УДК 622.23.054.522 + 514.18

Довгаль Д. О.
Донецький національний технічний університет
(*м. Донецьк, Україна*)

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ДОВЖИНИ ШЛЯХУ РІЗАННЯ ІНСТРУМЕНТУ ТОРОВИХ ПЛАНЕТАРНИХ ВИКОНАВЧИХ ОРГАНІВ ПОРОДОРУЙНУВАЛЬНИХ МАШИН

Робота присвячена питанню оптимізації процесу роботи різцевого інструмента торових планетарних виконавчих органів. Як критерій оптимальності розглядається інтегрально-геометричний показник – довжина шляху різання. Отримані залежності, що зв'язують довжину шляху, що проходить різцевий інструмент за один робочий цикл з основними конструктивними й кінематичними параметрами виконавчих органів. На основі мінімізації отриманої залежності визначені границі вибору оптимальних значень передаточних чисел планетарного механізму.

Study of the length of the way of the processing incisor torahs planetary executive units of the machines cutting array

D. Dovgal

In article is considered optimization of the process of the work incisor of torahs planetary executive units. As criterion optymality is considered integral-geometric factor - a length of the way of the processing. They are received analytical dependencies, linking length of the way of the cutting of the instrument for one worker cycle with the main parameter of torahs planetary executive units. On the grounds of minimization got dependencies are determined borders of the choice of the best values transmission numbers of the planetary mechanism.

Исследование и оптимизация длины пути резания инструмента торовых планетарных исполнительных органом породоразрушающих машин

Довгаль Д. А.

В статье рассматривается оптимизация процесса работы резцового инструмента торовых планетарных исполнительных органов. В качестве критерия оптимальности рассматривается интегрально-геометрический показатель – длина пути резания. Получены зависимости, связывающие длину пути резания инструмента за один рабочий цикл с основными параметарми исполнительного органа. На основании минимизации полученной зависимости определены границы выбора оптимальных значений передаточных чисел планетарного механизма.

Постановка проблеми. В даний час, одною із головних перешкод при проведенні гірничих виробок механічним способом, є швидка зношуваність різцевого інструмента. Витрати на інструмент при роботі породоруйнувальних машин досягають 10-25% і більше прямих витрат на проведення гірничої виробки [1, 5].

Як показали дослідження [2-4], інтенсивність зношування ріжучого інструмента, при визначеній швидкості його руху для даного матеріалу руйнування, залежить тільки від шляху тертя інструмента об масив, що руйнується, тобто шляху різання. Тому, ряд авторів [3, 4] вважає, що руйнування гірничої породи доцільно здійснювати в режимі переривчастого різання, який характеризується чергуванням процесу різання з виходами інструмента з контакту з породою, протягом яких різець охолоджується.

Режим переривчастого різання легко реалізується так званими торовими планетарними виконавчими органами, якими обладнані прохідницькі комбайни типу “Караганда” та “Урал”. До того ж, такі виконавчі органи мають цілий ряд переваг перед іншими типами виконавчих органів [1, 5, 6, 7]. Однак, аналітичні залежності, що дозволяють визначати раціональні режими роботи зазначених виконавчих органів, зокрема, за критерієм оптимальності шляху різання, на сьогодні, практично відсутні. Отже, задача визначення та оптимізації таких залежностей є актуальною.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження довжини шляху різання торових виконавчих органів, проведене у роботі [8], є неповним, зокрема, відсутні рекомендації щодо вибору конструктивних і кінематичних параметрів, які забезпечують мінімальний шлях різання. При цьому отримана залежність для визначення довжини шляху, що проходить інструмент виконавчого органу за один оберт фрезеруючого диска, як зазначалося у роботі [9], є такою, що має цілу низку неточностей і не відбиває дійсної залежності між параметрами виконавчого органу і тому не може бути використана при розрахунках і проектуванні торових планетарних виконавчих органів. У подальшому, інших досліджень у даному напрямку, як нам відомо, не проводилося.

Формулювання цілей. На підставі викладеного, виникає необхідність встановити більш точну залежність довжини шляху, який проходить інструмент, від параметрів торового планетарного виконавчого органу, а також виявити оптимальні співвідношення між параметрами, що забезпечують мінімальний шлях різання інструмента.

Основна частина. Довжина шляху різання різця торового планетарного виконавчого органу може бути знайдена, виходячи з рівнянь траєкторії руху інструмента.

