

© Д.О. Довгаль¹, І.В. Вернер¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ГЕОМЕТРИЧНІ ОСНОВИ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДХИЛЕННЯ РІЗАЛЬНОЇ КРАЙКИ РІЗЦЯ ПЛОСКО-ПЛАНЕТАРНОГО ЗАБУРЮВАЛЬНИКА

© D. Dovhal¹, I. Verner¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

GEOMETRIC FOUNDATIONS FOR THE DETERMINATION OF A FLAT-PLANETARY DRILL CUTTING EDGE DEVIATION

Мета. Метою роботи є встановлення функції відхилення різальної крайки різця від напрямку різання, її дослідження та визначення граничних значень в залежності від значень конструктивних і кінематичних параметрів плоско-планетарного забурювальника гірничого комбайну.

Методика. Встановлення базової функції відхилення різальної крайки різця здійснено шляхом аналізу функцій миттєвих значень його координат. Графо-аналітичні дослідження характерних форм траєкторій руху різця дозволили визначити факт наявності особливих ділянок та дослідити їх.

Результати. Розроблена методика визначення миттєвого значення функції відхилення різальної крайки різця плоско-планетарного забурювальника. Встановлено наявність особливих елементів на траєкторії руху різця, які призводять до його повернення задньою гранню до напрямку різання, що не приспустимо. Отримана залежність кута відхилення різальної крайки різця θ від основних параметрів плоско-планетарного забурювальника, дозволяє, при заданих обмеженнях встановлювати неприйнятні за даним показником співвідношення параметрів. Доведено, що шляхом введення поняття початкового кута установки інструмента на робочому диску, за допомогою показника відхилення різальної крайки можна визначати зони ефективного і неефективного різання.

Наукова новизна. Встановлені залежності можуть бути застосовані, як для плоско-планетарних конструкцій виконавчих органів, так і для інших за умови прив'язки до рівнянь руху одиничного різця. Функція кута відхилення різальної крайки різця, дає можливість детального її аналізу з метою оцінки впливу кожного із параметрів забурювальника та мінімізації різниці між критичними відхиленнями на різних ділянках траєкторії.

Практична значимість. Розроблена методика дає змогу на етапі проектування виключити можливі випадки появи близьких до екстремальних значень кутів відхилення різальної крайки різця у процесі його роботи. Дослідження траєкторій руху різця за критерієм відхилення дозволить більш раціонально здійснювати підбір, схему встановлення і орієнтування інструменту, а отже і підвищити його ефективність.

Ключові слова: *різальна крайка, різцевий інструмент, плоско-планетарний забурювальник, кінематика руху інструменту, моделювання руху різця.*

Вступ. При видобуванні кам'яної солі та інших корисних копалин підземним способом широко використовуються прохідницько-очисні машини з буровими виконавчими органами, оснащеними планетарним забурювальником (рис. 1) [1–2].

