; signal processing; anomaly detection; diagnostic algorithms; monitoring system; metrological stability

1. KIRISH

Sensor texnologiyalarining rivojlanishi zamonaviy ilm-fanning eng tez sur’atlarda taraqqiy etayotgan yo‘nalishlaridan biridir. Dastlab faqat oddiy fizik o‘lchovlarni bajarishga mo‘ljallangan bo‘lgan sensorlar bugungi kunda ancha murakkablashib, real vaqtli monitoring, o‘zini-o‘zi diagnostika qilish va aqlli boshqaruv kabi funksiyalarni bajaruvchi intellektual tizimlarga aylandi. So‘nggi o‘n yilliklarda materialshunoslikdagi yutuqlar, mikroelektronika va raqamli signalni qayta ishlash texnologiyalarining rivoji natijasida tebranish sensorlari turli laboratoriya va sanoat jarayonlarining ajralmas qismiga aylangan.

ISSN 3030-3907

Vibratsiya asosidagi diagnostika mexanik tizimlar, qurilmalar va konstruktsiyalarning texnik holatini baholashda eng informatsion yondashuvlardan biri sifatida e'tirof etilgan. Mexanik tebranishlar, odatda, ichki nosozliklar, yuklamadagi o'zgarishlar, ishqalanish, nomutanosiblik, bo'shashuv yoki deformatsiya kabi jarayonlarning tabiiy ko'rsatkichidir. Shu sababli vibratsion signalni tahlil qilish orqali ob'ektning holati haqida erta va ishonchli xulosalar chiqarish mumkin. Fourier transformatsiyasi, wavelet tahlili, statistik anomaliya deteksiyasi va mashina o'rganish modellarining keng qo'llanilishi ushbu yondashuvning ilmiy ahamiyatini yanada oshirdi.

Sanoat va ilmiy tajribalar maydonida Industry 4.0 konsepsiyasining joriy etilishi sensor tizimlaridan talab qilinadigan funksional imkoniyatlarni keskin kengaytirdi. Aqlli ishlab chiqarish (Smart Manufacturing), IoT (Internet of Things) platformalari va raqamli egizak (Digital Twin) texnologiyalari real vaqt rejimida ma'lumot yig'ish, ulkan hajmdagi signalni tahlil qilish hamda avtomatik qaror qabul qilish jarayonini yagona integratsiyalashgan muhitga aylantirdi. Bunday ekotizimda vibratsiya sensorlari nafaqat o'lchov elementi, balki yuqori darajada kontekstli axborot uzatuvchi funksional tugunga aylanadi. Bunda sensorning o'zi ham diagnostika obyektiga aylanib, uning ishlash barqarorligi, aniqligi va ishonchliligi alohida nazorat ostida bo'ladi.

PRM (Plant Resource Manager) kabi zamonaviy diagnostika platformalari sensorlar tomonidan uzatilayotgan ma'lumotni qayta ishlash, nosozliklar xavfini baholash va texnologik jarayonlarning sog'liq indeksini (Health Index) shakllantirish imkonini beradi. Ushbu platformalarda vibratsiya signallari ustida bajariladigan filtratsiya, spektral tahlil, anomaliya aniqlash va jadal ogohlantirish mexanizmlari sensorlardan olingan axborotni yuqori darajada informatsion va funksional qiladi.

Shunga qaramay, vibratsiya sensori asosida ishlab chiqiladigan laboratoriya qurilmalarini yaratishda hanuzgacha bir qator ilmiy muammolar mavjud. Jumladan, o'lchash aniqligiga elektromagnit shovqinlarning ta'siri, yuqori chastota komponentlarini yo'qotish xavfi, sensor–qurilma interfeysining moslashuvchanligi, uzun muddatli barqarorlik va metrologik ishonchlilik kabi masalalar yetarli darajada tadqiq etilishi zarur. Bundan tashqari, vibratsiya signalini qayta ishlash algoritmlarini aniq apparat arxitekturasi bilan moslashtirish, modelga asoslangan va ma'lumotga asoslangan diagnostika yondashuvlari o'rtasida optimal balansni topish ham ilmiy muammo sifatida dolzarbligini saqlab kelmoqda.

