



КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-12>

УДК 514.18

О. О. Вершков¹, канд. техн. наук

ORCID: 0009-0009-0616-8983

О. Є. Мацулевич¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0001-5553-709X

М. В. Супрун¹, асистент

ORCID: 0009-0000-5903-1336

І. Р. Тетервак¹, асистент

ORCID: 0009-0009-0616-8983

¹ *Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*e-mail: oleksandr.vershkov.edu.ua**МОДЕЛЮВАННЯ КУЛАЧКІВ ЗУБОЗАТОЧУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ**

Анотація. У роботі вирішується завдання геометричного моделювання функціональних поверхонь кулачкових заточувальних пристроїв на основі таблично заданого закону переміщення штовхача з подальшою корекцією прямолінійних ділянок супроводжуючої ламаної лінії контуру кулачка, що задовольняє вимогам, які висуваються до роботи кулачкових механізмів із низькою швидкістю обертання.

Для цього авторами проаналізовано традиційну методику розрахунку профілю кулачка та виявлено її недоліки. На підставі аналізу цієї методики запропоновано універсальну методику проєктування робочих профілів кулачкових механізмів, а саме метод отримання координат профілю робочої поверхні кулачка на основі дискретного диференціювання табличної функції.

Для вирішення зазначеної проблеми запропоновано універсальний спосіб проєктування робочих профілів кулачків подачі та заточування для зубозаточувальних верстатів.

Доведено, що графіки аналогів швидкостей і прискорень переміщення штовхача, побудовані запропонованим способом, мають неосцилюючий характер, більш плавну зміну показників і відповідають графіку переміщень штовхача.

Згладжені значення швидкостей та прискорень переміщення штовхача розташовуються всередині смуги, що свідчить про відсутність осциляції. Запропонована методика дає змогу отримати значення швидкостей і прискорень переміщення штовхача в усіх заданих точках контуру кулачка. На основі отриманих значень швидкостей і прискорень отримано полярні координати точок профілю кулачків. Але розраховані точки мають полярні координати і розташовані на нерівномірній сітці кутів повороту кулачка. Це створює незручності під час подальшого використання програм для верстатів із числовим програмним забезпеченням. До того ж для забезпечення необхідної гладкості робочої поверхні кулачка визначеної кількості координат недостатньо. У зв'язку із цим авторами запропоновано схему згущення та проведено корекцію прямолінійних ділянок супровідної ламаної лінії.

Ключові слова: дискретно-представлена крива (ДПК), супроводжуюча ламана лінія (СЛЛ), кулачковий механізм, прямолінійна ділянка.

Постановка проблеми. У багатьох практичних застосуваннях, що вимагають циклічного повторення рухів робочого органу, широко використовуються механічні копіювальні пристрої. Одним із прикладів є заточування ріжучих елементів лісопильних машин. Кулачкові механізми ефективно справляються з подібними завданнями, оскільки вирізняються надійністю, простотою будови та зручністю в експлуатації. Проте користувачі стандартних заточувальних пристроїв часто мають труднощі з точним відтворенням геометрії зуба оригінального полотна після обробки. Ці проблеми зумовлені неточностями в обчисленні координат точок профілю

кулачка-копіра, що безпосередньо впливає на якість профільного заточування. Застосування полярної системи координат у процесі геометричного моделювання профілю кулачка може допомогти усунути ці недоліки.

Аналіз останніх досліджень. У працях [1; 2] розглядається спосіб моделювання кулачкових профілів газорозподільних систем двигунів внутрішнього згоряння з використанням полярних координат, де вихідною інформацією є табличне представлення руху штовхача. Створений таким чином профіль кулачка задовольняє вимоги, що ставляться до функціонування газорозподільних механізмів ДВЗ. Однак застосування цієї методики до геометричного моделювання кулачкових механізмів заточувальних пристроїв має певні обмеження. Ці недоліки зумовлені тим, що дискретні координати кулачкових профілів у швидкохідних двигунах задаються невеликою кількістю точок через високу швидкість обертання розподільних валів. Описуючи такий профіль у вигляді спіралеподібної замкненої ламаної лінії, отримуємо багатогранну поверхню з довгими прямолінійними відрізками, що визначають профіль. Для високошвидкісних кулачкових механізмів цей аспект несуттєво впливає на їхню ефективність. Проте кулачкові механізми заточувальних верстатів працюють на низьких обертових швидкостях, і для їхньої надійної та якісної роботи критично важлива відсутність значних за довжиною прямолінійних ділянок у профілі кулачка.

