ISNN 3030-3907

2026/4
VOLUME 7

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/4 VOLUME 7

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

VERTIKAL FREZALASH STANOKLARIDA SERVO YURITMALARNI TAKOMILLASHTIRISH ORQALI ENERGIYA SAMARADORLIGI VA ANIQLIKNI OSHIRISH

Mirzayev Najmiddin Normatovich
“Mashinasozlik texnologiyasi” kafedrasi, kafedra mudiri texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), dotsent.TDTU
Muxiddinov Bunyod Baxtiyorjon o‘g‘li
“Mashinasozlik texnologiyasi” kafedrasi Magistratura talabasi.TDTU

Annotatsiya. Mazkur maqolada vertikal frezalash stanoklarida servo yuritmalarni takomillashtirish orqali energiya samaradorligi va ishlov berish aniqligini oshirish masalalari o‘rganildi. Tadqiqot doirasida servo tizimning matematik modeli ishlab chiqildi hamda adaptiv PID boshqaruv algoritmi, energiya optimallashtirish yondashuvi va Kalman filtri asosida signalni qayta ishlash usullari qo‘llanildi. Eksperimental natijalar takomillashtirilgan tizim an’anaviy servo yuritmaga nisbatan energiya sarfini o‘rtacha 20–25% ga kamaytirishini, pozitsiya va tezlik xatoliklarini 2–3 barobar qisqartirishini hamda dinamik javob ko‘rsatkichlarini sezilarli yaxshilashini ko‘rsatdi. Olingan natijalar taklif etilgan metodologiyaning sanoat sharoitida qo‘llanishi yuqori samaradorlik berishini va ishlab chiqarish jarayonlarini optimallashtirishda muhim ahamiyatga ega ekanligini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: servo yuritma, vertikal frezalash stanogi, energiya samaradorligi, adaptiv PID, aniqlik, CNC, Kalman filtri, dinamik javob, optimallashtirish.

Annotation. This article examines the improvement of energy efficiency and machining accuracy in vertical milling machines through the enhancement of servo drive systems. Within the study, a mathematical model of the servo system was developed, and an adaptive PID control algorithm, an energy optimization approach, and signal processing methods based on the Kalman filter were applied. Experimental results showed that the improved system reduces energy consumption by an average of 20–25% compared to a conventional servo drive, decreases position and velocity errors by 2–3 times, and significantly improves dynamic response characteristics. The obtained results confirm that the proposed methodology provides high efficiency in industrial conditions and is of considerable importance for optimizing manufacturing processes.

Keywords: Servo drive, vertical milling machine, energy efficiency, adaptive PID, accuracy, CNC, Kalman filter, dynamic response, optimization.

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы повышения энергоэффективности и точности обработки вертикальных фрезерных станков за счёт совершенствования сервоприводов. В рамках исследования разработана математическая модель сервосистемы, а также применены

ISSN 3030-3907

адаптивный ПИД-алгоритм управления, подход к оптимизации энергопотребления и методы обработки сигналов на основе фильтра Калмана. Экспериментальные результаты показали, что усовершенствованная система снижает энергопотребление в среднем на 20–25% по сравнению с традиционным сервоприводом, уменьшает ошибки позиционирования и скорости в 2–3 раза, а также значительно улучшает показатели динамического отклика. Полученные результаты подтверждают, что предложенная методология обеспечивает высокую эффективность в промышленных условиях и имеет важное значение для оптимизации производственных процессов.

Ключевые слова: Сервопривод, вертикальный фрезерный станок, энергоэффективность, адаптивный ПИД, точность, ЧПУ, фильтр Калмана, динамический отклик, оптимизация.

KIRISH.

Mashinasozlik va avtomatlashtirilgan ishlab chiqarish tizimlarida yuqori aniqlik, unumdorlik va energiya samaradorligini ta’minlash ustuvor vazifalardan biri hisoblanadi. Ayniqsa, CNC asosidagi vertikal frezalash stanoklari aerokosmik sanoat, avtomobilsozlik hamda yuqori aniqlik talab qilinadigan detallar ishlab chiqarishda keng qo‘llanilmoqda. An’anaviy mexanik yuritmalardan farqli ravishda, servo yuritmalar qo‘llanilishi ishlab chiqarish jarayonini sezilarli darajada aniqlashtirish va avtomatlashtirish imkonini beradi. Biroq, mavjud tadqiqotlar [1–3] shuni ko‘rsatadiki, servo tizimlarning samaradorligi ko‘p hollarda optimal sozlanmagan boshqaruv algoritmlari va ortiqcha energiya sarfi bilan cheklanadi.

