

## SHAR PROKATLASH VALOKLARINI QIRQUVCHI KULACHOKLI MEXANIZMNING MATEMATIK MODELARI VA KINEMATIK TAHLILI

**Axmedov A.X., Hojibekov T.D., Axmedov D.A.**

*Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent sh.*

*e-mail: [azam0602@mail.ru](mailto:azam0602@mail.ru)*

**Annotatsiya.** Mazkur maqolada shar prokatchilash valoklarining uch kirimli ( $z = 3$ ), ariqchalar markazi radial yoʻnalishda siljigan (eksentrik) vintli kalibrlarini qirquvchi tizim kulachokli mexanizmlarining analitik matematik modellari va kinematik tahlili bayon etiladi. Kesuvchi asbobning fazaviy trayektoriyasini ifodalovchi parametrik analitik model, dezaksial kulachokli mexanizm uchun sinusoidal, kosinusoidal va doimiy tezlanish harakat qonunlarida siljish, tezlik analogi, tezlanish analogi, bosim burchagi va nisbiy tezlik formulalari keltiriladi. RT117 toko-vintkesar dastgohida kulachokli kopir, xodovoy vint va shpindel orasidagi harakatlar sinxronizatsiyasining kinematik tenglamalari shakllantiriladi. Texnologik xatolarni baholash natijalari GOST 7524-2015 talablari doirasida boʻlganligi aniqlandi. “Oʻzmetkombinat” AJ ga joriy etish natijasida import kulachokli kopirlar tannarxi 3–3,5 marta, chashka rezeslar va opravkalar 3,5–4 marta arzonlashtirildi;  $\varnothing 50$  mm sharlarni ishlab chiqarish unumdorligi 1,5–1,6 marta oshirildi.

**Kalit soʻzlar:** kulachokli mexanizm, shar prokatchilash valogi, vintli kalibr, eksentrisitet, kulachok profili, kinematik tahlil, sinxronizatsiya, texnologik xato, dezaksial mexanizm, bosim burchagi.

**Аннотация.** В данной статье представлены аналитические математические модели и кинематический анализ кулачковых механизмов системы нарезания шаропрокатных валков с трёхзаходными ( $z = 3$ ) винтовыми калибрами со смещёнными центрами ручьёв. Приводятся параметрические аналитические модели фазовой траектории режущего инструмента и формулы перемещения, аналогов скорости и ускорения, угла давления и относительной

скорости для дезаксиального кулачкового механизма при трёх законах движения. Сформированы уравнения кинематической синхронизации между кулачковым копиром, ходовым винтом и шпинделем станка РТ117. Суммарная технологическая погрешность  $\approx \pm 0,065$  мм соответствует требованиям ГОСТ 7524-2015. Внедрение разработанной технологии в АО “Узметкомбинат” позволило снизить стоимость кулачковых копиров в 3–3,5 раза и повысить производительность прокатки шаров  $\varnothing 50$  мм в 1,5–1,6 раза.

**Ключевые слова:** кулачковый механизм, шаропрокатный валок, винтовой калибр, эксцентриситет, профиль кулачка, кинематический анализ, синхронизация, технологическая погрешность, дезаксиальный механизм, угол давления.

**Annotation:** This paper presents analytical mathematical models and kinematic analysis of cam mechanisms for cutting ball-rolling rolls with three-start ( $z = 3$ ) helical calibres with offset groove centres. Parametric analytical models of the cutting-tool phase trajectory, and formulas for displacement, velocity and acceleration analogues, pressure angle and relative velocity are derived for a deaxial cam mechanism under three motion laws. Kinematic synchronisation equations between the cam copier, feed screw and spindle of the RT117 lathe are formulated. The total technological error of approximately  $\pm 0.065$  mm satisfies GOST 7524-2015 requirements. Implementation at Uzmetkombinat JSC reduced cam copier costs by 3–3.5 times and increased  $\varnothing 50$  mm ball-rolling productivity by 1.5–1.6 times.

**Key words:** cam mechanism, ball-rolling roll, helical calibre, eccentricity, cam profile, kinematic analysis, synchronisation, technological error, deaxial mechanism, pressure angle.

