TISHLI QUTILI PAXTA TOZALASH MASHINASINING HOLATINI BASHORATLI KUZATUV UCHUN FIZIKAGA ASOSLANGAN GIBRID MODELLASHTIRISH

Abdulazizov Baxrom Toshmirza o'g'li[1]
Baymatov Paziljon Jamoldinovich[1]
Inoyatov Shukurillo Turg'unboyevich[2]
Sharibayev Nosir Yusupjanovich[3]
Jarin Anatoliy Lavrentievich[4]
[1]Namangan Davlat Universiteti
[2]Namangan Davlat pedagogika instituti
[3]Namangan Davlat Texnika Universiteti
[4]Belarussiya Milliy Texnika Universiteti

Abstrakt. *Aylanma mexanizmlarning ishonchliligi sanoat samaradorligining asosiy tayanchi sifatida qolmoqda, ayniqsa paxta tozalash korxonalarida, bu yerda paxta tozalash mashinalari o'zgaruvchan mexanik yuklamalar ostida faoliyat yuritadi. Transmissiyadagi kutilmagan nosozliklar ishlab chiqarishdagi jiddiy zararlar va energiya sarfini oshirishga sabab bo'lishi mumkin. Ushbu ishda 75 kVt quvvatli asinxron motor bilan ishlaydigan tishli qutili paxta tozalash mashinasining holatini bashoratli monitoring qilish uchun fizik tamoyillarga asoslangan gibrid model taklif etiladi.*

Kalit so'zlar: *bashoratli texnik xizmat ko'rsatish, gibrid modellashtirish, tebranish diagnostikasi, vites qutisi dinamikasi, Kalman filtri, holatni kuzatish, paxta tozalash mashinasi, sanoat tahlili.*

ГИБРИДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ФИЗИКИ ДЛЯ ПРОГНОЗНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РЕДУКТОРНОЙ ХЛОПКОВОЛОНКИ

Аннотация. *Надежность вращающихся механизмов остается ключевым фактором эффективности промышленного производства, особенно на хлопкоочистительных заводах, где хлопкоочистительные машины работают под переменными механическими нагрузками. Непредвиденные отказы трансмиссии могут привести к значительным производственным потерям и увеличению энергопотребления. В данной статье предлагается гибридная модель, основанная на физических принципах, для прогнозирующего мониторинга состояния редукторной хлопкоочистительной машины, работающей от асинхронного двигателя мощностью 75 кВт.*

Ключевые слова: *прогнозирующее техническое обслуживание, гибридное моделирование, вибрационная диагностика, динамика редуктора, фильтр Калмана, мониторинг состояния, хлопкоочистительная машина, промышленная аналитика.*

PHYSICS-BASED HYBRID MODELING FOR PREDICTIVE MONITORING OF THE CONDITION OF A GEARBOX COTTON GRINDER

Abstract. *The reliability of rotating machinery remains a key pillar of industrial efficiency, especially in cotton ginning plants, where ginning machines operate under variable mechanical loads. Unexpected transmission failures can cause significant production losses and increased energy consumption. This paper proposes a hybrid model based on physical principles for predictive monitoring of the condition of a geared cotton ginning machine powered by a 75 kW asynchronous motor.*

Keywords: *predictive maintenance, hybrid modeling, vibration diagnostics, gearbox dynamics, Kalman filter, condition monitoring, cotton ginning machine, industrial analytics.*

KIRISH

Sanoat raqobatbardoshligi tobora ko'proq aylanuvchi mashinalarning ishonchliligiga bog'liq. Paxtani qayta ishlash zavodlarida jin mashinalari tola ajratish va o'tkazish qobiliyatining barqarorligi uchun mas'ul bo'lgan muhim aktivlarni ifodalaydi. Ularning ishlashi elektr drayvlar, mexanik uzatmalar va o'zgaruvchan material yuklari o'rtasidagi murakkab o'zaro ta'sirlarni o'z ichiga oladi. Bu o'zaro ta'sirlar an'anaviy monitoring usullari qo'llanilganda nosozliklarni aniqlashni murakkablashtiradigan chiziqli bo'lmagan dinamik xatti-harakatlarni keltirib chiqaradi.[6]

