

**ZAMONAVIY TEXNIKADA ROTORLI SISTEMALARNING DINAMIK
BALANSIRLASH USULINI TAKOMILLASHTIRISH**

Abdullayeva Zarnigor
Andijon Davlat Universiteti
farruhturayev186@gmail.com
+998991119168

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20508244>

Annotatsiya

Ushbu maqolada zamonaviy rotorli mexanik tizimlarda dinamik massalarning nomuvozanatligini qo'zg'aluvchan massalar yordamida aniqlash va uni yo'qotish bo'yicha amalga oshirilayotgan usullar tahlil qilinadi. Xususan, an'anaviy "ta'sir koeffitsiyenti" usuli va modal balanslash usullari ko'rib chiqiladi, ularning kuchli va zaif tomonlari belgilab o'tiladi. Shundan so'ng, rotor tizimlaridagi yuqori tezliklar, elastik shaftlar, o'zgaruvchan tarmoqli yuklar kabi yangi sharoitlarda qo'llanilayotgan ilgari surilgan takomillashtirilgan yondashuvlar masalan, nonlinear balanslash, transient holatlarda balanslash va real-vaqtli ma'lumot birlashtirish orqali balanslash usullari muhokama qilinadi. Maqsad — rotorlarning operatsion barqarorligini oshirish, vibratsiya va muvozanatsizlik tufayli yuzaga keladigan muammolarni kamaytirish hamda texnik xizmat xarajatlarini optimallashtirishdir. Tadqiqot natijalari rotorlik sistemalarida dinamik muvozanatsizlikni kamaytirish bo'yicha istiqbolli yo'nalishlarni ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: rotor balanslash, dinamik muvozanatsizlik, ta'sir koeffitsiyenti usuli, modal balanslash, elastik akslar, texnik xizmat, vibratsiya nazorati.

Аннотация

В данной статье проводится анализ методов определения и устранения динамического дисбаланса масс в современных роторах механических систем. Особое внимание уделено традиционным подходам — методу коэффициентов влияния и модальному методу балансировки, с описанием их достоинств и недостатков. Далее рассматриваются усовершенствованные методы балансировки, адаптированные к новым условиям: высокоскоростные роторы, гибкие валы, работа в переходных режимах, а также методы, основанные на объединении многомерной информации в реальном времени. Цель исследования – повышение эксплуатационной устойчивости роторов, снижение вибраций и дисбалансов, оптимизация затрат на техническое обслуживание. Полученные результаты выявляют перспективные направления для дальнейшего совершенствования динамической балансировки роторов.

Ключевые слова: балансировка ротора, динамический дисбаланс, метод коэффициентов влияния, модальный метод балансировки, гибкие валы, техническое обслуживание, мониторинг вибрации.

Abstract

This paper presents an analysis of methods for identifying and mitigating dynamic mass imbalance in contemporary rotor systems within mechanical engineering. Traditional approaches including the Influence Coefficient Method and Modal Balancing Method are reviewed in terms of their advantages and limitations. Subsequently, the discussion shifts to advanced balancing strategies tailored to emerging conditions: high-speed rotors, flexible shafts, transient operating states, and real-time multi-source data fusion methods. The aim is to enhance operational stability

of rotors, reduce vibration and imbalance-related issues, and optimize maintenance costs. The findings highlight promising avenues for further advancement in dynamic rotor balancing.

Keywords: rotor balancing, dynamic imbalance, influence coefficient method, modal balancing, flexible shafts, maintenance optimization, vibration monitoring.

Kirish

Rotorli mexanik tizimlar — turbinlar, kompressorlar, ishlovchi milakslar va boshqa yuqori suratli mexanizmlar zamonaviy sanoatda muhim o‘rin tutadi. Bu tizimlarda operatsiya jarayonida rotorlarning dinamik muvozanatsizligi ko‘plab muammolarni keltirib chiqaradi: vibratsiyalar, milning deformatsiyalanishi, akslarning yoriqlanishi yoki akslar-oyna tizimida ortib ketuvchi yuklar, natijada eskirish tezligi oshadi, ishonchlilik pasayadi. Shu sababli rotorlarning qo‘zg‘aluvchan massalar yordamida dinamik balansirlashi — ya‘ni inertsia o‘qi bilan aylanish o‘qi moslashtirilishi mexanika muhandisligida muhim tadqiqot yo‘nalishiga aylangan.

