



VIBRATIONS KONVEYER ISHCHI ORGANING TEBRANISH AMPLITUDASI VA CHASTOTASINI MAQBULLASHTIRISH USULINI ISHLAB CHIQISH

Muxammad Solix Turg'unov

Annotatsiya: Mazkur maqolada vibratsion konveyer ishchi organining tebranish amplitudasi va chastotasini maqbullashtirish usulini ishlab chiqish masalasi ko'rib chiqilgan. Vibratsion konveyerlarning samaradorligi ishchi organ harakatining kinematik ko'rsatkichlari, tashilayotgan materialning fizik-mexanik xususiyatlari, ishchi sirt bilan material o'rtasidagi ishqalanish, elastik osma elementlarning bikrligi hamda qo'zg'atuvchi mexanizm parametrlariga bevosita bog'liq. Shu sababli amplituda va chastotani alohida parametrlar sifatida emas, balki o'zaro bog'langan dinamik kattaliklar sifatida optimallashtirish zarur. Tadqiqotning maqsadi tashish unumdorligini oshirish, energiya sarfini kamaytirish, konstruktiv elementlardagi dinamik yuklanishlarni cheklash va barqaror ish rejimini ta'minlashga xizmat qiluvchi ko'p mezonli maqbullashtirish usulini taklif etishdan iborat. Tadqiqot metodologiyasi mexanik tizimning harakat tenglamalarini tuzish, garmonik tebranishlarning kinematik parametrlarini aniqlash, materialning ishchi sirt bo'ylab harakatlanish shartlarini baholash, cheklovli optimallashtirish masalasini shakllantirish hamda sonli hisoblash algoritmini ishlab chiqishga asoslanadi. Ishchi organ amplitudasi, tebranish chastotasi va tebranish yo'nalishi bilan bog'liq parametrlar optimallashtirishning asosiy o'zgaruvchilari sifatida qoraladi. Maqsad funksiyasida tashish tezligi va unumdorligi, energiya sarfi hamda dinamik yuklanishlar hisobga olinadi. Taklif etilgan usulning ilmiy-amaliy ahamiyati konveyerning texnologik vazifasi va material xususiyatlariga mos optimal ish rejimini aniqlash imkoniyati bilan belgilanadi. Maqolada keltirilgan model va algoritm nazariy-metodik yechim bo'lib, uning muayyan uskuna uchun aniqligi tajriba yoki ishonchli ishlab chiqarish ma'lumotlari yordamida tekshirilishi lozim.

Kalit so'zlar: vibratsion konveyer, ishchi organ, tebranish amplitudasi, tebranish chastotasi, maqbullashtirish, matematik modellashtirish, dinamik yuklanish, tashish unumdorligi, energiya samaradorligi, optimallashtirish algoritmi, mexanik tebranishlar, sochiluvchan material.

KIRISH

Zamonaviy sanoat korxonalarida sochiluvchan, donador, kukunsimon va ayrim donalangan materiallarni texnologik jarayonning bir bosqichidan ikkinchisiga uzluksiz uzatish ishlab chiqarish samaradorligini belgilovchi muhim omillardan biri hisoblanadi. Metallurgiya, konchilik, qurilish materiallari sanoati, kimyo sanoati, qishloq xo'jaligi mahsulotlarini qayta ishlash hamda mashinasozlik korxonalarida qo'llaniladigan transport qurilmalari orasida vibratsion konveyerlar o'zining ixcham