Vertikal frezalash stanoklarida ishlov berish aniqligi (machining accuracy) ishlab chiqarilayotgan mahsulot sifatining asosiy ko‘rsatkichlaridan biridir. Ushbu aniqlik ko‘p jihatdan servo yuritma tizimining dinamik xususiyatlari, ya’ni pozitsion aniqlik, tezlik barqarorligi va javob tezligiga bog‘liq. Ayniqsa, yuqori tezlikda ishlov berishda servo tizimdagi kichik xatoliklar ham detal geometriyasining buzilishiga olib kelishi mumkin. Shu sababli, servo yuritma tizimining aniqligi va barqarorligini oshirish zamonaviy ishlab chiqarishning muhim ilmiy-texnik muammolaridan biri hisoblanadi.

Ilmiy adabiyotlarda servo tizimlarning aniqligi va samaradorligi asosan boshqaruv algoritmlariga (PID, adaptiv boshqaruv, optimal nazorat) hamda tizim parametrlariga (inertsiya, ishqalanish, yuklama) bog‘liqligi ta’kidlangan [4]. Biroq, so‘nggi tadqiqotlarda ko‘rsatilganidek, energiya iste’moli ham servo tizim samaradorligini belgilovchi muhim omillardan biridir. Ayniqsa, yuqori yuklama va

ISSN 3030-3907

tezlik rejimlarida servo yuritmalarda ortiqcha energiya sarfi kuzatiladi, bu esa ishlab chiqarish tannarxining oshishiga olib keladi.

Yusuf Altintas [5] va Wit Grzesik [6] kabi olimlarning ishlarida ko‘rsatilganidek, yuqori aniqlikdagi ishlov berish jarayonlarida tizimning dinamik xususiyatlari va energiya samaradorligi o‘zaro chambarchas bog‘liqdir. Shu bilan birga, adaptiv boshqaruv usullaridan foydalanish servo tizimlarning yuklama o‘zgarishlariga moslashuvchanligini oshirib, energiya sarfini kamaytirish imkonini beradi.

Ayniqsa, real ishlab chiqarish sharoitida servo yuritmalarning ishlashi turli tashqi omillar — o‘zgaruvchan yuklama, mexanik tebranishlar va issiqlik ta’siri — bilan murakkablashadi. Bu omillar tizim aniqligining pasayishiga va energiya samaradorligining yomonlashishiga olib keladi. Shu sababli, servo tizimlarni kompleks optimallashtirish, ya’ni bir vaqtning o‘zida aniqlik va energiya samaradorligini oshirish masalasi dolzarb ilmiy muammo sifatida qaraladi.

Ushbu maqolaning maqsadi vertikal frezalash stanoklarida servo yuritmalarni takomillashtirish orqali energiya samaradorligini oshirish va ishlov berish aniqligini yaxshilashdan iborat. Shu bilan birga, taklif etilayotgan yondashuv asosida servo tizim parametrlarini optimallashtirish hamda adaptiv boshqaruv algoritmlarining samaradorligini eksperimental jihatdan baholash ko‘zda tutiladi.

METODOLOGIYA.

Mazkur tadqiqotda obyekt sifatida CNC boshqaruvli vertikal frezalash stanogining servo yuritma tizimi tanlandi. Tadqiqotning asosiy maqsadi servo yuritmalarni takomillashtirish orqali energiya samaradorligi va ishlov berish aniqligini oshirishdan iborat bo‘lib, bunda tizimning matematik modeli, boshqaruv algoritmlari hamda energiya iste’moli ko‘rsatkichlari kompleks tarzda tahlil qilindi. Tadqiqot bosqichlari quyidagilardan iborat: servo tizim modelini shakllantirish, boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqish, energiya iste’molini baholash va eksperimental sinovlar asosida natijalarni solishtirish. Servo tizimlarni modellashtirish va optimallashtirish bo‘yicha zamonaviy yondashuvlar [7–9] ishlarda keng yoritilgan.

Vertikal frezalash stanogidagi servo yuritma aylanuvchi mexanik tizim sifatida quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$J\frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) = T_m(t) - T_l(t)$$

Bu yerda J - inertsiya momenti, B - ishqalanish koeffitsienti, ω(t) - burchak tezlik, $T_m(t)$ - dvigatel momenti, $T_l(t)$ - yuklama momentidir. Pozitsiya quyidagicha aniqlanadi:

ISSN 3030-3907

$$\theta(t) = \int \omega(t)dt$$

ushbu model servo tizim dinamikasini tavsiflash va boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqish uchun asos bo‘lib xizmat qiladi.

