DOI: 10.65322/j.srd.05192026.92

UDK 621.822.6:620.178.16

ELASTIK-DEMPFERLOVCHI PODSHIPNIK TAYANCHLARIDA DINAMIKA VA YEYILISHNING BOG‘LANGAN MODELI VA PODSHIPNIKNI ALMASHTIRISH ORALIG‘INI BASHORAT QILISH

Djurayev A., *t.f.d., professor,*
Toshkent to‘qimachilik va yengil sanoat 665nstituti,
Maxmudova Sh.A., *PhD, dotsent,*
E-mail: maxmudovash88@gmail.com
Xo‘jaxmedova X.S.,
E-mail: xolidaxojahmedova@gmail.com,
Toshkent davlat transport universiteti

Annotatsiya*. Maqolada elastik-dempferlovchi podshipnik tayanchli aylanuvchi val uchun zarbali yuklar, podshipnik radial tirqishi va yeyilish o‘rtasidagi teskari bog‘lanishni ifodalovchi dinamika va yeyilishning bog‘langan modeli taklif etilgan. Zarbada eng ko‘p yuklangan sharikdagi kuchning radial tirqishga bog‘liqligi podshipnikning nochiziqli Gers kontakti modeli bilan vaqt sohasida aniqlangan va Archard turidagi yeyilish qonuni bilan birlashtirilgan. Podshipnikni almashtirish oraliqlarining nisbati yeyilish koeffitsienti va zarba chastotasiga bog‘liq bo‘lmagan ko‘rinishda olingan. Ichki (IQT), ikki tomonlama (ITT) va ko‘p qatlamli (KQT) elastik-dempferlovchi podshipnik tayanchlarida almashtirish oralig‘i bazaviy tayanchga nisbatan abraziv yeyilish qonunida 1,14–1,25 marta, kontakt toliqishiga yaqin qonunda 1,45–1,91 marta ortishi aniqlangan (KQT > ITT > IQT). Natijalarni qo‘llash elastik qatlamning issiqlik holati bilan cheklanishi ko‘rsatilgan.*

Аннотация. *Предложена связанная модель динамики и изнашивания для вращающегося вала на упруго-демпфирующих подшипниковых опорах, описывающая обратную связь между ударными нагрузками, радиальным зазором подшипника и износом. Зависимость силы на наиболее нагруженном шарике от зазора определена во временной области по нелинейной модели контакта Герца и объединена с законом изнашивания типа Арчарда. Отношение интервалов замены подшипника получено в виде, не зависящем от коэффициента изнашивания и частоты ударов. Для опор с внутренним (ВСО), двусторонним (ДСО) и многослойным (МСО) упругими слоями интервал замены по сравнению с базовой опорой увеличивается в 1,14–1,25 раза при абразивном изнашивании и в 1,45–1,91 раза при законе, близком к контактной усталости (МСО > ДСО > ВСО). Показано, что применимость результатов ограничена тепловым состоянием упругого слоя.*

Abstract. *A coupled dynamics–wear model is proposed for a rotating shaft on elastic-damping bearing supports, describing the feedback between shock loads, the radial clearance of the bearing and wear. The dependence of the force on the most loaded ball on the clearance is obtained in the time domain with a nonlinear Hertzian contact model and combined with an Archard-type wear law. The ratio of bearing replacement intervals is obtained in a form independent of the wear coefficient and the shock frequency. For supports with an inner (IQT), double-sided (ITT) and multilayer (KQT) elastic layer, the replacement interval increases relative to the base support 1.14–1.25 times for abrasive wear and 1.45–1.91 times for a law close to contact fatigue (KQT > ITT > IQT). The applicability of the results is shown to be limited by the thermal state of the elastic layer.*

Kalit so‘zlar: *elastik-dempferlovchi podshipnik tayanchi, zarbali yuk, radial tirqish, yeyilish, xizmat muddati, nochiziqli kontakt, issiqlik holati.*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.92