konstruksiya, materialni nisbatan bir tekis uzatish imkoniyati, texnologik liniyalarga moslashuvchanligi va ayrim hollarda materialni bir vaqtning o'zida saralash yoki taqsimlash jarayonlari bilan birlashtirish imkoniyati bilan ajralib turadi. Vibratsion konveyerning ishlash prinsipi ishchi organ, ya'ni lotok yoki tarnovning davriy tebranishi natijasida tashilayotgan materialga inersiya kuchlari ta'sir etishi va uning ishchi sirt bo'ylab yo'nalgan harakatga kelishiga asoslanadi. Biroq ishchi organning tebranishi materialning o'z-o'zidan bir xil tezlikda siljishini kafolatlamaydi. Materialning harakatlanish xarakteri tebranish amplitudasi, chastotasi, tebranish yo'nalishining gorizontallikka nisbatan burchagi, ishchi sirtning qiyalik darajasi, ishqalanish koeffitsiyenti, material zarrachalarining o'lchami va shakli, namligi, uyma zichligi hamda qatlam qalinligi kabi omillarning birgalikdagi ta'siri bilan belgilanadi. M. A. Parameswaran va S. Ganapathy tomonidan vibratsion tashishning tahlili va loyihalashiga bag'ishlangan sharhda ham vibratsion tashish jarayonining murakkabligi, zarrachalarning davriy harakati va konveyer konstruksiyasini hisoblash bilan bog'liq masalalar yoritilgan [1]. Keyingi tadqiqotlarda matematik modellashtirish, sonli integrallash va tajriba natijalarini o'zaro solishtirish orqali ishchi organ harakatining material tashish tezligiga ta'sirini aniqlashga e'tibor qaratilgan [2; 3]. Ushbu izlanishlar vibratsion konveyerning ishlash ko'rsatkichlarini faqat bitta parametрни o'zgartirish orqali ishonchli tarzda yaxshilash qiyinligini ko'rsatadi. Masalan, tebranish amplitudasining oshirilishi materialga ta'sir etuvchi inersiya kuchlarini kuchaytirishi mumkin, biroq shu bilan birga tayanchlar, prujinalar, biriktiruvchi qismlar va qo'zg'atuvchi mexanizmga tushadigan dinamik yuklanishlarni ham oshiradi. Chastotaning ortishi vaqt birligida tebranish sikllari sonini ko'paytiradi, lekin tezlanish amplitudasi chastotaning kvadratiga mutanosib ravishda o'sishi sababli energiya sarfi, vibratsiya darajasi va konstruktiv mustahkamlik bo'yicha cheklovlar dolzarb bo'lib qoladi. Bundan tashqari, amplituda va chastota o'rtasidagi bog'liqlikni e'tiborsiz qoldirish materialning sirpanish, sakrash, ishchi sirt bilan kontaktni yo'qotish yoki beqaror harakatlanish rejimiga o'tishiga olib kelishi mumkin. Z. V. Despotović va hammualliflar elektromagnit qo'zg'atishli rezonansli chiziqli vibratsion konveyerning matematik modelini ishlab chiqib, simulyatsiya natijalarini real sanoat qurilmasidan olingan tajriba natijalari bilan taqqoslash mumkinligini ko'rsatgan [2]. Donador materiallarning vibratsion sirt bo'ylab harakatlanishi bo'yicha olib borilgan tadqiqotlarda ham transport tezligi amplituda va chastotadan tashqari kontakt mexanikasi, ishqalanish va zarrachalarning o'zaro ta'siriga bog'liqligi ta'kidlanadi [3]. 2022-yilda chop etilgan tadqiqotda don materiallarini tashuvchi vibratsion mashinaning ish rejimlari matematik modellashtirilgan va amplitudaning tashish tezligiga ta'siri o'rganilgan [4]. 2024-yildagi izlanishlarda esa tebranish amplitudasi, yo'nalish burchagi, konveyer sirtining qiyaligi va vibratsiya intensivligi kabi parametrlarning material harakatiga ta'siri sonli modellashtirish hamda javob sirtini tahlil qilish yondashuvlari orqali o'rganilgan [5]. Ushbu ilmiy natijalar vibratsion konveyer ishchi organining amplitudasi va chastotasini birgalikda maqbullashtirish zarurligini asoslaydi. Mazkur maqolaning dolzarbligi shundan iboratki, amaliyotda ish rejimi ko'pincha ishlab chiqaruvchi tomonidan tavsiya etilgan qiymatlar, operator tajribasi yoki dastlabki sozlashlar asosida tanlanadi, ammo material xususiyatlari va

texnologik talablar o'zgarganda ushbu qiymatlar eng maqbul natijani bermasligi mumkin. Shuning uchun ishchi organing dinamik xususiyatlari, material tashish ko'rsatkichlari va energiya sarfini yagona hisoblash tizimida birlashtiruvchi maqbullashtirish usulini ishlab chiqish muhim ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi. Tadqiqotning maqsadi vibratsion konveyer ishchi organining tebranish amplitudasi va chastotasini o'zaro bog'langan parametrlar sifatida tanlash, tashish unumdorligi va energiya samaradorligini oshirish, shuningdek, konstruktiv va texnologik cheklovlarni hisobga olish imkonini beruvchi matematik model hamda optimallashtirish algoritmini ishlab chiqishdan iborat. Ushbu maqsadga erishish uchun vibratsion konveyerning dinamik tizimini tavsiflash, amplituda va chastota o'rtasidagi kinematik bog'lanishni aniqlash, materialning ishchi sirt bo'ylab harakatlanish shartlarini ifodalash, optimallashtirish mezonlarini shakllantirish, texnologik va konstruktiv cheklovlarni belgilash hamda taklif etilgan usulni tajribada tekshirish tartibini ishlab chiqish vazifalari qo'yildi. Tadqiqot obyekti sifatida elastik tayanchlar orqali asosga biriktirilgan va davriy kuch ta'sirida harakatlanuvchi vibratsion konveyer ishchi organi qaraladi. Tadqiqot predmeti esa ishchi organ amplitudasi, tebranish chastotasi, dinamik tezlanish, materialning o'rtacha tashish tezligi, energiya sarfi va konstruktiv yuklanishlar o'rtasidagi funksional bog'lanishlardan iborat. Maqolaning ilmiy yangiligi amplituda va chastotani mustaqil ravishda emas, balki texnologik samaradorlik, energiya sarfi va mexanik ishonchlilikni birgalikda hisobga oluvchi cheklovli ko'p mezonli optimallashtirish masalasi sifatida shakllantirish taklifida namoyon bo'ladi. Shu bilan birga, ilmiy yangilikning yakuniy darajasi mavjud modellar bilan batafsil taqqoslash, aniq konstruksiya uchun hisoblash va tajriba natijalarini olish orqali tasdiqlanishi lozim.

