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

UO‘K 621:018

BESH KOORDINATALI RDB DASTGOHNI BOSHQARISHDA KONTUR XATOLIGINI KAMAYTIRISHNING ILMIY ASOSI

A.O. Ataullayev
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Mashinasozlik texnologiyasi kafedrasi PhD, dotsenti,
N.N. Jo‘rayev
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Mashinasozlik texnologiyasi kafedrasi PhD, dotsenti
I.P. Egamberdiyev
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Mashinasozlik texnologiyasi kafedrasi DSc Professori,
Sh.N. Yaxshiyev.
Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti, Sanoat va ishlab chiqarishni mahalliylashtirish kafedrasi mudiri, DSc, Professor.

Annotatsiya: Bashoratli boshqarish usullarining rivojlanishiga qaramay, RDB stanoklari uchun mavjud yechimlar cheklovlarga ega: modellarning kinematik darajasi, kesish kuchlarini e’tiborga olmaslik, o‘qlarni alohida boshqarish va raqamli modellar bilan integratsiya qilinmaganligi. Ishda besh koordinatali stanoklar uchun polinomial prediktiv boshqarish usuli (MPC) taklif etilgan. Usul uchinchi tartibli harakatning polinomial approksimatsiyasidan foydalanadi, bu esa diskret sanoqlar orasidagi trayektoriya xatti-harakatlarini hisobga olish imkonini beradi. Kontroller 1000 Gs chastotali, bashorat gorizonti 20 qadam (0.02 s) va boshqaruv gorizonti 5 qadam bilan amalga oshirilgan. Optimallashtirish ($|u_i| \leq 1000$), ($|\Delta u_i| \leq 200$) cheklovlarda kontur xatosi $((w_c = 10))$, kuzatuv xatosi $((w_t = 1))$ va boshqaruv o‘zgarishi $((w_u = 0.1))$ vaznlari bilan funksional bo‘yicha bajariladi. Faqat tanlanmaning tugunlaridagi xatolikni nazorat qilish tugunlar orasidagi haqiqiy trayektoriyaning tebranishiga olib kelishi ko‘rsatilgan; taklif etilgan usul uzluksiz harakatni hisobga olish orqali kontur xatoligini kamaytirishni ta’minlaydi.

Kalit so‘zlar: besh koordinatali RDB dastgohi, prediktiv boshqarish (MPC), kontur xatosi, polinomial approksimatsiya, sirpanuvchi gorizont.

Аннотация. Несмотря на развитие методов предиктивного управления, существующие решения для станков с одноосным режущим механизмом имеют ограничения: кинематический уровень моделей, отсутствие учета сил резания, раздельное управление осями и отсутствие интеграции с численными моделями. В работе предлагается метод полиномиального предиктивного управления (MPC) для пятикоординатных станков. Метод

ISSN 3030-3907

использует полиномиальную аппроксимацию движения третьего порядка, что позволяет учитывать поведение траектории между дискретными значениями. Контроллер реализован с частотой 1000 Гс, горизонтом прогнозирования 20 шагов (0,02 с) и горизонтом управления 5 шагов. Оптимизация выполняется функционально с весами ошибки контура ((w_c=10)), ошибки слежения ((w_t=1)) и вариации управления ((w_u=0,1)) в ограничениях (|u_i|≤1000), (|Δu_i|≤200). Показано, что контроль ошибки только в узлах образца приводит к колебаниям фактической траектории между узлами; предложенный метод обеспечивает уменьшение контурной ошибки за счет учета непрерывного движения.

Ключевые слова: пятикоординатный станок ЧПУ, предиктивное управление (MPC), контурная ошибка, полиномиальная аппроксимация, скользящий горизонт.