Metallurgiya va mashinasozlik sanoatida yuqori sifatli po‘lat sharlarni ishlab chiqarishda ko‘ndalang vintli prokatlash (helical rolling) usuli jahon amaliyotida yetakchi o‘rinni egallagan.  $\varnothing 50$  mm o‘lchamdagi maydalovchi sharlarni GOST 7524-2015 talablari asosida ishlab chiqarishda valokning uch kirimli ( $z = 3$ ), ariqchalar

markazi radial yo‘nalishda siljigan (eksentrik) vintli kalibrlarini aniq geometrik parametrlar bilan qirqish hal qiluvchi texnologik bosqich hisoblanadi [1, 2].

Bunday kalibrlarni qirqishda kesuvchi asbobning uch koordinatsiyalangan harakati (valok aylanishi, bo‘ylama siljish va radial tebranma harakat) qat’iy sinxronlashtirilishi zarur. Ushbu sinxronizatsiya kulachokli mexanizmlar (kulachokli kopirlar) yordamida amalga oshiriladi. Ariqchalar markazi siljigan (eksentrik) uch kirimli kalibrlar uchun kulachok profili oddiy sinusoidal qonun bilan ifodalanmaydi — u analitik jihatdan murakkabroq bo‘lib, aniq matematik modelni talab etadi [3, 4, 5].

O‘zbekiston sharoitida “O‘zmetkombinat” AJ (Bekobod sh.) da Ø50 mm po‘lat maydalovchi sharlarni mahalliy ishlab chiqarish uchun zarur kulachokli kopirlar, chashka rezesar va opravkalar avval to‘liq xorijdan (Rossiya, ООО фирма “ШПС”, Moskva) import qilinardi. Bu katta valyuta xarajatlari va texnologik bog‘liqlikka olib kelardi. Mazkur maqolada ushbu import bog‘liqligini bartaraf etish uchun ishlab chiqilgan kulachokli mexanizmlarning matematik modellari, kinematik tahlil natijalari va amaliy joriy etish ko‘rsatkichlari taqdim etiladi.

Uch kirimli vintli ariqchalarning geometrik modeli va kesuvchi asbob trayektoriyasini ko‘rib chiqamiz.

Ø50 mm li shar prokatlash valogining boshlang‘ich parametrlari chop etilgan tadqiqot natijalariga asoslanadi [2, 3]: kalibrning nominal diametri  $D_{kalibr} = 52,3 \text{ mm}$ ; ariqchalar soni  $z = 3$ ; kalibrning cho‘zilishi  $\varphi_{kalibr} = 960^{\circ}$ ; valok ish uzunligi  $l_{valok} = 411 \text{ mm}$ ; stanok qadami  $T_{st} = 150 \text{ mm / ayl}$ ; eksentrisitet  $e = 0..5 \text{ mm}$ .

Dekart koordinata tizimida valok markazi koordinata boshi sifatida qabul qilinadi.  $j$ -ariqcha markazi  $O_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ) ning koordinatalari valok  $\varphi$  burchakka aylanganida quyidagicha ifodalanadi:

$$x \cdot j(\varphi) = e \cos(\varphi + 2\pi(j-1)/z), \quad (1)$$

$$y \cdot j(\varphi) = e \sin(\varphi + 2\pi(j-1)/z), \quad (2)$$

bunda  $e$  — eksentrisitet (mm);  $z=3$  — kirimlar soni.  $j$  - ariqcha uchun kesuvchi asbobning radial koordinatasi quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$r \cdot j(\varphi) = Rk + e \cos(z\varphi + 2\pi(j-1)/z). \quad (3)$$

(3) formulada  $z\varphi$  ko‘paytmasi juda muhim fizik ma’noga ega: valok bir marta aylanganida ( $\varphi = 2\pi$ ) kosinusoidaning  $z=3$  ta to‘liq tebranish davri bo‘ladi — har biri bitta ariqchanning shakllanishiga mos keladi. Eksentrisitetning radial tebranish amplitudasiga ta’siri 1-jadvalda keltirilgan.