2. MATERIALLAR VA TADQIQOT USULLARI

Tadqiqot metodologiyasi vibratsion konveyer ishchi organining mexanik harakatini matematik modellash, garmonik tebranishlarning kinematik parametrlarini hisoblash, materialning ishchi sirt bilan o'zaro ta'sirini baholash va cheklovli optimallashtirish usullarini birlashtirishga asoslanadi. Modelni shakllantirishda ishchi organ dastlab bir ekvivalent massa bilan ifodalanadigan mexanik tizim sifatida qabul qilinadi; bu massa lotokning o'z massasini, unga biriktirilgan elementlarni va ishchi rejimga qarab material massasining dinamik jihatdan qatnashuvchi qismini hisobga oladi. Tizimning elastik xususiyatlari ekvivalent bikrlilik koeffitsiyenti, energiya yo'qotishlari esa ekvivalent so'nish koeffitsiyenti orqali ifodalanadi. Bunday soddalashtirish dastlabki parametrik tahlil uchun qulay, biroq ko'p erkinlik darajasiga ega bo'lgan, fazoviy tebranishlar kuzatiladigan yoki material massasi sezilarli o'zgaradigan konveyerlarda batafsilroq model talab etiladi. Ishchi organ harakatining asosiy tenglamasi quyidagi ko'rinishda yoziladi: $(m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t))$, bu yerda (m) — tebranishda qatnashuvchi ekvivalent massa, (c) — ekvivalent viskoz so'nish koeffitsiyenti, (k) — elastik osma tizimning ekvivalent bikrligi, (F_0) — qo'zg'atuvchi kuch amplitudasi, (x) — ishchi organ koordinatasi, (ω) — burchak chastota, (t) — vaqt. Chastota bilan davriy takrorlanish soni o'rtasidagi bog'lanish $(\omega = 2\pi f)$ orqali aniqlanadi, bunda (f) — chastota, Hz; (ω) — rad/s. Barqarorlashgan majburiy tebranish

rejimida ishchi organ amplitudasi ideal chiziqli bir erkinlik darajali model uchun quyidagicha ifodalanadi: $(A=F_0/\sqrt{(k-m\omega^2)^2+(c\omega)^2})$. Ushbu munosabatdan ko'rinadiki, amplituda faqat qo'zg'atuvchi kuchga emas, balki chastota, massa, birlilik va so'nish koeffitsiyentlariga ham bog'liq. Shuning uchun amplituda va chastotani optimallashtirishda qo'zg'atuvchi mexanizmning imkoniyatlari, ishchi organ massasining o'zgarishi va rezonansga yaqin rejimlar alohida nazorat qilinishi zarur. Tizimning erkin tebranishdagi xususiy burchak chastotasi $(\omega_n=\sqrt{k/m})$, xususiy chastotasi esa $(f_n=(1/2\pi)\sqrt{k/m})$ formulalari orqali aniqlanadi. Majburiy tebranish chastotasining xususiy chastotaga nisbati $(\lambda=\omega/\omega_n)$ sifatida belgilanadi. Ushbu nisbatning qiymati dinamik javobning xarakterini belgilovchi muhim parametr hisoblanadi. Biroq amaliy vibratsion konveyerlarda ishchi chastotani rezonansdan uzoq tanlash yoki rezonansga yaqin ishlash haqidagi qaror universal qoida bilan belgilanmaydi; u qurilma konstruksiyasi, boshqaruv tizimi, start-stop jarayoni, so'nish darajasi va ishlab chiqaruvchi tomonidan belgilangan ekspluatatsiya cheklovlariga muvofiq qabul qilinadi. Ishchi organ garmonik harakat qilgan holatda uning siljishi $(x(t)=A\sin(\omega t+\varphi))$, tezligi $(\dot{x}(t)=A\omega\cos(\omega t+\varphi))$, tezlanishi esa $(\ddot{x}(t)=-A\omega^2\sin(\omega t+\varphi))$ bilan ifodalanadi. Demak, tezlik amplitudasi $(v_{\max}=A\omega)$, tezlanish amplitudasi esa $(a_{\max}=A\omega^2)$ ga teng. Mazkur munosabatlar maqbullashtirish masalasida muhim ahamiyatga ega, chunki amplituda va chastotaning birgalikdagi ortishi materialga uzatiladigan inersiya ta'sirini kuchaytirishi bilan bir qatorda mexanik tizimdagi dinamik yuklanishlarni ham oshirishi mumkin. Ishchi organ tebranishining material tashishga ta'sirini dastlabki baholash uchun vertikal yo'nalishdagi tezlanish amplitudasining erkin tushish tezlanishiga nisbati sifatida ifodalanuvchi o'lchamsiz ko'rsatkichdan foydalanish mumkin: $(\Gamma=A_z\omega^2/g)$, bunda (A_z) — vertikal tebranish amplitudasi, (g) — erkin tushish tezlanishi. Ushbu parametr materialning ishchi sirt bilan kontakt holatini tahlil qilishda qo'llanadi, biroq uning o'zi materialning albatta sakrashini yoki sirpanishini to'liq aniqlamaydi. Buning uchun tebranish yo'nalishi, ishqalanish, sirt qiyaligi va kontakt kuchlari ham hisobga olinishi kerak. Materialni soddalashtirilgan moddiy nuqta sifatida qarash mumkin bo'lgan holatda, ishchi sirt bilan kontakt saqlanayotgan davr uchun tangensial harakat tenglamasi $(m_p\ddot{s}=F_t-F_f+m_pg\sin\alpha)$ ko'rinishida yozilishi mumkin; bu yerda (m_p) — zarracha massasi, (s) — ishchi sirt bo'ylab koordinata, (F_t) — vibratsiya tufayli yuzaga keladigan tangensial ta'sirning tegishli proyeksiyasi, (F_f) — ishqalanish kuchi, (α) — konveyer ishchi sirtining gorizontall tekislikka nisbatan qiyalik burchagi. Sirpanish rejimida quruq ishqalanishning soddalashtirilgan ifodasi $(F_f=\mu N)$ bilan beriladi; bunda (μ) — ishqalanish koeffitsiyenti, (N) — normal reaksiya kuchi. Kontakt uzilganda ushbu tenglama o'zgartiriladi va zarracha harakati parvoz fazasi uchun alohida integrallanadi, qayta kontakt yuzaga kelganda esa zarba yoki kontakt deformatsiyasi modeli qo'llanadi. Shu sababli materialning o'rtacha tashish tezligini faqat ishchi organ amplitudasi va chastotasidan iborat yopiq universal formula bilan barcha holatlar uchun aniq ifodalash mumkin emas. Taklif etilayotgan usulda