Траєкторія руху інструмента торового планетарного виконавчого органа визначається параметричними рівняннями [7]

$$
\begin{aligned}
x &= r\cos(\varphi\, i+\psi)\cos(\varphi-\alpha)+R\cos\varphi;\\
y &= r\cos(\varphi\, i+\psi)\sin(\varphi-\alpha)+R\sin\varphi;\\
z &= h\varphi/2\pi \pm r\sin(\varphi\, i+\psi),
\end{aligned} \tag{1}
$$

де R – радіус кола обертання центру фрезеруючого диску; r – радіус фрезеруючого диска; φ – кут повороту водила від початкового положення (параметр); i – передаточне число планетарного механізму; Ψ – кут, що визначає положення інструмента на диску відносно початкового положення, прийнятого за нульове; α – двогранний кут між вертикальною площиною та площиною обертання фрезеруючого диску у початковому положенні; h – величина подачі виконавчого органу за один оберт водила.

У рівняннях (1) верхній знак відповідає підсумовуючій схемі роботи виконавчого органа, а нижній – віднімаючій.

Довжина шляху інструмента є довжина дуги його траєкторії і тому може бути визначена шляхом обчислення інтегралу

$$
L=\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\sqrt{\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2+\left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2+\left(\frac{dz}{d\varphi}\right)^2}\,d\varphi, \tag{2}
$$

Оскільки величина подачі виконавчого органу на забій за один оберт водила h, є величиною досить малою у порівнянні з величинами інших параметрів, та істотно не впливає на характер зміни функції $L(\varphi)$, для спрощення розрахунків нею доцільно зневажити.

Продиференціювавши параметричні рівняння (1) руху інструмента по параметру φ, і підставивши квадрати отриманих виражень у (2), після виконання відповідних спрощуючих перетворень, одержимо наступне вираження для визначення довжини дуги просторової кривої

$$
L=\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\sqrt{R^2+r^2i^2+r^2\cos^2(\varphi i+\psi)+2Rr(i\sin(\varphi i+\psi)\sin\alpha+\cos(\varphi i+\psi)\cos\alpha)}\,d\varphi \tag{3}
$$

За формулою (3) обчислюється довжина шляху руху інструменту виконавчого органу, яка, як видно з формули, не залежить від схеми роботи виконавчого органу. Оскільки даний виконавчий орган працює у режимі переривчастого різання, то конкретні значення φ_1 та φ_2 для знаходження довжини робочої ділянки траєкторії визначаються відповідно точками входу інструменту у контакт з масивом та точками його виходу.

Для зручності аналізу й рішення інтеграла (3) виконаємо деякі перетворення підінтегральної функції, після чого отримаємо

$$L = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} ri\sqrt{1 + \frac{R^2}{r^2 i^2} + \frac{\cos^2(\varphi i + \psi)}{i^2} + \frac{2R\sin(\varphi i + \psi)\sin\alpha}{ri} + \frac{2R\cos(\varphi i + \psi)\cos\alpha}{ri^2}}\,d\varphi, \quad (4)$$

Інтеграл (4) не виражається через елементарні функції аргументу φ, тому, для його обчислення доцільно скористатися одним із методів чисельного інтегрування.

Аналіз підінтегральної функції показує, що при будь-яких практично прийнятних співвідношеннях конструктивних R, r, α та кінематичних i, φ параметрах виконавчого органу величина

$$\Phi(\varphi) = -\frac{R^2}{r^2 i^2} - \frac{\cos^2(\varphi i + \psi)}{\mathrm{i}^2} - \frac{2R\sin(\varphi i + \psi)\sin\alpha}{ri} - \frac{2R\cos(\varphi i + \psi)\cos\alpha}{ri^2}$$

по своєму абсолютному значенню завжди менше або дорівнює одиниці. Тому, інтеграл (4) можна обчислити з будь-яким ступенем точності, розклавши підінтегральну функцію, що розглядається як біном Ньютона, у ряд по ступенях

$$L = ri\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{1 - \Phi(\varphi)}\,d\varphi = ri\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \left[1 - \frac{1}{2}\Phi(\varphi) - \frac{1}{8}\Phi(\varphi)^2 - \frac{1}{16}\Phi(\varphi)^3\right] d\varphi, \quad (5)$$

Розв'язавши інтеграл (5), отримаємо

$$L_\partial = \pi r \cdot \left\{ 2 + \frac{k^2(1+\cos^2\alpha)+1}{2i^2} - \frac{2(12k^4 + 11k^2)\cos^2\alpha - 2(8k^4 + k^2) + 3}{32 i^4} + \right.$$
$$\left. + \frac{32(3k^4 + 2k^2)\cos^2\alpha + 6(4k^4 + 3k^2) + 5}{128 i^6} \right\}, \quad (6)$$

де

$$k = R / r$$

Таким чином, формула (6) виражає залежність довжини дуги просторової кривої – шляху, що проходить різцевий інструмент виконавчого органу протягом оберту фрезеруючого диску від параметрів r, k, i, α.

