

УДК 622.23.054

Д. О. ДОВГАЛЬ, (канд. техн. наук, доц.)

С.А. ЗОРИ (д-р техн. наук, доц.)

Донецький національний технічний університет, м. Покровськ, Україна

СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ПЛАНЕТАРНИХ ВИКОНАВЧИХ ОРГАНІВ ПОРОДУРІЙНУВАЛЬНИХ МАШИН

Стаття присвячена питанню розробки алгоритму багатокритеріальної оптимізації параметрів планетарних виконавчих органів породоруйнівальних машин з метою забезпечення раціональних режимів руйнування. Проаналізовані переваги і недоліки планетарного способу руйнування гірничого масиву та визначені напрямки підвищення ефективності планетарних виконавчих органів. Розроблено структурну модель багатокритеріальної оптимізації процесу роботи планетарних виконавчих органів породоруйнівальних машин на основі математичних моделей і вихідних параметрів системи «виконавчий орган – гірничий масив».

Ключові слова: породоруйнівальна машина, планетарний виконавчий орган, робочий диск, ріжучий інструмент, конструктивна схема, гірничий масив, оптимізація параметрів, критерій.

Постановка проблеми. Однією з найважливіших умов успішного розвитку гірничовидобувної промисловості і тунелебудування є створення і вдосконалення існуючих породоруйнівальних машин. У комплексі технологічних операцій найбільш трудомістким і енергоємним є процес руйнування гірничого масиву, де успішно застосовують прохідницькі та очисні (виймальні) машини, оснащені робочими (виконавчими) органами різного принципу дії.

Виконавчі органи, принцип дії яких заснований на одночасному здійсненні робочим інструментом декількох обертальних рухів спільно з поступальним, отримали назву планетарних виконавчих органів (ПВО) та показали себе як ефективні за багатьма показниками:

- безперервність процесу руйнування вибою послідовними зрізами з відкритої поверхні, а також можливість реалізації схем перехресного різання, що характеризуються порівняно малою енергоємністю [1];
- відкидання зруйнованої маси від вибою до навантажувальних пристроїв безпосередньо самими ріжучими дисками;
- руйнування великих площ порівняно невеликим числом ріжучих інструментів, які одночасно контактують з вибоєм, що дозволяє зменшити осьові (напірні) зусилля на вибій;
- передача на кожен інструмент значної потужності, що особливо важливо при проведенні виробок по породах середньої міцності;
- відсутність або незначна величина перекидального моменту;
- природне охолодження інструменту, внаслідок можливості реалізації переривчастого режиму різання;
- можливість отримання однакових умов роботи ріжучих інструментів за швидкістю різання і навантаженнями незалежно від місця закріплення на ріжучому диску;
- можливість забезпечення раціональних режимів роботи інструментів для порід різної міцності і абразивності.

Велика кількість параметрів, у порівнянні з іншими конструкціями виконавчих органів, що впливають на умови та режими роботи ріжучого інструменту ПВО, визначає їх основний недолік – складність кінематичних розрахунків і узгодження параметрів виконавчого органа з параметрами руйнування. Крім цього, виконавчі органи, які працюють за принципом планетарного руйнування, мають великий питомий шлях різання інструменту, що призводить до підвищеного його зносу та збільшенню енерговитрат на руйнування.

Змінна товщина зрізу, який знімається одним інструментом упродовж одного робочого оберту диску, що має місце в багатьох конструктивних схемах ПВО, призводить до неефективних витрат енергії, погіршення сортності відокремлюваної гірничої маси і підвищеному пилоутворенню. Усунення або мінімізація цих та інших недоліків, можливі, в тому числі, і завдяки встановленню оптимальних (раціональних) значень конструктивних і режимних параметрів ПВО. Визначення оптимальних (раціональних) параметрів і режимів роботи виконавчого органу має найважливіше значення, оскільки, робота в оптимальному (раціональному) режимі дозволяє при одній і тій же потужності машини досягти максимальної продуктивності при мінімальних енерговитратах і витратах інструменту. Таким чином, вдосконалення виконавчих органів полягає в науковому обґрунтуванні їх оптимальних (раціональних) параметрів і виборі типу й параметрів ріжучого інструменту для заданих умов експлуатації, що забезпечують збільшення продуктивності, зменшення енерговитрат на руйнування і зносу інструменту, найменше пилоутворення та ін. Оскільки оптимуми за цими факторами можуть не збігатися, розрахунок процесу руйнування повинен забезпечити режими роботи, що дають найкраще поєднання зазначених величин. Реалізувати цю задачу можна за допомогою глибокого і всебічного вивчення взаємодії ріжучого інструменту планетарних виконавчих органів з гірничим масивом з використанням методів оптимізації та сучасних математичних програмних пакетів.

Таким чином, рішення задачі підвищення технічного рівня прохідницьких і очисних машин, оснащених планетарними виконавчими органами, являє собою значну проблему, що має важливе народногосподарське значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прохідницькі, очисні і прохідницько-очисні машини, виконавчі органи яких реалізують планетарний спосіб руйнування, мають особливості і переваги, розглядом яких різною мірою і в різних аспектах займалися дослідники в області геотехніки протягом багатьох років. Одними з перших розробників теорії планетарних виконавчих органів були: Архангельський А. С. [2], Єремеева Р. Р. [3], Унгефуг В. Г. [4], Дубянський В. М., Михайлов В. Г. [5], Барон Л. І., Глатман Л. Б., Губенков Є. К. [6], Долгов Л. В. [7]. Роботи цих авторів стосувалися переважно дослідження кінематики роботи трьох конструктивних схем – плоско-планетарного, кільцевого і ортосферичного виконавчих органів. Результати їх досліджень враховували не всі параметри, що впливають на процес взаємодії ріжучого інструменту з масивом: досить спрощено представлялася траєкторія його руху, не враховувалася величина подачі виконавчого органу на вибій, число ріжучих інструментів, встановлених на робочих дисках, і число самих дисків, напрямки відносного і переносного обертальних рухів інструменту тощо.

У подальших роботах, а саме Солода В. І., Гетопанова В. Н. [8], Зайкова В. І., Кізілова В. В. [9], Рогожина А. Г. [10] зазначені недоліки були частково усунені, але їхні дослідження стосувалися також обмеженої групи конструктивних схем. Автори усіх цих робіт робили висновок, що на характер взаємодії ріжучого інструменту з руйнованим масивом, а отже і на основні показники ефективності роботи ПВО, чинить вплив саме траєкторія руху робочого інструменту, форма якої залежить від конструктивних та кінематичних параметрів виконавчого органу. У цих же роботах було започатковано критеріальний підхід до оптимізації основних параметрів ПВО, виділені деякі критерії оцінки.