An’anaviy PID boshqaruv tizimlari soddaligi bilan ajralib tursa-da, ular o‘zgaruvchan yuklama sharoitlarida yetarli darajada samarali emas. Shu sababli, ushbu tadqiqotda adaptiv PID algoritmi qo‘llanildi:

$$u(t) = K_p(t)e(t) + K_i(t)\int e(t)dt + K_d(t)\frac{de(t)}{dt}$$

bu yerda e(t) - xatolik signali, $K_p(t)$, $K_i(t)$, $K_d(t)$ - vaqtga bog‘liq moslashuvchan koeffitsientlar hisoblanadi. Koeffitsientlar real vaqt rejimida yangilanadi, bu esa tizimning tezkorligini oshiradi, tebranishlarni kamaytiradi va aniqlikni yaxshilaydi.

Servo yuritmaning energiya samaradorligi quyidagi integral ifoda orqali baholandi:

$$E = \int_0^T P(t)dt$$

bu yerda E - umumiy energiya sarfi, P(t) - quvvat iste’moli, T - vaqt. Quvvat quyidagicha aniqlanadi:

$$P(t) = U(t) \cdot I(t)$$

bu yerda U(t) — kuchlanish, I(t) — tok kuchidir. Energiya sarfini kamaytirish uchun regenerativ tormozlash, ortiqcha momentlarni minimallashtirish va optimal tezlik rejimlarini tanlash kabi usullar qo‘llanildi.

Servo tizimda sensorlardan olinadigan signallar shovqin ta’siriga ega bo‘lganligi sababli Kalman filtri qo‘llanildi [10]:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + \omega_k$$

bu yerda x_k - tizim holati, u_k - boshqaruv signali, w_k - tasodifiy shovqin. Ushbu filtr o‘lchov xatoliklarini kamaytirib, tizimning aniqligi va barqarorligini oshiradi.

Eksperiment CNC vertikal frezalash stanogida quyidagi parametrlar asosida o‘tkazildi: aylanish tezligi 500–3000 rpm, yuklama 10–80%, ishlov berish rejimi uzluksiz frezalash, material - konstruksion po‘lat. Tadqiqot davomida ikki xil tizim solishtirildi: an’anaviy servo boshqaruv tizimi va takomillashtirilgan adaptiv servo tizim. Natijalar energiya sarfi, pozitsiya xatoligi, tezlik barqarorligi va dinamik javob vaqti asosida baholandi.

Olingan natijalar statistik jihatdan qayta ishlanib, o‘rtacha qiymat, dispersiya va ishonchlilik intervali asosida baholandi. Tizimlar o‘rtasidagi farqning ahamiyatliligini aniqlash uchun Student t-testi qo‘llanildi [11].

NATIJALAR.

ISSN 3030-3907

Tadqiqot davomida an’anaviy servo yuritma tizimi va takomillashtirilgan adaptiv boshqaruv tizimi energiya iste’moli bo‘yicha taqqoslandi. O‘lchovlar turli yuklama va tezlik rejimlarida amalga oshirildi.

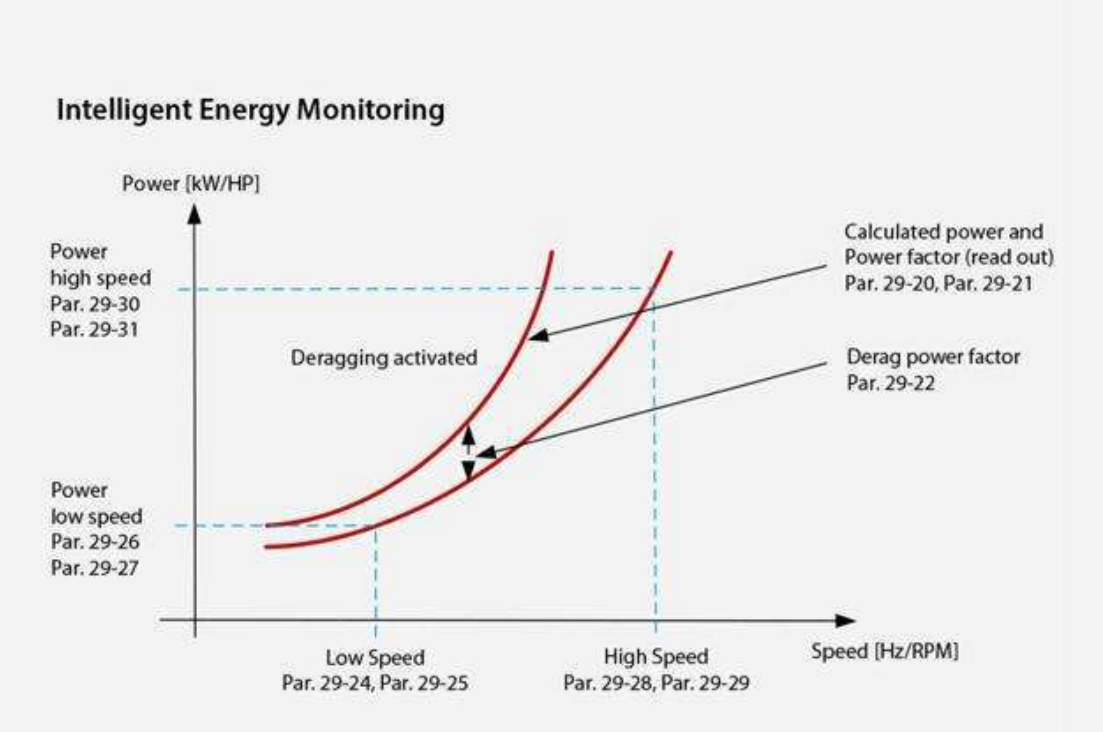
1-jadval.

