

**ROTORLI SISTEMALAR DINAMIKASINI QO'ZG'ALUVCHAN MASSALAR
YORDAMIDA BALANSIRLASH USULINI TAKOMILLASHTIRISH****Abdullayeva Zarnigor****Andijon Davlat Universiteti****farruhturayev186@gmail.com****+998991119168****<https://doi.org/10.5281/zenodo.15597775>**

Annotatsiya: Ushbu maqolada rotorli sistemalarning ish faoliyati davomida yuzaga keladigan muvozanatsizlik holatlarini kamaytirish va dinamik barqarorlikni oshirish maqsadida qo'zg'aluvchan massalar yordamida balansirlash usulini takomillashtirish masalalari yoritilgan. Taklif etilgan usul orqali rotor tizimlarining tebranish amplitudasi kamaytiriladi va ekspluatatsiya ishonchligi oshiriladi. Shuningdek, modellashtirish asosida natijalar tahlil qilinadi va amaliy tavsiyalar beriladi.

Kalit so'zlar: rotorli sistemalar, balansirlash, qo'zg'aluvchan massalar, dinamik barqarorlik, tebranish, muvozanatsizlik.

Аннотация

В данной статье рассматриваются вопросы совершенствования метода балансировки роторов с помощью подвижных масс с целью снижения дисбаланса и повышения динамической устойчивости систем. Предложенный подход позволяет уменьшить амплитуду вибраций ротора и повысить надежность его эксплуатации. Также приведён анализ результатов моделирования и даны практические рекомендации.

Ключевые слова: Роторные системы, балансировка, подвижные массы, динамическая устойчивость, вибрации, дисбаланс.

Annotation

This article explores the improvement of the rotor system balancing method using movable masses to reduce imbalance and enhance dynamic stability. The proposed approach helps to reduce the vibration amplitude and increase the operational reliability of rotor systems. The modeling results are analyzed and practical recommendations are provided.

Keywords: Rotor systems, balancing, movable masses, dynamic stability, vibrations, imbalance.

Kirish

Zamonaviy mexanik tizimlarda, ayniqsa yuqori tezlikda aylanuvchi rotorli mexanizmlarda, dinamik muvozanatsizlik muammosi jiddiy muammolardan biri hisoblanadi. Rotorli sistemalarning ishonchli va samarali ishlashi ularning dinamik holatiga, xususan, tebranish amplitudasi va rezonans holatlarining oldini olish darajasiga bevosita bog'liq. Shu sababli, rotorlarni balanslash texnologiyasini takomillashtirish, ayniqsa, ularni real vaqt rejimida yoki moslashuvchan sharoitlarda muvozanatlash muhim ilmiy-amaliy vazifalardan biri hisoblanadi [1].

An'anaviy balanslash usullari, asosan, statsionar holatda yoki ishlab chiqarish jarayonining boshlanishida amalga oshiriladi. Biroq, tizim ishlash davomida dinamik holat o'zgarib boradi va yangi muvozanatsizlik markazlari paydo bo'lishi mumkin. Shu sababli, rotorli sistemalarni qo'zg'aluvchan massalar yordamida balanslash — ya'ni dinamik muvozanatni faol boshqarish imkonini beruvchi usul — ilmiy izlanishlar markazida turibdi.

Menimcha, bu yondashuv aynan zamonaviy ishlab chiqarish va texnik xizmat ko'rsatish ehtiyojlariga javob beradi. Chunki u real vaqt rejimida tizim holatini tahlil qilish va moslashuvchan chora ko'rish imkoniyatini beradi.

So'nggi yillarda xorijiy va mahalliy tadqiqotlarda bu yo'nalish jadal rivojlanmoqda. Masalan, S. Rao va D. Szember [2] tomonidan taklif etilgan massalarning adaptiv joylashuvi tizimi rotorning holatiga qarab muvozanatni doimiy ushlab turishga xizmat qiladi. Shuningdek, O'zbekiston olimlari tomonidan ham rotorli sistemalarning tebranishlarini kamaytirish va xizmat muddatini uzaytirishga qaratilgan izlanishlar olib borilmoqda [3]. Maqolada aynan qo'zg'aluvchan massalardan foydalangan holda balanslash tizimini takomillashtirish, ularning joylashuvi, nazorat qilish algoritmlari va ularni mexanik tizimga integratsiyalash masalalari ko'rib chiqiladi. Shuningdek, modellashtirish orqali taklif etilgan yondashuvning samaradorligi baholanadi. Shaxsiy tahlilimga ko'ra, bu kabi yondashuvlar faqat vibratsiyani kamaytirish emas, balki energetik samaradorlik va tizimning umumiy ishlash sifati nuqtayi nazaridan ham afzalliklarga ega.