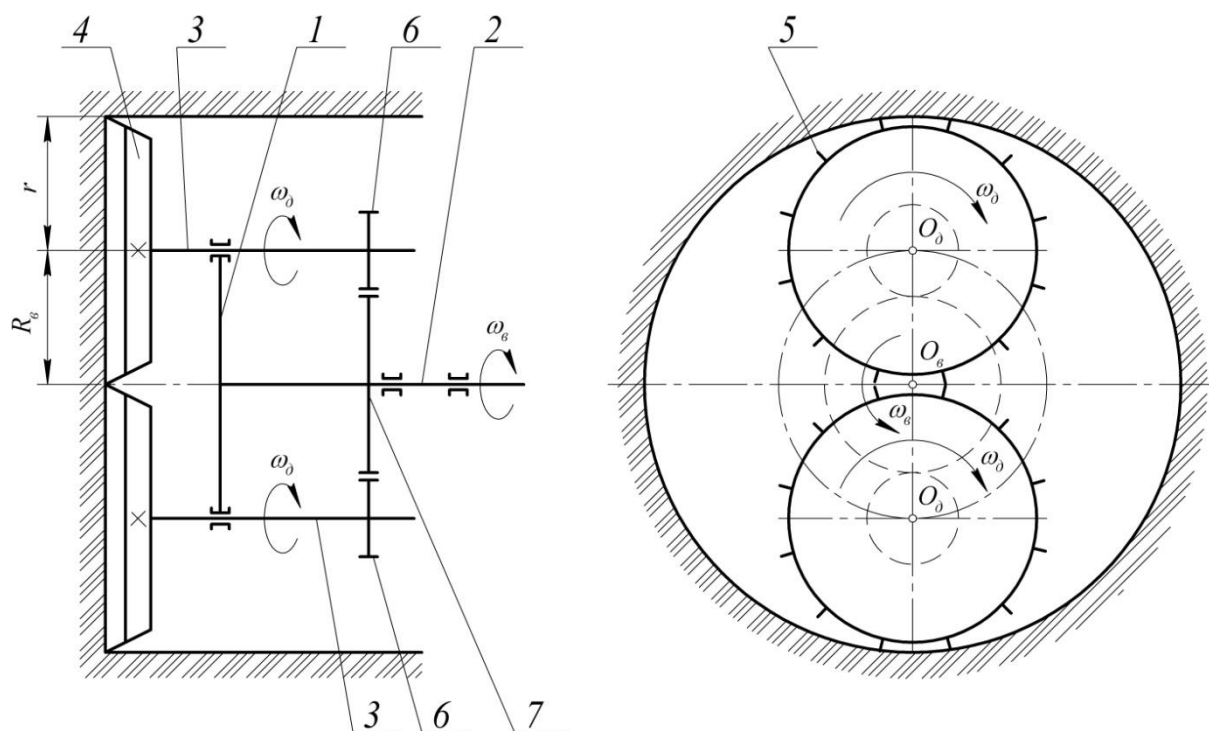


Рис.1. Схема плоско-планетарного зубурювальника: 1 – водило; 2 – головний вал; 3 – вали дисків; 4 – робочі диски; 5 – різальний інструмент; 6 – сателіти; 7 – сонячне колесо

Завдання зубурювальника – обробляти центральну частину виробки, обробка якої основними робочими дисками або ротором виконавчого органу неможлива або не раціональна.

Така конструкція зубурювальника (рис. 1) належить до найбільш складних, з точки зору кінематики руху робочого інструменту та має низку недоліків, які пов'язані із особливостями траєкторій руху робочого інструменту [3]. А саме – можливістю утворення ділянок, що мають точки повернення другого роду і ділянки з радіусом кривини, який прямує до нуля. Проходячи такі ділянки, різальна кромка інструменту значно відхиляється від нормалі до заданого напрямку різання, а сам різець, контактуючи з матеріалом, який руйнується, зазнає значних перевантажень, часто виходячи з ладу. На цей факт вказують різні автори, що досліджували дані процеси [4–6].

Однак, при певному співвідношенні конструктивних та кінематичних параметрів, з урахуванням можливостей сучасного високопродуктивного інструменту, конструкція плоско-планетарного зубурювальника дозволяє реалізовувати найбільш раціональні схеми різання і режими роботи, що підвищить ефективність виконавчого органу в цілому. Встановлення цих співвідношень вимагає глибокого аналізу, перш за все геометричних і кінематичних аспектів роботи виконавчого органу.

Отже, доцільно, в якості одного із критеріїв оцінки ефективності процесу руйнування гірничого масиву, ввести показник – кут відхилення ріжучої крайки від нормалі до траєкторії руху різального інструменту. Результати досліджень за цим критерієм вкрай необхідні для створення високопродуктивних, ефективних машин, з

високим ступенем надійності, які, у тому числі, найближчим часом будуть вкрай необхідні для відновлення економічного потенціалу післявоєнної України.

Основна частина. Рівняння руху одиничного різального інструменту в залежності від конструктивних та кінематичних параметрів плоско-планетарного забурювальника мають вигляд [7]:

$$\begin{aligned} x &= R \cdot \cos \phi + r(\cos \phi \cdot \cos(\phi i + \psi) \mp \sin \phi \cdot \sin(\phi i + \psi)) \\ y &= R \cdot \sin \phi + r(\sin \phi \cdot \cos(\phi i + \psi) \pm \cos \phi \cdot \sin(\phi i + \psi)) \\ z &= \frac{h}{2\pi} \phi \end{aligned} \quad (1)$$

де: R – радіус кола обертання центра робочого диска; r – радіус робочого диска; ϕ – кут повороту водила від початкового положення (параметр); i – передаточне число планетарного механізму, що дорівнює відношенню кутової швидкості робочого диска до кутової швидкості водила; ψ – кут, що визначає положення інструмента на диску відносно початкового положення, прийнятого за нульове; β – кут нахилу осі обертання робочих дисків у відносному русі до осі переносного обертального руху; h – величина подачі виконавчого органу на вибій за один оберт водила.

Величина подачі виконавчого органу на вибій у межах одного оберту є зневажливо малою величиною у порівнянні зі значеннями інших параметрів, яку можна не враховувати при дослідженні траєкторій, похибка при цьому складатиме – 0,01%, що є припустимим для даного дослідження.

Оскільки z в системі (1) є величиною малою по відношенню до значень x та y , криву-траєкторію руху одиничного різального інструменту можна розглядати як плоску, тобто приймати у розрахунок лише її проєкцію на площину XOY при $z = 0$. Конструктивні параметри R і r плоско-планетарного забурювальника, які забезпечують мінімальну довжину траєкторії руху інструменту, що є однією із необхідних умов забезпечення раціонального режиму роботи виконавчого органу, пов'язані залежністю [7]

$$k = R/r, \quad (2)$$

Коефіцієнт пропорційності k , який зв'язує між собою конструктивні параметри R і r , виражається квадратичною або лінійною залежностями, які для плоско-планетарного забурювальника приймають вигляд [7]

$$k_{1,2} = 0,5(i \pm 1) \left[(i \pm 1) - 2 + \sqrt{(i \pm 1)^2 - 4(i \pm 1)} \right], \quad (3)$$

$$k_3 = (i \pm 1). \quad (4)$$

Залежності k_1, k_2, k_3 , що є функціями від передавального числа i планетарного механізму, визначають мінімальний шлях тертя різального інструменту об поверхню вибою при різних схемах роботи плоско-планетарного забурювальника.