Profilaktik texnik xizmat ko'rsatish strategiyalari — an'anaviy ravishda belgilangan xizmat ko'rsatish oraliqlariga asoslangan — stoxastik degradatsiya jarayonlarini hisobga olmaydi. Natijada, zamonaviy ishlab chiqarish paradigmalari uzluksiz sensorlar va ilg'or tahlillar tomonidan qo'llab-quvvatlanadigan bashoratli texnik xizmat ko'rsatishga urg'u beradi.

Vibratsiyaga asoslangan diagnostika uzoq vaqtdan beri nomutanosiblik, valning noto'g'ri joylashishi, bo'shashish va podshipnik nuqsonlari kabi strukturaviy anomaliyalarni aniqlashning eng informatsion usullaridan biri sifatida tan olingan. Biroq, tebranish signallarining o'zi transmissiya kuchlanishining tarqalishini to'liq aniqlay olmaydi. Tensiometrik o'lchovlar uzatiladigan kuchlarni to'g'ridan-to'g'ri miqdorini aniqlash orqali qo'shimcha tushuncha beradi va shu bilan ortiqcha yuklanish holatlarini oldindan aniqlash imkonini beradi.[14]

Sanoat sensorlaridagi yutuqlarga qaramay, xom signalni olish va fizik jihatdan talqin qilinadigan sog'liq ko'rsatkichlari o'rtasida jiddiy tafovut saqlanib qolmoqda. Sof ma'lumotlarga asoslangan modellar ko'pincha umumlashtirilmaydi, sof nazariy modellar esa real dunyodagi noaniqlik bilan kurashadi. Shuning uchun yaqinda o'tkazilgan tadqiqotlar birinchi tamoyillar fizikasini statistik o'rganish bilan birlashtiradigan gibrid yondashuvlarni qo'llab-quvvatlaydi.

Ushbu tadqiqotda regulyatorli val tezligiga (730–750 rpm) ega bo'lgan reduktorli jin mashinasi uchun shunday gibrid tizim ishlab chiqilmoqda. Asosiy hissalar quyidagilar:

- Transmissiya dinamikasini tavsiflovchi chiziqli bo'lmagan elektromexanik modelni shakllantirish,
- strukturaviy sanoat signallari ma'lumotlar bazasini yaratish,
- fizikaga asoslangan sog'liqni saqlash ko'rsatkichini ishlab chiqish,
- yashirin holatni baholash uchun Kalman filtrlash usulini qo'llash,
- nazorat ostidagi anomaliya in'ektsiyasi orqali tasdiqlash.

Deterministik mexanikani ehtimollik xulosasi bilan birlashtirish orqali ish og'ir yuk ko'taradigan to'qimachilik mashinalari uchun bashoratli diagnostikani rivojlantiradi.

ADABIYOTLAR SHARHI

Aylanuvchi mashinalarning holatini monitoring qilish so'nggi uch o'n yillikda sezilarli darajada rivojlandi. Dastlabki tadqiqotlar asosan spektral tebranish tahliliga qaratilgan bo'lib, unda xarakterli chastota cho'qqilari ma'lum mexanik nosozliklar bilan bog'liq edi. Samarali bo'lishiga qaramay, chastota sohasi texnikalari ko'pincha mutaxassislarning talqinini talab qiladi va statsionar bo'lmagan yuklar ostida qiyinchiliklarga duch kelishi mumkin.