Інша група авторів, переважно це вчені та фахівці, що займалися й займаються проблемами механізації розробки родовищ калійних солей, досліджували групу, так званих, планетарно-дисккових або планетарно-торових виконавчих органів, робочі диски яких розташовані перпендикулярно фронту вибою. Серед них можна виділити Бреннера В. А. [11], Кабієва С. К. [12], Шмакіна І. Г., Семенова В. В., Жабіна О. Б. [13-14], Шишлянникова Д. І., [15] та ін. Як показали теоретичні дослідження та досвід промислового застосування прохідницько-очисних машин, оснащених таким виконавчим органом (прохідницько-очисні комбайни серії «Урал»), вони мають високі показники енергоефективності і продуктивності, у порівнянні із аналогічними машинами, оснащеними виконавчими органами простого обертання, та на сьогодні є основним засобом механізації при видобуванні калійних руд та кам'яної солі.

Отже, за результатами огляду існуючих робіт у галузі теорії планетарних виконавчих органів, очевидно, що усі відомі дослідження, з різним ступенем вірогідності, вирішують питання підвищення ефективності окремих схем виконавчого органу, використовувани для досліджень математичні моделі яких складаються із відокремлених, кінематично і функціонально пов'язаних між собою параметрів. До того ж, слід узяти до уваги і те, що оптимізація окремих параметрів при дослідженні різних схем різними авторами проводилася за різними критеріями. Відповідно наявність цього факту не дає змоги ставити отримані результати в один ряд та порівнювати їх. Тобто, можна стверджувати, що такий підхід не забезпечує достатньо точного уявлення про дійсний характер залежностей між параметрами будь-якої схеми планетарного виконавчого органу, не забезпечує синтез цих схем та не дозволяють у повній мірі використати усі переваги планетарного способу руйнування.

Що ж стосується визначення оптимальних (раціональних) параметрів, виходячи не із конкретних конструктивних схем, а із загальної моделі руху інструмента планетарного виконавчого органу, яка містить усі основні параметри та узагальнює усі існуючі та конструктивно можливі схеми, то таких досліджень досі не проводилося. В основному це пов'язано із великою кількістю параметрів, що входять до такої моделі, що в результаті призводить до складних і громіздких аналітичних розрахунків, які неможливо виконати без застосування сучасної обчислювальної техніки та потужних математичних і графічних пакетів прикладних програм. На сьогодні, коли все це є у наявності та доступне для проведення досліджень, можна здійснити спробу вивести такі дослідження на більш високий рівень, а їх результати зробити всеохоплюючими, справедливими для усіх конструктивних схем, що існують, та тих, що можна конструктивно реалізувати, знаючи які саме параметри і як впливають на ефективність процесу руйнування при різних умовах. Адже на сьогодні, основне завдання становить правильний вибір параметрів виконавчого органу, як основного елемента породоруйнувальної машини, що визначає її технічний рівень та ефективність роботи. Найбільш повно вирішити це завдання можна лише знаючи загальні залежності між усіма параметрами виконавчого органу та критеріями ефективності, не прив'язані до конкретних конструктивних схем.

Мета і завдання. Метою виконання даної роботи є розробка структурної моделі багатокритеріальної оптимізації параметрів планетарних виконавчих органів методом декомпозиції за критеріями якості, яка забезпечить оптимальне (раціональне) проектування планетарних виконавчих органів, підвищити технічний рівень та досягти показників прохідницької машини, що відповідають сучасним вимогам.

Основний зміст та результати роботи. При будь-якому способі руйнування гірничих порід і корисних копалин результати оцінюють питомими витратами енергії. Кращим способом руйнування і оптимальним режимом руйнування вважають такий, який забезпечує мінімальну енергоємність, оскільки при цьому досягається максимальна продуктивність. Крім цього, питомі енерговитрати визначають гранулометричний склад (сортність) відокремленої гірничої маси і пилоутворення. З точки зору витрат енергії необхідно міняти режим і параметри руйнування так, що б досягти мінімуму енергоємності руйнування. Тому узагальненим критерієм ефективності процесу руйнування гірничого масиву вважаються питомі енерговитрати [16].

Задача оптимізації у загальному вигляді може бути сформульована таким чином: знайти оптимальні значення змінних проектування, при яких цільова функція ефективності (якості) досягає максимального (мінімального) значення, при використанні прохідницької машини в заданих умовах експлуатації з урахуванням обмежуючих факторів.

У разі, коли мова йде про таку складну систему як планетарний виконавчий орган, ефективність роботи якого залежить від безлічі факторів, на які в свою чергу впливають параметри, як виконавчого органу (внутрішні), так і масиву (зовнішні), ефективність не може бути повністю оцінено за допомогою єдиного показника. Доводиться розглядати додаткові критерії (показники ефективності). Чим більше таких критеріїв вводиться у розгляд, тим повнішу характеристику переваг і недоліків проектного об'єкта можна отримати. Іншими словами задача оптимального проектування планетарного виконавчого органу багатокритеріальна, оскільки при виборі найкращого варіанта доводиться врахову-

вати безліч різних вимог, що пред'являються до таких систем, які найчастіше є суперечливими. Тому для розв'язання задачі оптимізації параметрів планетарного виконавчого органу слід провести її декомпозицію, виділивши відокремлені критерії якості.

При багатокритеріальній оптимізації важливий правильний вибір критеріїв. Один із шляхів обліку сукупностей суперечливих цільових установок полягає у виборі первинного критерію, тоді як інші відносяться до вторинних.

При руйнуванні масиву планетарними виконавчими органами найважливіший фактор зниження питомих енерговитрат – забезпечення мінімального шляху різання, віднесеного до одиниці об'єму руйнування масиву, що тягне за собою не тільки зниження витрат енергії на тертя ріжучого інструменту, але і забезпечення мінімуму його зносу і витрат. Така задача була досліджена у МДІ стосовно окремих конструктивних схем планетарного виконавчого органу [17]. Це дуже важливий критерій, але, очевидно, не єдиний. Тому, в якості первинного критерію доцільно прийняти довжину шляху різання, а інші критерії, на наш погляд, доцільно приймати виходячи з умови забезпечення найкращих умов роботи інструменту і сукупності факторів, що так чи інакше погіршують ці умови, а, отже, призводять до збільшення енергоємності процесу руйнування.

Як було показано вище, складність кінематичних розрахунків, що забезпечують вибір оптимальних (раціональних) параметрів, пов'язана зі складністю траєкторії руху інструмента, яка залежить, в свою чергу, від безлічі конструктивних і кінематичних параметрів планетарних виконавчих органів. Такі показники як величина питомого шляху різання, кінематичні кути інструментів і характеристики руху, крок різання та ін. залежать від траєкторій його руху. Негативні фактори, що впливають на параметри різання (несталість форми зрізу і кроку різання, наявність зон інтенсивного подрібнення матеріалу, що руйнується, і точок повернення, нерівномірна завантаженість інструменту тощо, обумовлені параметрами траєкторій, конструктивними характеристиками і схемою виконавчого органу. У зв'язку з цим, для розв'язання багатокритеріальної задачі оптимізації основних параметрів планетарного виконавчого органу, незалежно від його конструктивної схеми, які забезпечують найкращі умови роботи інструменту, а, отже, мінімальний його знос і енерговитрати на руйнування, необхідно розробити сукупність груп критеріїв, які забезпечують повноту обліку всіх основних факторів, що впливають на процес руйнування.