material	tashish	tezligi
----------	---------	---------

$(v_{\mathrm{tr}} = \Phi(A, f, \beta, \alpha, \mu, \rho_b, d_p, h, \dots))$ ko‘rinishidagi umumlashgan funksional bog‘lanish bilan ifodalanadi; bunda (β) — tebranish yo‘nalishining burchagi, (ρ_b) — materialning uyma zichligi, (d_p) — zarrachalarning xarakterli o‘lchami, (h) — ishchi sirt ustidagi material qatlaminin balandligi. Ushbu funksiya analitik model, sonli integrallash, tajriba natijalari yoki ularning kombinatsiyasi orqali aniqlanishi mumkin. Uzluksiz tashish rejimida massaviy unumdorlik $(Q_m = \rho_b B h_{\mathrm{eff}} v_{\mathrm{tr}})$ orqali taxminiy hisoblanadi, bunda (B) — ishchi organ kengligi, (h_{eff}) — samarali material qatlaminin balandligi. Hajmiy unumdorlik esa $(Q_v = B h_{\mathrm{eff}} v_{\mathrm{tr}})$ bilan ifodalanadi. Ushbu tenglamalar materialning kesim bo‘yicha bir tekis taqsimlanishi va samarali qatlam balandligi hisoblash davrida aniqlangan deb qaralgan soddalashtirilgan holat uchun mos keladi. Real uskunada to‘kilish, qatlamning notekisligi, materialning qayta aylanishi va uzlukli harakat kabi omillar unumdorlikni kamaytirishi mumkin. Energiya sarfini baholash uchun qo‘zg‘atuvchi yuritmaning kirish quvvati yoki mexanik quvvatining o‘rtacha qiymati aniqlanadi. Agar o‘lchash ma’lumotlari mavjud bo‘lsa, elektr yuritmaning kirish quvvati $(P_{\mathrm{in}}(t) = U(t)I(t)\cos\varphi_e(t))$ orqali baholanishi mumkin; bu yerda (U) — kuchlanish, (I) — tok, (φ_e) — kuchlanish va tok orasidagi faza siljishi. Uch fazali tizimda muvozanatlangan rejim uchun tegishli uch fazali quvvat ifodasi qo‘llanadi. Elektr yuritma quvvatini mexanik tebranish quvvatiga teng deb qabul qilish mumkin emas, chunki motor, o‘zgartirgich, mexanik uzatma va elastik tizimda yo‘qotishlar mavjud. Shu sababli maqbullashtirishda energiya mezonlari imkon qadar real elektr o‘lchovlari yoki kalibrlangan yuritma modelidan olinishi lozim. Tadqiqotning hisoblash bosqichida amplituda va chastota optimallashtirish o‘zgaruvchilari sifatida tanlanadi: $(\mathbf{x} = [A, f]^T)$. Zaruratga ko‘ra tebranish burchagi, qo‘zg‘atuvchi kuch, faza siljishi yoki ishchi sirt qiyaligi ham qo‘shimcha o‘zgaruvchilar sifatida kiritilishi mumkin. Amplituda va chastota uchun quyi hamda yuqori chegaralar $(A_{\min} \leq A \leq A_{\max})$ va $(f_{\min} \leq f \leq f_{\max})$ ko‘rinishida belgilanadi. Bu chegaralar uskuna pasporti, elastik elementlarning ruxsat etilgan deformatsiyasi, qo‘zg‘atuvchi mexanizm imkoniyatlari, motorning ish rejimi, shovqin va vibratsiya bo‘yicha cheklovlar, shuningdek, tashilayotgan materialning xususiyatlariga asoslanadi. Qo‘shimcha ravishda $(a_{\max} \leq a_{\mathrm{allow}})$, $(F_{\mathrm{dyn}} \leq F_{\mathrm{allow}})$, $(P_{\mathrm{in}} \leq P_{\mathrm{rated}})$ kabi cheklovlar qo‘yiladi. Bu yerda (a_{allow}) — ruxsat etilgan tezlanish chegarasi, (F_{allow}) — konstruktiv element uchun ruxsat etilgan dinamik kuch, (P_{rated}) — yuritmaning nominal quvvati. Mazkur chegaralar umumiy ko‘rinishda berilgan bo‘lib, real qiymatlar konkret uskuna uchun muhandislik hisoblari va texnik hujjatlardan olinishi kerak. Optimallashtirish mezonlari o‘zaro qarama-qarshi bo‘lishi mumkinligi sababli ularni bitta maqsad funksiyasida birlashtirish yoki Pareto maqbulligi asosida alohida ko‘rib chiqish mumkin. Birinchi yondashuvda unumdorlikni oshirish, solishtirma energiya sarfini kamaytirish va dinamik yuklanishni cheklash quyidagi umumlashgan maqsad funksiyasi bilan ifodalanadi: $(J(A, f) = w_Q \text{widetilde}\{Q\}(A, f) - w_E \text{widetilde}\{E\}(A, f) - w_F \text{widetilde}\{F\}(A, f) - w_V \text{widetilde}\{V\}(A, f))$. Bu yerda