So'nggi tadqiqotlar modelga asoslangan diagnostikaga urg'u beradi. Lei va boshqalar (2018) o'quv ma'lumotlari cheklangan bo'lsa, fizikaga asoslangan ko'rsatkichlar qora quti neyron tarmoqlaridan sezilarli darajada ustun ekanligini ko'rsatdilar. Jardine va boshqalar bashoratli texnik xizmat ko'rsatishning iqtisodiy foydalarini ta'kidlab, ishlamay qolish vaqtini 30% gacha kamaytirishni taxmin qilishdi.[7]

Tishli g'ildiraklar bilan boshqariladigan tizimlar orqaga burilish, vaqt o'zgarishi bilan o'zgaradigan to'rning qattiqligi va ishqalanishli qizdirish tufayli qo'shimcha modellashtirish murakkabligini keltirib chiqaradi. Shuning uchun chiziqli bo'lmagan holat-fazoviy tasvirlar, ayniqsa Kalman filtri kabi rekursiv baholashlar bilan birlashtirilganda mashhurlikka erishdi.

Gibrid modellashtirish — regressiya yoki mashina o‘rganishi fizik qonunlar bilan cheklangan — talqin qilish va bashorat qilish kuchi o‘rtasidagi mustahkam murosaga aylangan. Biroq, paxtani qayta ishlash mashinalarida qo‘llanilishi kamligicha qolmoqda, bu esa ushbu tadqiqotni rag‘batlantiradi.[4]

Tizim arxitekturasi va ma'lumotlarni yig'ish

Tekshirilgan jin mashinasi 75 kVt quvvatga ega uch fazali asenkron motor bilan ishlaydi. Reduktorli reduktor deyarli doimiy aylanish tezligini saqlab turganda chiqish momentini oshiradi. Tezlikni barqarorlashtirish tolani qayta ishlashning izchilligini yaxshilasa-da, agar monitoring faqat rpm o'lchovlariga tayansa, bu erta mexanik nosozliklarni yashirishi mumkin.

Signalni olish bir daqiqalik aniqlikda modellashtirildi va yetti kun davomida 10 080 ta sinxronlashtirilgan kuzatuvlar yaratildi. Yozib olingan o'zgaruvchilar quyidagilarni o'z ichiga oladi:

- burchak tezligi ω(t),
- stator oqimi I(t),
- faol quvvat P(t),
- yuk koeffitsienti KL(t),
- Kamar tarangligi Ft(t),
- tebranish tezligi V(t),
- yotoq harorati Tb(t),
- Paxtani oziqlantirish tezligi q(t).

Nazorat ostidagi anomaliyalar realistik sanoat buzilishlarini ifodalash uchun tasodifiy ravishda kiritildi. Bu hodisalar tebranish amplitudalarining ko'tarilishiga, issiqlik o'sishiga va momentning keskin oshishiga olib keldi.

Olingan ma'lumotlar bazasi mashina xatti-harakatlarining raqamli egizaklarga o'xshash tasvirini hosil qiladi.[10]

4. Chiziqli bo'lmagan elektromexanik modellashtirish

$$P(t) = \sqrt{3}UI(t)\cos\,\varphi\eta$$

Dvigatel yuklanishi quyidagicha aniqlanadi:

$$K_L(t) = \frac{P(t)}{P_{\text{rated}}}$$

0,85 dan yuqori qiymatlar odatda termal stress xavfini ko'rsatadi. Transmissiya quyidagilarga bo'ysunadi:

$$J\dot{\omega} = M_e - M_r - B\omega - M_f$$

bu yerda Kulon ishqalanishini ifodalaydi. Elektromagnit moment:M_f

$$M_e = \frac{P}{\omega}$$

Qarshilik momenti besleme tezligiga nisbatan chiziqli bo'lmagan sifatida modellashtirilgan:

$$M_r = k_1 q + k_2 q^2$$

Bu kvadratik bog'liqlik yuqori o'tkazuvchanlikda tola siqilishining ortishini aks ettiradi. Vaqt o'tishi bilan o'zgarib turadigan to'r qattiqligi quyidagicha taxmin qilinadi:

$$k(t) = k_0 + k_m \sin\,(\omega_m t)$$

rezonans sharoitida tebranishni kuchaytirishi mumkin bo'lgan parametrik qo'zg'alishni joriy etish.