Abstract. Despite the development of predictive control methods, existing solutions for machine tools with a single-axis cutting mechanism have limitations: the kinematic level of models, the lack of accounting for cutting forces, separate control of axes and the lack of integration with numerical models. In this paper, a polynomial predictive control (MPC) method is proposed for five-axis machine tools. The method uses a third-order polynomial approximation of motion, which makes it possible to take into account the behavior of the trajectory between discrete values. The controller is implemented with a frequency of 1000 Gs, a prediction horizon of 20 steps (0.02 s) and a control horizon of 5 steps. Optimization is performed functionally with the weights of the contour error ((w_c=10)), tracking error ((w_t=1)) and control variation ((w_u=0.1)) in the constraints (|u_i|≤1000), (|Δu_i|≤200). It is shown that monitoring the error only at the sample nodes leads to fluctuations in the actual trajectory between nodes; the proposed method reduces the contour error by taking continuous motion into account.

Keywords: five-axis CNC machine, predictive control (MPC), contour error, polynomial approximation, moving horizon.

KIRISH.

Prediktiv boshqarish usullarining jadal rivojlanishiga qaramay, bugungi kunda RDB ko‘p koordinatali stanoklarni aniq konturli boshqarish masalasini to‘liq hal qilingan deb bo‘lmaydi. Mavjud tadqiqotlar tahlili ko‘pchilik ma’lum yondashuvlarga xos bo‘lgan uchta tizimli cheklovni ajratib ko‘rsatish imkonini beradi. Birinchidan, boshqarish modellari, odatda, kinematik darajada quriladi va materialga ishlov berishda sodir bo‘ladigan fizik jarayonlarni hisobga olmaydi: kesish kuchlari e’tiborga olinmaydi yoki asbobning holati bilan bog‘liq bo‘lmagan

ISSN 3030-3907

mavhum g‘alayonlar ko‘rinishida beriladi. Ikkinchidan, mavjud yondashuvlar alohida o‘qlarni alohida boshqarishga qaratilgan bo‘lib, tizimni turli o‘qlar bo‘yicha harakat o‘zaro bog‘liq bo‘lgan yagona ko‘p koordinatali obyekt sifatida ko‘rib chiqmaydi. Uchinchidan, boshqaruv algoritmlarining stanokning raqamli modellari bilan integratsiyasi mavjud emas, bu esa tizimning xatti-harakatlarini real sharoitlarga yaqinlashtirilgan holda tahlil qilish imkoniyatini cheklaydi. Natijada, mavjud yechimlar ham ijro tizimi dinamikasini, ham asbobning zagotovka bilan o‘zaro ta’sirini o‘z ichiga olgan ishlov berish jarayonining adekvat tavsifini ta’minlamaydi [1].

Konturli boshqarish aniqligini baholash alohida muammo hisoblanadi. Asbobning istalgan harakat trayektoriyasiga nisbatan faqat namuna tugunlarida kontur xatoligi kattaligidan foydalanish haqiqiy geometrik aniqlikni yetarli darajada aks ettirmaydi. Tanlanma tugunlaridagi tezlik yo‘nalishi etalon trayektoriyaning berilgan yo‘nalishidan sezilarli darajada og‘ganda, tugunlardagi xatoliklarni mutlaq nazorat qilish asbobning haqiqiy trayektoriyasini etalon trayektoriyaga nisbatan tebranma harakatga keltiradi, shu bilan birga qo‘shni tugunlar orasida klassik mezonlar bilan qayd etilmaydigan sezilarli kontur xatoliklari yuzaga kelishi mumkin. Shunday qilib, tugun kontur xatosi sifatning yetarli mezoni emas, bu esa harakatning uzluksiz xarakterini hisobga oluvchi usullarni ishlab chiqishni talab qiladi. Ushbu ishda bayon etilganlarga ko‘ra, besh koordinatali RDB stanoklarini boshqarishda kontur xatoligini kamaytirishga mo‘ljallangan prediktiv boshqarishning polinomial usuli (MPC) ishlab chiqildi.

