

О. В. БОНДАРЕНКО, О. В. УСТИНЕНКО, В. І. СЕРИКОВ

МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТА АДАПТАЦІЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЗУБЧАСТИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕДУКТОРІВ ТА КОРОБОК ПЕРЕДАЧ

Стаття присвячена можливості використання та адаптації генетичних алгоритмів (ГА) для раціонального проектування зубчастих циліндричних редукторів та коробок передач. Розглянуто основні теоретичні положення методу ЛПт-пошуку, які дають змогу оцінити можливості цього методу та проаналізувати перспективи його розширення, використовуючи ідеологію ГА. Розглянуто основні теоретичні положення, що стосуються ГА. Надано основні відмінності ГА від класичних методів оптимізації. Описано алгоритмічну схему класичного ГА. Приведено аналіз основних генетичних операторів обрання батьків, схрещування та мутацій. Проведено оцінку основних генетичних операторів за їх продуктивністю та зручністю використання, і визначено їх вибір для подальшої роботи. Розглянуто можливі варіанти модифікацій послідовностей ГА, зважаючи на особливості задачі раціонального проектування зубчастих циліндричних редукторів та коробок передач. Першим надано алгоритм, який дає змогу значно збільшити кількість життєздатних особин, тобто пробних точок, що задовольняють числовим та функціональним обмеженням задачі, тим самим нівелювати недолік обмеження на максимально можливу кількість пробних точок у ЛПт-пошуку. Наступним описано алгоритм, який направлений насамперед на відбір більш якісних пробних точок та створення відповідної популяції, що притаманно генетично-еволюційним алгоритмам (ГЕА). Він базується на операторі – відсіві менш якісних точок, а також обов'язковому використанні оператора мутації. Таким чином, створено теоретичну базу для подальшої апробації запропонованих модифікацій алгоритмів ГА.

Ключові слова: проектування, редуктор, коробка передач, раціональні параметри, генетичний алгоритм, ЛПт-пошук

А. В. БОНДАРЕНКО, А. В. УСТИНЕНКО, В. И. СЕРИКОВ

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И АДАПТАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕДУКТОРОВ И КОРОБОК ПЕРЕДАЧ

Статья посвящена возможности использования и адаптации генетических алгоритмов (ГА) для рационального проектирования зубчатых цилиндрических редукторов и коробок передач. Рассмотрены основные теоретические положения метода ЛПт-поиска, которые позволяют оценить возможности этого метода и проанализировать перспективы его расширения, используя идеологию ГА. Рассмотрены основные теоретические положения, касающиеся ГА. Приведены основные отличия ГА от классических методов оптимизации. Описана алгоритмическая схема классического ГА. Приведен анализ основных генетических операторов выбора родителей, скрещивания и мутаций. Проведена оценка основных генетических операторов по их производительности и удобства использования, и определен их выбор для дальнейшей работы. Рассмотрены возможные варианты модификаций последовательностей ГА, учитывая особенности задачи рационального проектирования зубчатых цилиндрических редукторов и коробок передач. Первым предоставлен алгоритм, который позволяет значительно увеличить количество жизнеспособных особей, то есть пробных точек, удовлетворяющих числовым и функциональным ограничениям задачи, тем самым нивелировать недостаток ограничения на максимально возможное количество пробных точек в ЛПт-поиске. Следующим описан алгоритм, который направлен в первую очередь на отбор более качественных пробных точек и создание соответствующей популяции, что характерно генетически-эволюционных алгоритмов (ГЕА). Он базируется на операторе – отсева менее качественных точек, а также обязательном использовании оператора мутации. Таким образом, создана теоретическая база для дальнейшей апробации предложенных модификаций алгоритмов ГА.

Ключевые слова: проектирование, редуктор, коробка передач, рациональные параметры, генетический алгоритм, ЛПт-поиск