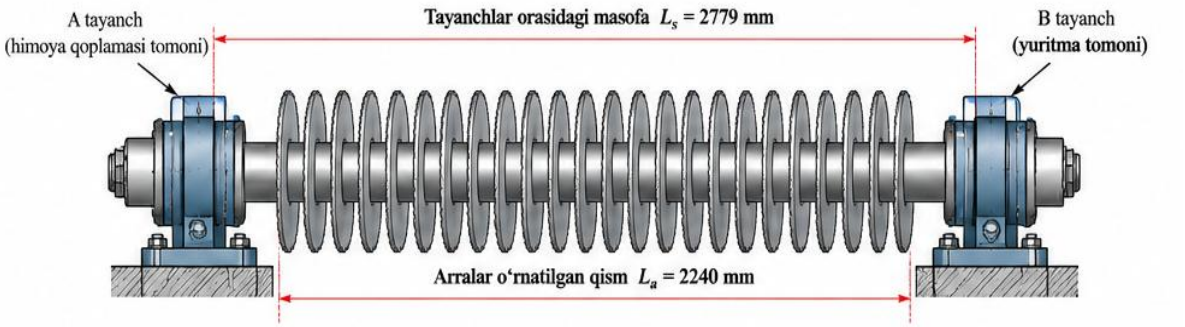
Ключевые слова: *упруго-демпфирующая подшипниковая опора, ударная нагрузка, радиальный зазор, изнашивание, срок службы, нелинейный контакт, тепловое состояние.*

Keywords: *elastic-damping bearing support, shock load, radial clearance, wear, service life, nonlinear contact, thermal state.*

Kirish. Ko‘p diskli uzun valli texnologik mashinalarda dumalash podshipniklarining ishdan chiqishi mashinaning rejadan tashqari to‘xtashining asosiy sabablaridan biridir. Bunda podshipnikni ko‘pincha statik yuk emas, balki ishlov berilayotgan material oqimidan, muvozanatlanmaganlikdan va qo‘shni mexanizmlardan keladigan zarbali va o‘zgaruvchan dinamik yuklar ishdan chiqaradi [1, 2]. Podshipnik yeyilgan sari radial tirqish ortadi; tirqish ortishi esa zarbada kontakt kuchlarini oshiradi va yeyilishni tezlashtiradi. Ana shu ijobiy teskari bog‘lanish sababli podshipnik resursini faqat statik yuk bo‘yicha hisoblash (L_{10h}) zarbali yuklar ustun bo‘lgan sharoitda yetarli emas.

Val va korpus orasiga elastik qatlam kiritish zarba kuchini kamaytiradi va shu bilan yuqoridagi bog‘lanishni sekinlashtirishi kutiladi [3, 4]. Avvalgi ishlarimizda poliuretan va kaprolon qatlamli elastik-dempferlovchi podshipnik tayanchlarining bikrligi, xususiy chastotalari va korpusga uzatiladigan kuch ko‘rib chiqilgan [5, 6], ammo bu tayanchlarning podshipnik resursiga ta’siri miqdoriy baholanmagan. Ushbu maqolaning maqsadi – dinamika va yeyilishni bitta modelda bog‘lash va uch xil elastik-dempferlovchi podshipnik tayanchida podshipnikni almashtirish oralig‘ining o‘zgarishini baholash.