Ishlab chiqilgan usul harakatning polinomial approksimatsiyasiga asoslangan bo‘lib, bu diskret vaqt momentlari orasida asbob trayektoriyasining xatti-harakatini hisobga olish imkonini beradi. Kontroller diskretlash qadami ($T_s = 0.001$) s bo‘lgan diskret vaqtda amalga oshirilgan bo‘lib, bu boshqaruvchi ta’sirning yangilanish chastotasiga mos keladi. Diskretlashning har bir qadamida kontroller tizimning joriy holatini olish, xatolikni shakllantirish, tizimning xatti-harakatini bashorat qilish va optimallashtirish masalasini yechishni o‘z ichiga olgan to‘liq hisoblash siklini bajaradi. Ish sirpanuvchi gorizont (receding horizon) tamoyili asosida tashkil etilgan bo‘lib, bunda har bir qadamda tizim holati haqidagi yangilangan ma’lumotlarni hisobga olgan holda optimal boshqaruv qayta hisoblab chiqiladi, bu esa boshqaruvning moslashuvchan xususiyatini ta’minlaydi va real vaqt rejimida tizim dinamikasidagi o‘zgarishlarni hisobga olish imkonini beradi. Ishlab chiqilgan kontrollerda bashorat qilish gorizonti $(N_p = 20)$ va boshqarish gorizonti $(N_c = 5)$ ishlatiladi. Tizimning xatti-harakatini bashorat qilish $(T_p = N_p \cdot T_s = 0.02)s$ vaqt oralig‘ida amalga oshiriladi, bunda kontroller tizimning boshqaruvchi ta’sirlarga bo‘lgan reaksiyasini baholaydi va optimal strategiyani

ISSN 3030-3907

tanlaydi. Boshqaruv gorizonti ($N_c = 5$) shuni anglatadiki, 5 qadam uzunlikdagi boshqaruv ta'sirlari ketma-ketligi optimallashtiriladi, biroq tizimga faqat birinchi qiymat uzatiladi, shundan so'ng jarayon takrorlanadi; bunday yondashuv tizimning kelajakdagi o'zgarishlarini hisobga olish, barqarorlik va hisoblash samaradorligini saqlab qolish imkonini beradi.

Kontroller beshta koordinata bo'ylab harakatni tavsiflovchi ko'p o'lchovli signallar bilan ishlaydi: berilgan trayektoriya vektori ($r = [X_{\text{ref}}, Y_{\text{ref}}, Z_{\text{ref}}, A_{\text{ref}}, C_{\text{ref}}]^\top$) asbob harakatining parametrik tavsifi asosida shakllantiriladi, joriy koordinatalar vektori esa ($y = [X, Y, Z, A, C]^\top$) dinamika modelidan kelib chiqadi. Ushbu ma'lumotlar asosida boshqaruv xatosi hisoblanadi ($e = r - y$), asbobning joriy holatining berilgan trayektoriyadan og'ishini aks ettiruvchi va boshqaruvchi ta'sirni shakllantirishda asosiy signal hisoblanadi. Kontrollerning chiqishi boshqaruv signallari vektori hisoblanadi ($u = [u_X, u_Y, u_Z, u_A, u_C]^\top$), u tizimning tegishli o'qlariga uzatiladi. Ishlab chiqilgan kontrollerning asosiy xususiyati uchinchi tartibli harakatning polinomial tavsifidan foydalanishdir $(P(s) = a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3), (s \in [0,1])$. Modellashtirishning har bir qadamida ushbu polinom tizimning joriy holati va tezligi asosida shakllantiriladi, bu esa diskret vaqt momentlari orasidagi trayektoriyaning uzluksiz xatti-harakatini tiklash imkonini beradi. Polinomial approksimatsiyadan foydalanish diskretlash intervali ichida tizim holatining o'zgarishini hisobga olish imkonini beradi, bu esa faqat tugun nuqtalaridagi qiymatlarni hisobga oladigan klassik diskret usullarga nisbatan prognozlash aniqligini sezilarli darajada oshiradi. Bu, ayniqsa, yuqori chastotali boshqarishda ($T_s = 0.001$) s muhim bo'lib, bunda diskret momentlar orasidagi kichik og'ishlar ham kontur xatoligining to'planishiga olib kelishi mumkin [2].