O. V. BONDARENKO, O. V. USTYNYENKO, V. I. SERYKOV

POSSIBILITY OF USE AND ADAPTATION OF GENETIC ALGORITHMS FOR RATIONAL DESIGN OF TOOTHED HELICAL REDUCERS AND GEARBOXES

The article is devoted to the possibility of using and adapting genetic algorithms (GA) for rational design of cylindrical reducers gearboxes. The main theory of the LP-search method are considered, which allow to evaluate the possibilities of this method and analyze the prospects of its expansion using the ideology of GA. The basic theory concerning GA are considered. The main differences between GA and classical optimization methods are given. The algorithmic scheme of classical GA is described. An analysis of the main genetic selection of parents, cross-breeding and mutations is given. An estimation of the basic genetic operators is made on their productivity and convenience of use, and determined by their choice for further work. Possible variants of modifications of GA sequences are considered considering the features of the problem of rational design of geared cylindrical gearboxes. The first one provides an algorithm that allows a significant increase in the number of viable individuals, that is, test points satisfying the numerical and functional limitations of the data, thereby offsetting the lack of limitation on the maximum possible number of test points in the LP-search. The following describes an algorithm that focuses primarily on the selection of more qualitative test points and the creation of an appropriate population that is inherent in genetic-evolutionary algorithms (GEAs). It is based on the operator - the withdrawal of less quality points, as well as the mandatory use of the operator mutation. Thus, a theoretical basis for further testing of proposed modifications of GA algorithms was created.

Keywords: design, reducer, gearbox, rational parameters, genetic algorithm, LPt search

Актуальність задачі. У машинобудуванні широке застосування набули зубчасті приводи, які виконують функції зміни обертового моменту та частоти обертання, найбільш яскравими та розповсюдженими представниками яких є зубчасті циліндричні редуктори та коробки передач. Частіше застосовуються двоступінчасті редуктори, які можуть бути виконані як у розгорнутій, так і у співвісній компоновках. Широко вживаними представниками коробок передач є дво- та тривальні [1]. На кожний (не прямий) передачі вони працюють як одно- та двоступене-

вий співвісний редуктор.

Складністю проектування такого типу приводів є розподілення передаточних чисел між ступенями та забезпечення рівномірності усіх зубчастих зачеплень при головній вимозі – поліпшення масогабаритних характеристик. Зазвичай, при проектуванні технічних систем інженер стикається з дилемою, бо широкий спектр вимог до виробу приводить до появи декількох критеріїв якості. Більшість задач раціонального проєк-

© О. В. Бондаренко, О. В. Устиненко, В. І. Сериков, 2019

тування зубчастих ступінчастих приводів також є багатокритеріальними. Одночасне досягнення кращих характеристик завжди є суперечливим, складним та суб'єктивним процесом, тому доцільно використати при проектуванні підходи багатокритеріальної математичної оптимізації.

Сучасний погляд проектувальників при розв'язанні прикладних задач оптимізації технічних об'єктів полягає у тенденції відходу від «класичних» методів оптимізації та уподобання методів дослідження простору параметрів проектування шляхом його зондування так званими пробними точками.

Ідеалістичним підходом для даного типу задач є метод пошуку розв'язання прямим послідовним перебором параметрів. Цей метод є універсальним, може використовуватися як при дискретних параметрах, так і при розподілених, бо розподілені параметри при розв'язанні технічних задач можуть бути представлені у вигляді дискретних. Рівень дискретизації розподілених параметрів, тобто мінімально можливий крок, може визначитися технічними та технологічними умовами або досвідом та побажаннями проектувальника. Але розв'язання задач пошуку кращого варіанту комбінації параметрів цим методом перетворюється у досить ресурсо- та часозатратну процедуру, що вимагає значних фінансових затрат. Автори вважають, що цей метод є кращим, але у реаліях сьогодення недосяжним для більшості проектувальників технічних систем.

Для розв'язання даного типу задач пропонується використовувати методи зондування простору параметрів закономірним та псевдовипадковим способом.

Авторами розвивається методика пошуку, що базується на зондуванні простору параметрів, де у якості пробних точок в одиничному багатомірному кубі використовуються точки ЛПт-послідовності [2], а усі критерії об'єднуються в один [3]. Але ріст кількості параметрів проектування та розширення їх числових обмежень призводить до зменшення щільності пробних точок у просторі параметрів, бо ЛПт-послідовність має обмеження на кількість пробних точок. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано [4] суміщення методів ЛПт-пошуку та звуження околів параметрів відносно можливих розв'язань. При розв'язанні задач раціонального проектування цей підхід якісно зарекомендував себе, але у деяких випадках показує швидку збіжність, що може привести до локального розв'язання.

Іншим виходом з ситуації автори бачать використання суміщення ЛПт-пошуку з «керованими» методами пошуку, наприклад, варіаціями генетичних алгоритмів.