Виділяють найважливіші умови забезпечення ефективної роботи планетарних виконавчих органів: забезпечення мінімального шляху різання, вибір оптимальних значень параметрів зрізів, узгодження швидкостей відносних і переносного обертань ріжучого диска, визначення необхідної кількості ріжучих інструментів і конструктивних параметрів виконавчого органу, що забезпечують найбільш високу його продуктивність при мінімальних енерговитратах на руйнування [12, 18].

Ґрунтуючись на науково-технічних передумовах, викладених вище, при аналізі енерговитрат на руйнування гірничого масиву планетарними виконавчими органами, вважаємо за доцільне проводити оцінку умов роботи інструменту, і пов'язаних з цим параметрів, виходячи із таких умов і критеріїв якості (оцінки), що їх забезпечують (рис. 1).

Розроблена сукупність груп основних критеріїв оцінки показників функціонування планетарного виконавчого органу забезпечує повноту обліку всіх основних факторів, що впливають на процес руйнування гірничого масиву, з точки зору енергоефективності, сортності та зносу ріжучого інструменту. Отримані в результаті такої оцінки оптимальні або раціональні значення параметрів, в кінцевому підсумку, дають можливість визначити найкращу конструктивну схему планетарного виконавчого органу, її структуру та режими роботи для заданих умов експлуатації.

Таку критеріальну оцінку та оптимізацію можна виконати як експериментальним шляхом, що пов'язано з великими витратами ресурсів і часу, так і за допомогою методу математичного моделювання, що дозволяє відтворити будь-які задані умови роботи інструменту, змодельовати будь-який вид його руху і взаємодії з гірничим масивом. Важливо, що при моделюванні можуть бути створені будь-які складно відтворювані умови роботи інструменту з урахуванням всього спектру можливих значень конструктивних параметрів, як інструменту, так і виконавчого органу в цілому.

Таким чином, попереднім етапом розв'язання оптимізаційної задачі є складання математичної моделі. Основним завданням при її розробці є коректне завдання цільової функції, яка повинна досить точно відображати зв'язок змінних проектування з критеріями якості системи, якою є планетарний виконавчий орган породоруйнувальної машини.

Виходячи з основних умов раціональної роботи ріжучого інструменту, що встановлений на робочих дисках планетарного виконавчого органу, і, відповідно до прийнятих критеріїв якості, необхідно розробити такі математичні моделі:

1. Математична модель руху інструменту, як матеріальної точки.
2. Математична модель руху всієї сукупності інструментів, встановлених на дисках виконавчого органу.
3. Математична модель руху інструменту з урахуванням його геометрії.
4. Математична модель взаємодії ріжучого інструменту з гірничим масивом (модель зрізоутворення).
5. Математична модель навантаження ріжучого інструменту (силови модель).

Для складання математичної моделі, перш за все, необхідно визначити сукупність параметрів, що входять до неї, однозначно визначають один з варіантів процесу, і, по можливості розглянути можливі шляхи спрощення математичної моделі. Після цього складається цільова функція, яка в математичній формі повинна відображати критерій вибору найкращого варіанту.

Для розробки названих математичних моделей розглянемо параметри узагальненої схеми планетарного виконавчого органу, які, з точки зору математичного моделювання, є внутрішніми.

Математичної модель руху інструменту, що розглядається як матеріальна точка, необхідна для дослідження і оптимізації траєкторій, може бути складена на основі узагальненої схеми планетарного виконавчого органу, представленої на рис. 2.

Планетарний робочий диск характеризується складним рухом інструментів. Кожному інструменту передається три або чотири складові руху (більша кількість рухів призводить до невіправдано складної конструкції виконавчого органу):

- а) обертальний відносний рух – навколо осі диска з радіусом r та кутовою швидкістю ω_d ;
- б) обертальний переносний рух навколо осі виконавчого органу з радіусом R і кутовою швидкістю ω_v ;
- в) поступальний переносний рух на забій зі швидкістю v_n .

Якщо робочому диску надати сферичне обертання, тобто додати другий відносний обертальний рух – отримаємо триобертальний планетарний виконавчий орган.

Складаючись геометрично, ці складові руху утворюють планетарний рух інструментів, абсолютна швидкість яких, відносно нерухомої поверхні забою, змінна. Просторовий рух інструментів планетарного виконавчого органу, у загальному випадку характеризується тороїдальними кривими [19] (при двох обертальних рухах (рис. 3) та кривими, що лежать на сімействі циклічних поверхонь, утворених довільно зорієнтованим у просторі колом робочого диска (при трьох обертальних рухах (рис. 4). У часткових випадках рух може бути плоским, при цьому траєкторії інструмента (при нульовій подачі) вироджуються в епі- та гіпоциклоїди або у кола; сферичним, коли траєкторіями є лінії, розташовані на поверхні сфери або сферичного поясу; циліндричним, коли траєкторії лежать на поверхні циліндра або на конгруенції циліндричних поверхонь тощо.

При такій схемі, мають місце наступні конструктивні параметри:

- R – відстань від центру обертання диску до поздовжньої осі виробки;
- r – радіус диска (відстань від осі обертання диску до різальної крайки інструмента);
- γ – кут «розвалу» осі обертання водила виконавчого органу відносно поздовжньої осі виробки у горизонтальній площині;
- α – кут між площиною диска і вертикальною площиною XOZ у початковому положенні (для схем з трьома обертальними рухами цей кут є змінним, тобто параметр перетворюється з конструктивного на кінематичний);

β – кут між площиною диска і вертикальною площиною YOZ у початковому положенні (для схем з трьома обертальними рухами цей кут є змінним, тобто параметр перетворюється з конструктивного на кінематичний);

ψ – кут між сусідніми ріжучими інструментами на диску (визначник кількості інструментів на диску).

При розгляданні окремих випадків планетарного виконавчого органу параметри R і r доцільно зв'язати співвідношенням: $k = R / r$.

Набір кінематичних параметрів узагальненої моделі планетарного виконавчого органу наступний:

ω_{∂} , ($\omega_{\partial 1}$, $\omega_{\partial 2}$), ω_{ϵ} – відповідно кутові швидкості обертання ріжучого інструмента, розташованого на диску, у відносному та переносних рухах (співвідношення між ними прийнято виражати передавальними числами, які дорівнюють: для схем з двома обертальними рухами – $i = \omega_{\partial} / \omega_{\epsilon}$, для схем з трьома обертальними рухами – $i_1 = \omega_{\partial 1} / \omega_{\epsilon}$, $i_2 = \omega_{\partial 2} / \omega_{\partial 1}$, де $\omega_{\partial 1}$, $\omega_{\partial 2}$ – відповідно кутові швидкості першого та другого відносних обертальних рухів);

φ – кут повороту центру диска у переносному русі навколо осі виробки від початкового положення, прийнятого за нульове (пов'язаний із кутом повороту інструмента у площині диска відносно його центру залежністю $\theta = \varphi i + \psi$, де θ – кут повороту різального інструмента у площині диска від початкового положення);

h – величина подачі виконавчого органу на вибій за один його повний оберт.