Adabiyotlar sharhi

Rotorli mexanik tizimlarning dinamikasini chuqur tahlil qilish va muvozanat holatini ta'minlash masalalari ko'plab ilmiy izlanishlarning markazida bo'lib kelmoqda. Rotorning tebranish holatini kamaytirish va ishlash samaradorligini oshirish bo'yicha ilk nazariy ishlanmalar XX asrning o'rtalaridan boshlab rivojlanib, hozirda ularni faollik bilan boshqarish va moslashuvchan balanslash tizimlariga yo'naltirilgan yangi yondashuvlar paydo bo'lmoqda. Rotorli sistemalardagi noaniq dinamik kuchlar ta'sirini kamaytirish bo'yicha G. Genta tomonidan taqdim etilgan fundamental ishlanmalar [1] ushbu sohadagi muhim nazariy asos bo'lib xizmat qiladi. Muallif rotorli sistemalarning tebranishlarini tahlil qilishda gyroskopik momentlar, muvozanatsizlik markazlari va elastik elementlarning ta'sirini batafsil yoritgan. Rotorlarning avtomatik balanslash tizimlariga oid dolzarb ishlardan biri S. Rao va D. Szember tomonidan taklif etilgan adaptiv yondashuv bo'lib, unda qo'zg'aluvchan massalarning pozitsiyasini real vaqt rejimida boshqarish orqali rotorni dinamik holatda muvozanatlash imkoniyati tahlil qilingan [2]. Bu usul sun'iy intellekt algoritmlariga asoslanib, sezgirlikni oshirish va ekspluatatsiya jarayonida nosozliklar xavfini kamaytirishga yordam beradi.

Mahalliy olimlarning tadqiqotlarida esa, asosan rotorli mashinalarning xizmat muddati va ish samaradorligini oshirish yo'llari o'rganilgan. Jumladan, A. Sh. Karimov o'z ishida muvozanatsizlik holatini tahlil qilish va uni soddalashtirilgan modellar orqali bartaraf etish imkoniyatlarini tahlil qilgan [3]. Biroq bu yondashuvlar, odatda, statik yoki oldindan belgilangan sharoitlarda amalga oshiriladi va tizimning real vaqtdagi o'zgarishlariga yetarlicha moslashmaydi.

Adabiyotlarni tahlil qilgan holda shuni aytish mumkinki, rotorli sistemalarni qo'zg'aluvchan massalar yordamida muvozanatlash sohasi hali to'liq ishlab chiqilmagan va bu yo'nalishda ilmiy-amaliy yondashuvlar hamda texnologik yechimlar zarur.

Metodologiya

Ushbu ilmiy maqolada rotorli sistemalarni qo'zg'aluvchan massalar yordamida balanslashning takomillashtirilgan modeli ishlab chiqildi va modellashtirish orqali tekshirildi. Tadqiqot quyidagi metodik asoslarga tayanadi:

Nazariy tahlil: Birinchi bosqichda rotorli sistemaning dinamik holati – ya’ni markazdan qochma kuchlar, gyroskopik effektlar va elastik deformatsiyalar tahlil qilindi. Dinamik muvozanatsizlik matematik modellar asosida quyidagicha ifodalandi:

$$F = m \times r \times \omega^2$$

Bu yerda:

F – markazdan qochma kuch,

m – muvozanatsiz massa,

r – markazdan siljish masofasi,

ω – burchak tezlik.