Таким чином, аналіз адаптаційних можливостей генетичних алгоритмів та розробка варіантів їх використання сумісно з ЛПт-пошуком при раціональному проектуванні зубчастих циліндричних редукторів та коробок передач є актуальною задачею.

Метод ЛПт-пошуку. Як відомо з [2], метод ЛПт-пошуку базується на ЛПт-рівномірно-розподілених послідовностях та дає змогу оперувати значною кількістю параметрів (до 51) та кількістю рівномірно-розподілених пробних точок (до 2^{20}).

Приведемо деякі теоретичні викладки стосовно рівномірно розподілених послідовностей.

Одиничний n -мірний куб K^n , що складається з точок P , які мають декартові координати x_1, \dots, x_n , $P = (x_1, \dots, x_n)$, задовольняють нерівностям $0 \leq x_j \leq 1$ при $j=1, 2, \dots, n$.

Оберемо в K^n довільний n -мірний паралелепіпед Π . Позначимо через $S_N(\Pi)$ кількість точок P_i з номерами $1 \leq i \leq N$, що належать Π .

Послідовність точок P_1, \dots, P_i, \dots має назву рівномірно розподіленої в K^n , якщо для будь-якого Π

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{S_N(\Pi)}{N} = V_\Pi, \quad (1)$$

де V_Π – об'єм (n -мірний) паралелепіпеда Π .

Якщо точки Q_i з декартовими координатами $(q_{i,1}, \dots, q_{i,n})$ є рівномірно розподіленою послідовністю в K^n , то точки A_j з декартовими координатами $(\alpha_{j,1}, \dots, \alpha_{j,n})$, де при $j=1, 2, \dots, n$

$$\alpha_{i,j} = a_j + (b_j - a_j) \cdot q_{i,j}, \quad (2)$$

є рівномірно розподіленою послідовністю в паралелепіпеді Π , що складається з точок $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, координати яких задовольняють нерівностям $a_j \leq \alpha_j \leq b_j$.

Декартові координати $q_{i,j}$ для ЛПт-послідовності обчислюються за арифметичним алгоритмом. Цей алгоритм базується безпосередньо на розрахунках за таблицею чисельників $r_j^{(l)}$. За заданим номером точки i обчислюємо верхню границю суми $m = 1 + \lceil \ln i / \ln 2 \rceil$, а потім для кожного параметру $j (j=1, 2, \dots, n)$ обчислюємо координату:

$$q_{i,j} = \sum_{k=1}^m 2^{-k+1} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{l=k}^m \left[2 \{i^{-l}\} \right] \cdot \left[2 \left\{ r_j^{(l)} 2^{k-l-1} \right\} \right] \right\}, \quad (3)$$

де $\{z\}$ – ціла частина, а $\{z\}$ – дрібна частина числа Z .

Підхід до пошуку побудовано на позиції дослідження точками ЛПт-рівномірно-розподіленої (A_i) послідовності усього можливого простору параметрів (W), який визначається технічними та технологічними вимогами до типу привода, що розглядається. Потім точки проходять перевірку у певній послідовності, яка дає змогу вчасно відсіяти «непридатні» точки і тим самим скоротити час машинних розрахунків. З точок, що пройшли перевірку, складається множина, що задовольняє умовам проектування (Q , $Q \in W$).

Генетичні алгоритми. Генетичні алгоритми (ГА) [5–7] – це евристичні процедури пошуку, що використовуються для розв'язання задач оптимізації та моделювання шляхом випадкових дій та процесів з

параметрами; такі процеси є подібними механізмам відбору та наслідування в природі. Прикладна сфера використання ГА в механіці – розв’язання багатопараметричних задач при проектуванні [8-10]. Від традиційних методів оптимізації ГА відрізняються певними відмінними властивостями:

- кодування параметрів – задача формалізується таким чином, щоб обробляти не значення параметрів самої задачі, а їх закодовану форму – сукупність генів, що утворюють геном, який відповідає певній точці – особині;
- особливості початку пошуку – ГА починають пошук не з однієї точки, а з деякої сукупності точок, що складають популяцію;
- мінімум інформації про цільову функцію – ГА використовують тільки цільову функцію і не використовують її похідні та іншу додаткову інформацію;
- випадковість – ГА для багатьох дій та операцій використовують випадкові правила вибору.

Останні три властивості також притаманні методу ЛПт-пошуку, що дає можливість до їхнього більш якісного об’єднання.

Для розуміння функціонування ГА покажемо його основні етапи для класичної реалізації [11,12] на рис. 1.