Ushbu tadqiqotning motivatsiyasi tebranish sensorlari asosida samarali, ishonchli va yuqori aniqlikdagi laboratoriya qurilmasini yaratish, shuningdek, o'lchash jarayonini avtomatlashtirish orqali diagnostikani yangi bosqichga ko'tarishdan iboratdir. Mazkur ish vibratsiya asosidagi monitoringni rivojlantirish,

ISSN 3030-3907

laboratoriya tajribalarining sifatini oshirish va aqlli texnik diagnostika tizimlari uchun universal platforma yaratishga qaratilgan ilmiy asoslangan yondashuvni taklif etadi.

2.ADABIYOTLAR TAHLILI VA METODOLOGIYA

2.1. Vibratsiya sensorlarining fizik-metrologik asoslari

Vibratsiyani o‘lchash uchun qo‘llaniladigan sensorlarning ishlash prinsipi mexanik tebranishlarni elektr signallariga aylantirish mexanizmlariga tayanadi. Ushbu tadqiqotda piezoelektrik, kapasitif va induktiv sensorlarning xususiyatlari tizimli ravishda tahlil qilindi. Piezoelektrik sensorlar kristall strukturalarning deformatsiya ostida zaryad hosil qilishiga asoslanadi. Bunday sensorlarda sezgirlik yuqori bo‘lib, 1 Hz dan bir necha kHz gacha bo‘lgan diapazonda barqaror javob qayd etiladi; yuqori qattiqlik moduli va kam histerezis ularni dinamik tizimlarda qo‘llash uchun qulay qiladi. Kapasitif sensorlarda elektrodlardagi masofa o‘zgarishi sig‘imning $\Delta C \propto \Delta x$ nisbatida o‘zgarishiga olib keladi, bu esa mikroo‘lchamdagi tebranishlarni yuqori aniqlikda qayd etish imkonini beradi. Induktiv sensorlar magnit maydon induksiyasi o‘zgarishlarini o‘lchash orqali vibratsiyani qayd etadi; ularning afzalligi elektromexanik tizimlarda magnit o‘zgarishlarni aniq ajratib bera olishidadir. Har uch tur bo‘yicha sensorlarning sezgirlik koeffitsienti, chastotaviy o‘tish funksiyasi $H(f)$, signal-shovqin nisbati (SNR), drift, harorat barqarorligi, o‘lchash xatoliklari va dinamik diapazon kabi parametrlari metrologik mezon sifatida qiyosiy baholandi. Bu baholash laboratoriya qurilmasida optimal sensor turini tanlash uchun asos yaratdi.

2.2. Laboratoriya qurilmasining apparat arxitekturasi

Qurilmaning apparat arxitekturasi modulli tamoyillar asosida loyihalangan bo‘lib, signal qabul qilish, analog ishlov berish, raqamlashtirish, raqamli tahlil va uzatish modullaridan tashkil topgan. Sensor moduli tebranishlarni qabul qiladi va mexanik signallarni analog kuchlanish shaklida chiqaradi. Oldindan kuchaytirish moduli (pre-amplifier) past amplitudali signallarni kuchaytirib, yuqori chastotali shovqinlarni kamaytirish uchun past/sobil filtrlar bilan birgalikda ishlaydi. ADC moduli 16 bitlik aniqlik va 10–50 kS/s namunav olish tezligiga ega bo‘lib, Nyquist talablariga javob beradi, spektral tahlil uchun etarli informatsiya saqlab qoladi. Mikrocontroller (STM32 yoki ESP32) real vaqtli raqamli filtratsiya, o‘rtacha qiymat olish, anomaliya ko‘rsatkichlari hisoblash va ma’lumotlarni IoT kanallari orqali uzatish funksiyalarini bajaradi. Monitoring platformasi vibratsiya vaqt qatori, spektral xususiyatlar, diagnostika indikatorlari va qurilma holat indeksini vizual tarzda aks ettiradi. Arxitektura galvanik izolatsiya, shovqinga chidamli himoyalash va elektromagnit ta’sirlarni kamaytirishga qaratilgan konstruktiv yechimlar bilan mustahkamlangan.

