

О. В. БОНДАРЕНКО, О. В. УСТИНЕНКО

ВИКОРИСТАННЯ ПСЕВДОВИПАДКОВИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ В ЕВОЛЮЦІЙНИХ АЛГОРИТМАХ ПРИ РАЦІОНАЛЬНОМУ ПРОЕКТУВАННІ ЗУБЧАСТИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕДУКТОРІВ ТА КОРОБОК ПЕРЕДАЧ

Стаття присвячена використанню псевдовипадкових послідовностей в еволюційних алгоритмах (ЕА) при раціональному проектуванні зубчастих циліндричних редукторів та коробок передач. Розглянуто основні теоретичні викладки рівномірно розподілених послідовностей та ЛП τ -послідовностей, які дають змогу оцінити можливості цих послідовностей та проаналізувати перспективи застосування при реалізації еволюційних алгоритмів. Розглянуто основні теоретичні викладки, що стосуються ЕА. Описано алгоритмічну схему класичного ЕА, яка наочно ілюструє його роботу та функціонування. Це дало змогу критично оцінити можливі етапи, на яких актуально використовувати ЛП τ -послідовності як псевдовипадковий фактор. Запропоновано віддати на розсуд псевдовипадковості наступні етапи: генерацію початкової популяції, підбір батьківських пар, схрещування та мутацію. Розглянуто «внутрішні» можливості ЛП τ -послідовності, а саме – можливість використання таблиці чисельників для реалізації можливості отримання у різних експериментах для однієї задачі пробних точок з відмінними координатами. Це дає змогу більш щільно дослідити простір параметрів проектування та поліпшити етап генерації початкової популяції, досягти її урізноманітнення та збільшення у декілька разів, що дає змогу знайти кінцевий результат швидше та якісніше. Розглянуто особливості використання ЛП τ -послідовності при схрещуванні. Рекомендовано для кожної обраної батьківської пари за ЛП τ -послідовністю обирати один з описаних методів схрещування. Це дає змогу наблизити процес формування нащадків до реально-го еволюційного процесу, коли процес носить випадковий характер. Розглянуто особливості та наочно проілюстровано використання ЛП τ -послідовностей при реалізації рекомендованих генетичних операторів схрещування для батьківських пар. Розглянуто особливості та наочно проілюстровано використання ЛП τ -послідовностей при реалізації рекомендованого генетичного оператора мутації. Таким чином, створено теоретичну базу для подальшої апробації та реалізації випадкового фактору в еволюційних алгоритмах.

Ключові слова: проектування; редуктор; коробка передач; раціональні параметри; еволюційний алгоритм; ЛП τ -послідовність

А. В. БОНДАРЕНКО, А. В. УСТИНЕНКО

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМАХ ПРИ РАЦИОНАЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗУБЧАТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕДУКТОРОВ И КОРОБОК ПЕРЕДАЧ

Статья посвящена использованию псевдослучайных последовательностей в эволюционных алгоритмах (ЭА) при рациональном проектировании зубчатых цилиндрических редукторов и коробок передач. Рассмотрены основные теоретические выкладки равномерно распределенных последовательностей и ЛП τ -последовательностей, которые позволяют оценить возможности этих последовательностей и проанализировать перспективы применения при реализации эволюционных алгоритмов. Рассмотрены основные теоретические выкладки, касающиеся ЭА. Описана алгоритмическая схема классического ЭА, которая наглядно иллюстрирует его работу и функционирование. Это позволило критически оценить возможные этапы, на которых актуально использовать ЛП τ -последовательности как псевдослучайный фактор. Предложено отдать на усмотрение псевдослучайности следующие этапы: генерацию начальной популяции, подбор родительских пар, скрещивания и мутации. Описаны «внутренние» возможности ЛП τ -последовательности, а именно – возможность использования таблицы числителей для реализации возможности получения в различных экспериментах для одной задачи пробных точек с отличными координатами. Это позволяет более плотно исследовать пространство параметров проектирования и улучшить этап генерации начальной популяции, достичь ее разнообразия и увеличения в несколько раз, что позволяет найти конечный результат быстрее и качественнее. Рассмотрены особенности использования ЛП τ -последовательности при скрещивании. Рекомендовано для каждой выбранной родительской пары по ЛП τ -последовательности выбирать один из описанных методов скрещивания. Это позволяет приблизить процесс формирования потомков к реальному эволюционному процессу, когда процесс носит случайный характер. Описаны особенности и наглядно проиллюстрировано использование ЛП τ -последовательностей при реализации рекомендованных генетических операторов скрещивания для родительских пар. Рассмотрены особенности и наглядно проиллюстрировано использование ЛП τ -последовательностей при реализации рекомендованного генетического оператора мутации. Таким образом, создана теоретическая база для дальнейшей апробации и реализации случайного фактора в эволюционных алгоритмах.