Математична модель руху ріжучого інструменту (або його сукупності) має вигляд [20]:

$$\begin{aligned} x &= r \left[\cos \gamma \left[\cos(\varphi i + \psi) \cos(\varphi + \alpha) \mp \sin(\varphi i + \psi) \sin(\varphi + \alpha) \sin \beta + k \cdot \cos \varphi \right] \mp \sin(\varphi i + \psi) \sin \gamma \cos \beta \right]; \\ y &= r \left[\left[\cos(\varphi i + \psi) \sin(\varphi + \alpha) \pm \sin(\varphi i + \psi) \cos(\varphi + \alpha) \sin \beta \right] + k \cdot \sin \varphi \right]; \\ z &= r \left[\sin \gamma \left[\cos(\varphi i + \psi) \cos(\varphi + \alpha) \mp \sin(\varphi i + \psi) \sin(\varphi + \alpha) \sin \beta \right] + k \cdot \cos \varphi \right] + \frac{h}{2\pi} \varphi \pm \\ &\quad \pm r \cdot \sin(\varphi i + \psi) \cos \gamma \cos \beta, \end{aligned} \quad (1)$$

У рівняннях (1) верхній знак «+» або «-» відповідає додавальній схемі роботи виконавчого органу, а нижній – різницевої, які відрізняються напрямками обертання дисків.

На другому етапі, при розгляданні ріжучого інструменту не як матеріальної точки, а як сукупності поверхонь, тобто з урахуванням його фактичної геометрії та миттєвого положення у просторі, в рівняння (1) слід додати відповідні параметри. Таким чином, отримаємо математичну модель кінематики руху інструменту з урахуванням його геометрії, на основі якої вже можна досліджувати та оптимізувати кінематичні зміни кутів різання, положення (відхилення від напрямку різання) різальної крайки у «плані» та ін. Аналогічним чином, ввівши відповідні додаткові параметри, пов'язані із процесом руйнування масиву та складові навантаження, у модель (1), отримаємо математичну модель взаємодії ріжучого інструменту з гірничим масивом та силову модель. Ці моделі необхідні для визначення та дослідження схем і параметрів різання – кроку різання та геометрії зрізів, завантаженості інструменту під час руйнування гірничого масиву, визначення енерговитрат тощо.

Із викладеного витікає, що внутрішніми параметрами системи «планетарний виконавчий орган – гірничий масив» є конструктивні та кінематичні параметри виконавчого органу, а також параметри процесу руйнування (кінематичні, геометричні та силові). Їх характерною ознакою є керованість. Ті ж параметри, що не підлягають коректуванню, тобто властивості середовища – масиву, що руйнується (фізико-механічні властивості матеріалу), складатимуть групу *зовнішніх* параметрів. Внутрішні та зовнішні параметри системи «планетарний виконавчий орган – гірничий масив» разом формують набір *вихідних* параметрів (показників) системи, у вигляді функцій від вхідних параметрів. Оптимізація цих функцій за певним критерієм і дає оптимальні значення вхідних параметрів за цим критерієм (рис. 5).

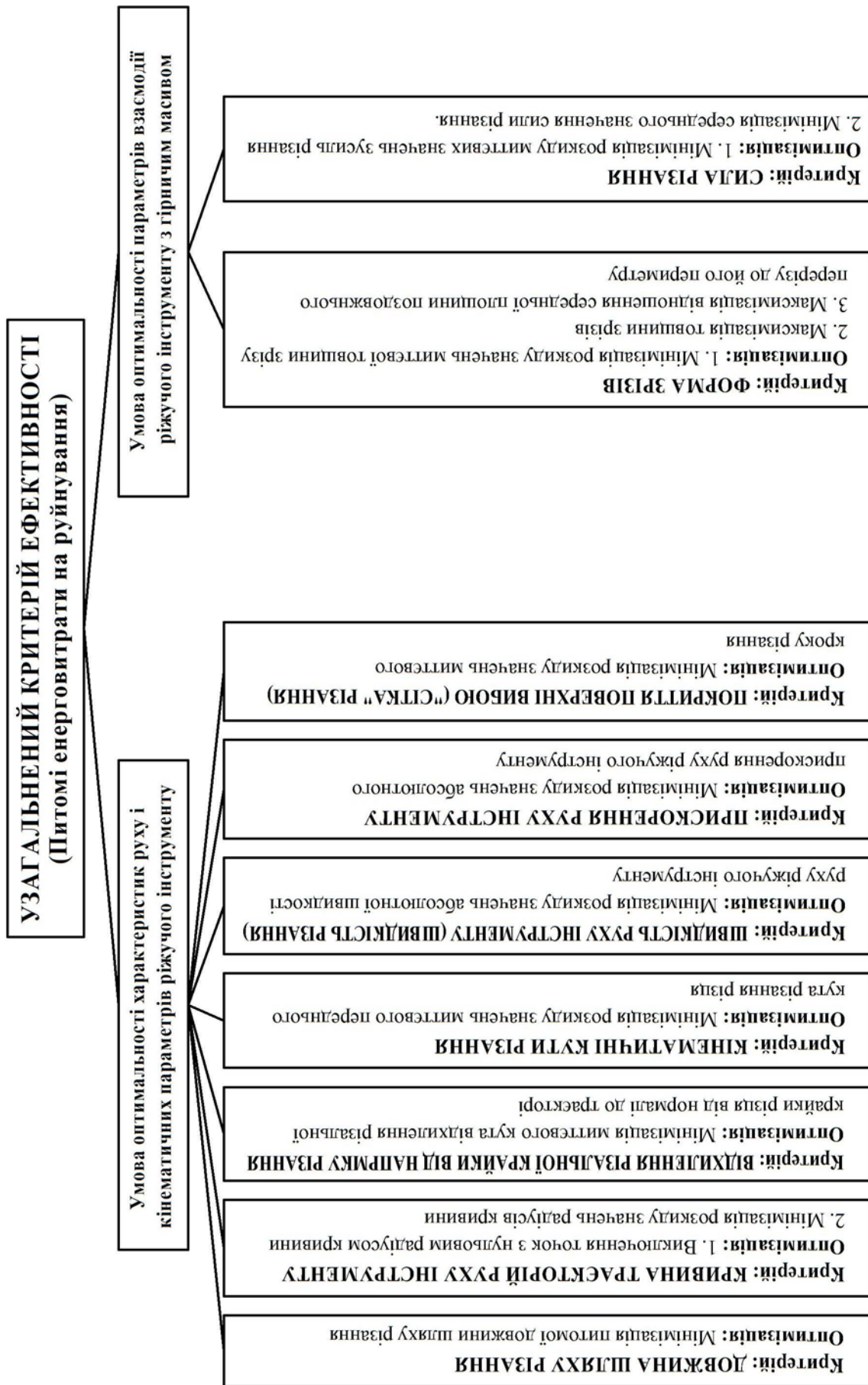


Рис. 1. Схема декомпозиції за умовами забезпечення мінімальних енерговитрат руйнування