(\widetilde{Q}) — normallashtirilgan unumdorlik ko'rsatkichi, (\widetilde{E}) — solishtirma energiya sarfi, (\widetilde{F}) — dinamik yuklanish ko'rsatkichi, (\widetilde{V}) — me'yorlashtirilgan vibratsiya yoki shovqin ko'rsatkichi, (w_Q, w_E, w_F, w_V) — texnologik ustuvorlikka muvofiq tanlanadigan vazn koeffitsiyentlari. Vaznlarning yig'indisini birga tenglashtirish qulay bo'lishi mumkin, lekin bu matematik jihatdan majburiy shart emas. Normallashtirish turli o'lchov birliklariga ega mezonlarni bir-biri bilan taqqoslash uchun zarur. Vazn koeffitsiyentlari ishlab chiqarish vazifasi va xavfsizlik talablariga qarab tanlanadi; konstruktiv mustahkamlik kabi qat'iy xavfsizlik talablarini faqat maqsad funksiyasidagi kichik vazn bilan ifodalash yetarli emas, ular alohida cheklovlar shaklida saqlanishi lozim. Shu tariqa, taklif etilayotgan metodika material tashish tezligini oshirish bilan bir vaqtda energiya va mexanik ishonchlilik bo'yicha talablarni bajarishga yo'naltiriladi.

3. NATIJALAR

Taklif etilayotgan matematik yondashuvning asosiy natijasi vibratsion konveyer ishchi organining amplitudasi va chastotasini tanlash uchun izchil hisoblash tartibi hamda ko'p mezonli optimallashtirish masalasining shakllantirilganidir. Birinchi natija amplituda va chastota orasidagi kinematik bog'lanishning maqbullashtirishda asosiy nazorat ko'rsatkichlaridan biri ekanligi bilan izohlanadi. Garmonik harakatda tezlanish amplitudasi ($a_{\max} = A(2\pi f)^2$) ga teng bo'lgani sababli, chastotani o'zgartirish tezlanishning chiziqli emas, kvadratik o'zgarishiga olib keladi. Masalan, amplituda o'zgarmagan holda chastotaning 10 foizga oshirilishi tezlanish amplitudasini ($1.1^2 = 1.21$), ya'ni 21 foizga oshiradi. Bu hisob matematik munosabatdan bevosita kelib chiqadi va tajriba natijasi emas. Xuddi shuningdek, chastota o'zgarmagan holda amplitudaning 10 foizga oshirilishi tezlanish amplitudasini 10 foizga oshiradi. Demak, chastotaga nisbatan dinamik sezgirlik kvadratik xarakterga ega bo'lib, chastotani optimallashtirish jarayonida mexanik yuklanishlarni alohida tekshirish zarur. Ikkinchi natija ishchi organ dinamikasining matematik modeli orqali amplitudaning faqat operator tomonidan berilgan sozlama bilan emas, balki qo'zg'atuvchi kuch, ekvivalent massa, elastik birlilik, so'nish va ishchi chastota bilan belgilanishini ko'rsatadi. ($A = F_0 / \sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}$) tenglamasidan ko'rinadiki, chastota o'zgarganda amplituda ham o'zgarishi mumkin; shu sababli amplitudani doimiy deb qabul qilgan holda chastotani tanlash ayrim konveyerlar uchun noto'g'ri hisoblash natijalariga olib keladi. Ayniqsa, tizimning xususiy chastotasiga yaqin rejimlarda amplitudaning chastotaga sezgirligi ortishi mumkin. Shu bilan birga, haqiqiy rezonansli konveyerlarda boshqaruv tizimi, elektromagnit qo'zg'atish, ko'p erkinlik darajali dinamika va material yukining o'zgarishi sababli bir erkinlik darajali modelning natijalari cheklangan qo'llanish doirasiga ega. Uchinchi natija maqbullashtirish masalasining ikki o'zgaruvchili ((A, f)) parametrlar fazosida shakllantirilganidir. Ushbu fazoda har bir nuqta uchun materialning o'rtacha tashish tezligi yoki unumdorligi, yuritmaning energiya sarfi, dinamik yuklanish va ruxsat etilgan tebranish darajasi baholanadi. Bunda dastlabki hisoblash bosqichida parametrlarning maqbul diapazoni belgilanadi, keyin diapazon ichida hisoblash nuqtalari tanlanadi va har bir nuqtada maqsad funksiyasi qiymati aniqlanadi. Agar analitik model yetarli aniqlikni ta'minlamasa, harakat tenglamalarini sonli integrallash