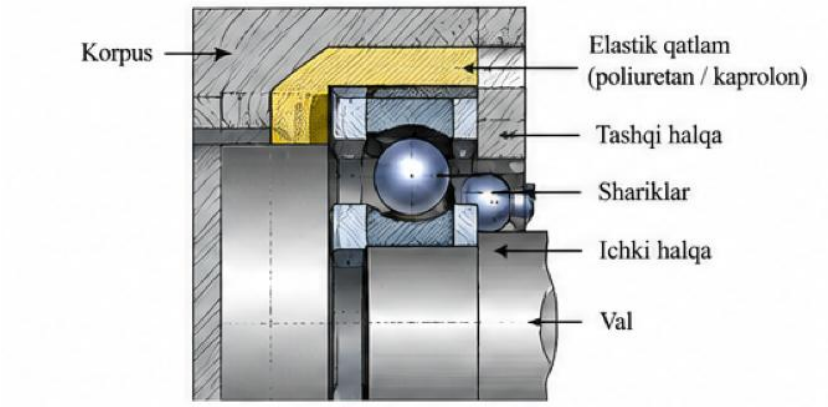
Tayanchlar va hisoblash modeli. Hisob ko‘p diskli val (5DP-130 arrali silindri: 130 ta disk, tayanchlar orasidagi masofa 2779 mm, disklar o‘rnatilgan qism 2240 mm, yig‘ma massasi 265,9 kg, ishchi tezlik 730 ayl/min; 1-rasm) va bir qatorli radial sharikli podshipnik (d×D×B = 70×125×24 mm, Z = 10) uchun bajarildi.



1-rasm. Tadqiqot obyektining sxemasi: 5DP-130 arrali silindri (130 ta disk)

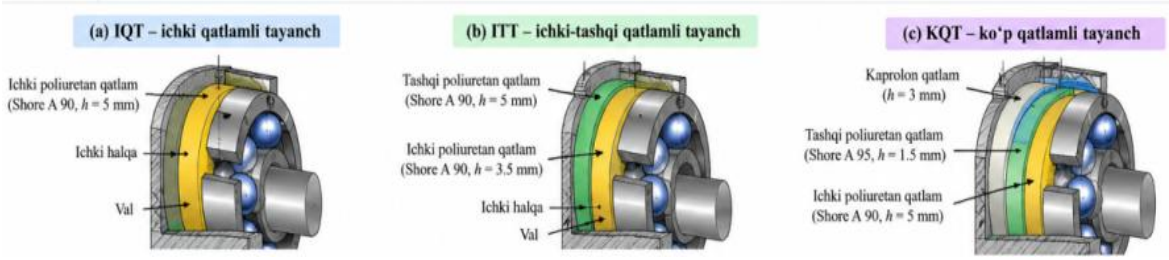
Elastik-dempferlovchi podshipnik tayanchining umumiy g‘oyasi – podshipnik va korpus (yoki val) orasiga poliuretan yoki kaprolondan tayyorlangan elastik qatlam kiritish (2-rasm).

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.92



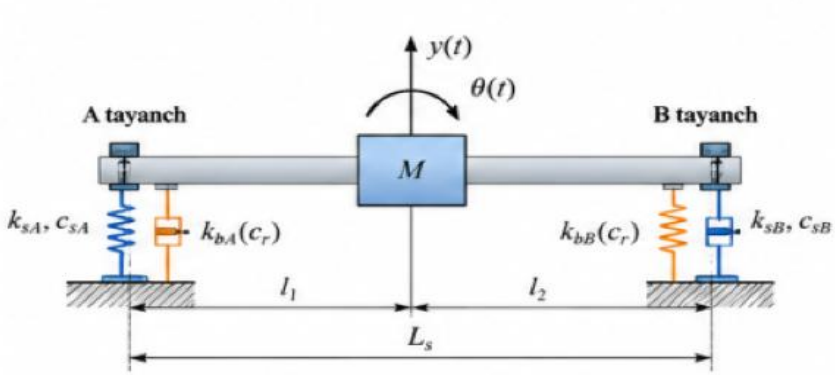
2-rasm. Elastik qatlamli podshipnik tayanchining umumiy konstruktiv sxemasi (kesim)

Uch xil elastik-dempferlovchi podshipnik tayanchi qaraldi: IQT – poliuretan qatlam val va ichki halqa orasida joylashgan va val bilan birga aylanadi; ITT – yopishtirilgan ichki va presslangan tashqi qatlam podshipnikni ikki tomondan o‘raydi; KQT – poliuretan va kaprolon qatlamlardan iborat ko‘p qatlamli paket tashqi halqa va korpus orasiga presslangan. Konstruksiyalar 3-rasmda ko‘rsatilgan. Bazaviy tayanch sifatida elastik qatlamsiz oddiy tayanch olindi.