На рис. 2 наведені типові форми траєкторій одиничного різального інструменту плоско-планетарного забурювальника, побудовані за рівняннями (1) при різних значеннях конструктивних і кінематичних параметрів. Аналізуючи наведені приклади траєкторій, можна побачити наявність точок повернення друго

роду (рис. 2, а-в), у яких траєкторія перетинає сама себе. При цьому різальна крайка неприпустимо відхиляється від напрямку різання, а різальний інструмент повертається задньою гранню до поверхні вибою, зазнаючи значних перевантажень, які призводять до його швидкого зносу або руйнування. Існують і такі форми траєкторій, які мають ділянки (петлі) з мінімальними радіусами кривини, іноді вони близькі до нуля (рис. 2, г), проходячи які, різальна крайка значно відхиляється від напрямку різання, що істотно впливає на продуктивність роботи виконавчого органу. А зони інтенсивного захоплення матеріалу, які мають місце поблизу вершин петель з мінімальними радіусами кривини – створюють умови значного перевантаження різального інструменту [3, 8].

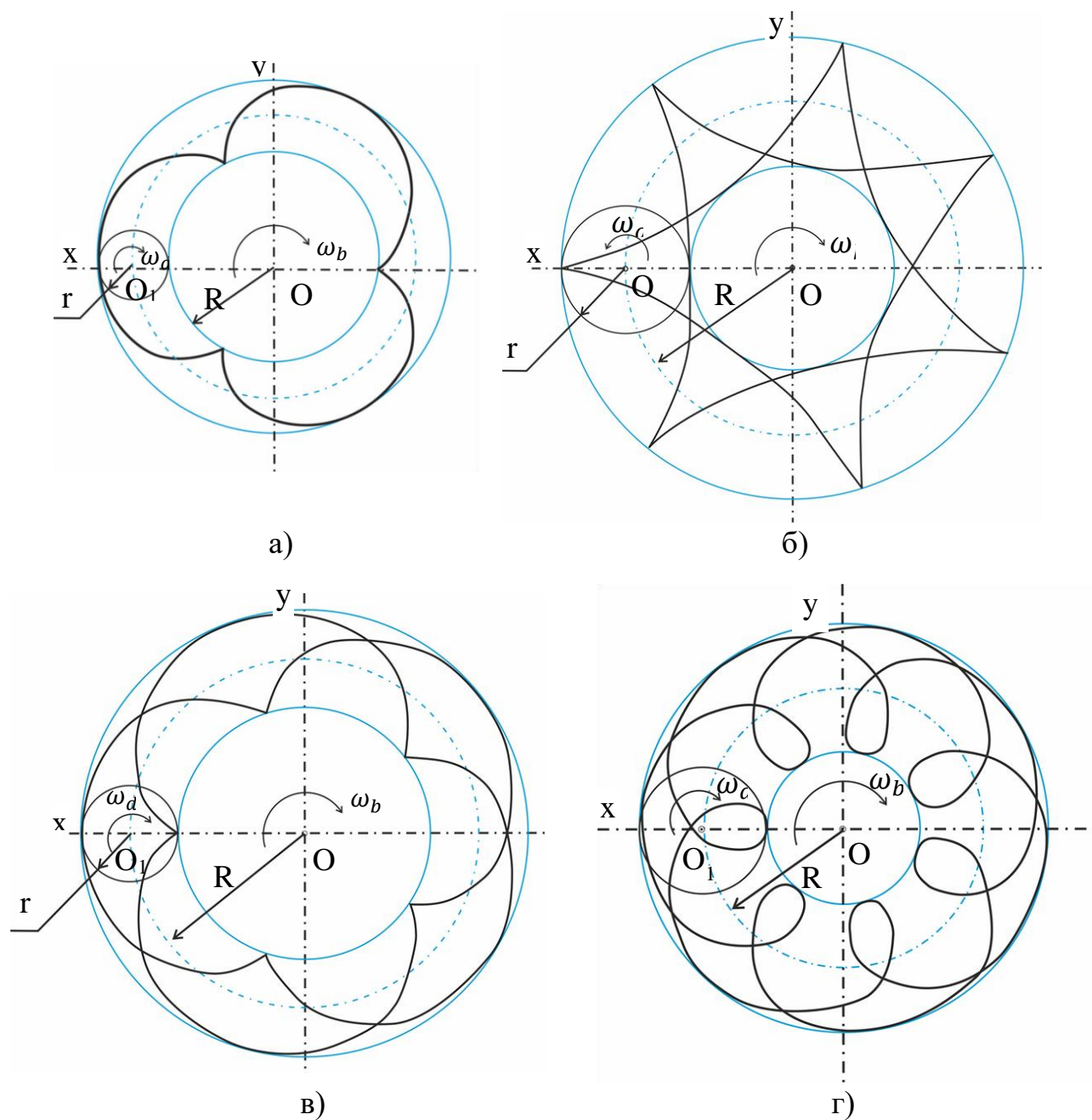


Рис. 2. Траєкторії руху різального інструменту плоско-планетарного забурювальника

Отже, з метою аналізу траєкторій руху різального інструменту за критерієм відхилення різальної крайки, виведемо залежність відповідного відхилення від параметрів плоско-планетарного забурювальника.