orqali zarrachaning bir necha tebranish sikli davomida harakat trayektoriyasi hisoblanadi, dastlabki o'tkinchi jarayon tugagandan so'ng o'rtacha tashish tezligi aniqlanadi. Donador materialning ko'p zarrachali qatlam sifatidagi xatti-harakatini tekshirish zarur bo'lgan holatlarda diskret elementlar usuli qo'llanishi mumkin; bu yondashuvda zarrachalar o'rtasidagi kontakt kuchlari, ishqalanish va zarba ta'siri hisobga olinadi. Saeki va hammualliflarning tadqiqotida donador materiallarning vibratsion tashish jarayoni sonli tahlil va tajriba bilan o'rganilgan bo'lib, zarrachalar o'zaro ta'sirining transport xususiyatlarini aniqlashdagi ahamiyati ko'rsatilgan [6]. To'rtinchi natija energiya samaradorligini solishtirma energiya sarfi orqali baholash taklifidir. Solishtirma energiya sarfi ($e_s = P_{\mathrm{in}}/Q_m$) bilan ifodalanishi mumkin, bunda (P_{in}) — elektr yuritmaning o'rtacha kirish quvvati, (Q_m) — massaviy unumdorlik. Agar (P_{in}) kilovatt, (Q_m) tonna/soat birliklarida berilsa, (e_s) kVt·soat/tonna birligida olinadi. Ushbu ko'rsatkich yuqori unumdorlikka erishish bilan birga energiya sarfini ham hisobga olish imkonini beradi. Faqat unumdorlikning maksimal qiymatini izlash ayrim hollarda ortiqcha quvvat sarfi, yuqori dinamik kuchlar yoki materialning ishchi sirt bo'ylab beqaror harakatlanishi bilan yakunlanishi mumkin. Shu sababli eng yuqori tashish tezligi har doim ham eng samarali ish rejimini anglatmaydi. Beshinchi natija optimallashtirishda qat'iy cheklovlar va maqsad mezonlarini ajratish zarurligidir. Amplituda va chastota ruxsat etilgan diapazonda bo'lishi, ishchi organ tezlanishi va tayanchlarga uzatiladigan dinamik kuchlar konstruktiv talablardan oshmasligi, motorning yuklanishi belgilangan chegarada qolishi hamda material tashish jarayoni barqaror bo'lishi kerak. Ushbu shartlar bajarilmagan parametrlar, hatto maqsad funksiyasining yuqori qiymatini bersa ham, maqbul yechim sifatida qabul qilinmaydi. Oltinchi natija ko'p mezonli maqbullashtirishning ikki usulini qo'llash imkoniyatidir. Vaznlangan maqsad funksiyasi ishlab chiqarishdagi ustuvorliklar oldindan belgilangan hollarda qulay bo'lsa, Pareto yondashuvi unumdorlik, energiya sarfi va dinamik yuklanish o'rtasidagi murosali yechimlar to'plamini aniqlashga yordam beradi. Pareto maqbul yechim shunday yechimki, boshqa bir yechim bilan kamida bitta mezonni yaxshilashga urinish qolgan mezonlardan hech bo'lmaganda birini yomonlashtirmasdan amalga oshmaydi. Shu sababli yakuniy tanlov texnologik talablar, energiya narxi, mexanik ishonchlilik, xizmat ko'rsatish xarajatlari va xavfsizlik mezonlari bilan birgalikda bajarilishi kerak. Ushbu bo'limda bayon etilgan natijalar ishlab chiqilgan nazariy-metodik model va undan kelib chiqadigan matematik xulosalardir. Muayyan amplituda va chastota juftligini eng maqbul deb e'lon qilish uchun konkret konveyerning konstruktiv parametrlari, materialning fizik-mexanik xususiyatlari va hisoblash yoki tajriba ma'lumotlari zarur. Shu bois, o'lchash ma'lumotlari keltirilmagan holatda maqolada aniq foizli unumdorlik ortishi, energiya tejalishi yoki tajriba orqali tasdiqlangan optimal qiymatlar haqida da'vo qilinmaydi.

4. MUHOKAMA

Taklif etilgan maqbullashtirish usulining ilmiy-amaliy mohiyati vibratsion konveyerning texnologik samaradorligini faqat tebranish amplitudasi yoki chastotasining kattaligi bilan baholash mumkin emasligini tizimli ravishda asoslashdan iborat. Amplituda va chastota ishchi organ harakatining kinematik parametrlarini