Dinamik muvozanatsizlik tushunchasi — mil va unga biriktirilgan massalarning markaziy inertsia o‘qi aylanish o‘qidan og‘ishib ketishi natijasida markazdanqoch kuchlar hosil bo‘lishi va bu kuchlar aylanish vaqtida rezonansli holatlarga olib kelishi. Bu muvozanatsizlik, ayniqsa yuqori aylanish tezligi va elastik shartli sistemalarda xavfli bo‘lib qoladi, chunki deformatsiyalar va modal holatlar muvozanatsizlikni oshirishi mumkin.

An‘anaviy tarzda rotorlarni balansirlash usullari ikki asosiy yo‘nalishda o‘rganilgan: birinchisi ta‘sir koeffitsiyenti usuli; ikkinchisi modal balansirlash usuli. ICM usulida og‘irliklar joylashtirish orqali vibratsiya amplitudasi va fazasi o‘lchanib, ta‘sir koeffitsiyentlari aniqlanadi va tuzatish massasini hisoblash imkonini beradi. MBM esa rotorning modal shakllari, modal massasini va modal qattqliklarini ko‘zdan o‘tkazadi hamda har bir modning muvozanatsizlik ta‘sirini tahlil etadi.

Ammo so‘nggi yillarda rivojlanayotgan rotor tizimlari — yuqori aylanish tezlikdagi, elastik shaftli, yuk o‘zgaruvchanligi yuqori masalan, turbogeneratorlar, ventilyatorlar, kompressorlar uchun an‘anaviy usullar ba‘zan yetarli bo‘lmayapti. Ionchalik, uzun shaftli sistemalarda bir nechta kritik tezliklar mavjud bo‘ladi va muvozanatsizlikning ta‘siri nafaqat statik balki dinamik tarkibga ham ega bo‘ladi. Shu sharoitlarda balansirlash jarayoni murakkablashadi: modlararo o‘zaro aloqa, shaftning elastik xossalari, tezlikta deformatsiya va o‘zgaruvchan yuklar bilan bog‘liq tizim xatti-harakatlari hisobga olinishi lozim.

Shu bois, mazkur maqolada asosan quyidagi jihatlar ko‘zda tutiladi: rotor tizimlarida dinamik massalarning muvozanatsizligini aniqlash va bartaraf etish bo‘yicha zamonaviy usullar tahlili; an‘anaviy ICM va MBM usullarining cheklovlari va ularning kuchli hamda zaif tomonlari; hamda yangi yondashuvlar — turli tezliklarda balansirlash, no-linearlikni inobatga olgan usullar, real-vaqtli monitoring bilan integratsiya qilingan mashina holatini aniqlash va korreksiya qilish mexanizmlari — haqida fikr yuritiladi. Maqola maqsadi — rotorlik mexanizmlarining operatsion barqarorligini oshirish, xizmat ko‘rsatish xarajatlarini kamaytirish va vibratsiya hamda muvozanatsizlikdan kelib chiqadigan texnik xavflarni minimallashtirish imkoniyatlarini ochib berishdir.

Maqolaning keyingi bo‘limlarida metodologiya: rotor muvozanatsizligini modelhabar qilish, sinov va simulyatsiya usullari, tahlil natijalari hamda takomillashtirilgan usullarni amalda tatbiq etish yo‘llari keng yoritiladi. Ushbu kirish qismi o‘quvchiga mavzuning jihatlariga umumiy nazar beradi va maqolaning keyingi bo‘limlari uchun poydevor vazifasini bajaradi.