3-rasm. Elastik-dempferlovchi podshipnik tayanchlarining konstruksiyalari: a) IQT; b) ITT; c) KQT

Tizimning hisoblash sxemasi 4-rasmda keltirilgan: har bir tayanch elastik qatlam (k_s, c_s) va radial tirqishga bog‘liq podshipnik kontakti ($k_b(c_r)$) bo‘g‘inlaridan iborat bo‘lib, ular kuch uzatish zanjirida ketma-ket ulangan. Rasmda val soddalashtirilgan ko‘rinishda (M massa, y siljish va θ burilish) berilgan; hisoblarda esa val Eyler–Bernulli chekli elementlari bilan, tayanchlar ketma-ket ulangan bo‘g‘inlar zanjiri (elastik qatlam – oraliq massa – podshipnik kontakti) bilan modellashtirildi [5].



4-rasm. Val–podshipnik–elastik tayanch tizimining dinamik modeli

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.92

Sharik va halqa yo‘li orasidagi kontakt kuchi Gers qonuni bilan ifodalanadi:

$$Q_i = K\,\delta_i^{3/2}, \qquad \delta_i = u_r\cos\psi_i - \frac{c_r}{2}, \qquad Q_i = 0 \;\; (\delta_i \le 0) \tag{1}$$

bu yerda K – sharikli kontaktning yuk-deformatsiya koeffitsienti; u_r – halqalarning nisbiy radial siljishi; ψ_i – i-sharikning burchak koordinatasi; c_r – radial tirqish. Tayanch reaksiyasi yuklangan shariklar bo‘yicha $Q_i\cos\psi_i$ yig‘indisi sifatida topiladi. Kontaktning nochiziqliligi dinamik kuch statik reaksiyaning 94–99 % iga yetganda (1230–1300 N) namoyon bo‘ladi: shu chegaradan keyin shariklarning bir qismi yuksizlanadi va ekvivalent kontakt bikrligi 0,38–0,84 k_0 gacha pasayadi. Shu sababli zarbali yuklar chiziqli model bilan emas, (1) bo‘yicha vaqt sohasida hisoblandi. Zarba sifatida arra paketiga qo‘yilgan 20 kN amplitudali, 0,5 ms davomiylikdagi yarim sinusoidal impuls olindi.

Yeyilgan podshipnikda (c_r = 40 mkm) elastik tayanchlar korpusga uzatiladigan kuchni 1,42–1,59 marta, eng ko‘p yuklangan sharikdagi kuchni esa 1,15–1,35 marta kamaytiradi. Sharik kuchining korpus kuchiga nisbatan kamroq pasayishi zarba energiyasining asosiy qismi valning past chastotali egilish shakllari orqali uzatilishi bilan izohlanadi: bu shakllarda tayanch deyarli qo‘zg‘almaydi va elastik qatlam ularni to‘liq yumshata olmaydi.

Dinamika va yeyilishning bog‘langan modeli. Radial tirqishning o‘sish tezligi zarbadagi kontakt yuklanishining funksiyasi sifatida Archard qonuni [6] asosida yoziladi:

$$\frac{dc_r}{dt} = \kappa_w\,\nu_z\left(\frac{Q_{max}(c_r)}{Q_0}\right)^m, \qquad T_c = \frac{1}{\kappa_w\nu_z}\int_0^{c_r^*}\left(\frac{Q_0}{Q_{max}(c_r)}\right)^m dc_r \tag{2}$$

bu yerda κ_w – materiallar va moylash sharoitiga bog‘liq yeyilish koeffitsienti; ν_z – zarbali yuklar chastotasi; $Q_{max}(c_r)$ – zarbada eng ko‘p yuklangan sharikdagi kuch; Q_0 – taqqoslash kuchi; m – yeyilish mexanizmini ifodalovchi daraja ko‘rsatkichi (m = 1 – abraziv yeyilish, m = 3 – kontakt toliqishiga yaqin qonun [2]); c_r^* = 40 mkm – podshipnikni almashtirish chegarasi; T_c – almashtirish oralig‘i.