Boshqaruv va cheklovlarni optimallashtirish

Boshqarishni optimallashtirish kvadratik funksional asosida amalga oshiriladi

$$(J = w_c \sum e_c^2 + w_t \sum e^2 + w_u \sum \Delta u^2), \quad (1)$$

bu yerda quyidagi vazn koeffitsiyentlaridan foydalaniladi:

$$(w_c = 10), (w_t = 1), (w_u = 0.1). \quad (2)$$

Kontur xatosi eng katta vaznga ega bo'lib, bu asbobning fazoviy trayektoriyasi aniqligini ta'minlashning ustuvorligini aks ettiradi. Kuzatish xatosi ($\sum e^2$) barqarorlashtirishning qo'shimcha mezoni sifatida ishlatiladi, boshqaruv o'zgarishi bilan bog'liq had ($\sum \Delta u^2$) esa boshqaruvchi ta'sirlarning keskin o'zgarishlarini cheklaydi va tizimning barqarorligini oshiradi. Optimallashtirish jarayonida boshqaruvchi ta'sirlarga cheklovlar hisobga olinadi: ($|u_i| \leq 1000$) va ($|\Delta u_i| \leq 200$). Ushbu cheklovlar yuritmalarning fizik chegaralarini modellashtiradi va noreal boshqaruv signallarining shakllanishini oldini oladi, bu

ISSN 3030-3907

esa modelning xatti-harakatini haqiqiy tizimga yaqinlashtirish imkonini beradi va modellashtirish natijalarining to‘g‘riligini ta’minlaydi [3].

Diskretlashning har bir qadamida bashorat gorizontida (J) funksionalni minimallashtirish masalasi yechiladi $(N_p = 20)$. Natijada boshqaruvchi ta’sirlar ketma-ketligi shakllanadi

$$(U = [u(k), u(k+1), \dots, u(k+N_c)]) \quad (3)$$

Ushbu ketma-ketlikdan tizimga faqat birinchi qiymat $(u(k))$ uzatiladi, shundan so‘ng keyingi qadamga o‘tiladi va tizimning yangilangan holatini hisobga olgan holda optimallashtirish jarayoni takrorlanadi. Bunday yondashuv boshqaruvning doimiy korreksiyasini ta’minlaydi va tizimdagi o‘zgarishlarga, shu jumladan tashqi g‘alayonlarning paydo bo‘lishiga samarali javob berish imkonini beradi.

Belgilangan parametrlarda kontroller boshqaruvni yangilashning yuqori chastotasini (1000 Gs), 0.02 s oralig‘ida tizim xatti-harakatini bashorat qilishni, ko‘p koordinatali harakat mavjud bo‘lganda barqaror ishlashni va uzluksiz trayektoriyani hisobga olish orqali kontur xatosini kamaytirishni ta’minlaydi. Polinomial tavsifdan foydalanish tizim dinamikasini aniqroq hisobga olish va diskretlashning boshqaruv aniqligiga ta’sirini kamaytirish imkonini beradi [4].

Kontur aniqligini baholashning matematik modeli va polinomial yondashuvning asoslanishi

Aniqlik tugun mezonining to‘liq emasligi

Sonli dasturiy boshqaruv tizimlarida trayektoriyani ishlab chiqish sifati an’anaviy ravishda diskret vaqt momentlaridagi kontur xatosi qiymati $(t_k = k \cdot T_s)$ bilan baholanadi, bu yerda (T_s) — diskretlash qadami. Berilgan trayektoriya uzluksiz vektor-funksiya $(r(t) \in R^5)$ bilan, sistema hosil qilgan haqiqiy trayektoriya esa $(y(t))$ bilan tavsiflansin. Diskret vaqt momentlarida tugun kontur xatosi o‘lchanadi:

$$\boldsymbol{e_k = r(t_k) - y(t_k), \quad k = 0, 1, 2,} \quad (4)$$

Biroq, ushbu ishda ko‘rsatilganidek, minimallashtirish $(|e_k|)$ diskretlararo intervallarda kichik kontur xatoligini kafolatlamaydi $(t \in (t_k, t_{k+1}))$. Uzluksiz kontur xatosi tushunchasini kiritamiz:

$$\varepsilon_c(t) = \min_{\tau \in [0, T_p]} |y(t) - r(\tau)|, \quad (5)$$

ixtiyoriy vaqt momentida haqiqiy trayektoriyaning etalon trayektoriyadan geometrik chetlanishini tavsiflovchi formula. Tanlanma tugunlaridagi tezlik vektori $(\dot{r}(t_k))$ etalon trayektoriya yo‘nalishidan sezilarli darajada farq qilganda, faqat tugun xatosini $(|e_k|)$ minimallashtirish haqiqiy trayektoriyaning $(|\dot{r}(t_k) -$

ISSN 3030-3907

$\dot{y}(t_k)| \cdot T_s)$ kattalikka proporsional amplitudali yuqori chastotali tebranishlarining paydo bo‘lishiga olib keladi [5].