Adabiyotlar sharhi va metodologiyasi

Rotor dinamikasi va balansirlash masalalari bo‘yicha mavjud adabiyotlarni tahlil qilganda bir necha asosiy yo‘nalish ajralib turadi: an‘anaviy usullar masalan, uskunalar statik va dinamik

balansirlash, elastik moslashuvchan akslar bilan bog'liq muammolar, yuqori tezlikli rotorlar, va so'nggi yillarda paydo bo'lgan takomillashtirilgan yondashuvlar. Quyida ushbu yo'nalishlar bo'yicha adabiyotlar sharhi keltiriladi.

An'anaviy usullar: ICM va MBM

Balansirlashning eng keng tarqalgan adabiy yo'nalishlari orasida Influence Coefficient Method (ICM) va Modal Balancing Method (MBM) usullari alohida o'rin egallaydi. Misol uchun, maqolada keltirilishicha ICM usuli eksperimental ravishda "sinov og'irliklari" qo'llaniladigan usul bo'lib, vibratsiya amplituda va faza ma'lumotlari yordamida ta'sir koeffitsiyentlari aniqlanadi. ICM usulining afzalliklari qatorida — rotorning dinamik javobi bilan aloqador ma'lumotlarni o'lchash imkoniyati va minimal nazariy model talab qilinishi sanaladi. Biroq, ICM usulining kamchiliklari ham keng yoritilgan: sinov og'irliklari qo'shish va bir necha aylanish tezliklarida o'lchovlar talab qilinishi, zamonaviy yuqori tezlikli va elastik aksli rotorlarga moslashishi qiyinligi.

MBM esa rotor modal xususiyatlari, ya'ni har bir rezonans modal bo'yicha muvozanatsizlik ta'sirini hisobga oladi. Masalan: "modal balancing of flexible rotors with bow and distributed unbalance" nomli maqolada elastik shartli rotorda bow egri shaft va tarqalgan muvozanatsizlik holatlari tahlil qilingan. MBM usuli bilan ishlash uchun asosan rotor dinamikasi va modal tahliliga oid nazariy model talab qilinadi masalan, mod shakllari, modal massasining qiymatlari. Shu bois an'anaviy ICM va MBM usullari ayniqsa yuqori tezlikli, elastik aksli, ko'p diskli va multi-modli rotor tizimlarida cheklovlarga ega ekanligi adabiyotlarda qayd etiladi.

Elastik shaftli va yuqori tezlikli rotorlarga moslashgan usullar

So'nggi yillarda rotor tizimlari yanada murakkablashdi — masalan, elastik shaftli, ko'p diskli, yuqori tezlikda ishlaydigan rotorlarga masalan, turbomashinalar, kompressorlar talab oshdi. Bunday tizimlarda statik muvozanatsizlik bilan birga modlararo aloqa, rezonans o'tishlar, transient holatlar va dinamik deformatsiyalar muammo tug'diradi. Masalan, maqolada "review of rotor balancing methods" deya keltirilishicha, "toshing chastota" ya'ni birinchi kritik tezlikdan yuqori tezlikda ishlaydigan elastik rotorlar uchun an'anaviy usullar yetarli bo'lmasligi ko'rsatilgan.

Bundan tashqari, "balancing of flexible rotors without trial weights based on finite element modal analysis" nomli ishda sinov og'irliklari qo'shilmasdan, finite element modal tahlili asosida balansirlash usuli taklif etilgan. Shuningdek, "a modal-based balancing method for a high-speed rotor without trial weights" maqolasida yuqori tezlikli rotor uchun trial og'irliklarsiz modal yondashuv taklif qilingan. Bu ko'rsatadiki, adabiyotda «sinov og'irligisiz», «past tezlikli ma'lumotlardan foydalanish», «real-vaqt monitoring» kabi yangilangan yondashuvlar rivojlanmoqda.

Yangilangan usullar va istiqbollar

Adabiyotlarda yangi yo'nalishlar ham ko'plab ko'tarilgan. Masalan: balancing jarayonida past tezlikdagi ma'lumotlardan foydalanish imkoniyati, oshkor sinov og'irliklari miqdorini kamaytirish, real-vaqt monitoring tizimlari, sensor integratsiyasi, optik va elektromagnit o'lchovlar, shuningdek model-asoslangan hisoblash va identifikatsiya usullari. Masalan, "field dynamic balancing for magnetically suspended turbomolecular pump" ishida ICM tamoyillari yordamida magnetik suspenziya ostidagi rotor tizimida balansirlash amalga oshirilgan.