Формулювання мети статті. Метою статті є розроблення способу збільшення кількості точок на прямолінійних відрізках дискретно заданої кривої профілю кулачків, що використовуються в заточувальних пристроях, які функціонують за низьких швидкостей обертання кулачкового механізму.

Основна частина. На рис. 1 зображено будову двокулачкового верстата «Ритм РА-50 Харків», призначеного для заточування стрічкових пил 7. Кулачки подачі (1) та заточування (2) розташовані на спільному валу, який отримує обертання через регульований редуктор. Пари обкатних роликів (3) за допомогою системи важелів (4) трансформують обертальний рух профільованих кулачків у лінійний поздовжній рух штовхача (5) та поперечне переміщення абразивного круга (6). Синхронне переміщення пилки під впливом штовхача та робочої поверхні шліфувального круга забезпечує формування необхідної геометрії зуба в процесі заточування.

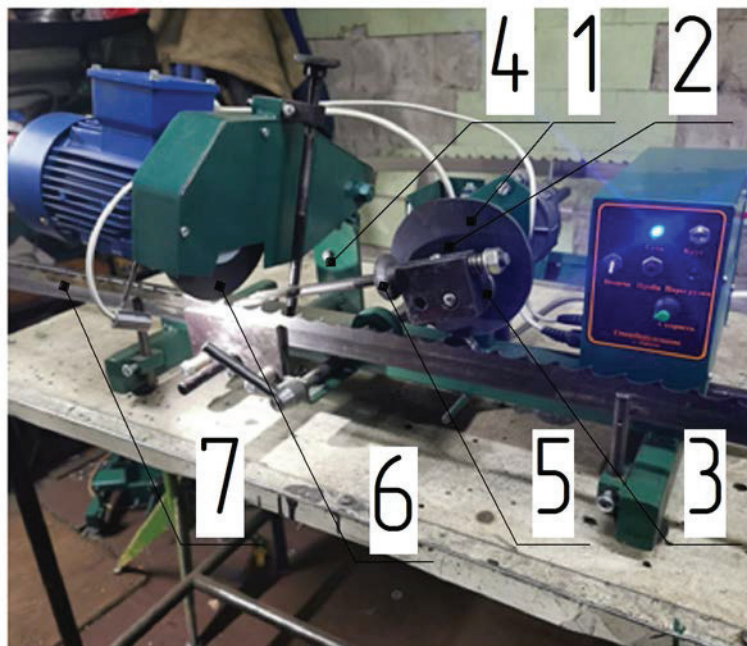


Рис. 1. Двокулачковий заточувальний верстат моделі «Ритм РА-50 Харків»

Визначивши табличний закон переміщення штовхача та застосовуючи відомий метод, описаний у [2], отримуємо полярні координати профілю кулачка. Із метою коригування прямолінійних відрізків спіральної дискретної профільної кривої (ДПК) кулачка розглянемо геометричну схему, представлену на рис. 2.

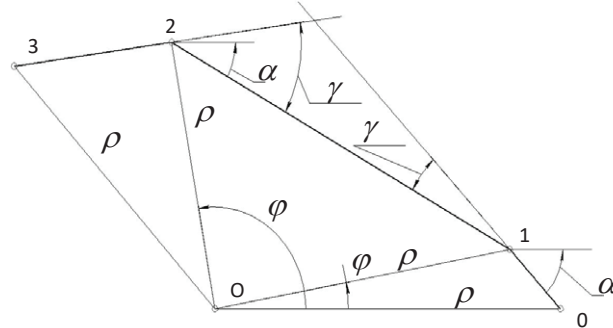


Рис. 2. Геометрична схема прямолінійної ділянки СЛЛ:

ρ_i – радіус-вектори точок на довільній сітці кутів ϕ_i , $i = \overline{0, n}$; α_i – кути нахилу ланок супроводжувачої ламаної лінії (СЛЛ) до горизонтальної осі; γ – кути суміжності ланок СЛЛ

Як критерій опуклості моделюючої ДПК використовуються суміжні кути γ_i нахилу ланок супровідної ламаної лінії (СЛЛ).

Алгоритм згущення прямолінійних ділянок включає такі кроки:

1. Визначаються значення кутів суміжності ланок супровідної ламаної лінії (у цьому разі кутів γ_1 та γ_2 (рис. 2)).
2. Знаходимо значення приращення Δ кутів суміжності за формулою

$$\Delta = \frac{|\gamma_2 - \gamma_1|}{m}, \quad (1)$$

де m – кількість ланок СЛЛ після згущення.

3. Розраховуються значення радіус-векторів згущеної ланки.