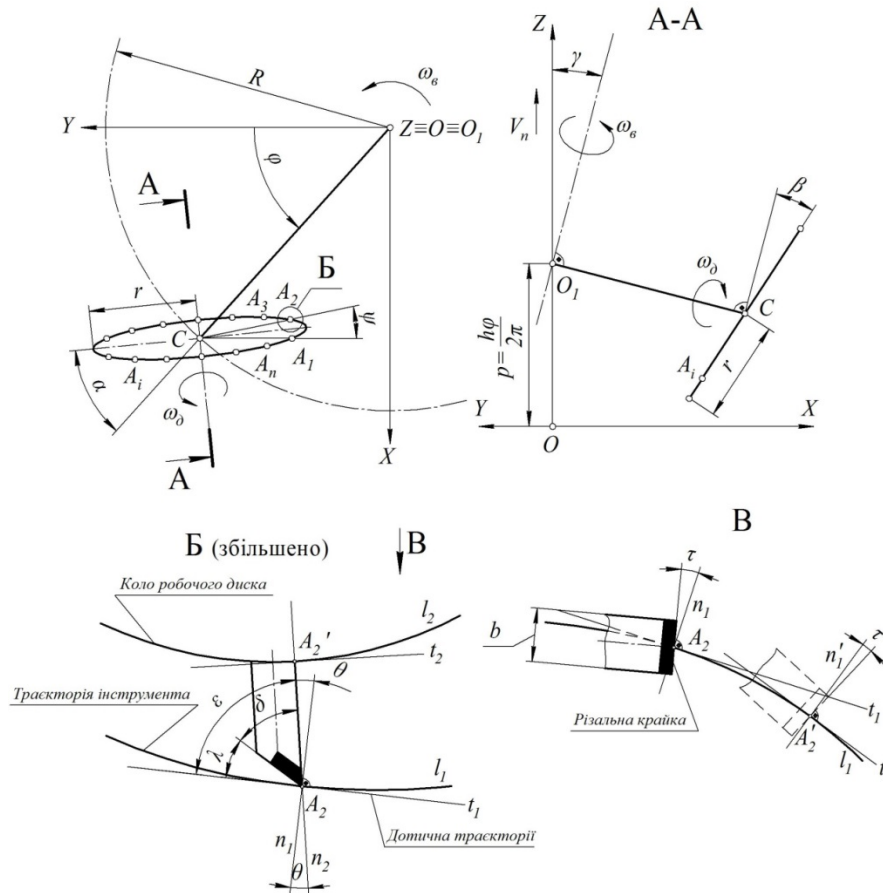


Рис. 2. Узагальнена схема кінематики руху ріжучого інструменту виконавчого органу

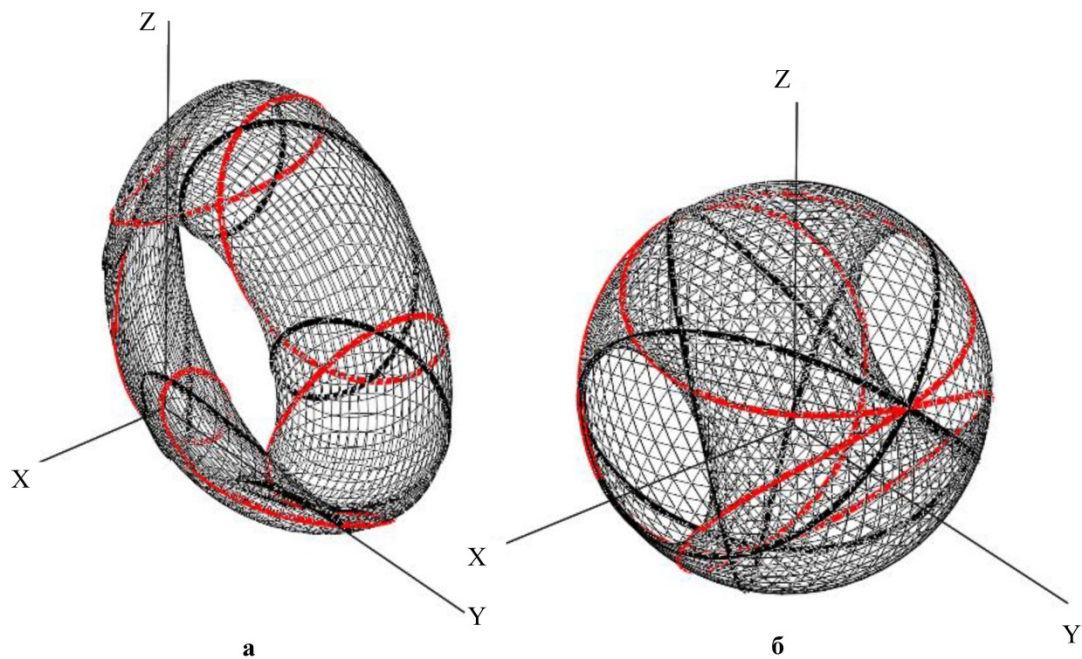


Рис. 3. Вигляд траєкторій руху одного робочого інструменту та поверхні-носія при двох обертових рухах за додавальною та різницевою схемами роботи виконавчого органу (а – у загальному випадку, б – при сферичному русі)

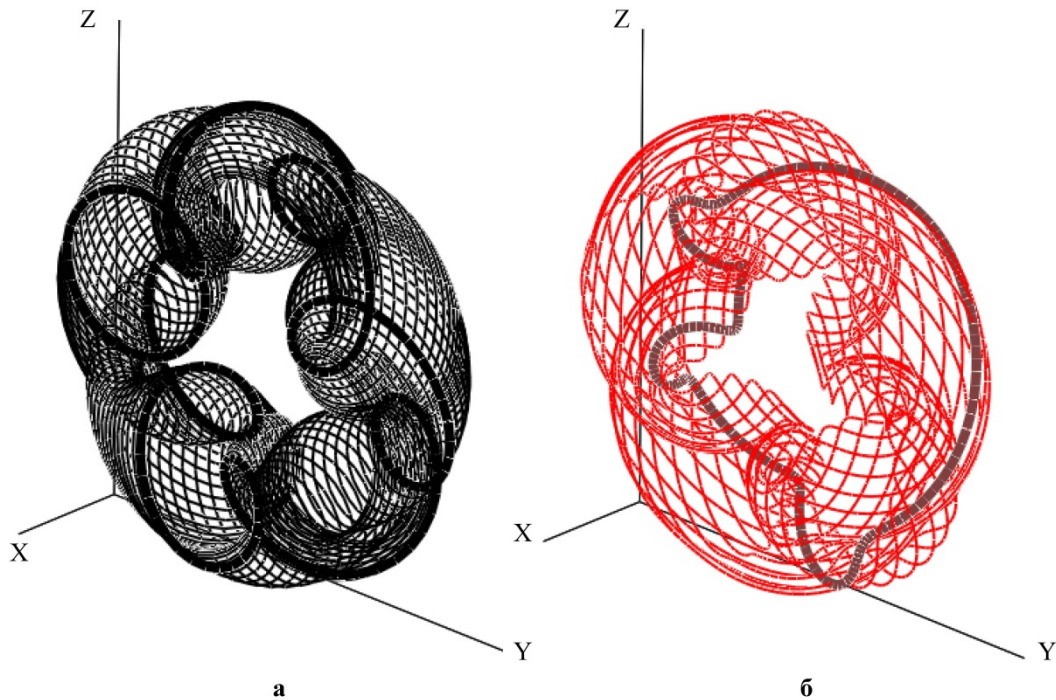


Рис. 4. Вигляд траєкторій руху сукупності ріжучих інструментів при трьох обертальних рухах за додавальною (а) та різницевою (б) схемами роботи виконавчого органу