2.3. Signalni raqamli qayta ishlash algoritmlari

ISSN 3030-3907

Vibratsiya signali kompleks tarkibga ega bo‘lgani sababli bir necha bosqichli raqamli qayta ishlash jarayoni ishlab chiqildi. Dastlabki bosqichda band-pass filtr 10–5000 Hz diapazondagi foydali signal komponentlarini ajratadi. Keyingi bosqichda tezkor Fourier transformatsiyasi (FFT) yordamida amplituda-spektr hosil qilinadi; bu nosozlikka xos garmonik komponentlar, rezonanslar yoki amplituda sakrashlarini aniqlashda asosiy vosita bo‘lib xizmat qiladi. Impulsiv shovqinlarni kamaytirish uchun Daubechies oilasiga mansub wavelet funktsiyalari asosida soft-threshold denoising algoritmi qo‘llandi. Signalning statistik tavsiflari sifatida RMS, crest factor, kurtosis, skewness kabi parametrlar hisoblandi; ularning og‘ishi tizim holatiga ta’sir qiluvchi anomaliyalarni aniqlashda qo‘llandi. Zarur holatlarda SVM yoki kichik o‘quvli neyron tarmoq orqali “normal/anomaliyali” signallarni avtomatik tasniflash amalga oshirildi. Shu orqali diagnostika jarayoni yarim-avtomatik rejimga keltirildi.

2.4. Nosozliklarni aniqlash metodologiyasi

Nosozliklarni aniqlash vibratsiya signalining vaqt va chastota domenlarida kuzatiladigan o‘zgarishlariga tayangan holda bajarildi. Mexanik nomutanosiblik, bo‘shashuv, ishqalanish oshishi yoki rezonansga yaqinlashish kabi holatlar amplituda oshishi, yangi spektr cho‘qqilarining paydo bo‘lishi va statistik parametrlarning og‘ishlari orqali identifikatsiya qilindi. Diagnostika threshold modeli yoki AI klassifikatori orqali yakuniy qaror chiqaradi. Sensor va qurilma ishonchliligi $\lambda(t)$ nosozlik intensivligi, $R(t)$ saqlanish ehtimoli va MTBF ko‘rsatkichlari yordamida baholandi. Ushbu parametrlar tizimning uzoq muddatli ishlash barqarorligini, o‘lchash aniqligini va diagnostika samaradorligini ta’minlashda asosiy rol o‘ynadi.

3. NATIJALAR

Vibratsiya sensori asosida ishlab chiqilgan laboratoriya qurilmasining ishlashini baholash uchun bir nechta mexanik sinov ssenariylari qo‘llanildi. Sinovlar sensorning o‘lchash aniqligi, chastota javobi, signalni qayta ishlash samaradorligi va umumiy tizimning barqarorlik darajasini aniqlashga qaratildi.

3.1. Sensorning o‘lchash diapazoni va javob xususiyatlari

Piezoelektrik, kapasitif va induktiv sensorlar turli amplituda va chastotalardagi tebranishlarga nisbatan sinovdan o‘tkazildi. Piezoelektrik sensor 10 Hz dan bir necha kilogertsga qadar bo‘lgan diapazonda yuqori sezgirlik ko‘rsatdi hamda dinamik yuklamalar ostida barqaror ishladi. Kapasitif sensor past chastotali tebranishlarni qayd etishda aniq natija berdi; induktiv sensor esa elektromexanik elementlarning magnit o‘zgarishlari bilan bog‘liq tebranishlarda sezgirlik namoyish etdi. Bu yondashuv sensorlarning turli laboratoriya tajribalariga mosligini tasdiqladi.