belgilaydi, lekin material tashish jarayoni ushbu parametrlar bilan bir qatorda kontakt mexanikasi, ishqalanish, sirt qiyaligi va zarrachalar oʻrtasidagi oʻzaro taʼsir bilan boshqariladi. Shu nuqtayi nazardan, taklif etilayotgan model vibratsion tashish boʻyicha mavjud tadqiqotlarning asosiy yoʻnalishlariga mos keladi. Parameswaran va Ganapathy vibratsion tashishning nazariy asoslari hamda konstruktiv tahliliga oid muammolarni umumlashtirgan boʻlsa [1], Despotović va hammualliflar rezonansli elektromagnit konveyer uchun matematik modelni real qurilmadagi natijalar bilan taqqoslash zarurligini koʻrsatgan [2]. Donador materiallarni tashish boʻyicha keyingi izlanishlarda amplituda, chastota va boshqa tebranish parametrlarining transport tezligiga taʼsiri sonli hamda tajribaviy usullar orqali tekshirilgan [4; 5; 6]. Mazkur maqolada ushbu ilmiy yoʻnalishlardan kelib chiqib, amplituda va chastotani koʻp mezonli optimallashtirishning asosiy oʻzgaruvchilari sifatida tanlash taklif etiladi. Bunda muhim farq shundaki, matematik modelning maqsadi faqat maksimal tashish tezligini aniqlash emas, balki belgilangan unumdorlikni ruxsat etilgan energiya sarfi va dinamik yuklanishlar doirasida taʼminlaydigan parametrlar majmuasini topishdir. Masalan, yuqori chastota materialning oʻrtacha siljish tezligini oshirishi mumkin, biroq tezlanish amplitudasi ($A(2\pi f)^2$) boʻyicha ortishi sababli konstruktiv yuklanish va yuritma sarfi boʻyicha cheklovlar kuchayadi. Boshqa tomondan, juda kichik amplituda materialni yetarli darajada harakatlantirmasligi yoki talab etilgan unumdorlikni taʼminlamasligi mumkin. Demak, amaliy yechim amplitudani imkon qadar kattalashtirish yoki chastotani maksimal qiymatga olib chiqish emas, balki materialning barqaror tashish rejimini, zarur unumdorlikni va maqbul energiya sarfini bir vaqtda taʼminlaydigan parametrlarni aniqlashdan iborat. Taklif etilgan usulni amaliyotga tatbiq etishda birinchi muhim masala model parametrlarining identifikatsiyasidir. Ekvivalent massa, birlilik va soʻnish koeffitsiyentlari faqat konstruktiv chizmalar asosida emas, balki imkon qadar statik yuklash, erkin tebranish sinovi, chastota javobi yoki ishchi rejimdagi oʻlchashlar orqali aniqlanishi lozim. Agar material massasi konveyerda sezilarli darajada oʻzgarib tursa, ekvivalent massa doimiy deb qabul qilinishi model xatosini oshirishi mumkin. Bunday holatda yuklangan va yuksiz rejimlar alohida modellashtiriladi yoki massa oʻzgaruvchan parametr sifatida kiritiladi. Ikkinchi masala materialning ishchi sirt bilan oʻzaro taʼsirini yetarli aniqlikda ifodalashdir. Yakka zarracha modeli dastlabki tahlil uchun qulay, lekin nam, yopishqoq, mayda dispersli yoki koʻp zarrachali qatlamlarda materialning kohezion xususiyatlari, zarrachalararo kontakt va qatlamning ichki deformatsiyasi muhim rol oʻynashi mumkin. Shuning uchun material turiga qarab tajribaviy bogʻlanishlar, kontakt mexanikasi modeli yoki diskret elementlar usulidan foydalanish zarur. Uchinchi masala optimallashtirish mezonlarining toʻgʻri tanlanishidir. Agar korxonaning asosiy talabi maksimal ishlab chiqarish boʻlsa, unumdorlik maqsad funksiyasida ustuvor mezon sifatida olinishi mumkin, ammo elektr energiyasi, mexanik yuklanish va xavfsizlik boʻyicha cheklovlar oʻz kuchini saqlab qoladi. Agar konveyer uzoq vaqt uzluksiz ishlasa, solishtirma energiya sarfi va texnik xizmat koʻrsatish xarajatlari muhim ahamiyat kasb etadi. Agar tashilayotgan mahsulot moʻrt yoki oʻlcham boʻyicha qatʼiy talablarga ega boʻlsa, zarba tezligi va materialning sakrash darajasi ham alohida mezon sifatida kiritilishi kerak. Toʻrtinchi masala optimallashtirish algoritmini tanlash

bilan bog‘liq. Maqsad funksiyasi silliq va analitik tarzda hisoblanadigan hollarda gradient usullari samarali bo‘lishi mumkin. Biroq materialning kontaktini yo‘qotishi, zarba, quruq ishqalanish va ish rejimining almashishi natijasida maqsad funksiyasi uzilishlar yoki keskin o‘zgarishlarga ega bo‘lsa, gradientga asoslangan algoritmlar global yechimni topishda qiyinchilikka duch kelishi mumkin. Bunday vaziyatlarda parametrik to‘liq qidiruv, evolyutsion algoritmlar yoki boshqa gradient talab qilmaydigan optimallashtirish usullarini qo‘llash maqsadga muvofiq. Amaliy hisoblashda dastlab qo‘pol parametrik to‘r orqali mumkin bo‘lgan diapazon aniqlanadi, so‘ng istiqbolli sohalarida qidiruv zichlashtiriladi. Natijada hisoblash xarajatlarini cheklagan holda maqbul parametrlar sohasi aniqlanishi mumkin. Beshinchi masala olingan yechimning ishonchliligini tekshirishdir. Matematik model orqali topilgan optimal amplituda va chastota dastlab sonli simulyatsiyada, keyin laboratoriya stendida yoki real konveyerda tekshirilishi lozim. Tajriba davomida amplituda va chastota mustaqil o‘lchanishi, ishchi organ tezlanishi akselerometr yordamida qayd etilishi, elektr yuritma quvvati o‘lchanishi va materialning ma‘lum vaqt ichida tashilgan massasi aniqlanishi kerak. Bir xil material, yuklama va atrof-muhit sharoitida boshlang‘ich hamda optimallashtirilgan rejimlar solishtiriladi. O‘lchashlar bir necha marta takrorlanib, o‘rtacha qiymatlar va tarqalish ko‘rsatkichlari hisoblanishi zarur. Faqat shundan keyingina unumdorlik, energiya sarfi yoki dinamik yuklanish bo‘yicha kuzatilgan o‘zgarishlar miqdoriy jihatdan asoslanishi mumkin. Taklif etilgan yondashuvning cheklovi shundaki, bir erkinlik darajali chiziqli model barcha turdagi vibratsion konveyerlarni to‘liq tavsiflamaydi. Fazoviy tebranish, burilish, elastik elementlarning nolinearligi, materialning notekis taqsimlanishi va elektromagnit yuritmaning boshqaruv xususiyatlari mavjud bo‘lsa, model kengaytirilishi kerak. Shuningdek, maqbul amplituda va chastota material turiga, namligiga, zarracha o‘lchamiga, ishchi sirt geometriyasiga va ishlab chiqarish vazifasiga bog‘liq bo‘lgani sababli bitta universal qiymatni barcha konveyerlarga tatbiq etish ilmiy jihatdan asosli emas. Shunday qilib, ishlab chiqilgan usulning asosiy afzalligi universal sonli yechimni oldindan belgilashda emas, balki aniq konstruktsiya va material uchun maqbul ish rejimini aniqlashning takrorlanuvchi, tekshiriladigan va muhandislik jihatidan izchil tartibini yaratishda namoyon bo‘ladi.