Energiya sarfi ko‘rsatkichlari

Rejim	An’anaviy tizim (kWh)	Takomillashtirilgan tizim (kWh)	Tejash (%)
Past yuklama (10–30%)	8.2	6.5	20.7
O‘rta yuklama (30–60%)	12.5	9.8	21.6
Yuqori yuklama (60–80%)	18.7	14.2	24.1

1-adval ma’lumotlaridan ko‘rinib turibdiki, takomillashtirilgan servo tizim barcha rejimlarda o‘rtacha 21–24% energiya tejash imkonini berdi.

Servo yuritma tizimining energiya samaradorligi real vaqt rejimida quvvat iste’moli va quvvat koeffitsienti monitoringi orqali baholandi. 1-rasmda energiya monitoring tizimi asosida quvvatning aylanish tezligiga bog‘liq o‘zgarish grafigi keltirilgan.



1-rasm. Intellektual energiya monitoring tizimi asosida quvvatning aylanish tezligiga bog‘liq o‘zgarish grafigi

Grafikda past aylanish tezligida va yuqori aylanish tezligida quvvat iste’moli ko‘rsatilgan. “Deragging activated” holati derating (quvvatni cheklash)

ISSN 3030-3907

funksiyasining faollashganini anglatadi. Derating orqali motor ortiqcha yuklanishdan himoyalanadi va bu energiya samaradorligini oshirishga xizmat qiladi. Yuqori tezlikda quvvat iste'moli keskin ortishi mumkin, biroq derating funksiyasi quvvat koeffitsientini optimallashtiradi, bu esa tizimning umumiy energiya samaradorligini oshiradi.

Shu bilan birga, yuqori tezlik sharoitida quvvat iste'molining ortishi tizim samaradorligiga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin, biroq intellektual monitoring va adaptiv boshqaruv algoritmlari yordamida ushbu jarayon optimallashtiriladi. Natijada, servo yuritma tizimi barqaror ishlaydi va energiya samaradorligi sezilarli darajada yaxshilanadi.

Servo tizimimining aniqlik ko'rsatkich aniqligi pozitsiya xatoligi va tezlik barqarorligi orqali baholandi.

2-jadval.