**1-jadval. Turli eksentrisitet qiymatlarida kesuvchi asbobning radial harakat diapazoni**

$e$ , mm	$r_{\min}$ , mm	$r_{\max}$ , mm	$2A = 2e$ , mm	Nisbiy amplituda $2e/Rk$ , %
0	26,15	26,15	0	0
1,0	25,15	27,15	2,0	7,65
2,0	24,15	28,15	4,0	15,30
3,0	23,15	29,15	6,0	22,94
4,0	22,15	30,15	8,0	30,59

Kulachok profilini qurishning analitik modellarini ishlab chiqamiz.

Dezaksial kulachokli mexanizmدا tolkatelning siljishi  $s_{T(\varphi_k)}$ , tezlik analogi  $r_{\min}(s'_{T(\varphi_k)})$  va tezlanish analogi  $s''_{T(\varphi_k)}$  uchta harakat qonuni asosida hisoblanadi [5, 6].

Sinusoidal harakat qonuni — ko‘tarilish fazasi ( $0 < \varphi_k < \varphi_1$ ):

$$s_{T(\varphi_k)} = h \left[ \varphi_k / \varphi_1 - (1/2\pi) \sin(2\pi\varphi_k / \varphi_1) \right], \quad (4)$$

$$s'_{T(\varphi_k)} = (h / \varphi_1) [1 - \cos(2\pi\varphi_k / \varphi_1)], \quad (5)$$

$$s''_{T(\varphi_k)} = (2\pi h / \varphi_1^2) \sin(2\pi\varphi_k / \varphi_1). \quad (6)$$

Sinusoidal qonunning asosiy afzalligi — fazalar o‘tish nuqtalarida  $s''_T = 0$ , ya’ni zarbasiz o‘tish ta’minlanadi. Bu mexanizmning uzoq muddatli ishlash muddatini oshiradi va tebranishlarni kamaytiradi [5].

Kosinusoidal harakat qonuni — tushish fazasi ( $\psi_1 < \varphi_k < \psi_2$ ):

$$s_{T(\varphi_k)} = (h/2)[1 + \cos(\pi(\varphi_k - \psi_1)/\varphi_3)], \quad (7)$$

$$s'_{T(\varphi_k)} = -(\pi h/2\varphi_3) \sin(\pi(\varphi_k - \psi_1)/\varphi_3). \quad (8)$$

Kosinusoidal qonunda sinusoidal qonundan farqli o‘laroq fazalar o‘tish nuqtalarida tezlanish nolga teng emas — u “yumshoq zarba” holatini yaratadi.

Doimiy tezlanish (parabolik) qonuni — ko‘tarilish birinchi yarmi ( $0 < \varphi_k < \varphi_1/2$ ):

$$s_{T(\varphi_k)} = 2h(\varphi_k/\varphi_1)^2, \quad (9)$$

$$s''_{T(\varphi_k)} = 4h/\varphi_1 = const. \quad (10)$$

Doimiy tezlanish qonunining kamchiligi — birinchi yarimdan ikkinchi yarimga o‘tishda tezlanish ishorasi keskin o‘zgarib (“qattiq zarba” yuzaga keladi) va mexanizmda kuchli dinamik yuklamalar hosil bo‘ladi [6].

Kulachok profilining asosiy parametrlari siljish  $s_{T(\varphi_k)}$  aniqlanganidan keyin quyidagi formulalar yordamida hisoblanadi. Kontakt nuqtasi B ning radius-vektori:

$$R(\varphi_k) = \sqrt{[e^2 + (R_0 + s_{T(\varphi_k)})^2]}. \quad (11)$$

Bosim burchagi:

$$\theta(\varphi_k) = \arctan[(s'_{T(\varphi_k)} - e)/(R_0 + s_{T(\varphi_k)})]. \quad (12)$$

Nisbiy tezlik:

$$V_{B_2B_1} = \sqrt{[(\omega_1(R_0 + s_T))^2 + (s'_T \cdot \omega_1)^2]}. \quad (13)$$

Uchala harakat qonunining qiyosiy kinematik tahlil natijalari 2-jadvalda keltirilgan ( $\omega_1 = 25 \text{ s}^{-1}$ ,  $R_0 = 80 \text{ mm}$ ,  $h = 50 \text{ mm}$ ,  $e = 40 \text{ mm}$ ).