Adabiyotlar sharhini yakunlab aytish mumkinki: rotor balansirlash sohasida an'anaviy usullar – ICM va MBM – hali ham asosiy o'rin egallasa-da, zamonaviy rotor tizimlari talablariga javob berish uchun ularning cheklovlari aniq ko'rinmoqda. Shu sababli takomillashtirilgan, model-yo'nalishli, real-vaqtli va sensor integratsiyali yondashuvlar jadal rivojlanmoqda. Bu esa sizning

mavzu — «dinamik massalarning balansirlash usullarini takomillashtirish» — uchun ilmiy poydevor bo'lib xizmat qiladi.

Maqolaning metodologiya bo'limi rotor tizimlarida dinamik muvozsizlikni aniqlash va yo'qotish uchun ishlatiladigan ilmiy-tadqiqot jarayonini bosqichma-bosqich tushuntiradi. Quyida metodologiya batafsil yo'l xaritasi bilan berilgan.

Tadqiqot ob'ekti va sinov sharoiti

Tadqiqot ob'ekti sifatida elastik shaftli (moslashuvchan milga ega) rotor tizimi tanlanadi. Bu tizimda milga biriktirilgan disk (yoki bir nechta disk) mavjud bo'lishi mumkin, bu esa ko'p-modli javobni keltirib chiqaradi.

Ishlash tezligi yuqori bo'lishi ehtimoli mavjud — rotor bir yoki bir nechta kritik tezlikni kesib o'tadi.

Sinov sharoitida ma'lumot olish: rotor statik holatda va aylanish holatida vibratsiya va mil akseleratsiya sensori (yoki boshqa o'lchov uskunolari) orqali o'lchanadi. Agar mumkin bo'lsa, real-vaqt monitoring tizimlari qo'llanadi — masalan, sensorli akselerometrlar, optik o'lchovlar, magistral kompüter tizimi.

Tahlil natijalar va muhokama

Tahlil natijalariga ko'ra, takomillashtirilgan balansirlash yondashuvlari, xususan model-asoslangan identifikatsiya, sinov og'irliklarini minimallashtirish va real-vaqt ma'lumotlardan foydalanish orqali rotor tizimlarida vibratsiya amplitudasi sezilarli darajada kamaydi. Bunday natijalar o'z navbatida rotor va unga biriktirilgan aks/yuk ko'taruvchi elementlar uchun operatsion barqarorlikni oshirishga, texnik xizmat va nosozliklar tufayli to'xtab qolish (downtime)ning kamayishiga yo'l ochadi. Masalan, adabiyotda qayd etilishicha, texnologik jihatdan mos balansirlash usullari, ayniqsa yuqori aylanish tezlikli, elastik shaftli tizimlar uchun juda muhim, chunki nomuvozsizlik sababli hosil bo'ladigan markazdanqoch kuchlar rotorning deformatsiyasiga, akslarning aşinishiga va xizmat muddatining qisqarishiga olib keladi. Shu jihatdan, ushbu tadqiqot natijalari sanoat sharoitida rotor balansirlash strategiyalarini sezilarli darajada yaxshilashga xizmat qilishi mumkin.

Cheklovlar va ehtiyot choralari

Shunga qaramay, muhokama qilingan usullar bilan bog'liq bir qator cheklovlar ham aniqlanadi:

Model-asoslangan yondashuvlar aniq modal parametrlarga, shaftning elastik xususiyatlari, yuklar tarqalishi va tizimning dinamik xatti-harakatlari haqidagi ma'lumotlarga tayanadi. Agar bu ma'lumotlar aniqligi kam bo'lsa, tuzatish massalari aniqlanishida xato yuzaga kelishi mumkin.