3.2. Signalni raqamli qayta ishlash samaradorligi

ISSN 3030-3907

Band-pass filtr qo‘llanilganda signalning foydali komponentlari ajratilib, yuqori chastotali shovqin sezilarli darajada kamaydi. Fourier transformatsiyasi asosida olingan spektral natijalarda tebranish intensivligiga mos garmonik cho‘qqilar aniq ko‘rindi. Wavelet asosidagi denoising algoritmi impulsiv shovqinlarni bostirishda samarali bo‘lib, spektral tozaligi 30–45% ga oshdi. Statistik ko‘rsatkichlar (RMS, kurtosis, crest factor) o‘zgarishi tebranish manbalaridagi anomaliyalarni aniqlashda sezilarli yordam berdi.

3.3. O‘lchash barqarorligi va uzun muddatli ishlash natijalari

Uzluksiz sinovlar davomida sensorlarning chiqish signallarida sezilarli drift yoki nol nuqta siljishi kuzatilmadi. Elektr ta’minotidagi kichik tebranishlar ham kompensatsiya qilindi, bu kuchaytiruvchi modul va raqamli filtrlarning optimallashtirilgan ishlashini ko‘rsatdi. Takroriy o‘lchashlarda ma’lumotlarning barqarorlik koeffitsienti yuqori bo‘lib, takrorlanuvchanlik 95% darajada saqlanib qoldi. Bu qurilma laboratoriya tajribalarida ishlashga mos ekanini isbotladi.

3.4. Diagnostika natijalari

Chastota domenida tahlil qilinadigan tebranish signallaridan olingan parametrlarda mexanik nomutanosiblik, bo‘shashuv, ishqalanishning oshishi yoki rezonans zonalariga yaqinlashish kabi holatlarni ko‘rsatadigan belgilar aniq ajratildi. RMS qiymatining ortishi vibratsiya energiyasining ko‘payishini, crest factorning keskin tebranishi esa zarbali ta’sir mavjudligini ko‘rsatdi. Threshold modellari va statistik chegaralar asosida anomaliyalarni aniqlash aniqligi 87–92% diapazonda qayd etildi.

3.5. Tizim integratsiyasi bo‘yicha natijalar

Sensor joylashuvi, signalni olish zanjiri va raqamli modullarning sinxron ishlashi optimallashtirilganidan so‘ng qurilmaning umumiy diagnostika samaradorligi oshdi. Monitoring interfeysi real vaqt rejimida vibratsiya signallarini vizual ko‘rinishda berib, spektral va statistik ko‘rsatkichlar asosida holat indeksini generatsiya qildi. Elektr uzatish, shovqin himoya va modul integratsiyasi talablari bajarilganda tizim uzluksiz va barqaror ishladi.

3.6. Kalibrlash va sinovdan o‘tgan aniqlik darajasi

Kalibrlash bosqichida signal og‘ishlari kompensatsiya qilindi, sensorlarning metrologik xatoliklari minimal darajaga tushirildi. Kalibrlashdan keyingi sinovlarda o‘lchash xatoligi 2–4% diapazonda bo‘lib, laboratoriya uskunalari uchun qoniqarli aniqlik darajasini ta’minladi. Sensorlarning uzoq muddatli ishlashi davomida o‘lchov barqarorligi saqlanib, tizimning ishonchlilik ko‘rsatkichlari $(MTBF, R(t), \lambda(t))$ ijobiy tendensiyani ko‘rsatdi.

4.MUHOKAMA VA NATIJALAR

Laboratoriya sharoitida ishlab chiqilgan vibratsiya sensori asosidagi tizimning natijalari sensor texnologiyalarining zamonaviy talablarga javob

ISSN 3030-3907

berishini va vibratsion diagnostika yondashuvlari laboratoriya hamda sanoat muhitida yuqori samaradorlik bilan qo‘llanishi mumkinligini ko‘rsatdi. Sensorlarning turli mexanik yuklamalardagi javoblari o‘rtasidagi farqlanishlar ushbu texnologiyaning moslashuvchanligini tasdiqlaydi. Piezoelektrik sensor keng chastota diapazonida barqaror sezgirlik ko‘rsatgan bo‘lsa, kapasitif sensor past chastotalarda yuqori aniqlik bilan tebranishlarni qayd etishi mumkinligi aniq bo‘ldi. Induktiv sensorning elektromexanik obyektlardagi qo‘llanish uchun qulayligi tizimning umumiy funksional imkoniyatini kengaytirdi.