Ключевые слова: проектирование; редуктор; коробка передач; рациональные параметры; эволюционный алгоритм; ЛП τ -последовательность

O. BONDARENKO, O. USTYNNENKO

THE USE OF PSEUDO RANDOM SEQUENCES IN EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR RATIONAL DESIGN OF TOOTHED HELICAL REDUCERS AND GEARBOXES

The article is devoted to the use of pseudo-random sequences in evolutionary algorithms (EA) with rational design of gear cylindrical gearboxes and gearboxes. The main theoretical calculations of uniformly distributed sequences and LP τ -sequences, which allow to evaluate the capabilities of these sequences and analyze the prospects for application in the implementation of evolutionary algorithms, are considered. The main theoretical calculations concerning EA are considered. The algorithmic scheme of the classic EA is described which vividly illustrates its operation and functioning. This made it possible to critically evaluate the possible stages at which it is important to use LP τ -sequences as a pseudo-random factor. It is proposed to give the following stages to the discretion of the pseudorandom: the generation of the initial population, the selection of parental pairs, the crossing and the mutation. The “internal” capabilities of the LP τ -sequence are described, namely, the possibility of using the table of numerators to realize the possibility of obtaining test points with excellent coordinates in different experiments for one problem. This allows you to more closely explore the space of design parameters and improve the generation stage of the initial population, to achieve its diversity and increase several times, which allows you to find the end result faster and more qualitatively. The features of the use of the LP τ -sequence when crossing are considered. It is recommended for each selected parental pair in the LP τ -sequence to choose one of the described methods of crossing. This allows you to bring the process of the formation of descendants to the actual evolutionary process, when the process is random. Features and clearly illustrated the use of LP τ -sequences in the implementation of the recommended genetic crossing operators for parental pairs. Features and clearly illustrated the use of LP τ -sequences in the implementation of the recommended genetic mutation operator. Thus, a theoretical basis was created for further testing and implementation of the random factor in evolutionary algorithms.

Keywords: design; reducer; gearbox; rational parameters; evolutionary algorithm; LP τ -sequence

Актуальність задачі. У сучасному машинобудуванні досить розповсюджені зубчасті приводи, що використовуються для реалізації зміни оберта-

льного моменту та частоти обертання. Моделями,

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

що користуються попитом у промисловості, є зубчасті циліндричні редуктори та коробки передач. Загальне машинобудування більше віддає перевагу універсальним та спеціальним двоступінчастим співвісним та розгорнутим редукторам. Автомобільне машинобудування потребує дво- та тривальних коробок передач [1], які на кожній (не прямій) передачі працюють як одно- та двоступеневий співвісний редуктор.

Основні проблеми та складності при проектуванні такого типу приводів було розглянуто у [1].

У якості одного із підходів до розв'язання задачі авторами було запропоновано використання псевдовипадкового пошуку за ЛПТ-последовностями [2], як самостійно [3], так і в комбінації з іншими методами [4].

У роботі [5] було розглянуто можливості та адаптацію генетичних алгоритмів для раціонального проектування редукторів та коробок передач. У вказаній роботі надано декілька варіацій генетичних алгоритмів, де для генерування початкових популяцій використовувалися ЛПТ-рівномірно розподілені последовності.

Автори бачать можливим розвиток цього напрямку та удосконалення подібних підходів до розв'язання задач раціонального проектування вказаних зубчастих приводів.

Таким чином, аналіз можливості використання псевдовипадкових последовностей в еволюційних алгоритмах при раціональному проектуванні зубчастих циліндричних редукторів та коробок передач є актуальною науково-прикладною задачею.

Рівномірно розподілені последовності точок в K^n (одичинному n -вимірному кубі). Нехай P_1, \dots, P_i, \dots – последовність точок, що належать K^n . Виберемо в K^n довільний n -вимірний паралелепіпед Π із сторонами, що паралельні координатним граням. Позначимо через $S_N(\Pi)$ кількість точок P_i з номерами $1 \leq i \leq N$, що належать Π .

Последовність точок P_1, \dots, P_i, \dots називається рівномірно розподіленою 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 -вимірний) паралелепіпеда Π .

Можна довести, що, якщо G – довільна область, яка розташована в K^n , має об'єм V_G , то з попередніх міркувань витікає, що

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{S_N(G)}{N} = V_G.$$

Це співвідношення показує, що при достатньо великих N кількість точок последовності, що належать G , пропорційна об'єму G : $S_N(G) \sim NV_G$.

Легко також довести, що проєкції точок рівномірно розподіленої последовності на будь-яку

m -вимірну грань куба K^n при $m < n$ утворюють рівномірно розподілену последовність в K^m .