Для забезпечення оптимальних режимів роботи різцевого інструменту, довжина шляху, на якому він знаходиться в контакті з породою, тобто довжина шляху різання, повинна бути мінімальною при постійних значеннях конструктивних параметрів виконавчого органу.

Аналізуючи формулу (6), помічаємо, що довжина шляху, який проходить інструмент виконавчого органу за один оберт диску, дорівнює добутку радіуса фрезеруючого диска r на деяку безрозмірну функцію. Тому, для збереження спільності доцільно досліджувати відношення $L_д/r$.

Встановлено, що в межах одного оберту фрезеруючого диску, кут α, при будь-яких практично прийнятних його значеннях, не робить помітного впливу на відношення $L_д/r$, тому далі будемо досліджувати характер зміни величини відношення $L_д/r$ тільки від параметрів i та k .

Зі збільшенням значення передаточного числа i відношення $L_д/r$ асимптотично наближається до деякої величини. Значення цієї величини можна отримати, обчисливши границю функції $L_д/r$ при $i \to \infty$, тобто

$$\lim_{i\to\infty}\frac{L_д}{r} = 2\pi.$$

Отже, функція $L_д/r$ прямує до своєї мінімальної величини при необмеженому зростанні i та має єдину границю, яка дорівнює 2π (у роботі [8] зазначається, що функція $L_д/r$ при $i \to \infty$ прямує до числа π, що також доводить помилковість її результатів). З цього випливає, що при значенні передаточного числа $i \to \infty$, довжина шляху інструменту за один оберт фрезеруючого диску прямує до величини $2\pi r$. Це говорить про те, що при $i \to \infty$, кутова швидкість обертання водила прямує до нуля, а диск у цьому випадку здійснює простий обертальний рух.

Отже, для забезпечення оптимальних режимів роботи виконавчого органу необхідно встановити функціональну залежність між його конструктивними та кінематичними параметрами, яка забезпечує мінімальний шлях інструмента протягом робочого циклу, або іншими словами – оптимальну питому довжину шляху різання. Для цього слід розглядати довжину шляху, що проходить різцевий інструмент за один оберт водила.

Оскільки, кількість обертів фрезеруючого диска пов'язана з кількістю обертів водила за допомогою передаточного числа i планетарного механізму, то справедлива наступна рівність

$$L_в = iL_д, \tag{7}$$

де $L_в$ – довжина шляху інструмента за один оберт водила.

Функція $L_{в}$, як і функція $L_{д}$, дорівнює добутку радіуса фрезеруючого диска r на деяку безрозмірну функцію, тому доцільно розглядати відношення $L_{в}/r$ (Рис. 1).

Аналізуючи криві, представлені на рис. 1, помічаємо, що відношення $L_{в}/r$ має мінімум, після якого функція $L_{в}/r$ різко збільшується у напрямку зростання величини передаточного числа i та прямує до нескінченності при $i \to \infty$.

Виконаємо дослідження функції $L_{в}/r$ від параметра i з метою визначення співвідношення між конструктивними й кінематичними параметрами торового виконавчого органу, яке забезпечує мінімальний шлях інструменту, що він проходить за один оберт водила.

Встановлено, що на досліджуваному проміжку зміни передаточного числа $i \in [1; +\infty)$ функція $L_{в}/r$ має єдине мінімальне значення, тому найменше значення функції $L_{в}/r$ можна знайти з рівності