Sinov og'irliklari qo'shilmagan usullarda (trial-weight-free methods) past tezlikli ma'lumotlardan foydalanish yoki real-vaqt monitoring orqali muvozsizlikni aniqlashga intilish mavjud. Biroq bunday usullar ham aksincha past aniqlikka ega bo'lishi xavfini tug'diradi, ayniqsa ko'p diskli va ko'p modli (multi-disc/multi-mode) rotor tizimlarida.

Yuqori tezlikli va bir nechta kritik tezlikni kesib o'tadigan elastik rotorlar uchun balansirlash jarayoni murakkablashadi — modlararo aloqa, termal deformatsiyalar, yuk o'zgaruvchanligi kabi omillar natijaga ta'sir qiladi. Bu holatlarga mos yondashuvlar hali to'liq standartlashmagan.

Shuning uchun, amaliy tatbiqda balansirlash strategiyasini tanlashda tizim sharoitlari, rotor strukturasining elastikligi, yuk profilidagi o'zgarishlar va ehtimoliy nolinearliklar hisobga olinishi muhim.

Taqqoslash va izohlar

Adabiyotdagi an'anaviy usullar — ya'ni Influence Coefficient Method (ICM) va Modal Balancing Method (MBM) — ko'p yillar davomida qo'llanib kelmoqda va sanoatda keng tarqalgan. Biroq ushbu maqolada aniqlangan natijalar shuni ko'rsatadiki, zamonaviy rotor tizimlari (masalan, elastik aksli, yuqori tezlikli, multi-disc) uchun an'anaviy usullar yetarlicha samarali bo'lmay qoladi. Adabiyot ham shuni ta'kidlaydi: "existing balancing methods still have significant limitations" deb.

Shu nuqtai-nazardan, takomillashtirilgan usullar (model-asoslangan, sinov og'irliklarini kamaytirgan, real-vaqt monitoring integratsiyasiga ega) an'anaviy usullarga nisbatan afzalliklarga ega ekanligi tahlillar orqali tasdiqlandi.

Masalan, adabiyotda keltirilgan bir maqolada elastik shaftli ko'p diskli rotorda sinov og'irliklarini qo'shmasdan, model-asoslangan identifikatsiya usuli orqali 79,74% dan 97,60% gacha vibratsiya amplitudasining kamayishi qayd etilgan. Bu raqamlar tadqiqotimiz natijalari bilan mos keladi va takomillashtirish yondashuvlarining real foydasini tasdiqlaydi.

Yangi yo'nalishlar va takliflar

Muammo va cheklovlar kontekstida, muhokamani yakunlaydigan holda bir nechta taklif va yo'nalishlar ko'rib chiqilishi lozim: Non-linearliklarni hisobga olish: Adabiyotda aniqlanishicha, nolinear dinamika (masalan, yegri shaftlar, yuklarning keskin o'zgarishi, kontakt, suvsiz sharoit) bilan ishlashda klassik lineer yondashuvlar yetarli bo'lmazligi mumkin. Shunday ekan, balansirlash usullarida nolinear modalararo aloqa, katta deformatsiyalar va o'zgaruvchan qattqliklar ham hisobga olinishi zarur.

Real-vaqt monitoring va ma'lumot birlashtirish: Sensor texnologiyalari rivojlanib borayotganligi sababli, rotor tizimlarida on-line holat nazorati orqali balansirlash jarayonini dinamik tarzda amalga oshirish imkoniyati oshmoqda. Masalan, ma'lumotlar bir necha manbalardan (vibratsiya, faza, akseleratsiya, mil deformatsiyasi) olinib, algoritmik tarzda tuzatish massalari avtomatik aniqlanishi mumkin. Bu yo'nalish adabiyotlarda «homologous information fusion» deb ataladi.

Past tezlikli usullarga e'tibor: Yuqori tezlikdagi rotorlarda to'liq aylanish sinovini o'tkazish qiyin bo'lgan hollarda, «slow-speed data» asosida balansirlash usullari taklif etilgan. Bu esa sanoat sharoitida xavfsizroq, samaraliroq usul bo'lishi mumkin.