Для розрахунку значень радіус-векторів згущеної прямолінійної ділянки СЛЛ у загальному випадку розглянемо схему, наведену на рис. 3.

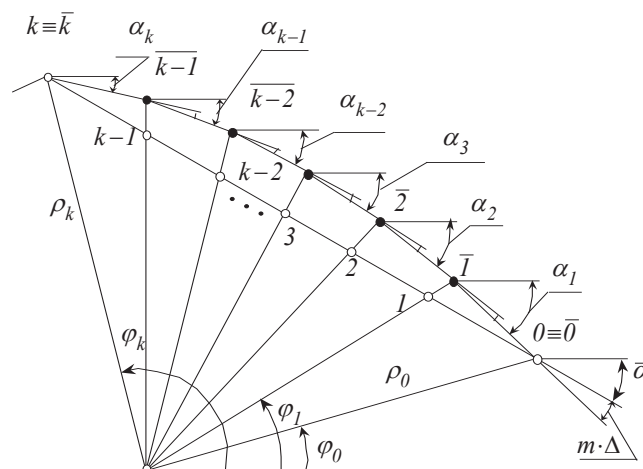


Рис. 3. Деяка прямолінійна ділянка $(0; k)$ СЛЛ

Розпишемо отримання значень радіусів на ділянці $(0;k)$:

$$\begin{aligned}\rho_1 &= \rho_0 \frac{\sin(\alpha_1 + \phi_0)}{\sin(\alpha_1 + \phi_1)} = \rho_0 \frac{\sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_0)}{\sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_1)} \\ \rho_2 &= \rho_0 \frac{\sin(\bar{\alpha} + (m-1)\Delta + \phi_1) \sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_0)}{\sin(\bar{\alpha} + (m-1)\Delta + \phi_2) \sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_1)} \\ \rho_3 &= \rho_0 \frac{\sin(\bar{\alpha} + (m-2)\Delta + \phi_2) \sin(\bar{\alpha} + (m-1)\Delta + \phi_1) \sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_0)}{\sin(\bar{\alpha} + (m-2)\Delta + \phi_3) \sin(\bar{\alpha} + (m-1)\Delta + \phi_2) \sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_1)}\end{aligned}$$

Або в загальному вигляді:

$$\begin{aligned}\rho_k &= \rho_0 \cdot \frac{\sin(\bar{\alpha} + (m-k-1)\Delta + \phi_{k-1})}{\sin(\bar{\alpha} + (m-k-1)\Delta + \phi_k)} \cdot \frac{\sin(\bar{\alpha} + (m-k-2)\Delta + \phi_{k-2})}{\sin(\bar{\alpha} + (m-k-2)\Delta + \phi_{k-1})} \times \\ &\times \frac{\dots \sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_0)}{\dots \sin(\bar{\alpha} + m\Delta + \phi_1)};\end{aligned}\quad (2)$$

де k – кількість точок, вибраних на прямолінійній ділянці, $\bar{\alpha}$ – кут нахилу прямолінійної ділянки до полярної осі.

Варто зауважити, що величина m у виразі (2) не має бути значною. Вона вказує на те, який саме відрізок нової СЛЛ є паралельним відрітку $0-k$. Зокрема, якщо $m=2$ $\alpha_3 = \bar{\alpha}$, тобто ланка $(\bar{2}-\bar{3})/0-k$. Для досягнення приблизної симетрії створюваної ДПК відносно середини сегмента $0-k$ рекомендується вибирати значення $m=(k-1)/2$ або $m=(k+1)/2$ (рис. 3). Коли прямолінійна ділянка ДПК складається з непарної кількості ланок, центральний елемент відко-ригованої ділянки має бути орієнтований паралельно початковій прямій. У ситуації ж коли число ланок прямолінійної ділянки є парним, то як паралельну прямолінійній ланці можна вибрати ланку, розташовану праворуч або ліворуч від центрального вузла залежно від специфіки моделювання. При цьому ліворуч від вибраної ланки кути α_i зменшуються, а праворуч – збільшуються.

Висновки. Запропонована методика геометричного моделювання профілів кулачкових механізмів, що використовуються в заточувальних пристроях, а також розроблений спосіб збільшення кількості точок на прямолінійних ділянках апроксимуючої ламаної лінії профілю кулачка, відповідають вимогам, що висуваються до роботи низькошвидкісних кулачкових механізмів.