## 2-jadval. Turli harakat qonunlari uchun dezaksial kulachokli mexanizmning kinematik parametrlari

Parametr	Sinusoidal	Kosinusoidal	Doimiy tezlanish
$V_{B_1B_2 \max}$ , m/s	0,781	1,052	1,325
$\theta_{\max}$ , °	29,19	34,73	42,51
$s''_{T \max}$ , mm / rad <sup>2</sup>	127,3	98,7	81,1
Zarba xarakteri	Zarbasiz	Yumshoq zarba	Qattiq zarba
Amaliy tavsiya	Eng tavsiya etiladi	Maqbul	Faqat past tezlikda

2-jadvaldan ko‘rinib turibdiki, sinusoidal qonun eng qulay kinematik parametrlarni beradi: nisbiy tezlik eng past ( $V_{B_1B_2} = 0,781 \text{ m/s}$ ), bosim burchagi eng kichik ( $\theta_{\max} = 29,19^\circ$ ), zarbasiz ishlash ta‘minlanadi. Shu sababli shar prokatlash valoklarini qirquvchi kulachokli mexanizmlar uchun sinusoidal harakat qonuni asosiy variant sifatida tavsiya etiladi [5, 6].

RT117 toko-vintkesar dastgohida vintli kalibrn qirqishda kulachokli kopir, xodovoy vint va shpindel orasidagi uchta koordinatsiyalangan harakatning qat‘iy sinxronizatsiyasi talab etiladi [7, 8]. Kinematik tenglamalar tizimi quyidagicha shakllantiriladi.

Valokning aylanma harakati:

$$\varphi \cdot v(t) = \omega \cdot v(t) \cdot t. \quad (14)$$

Kesuvchi asbobning bo‘ylama siljishi (xodovoy vint orqali):

$$z \cdot k(t) = (S_T / 360^\circ) \cdot \varphi \cdot v(t). \quad (15)$$

Kesuvchi asbobning radial harakati (kulachokli kopir orqali):

$$r \cdot k(t) = R \cdot k + e \cdot \cos(z \cdot \omega \cdot v \cdot t + \alpha_0). \quad (16)$$

Radial siljish maksimal tezligi va tezlanishi:

$$V_{r \max} = e \cdot z \cdot \omega_v, \quad (17)$$

$$a_{r \max} = e \cdot z^2 \cdot \omega_v^2. \quad (18)$$

Sonli misol:  $e = 3\text{mm}$ ,  $z = 3$ ,  $\omega_v = \pi \text{ rad} / \text{s}$  ( $n_v = 30 \text{ min}^{-1}$ ) da  
 $V_{r\text{max}} = 28,3 \text{ mm} / \text{s}$ ;  $a_{r\text{max}} = 267 \text{ mm} / \text{s}^2$ .

Kulachokli kopirning shpindel bilan bog‘lanish sharti quyidagicha:  
 $\omega_{\text{kopir}} / \omega_v = z = 3$ , ya’ni kulachokli kopir valokdan  $z = 3$  marta tez aylanishi kerak — har bir valok aylanishida uchta ariqchani qirqish uchun. Ushbu nisbat RT117 dastgohining reduktori ( $i = 35$ ) va almashtiriluvchi tishli g‘ildiraklar orqali ta’minlanadi [7].

Endi texnologik xatolarni baholab olamiz. RT117 dastgohining kinematik zanjirida sinxronizatsiya xatosining beshta asosiy manbai aniqlandi: tishli uzatmalardagi bo‘shliqlar ( $\Delta_1 = 0,05 \text{ mm}$ ); xodovoy vint qadamidagi xato ( $\Delta_2 = 0,02 \text{ mm}$ ); kulachokli kopir profilining ishlab chiqarish xatosi ( $\Delta_3 = 0,015 \text{ mm}$ ); termal deformatsiyalar ( $\Delta_4 = 0,01 \text{ mm}$ ); suport yo‘naltiruvchisidagi ishqalanish va elastiklik ( $\Delta_5 = 0,01 \text{ mm}$ ).