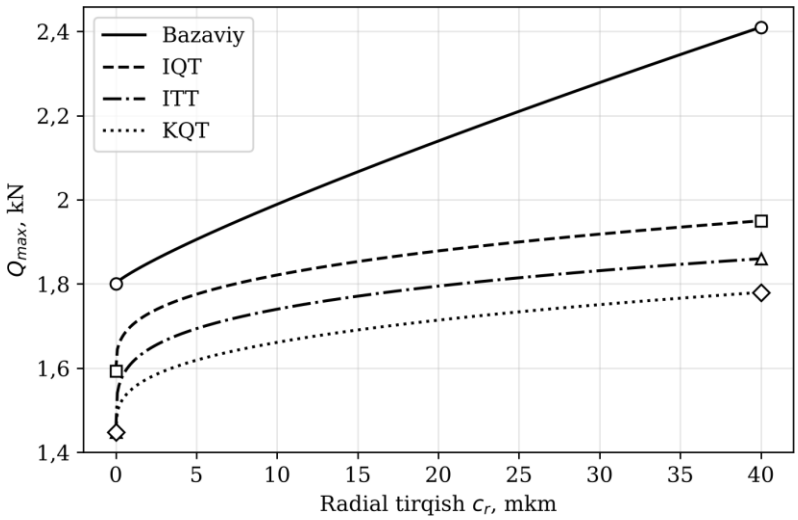
κ_w va ν_z ni ishlab chiqarish sharoitida aniqlash qiyin, lekin ular barcha tayanchlar uchun bir xil, chunki podshipnik, moylash va texnologik yuklar o‘zgarmaydi. Shu sababli (2) dan almashtirish oraliqlarining nisbati ularsiz aniqlanadi:

$$\frac{T_c}{T_{c,baz}} = \frac{\int_0^{c_r^*} Q_{max}^{-m}(c_r)\,dc_r}{\int_0^{c_r^*} Q_{max,baz}^{-m}(c_r)\,dc_r} \tag{3}$$

$Q_{max}(c_r)$ bog‘lanish har bir tayanch uchun c_r = 0, 10, 20, 30 va 40 mkm da (1) model bo‘yicha vaqt sohasida hisoblandi, oraliq qiymatlar interpolyatsiya qilindi va (3) dagi integrallar sonli hisoblandi.

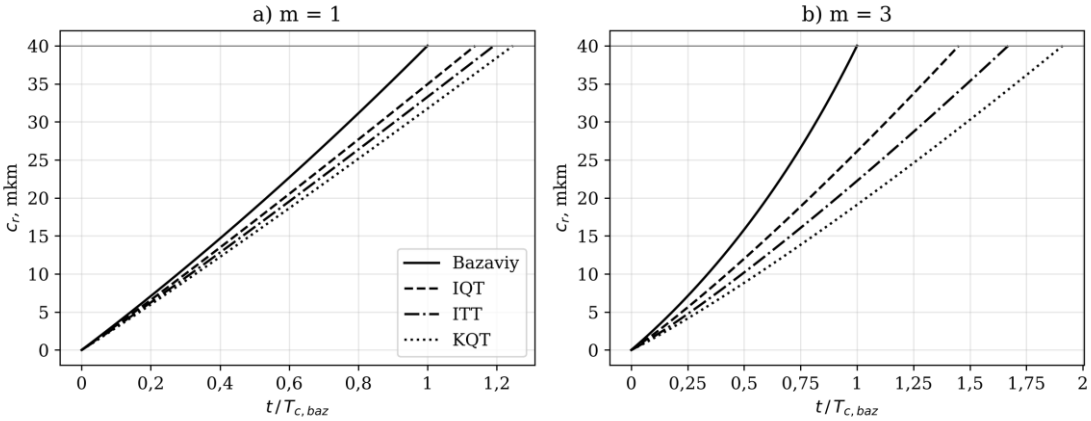
Natijalar va ularning tahlili. Zarbada eng ko‘p yuklangan sharikdagi kuchning radial tirqishga bog‘liqligi 5-rasmda keltirilgan. Bazaviy tayanchda sharikdagi zarba kuchi tirqishsiz holatda 1801 N ni tashkil etadi va tirqish 40 mkm gacha ortganda 1,34 marta oshadi. Elastik tayanchlarda zarba kuchi tirqishsiz holatda 1448–1593 N, ya’ni bazaviydagidan 1,13–1,24 marta kichik bo‘lib, 40 mkm da 1781–1949 N ga yetadi. Demak, elastik tayanchli podshipnik yeyilgan holatda ham bazaviy tayanchdagi yangi podshipnik bilan taqqoslanadigan yuklanishda ishlaydi. Elastik tayanchlarda kuch tirqishning dastlabki 5–10 mkm ida tezroq, keyin sekin ortadi: tirqish paydo bo‘lishi bilan yuklangan shariklar soni kamayadi, keyingi o‘sishni esa elastik qatlam yumshatadi. Bazaviy tayanchda kuch butun oraliqda deyarli bir tekis ortib boradi.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.92