Введемо позначення груп параметрів і функцій математичних моделей процесу функціонування планетарного виконавчого органу у загальному вигляді:

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ - вектор внутрішніх (керованих) параметрів;

$Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ - вектор зовнішніх (некерованих) параметрів;

$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ - вектор вихідних параметрів (характеристик функціонування).

Y є функцією від X і Q , отже у явному вигляді вона має наступний вигляд:

$$Y = F(X, Q), \quad (2)$$

Функція (2) являє собою глобальну математичну модель функціонування планетарного виконавчого органу, скласти та досліджувати яку дуже складно, а для загального випадку планетарного виконавчого органу, практично неможливо. Отже, як зазначалося раніше, доцільно розглядати процес функціонування виконавчого органу як сукупність більш простих математичних моделей, що описують окремі складові цього процесу. Функціональні залежності, що описують ці складові мають наступний вигляд:

$$\begin{cases} y_1 = F_1(X, Q); \\ y_2 = F_2(X, Q); \\ y_m = F_m(X, Q), \end{cases} \quad (3)$$

При складанні математичних моделей, що описують кінематичні показники функціонування планетарного виконавчого органу, тобто без урахування фізико-механічних властивостей матеріалу, будемо вважати, що $Y = F(X)$, тобто матимуть місце детерміновані моделі. При цьому необхідно задати і обґрунтовані межі зміни кожного із внутрішніх параметрів, які у нашому випадку визначаються границями існування конструкції та можливостями їх практичного забезпечення. Крім параметричних обмежень необхідно враховувати і критеріальні, які не є жорсткими, і залежать від фізичного змісту критерію або інших міркувань.

Задача складання окремих математичних моделей, їх дослідження і оптимізації за певними, виділеними і обґрунтованими критеріями якості, і є задачею декомпозиції багатопараметричної системи «планетарний виконавчий орган – гірничий масив». Головною умовою застосування методу декомпозиції є сепарабельність розв'язуваної задачі. Це виражається в тому, що задача допускає розбиття на локальні і координаційну задачі, спільне розв'язання яких еквівалентно шуканому [21]. У випадку з планетарним виконавчим органом дана умова виконується.

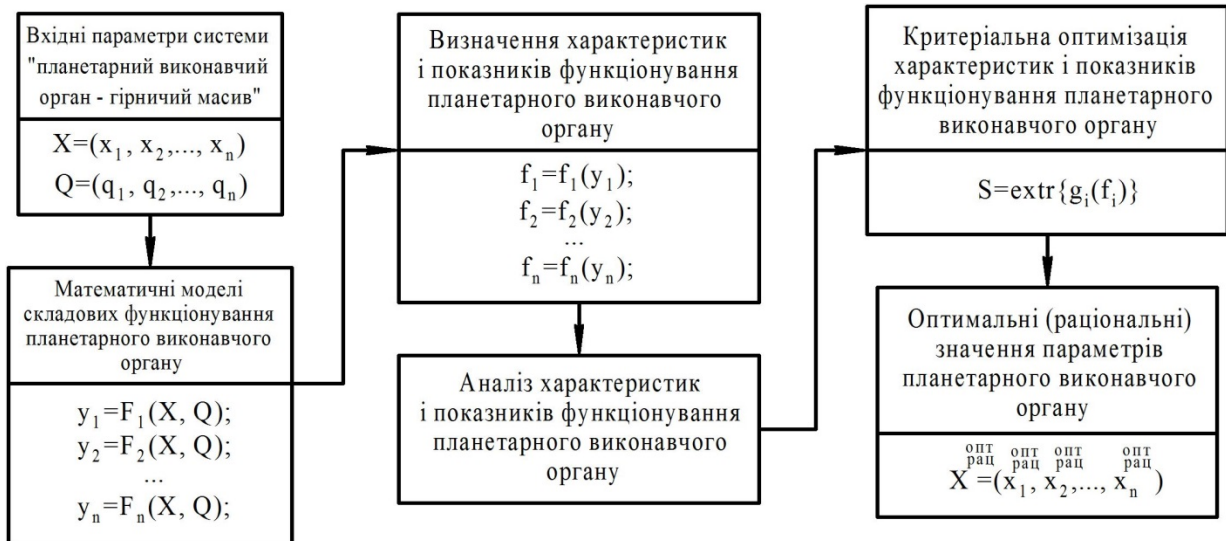


Рис. 5. Загальна схема алгоритму критеріальної оптимізації параметрів планетарного виконавчого органу

Багатокритеріальна задача має на меті відшукування рішення, що одночасно забезпечує оптимум по кожному з окремих критеріїв. Однак, знаходження такого рішення на основі роздільної оптимізації окремих критеріїв якості, у випадку системи «планетарний виконавчий орган – гірничий масив», важко, оскільки окремі критерії взаємопов'язані і мають суперечливі тенденції у зміні оптимальних значень параметрів. Тому для розв'язання практичних завдань проектування, необхідно визначити рішення у вигляді найкращого поєднання значень параметрів, що визначаються частковими критеріями. Допустимі рішення задачі при цьому вважаються ефективними і становлять набір раціональних значень параметрів. А завдання пошуку цих умов раціональних значень є, по суті, пошуком компромісу між рішеннями, які визначаються окремими критеріями (координаційна задача).

Певна складність розв'язання такої координаційної задачі викликана можливою появою, так званого, ефекту непорівнянності варіантів, тобто векторів оптимальних значень параметрів, отриманих за різними критеріями. Непорівнянність результатів є формою невизначеності, яка спонукає до «досягнення суперечливих цілей» і називається ціннісною невизначеністю. Вибір між непорівнянними результатами є складною проблемою і складає основний зміст багатокритеріальної оптимізації. У випадку з планетарним виконавчим органом, розв'язання цієї кінцевої і найбільш важливої задачі координації рішень слід здійснювати, виходячи із пріоритету критеріїв. Адже, як було зазначено, локальні критерії мають різний ступінь важливості при розв'язанні задачі, тобто один локальний критерій має деякий пріоритет перед іншим локальним критерієм. Це слід враховувати при виборі принципу оптимальності та визначенні області можливих рішень, віддаючи перевагу більш важливим критеріям.