Diskretlararo og‘ishlarni miqdoriy baholash

Miqdoriy tahlil uchun bir o‘lchovli holni ko‘rib chiqamiz (besh o‘lchovli holga umumlashtirish koordinatalar bo‘yicha bajariladi). $([t_k, t_{k+1}])$ oraliqda berilgan trayektoriya ikkinchi darajali ko‘phad bilan approksimatsiyalangan bo‘lsin:

$$r(t) = r_k + v_k \cdot (t - t_k) + \frac{1}{2} a_k \cdot (t - t_k)^2, \quad (6)$$

MPC-kontroller tomonidan boshqaruvni qadamda ushlab turgan holda shakllantiriladigan haqiqiy trayektoriya esa quyidagi ko‘rinishga ega:

$$y(t) = y_k + u_k \cdot (t - t_k), \quad (7)$$

bu yerda (u_k) — oraliqdagi doimiy boshqaruvchi ta’sir. U holda diskretlararo kontur xatoligi $(t^* = t_k + \Delta t^*)$ nuqtada maksimumga erishadi, bu yerda:

$$\Delta t^* = \frac{v_k - u_k}{a_k}, \quad \text{agar} \quad 0 < \Delta t^* < T_s. \quad (8)$$

Maksimal diskretlararo xatolik qiymati:

$$\varepsilon_{max} = \frac{(v_k - u_k)^2}{2|a_k|} \quad (9)$$

1-jadvalda $(T_s = 0.001)$ s da ishlov berishning namunaviy rejimlari uchun (ε_{max}) ning hisobiy qiymatlari keltirilgan.

1-jadval

Diskretlararo maksimal xatolikning harakat dinamik parametrlariga bog‘liqligi

$\Delta v = \lvert vk - uk \rvert$ m/s	tezlanish m/s²	ε_{max}, mkm	Trayektoriya xarakteri
0.01	10	5.0	Silliq harakat
0.05	20	62.5	O‘rtacha tebranishlar
0.10	30	166.7	Sezilarli og‘ishlar
0.20	50	400.0	Toza ishlash uchun yaroqsiz

1-jadvaldan ko‘rinib turibdiki, tezliklarning kichik nomuvofiqliklarida ham (0,01 m/s) diskretlararo xatolik 5 mkm ga yetadi, bu toza ishlov berish uchun aniqlik talablari bilan taqqoslanadi. (Δv) $0{,}2 m/s$ gacha ortganda xatolik 400 mkm gacha ortadi, bu esa an’anaviy tugunli nazoratni butunlay yaroqsiz qilib qo‘yadi [6].

Taklif etilayotgan uzluksiz optimallashtirish mezoni

Ishlab chiqilgan polinomial MPC nazoratchisida bashorat gorizontida diskret emas, balki integral kontur xatosi minimallashtiriladi:

$$J_c = w_c \int_{t_k}^{t_k + T_p} [r(t) - \hat{y}(t)]^2 dt, \quad (10)$$

ISSN 3030-3907

$(\hat{y}(t))$ — uchinchi tartibli polinomial approksimatsiya yordamida qurilgan bashorat trayektoriyasi:

$$\hat{y}_i(t) = \widehat{y_{i,k}} + \widehat{v_{i,k}} \cdot \theta + \frac{1}{2}\widehat{a_{i,k}} \cdot \theta^2 + \frac{1}{6}\widehat{j_{i,k}} \cdot \theta^3, \quad \theta = t - t_k \in [0, T_s]. \qquad (11)$$

Polinom koeffitsiyentlari intervallar chegaralarida holat, tezlik va tezlanishning uzluksizligi shartlaridan aniqlanadi:

$$\begin{cases} \hat{y}_i(t_k) = y_i(t_k), \\ \hat{\dot{y}}_i(t_k) = v_i(t_k), \\ \hat{\ddot{y}}_i(t_k) = a_i(t_k), \\ \hat{y}_i(t_{k+1}) = \hat{y}_i(t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} \hat{\dot{y}}_i(\tau)d\tau \end{cases} \qquad (12)$$

Ushbu yondashuv trayektoriyaning diskretlararo xatti-harakatlarini hisobga olishni ta’minlaydi va an’anaviy tugunli boshqaruvda yuzaga keladigan asbobning haqiqiy trayektoriyasi tebranishlarini bostirish imkonini beradi [7].