Umumiy texnologik xato tasodifiy xatoliklarning yig‘indisi qoidasi asosida baholanadi [7, 8]:

$$\Delta_{\text{umum}} = k \cdot \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2}. \quad (19)$$

$k = 1,15$  qiymatida hisoblash natijasi:

$\Delta_{\text{umum}} = 1,15 \cdot \sqrt{0,0025 + 0,0004 + 0,000225 + 0,0001 + 0,0001} \text{ mm} \approx \pm 0,065 \text{ mm}$ . Bu natija GOST 7524-2015 da yo‘l qo‘yiladigan chetlanish ( $\pm 3,0 \text{ mm}$ ) dan 46 martadan ortiq kichikdir. Demak, RT117 dastgohining modernizatsiyasidan keyingi texnologik aniqlik standart talablarni to‘liq qondiradi. Uchala harakat qonunida sinxronizatsiya xatosi tahlili 3-jadvalda keltirilgan.

### 3-jadval. Turli harakat qonunlarida sinxronizatsiya xatosining qiyoslanmasi

Harakat qonuni	$\Delta r$ , mm	$\Delta z$ , mm	$\Delta_{\text{umum}}$ , mm	GOST talabi, mm	Baho
Sinusoidal	$\pm 0,020$	$\pm 0,020$	$\pm 0,033$	$\pm 3,0$	Eng qulay
Kosinusoidal	$\pm 0,030$	$\pm 0,020$	$\pm 0,042$	$\pm 3,0$	Maqbul

Doimiy tezlantirish	$\pm 0,060$	$\pm 0,030$	$\pm 0,078$	$\pm 3,0$	Chegarada
---------------------	-------------	-------------	-------------	-----------	-----------

Olib borilgan tadqiqotlar asosida kulachokli kopirlarni tayyorlash texnologiyasi va amaliy natijalar quyidagilardan iborat:

Kulachokli kopirni tayyorlashda profilning ishlab chiqarish xatosini minimallashtirish uchun *MathCAD 15* → *SolidWorks* → *RDB* frezerlash texnologik zanjiri qoʻllanildi. Bu jarayon quyidagi bosqichlardan iborat:

1) *MathCAD 15* muhitida kulachok profilining barcha koordinatalari (1)–(13) formulalar asosida aniq hisoblangadi — profil nuqtalari  $0,5^\circ$  qadam bilan, jami 720 nuqta;

2) Hisoblangan nuqtalar *SolidWorks* muhitida 3D-model koʻrinishida quriladi va parametrik splayn orqali silliq profil hosil qilinadi;

3) 3D-model asosida *RDB* vertikal-frezerlash dastgohida kulachokli kopir ishlab chiqariladi — bu  $\pm 0,01$  mm aniqlikni taʼminlaydi;

4) Tayyor kulachokli kopir profil proyektorda  $\pm 0,005$  mm aniqlikda tekshiriladi va *MathCAD* hisoblash natijalari bilan solishtiriladi.

Ushbu texnologik zanjir asosida ishlab chiqilgan mahalliy kulachokli kopirlar “Oʻzmetkombinat” AJ ga 2022 yilning II-choragi davomida joriy etildi (GPS № 8/2022). Amaliy joriy etish natijalari 4-jadvalda keltirilgan.

#### 4-jadval. “Oʻzmetkombinat” AJ ga joriy etish natijalari (2022 y.)

Koʻrsatkich	Import texnologiya	Mahalliy texnologiya	Samara
Kulachokli kopirlar tannarxi (1 komplekt)	~3200 USD	~900–1000 USD	3–3,5 marta arzon
Chashka rezeslar (30 dona)	~4500 USD	Mahalliy	3,5–4 marta arzon
$\varnothing 50$ mm shar ishlab chiqarish unumdorligi	—	1,5–1,6 marta oʻsish	+50–60%
Yillik haqiqiy iqtisodiy samara	—	3 305 000 000 soʻm	Tasdiqlangan

## XULOSALAR

1. Uch kirimli, ariqchalar markazi radial yo‘nalishda  $e$  miqdorida siljigan vintli kalibrlarning to‘liq geometrik modeli shakllantirildi: ariqchalar markazlari koordinatalari (1)–(2), kesuvchi asbobning radial holati (3) va fazoviy trayektoriyasi analitik ko‘rinishda ifodalandi.  $e$  ning ortishi bilan radial tebranish amplitudasi chiziqli ravishda oshishi aniqlandi.