$$\frac{1}{di} d\left(\frac{L_{в}(i)}{r}\right) = 0 \qquad (8)$$

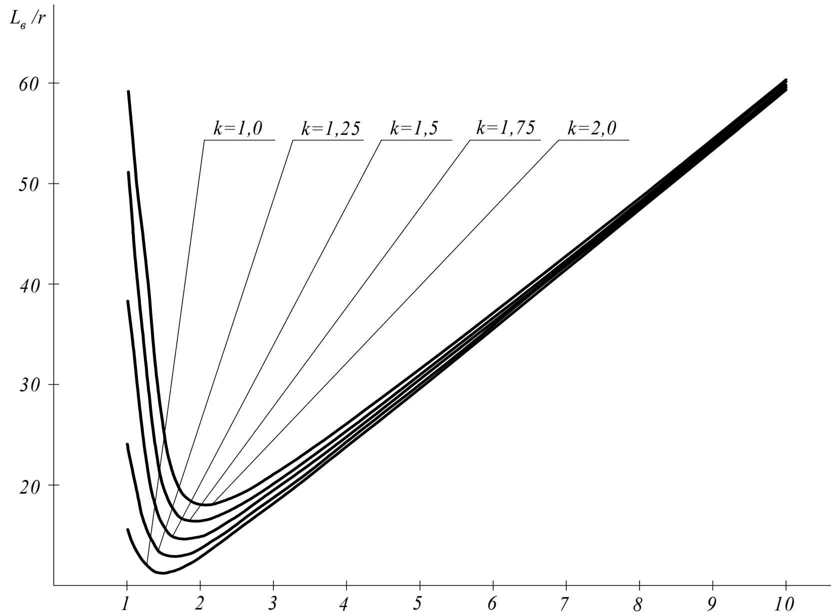

Рис. 1. – Залежність відношення $L_{в}/r$ від передаточного числа планетарного механізму i при різних значеннях коефіцієнта k

Після знаходження похідної від функції $L_в/r$ по параметру i та підстановки її значення у рівняння (8), отримаємо наступне рівняння

$$Ai^4 + Bi^2 + C = 0, \tag{9}$$

де

$$A = \frac{1}{12}[k^2(1+\cos^2\alpha)+1]\,; \quad B = \frac{1}{4}k^4\left(\cos^2\alpha - \frac{2}{3}\right) + \frac{11}{48}k^2\left(\cos^2\alpha + \frac{1}{11}\right) + \frac{1}{32};$$

$$C = -\frac{1}{16}k^6 - \frac{3}{8}k^4\left(\cos^2\alpha + \frac{1}{4}\right) - \frac{9}{32}k^2(\cos^2\alpha + 6) - \frac{5}{256}.$$

Розв’язавши біквадратне рівняння відносно i, знайдемо значення передаточного числа, яке забезпечує мінімальний шлях інструменту за один оберт водила, воно виражається відношенням

$$i = \sqrt{\frac{\sqrt{B^2 - 4AC} - B}{2A}}, \tag{10}$$

Таким чином, довжина шляху, який проходить інструмент торового виконавчого органу має найменше з усіх можливих значень, тільки в одному випадку, коли співвідношення між його конструктивними та кінематичними параметрами виражається залежністю (10).

Висновки. Таким чином, результатом теоретичних досліджень, проведених у даній роботі, є наступне:

1) Отримана аналітична залежність довжини шляху руху різцевого інструменту від конструктивних та кінематичних параметрів торового планетарного виконавчого органу.

2) Вперше встановлене оптимальне, за критерієм шляху різання, співвідношення між конструктивними параметрами R, r та α торового планетарного виконавчого органу, яке виражається складною функціональною залежністю $i(k, \alpha)$.

Результати даного дослідження можуть бути використані при розробці методики призначення раціональних параметрів торових планетарних виконавчих органів, впроваджені у проектування та дослідження процесу їхньої роботи.

Список літератури

1. Архангельский А. С. Некоторые вопросы теории планетарных исполнительных органов проходческих комбайнов // Расчеты, конструирование и испытание горных машин. Сборник статей. – 1955. – №2. – с. 143-208.
2. Крапивин М. Г. Горные инструменты. – М.: “Недра”, 1979. – 263 с.
3. Барон Л. И., Глатман Л. Б. Износ инструмента при резании горных пород. – М.: “Недра”, 1971. – 384 с.
4. Дубянский В. М., Михайлов В. Г. К теории аналитического расчета параметров отделения стружки от массива инструментом планетарных исполнительных органов горных машин. Труды НПИ, том 158, Новочеркасск, 1964. – С. 37-53.
5. Рогожин А. Г., Довгаль Д. О., Уткіна Р. В. До питання щодо раціональної конструкції різцевих виконавчих органів породоруйнувальних машин // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Динаміка наукових досліджень `2005». Том 67. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2005. – С. 44-48.
6. Рогожин А. Г., Довгаль Д. О., Уткіна Р. В. Дослідження швидкості різання торових планетарних виконавчих органів прохідницьких комбайнів // Матеріали III науково-практичної конференції “Донбас-2020: наука і техніка – виробництву”. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С. 290-295.
7. Довгаль Д. О. Визначення основних характеристик руху різцевого інструменту при роботі торових планетарних виконавчих органів породоруйнувальних машин // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 31. – С. 103-111.
8. Барон А. И., Глатман Л. Б., Губенков Е. К. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. – М.: “Наука”, 1968. – 215 с.
9. Кизилов В. В. Исследование и выбор рациональных конструктивных и режимных параметров планетарных исполнительных органов проходческих комбайнов: Дис... канд. техн. наук: 05.05.06. – М., 1982. – 176 с.