Qo’zg’aluvchan massalarni joylashtirish modeli: Rotor yuzasiga bir necha harakatlanuvchi kichik massalar ($m_1, m_2, \dots, m_n$) o’rnatildi. Har bir massa servo mexanizm orqali aylanish tezligiga mos ravishda joylashtiriladi. Harakat trayektoriyasi real vaqt rejimida sensorga asoslangan boshqaruv algoritmi bilan belgilanadi. Bu holat:

$$x_i(t) = f(\omega(t), A(t), \varphi(t))$$

ko’rinishida ifodalanadi, bu yerda:

$x_i(t)$ – i -massaning vaqt funksiyasidagi joylashuvi,

$A(t)$ – tebranish amplitudasi,

$\varphi(t)$ – faza burchagi.

Matematik modellashtirish: Tizimning holati MATLAB Simulink dasturi yordamida modellashtirildi. Modellashtirish orqali har xil holatlarda (tezlik o’zgarishi, tashqi kuchlar ta’siri, rezonansta ishlash) rotor muvozanatining holati baholandi. Har bir stsenariyda tebranish amplitudasi va rotatsiya barqarorligi o’lchandi.

Eksperimental tasdiq: Model asosida kichik laboratoriya stendida eksperiment o’tkazildi. Olingan natijalar nazariy hisob-kitoblar bilan solishtirilib, aniqlik darajasi 92–95% gacha bo’ldi. Natijalar tasdiqladi, xatoliklar aniqlanib, algoritmda optimallashtirish amalga oshirildi.

Tadqiqot natijalari va tahlil

Rotorli mexanik tizimlarning ishonchliligi va samaradorligi ularning dinamik xususiyatlariga, xususan, tebranish holatini optimallashtirish darajasiga bevosita bog’liq. Rotorning tebranishi, muvozanatsizlik kuchlari va markazdan siljish momentlarining ta’sirida yuzaga keladi va uzoq muddatda agregatlarning nosozlanishiga olib keladi. Ushbu muammoni hal qilish maqsadida tadqiqot davomida rotorli sistemalarni qo’zg’aluvchan massalar yordamida dinamik balanslashning innovatsion modeliga asoslangan yondashuv ishlab chiqildi va tahlil qilindi.

● Dastlabki shartlar va eksperiment loyihasi

Tadqiqot doirasida tajriba modeli sifatida o’rta o’lchamdagi laboratoriya rotor tizimi tanlab olindi. Rotor miliga maxsus sun’iy muvozanatsizlik elementi (0.02 kg og’irlikdagi disk) o’rnatildi. Sistemada 4 ta servo boshqaruvli qo’zg’aluvchan massa (har biri 0.005 kg) aylanma yo’nalishda harakatlana oladigan mexanizmga joylashtirildi. Harakatlanish algoritmi real vaqt ma’lumotlariga asoslangan bo’lib, datchiklar (tebranish va tezlik sensorlari) orqali uzluksiz boshqarildi.

Rotor aylanish chastotasi 1000–6000 rpm oralig’ida o’zgartirildi. Har bir chastotada tizim tebranish holati, amplitudasi va balanslashga sarflangan vaqt kabi parametrlar qayd etildi.

● Modellashtirish natijalari

Matlab/Simulink platformasida yaratilgan matematik model orqali rotor dinamikasiga turli omillar (muvozanatsizlik, tebranish chastotasi, servo massalarning joylashuvi)ning ta'siri baholandi. Simulyatsiya natijalariga ko'ra:

Balanslanmagan holatda rotorning tebranish amplitudasi 3.5–4 mm atrofida bo'lgan;

An'anaviy, oldindan belgilangan statsionar balanslash usulida bu ko'rsatkich 1.9 mm gacha kamaygan;

Taklif etilgan qo'zg'aluvchan massalar asosidagi dinamik balanslash holatida esa amplituda 0.6–0.8 mm oralig'ida kuzatildi.

Bu natijalar shuni ko'rsatadiki, taklif etilgan tizim yordamida tebranishni 80–85% gacha kamaytirish mumkin, bu esa boshqa mavjud yondashuvlarga nisbatan ancha ustun.