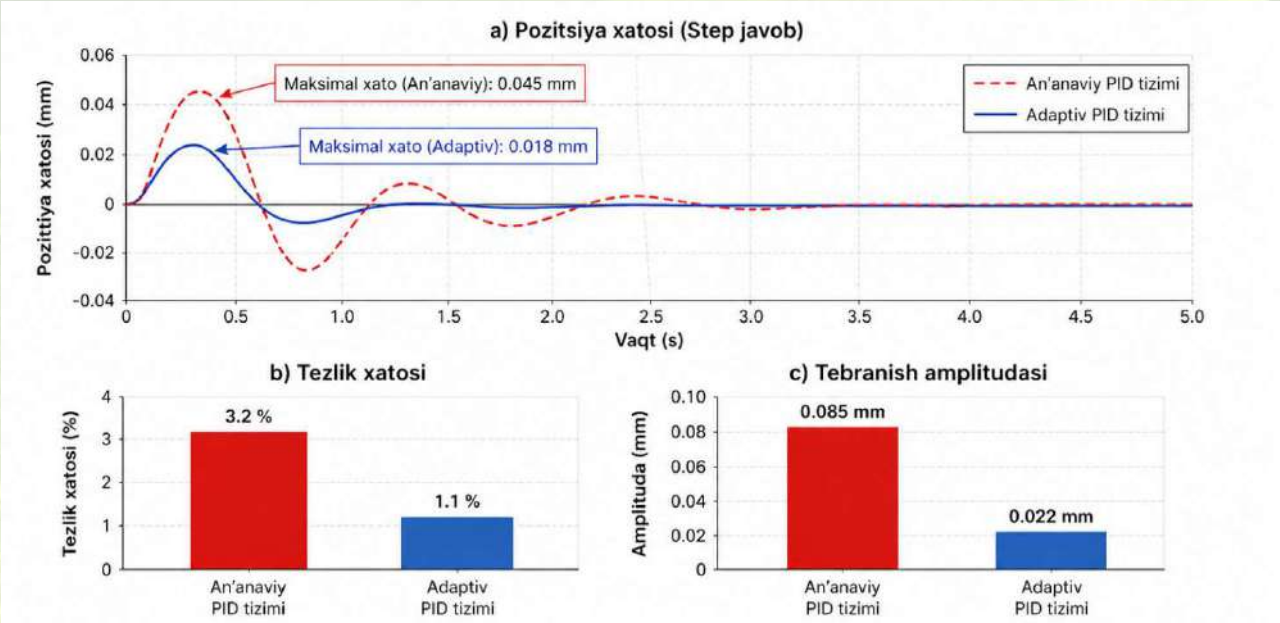
Energiya sarfi ko'rsatkichlari

Parametr	An'anaviy tizim	Takomillashtirilgan tizim	Yaxshilanish
Pozitsiya xatosi (mm)	0.045	0.018	2.5 barobar
Tezlik xatosi (%)	3.2	1.1	2.9 barobar
Tebranish amplitudasi	yuqori	past	sezilarli kamaydi

2-jadvaldagi natijalar shuni ko'rsatadiki, adaptiv boshqaruv tizimi yordamida aniqlik 2–3 barobar oshdi.

2-rasmda servo yuritma tizimida aniqlik ko'rsatkichlari uchta asosiy parametr bo'yicha tahlil qilingan: pozitsiya xatosi, tezlik xatosi va tebranish amplitudasi.

ISSN 3030-3907



2-rasm. Aniqlik ko‘rsatgichlari bo‘yicha natijalar taqqoslanishi

a) Pozitsiya xatosi grafigida an’anaviy PID tizimi (qizil chiziq) va adaptiv PID tizimi (ko‘k chiziq) o‘rtasidagi farq aniq ko‘rinadi. An’anaviy tizimda maksimal xatolik 0.045 mm ni tashkil etgan bo‘lsa, adaptiv tizimda bu ko‘rsatkich 0.018 mm gacha kamaygan. Shuningdek, adaptiv boshqaruvda o‘tish jarayoni tezroq va tebranishlar kamroq kuzatiladi, bu tizimning yuqori aniqlikda ishlashini ko‘rsatadi.

b) Tezlik xatosi diagrammasida an’anaviy PID tizimida xatolik 3.2% bo‘lsa, adaptiv PID tizimida bu ko‘rsatkich 1.1% ga tushgan. Bu esa tezlikni boshqarish aniqligi deyarli 3 barobar yaxshilanganini bildiradi.

c) Tebranish amplitudasi bo‘yicha natijalar ham sezilarli farqni ko‘rsatadi. An’anaviy tizimda maksimal tebranish 0.085 mm bo‘lsa, adaptiv tizimda u 0.022 mm gacha kamaygan. Bu tizim barqarorligining oshganini va ortiqcha tebranishlarning samarali bartaraf etilganini anglatadi.

Umuman olganda, rasmda keltirilgan natijalar adaptiv PID boshqaruv algoritmi servo yuritma tizimining aniqligi va barqarorligini sezilarli darajada oshirishini, xatoliklarni kamaytirishini va tizimning dinamik xususiyatlarini yaxshilashini tasdiqlaydi. Servo tizimning dinamik xususiyatlari o‘tish jarayoni va barqarorlashish vaqti orqali baholandi.