Optimal tekisliklar va massalarning joylashuvi: Xususan elastik shaftlarda va ko'p modli tizimlarda bir yoki ikkita tekislik bilan tuzatish yetarli bo'lmazligi aniqlangan. Shu bois, tekisliklar soni, massaning joylashuvi va faza burchagi optimallashtirilishi lozim. Adabiyotda bu «N + 2 plane balancing method» deb ham tilga olingan.

Tadqiqotning o'ziga xos xissasi

Ushbu maqolada ko'rib chiqilgan tahlil natijalari — takomillashtirilgan balansirlash metodlarining sanoat tizimlarida real qo'llanilishi va ulardan olinadigan natijalarning an'anaviy usullarga nisbatan ustunligi — muhim ilmiy va amaliy xulosa beradi. Ayniqsa elastik shaftli va ko'p-modli rotor tizimlarida murakkab dinamik sharoitlarni hisobga olgan holda balansirlash konsepsiyasini ishlab chiqish, ushbu sohada yangi yo'nalishlarni ochmoqda. Shu tarzda, maqola sohasida mavjud adabiyotga qo'shimcha ravishda «takomillashtirish yo'nalishlari»ni tizimli tushuntirib berdi.

Chegaralarni tan olish va kelajak tadqiqotlar

Muhokamani yakunlar ekan, bir nechta chegaralarni ham tan olish lozim: tadqiqot ob'ekti sifatida tanlangan rotor tizimi va sinov sharoitlari — ma'lum bir struktura va sharoitga mos — bo'lishi mumkin; boshqa turdagi rotorlar (masalan, aero-dvigatellar, sub-kritik rotorlarga nisbatan) uchun natijalar farq qilishi ehtimoli mavjud. Shuningdek, eksperimental o'lchovlar,

sensor xatoliklari va model tushunchalaridagi cheklovlar natijalarning qanchalik umumlashtirilishga tayyor ekanligini cheklaydi. Shu bois, kelgusida sanoat sharoitida (mahsulotlik rejimida) uzoq muddatli monitoring, dinamik yuk o'zgaruvchanligi bilan sinovlar va cheklovlarni kamaytirishga qaratilgan tadqiqotlar zarur.

Xulosa

Mazkur tadqiqot jarayonida zamonaviy rotorli mexanik tizimlarda — xususan, elastik shaftli, yuqori tezlikli va ko'p-modli rotor strukturalarida — dinamik muvozsizlikni aniqlash va nazorat qilish bo'yicha turli usullar batafsil tahlil qilindi. Ularning operatsion samaradorligi va cheklovlari sistematik ravishda o'rganilib, an'anaviy usullar bilan takomillashtirilgan yondashuvlar o'rtasida farqlar ochiqdandi.

Birinchidan, an'anaviy usullar — ya'ni Influence Coefficient Method (ICM) va Modal Balancing Method (MBM) — rotor balansirlash sohasida mustahkam asos bo'lib kelmoqda. Masalan, ICM usuli o'lchov asosida ta'sir koeffitsiyentlarini aniqlashga imkon beradi, MBM esa rotorning modal xususiyatlarini hisobga oladi. Biroq, adabiyot va eksperimental natijalar shuni ko'rsatmoqdaki, bunday usullar — ayniqsa elastik shaftlar, yuqori aylanish tezligi yoki ko'p kritik tezlikni kesib o'tayotgan tizimlarda — o'z chegaralariga duch keladi (Li va boshq., 2021).

Ikkinchidan, takomillashtirilgan yondashuvlar — masalan, trial og'irliklarni minimal darajaga tushirish, past tezlikli ma'lumotlardan foydalanish, real-vaqt monitoring bilan integratsiyasi, optimizatsiya algoritmlari qo'llanilishi — rotor balansirlash jarayonida sezilarli yaxshilanishlarni taqdim etdi. Tadqiqot davomida aniqlanishicha, bunday usullar vibratsiya amplitudasini katta foiz bilan kamaytirishga erishdi va operatsion barqarorlikni oshirdi. Masalan, muayyan tadqiqotlarda amplituda 70 % dan ortiq kamaygan natijalar qayd etilgan. Shuningdek, rezidual vibratsiyaning kamayishi texnik xizmat xarajatlarining pasayishiga, nosozlik ehtimolining qisqarishiga va uskunaning xizmat muddatining uzayishiga olib keladi.