Transmissiya majburiy osilator sifatida ko'rib chiqiladi:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 + F_d(t)$$

Tebranish energiyasi:

$$E_v = \frac{1}{2} m V_{RMS}^2$$

Termal evolyutsiya:

$$C\dot{T}_b = \gamma M\omega - h(T_b - T_{env})$$

ishqalanishli isitish mexanik quvvat yo'qotilishi bilan kengayishini namoyish etadi. O'lchov shovqinini bartaraf etish uchun tizim quyidagicha ifodalanadi:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k$$
$$y_k = Cx_k + v_k$$

bu yerda va Gauss buzilishlari. Rekursiv bashorat:$w_k v_k$

$$\hat{x}_{k|k-1} = A\hat{x}_{k-1|k-1} + Bu_k$$

Kalman daromadi:

$$K_k = P_{k|k-1}C^T(CP_{k|k-1}C^T + R)^{-1}$$

Filtr signal dispersiyasini taxminan ga kamaytirdi va bu anomaliyani ajratishni yaxshiladi.$18 - 25\%$

Kompozit indikator joriy etiladi:

$$HSI = w_1\frac{V}{V_{lim}} + w_2\frac{T_b}{T_{lim}} + w_3\frac{M}{M_{lim}}$$

Chegara talqini:

- HSI < 0.7- nominal
- 0.7-1.0 - degradatsiya boshlanishi
- 1.0-kritik holat

Ushbu metrika ko'p domenli fizikani bitta diagnostik skalyarga birlashtiradi.

$$V = \beta_0 + \beta_1 M + \beta_2 F_t + \beta_3 T_b + \beta_4 K_L + \epsilon$$

Harorat va moment dominant bashorat qiluvchi omillar sifatida paydo bo'ldi ( ).Model aniqligi:p < 0.01

$$R^2 \approx 0.81$$

kuchli tushuntirish qobiliyatidan dalolat beradi.

NATIJALAR

Nominal rejim:

- Tezlik≈ 740rpm
- Yuk:$65 - 80\%$
- Tebranish< 4 mm/s

Anomal rejim:

- Tebranish> 7 mm/s
- Harorat≈ 100°C
- Vibratsiyaning o'sishidan oldin momentning keskin ko'tarilishi kuzatildi

Shunisi e'tiborga loyiqki, momentning oshishi kritik tebranishdan oldin sodir bo'lgan, ↓~12-18 daqiqa - bu qimmatli bashorat oynasi.

Taklif qilinayotgan gibrid monitoring tizimining talqin qilinishini yaxshilash uchun jin mashinasining elektromexanik xatti-harakati va degradatsiya naqshlarini vizualizatsiya qilish uchun bir nechta grafik tahlillar ishlab chiqildi.

1-rasm yetti kunlik kuzatuv davrida valning aylanish tezligining vaqtinchalik evolyutsiyasini ko'rsatadi. Paxtani oziqlantirish tezligining o'zgarishi natijasida yuzaga kelgan stoxastik yuk o'zgarishlariga qaramay, vites qutisi tezlikni 730–750 rpm tor diapazonda saqlab qoldi.

Katta og'ishlarning yo'qligi burchak tezligini barqarorlashtirishda reduktor uzatishning samaradorligini tasdiqlaydi. Biroq, bu shuningdek, tishli tizimlarda tezlikning o'zi yetarlicha sezgir diagnostika parametri emasligini ko'rsatadi, chunki muhim nosozliklar rpmlarda sezilarli o'zgarishlarsiz paydo bo'ldi.

1-rasm.O'zgaruvchan sanoat yuk sharoitida yuqori aylanish barqarorligini namoyish etuvchi vites qutisi tomonidan boshqariladigan val tezligining vaqt ketma-ketligi profili.

2-rasmfaol quvvat va dvigatel yuk koeffitsienti o'rtasidagi bog'liqlikni ko'rsatadi. Nominal sharoitlarda mashina nominal quvvatning 65–80% doirasida ishladi, bu esa energiya tejamkorligini ko'rsatadi.