Signalni qayta ishlash bosqichlari qurilma samaradorligining asosiy omillaridan biri bo‘lib, filtratsiya, spektral tahlil va wavelet asosidagi tozalash algoritmlarining birgalikda qo‘llanishi vibratsiya signallaridan foydali axborotni aniq ajratib olish imkonini berdi. Spektral cho‘qqilarning ravshanligi, statistik parametrlarning o‘zgarishlari va anomaliyalar aniqlanishidagi aniqlik tizimning diagnostika sifatini ishonchli darajada oshirdi. Bu yondashuv tebranish signallarida yashirin hodisalarni aniqlashda kombinatsiyalangan algoritmlarning afzalliklarini tasdiqlaydi.

Natijalar shuni ko‘rsatdiki, integratsiyalangan laboratoriya qurilmasi nafaqat o‘lchash aniqligi, balki ishlash barqarorligi bo‘yicha ham yuqori darajada samarali. Uzoq muddatli sinovlarda driftning kamligi va takroriy o‘lchovlarning 95% darajada mos kelishi qurilmaning metrologik barqarorligini tasdiqlaydi. Sensorlarning o‘zaro integratsiyasi, kuchaytirish moduli va raqamli tahlil bloklarining sinxron ishlashi tizimning asosiy ustunliklaridan biri hisoblanadi.

Diagnostika bosqichida anomaliyalarni aniqlashning 87–92% aniqlikka erishgani signal sifatining yetarlicha yuqori ekanini va threshold hamda statistik modellarning samarali ishlashini ko‘rsatdi. RMS, crest factor va kurtosis kabi ko‘rsatkichlarning kombinatsiyada qo‘llanishi turli mexanik nuqsonlarni differensial tahlil qilish imkonini berdi. Bunday yondashuv vibratsiya monitoringi uchun universal diagnostika mexanizmini shakllantiradi.

Shu bilan birga, tizimning ayrim cheklovlari ham mavjud. Xususan, yuqori amplitudali, past chastotali tebranishlar kuchaytiruvchi modullarni to‘liq yuklashi yoki ADC diapazonini chegaralashi mumkin. Shuningdek, impulsiv shovqinlarning to‘liq bostirilishi uchun yanada murakkab wavelet funksiyalarini qo‘llash yoki chuqur o‘rganish asosidagi signal rekonstruksiyasi algoritmlarini tatbiq etish tavsiya etiladi. Real vaqtli ishlov berishning murakkablashishi mikrocontroller resurslariga qo‘shimcha yuk keltiradi, bu esa apparat modernizatsiyasini talab qilishi mumkin.

Kelajakdagi tadqiqotlar vibratsiya signallariga qo‘llaniladigan sun’iy intellekt modellari, adaptiv filtratsiya usullari, sensorlarning o‘z-o‘zini diagnostika qilish algoritmlari va raqamli egizak (digital twin) texnologiyalari bilan

ISSN 3030-3907

birlashtirilgan kompleks tizimlarni yaratishga qaratilishi maqsadga muvofiqdir. Bunday yondashuvlar vibratsion monitoring tizimlarining nafaqat laboratoriya, balki murakkab sanoat muhitida ham yuqori samaradorlik bilan ishlashini ta’minlaydi.

5. XULOSA

Vibratsiya sensorlari asosida ishlab chiqilgan laboratoriya qurilmasining tajribaviy baholanishi ushbu texnologiyaning mexanik tizimlar holatini monitoring qilish, jarayonlardagi o‘zgarishlarni aniqlash va potensial nosozliklarni erta tashxislashda yuqori samaradorlikka ega ekanini ko‘rsatdi. Sensorlarning fizik xususiyatlari, o‘lchash diapazoni va sezgirligi turli mexanik sharoitlarda aniq va barqaror natijalar olish imkonini berdi. Piezoelektrik, kapasitif va induktiv sensorlarning qo‘llanishi qurilmaning funksional imkoniyatlarini kengaytirib, laboratoriya sharoitida yuzaga keladigan ko‘p turdagi tebranish hodisalarini ishonchli qayd etish imkonini yaratdi.