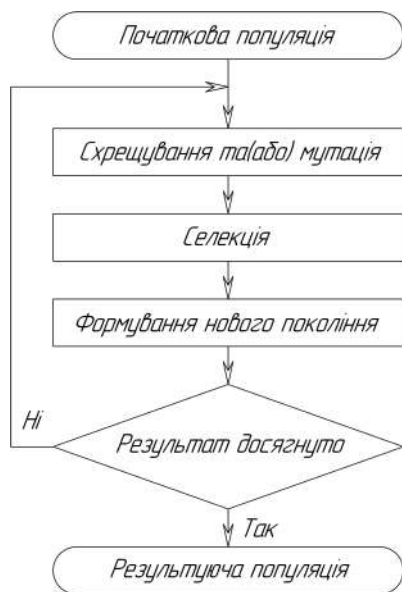


Рисунок 1 – Етапи ГА

Першим кроком ГА пошуку є створення початкової популяції. Популяція складається з особин, кожен особину визначає хромосома, яка вміщує в собі генотип, тобто сукупність генів. Ген – одна з характеристик особини, він може бути закодованим або бути явним значенням, наприклад, фізичною величиною.

Серед початкової популяції обираються батьки, які приймають участь у схрещуванні (обміні генів) або піддаються мутаціям. У наслідок цього процесу отримують нове покоління – нащадків.

Подальший перебіг ГА – селекція – відбір життєздатних або цікавих особин, може проводитись як з участю батьків, так і без них. У результаті цього етапу формується нове покоління. Якщо воно відповідає певним вимогам, що висуває генетик, то робота ГА

припиняється, якщо ні – процеси «схрещування-селекція» повторюються до досягнення мети.

Генотип, аналіз генетичних операторів та варіантів послідовностей ГА для розширення можливостей ЛПт-пошуку. Розкриємо базові визначення для проведення паралелей з раціональним проектуванням циліндричних редукторів та коробок передач. Ген – структурна та функціональна одиниця наслідування особин, вони визначають признаки, що передаються від батьків до нащадків. Алелі – різні форми одного і того ж гена, що розташовані в однакових локусах хромосоми. Лocus – місце розташування певного гена на генетичній карті хромосоми. Генотип – сукупність генів даного організму. Якщо особину характеризує одна хромосома, то визначені генотип та хромосома співпадають – це типова ситуація при розв’язанні задач оптимізації з використанням ГА.

Як було показано у [2], пробні точки у просторі параметрів проектування, що обираються за ЛПт-послідовністю, мають набір певних координат, у термінології ГА – *геном*, де кожен з параметрів проектування є геном. В залежності від кінематичних структур, що розглядаються, геном може приймати різну довжину. Узагальнену схему генома при раціональному проектуванні циліндричних редукторів та коробок передач (дивись постановку задачі у [1,13]) запропоновано представити у вигляді, наданому на рис. 2.

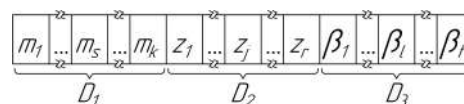


Рисунок 2 – Узагальнена схема генома

Як бачимо на рисунку 2, структура генома складається з 3-х ділянок D_1, D_2, D_3 , у локусах яких згруповано споріднені гени, тобто конструктивні параметри зубчастого привода, що мають однаковий змістовний сенс. Ділянки D_1 відповідають k модулів зубчастих зачеплень, ділянки D_2 відповідають r чисел зубців 3, ділянки D_3 відповідають t кутів нахилу зубців у зачепленнях, які входять до параметрів проектування при формулюванні постановки певної задачі. Наприклад, при розв’язанні задачі раціонального проектування циліндричного двоступінчастого співвісного редуктора методом ЛПт-пошуку маємо пробну точку, що характеризується геномом зображеним на рис. 3.

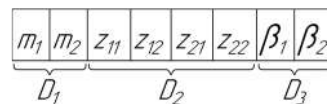


Рисунок 3 – Приклад генома пробної точки двоступінчастого співвісного редуктора

На рис. 3 прийняті наступні позначення: m_μ – відповідні модулі пар зубчастих коліс ($\mu=1,2$); $z_{\mu,k}$ – відповідні числа зубців коліс, k – номер колеса у зачепленні ($k=1$ – ведуче колесо, $k=2$ – ведене колесо); β_μ – кути нахилу зубців у зачепленнях.