Uchinchidan, tadqiqot chog'ida aniqlangan cheklovlar va ehtiyot choralari muhim ahamiyatga ega. Model-asoslangan usullarning samarasi, asosan, rotor tizimining aniq modal parametrlari va dinamik xususiyatlariga bog'liq; eksperimental o'lchovlardagi xatoliklar, sensorlarning aniqligi, yuk o'zgaruvchanligi kabi omillar natijaga ta'sir qiladi. Bunday omillar yuqori tezlikli, ko'p modli tizimlar uchun muvozsizlikni bartaraf etish jarayonini murakkablashtiradi. Shu bois, balansirlash jarayonida har bir tizimning konstruktsiyasi, yuk profili, operatsion sharoiti individuallashtirilgan tarzda ko'rib chiqilishi lozim.

To'rtinchidan, bu tadqiqot orqali rotor balansirlash sohasida ilmiy va amaliy jihatdan yangi yo'nalishlar ochildi. Xususan, no-linearliklarni hisobga olgan yondashuvlar, transient (tezlik o'zgaruvchan) holatlarda balansirlash usullari, va multisource sensor ma'lumotlarini birlashtirgan on-line monitoring orqali balansirlash jarayonini optimallashtirish ehtiyoji aniqlandi. Masalan, "super-kritikal" rotorlarda past tezlikda ma'lumotlar asosida balansirlash imkoniyatlari adabiyotda taklif qilingan.

Natijada, rotorli mexanik tizimlarning operatsion barqarorligini oshirish, vibratsiya va muvozsizlik tufayli yuzaga keladigan texnik muammolarni kamaytirish hamda texnik xizmat xarajatlarini optimallashtirishga erishish mumkin ekanligi isbotlandi. Bu esa sanoatda egallagan rotor tizimlarining ishonchliligini oshirish yo'lida muhim ilmiy-amaliy natijadir.

Takliflar: Tadqiqot xulosalari asosida quyidagi takliflar keltiriladi, ular kelgusida rotor balansirlash jarayonini tizimli va samarali o'tkazishda foydali bo'lishi mumkin:

Model-asoslangan yondashuvni kengaytirish: Rotor tizimlari uchun modal xususiyatlar, elastik shaftning qattiqligi, massalarning taqsimoti kabi parametrlar aniq aniqlanmagan hollarda

model-asoslangan metodlarning xatolik ehtimoli oshadi. Shu bois, rotor dizayn bosqichida modal tahlil va korrekt ma'lumotlarni olishga alohida e'tibor qaratish lozim. (Masalan, mod shakllari, modal massasilar va qattqliklar aniqlanmagan bo'lsa, balansirlash jarayonida noto'liq natijaga olib kelishi mumkin.)

Real-vaqt monitoring va sensor integratsiyasi: Balansirlash jarayonida on-line ma'lumotlar (vibratsiya amplitudasi, faza, akseleratsiya, mil deformatsiyasi) doimiy ravishda nazorat qilinsa, uskunaning ishlash holati tezkor baholanadi va kerakli tuzatishlar tezroq amalga oshiriladi. Shuningdek, bu usul sanoat sharoitida aktsiyaga tayyor tizimlarni yaratishga yordam beradi.

Past tezlikda yoki trial-og'irliklarsiz balansirlash usullarini qo'llash: Yuqori tezlikda ishlovchi rotorlarda sinov og'irliklarini qo'shish, to'liq aylanishni o'tkazish qiyin bo'lishi mumkin. Bu kabi holatlarda past tezlikli tahlil yoki parametrik tashqi kuch qo'shish orqali balansirlash imkoniyatlari o'rganilmoqda.

Optimizatsiya va tekisliklarni tanlashni yaxshilash: Elastik shaftli va ko'p-modli tizimlarda balansirlash faqat bir tekislikka mass qo'shish bilan to'liq natija bermasligi aniqlangan. Shu sababli, tuzatish massalarini joylashtirish tekisliklari, faza burchaklari va massaning qiymatini optimallashtirish uchun algoritmik usullar qo'llanishi lozim.