Відомо, що для плоскої кривої кут нахилу дотичної до осі OX визначається залежністю:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx}. \quad (5)$$

Підставивши значення перших похідних по параметру φ рівнянь (1) в (5), враховуючи (2) для коефіцієнта k , оптимальні значення якого визначаються залежностями (3), (4), отримаємо:

$$k_{1,2}: \operatorname{tg} \alpha = \frac{k_{1,2} \cos \varphi + (i \pm 1) \cos(i \pm 1) \varphi}{k_{1,2} \sin \varphi + (i \pm 1) \sin(i \pm 1) \varphi}, \quad (6)$$

$$k_3: \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{ctg} \frac{\varphi \pm \varphi k_3}{2}. \quad (7)$$

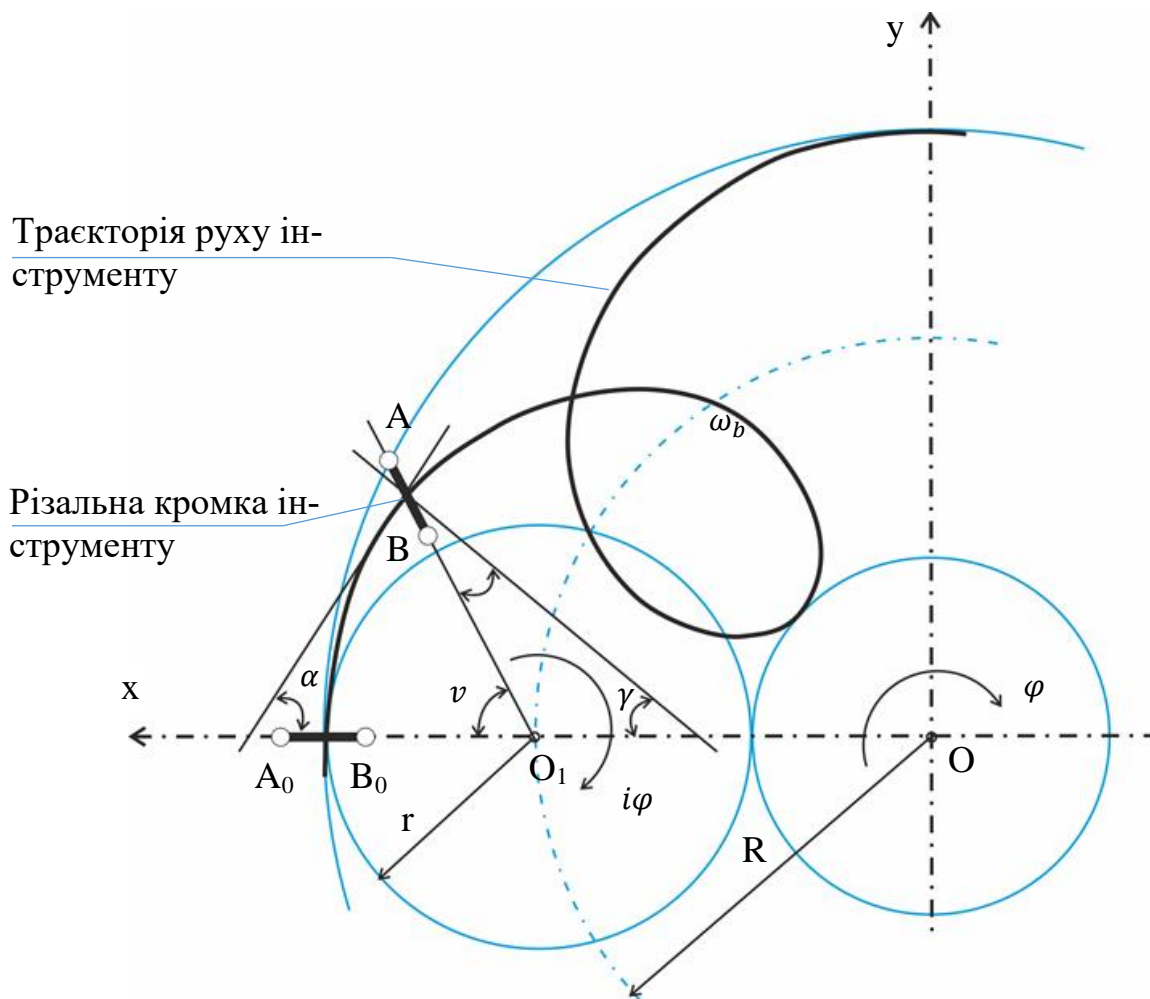


Рис.3. Схема до визначення кута між різальною крайкою інструменту і напрямком різання