5-rasm. Zarbada (20 kN, 0,5 ms) eng ko‘p yuklangan sharikdagi kuchning radial tirqishga bog‘liqligi (belgilar – c_r = 0 va 40 mkm dagi hisob qiymatlari, chiziqlar – oraliq qiymatlar interpolyatsiyasi)

Tirqishning (2) tenglamani integrallash natijasida olingan vaqt bo‘yicha o‘sishi 6-rasmda, (3) bo‘yicha almashtirish oraliqlarining nisbati 1-jadvalda keltirilgan.



6-rasm. Radial tirqishning nisbiy vaqt $t/T_{c,baz}$ bo‘yicha o‘sishi: a) m = 1; b) m = 3

1-jadval

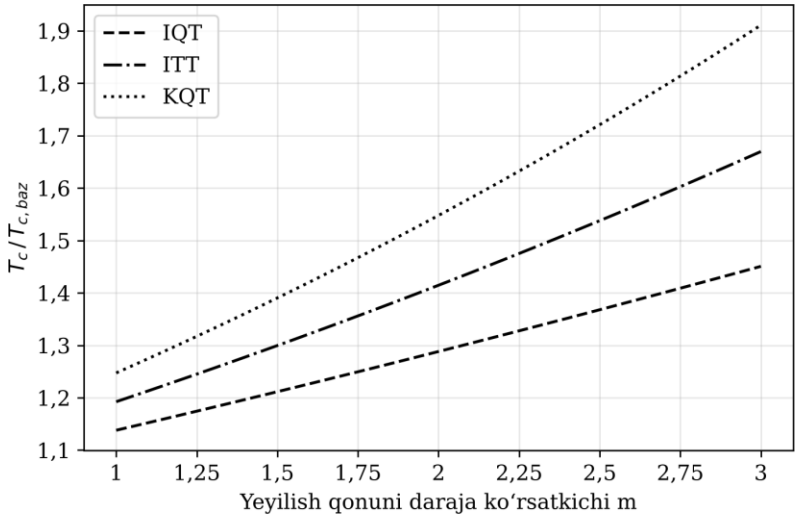
Podshipnikni almashtirish oralig‘ining bazaviy tayanchga nisbati $T_c/T_{c,baz}$

Yeyilish qonuni	Bazaviy	IQT	ITT	KQT
m = 1 (abraziv yeyilish)	1,00	1,14	1,19	1,25
m = 3 (kontakt toliqishi)	1,00	1,45	1,67	1,91