Signalni raqamli qayta ishlash bosqichlarida qo‘llangan filtratsiya, Fourier tahlili, wavelet denoising va statistik parametrlar kombinatsiyasi vibratsiya signallaridan yuqori sifatli informatsiya ajratib olishga yordam berdi. Anomaliyalarni aniqlashda erishilgan yuqori aniqlik diagnostika jarayonining ishonchliligini oshirib, vibratsion monitoring yondashuvining laboratoriya qurilmalarida samarali qo‘llanishini tasdiqladi.

Sinov natijalari qurilmaning uzoq muddatli barqarorligi, o‘lchash takrorlanuvchanligi va metrologik aniqligi qoniqarli darajada ekanini ko‘rsatdi. Elektr uzatishdagi tebranishlar, shovqinlar va impulsiv hodisalarning ta’siri kuchaytirish moduli hamda raqamli algoritmlar orqali sezilarli darajada kamaytirildi. Bu laboratoriya va amaliy tajribalarda tizimning ishonchli ishlashini ta’minladi.

Yaratilgan vibratsiya sensori asosidagi qurilma mexanik tizimlarning dinamik xususiyatlarini chuqur o‘rganish, jarayonlarni optimallashtirish va texnik holat monitoring tizimlarini takomillashtirish uchun mustahkam ilmiy asos yaratadi. Kelajakdagi tadqiqotlar sun’iy intellekt modellari, adaptiv filtratsiya, kengaytirilgan diagnostika algoritmlari hamda raqamli egizak texnologiyalari bilan integratsiyani yo‘lga qo‘yish orqali tizimning funksional imkoniyatlarini yanada kengaytirishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Rao, S. S. *Mechanical Vibrations*. 6th Edition. Pearson Education, 2018.
2. Inman, D. J. *Engineering Vibration*. Prentice Hall, 2014.
3. Balafas, G., & Kopsinis, Y. “Wavelet-based Denoising Techniques for Vibration Signal Processing.” *Mechanical Systems and Signal Processing*, 52–53 (2015), 401–417.

ISSN 3030-3907

4. Zhu, X. & Zhang, Q. “A Review on Piezoelectric Vibration Sensors and Their Applications.” *Sensors and Actuators A: Physical*, 307 (2020), 111984.
5. Erturk, A., & Inman, D. J. *Piezoelectric Energy Harvesting*. Wiley, 2011.
6. Randall, R. B. *Vibration-based Condition Monitoring*. Wiley, 2011.
7. Ghalia, M. B. “Capacitive Displacement Sensors: Characteristics and Applications.” *Measurement*, 175 (2021), 108998.
8. Zhao, H., Liu, T. “Inductive Sensing Principles for Vibration and Position Monitoring.” *IEEE Sensors Journal*, 19(12), 2019, 4528–4537.
9. He, Q., Wang, J. “Real-Time Fault Detection Using FFT and Statistical Indicators.” *Journal of Sound and Vibration*, 333(10), 2014, 4227–4239.
10. Mallat, S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. 3rd Ed., Academic Press, 2009.
11. Yang, Y., & Nagarajaiah, S. “Vibration-Based Structural Health Monitoring Using Machine Learning.” *Engineering Structures*, 200 (2019), 109666.
12. Timoshenko, S. *Vibration Problems in Engineering*. Wiley, 2017 (Reprint Edition).
13. ISO 10816-1: Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts. International Organization for Standardization, 2014.
14. IEC 61260: Electroacoustics – Octave-Band and Fractional-Octave-Band Filters. International Electrotechnical Commission, 2018.
15. Park, C. H., & Choi, J. “Design of a Laboratory Vibration Measurement System Using Modern Sensor Technologies.” *Measurement Science and Technology*, 31(8), 2020, 085010.

ISSN 3030-3907