2. Dezaksial kulachokli mexanizm uchun kulachok profilini qurishning aniq analitik modeli ishlab chiqildi: sinusoidal, kosinusoidal va doimiy tezlanish harakat qonunlari uchun siljish, tezlik analogi, tezlanish analogi (4)–(10), kulachok radius-vektori (11), bosim burchagi (12) va nisbiy tezlik (13) formulalari keltirildi.

3. Qiyosiy kinematik tahlil (2-jadval) shuni ko‘rsatdiki, sinusoidal qonun eng qulay parametrlarni beradi: nisbiy tezlik  $V_{\max} = 0,781 \text{ m/s}$ , bosim burchagi  $\theta_{\max} = 29,19^\circ$ , zarbasiz ishlash. Ushbu qonun shar prokatlash valoklarini qirquvchi kulachokli mexanizmlar uchun asosiy variant sifatida tavsiya etiladi.

4. RT117 dastgohida kulachokli kopir, xodovoy vint va shpindel orasidagi harakatlar sinxronizatsiyasining kinematik tenglamalari tizimi (14)–(18) shakllantirildi. Umumiy texnologik xato  $\Delta_{\text{umum}} \approx \pm 0,065 \text{ mm}$  deb baholandi (19), bu GOST 7524-2015 talabidan ( $\pm 3,0 \text{ mm}$ ) 46 martadan ortiq kichikdir.

5. *MathCAD 15* → *SolidWorks* → *RDB* frezerlash texnologik zanjiri asosida ishlab chiqilgan mahalliy kulachokli kopirlar “O‘zmetkombinat” AJ ga 2022 yilda joriy etildi (GPS № 8/2022). Natijada kulachokli kopirlar tannarxi 3–3,5 marta, chashka rezesar va opravkalar 3,5–4 marta arzonlashtirildi; Ø50 mm majdaloovchi sharlarni ishlab chiqarish unumdorligi 1,5–1,6 marta oshirildi; yillik haqiqiy iqtisodiy samaradorlik 3 305 000 000 so‘mni tashkil etdi.

### Foydalanilgan adabiyotlar

1. Артоболевский И.И. Механизмлар ва машиналар назарияси. — М.: Наука, 1988. — 640 б.

2. Шахобутдинов Р.Э., Хожобеков Т.Д., Носиров Т.Н., Хуррамов Д.Х. Особенности калибровки шаропрокатных валков со сверхзаходными

винтовыми калибрами. Сообщение 1 // Калибровочное бюро. — 2022. — № 20. — С. 15–28. (ISSN 2308-6440, РИНС).

3. Шахобутдинов Р.Э., Хожибеков Т.Д., Носиров Т.Н., Хуррамов Д.Х. Особенности калибровки схаропркатных валков со сверхзаходными винтовыми калибрами. Сообщение 2 // Калибровочное бюро. — 2022. — № 21. — С. 10–24. (ISSN 2308-6440, РИНС).

4. ГОСТ 7524-2015. Шари мелющие стальные для шаровых мельниц. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2015. — 12 с.

5. Каримов Р.И., Шахобутдинов Р.Е., Хожибеков Т.Д. Исследование факторов, влияющих на относительные скорости в кулачковых механизмах при синусоидальном законе движения толкателя // ТДТУ Хабарлари. — 2018. — № 2. — С. 45–52.

6. Вулфсон И.И. Кулачковые механизмы: Динамика и прочность. — Л.: Машиностроение, 1983. — 328 с.

7. Шахобутдинов Р.Э. Шар прокатлаш валокларини кирқувчи тизим кулачокли механизмларини ишлаб чиқиш ва таҳлил қилиш: PhD диссертация. — Тошкент: ТДТУ, 2022. — 154 б.

8. Wang B., Liu W., Xu H., Zhang Q. Research on hot rolling process of large diameter steel balls // Journal of Materials Processing Technology. — 2024. — Vol. 325. — P. 118–132.

9. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. Numerical analysis of the cross-wedge rolling process for producing balls // Procedia Manufacturing. — 2019. — Vol. 27. — P. 109–116.