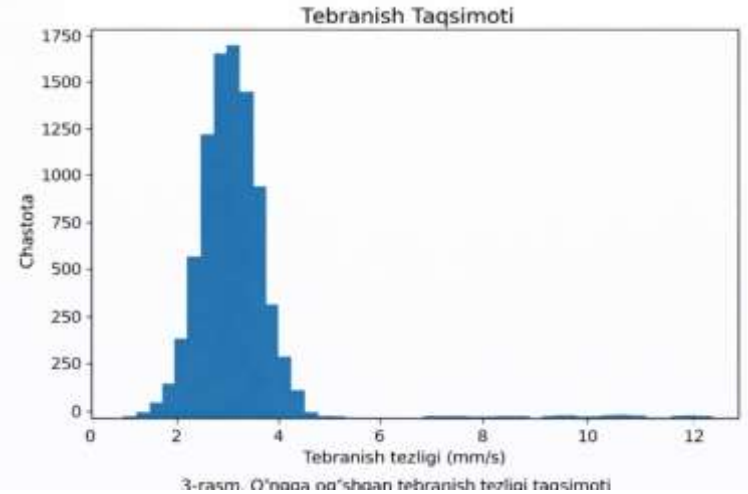
Qisqa muddatli ortiqcha yuklanish mintaqalari aniq ajralib turadi va in'ektsiya qilingan anomaliya oynalari bilan mos keladi. Bu cho'qqilar qarshilik momenti va elektr talabi o'rtasidagi chiziqli bo'lmagan bog'liqlikni ko'rsatadi.

Muhandislik nuqtai nazaridan, takroriy ortiqcha yuklanish sikllari izolyatsiyaning degradatsiyasini tezlashtirishi va hayot aylanishi xarajatlarini oshirishi mumkin.

2-rasm. Momentning kuchayishi bilan bog'liq bo'lgan vaqtinchalik ortiqcha yuklanish rejimlarini ta'kidlaydigan faol quvvat va yuk koeffitsienti tendentsiyalari.

3-rasmda ko'rsatilgan tebranish tezligi gistogrammasi o'ngga burilgan taqsimotni ko'rsatadi. Ko'pgina kuzatuvlar 4 mm/s dan past bo'lib qolmoqda, bu o'rta quvvatli aylanadigan mashinalar uchun ISO tebranish darajasi bo'yicha ko'rsatmalarga mos keladi.

Ikkilamchi dum 7 mm/s dan oshib ketadi, bu simulyatsiya qilingan nosozlik holatlariga mos keladi. Bu ajratish tebranish RMS sog'lom va buzilgan ishlash o'rtasidagi samarali farqlovchi ekanligini ko'rsatadi.

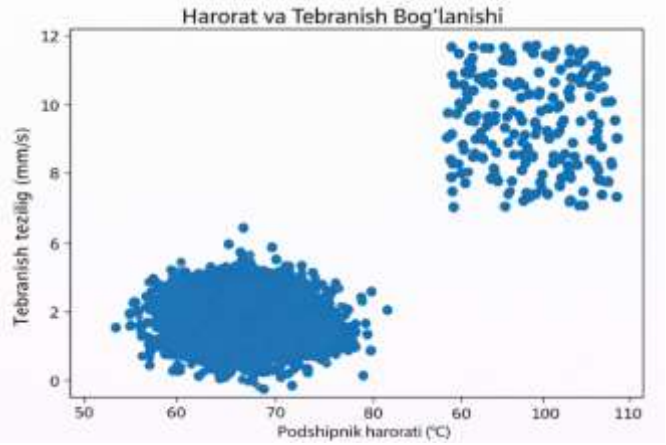


3-rasm. Nominal va anomal rejimlar o'rtasida aniq ajratilishini ko'rsatuvchi tebranish tezligining statistik taqsimoti.

4-rasmtebranish amplitudasi bilan birga rulman haroratining o'zgarishini tasvirlaydi. Kuchli termo-mexanik bog'lanish kuzatilishi mumkin: harorat ko'tarilishi qisqa vaqt kechikishi bilan tebranish energiyasining ortishiga ergashadi.

Bu xatti-harakatlar erta nuqson shakllanishi paytida ishqalanish yo'qotishlarining kuchayishi haqidagi gipotezani qo'llab-quvvatlaydi.