Обрання батьків зазвичай проходить за наступними стратегіями:

– *panmixia* – дві особини, що входять у батьківську пару, обираються з популяції випадковим чином, також зазначимо, що будь-яка особина може приймати участь у декількох батьківських парах;

– *inbreeding* – перша особина пари обирається випадково, а друга – максимально геометрично наближена у просторі параметрів до першої;

– *outbreeding* – пари формуються з особин, які максимально геометрично віддалені одна від одної у просторі параметрів.

Для розв'язання представленої задачі пропонується використовувати стратегію *panmixia*, бо вона дає змогу отримати кількість батьківських пар до $p!/[2 \cdot (p-2)!]$, що дає змогу отримати популяцію нащадків, яка перевершує батьківську у рази. Також пропонується обирати батьківські пари за допомогою ЛП-τ послідовностей, що значно підвищує рівень розподіленості, а також зручно реалізується при генерації програмного коду.

Розглянемо на прикладі наведеного на рис. 3 генна широко вживані оператори *схрещування* та *мутації*, які можна використати при розв'язанні вказаної задачі.

Як вже було сказано, особина (пробна точка) має гени, які є дійсними значеннями. У такому випадку застосовують дискретне односточкове і багаточкове схрещування, а також однорідне дискретне та проміжне схрещування. При односточковому схрещенні обирається будь-яким способом точка схрещування, і після неї проводиться обмін фрагментами хромосом двох батьків (B1 та B2) з формуванням двох нащадків (H1 та H2), як показано на рис. 4.

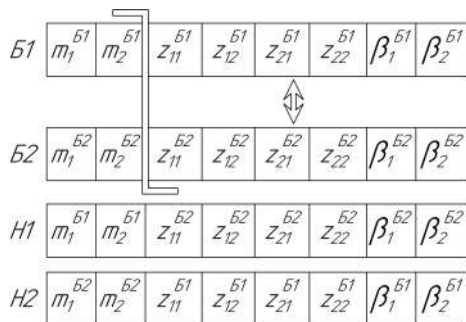


Рисунок 4 – Ілюстрація односточкового схрещування

При багаточковому схрещуванні обирають дві та більше точок, потім батьки обмінюються відповідними фрагментами, як показано на рис. 5.

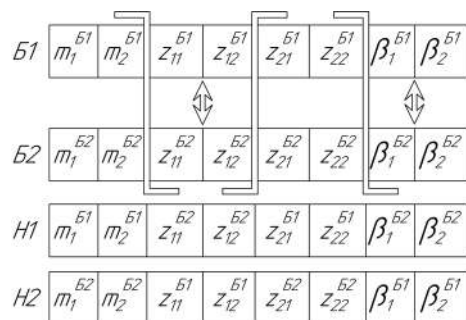


Рисунок 5 – Ілюстрація багаточкового схрещування

При однорідному дискретному схрещуванні генна нащадка створюється шляхом копіювання відповідного гена від першого або другого з батьків. Для цього будь-яким способом, зазвичай випадковим, генерується маска нащадка, довжина якої відповідає довжині хромосоми батьків. Наповнення маски складається з цифр 1 та 2, які відповідають номеру одного з двох батьків, ген яких входить до геному нащадка, як показано на рис. 6.

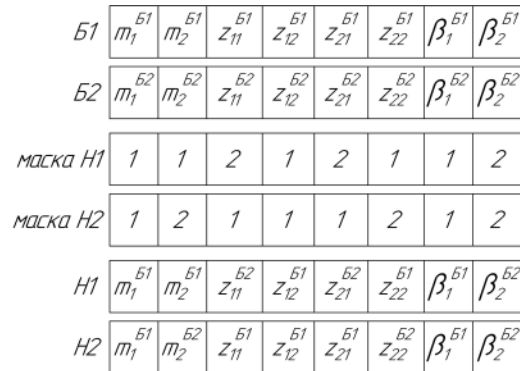


Рисунок 6 – Ілюстрація однорідного дискретного схрещування

При проміжному схрещуванні значення геному нащадка визначається за залежністю $A' = \min(A, B) + \alpha \cdot |B - A|$, де A' – значення геному нащадка відповідно до значень генів батьків (A, B), а $\alpha \in [0, 1]$ – випадковий множник. Таким чином, хромосома одного або двох нащадків формується за окремими компонентами геному, як показано на рис. 7.