Для наочного представлення застосування методу декомпозиції для оптимізації параметрів планетарного виконавчого органу наведемо її структурну модель (рис. 6).

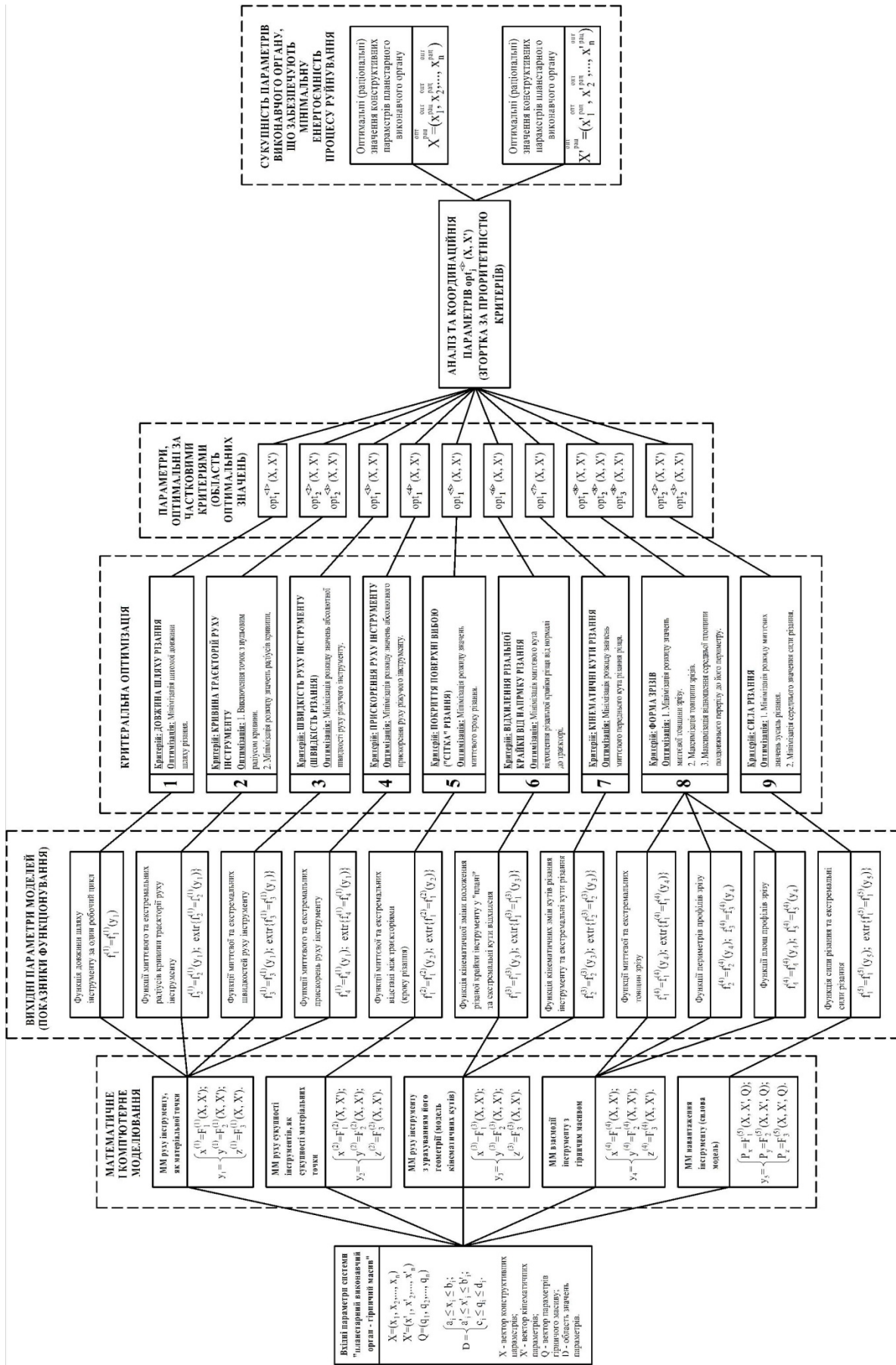


Рис. 6. Структурна модель зв'язання задачі оптимізації параметрів планетарного виконавчого органу методом декомпозиції

Висновки та перспективи подальших досліджень. В результаті виконання роботи можна зробити наступні твердження:

1. Виходячи з результатів численних теоретичних і експериментальних досліджень, що стосуються роботи планетарних виконавчих органів, даний спосіб руйнування гірничого масиву має великі резерви підвищення продуктивності. Отже, використовуючи всі позитивні сторони даного способу руйнування і можливості, закладені в чисельні конструкції планетарних виконавчих органів, застосовуючи методи багатокритеріальної оптимізації сукупності їх основних параметрів, можна створити нові машини з високим технічним рівнем.

2. Використовувати результати відомих робіт для визначення оптимальних (раціональних) значень основних параметрів планетарних виконавчих органів нового технічного рівня не представляється можливим, оскільки, по-перше, вони досить суперечливі, а по-друге, їх результати характеризуються роз'єднаністю, оскільки вони відносяться до окремих конструктивних схем планетарного виконавчого органу, які не відображають всієї повноти параметрів і функціональних залежностей між ними.

3. Для забезпечення найбільш високої продуктивності планетарних виконавчих органів при мінімальних енерговитратах на руйнування доцільна постановка багатокритеріальної задачі - визначити сукупність оптимальних (раціональних) конструктивних і кінематичних параметрів, що забезпечують раціональні режими роботи виконавчого органу.

4. Багатокритеріальний аналіз процесу роботи планетарних виконавчих органів на основі узагальнених математичних моделей і вихідних параметрів, дозволяє отримати якісну картину процесу руйнування, а, отже, і провести оптимізацію внутрішніх параметрів системи «виконавчий орган – гірничий масив». Для реалізації такої оптимізації вперше запропоновано: набір з дев'яти окремих критеріїв якості, виділених, виходячи з умов забезпечення мінімальних енерговитрат на руйнування; структурна модель багатокритеріальної оптимізації внутрішніх параметрів системи «планетарний виконавчий орган - гірничий масив» шляхом оптимізації функцій вихідних показників математичних моделей процесу функціонування виконавчого органу. Для складання критеріальних цільових функцій необхідно розробити п'ять основних математичних моделей складових процесу функціонування виконавчого органу.

5. Зміст подальших робіт та досліджень бачиться у побудові математичних моделей складових процесу функціонування планетарних виконавчих органів та визначенні залежностей вихідних показників роботи планетарного виконавчого органу (кінематичних та режимних) і їх оптимізації. У результаті цього з'явиться можливість отримати вирішення проблеми оцінки і оптимізації параметрів планетарних виконавчих органів у загальному вигляді, тобто без прив'язки до якоїсь з конструктивних схем або класу планетарних виконавчих органів.