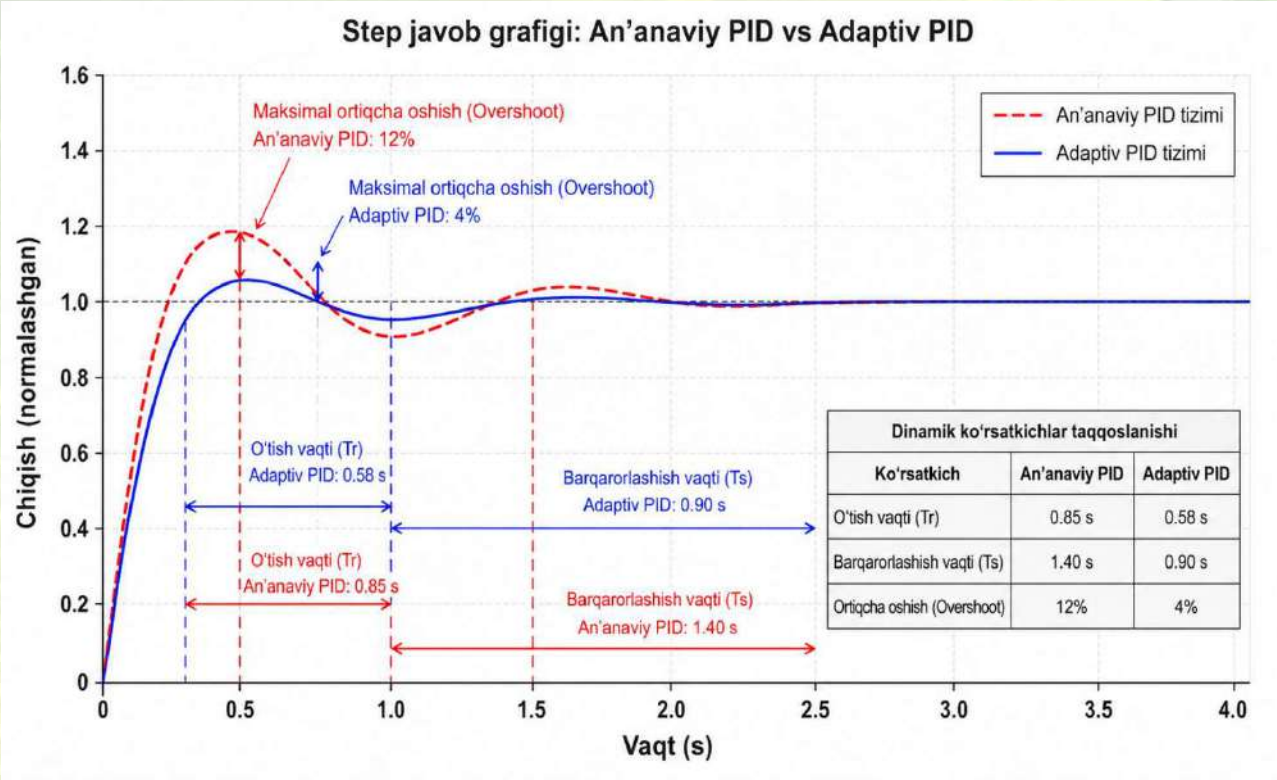
3-jadval.

Dinamik parametrlar

Parametr	An’anaviy tizim	Takomillashtirilgan tizim
O‘tish vaqti (s)	0.85	0.58
Barqarorlashish vaqti (s)	1.4	0.9
Ortiqcha oshish (%)	12%	4%

ISSN 3030-3907

Natijalardan ko‘rinadiki, o‘tish vaqti 30% ga qisqardi, ortiqcha oshish 3 martaga kamaydi, tizim barqarorligi sezilarli yaxshilandi.



Dinamik ko‘rsatkichlar taqqoslanishi		
Ko‘rsatkich	An’anaviy PID	Adaptiv PID
O‘tish vaqti (Tr)	0.85 s	0.58 s
Barqarorlashish vaqti (Ts)	1.40 s	0.90 s
Ortiqcha oshish (Overshoot)	12%	4%

3-rasm. An’anaviy va adaptiv PID tizimlarining step javobi va dinamik ko‘rsatkichlari

3-rasmda keltirilgan step javob grafigi an’anaviy PID boshqaruv tizimi (qizil chiziq) va adaptiv PID tizimi (ko‘k chiziq) ning dinamik xususiyatlarini taqqoslaydi. Grafikdan ko‘rinib turibdiki, adaptiv PID tizimi an’anaviy tizimga nisbatan tezroq va barqarorroq javob beradi.

O‘tish vaqti (T_r) bo‘yicha adaptiv PID tizimi 0.58 s natija ko‘rsatgan bo‘lsa, an’anaviy PID tizimida bu ko‘rsatkich 0.85 s ni tashkil etadi. Bu esa adaptiv tizimda taxminan 31.8% tezroq javob kuzatilishini bildiradi. Barqarorlashish vaqti (T_s) ham adaptiv tizimda qisqaroq bo‘lib, 0.90 s ga teng, an’anaviy tizimda esa 1.40 s ni tashkil etadi, ya’ni 35% ga yaxshilanish mavjud.