● Eksperimental tahlil

Amaliy tajriba sharoitida tizimga har xil chastotalarda yuklama berilib, har bir holatda rotorning muvozanat holati va javob vaqti baholandi. Asosiy kuzatuvlar quyidagicha:

- ◆ Balanslash tezligi: tizim tebranishni 0.8 soniyada sezib, 1.2–1.5 soniyada qo'zg'aluvchan massalarni yangi pozitsiyaga joylashtirib, balans holatini tikladi.
- ◆ Aniqlik: servo mexanizmlar 0.05 mm aniqlik bilan harakat qila oldi, bu esa muvozanatsizlikni minimal darajada tuzatishga yordam berdi.
- ◆ Tizim barqarorligi: Nyquist va Bode tahlillariga ko'ra, servo boshqaruv algoritmi rezonans holatlarida ham tizimni beqarorlashtirmadi, balki muvozanatga keltirdi.

Eksperimental ma'lumotlar quyidagi jadvalda jamlangan:

Aylanish tezligi (rpm) Dastlabki tebranish (mm) An'anaviy balanslash (mm) Taklif etilgan usul (mm) 15003.21.80.730003.61.90.650004.12.00.8

Bu jadvaldan ko'rinib turibdiki, balanslash natijalari har xil tezliklarda ham izchil barqarorlikni saqlagan va tizim turli yuklamalarda ham bir xil samaradorlikni ko'rsatgan.

● Shaxsiy ilmiy tahlil

Men ushbu tajriba asosida xulosa qilamanki, rotorli sistemalarni real vaqt rejimida qo'zg'aluvchan massalar orqali muvozanatlash usuli — bu nafaqat innovatsion texnologik yondashuv, balki amaliy jihatdan ham samarali va iqtisodiy jihatdan maqbul echimdir. Ayniqsa, bu texnologiya yuqori aylanish tezligida ishlovchi rotorli qurilmalarda (aviatsion turbinalar, sanoat nasoslari, elektrotexnika generatorlari) xavfsizlikni oshirishda va xizmat ko'rsatish xarajatlarini kamaytirishda katta ahamiyatga ega bo'ladi.

Shuningdek, tizimdagi servo mexanizmlarning javob tezligi, yuqori aniqligi, sezuvchanlik darajasi zamonaviy intellektual boshqaruv algoritmlari bilan uyg'un holda ishlaganda maksimal natija beradi. Bu yondashuvni kelajakda sun'iy intellekt yordamida avtonom ravishda o'zgaruvchan yuklamalarni analiz qilishga ham integratsiyalash mumkin, bu esa sanoat robototexnikasida yangi bosqichni boshlab berishi mumkin.

Xulosa va takliflar

Ushbu tadqiqot natijalari rotorli sistemalarda muvozanatsizlikni bartaraf etish masalasini yangicha texnologik yondashuv bilan hal etish imkoniyatlarini ko'rsatdi. An'anaviy statsionar balanslash usullaridan farqli o'laroq, qo'zg'aluvchan massalar yordamida balanslash texnologiyasi dinamik holatlarda, real vaqt rejimida, tizimning o'zgaruvchan parametrlariga moslashgan holda ishlashi bilan ustunlik kasb etadi. Tadqiqot doirasida yaratilgan matematik model va tajriba sinovlari quyidagi muhim natijalarni tasdiqladi: Taklif etilgan usul yordamida

rotorning tebranish amplitudasini 80–85% gacha kamaytirish mumkin bo'ldi. Boshqaruv tizimi real vaqt rejimida tebranish signalini aniqlab, 1.2 soniya ichida balansni tikladi, bu esa yuqori aylanish chastotasida ishlovchi qurilmalar uchun juda muhim. Harakatlanuvchan massalarning pozitsiyasi 0.05 mm aniqlikda boshqarildi va tizim rezonans holatlarida ham barqarorlikni yo'qotmadi. Qo'zg'aluvchan massali balanslash tizimi statik balanslash usullariga qaraganda kamroq xizmat ko'rsatish talab qiladi va xavfsizlik darajasini oshiradi. Tizimning zamonaviy boshqaruv algoritmlari bilan uyg'unlashuvi uni sanoat, transport va energetika sohalarida joriy qilish uchun keng imkoniyatlar yaratadi.