Библиографический список

1. Пат. 2375571 Российская федерация, МПК Е 21 С 27/24, Е 21 D 9/11. Способ разрушения горного массива перекрестными резами / Н. В. Чекмасов, А. Н. Чистяков, В. В. Семенов, Д. И. Шишилянников; заявитель и патенто-обладатель ОАО "Сильвинит". - № 2008127396/03; заявл. 04.07.2008; опубл. 10.12.2009.
2. Архангельский А. С. Некоторые вопросы теории планетарных исполнительных органов проходческих комбайнов / А. С. Архангельский // Расчеты, конструирование и испытание горных машин. - 1955. - №2. - С. 143-210.
3. Еремеев Г. Г. Необходимое условие рациональной работы планетарных исполнительных органов горных машин / Г. Г. Еремеев // Сб. «Горные машины». - 1959. - №5. - С. 39-42.
4. Унгефуг В. Г. К теории аналитического расчета кинематических и геометрических параметров отделения стружки от массива инструментом резовых дисков исполнительных органов горных машин / В. Г. Унгефуг // Вопросы механизации и автоматизации в горной промышленности. Научные труды КНИУИ. - 1962. - № 11. - С. 35-78.
5. Дубянский В. М. К выбору рациональных параметров планетарного исполнительного органа проходческого комбайна / В. М. Дубянский, В. Г. Михайлов, М. Г. Крапивин // Изв. ВУЗов. Горн. журнал. - 1965. - № 7. - С. 124-130.
6. Барон Л. И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Научно-методические основы. Разрушение резовым инструментом / Барон Л. И., Глатман Л. Б., Губенков Е. К. - М.: Наука, 1968. - 216 с.

7. Долгов Л. В. Совершенствование плоскопланетарных исполнительных органов проходческих комбайнов / Л. В. Долгов // Горная электромеханика и механизация горных работ. – М.: Недра, 1969. – 383 с.
8. Солод В. И. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов / Солод В. И., Гетапонов В. И., Рачек В. М. – М.: Недра, 1982. – 350 с.
9. Солод В. И. Выбор оптимальных соотношений между конструктивными параметрами планетарных исполнительных органов горных машин / В. И. Солод, В. И. Зайков, В. В. Кизилов // Изв. ВУЗов. Горн. журнал. – 1979. - №8. – С. 65-68.
10. Рогожин А. Г. Геометрическое моделирование процесса работы резцового инструмента планетарных исполнительных органов породоразрушающих машин: дис... канд. техн. наук: 05.01.01: Рогожин Анатолий Григорьевич. – К., 1988. – 162 с.
11. Бреннер В. А. Совершенствование конструкции соледобывающих комбайнов типа "Урал" / А. А. Бреннер, И. Г. Шмакин, В. В. Семенов // Технология и механизация горных работ / Изд-во АГН. – М., 1998. – С. 9-17.
12. Кабиев С. К. Оптимизация параметров комбайнов для добычи калийных руд / С. К. Кабиев. – М.: Недра, 1992. – 239 с.
13. Семенов В. В. Обоснование рациональных параметров режущих органов комбайнов типа "Урал" / Семенов В. В., Шмакин И. Г. // Горное оборудование и электромеханика / Нов. технол. - М., 2008. – Вып. 4. – С. 49-52.
14. Семенов В. В. Обоснование параметров и выбор резцов исполнительного органа проходческо-очистного комбайна для добычи калийных руд "Урал-61" / Семенов В. В., Шмакин И. Г., Жабин А. Б., Чеботарев П. Н. // Горное оборудование и электромеханика / Нов. технол. - М., 2010. – Вып. 4. – С. 6-9.
15. Шишлянников Д. И. Повышение эффективности отделения калийной руды от массива резцами добычных комбайнов: автореф. дисс... канд.техн.наук: 05.05.06 / СПГУ. - СПб.: 2012. – 20 с.
16. Первов К. М. Обоснование и выбор параметров и критериев взаимодействия системы «горные породы – горные машины». Автореф. Докт. Дис.
17. Солод В. И. Горные машины и автоматизированные комплексы / В. И. Солод, В. И. Зайков, К. М. Первов. – М.: Недра, 1981. – 503 с.
18. Отраслевая методика. Комбайны проходческо-очистные для добычи калийных руд. Выбор показателей назначения и расчет параметров разрушения горных пород / В. Л. Пинский, С. К. Кабиев, А. А. Насыров и др. – Л.: ВНИИГ, 1986.
19. Довгаль Д. О. Геометричне моделювання процесу руйнування гірничого масиву планетарно-торовими виконавчими органами гірничих машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.01.01 / ДонНТУ. – Донецьк, 2012. – 19с.
20. Довгаль Д. О. Узагальнена геометрична модель бурового виконавчого органа гірничопрохідницьких машин / Д. О. Довгаль // Прогресивні технології і системи машинобудування: міжнародний зб. наукових праць / Донец. нац. техн. ун-т. – Донецьк, 2014. – Вып. 1(47). – С. 118-127.
21. Ху Вен-Цен. Параметрическая декомпозиция задач управления сложными технологическими системами / Ху Вен-Цен // Научно-технический журнал "Новости науки Казахстана": сборник статей / Нац. Центр научно-технической информации. – Алматы, 2008. - № 3. – С. 105-112.

Надійшла до редакції 05.12.2016

Д. А. Довгаль, С.А. Зори

Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАНЕТАРНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩИХ МАШИН

Статья посвящена вопросу разработки алгоритма многокритериальной оптимизации параметров планетарных исполнительных органов породоразрушающих машин с целью обеспечения рациональных режимов разрушения. Проанализированы преимущества и недостатки планетарного способа разрушения горного массива и определены направления повышения эффективности планетарных исполнительных органов. Разработана структурная модель многокритериального анализа и оптимизации процесса работы планетарных исполнительных органов породоразрушающих машин на основе математических моделей и входных параметров системы «исполнительный орган - горный массив».

Ключевые слова: породоразрушающая машина, планетарный исполнительный орган, рабочий диск, режущий инструмент, конструктивная схема, горный массив, оптимизация параметров, критерий.

D. Dovgal, S. Zori

Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine

MULTICRITERIA OPTIMIZATION ALGORITHM OF PARAMETERS OF PLANETARY EXECUTIVE BODIES OF ROCK-DESTRUCTIVE DRILLING MACHINES

This article highlights the development of the multicriteria optimization algorithm of parameters of planetary executive bodies of rock-destructive drilling machines with the objective of ensuring the rational destruction modes. We analyzed the advantages and disadvantages of planetary modes of drilling the mountain massif and the directions of increase of efficiency of planetary executive bodies. We developed a structural model of multi-criteria analysis and optimization of work of planetary executive bodies of drilling machines based on mathematical models and the input parameters of the system "executive body - mountain massif".

Keywords: rock-destructive drilling machine, planetary executive body, work wheel, cutting tool, construction scheme, mountain massif, parameter optimization, criterion.