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

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

є рівномірно розподіленою последовністю в паралелепіпеді Π (n -вимірний паралелепіпед), що складається з точок $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$, координати яких задовольняють нерівностям $a_j \leq \alpha_{j,i} \leq b_j$.

ЛПТ-последовність є однією з найякісніших рівномірно розподілених последовностей.

Декартові координати $q_{i,j}$ для ЛПТ-последовності обчислюються за двома типами алгоритмів: вихідним та арифметичним.

Автори використовують арифметичний алгоритм у зв'язку з відносно простою його програмною реалізацією.

Розглянемо варіант, коли декартові координати $q_{i,j}$ для ЛПТ-последовності обчислюються за арифметичним алгоритмом. Цей алгоритм базується безпосередньо на розрахунках за таблицею чисельників $r_j^{(l)}$. За заданим номером точки i обчислюємо

$$m = 1 + \lceil \ln i / \ln 2 \rceil, \quad (3)$$

а потім для кожного параметру j ($j=1, 2, \dots, n$) обчислюємо координату

$$q_{i,j} = \sum_{k=1}^m 2^{-k+1} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{l=k}^m [2\{i^{-l}\}] \cdot [2\{r_j^{(l)} 2^{k-l-1}\}] \right\}. \quad (4)$$

У останніх двох формулах $\{z\}$ – ціла частина, а $\{z\}$ – дрібна частина числа z .

Еволюційні алгоритми (ЕА) [6–8] – це спеціальні підходи до пошуку, що використовуються для розв'язання задач оптимізації та моделювання станів та процесів шляхом випадкових або спрямованих дій та процесів з параметрами. Такі стратегії є ідентичними процесам відбору та наслідування в живій природі. ЕА використовують як один з механізмів розв'язання багатопараметричних задач в механіці [9–12]. ЕА, як і генетичні алгоритми (ГА), відрізняються від класичних методів оптимізації деякими особливостями [5].

Основною відмінністю ЕА від ГА є те, що у наступні покоління передаються не всі особини, а лише такі, що задовольняють умовам існування – певним обмеженням, що висуваються проектувальником. Така стратегія розвитку популяцій дає змогу у кожному наступному поколінні отримувати

особини із все більш якісними показниками пристосованості до вимог. Аналіз кожного дійсного покоління проходить досить швидко, бо кількість особин лімітується або умовами існування, або задається проектувальником.

Для ЕА притаманні ті ж самі терміни та оператори що і для ГА [5]: ген, геном, ділянка генома, генотип, алелі, локус, хромосома, особина.

Покажемо основні етапи ЕА на рис. 1. При ініціалізації ЕА спочатку будь яким чином, зручним для проектувальника, формують початкову популяцію. Кількість особин цієї популяції повинна бути максимально можливою, бо це значення значно впливає на подальший перебіг еволюційного процесу, і, відповідно, на кінцеві результати.

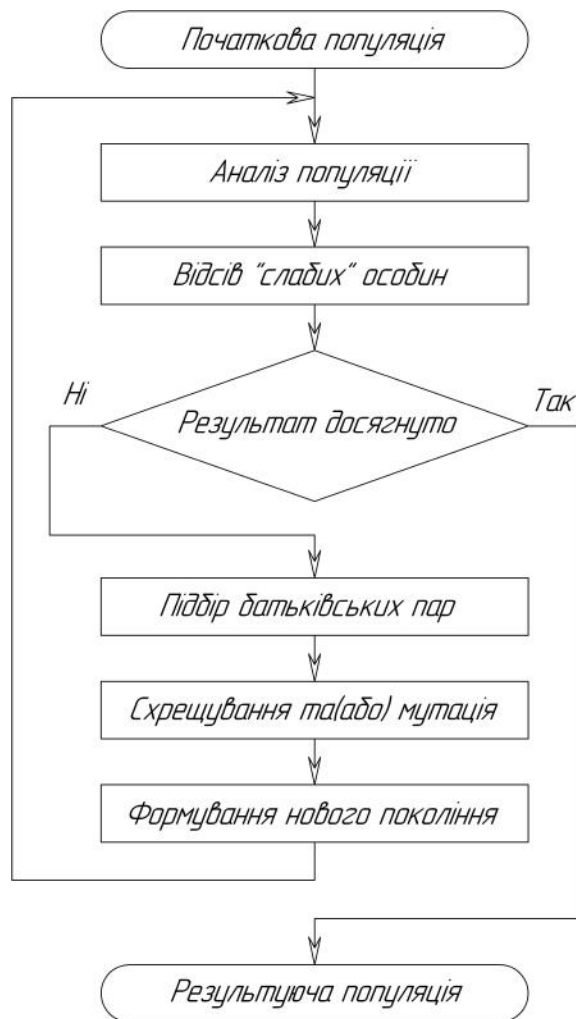


Рисунок 1 – Етапи ЕА

Потім початкова популяція піддається аналізу життєздатності, у межах якого визначають особин, що будуть брати участь у подальшому життєвому циклі. При розв'язанні технічних задач цей аналіз відповідає операції перевірки відповідності об'єкта технічним та технологічним умовам, що гарантує його працездатність.