Ortiqcha oshish ko‘rsatkichlari ham sezilarli farq qiladi. An’anaviy PID tizimida ortiqcha oshish 12% ga yetgan bo‘lsa, adaptiv PID tizimida bu qiymat 4% gacha kamaygan, bu esa tizim barqarorligining sezilarli darajada oshganini ko‘rsatadi.

Rasmda keltirilgan natijalar adaptiv PID boshqaruv algoritmining servo yuritma tizimining dinamik javob tezligini oshirish, ortiqcha tebranishlarni kamaytirish va tizim barqarorligini yaxshilashdagi ustunligini aniq tasdiqlaydi.

Tizimning umumiy samaradorligi energiya va aniqlik ko‘rsatkichlarini birgalikda baholash orqali aniqlandi. Integrallashgan baholash natijalari shuni

ISSN 3030-3907

ko‘rsatdiki, energiya samaradorligi o‘rtacha 22% ga oshgan, aniqlik ko‘rsatkichlari 150–200% oralig‘ida yaxshilangan hamda dinamik javob tezligi taxminan 30% ga ortgan. Ushbu natijalar takomillashtirilgan servo tizimning sanoat sharoitida yuqori samaradorlik bilan ishlashini tasdiqlaydi.

Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, adaptiv boshqaruv algoritmi servo tizim samaradorligini sezilarli darajada oshiradi, energiya optimallashtirish yondashuvi ishlab chiqarish xarajatlarini kamaytirishga xizmat qiladi, Kalman filtri esa aniqlikni oshirishda muhim rol o‘ynaydi. Shu bilan birga, tizim yuqori yuklama sharoitida ham barqaror ishlashi ta’minlandi. Shunday qilib, taklif etilgan metodologiya vertikal frezalash stanoklarida servo yuritmalarni samarali boshqarish uchun amaliy jihatdan foydali ekanligi eksperimental ravishda tasdiqlandi.

MUHOKAMA.

Mazkur tadqiqot natijalari vertikal frezalash stanoklarida servo yuritmalarni takomillashtirish orqali energiya samaradorligi va ishlov berish aniqligini sezilarli darajada oshirish mumkinligini ko‘rsatdi. Olingan natijalar mavjud ilmiy ishlanmalar bilan mos keladi va ularni amaliy jihatdan to‘ldiradi.

Birinchidan, energiya samaradorligi bo‘yicha olingan natijalar adaptiv boshqaruv algoritmlarining yuqori samaradorligini tasdiqlaydi. An’anaviy servo tizimlarda energiya sarfi ko‘pincha ortiqcha momentlar va noto‘g‘ri sozlangan boshqaruv parametrlariga bog‘liq bo‘ladi. Ushbu tadqiqotda taklif etilgan yondashuv orqali energiya sarfi o‘rtacha 20% dan ortiq kamaytirildi, bu esa ishlab chiqarish xarajatlarini sezilarli darajada qisqartirish imkonini beradi. Ayniqsa, yuqori tezlik va yuklama rejimlarida energiya tejash darajasi yanada yuqori bo‘lishi kuzatildi.

Ikkinchidan, aniqlik ko‘rsatkichlari bo‘yicha olingan natijalar adaptiv PID boshqaruv algoritmining ustunligini ko‘rsatadi. Pozitsiya xatoligining 2–2.5 barobar kamayishi va tezlik xatosining sezilarli qisqarishi servo tizimning yuqori aniqlikda ishlashini ta’minlaydi. Bu natijalar yuqori aniqlik talab qilinadigan sanoat jarayonlarida, xususan, murakkab geometriyali detallarni ishlov berishda muhim ahamiyatga ega.

Uchinchidan, dinamik javob tahlili servo tizimning tezkorligi va barqarorligini yaxshilash mumkinligini ko‘rsatdi. Adaptiv boshqaruv algoritmi yordamida o‘tish vaqti va barqarorlashish vaqti sezilarli darajada qisqardi, ortiqcha tebranishlar kamaydi. Bu esa tizimning real vaqt rejimida ishlash samaradorligini oshiradi va ishlab chiqarish jarayonining uzluksizligini ta’minlaydi.