Оскільки різальна крайка інструменту в ідеальному випадку повинна бути спрямована по нормалі до траєкторії його руху, визначимо рівняння нормалі до кривої у вигляді (див. рис. 3):

$$k_{1,2}: \operatorname{tg} j = -\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} = -\frac{k_{1,2} \sin \varphi \pm (i \pm 1) \sin(i \pm 1) \varphi}{k_{1,2} \cos \varphi + (i \pm 1) \cos(i \pm 1) \varphi}, \quad (8)$$

$$k_3: \operatorname{tg} j = -\operatorname{tg} \frac{\varphi \pm \varphi k_3}{2}, \quad (9)$$

В дійсності положення різальної крайки не буде всюди нормальним до дотичної траєкторії руху інструменту. Кут нахилу крайки різального інструменту до осі OX згідно рис. 3 визначимо за формулою:

$$\operatorname{tg} v = \frac{(Y_A - Y_B)}{(X_A - X_B)} = \frac{(R_A - R_B) \sin \varphi - (r_A - r_B) \sin(i \pm 1) \varphi}{(R_A - R_B) \cos \varphi \pm (r_A - r_B) \cos(i \pm 1) \varphi}, \quad (10)$$

Розглядаючи спільно (8), (9) і (10), отримаємо:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\operatorname{tg} j - \operatorname{tg} v}{1 + \operatorname{tg} j \cdot \operatorname{tg} v} = \operatorname{tg}(j - v). \quad (11)$$

Кут θ може приймати (для усіх типів інструменту та в усіх схемах роботи забурювальника) як додатні, так і від'ємні значення, однак їх усереднення з метою визначення кута початкового встановлення за залежністю вигляду:

$$\theta_{нач} = \frac{\theta_{max}^{(+)} + \theta_{min}^{(-)}}{2}, \quad (12)$$

неможливо, оскільки для усіх випадків $\theta_{max}^{(+)} = \theta_{min}^{(-)}$. В чому легко переконатися із дослідження функції (11) на екстремум. Відповідно, питання визначення $\theta_{нач}$ повинно вирішуватися з урахуванням зон інтенсивного захоплення матеріалу різальним інструментом.

Використовуючи формулу (11), побудуємо графіки $\theta = \theta(\varphi)$ для різних значень передаточних чисел (рис. 4). Зі збільшенням значень числа і значення $\theta_{max}^{(+)}(\theta_{min}^{(-)})$ зменшуються за нелінійним законом (рис. 5).

Рекомендації по вибору передавальних чисел, наступні:

– при розрахунку параметрів R і r функції $k_1 = f(i, \beta)$

а) при $i > 0$

$$(6 \pm \cos \beta) > i \geq (4 \pm \cos \beta),$$

б) при $i < 0$

$$0 > i \geq -(2,25 \pm \cos \beta),$$

– при розрахунку параметрів R і r функції $k_2 = f(i, \beta)$

а) при $i > 0$

$$(4,5 \pm \cos \beta) > i \geq (4 \pm \cos \beta),$$

б) при $i < 0$

$$0 > i \geq -(3,5 \pm \cos \beta).$$

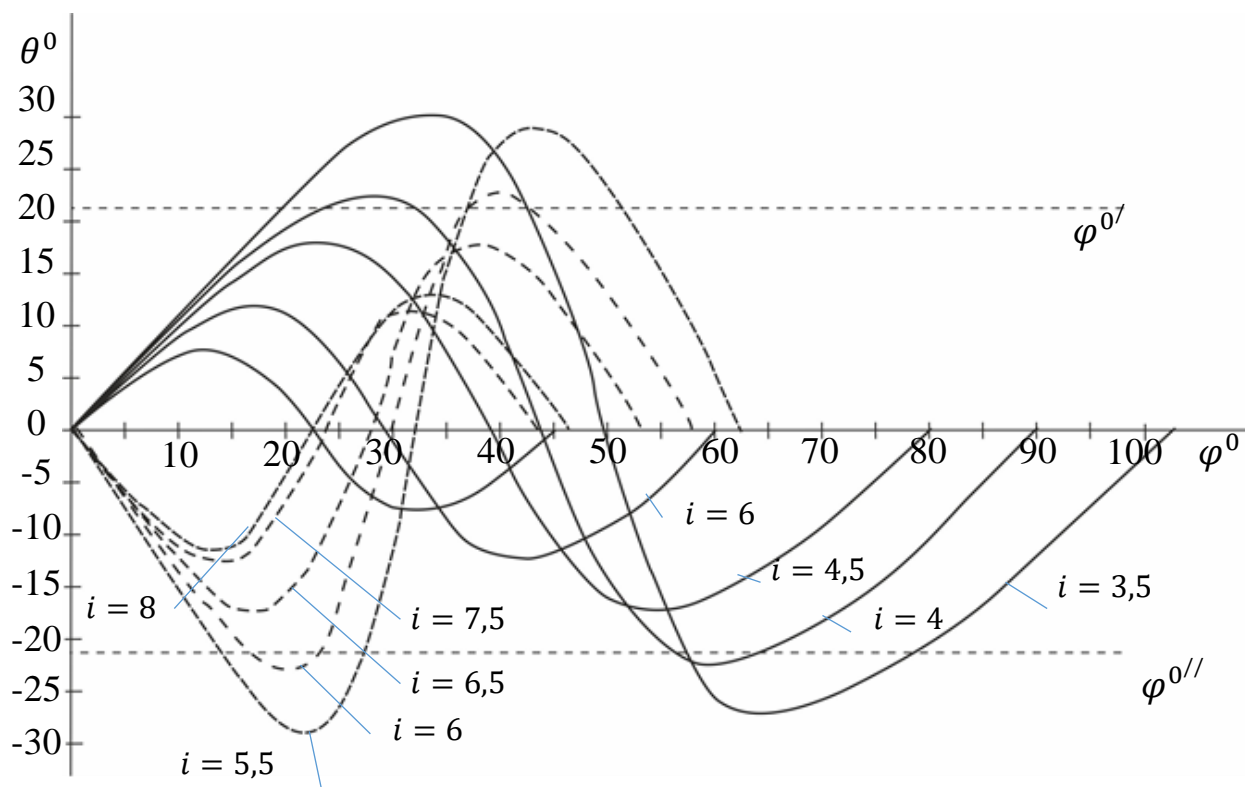


Рис. 4. Функції відхилення різальної крайки різця для різних значень передавальних чисел

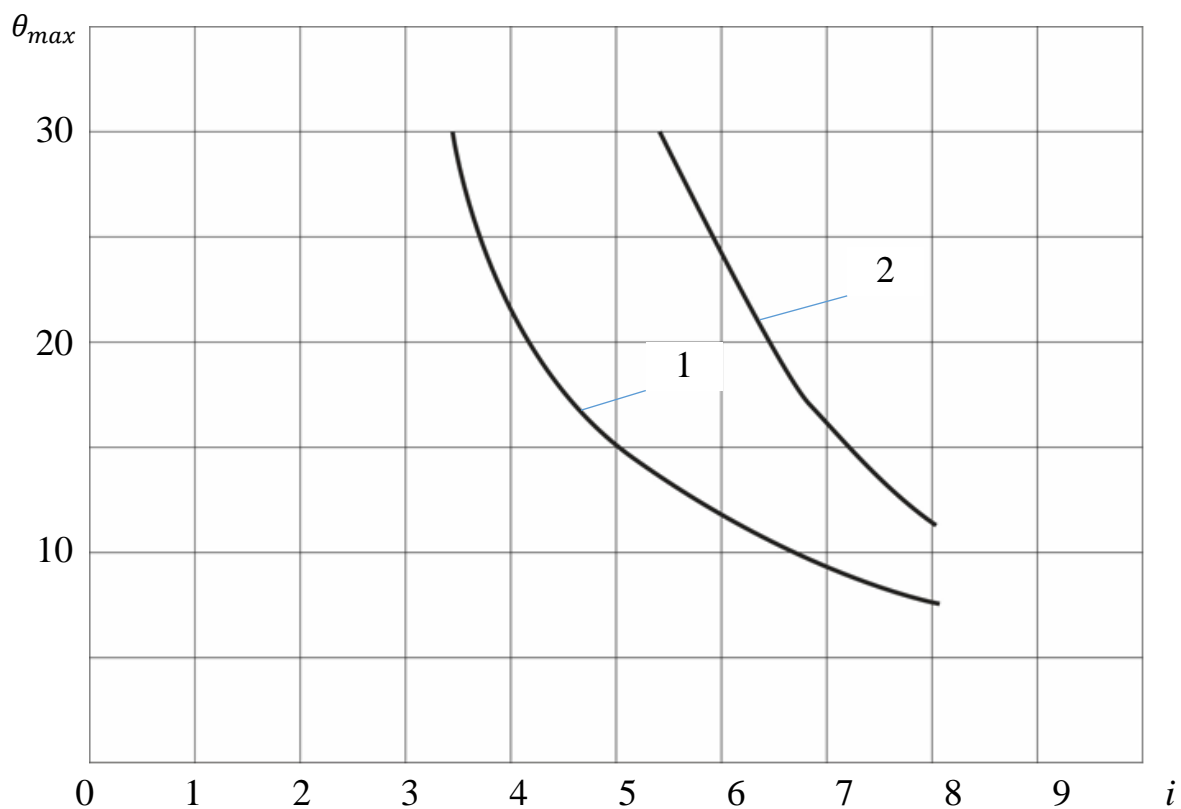


Рис. 5. Графіки залежності граничних значень кута відхилення різальної крайки від значень передавального числа

Дослідження графіків (див. рис. 4, 5) показує, що при $\theta_{noc} = 0^\circ$ та $\theta_{max} = 30^\circ$, раціональні значення передавальних чисел знаходяться в межах, які узгоджуються з рекомендаціями для плоско-планетарних виконавчих органів, наведеними у попередніх дослідженнях [3, 7].