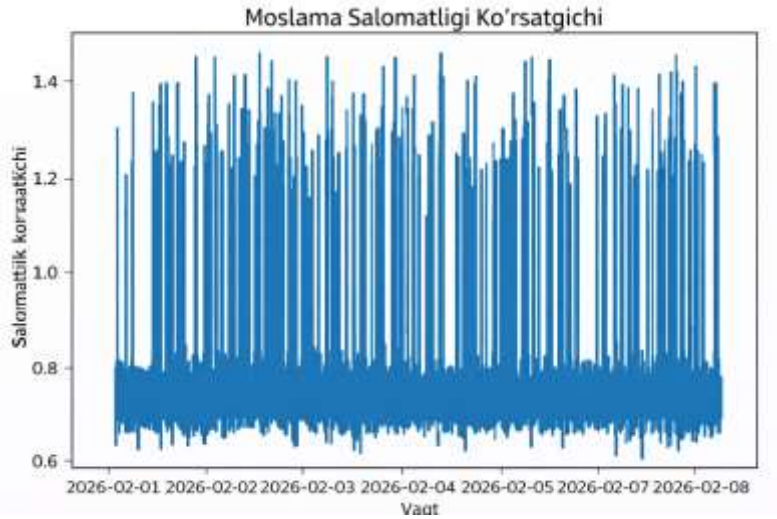
Amalda, haroratni kuzatish asosiy signal signali o'rniga tasdiqlovchi dalillarni taqdim etadi, chunki termal inertiya javobni kechiktiradi.



4-rasm. Parchalanish boshlanishida ishqalanish natijasida hosil bo'lgan issiqlik o'sishini ko'rsatadigan tebranish-harorat dinamikasi bilan bog'liq.

Uzatilgan moment va tebranish tezligi o'rtasidagi tarqoq korrelyatsiya grafigi 5-rasmda keltirilgan. Deyarli chiziqli trend regressiya topilmalarini tasdiqlaydi va momentni strukturaviy qo'zg'alishning oldingi omili sifatida tasdiqlaydi.

Muhimi, tebranish ko'tarilishlaridan oldin bir nechta yuqori moment nuqtalari paydo bo'ladi, bu esa proaktiv texnik xizmat ko'rsatish aralashuvlari uchun mos keladigan bashoratli oynani ko'rsatadi.



5-rasm. Uzatilgan moment va tebranish tezligi o'rtasidagi o'zaro bog'liqlik momentning ko'tarilishini erta nosozlik ko'rsatkichi sifatida ko'rsatadi.

MUNOZARA

Grafik tahlil shuni tasdiqlaydiki, ko'p domenli sensorlar bitta parametrli monitoringga nisbatan nosozliklarni kuzatishni sezilarli darajada yaxshilaydi. Xususan, momentdan olingan indikatorlar va tebranish energiyasining kombinatsiyasi beqarorlikni faqat harorat o'lchovlariga qaraganda erta aniqlash imkonini beradi. Sog'liqni saqlash holati indikatori murakkab tizim dinamikasini talqin qilinadigan skalyar metrikaga aylantirish orqali qaror qabul qilishni yanada soddalashtiradi.[11]

Bunday vizualizatsiya nafaqat muhandislik diagnostikasini qo'llab-quvvatlaydi, balki model shaffofligini ham oshiradi - bu bashoratli texnik xizmat ko'rsatish texnologiyalarini sanoat miqyosida joriy etishning asosiy talabidir.

7. Sanoat oqibatlari

Metodologiya Sanoat 4.0 tamoyillariga mos keladi va raqamli egizak arxitekturalarini qo'llab-quvvatlaydi. Strukturaviy ma'lumotlar to'plamlari kelajakda Foydali Hayotning Qolgan qismini baholash uchun chuqur o'rganish modellarini joriy etish imkonini beradi.

Masshtablash juda oddiy: boshqaruvchi tenglamalarni o'zgartirmasdan qo'shimcha sensorlarni qo'shish mumkin.