Almashtirish oralig‘i abraziv yeyilish qonunida 1,14–1,25 marta, kontakt toliqishi qonunida 1,45–1,91 marta ortadi; samara tartibi KQT > ITT > IQT. 6-rasmdan ko‘rinadiki, m = 3 da bazaviy tayanchda tirqish o‘sishi vaqt o‘tishi bilan tezlashadi (egri chiziq yuqoriga egiladi), elastik tayanchlarda esa deyarli chiziqli bo‘lib qoladi: elastik qatlam tirqish ortishi bilan kuchning o‘sishini cheklab, yeyilishning o‘z-o‘zini tezlashtirishini susaytiradi. Samaraning yeyilish mexanizmiga bog‘liqligi 7-rasmda ko‘rsatilgan: m ortishi bilan nisbat monoton ortadi, oraliq

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.92

qiymat m = 2 da IQT, ITT va KQT uchun mos ravishda 1,29; 1,41 va 1,55 ni tashkil etadi. Kontakt toliqishiga yaqin qonunda samara kuchliroq, chunki yeyilish tezligi kuchning uchinchi darajasiga proporsional va zarba kuchining kichik pasayishi ham sezilarli samara beradi.



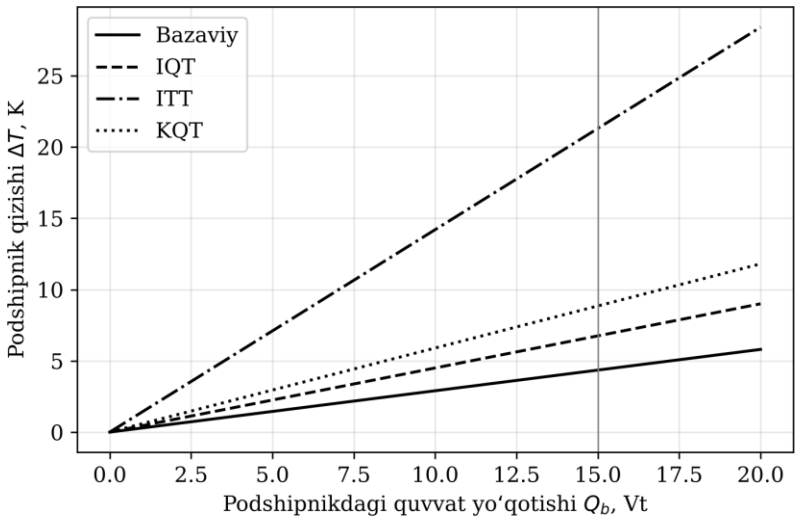
7-rasm. Almashtirish oraliqlari nisbatining yeyilish qonuni daraja ko‘rsatkichi m ga bog‘liqligi

Shunga qaramay, bu ortish chiziqli model bo‘yicha yuqori chastotali kontakt kuchining kamayishidan ancha kichik: yuqorida ta’kidlanganidek, zarba energiyasining asosiy qismi past chastotali val shakllari orqali o‘tadi.

Olingan natija statik yuk bo‘yicha hisoblangan nominal resurs L_{10h} ning o‘rnini bosmaydi; u zarbali yuklar ustun bo‘lgan sharoitda tayanch turlarining nisbiy samarasini ifodalaydi. κ_w va ν_z ishlab chiqarishdagi kuzatuvlar (podshipniklarni almashtirish jurnali, tirqishni davriy o‘lchash) bo‘yicha aniqlanganda (2) bo‘yicha absolyut almashtirish oralig‘ini ham hisoblash mumkin.

Issiqlik holati cheklovi. Elastik qatlamdagi energiya dissipatsiyasi tayanchning qizishini oshiradi. Podshipnikning statsionar qizishi $\Delta T = Q_b R_{ekv}$ bilan baholandi, bu yerda Q_b – podshipnikdagi quvvat yo‘qotishi, R_{ekv} – val va korpus orqali parallel issiqlik yo‘llarining ekvivalent qarshiligi (bazaviy tayanchda 0,29, IQT da 0,45, KQT da 0,59, ITT da 1,42 K/Vt). 15 Vt quvvat yo‘qotilganda podshipnikning qizishi bazaviy tayanchda 4,3 K, IQT da 6,8 K, KQT da 8,8 K, ITT da 21,3 K ni tashkil etadi (8-rasm): ITT da podshipnik ikki tomondan issiqlikni yomon o‘tkazuvchi qatlam bilan o‘ralgan.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.92