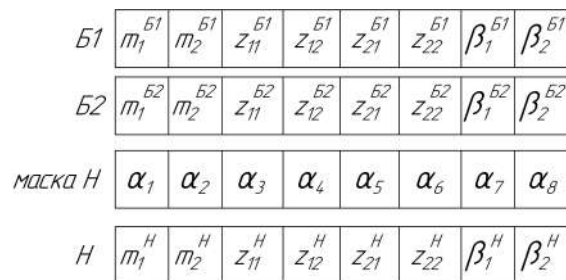


Рисунок 7 – Ілюстрація проміжного схрещування

Зважаючи на специфіку описаних операторів схрещування, можна рекомендувати як достатній метод багаточкового схрещування з можливістю примусового обрання точок схрещування. В залежності від обмежень на змінні проектування це дасть змогу проектувальнику керувати оперувати ділянками хромосоми, при необхідності залишаючи їх цілими або розривати їх у певних місцях. Але для збільшення кількості нащадків у деяких випадках можливо використати і інші надані оператори схрещування.

Розглянемо далі більш вживані оператори *мутації*. Зазвичай мутацію використовують для того, щоб відвести процес пошуку від локальних сплесків цільової функції. Також мутація дає можливість збільшити кількість популяції. Для задачі, що розглядається, пропонується використати наступні оператори.

Широко вживають оператор «інверсію», принцип якого показано на рис. 8. Але, на відміну від класичного підходу, де точки розриву обираються випадково, пропонуємо використовувати варіант оперування лише у межах певних ділянок, щоб не сплутати смислове наповнення локусів хромосоми.

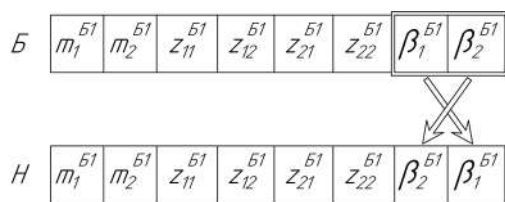


Рисунок 8 – Ілюстрація мутації інверсії

Інший варіант мутації – крокова. У даному випадку значення випадкового гену випадково змінюється (зменшується або збільшується) на деяке значення – крок (Δ), яке може бути як постійним, так і змінним, що залежить від порядкового номеру покоління $A' = A \pm \Delta$.

Використання зазначених операторів мутацій дає змогу значно збільшити та урізноманітнити як початкову, так і проміжні популяції.

Зважаючи на особливості задачі раціонального проектування зубчастих циліндричних редукторів та коробок передач, а також на рекомендовані для реалізації її розв'язання оператори ГА, розглянемо можливі *варіанти модифікації послідовностей ГА*.

Першим пропонуємо модифікацію алгоритму, що дає змогу ліквідувати недолік обмеження на максимально можливу кількість пробних точок у ЛПТ-пошуку [2, 4], схему алгоритму надано на рис. 9.



Рисунок 9 – Етапи модифікованого ГА

Використовуючи представлений алгоритм, можливо значно збільшити кількість життєздатних особин, тобто пробних точок, що задовольняють число-

вим та функціональним обмеженням задачі. Початкова популяція обирається за ЛПТ-послідовністю у межах числових обмежень на параметри проектування, що обумовлені постановкою задачі. Потім початкова популяція проходить селекцію, тобто перевірку функціональних умов задачі. Особини, що пройшли перевірку, утворюють життєздатне покоління, яке залучається до схрещення за стратегією ранміхія для утворення нащадків. Батьки не відкидаються і разом з нащадками формують групу, що знов проходить селекцію. Таким чином, проходячи певне число циклів, популяція життєздатних особин поступово розширюється. Кількість циклів «селекція-схрещування» визначається проектувальником окремо для кожної задачі експериментально або може бути динамічною величиною та обмежуватися, наприклад, у випадку припинення збільшення популяції. Після виходу з циклу сформована результуюча популяція проходить аналіз – обчислення значення цільової функції для кожної особини (пробної точки) та сортування за цим показником. На виході маємо одну чи декілька перодових точок, що визначають розв'язання задачі.

Наступним пропонуємо алгоритм, який направлений насамперед на відбір більш якісних пробних точок та створення відповідної популяції, що притаманно генетично-еволюційним алгоритмам (ГЕА). Схему модифікації ГЕА надано на рис. 10.