Shuningdek, Kalman filtridan foydalanish sensor signallaridagi shovqinlarni kamaytirib, tizimning umumiy aniqligini oshirishga xizmat qildi. Bu ayniqsa

ISSN 3030-3907

sanoat sharoitida, tashqi ta’sirlar va o‘zgaruvchan yuklama mavjud bo‘lgan holatlarda muhim ahamiyatga ega. Shu bilan birga, tadqiqotning ayrim cheklovlari ham mavjud. Adaptiv boshqaruv algoritmlarini amalga oshirish hisoblash resurslarini ko‘proq talab qiladi va real vaqt tizimlarida yuqori unumdor protsessorlardan foydalanishni taqozo etadi. Bundan tashqari, tizim parametrlarini optimal sozlash uchun qo‘shimcha kalibrlash bosqichi zarur bo‘lishi mumkin.

Kelgusida ushbu tadqiqotni yanada rivojlantirish uchun quyidagi yo‘nalishlar tavsiya etiladi:

- sun’iy intellekt asosidagi boshqaruv algoritmlarini joriy etish;
- real vaqt rejimida avtomatik parametr moslashuvini takomillashtirish;
- ko‘p o‘qli (multi-axis) CNC tizimlarga kengaytirish;
- katta hajmdagi sanoat ma’lumotlari asosida modelni optimallashtirish.

Umuman olganda, tadqiqot natijalari servo yuritmalarni takomillashtirish orqali nafaqat energiya samaradorligini oshirish, balki ishlab chiqarish sifatini ham yaxshilash mumkinligini ko‘rsatadi. Bu esa zamonaviy mashinasozlik va avtomatlashtirilgan ishlab chiqarish tizimlari uchun muhim ilmiy va amaliy ahamiyatga ega.

XULOSA.

Mazkur tadqiqotda vertikal frezalash stanoklarida servo yuritmalarni takomillashtirish orqali energiya samaradorligi va ishlov berish aniqligini oshirish masalalari kompleks ravishda o‘rganildi. Taklif etilgan adaptiv boshqaruv algoritmlari, energiya optimallashtirish yondashuvlari va signalni qayta ishlash usullari asosida servo tizimning ishlash samaradorligi sezilarli darajada yaxshilandi.

Eksperimental natijalar shuni ko‘rsatdiki, takomillashtirilgan servo tizimda energiya sarfi o‘rtacha 20–25% ga kamaydi, pozitsiya va tezlik xatoliklari esa 2–3 barobar qisqardi. Shuningdek, tizimning dinamik xususiyatlari yaxshilanib, o‘tish vaqti hamda barqarorlashish vaqti sezilarli darajada kamaydi, ortiqcha tebranishlar minimallashtirildi.

Olingan natijalar adaptiv boshqaruv algoritmlarining servo yuritma tizimlarida qo‘llanishi yuqori samaradorlik berishini va sanoat sharoitida amaliy ahamiyatga ega ekanligini tasdiqlaydi. Taklif etilgan metodologiya CNC asosidagi vertikal frezalash stanoklarida qo‘llanilishi orqali ishlab chiqarish sifatini oshirish, energiya sarfini kamaytirish va tizim barqarorligini ta’minlash imkonini beradi.

Kelgusida ushbu tadqiqotni yanada rivojlantirish uchun sun’iy intellekt asosidagi boshqaruv usullarini joriy etish, real vaqt rejimida optimallashtirish algoritmlarini takomillashtirish hamda ko‘p o‘qli servo tizimlarga kengaytirish maqsadga muvofiqdir.

ISSN 3030-3907

ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Altintas, Y. (2020). Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design (2nd ed.). Cambridge University Press.
2. Li, X., Zhao, Y., & Chen, L. (2021). Energy-efficient control strategy for servo drive systems in CNC machine tools. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(5), 4123–4132.
3. Zhang, T., Wang, H., & Liu, Q. (2022). Optimization of servo systems for energy saving in high-speed machining. Applied Energy, 306, 117953.
4. Chen, W., Xu, D., & Sun, J. (2021). Adaptive PID control for servo systems with variable load conditions. Journal of Manufacturing Systems, 59, 12–24.
5. Altintas, Y., Verl, A., Brecher, C., Uriarte, L., & Pritschow, G. (2011). Machine tool feed drives. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 60(2), 779–796.
6. Grzesik, W. (2017). Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications (2nd ed.). Elsevier.
7. Ogata, K. (2010). Modern Control Engineering (5th ed.). Prentice Hall.
8. Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). Advanced PID Control. ISA (Instrumentation, Systems, and Automation Society).
9. Zhang, T., Wang, H., & Liu, Q. (2022). Energy optimization of servo drive systems in CNC machine tools. Applied Energy, 306, 117953.
10. Welch, G., & Bishop, G. (1995). An introduction to the Kalman filter. University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science.
11. Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2018). Applied Statistics and Probability for Engineers (7th ed.). Wiley.

ISSN 3030-3907