8-rasm. Podshipnik qizishining quvvat yo‘qotishiga bog‘liqligi (vertikal chiziq – 15 Vt)

Qizish ITT da rezonans zaxirasini kamaytiradi, KQT da esa oshiradi; ITT da 730 ayl/min da qatlam harorati 30 °C dan oshganda harorat va chastotaga bog‘liq termoviskoelastik model talab etiladi. KQT dagi kaprolon qatlami uchun shishalanish harorati 46–60 °C bo‘lib, undan yuqorida saqlanish moduli taxminan 3,3 GPa dan 2 GPa gacha va undan ham pastga tushadi [7]; poliuretan uchun ishchi harorat −40…+110 °C [8]. Shuning uchun (2)–(3) bo‘yicha baho qatlam harorati shu chegaralardan oshmagan sharoitda qo‘llanadi. KQT eng katta resurs samarasini nisbatan kichik qizish bilan birga beradi, ITT esa tezlik oralig‘i keng va issiqlik chiqarish yaxshi bo‘lgan sharoitda maqsadga muvofiq.

Xulosa. Zarbali yuk, radial tirqish va yeyilish o‘rtasidagi teskari bog‘lanishni ifodalovchi dinamika va yeyilishning bog‘langan modeli taklif etildi; podshipnikni almashtirish oraliqlarining nisbati yeyilish koeffitsienti va zarba chastotasiga bog‘liq bo‘lmagan (3) ko‘rinishda olindi.

Elastik-dempferlovchi podshipnik tayanchlari yeyilgan podshipnikda korpusga uzatiladigan zarba kuchini 1,42–1,59 marta, sharikdagi kuchni 1,15–1,35 marta kamaytiradi; buning natijasida podshipnikni almashtirish oralig‘i tayanch turiga qarab abraziv yeyilishda 1,14–1,25 marta, kontakt toliqishiga yaqin qonunda 1,45–1,91 marta ortadi (KQT > ITT > IQT).

Natijalarni qo‘llash elastik qatlamning issiqlik holati bilan cheklanadi: ITT da 730 ayl/min da qatlam harorati 30 °C dan, KQT ning kaprolon qatlamida shishalanish haroratidan (46–60 °C) oshmasligi kerak. Model koeffitsientlari (κ_w, ν_z) va hisoblangan nisbatlar ishlab chiqarish sinovlarida tekshirilishi rejalashtirilgan.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Harris T.A., Kotzalas M.N. Rolling Bearing Analysis. 5th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2006.

2. Vance J.M., Zeidan F.Y., Murphy B. Machinery Vibration and Rotordynamics. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

3. Makhmudova Sh. Modeling and analysis of interactions in the rotor–bearing–housing system under variable loads // Material and Mechanical Engineering Technology. – 2026. – № 1.

4. Makhmudova S., Romanenko S. Comparative analysis of rigid and polyurethane-modified bearing supports in rotor systems // AIP Conference Proceedings. – 2026. – Vol. 3484. – 050007. https://doi.org/10.1063/12.0044802

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.92

5. Maxmudova Sh.A., Djurayev A., Jo‘rayev D.J. Arrali silindr uchun poliuretan va kaprolon qatlamli ko‘p qatlamli elastik-dempferlovchi podshipnik tayanchi // Qurilish va ta’lim ilmiy jurnali. – 2026. – T. 5, № 5. – B. 609–614.

6. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces // Journal of Applied Physics. – 1953. – Vol. 24, No. 8. – P. 981–988.

7. Song P., Trivedi A., Hawkins N., Graham A., Chapman D., Siviour C.R. Thermomechanical characterisation of polyamide 6 over a wide range of rates and temperatures // Polymer. – 2024. – Vol. 300. – 126907.

8. Белкин А.Е., Даштиев И.З., Семенов В.К. Математическая модель вязкоупругого поведения полиуретана при сжатии с умеренно высокими скоростями деформирования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2014. – № 6. – С. 44–58.