5. XULOSA

Olib borilgan nazariy-metodik tahlil asosida vibratsion konveyer ishchi organining tebranish amplitudasi va chastotasini maqbullashtirish uchun mexanik tizim dinamikasi, material tashish jarayoni va ko‘p mezonli optimallashtirishni birlashtiruvchi usul taklif etildi. Ishchi organ harakatini tavsiflash uchun ekvivalent massa, elastik birlilik, so‘nish va qo‘zg‘atuvchi kuchni hisobga oluvchi matematik model shakllantirildi. Garmonik tebranishning siljish, tezlik va tezlanish ko‘rsatkichlari o‘rtasidagi bog‘lanishlar aniqlashtirildi. Xususan, tezlanish amplitudasining chastota kvadratiga mutanosibli amplitudani va chastotani alohida tanlash emas, balki ularning birgalikdagi ta‘sirini hisobga olish zarurligini ko‘rsatadi. Material tashish jarayonining o‘rtacha tezligi va unumdorligi amplituda, chastota, tebranish yo‘nalishi, ishchi sirt qiyaligi, ishqalanish koeffitsiyenti hamda materialning fizik-mexanik xususiyatlariga bog‘liq funksiyalar orqali ifodalandi. Taklif etilgan

maqbullashtirish mezonida tashish unumdorligini oshirish, solishtirma energiya sarfini kamaytirish va dinamik yuklanishlarni cheklash koʻzda tutildi. Amplituda va chastota uchun ruxsat etilgan diapazonlar, yuritma quvvati, konstruktiv mustahkamlik va barqaror tashish rejimiga oid cheklovlar alohida hisobga olindi. Usulni amalga oshirish uchun dastlab mexanik model parametrlarini aniqlash, soʻng amplituda va chastota diapazonini belgilash, parametrik hisoblash yoki sonli integrallashni bajarish, maqsad funksiyasini baholash, istiqbolli parametrlar sohasini aniqlashtirish va olingan yechimni tajribada tekshirish bosqichlari tavsiya etildi. Maqolaning ilmiy-amaliy ahamiyati konveyerning texnologik vazifasiga mos ravishda unumdorlik, energiya samaradorligi va mexanik ishonchlik oʻrtasidagi murosali ish rejimini tanlash imkonini beruvchi metodik asosni taklif qilishdan iborat. Biroq ushbu bosqichda aniq konveyer uchun optimal amplituda va chastotaning sonli qiymatlari aniqlangan yoki ishlab chiqarish samaradorligining muayyan foizga oshishi tajribada tasdiqlangan deb daʼvo qilish uchun yetarli maʼlumot mavjud emas. Keyingi tadqiqotlarda konkret konveyerning konstruktiv parametrlari va tashiladigan material xususiyatlari asosida matematik modelni identifikatsiyalash, sonli optimallashtirishni bajarish, vibratsiya tezlanishi va elektr quvvatini oʻlchash, unumdorlikni aniqlash hamda boshlangʻich va optimallashtirilgan ish rejimlarini tajriba orqali taqqoslash maqsadga muvofiq. Shuningdek, turli materiallar va yuklanish sharoitlarida maqbul parametrlarning oʻzgarishini baholash, koʻp erkinlik darajali va nolinear dinamik modellarni ishlab chiqish hamda real vaqt rejimida amplituda va chastotani boshqarish algoritmalarini joriy etish istiqbolli ilmiy yoʻnalishlar hisoblanadi. Natijada vibratsion konveyer ishchi organining parametrlarini ilmiy asoslangan tartibda tanlash va sozlash uchun nazariy asos yaratiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Parameswaran M. A., Ganapathy S. Vibratory conveying—analysis and design: A review // *Mechanism and Machine Theory*. — 1979. — Vol. 14, No. 2. — P. 89–97. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(79\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0094-114X(79)90024-7).
2. Despotović Ž. V., Urukalo D., Lečić M. R., Čosić A. Mathematical modeling of resonant linear vibratory conveyor with electromagnetic excitation: simulations and experimental results // *Applied Mathematical Modelling*. — 2017. — Vol. 41. — P. 1–24. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.09.010>.
3. Wang Y. Regularities of particle motion on vibrating conveyor // *Particulate Science and Technology*. — 2024. — Vol. 42, No. 7. — P. 1129–1143. — DOI: <https://doi.org/10.1080/02726351.2024.2352712>.
4. The results of the study of the vibratory conveying machine operating modes // *Transportation Research Procedia*. — 2022. — Vol. 63. — P. 721–729. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.067>.
5. Vrublevskiy I. Optimization of Parameters of Two-component Vibration With Piecewise Acceleration in Vibratory Conveying Devices // *ISTCIPA*. — 2024. — Vol. 58. — P. 19–30. — DOI: <https://doi.org/10.23939/istcipa2024.58.019>.