Рисунок 10 – Етапи модифікованого ГЕА

Як і у попередньому випадку, початкова популяція обирається за ЛПт-послідовністю. Потім початкова популяція проходить мутацію для збільшення та урізноманітнення. Батьки не відкидаються на всіх етапах та складають популяцію на рівні з нащадками. Наступним етапом є селекція за функціональними умовами. Відібрані особини піддаються аналізу та сортуванню за значенням цільової функції. Отримана впорядкована популяція проходить етап певної селекції – відсів певного відсотка «слабих» генів, що програють за «якістю» – значенням цільової функції. Відсоток відсіву може бути однаковим на кожному кроці, а може і змінюватися, наприклад, бути функцією номеру кроку. Особини, що пройшли відсів, утворюють життєздатне покоління, яке залучається до схрещення за стратегією раппіхія для утворення нащадків та подальшої їх мутації. Таким чином, проходячи певне число циклів, популяція життєздатних якісних особин поступово поповнюється. На виході з циклу отримуємо результуючу популяцію, яка проходить аналіз за значенням цільової функції та сортування. На виході маємо одну чи декілька передових точок, що визначають розв'язання задачі.

Висновки:

1. Розглянута актуальність поставленої задачі та доведено необхідність аналізу можливості використання та адаптації генетичних алгоритмів для раціонального проектування зубчастих циліндричних редукторів та коробок передач.

2. Розглянуто основні теоретичні викладки методу ЛПт-пошуку, які дають змогу оцінити можливість цього методу та проаналізувати перспективи його розширення, використовуючи ідеологію ГА.

3. Розглянуто основні теоретичні викладки, що стосуються ГА. Надано основні відмінності ГА від класичних методів оптимізації. Описано алгоритмічну схему класичного ГА. Приведено аналіз основних генетичних операторів обрання батьків, схрещування та мутацій. Це дало змогу критично оцінити генетичні оператори за їх продуктивністю та зручністю використання і визначитися з їх вибором для подальшої роботи.

4. Розглянуто можливі варіанти модифікацій послідовностей ГА, зважаючи на особливості задачі раціонального проектування зубчастих циліндричних редукторів та коробок передач. Перший наданий алгоритм дає змогу значно збільшити кількість життєздатних особин, тобто пробних точок, що задовольняють числовим та функціональним обмеженням задачі, тим самим нівелювати недолік обмеження на максимально можливу кількість пробних точок у ЛПт-пошуку. Наступним пропонується алгоритм, який направлений насамперед на відбір більш якісних пробних точок та створення відповідної популяції, що притаманно генетично-еволюційним алгоритмам (ГЕА). Він базується на операторі – відсві менш якісних точок, а також обов'язковому використанні оператора мутації. Таким чином створено теоретичну базу для апробації запропонованих модифікацій алгоритмів ГА, що буде відображено у наступних працях.

Список літератури

1. Бондаренко Олександр, Устиненко Олександр Оптимізації співвісних ступінчастих приводів машин по масогабаритними характеристиками на прикладі тривальних коробок передач. *Вісник Національного Політехнічного Інституту «Харківський Політехнічний Інститут»: тематичний випуск «Проблеми механічного приводу»*. Харків : НТУ "ХПІ", 2012. №22. С. 16–27.
2. Соболев И.М., Статников Р.Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. – М. : Наука, 1981. – 107 с.
3. А.М. Анохин, В.А. Глотов, В.В. Павельев, А.М. Черкашин Методы определения коэффициентов важности критериев. *Автоматика и телемеханика*. М. : Институт проблем управления, 1997. №8. С. 3–35.
4. Бондаренко О.В. Суміщення методів ЛПт-пошуку та звуження околив при оптимізації тривальних коробок передач. *Механіка та машинобудування*. Харків : НТУ «ХПІ». 2010. №1. С. 78–84.
5. John H. Hollan. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor : University of Michigan Press, 1975. – 183 p.
6. Панченко Т.В. *Генетические алгоритмы*. Астрахань: Астраханский университет, 2007. 87с.
7. Lance Chambers *The Practical Handbook of GENETIC ALGORITHMS / Lance Chambers*. CRC Press, Inc, 1998. 592 p.
8. Goldber, David E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989. 414 p.
9. Бежитский С.С., Е.С. Семенкин, О.Э. Семенкина Гибридный эволюционный алгоритм для задач выбора эффективных вариантов систем управления. *Автоматизация и современные технологии*. 2005. № 11. С. 24–31.
10. Еремеев А.В. *Генетические алгоритмы и оптимизация: Учебное пособие*. – Омск : Изд-во Омского государственного университета, 2008. 36с.
11. Koza J.R. *Genetic Programming*. Cambridge: The MIT Press, 1998. 609 с.
12. Mitchell M. *An Introduction to Genetic Algorithms*. – Cambridge: MIT Press, 1999. 158 p.
13. Олександр Бондаренко, Олександр Устиненко, Володимир Серіков Рациональне проектування зубчастих циліндричних двоступінчастих редукторів з урахуванням рівня напруженості зачеплень // *Вісник Національного Політехнічного Інституту «Харківський Політехнічний Інститут»: тематичний випуск «Проблеми механічного приводу»*. Харків : НТУ "ХПІ", 2015. №15. С. 23–27.