Розглянемо процес роботи різального інструменту більш детально. По ходу руху різця (рис. 6) від двічі за повний оберт робочого диску займає положення $\theta = 0^\circ$ в точках А і В, де мають місце екстремальні значення радіусів кривини. У зоні АВ (ділянка кривої l_1) різець інтенсивне руйнує матеріал, тоді як у зоні В \bar{A} (ділянка кривої l_2) – ділянка, практично холостого ходу. У той самий час, як на ділянці АВ, так і на В \bar{A} присутні точки зі значеннями $\theta = max$. Відповідно, має сенс приведення значення кута θ до нуля у середині зони інтенсивної роботи за одночасного контролю неможливості розвороту різця задньої гранню у зоні холостого ходу. Цього можна досягнути шляхом попереднього встановлення різця у точці А з деяким кутом θ_{noc} . Значення кута θ_{noc} для заданого передавального числа можна визначити через значення положення осі φ° функції $\theta = \theta(\varphi)$ (див. рис. 4), коли кут θ буде дорівнювати нулю у середині першого напівперіоду функції $\theta = \theta(\varphi)$ (період функції відповідає одному оберту диска).

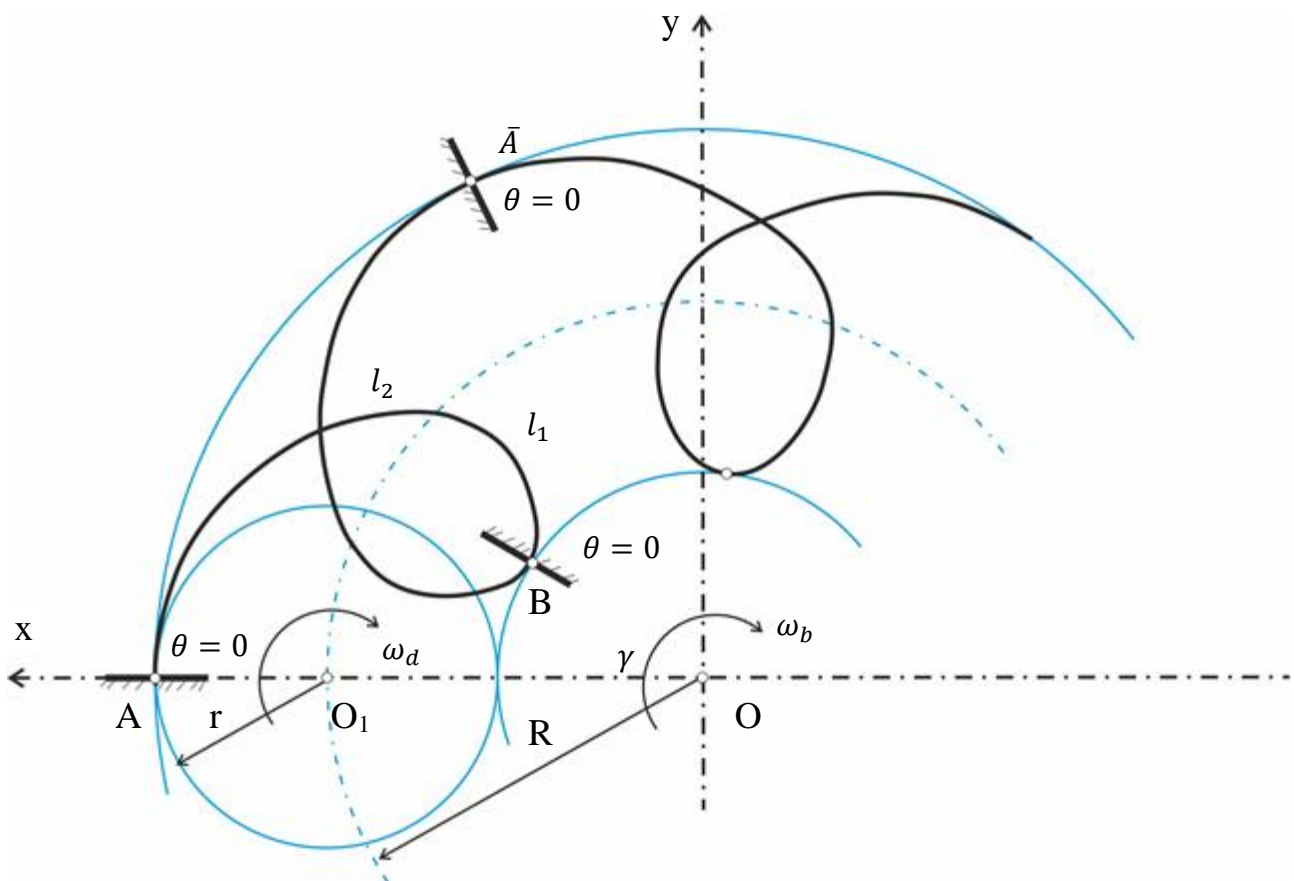


Рис. 6. Схема до визначення ділянок інтенсивного та неінтенсивного різання

Очевидно, що наведений етап аналізу процесу роботи різального інструменту плоско-планетарного забурювальника не може виконуватися

ізолювано від інших етапів, оскільки не забезпечує розгляд характеристик покриття поверхні вибою; не враховує низку важливих питань кінематики різання; не можливо дати відповідь про раціональне співвідношення між кількістю різців, передавальним числом та довжиною шляху різання одиничного різця. Однак, отримані в роботі показники визначають систему обмежень для значень передавальних чисел та враховуються при розгляданні критерію покриття поверхні вибою.