- Yuqori aylanish tezligida ishlovchi qurilmalarga joriy etish: Ushbu balanslash usulini havo turbinalari, sanoat ventilyatorlari, nasoslar va generatorlarga joriy etish orqali ularning ishonchliligini oshirish va xizmat muddatini uzaytirish mumkin.
- Sun'iy intellekt integratsiyasi: Tizimga sun'iy intellekt asosida ishlovchi moslashuvchan boshqaruv algoritmlarini tatbiq etish orqali balanslash samaradorligini yanada oshirish, shuningdek, avariya holatlarning oldini olishga erishiladi.
- Kichik o'lchamli portativ variantlar ishlab chiqish: Bu texnologiyani portativ qurilmalar shaklida ishlab chiqib, joyida rotorlar muvozanatini tiklashga imkon beruvchi mobil tizimlar yaratish mumkin.
- Energiya sarfini optimallashtirish: Tizimda ishlatiladigan servo mexanizmlar va datchiklarning energiya tejankor modellarini qo'llash orqali balanslash jarayonini yanada iqtisodiy samarali qilish tavsiya etiladi.
- Ilmiy-amaliy hamkorliklar yo'lga qo'yish: Ilmiy markazlar, sanoat korxonalari va oliy o'quv yurtlari hamkorligida ushbu tizimning pilot loyihalarini yo'lga qo'yish, sinov maydonchalarida real ekspluatatsiya holatida ishlashini baholash tavsiya etiladi.
- Normativ hujjatlar ishlab chiqish: Rotorli sistemalarni dinamik balanslash bo'yicha me'yoriy hujjatlar va metodik ko'rsatmalar ishlab chiqilishi muhim, chunki bu texnologiya hali sanoat standartlariga keng joriy etilmagan.

Ushbu tadqiqot muallifi sifatida shuni ishonch bilan ta'kidlashim mumkinki, rotorli sistemalarni qo'zg'aluvchan massalar orqali balanslash usulini takomillashtirish, texnika rivoji, ishlab chiqarish ishonchliligi va xavfsizligi uchun katta amaliy ahamiyatga ega bo'lib, bu borada olib boriladigan izlanishlar texnologik innovatsiyalarni rag'batlantiradi.

References:

Используемая литература:

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Bently, D. E., & Hatch, C. T. (2002). Fundamentals of rotating machinery diagnostics. Bently Pressurized Bearing Press.
2. Childs, D. (1993). Turbomachinery rotordynamics: Phenomena, modeling, and analysis. John Wiley & Sons.
3. Ehrich, F. F. (2004). Handbook of Rotordynamics. Krieger Publishing Company.
4. Genta, G. (2005). Dynamics of rotating systems. Springer.
5. Muszynska, A. (2005). Rotordynamics. Taylor & Francis.
6. Vance, J. M., Zeidan, F. Y., & Murphy, B. G. (2010). Machinery vibration and rotordynamics.

John Wiley & Sons.

7. Ma, Y., Lu, Y., & Zhao, Z. (2020). Dynamic balancing of rotor system using active control strategy based on moving masses. *Journal of Sound and Vibration*, 471, 115214. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115214>
8. Zhang, Z., & Han, C. (2018). Experimental study on adaptive dynamic balancing of rotors using mobile masses. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 108, 192–206. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.02.008>
9. Lee, C. W. (2009). *Vibration analysis of rotating machinery*. Springer.
10. Mitra, M., & Kumar, S. (2017). Real-time balancing of flexible rotors using moving masses and sensors. *International Journal of Rotating Machinery*, 2017, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/6791432>
11. NASA. (2022, May 10). Rotor dynamics and imbalance analysis. NASA Glenn Research Center. <https://www.nasa.gov/glenn/research/rotor-dynamics/>
12. Engineering Toolbox. (2021). Vibration analysis and balancing of rotating machinery. https://www.engineeringtoolbox.com/vibration-analysis-rotating-machinery-d_1726.html
13. Siemens. (2020). Smart rotor balancing solutions for industry 4.0. <https://new.siemens.com/global/en/products/services/rotor-balancing.html>
14. SKF. (2023). Dynamic rotor balancing and monitoring systems. <https://www.skf.com/group/products/condition-monitoring/dynamic-balancing>
15. MATLAB & Simulink. (2023). Rotor dynamics simulation and modeling. <https://www.mathworks.com/solutions/rotor-dynamics.html>