Список використаних джерел

1. Мацулевич О.Є. Апроксимація дискретно представлених кривих у полярній системі координат за критерієм найменших граничних відхилень : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мелітополь, 2003. 21 с.
2. Мацулевич О.Є., Найдіш А.В. Моделювання спіралеподібних ДПК у полярній системі координат на основі кутів нахилу ланок СЛЛ. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2002. Вип. 4. Т. 16. С. 31–35.
3. Alrefo I.F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun, O., Miroshnyk, O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2023. 4, 82–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>
4. Y. Havrylenko, J.I. Cortez, Y. Kholodniak, G.T.Garcia. Modelling of surfaces of engineering products on the basis of array of points *Tekhniki vjesnik* 27, 6(2020), 2034–2043. <https://doi.org/10.17559/TV-20190720081227>
5. Havrylenko Y., Kholodniak Y. Formation of geometric model of the impeller of the turbocharger. *Proceedings of the Tavria State Agrrotechnological University*, 2014. 14, 48–53.
6. Havrylenko Y., Kholodniak Y., Halko S., Vershkov O., Miroshnyk O., Suprun O., Dereza O., Shshur T., Śrutek. M. Representation of a monotone curve by a contour with regular change in curvature. *Entropy*, 2021. 23(7), 923, 1–14. <https://doi.org/10.3390/e23070923>



7. Havrylenko Y., Kholodniak Y., Halko S., Vershkov O., Bondarenko L., Suprun, O., Miroshnyk, O., Shshur, T., Šrutek, M., & Gackowska M. (2021). Interpolation with specified error of a point series belonging to a monotone curve. *Entropy*, 23(5), 493, 1–13. <https://doi.org/10.3390/e23050493>
8. Холодняк Ю.В., Гавриленко Є.А. Розв'язання позиційних задач при моделюванні монотонних кривих ліній. *Сучасні проблеми моделювання*. 2022. Вип. 24. С. 173–181.
9. Михайленко О.Ю., Антонова Г.В. Технологія формоутворення елементів каркасу динамічної поверхні. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12.Т. 2. № 26.
10. Холодняк Ю.В., Гавриленко Є.А. Моделирование каркаса динамических поверхностей. *Інноваційні технології в агропромисловому комплексі : матеріали II всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 21–24.
11. Холодняк Ю.В., Гавриленко Є.А. Моделювання кривих ліній із заданою точністю. *Інноваційні технології в агропромисловому комплексі : матеріали II всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції*. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. С. 28–31.
12. Мацулевич О.Є., Щербина В.М. Використання пакету прикладних програм NETCRACKER. *Фундаментальна підготовка фахівців у природничо-математичній, технічній, агротехнологічній та економічній галузях : матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конференції з міжнар. участю, м. Мелітополь, присвяченої 85-річчю кафедри вищої математики і фізики ТДАТУ, 11–13 вересня 2017 р. Мелітополь, 2017. С. 107–108.*

Стаття надійшла до редакції 16.04.2025

O. Vershkov¹, O. Matsulevych¹, M. Suprun¹, I. Tetervak¹

¹ *Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University*

MODELING THE CAMS OF THE DENTACING MACHINES

Summary

The work solves the problem of geometric modeling of the functional surfaces of the cam sharpening devices on the basis of a tabular law of moving the pusher, followed by correction of the rectilinear sections of the accompanying broken line of the circuit of the cam, which satisfies the requirements that are put forward to the operation of the cam.

For this purpose the authors analyzed the traditional method of calculating the profile of the cam and revealed its disadvantages. Based on the analysis of this methodology, a universal technique of designing working profiles of cam mechanisms is proposed, namely the method of obtaining coordinates of the work surface of the cam on the basis of discrete differentiation of table function.

To solve this problem, a universal way of designing working profiles of fists and sharpening for dentacing machines is proposed.

It is proved that graphs of analogues of speed and acceleration of the movement of the pusher, constructed in the proposed way have a non-social character, more smooth change of indicators and correspond to the schedule of the displacement of the pusher.

Smoothed values of speed and acceleration of moving the pusher are located inside the strip, which indicates the absence of oscillation. The proposed technique allows you to obtain the value of speed and acceleration of moving the pusher at all specified points of the outline of the cam. On the basis of the obtained values of speeds and accelerations, the polar coordinates of the points of the profile of the cam were obtained. But the calculated points have polar coordinates and are located on an uneven grid of the angles of rotation of the cam. This creates inconvenience when using programs for numerical software. In addition, to ensure the required smoothness of the work surface of the cam, a certain number of coordinates is not enough. In this regard, the authors proposed a thickening scheme and corrected straight lines of the accompanying broken line.

Keywords: discrete-representative curve (DRK), accompanying broken line (ABL), CAM mechanism, straight line.