References (transliterated)

1. Olexsij Bondarenko, Olexsandr Ustinenko Optimizacii spivvisnih stupinchastih privodiv mashin po masogabaritnimi harakteristikami na prikladi trival'nih korobok peredach. *Visnik Nacional'nogo Politehnicnogo Institutu «Harkivs'kij Politehnicnij Institut»: zbirnik naukovih prac': tematicnij vipusk «Problemi mehanicnogo privodu»*. Kharkiv : NTU «KhPI». 2012, no. 22, pp. 16–27.
2. Sobol' I.M., Statnikov R.B. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. – Moscow : Nauka, 1981. – 107 p.
3. А.М. Anohin, V.A. Glotov, V.V. Pavel'ev, A.M. Cherkashin Metody opredelenija koeficientov vazhnosti kriteriev. *Automatika i telemehaniika*. Moscow : Institut problem upravlenija, 1997, no. 8, pp. 3–35.
4. Bondarenko Olexsij. Cumishhennja metodiv LPt-poshuku ta zvuzhennja okoliv pri optimizacii trival'nih korobok peredach. *Mehaniika ta mashinobuduvannja*. Kharkiv : NTU «KhPI». 2010, no. 1, pp. 78–84.
5. John H. Hollan. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor : University of Michigan Press, 1975. 183 p.
6. Panchenko T.V. *Geneticheskie algoritmy*. – Astrakhanskiy universitet, 2007. 87p.
7. Lance Chambers *The Practical Handbook of GENETIC ALGORITHMS / Lance Chambers*. CRC Press, Inc, 1998. 592 p.
8. Goldber, David E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989. 414 p.
9. Bezhitskiy S.S., E.S. Semenkin, O.E. Semenkina Gibridnyy

- evolyutsionnyy algoritm dlya zadach vybora effektivnykh variantov sistem upravleniya. *Avtoma-tizatsiya i sovremennyye tekhnologii*. 2005, no. 11, pp. 24-31.
10. Eremmeev A.V. *Geneticheskie algoritmy i optimizatsiya: Uchebnoe posobie*. – Omsk: Izdatel'stvo Omskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008. 36 p.
 11. Koza J.R. *Genetic Programming*. Cambridge: The MIT Press, 1998. 609 p.
 12. Mitchell M. *An Introduction to Genetic Algorithms*. – Cambridge: MIT Press, 1999. 158 p.
 13. Oleksij Bondarenko, Oleksandr Ustinenko, Volodimir Serikov Racional'ne proektuvannja zubchastih cilindrichnih dvostupinchastih reduktoriv z urahuvannjam rivnja napruzenosti zacheplen'. *Visnik Nacional'nogo Politehnichnogo Institutu «Kharkivs'kij Politehnichnij Institut»: tematicnij випуск «Problemi mehanich-nogo privodu»*. Kharkiv : NTU «KhPI», 2015, no. 15, pp. 23–27.

Надійшла (received) 09.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бондаренко Олексій Вікторович (Бондаренко Алексей Викторович, Bondarenko Oleksiy) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; доцент кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (067) 189-97-00; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2693-5301>; e-mail: avbondko@gmail.com

Устиненко Олександр Віталійович (Устиненко Александр Витальевич, Ustynenko Oleksandr) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; професор кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-64-78; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6714-6122>; e-mail: ustin1964@tmm-sapr.org

Сериков Володимир Іванович (Сериков Владимир Иванович, Serykov Volodymyr) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; старший науковий співробітник кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-64-78; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5295-3925>; e-mail: SerikovVI@tmm-sapr.org