Висновки. У результаті аналізу кінематики руху різального інструмента плоско-планетарного забурювальника відносно поверхні вибою розроблено методику визначення миттєвого значення функції відхилення різальної крайки у процесі різання. При цьому встановлено, що:

1. Наявність особливих елементів (точки повернення) на траєкторії є свідченням повороту у процесі різання різального інструменту задньою гранню, що практично не припустимо для плоско-планетарних виконавчих органів.

2. Величина кута відхилення різальної крайки від напрямку різання є величиною, яка залежить від конструктивних і кінематичних параметрів плоско-планетарного забурювальника. Причому при збільшенні значень передавального числа i , кут відхилення θ , який змінюється за синусоїдальним законом із квазісталими максимумами та мінімумами – зменшується, а в точках з екстремальними значеннями кривини – дорівнює нулю.

3. Розроблена залежність кута відхилення різальної крайки різця θ від основних параметрів плоско-планетарного забурювальника, дозволяє, при заданих обмеженнях встановлювати неприйнятні за даним показником співвідношення конструктивних і кінематичних параметрів та виключити дані варіанти із розгляду на етапі попереднього проєктування.

4. Узгодження отриманих залежностей вигляду $\theta = \theta(\varphi)$, $\theta = \theta(i)$ з існуючими рекомендаціями щодо обмеження θ дає можливість запропонувати межі значень передавального числа i для різних схем роботи плоско-планетарного забурювальника.

5. Показник кута відхилення, який одночасно з реальним процесом різання N різальними інструментами, з виділенням ефективних і неефективних зон різання, дозволяє покращити його роботу шляхом введення поняття початкового кута установки інструмента на робочому диску.

Перелік посилань

1. Tian, W., Wang, L., & Bu, G. (2021). Application of Modern Machinery Design Method in Mine Machinery Design. *Journal of Physics: Conference Series*, 1748(6), 062003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1748/6/062003>
2. Довгаль, Д.О. (2016). Структурна систематизація бурових виконавчих органів тунелепрхідницьких машин суцільного руйнування. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 1(38), 115–126.
3. Довгаль, Д.О. (2020). Дослідження кривини траєкторій руху робочого інструменту торових планетарних виконавчих органів гірничих машин. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 1(46), 28–35.

4. Wang, W., Liu, G., Li, J., Zha, C., Lian, W. (2021). Numerical simulation study on rock-breaking process and mechanism of compound impact drilling. *Energy Reports. Elsevier Ltd*, 7, 3137–3148. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.040>
5. Stopka, G. (2021). Modelling of Rock Cutting with Asymmetrical Disc Tool Using Discrete-Element Method (DEM). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(12), 6265–6279. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02611-y>
6. Chen, T., Wie, T., Gong, Y. (2018). Research on optimal layout of cutter-head system of rock tunnel-boring machine based on Archimedes spiral theory. *Advances in Mechanical Engineering. SAGE Publications Ltd*, 10(2), 168781401875935. <http://dx.doi.org/10.1177/1687814018759352>
7. Довгаль, Д.О. (2023). Розробка математичної моделі просторового руху інструменту узагальненої схеми бурового виконавчого органу суцільного руйнування. *Збірник наукових праць національного гірничого університету*, 73, 113–125. <https://doi.org/10.33271/crp-nmu/73.113>
8. Dovhal, D., & Matsiuk, I. (2023). Geometric modelling of face processing surfaces by planetary executive devices of tunnelling machines. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 54–59. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-5/054>

ABSTRACT

Purpose. The purpose of the work is to establish the function of the deviation of the cutting edge of the tool from the cutting direction, to investigate it and to determine the limit values depending on the values of the design and kinematic parameters of the flat-planetary mining combine drill.

Methodology. The basic function of the deviation of the cutting edge of the tool was established by analyzing the functions of the instantaneous values of its coordinates. Graphical and analytical studies of the characteristic forms of the tool's motion trajectories allowed us to determine the presence of special sections and to investigate them.

Results. A method for determining the instantaneous value of the deviation function of the cutting edge of a flat-planetary drill tool has been developed. The presence of special elements on the tool's trajectory has been established, which lead to its return with the back surface to the cutting direction, which is unacceptable. The obtained dependence of the tool's cutting edge deviation angle θ on the main parameters of the flat-planetary drill allows, under given constraints, to establish unacceptable parameter ratios based on this indicator. It has been proved that by introducing the concept of the initial angle of the tool installation on the working disk, using the cutting edge deviation indicator, it is possible to determine the zones of effective and ineffective cutting.

Scientific novelty. The established dependencies can be applied both to flat-planetary designs of executive bodies and to others, provided that they are linked to the equations of motion of a single cutting tool. The function of the cutting edge deviation angle of the tool allows for its detailed analysis in order to assess the influence of each of the drill parameters and to minimize the difference between critical deviations at different sections of the trajectory.

Practical significance. The developed methodology allows us to exclude possible cases of the appearance of cutting edge deviation angles close to extreme values during the tool operation at the design stage. The study of the tool's motion trajectories based on the deviation criterion will allow for a more rational selection, installation scheme and orientation of the tool, and therefore increase its efficiency.

Keywords: cutting edge, cutting tool, flat-planetary drill, kinematics of tool movement, modeling of tool movement.