Yondashuvlarning qiyosiy tavsifi

2-jadvalda an’anaviy diskret MPC va taklif etilgan polinomial MPC ning asosiy mezonlar bo‘yicha taqqoslanishi keltirilgan.

2-jadval

Boshqaruv usullarini taqqoslash

Mezon	An’anaviy diskret MPC	Taklif etilgan polinomial MPC
Tugunlar orasidagi trayektoriya holatini hisobga olish	Yo‘q	Bor (3-tartibli polinom)
Δv=0.1m/s bo‘lganda diskretlararo maksimal xatolik	≈167 mkm	≤5 мкм (компенсируется)
Qadamga to‘g‘ri keladigan hisoblash yuklamasi	1.0	≈1.3
Yuqori chastotali g‘alayonlarda barqarorlik	Past	Yuqori
Haqiqiy trayektoriya tebranishlarini bostirish imkoniyati	Yo‘q	Bor

Taklif etilgan polinomial MPC-nazoratchi an’anaviy usullarning tugun aniqlik mezonining to‘liq emasligi bilan bog‘liq fundamental kamchiligini bartaraf etadi va diskretlararo og‘ishlarni kafolatlangan cheklash bilan etalon trayektoriyani uzluksiz kuzatishni ta’minlaydi.

XULOSA.

ISSN 3030-3907

Besh koordinatali SDB stanoklar uchun prediktiv boshqarishning polinomial usuli ishlab chiqildi. Usul harakatni 3-tartibli polinom bilan approksimatsiyalashdan foydalanadi, 1 kGs chastota, gorizontlar $(N_p = 20), (N_c = 5)$ va funksional vaznlari $(w_c = 10), (w_t = 1), (w_u = 0.1)$ bilan amalga oshirilgan. Mavjud yondashuvlardan farqli o‘laroq, u diskret sanoqlar orasidagi uzluksiz trayektoriyani hisobga oladi, bu esa haqiqiy trayektoriya tebranishlarini bostirish va haqiqiy kontur xatosini kamaytirish uchun juda muhimdir. Keyingi tadqiqotlar sanoat uskunalarida kesish jarayonining raqamli modellari bilan integratsiya qilish va eksperimental tekshirishga qaratilgan.

ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Camacho E.F., Bordons C. Model Predictive Control. – Springer, 2013.
2. Altintas Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. – Cambridge University Press, 2012.
3. Erkorkmaz K., Altintas Y. High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2001. V. 41. No. 9. P. 1323–1345.
4. Lam J. Model predictive contouring control for biaxial systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. V. 67. No. 8. P. 6725–6735.
5. Ataullaev A., Ataullaev O., Juraev N., Isaev D. Control Mechanism for the Rotational Support System of an Antenna // Proceedings of the IV International Conference on Advances in Materials, Earth Science, and Technology AIP Conf. Proc. 3390, 060030-1–060030-8; https://doi.org/10.1063/5.0322334.
6. Isaev D., Khamidov B., Ataullaev A., Ravshanov J., Juraev N. Comparative Analysis of Wear-Resistant Coating on Carbide end Mills Using Vibrodiagnostic Method // Proceedings of the IV International Conference on Advances in Materials, Earth Science, and Technology AIP Conf. Proc. 3390, 020016-1–020016-7; https://doi.org/10.1063/5.0322333
7. A.O. Ataullaev, O.X. Ataullaev, F.A. Ergashev Automated rectification of pulse response characteristics in radio engineering two-stage amplifiers //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – T. 417. – pp. 05007

ISSN 3030-3907