8. Cheklovlar va kelajakdagi tadqiqotlar

Tadqiqot maydon orqali olingan signallarga emas, balki modellashtirilgan signallarga asoslangan. Kelajakdagi ishlar spektral diagnostika, chiziqli bo'lmagan kuzatuvchilar va transformatorga asoslangan vaqtinchalik modellarni o'z ichiga olishi kerak.[15]

Mustahkamlash bo'yicha o'rganish orqali boshqariladigan moslashuvchan chegaralar yana bir istiqbolli yo'nalishni ifodalaydi.

XULOSA

Vites qutisi bilan ishlaydigan paxta tozalash mashinasini kuzatish uchun fizikaga asoslangan gibrid modellashtirish tizimi ishlab chiqildi. Nochiziqli mexanika, termal dinamika, Kalman filtrlash va regressiya analitikasini birlashtirish orqali yondashuv tushunarli va aniq sog'liqni saqlashni baholashni ta'minlaydi.

Natijalar tebranish energiyasi va podshipnik harorati asosiy degradatsiya ko'rsatkichlari ekanligini, moment esa erta ogohlantiruvchi o'zgaruvchi sifatida ishlayotganini tasdiqlaydi. Ushbu metodologiyani qo'llash ishonchlilikni sezilarli darajada oshirishi, texnik xizmat ko'rsatish xarajatlarini kamaytirishi va aqlli paxtani qayta ishlash zavodlariga o'tishni tezlashtirishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Engineering. – 1960. – Vol. 82, No. 1. – P. 35–45.

2. Anderson B.D.O., Moore J.B. Optimal Filtering. – Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979. – 357 p.
3. Simon D. Optimal State Estimation: Kalman, H∞, and Nonlinear Approaches. – New York: Wiley, 2006. – 552 p.
4. Øksendal B. Stochastic Differential Equations: An Introduction with Applications. – Berlin: Springer, 2003. – 360 p.
5. Gardiner C.W. Handbook of Stochastic Methods. – Berlin: Springer, 2009. – 447 p.
6. Randall R.B. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. – Chichester: Wiley, 2011. – 448 p.
7. Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – Vol. 20, No. 7. – P. 1483–1510.
8. Lei Y., Yang B., Jiang X., Jia F. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Vol. 99. – P. 46–61.
9. Nandi S., Toliyat H.A., Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – A review // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2005. – Vol. 20, No. 4. – P. 719–729.
10. Benbouzid M.E.H. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2000. – Vol. 47, No. 5. – P. 984–993.
11. Antoni J. The spectral kurtosis: A useful tool for characterising non-stationary signals // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – Vol. 20, No. 2. – P. 282–307.
12. Bolotin V.V. Random Vibrations of Elastic Systems. – Dordrecht: Springer, 1984. – 468 p.
13. Sharibayev N.Yu., Yunusov O.M., Khoshimov A.A. Intelligent monitoring of electromechanical systems based on vibration diagnostics // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2022. – Vol. 1248. – 012034.
14. Sharibayev N.Yu., Davlatov A.B., Abdullayev L.A. Prognostic analysis of vibration signals in industrial gear drives using Kalman filtering // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2700. – 030052.
15. Sharibayev N.Yu., Baymatov P.J., Inoyatov Sh.T. Hybrid diagnostic modeling of vibration and torque signals in cotton processing machinery // Proceedings of International Conference on Industrial Engineering. – Namangan, 2023. – P. 58–64.
16. Jarin A.L., Taratyn I.A., Sharibayev N.Yu. Mathematical modeling of stochastic oscillations in gear transmission systems // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. – 2020. – Vol. 84, No. 5. – P. 357–369.
17. Davlatov A.B., Sharibayev N.Yu. Energy-based fault indicators in electromechanical systems // Mekhanika mashin, mexanizmlar va materiallar. – 2022. – No. 2. – P. 34–42.
18. Yin S., Ding S.X., Haghani A., Hao H., Zhang P. A comparison study of basic data-driven fault diagnosis and process monitoring methods // Journal of Process Control. – 2012. – Vol. 22, No. 9. – P. 1567–1581.