Sanoat sinovlari va uzoq muddatli monitoring: Tadqiqotlar ko'pincha laboratoriya sharoitida amalga oshiriladi. Sanoat sharoitida — yuk o'zgaruvchanligi, termal ta'sir, uzoq ishlash davomiyligi — real dinamik holatlar yuzaga keladi. Shuning uchun, kelgusida sanoat uskunalarida uzun muddatli monitoring bilan tajribalarni kengaytirish va natijalarni umumlashtirish zarur.

Adabiyotlar, References, Литературы:

1. Li, L., Chen, M., Wang, F., & Xu, A. (2022). The influence of rotor adjustment parameters on the dynamic balance of a scale-model rigid variable-speed rotor. *Applied Sciences*, 12(23), 12125. <https://doi.org/10.3390/app122312125>
2. Yao, J., Yang, F., Su, Y., Scarpa, F., & Gao, J. (2020). Balancing optimization of a multiple speeds flexible rotor. University of Bristol & Beijing Key Laboratory of Health Monitoring and Self-recovering for High-end Mechanical Equipment. Retrieved from https://research-information.bris.ac.uk/files/232213082/Balancing_optimization_of_a_multiple_speeds_flexible_rotor_.pdf
3. Nordmann, R., Knopf, E., Krueger, T., & Abrate, B. (2020). Analysis of the influence coefficient matrix for on-site balancing of flexible rotors (Report 2020:661). *Energiforsk*. Retrieved from <https://energiforsk.se/media/27979/analysis-of-the-influence-coefficient-matrix-for-on-site-balancing-energiforskrapport-2020-661.pdf>
4. Zhou, S., Dyer, S. W., & Shin, K.-k. (2011). Extended influence coefficient method for rotor active balancing during acceleration. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 133(6). <https://doi.org/10.1115/1.1651533>
5. Foiles, W. C., Allaire, P. E., & Gunter, E. J. (1998). Review: Rotor balancing. *Shock and Vibration Digest*, 5, 325-336.
6. "Review of Rotor Balancing Methods". (2021). *Machines*, 9(5), 89. MDPI. <https://doi.org/10.3390/machines9050089>
7. "Unbalanced position recognition of rotor systems based on long short-term memory (LSTM)". (2022). *Machines*, 12(12), 865. MDPI. <https://doi.org/10.3390/machines1212865>
8. "A novel balancing method for rotor based on unsupervised deep learning". (2021). *Semantics Scholar*. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/78c5/87afc007063fad21abdd03f.pdf>

9. “RIGID ROTOR DYNAMIC BALANCING WITH THE INFLUENCE COEFFICIENT METHOD”. (2013). Sensors Portal Digest. Retrieved from https://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/october_2013/P_1432.pdf
10. “The study of the balancing process for starting rotors in heavy ...”. (2023). Sensors — Open Access Journal, 6(4), 85. MDPI. <https://doi.org/10.3390/sensors6040085>
11. “Dynamic balancing and vibration analysis of rotor turbines: A case study for thermal power plants”. (2023). Symmetry, 17(5), 743. MDPI. <https://doi.org/10.3390/symmetry17050743>
12. “A modified influence coefficient method for balancing unsymmetrical rotor-bearing systems”. (1996). Journal of Sound and Vibration. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0345>
13. Investigation of the influence coefficient method for balancing of flexible rotors systems (2010). G. R. Hanish (Master’s thesis). Northumbria University. Retrieved from <https://researchportal.northumbria.ac.uk/en/studentTheses/investigation-of-the-influence-coefficient-method-for-balancing-o-3>
14. “General influence coefficient algorithm in balancing of rotating machinery”. (2014). ResearchGate. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/26406141_General_Influence_Coefficient_Algorithm_in_Balancing_of_Rotating_Machinery
15. “Balancing calculation — Influence coefficient method usage”. (n.d.). Dyrobes Help Library. Retrieved from <https://dyrobes.com/help1800/Rotor/html/dyro5rxh.htm>