Наступним етапом є селекція, тобто відсів недієздатних особин. Ця операція дає змогу у процесі подальшого перебігу алгоритму для формування

батьківських пар долучати лише обраних особин. Як вже зазначалося вище, селекція в ЕА при розв'язанні задач раціонального проектування може проводитися декількома підходами: відсів тільки недієздатних особин або певного відсотка «слабких» особин. «Слабкі» особини визначаються шляхом аналізу та сортування дієздатних особин за певним критерієм, їх кількість може задаватися проектувальником точно або відповідати певному відсотку від дієздатних особин.

Після селекції проводиться перевірка, чи поставлену мету було досягнуто. Якщо так, то з обраних особин формується результуюча популяція, якщо ні, то алгоритм переходить до наступних етапів.

Підбір батьківських пар, у відповідності до розв'язання задачі раціонального проектування циліндричних редукторів та коробок передач, як вже зазначалося в [5], рекомендовано проводити за наступними стратегіями: panmixia, inbreeding, outbreeding. При застосуванні до вказаної задачі ГА було запропоновано використовувати лише першу зі списку стратегію, зважаючи на її переваги. Але в ідеології ЕА це є недопустимим, і необхідно використовувати дві та більше стратегій. Вони можуть використовуватися як на рівні, так і складати певне співвідношення між собою. Така концепція більше відповідає реальним біологічним процесам, коли не існує виключно моногамних або полігамних видів. Так, є домінуючі моделі створення батьківських пар, але не виключні, тобто, зазвичай зустрічаються змішані стратегії.

Наступний етап визначає те, як буде проводитись обмін генами, тобто схрещування, або зміна гену при мутаціях. З великої кількості можливих варіантів схрещування авторами обрано більш зручні з точки зору програмної реалізації та піддатливості для реалізації випадковості процесів. Найбільш зручними методами є: дискретне односточкове і багаточкове схрещування, однорідне дискретне схрещування, проміжне схрещування. З переліку операторів мутацій автори рекомендують використовувати крокову та модифіковану інверсію [5]. Остання передбачає зміну локусів генів тільки в ділянках.

Сформована популяція знову повинна піддаватися аналізу, тобто цикл алгоритму замикається.

Далі розглянемо використання рівномірно розподілених послідовностей для наведеного алгоритму на прикладі розв'язання задачі раціонального проектування двоступінчастого циліндричного редуктора. Геном особини було наведено у [5].

ЛПЗ-послідовність як псевдовипадковий фактор ЕА. Для досягнення наближення до природного процесу еволюції необхідно у процесі ЕА забезпечити певну долю випадковості. У світовій науці існує декілька крайніх поглядів відносно еволюційного процесу. Одна сторона стверджує, що еволюція є випадковим процесом, інша – спрямованою необхідністю.

Автори закликають не впадати в крайнощі та

розглядати ЕА як комплексний процес, що вміщує у певних долях випадковість і необхідність. Необхідність визначається числовими і функціональними технічними та технологічними умовами, що призначає проектувальник, а випадковість – використанням на певних етапах ЕА псевдовипадкового фактору. У якості останнього автори пропонують використовувати ЛПт-послідовність.

Пропонується в ЕА віддати на розсуд псевдовипадковості наступні етапи: генерацію початкової популяції, підбір батьківських пар, схрещування та мутацію. Але насамперед пропонується розглянути «внутрішні» можливості ЛПт-послідовності.

Як відомо, базою для ЛПт-послідовності є таблиця чисельників, яка відображає останні в залежності від номеру виміру простору параметра проектування (j) та параметру l , що бере участь при розрахунку за формулою (4). Надамо загальний вид таблиці чисельників у табл. 1, з повною таблицею можна ознайомитися у [2].

Таблиця 1 – Таблиця чисельників

j	$l=1$	2	3	...	18	19	$l=20$
1	1	1	1	...	1	1	1
2	1	3	5	...	196611	327685	983055
3	1	1	7	...	250113	276231	326411
...
49	1	1	7	...	239693	73299	863545
50	1	3	5	...	113679	204881	761911
51	1	1	1	...	37261	431301	176455

Табл. 1 дає змогу досліджувати 51-вимірний простір. У межах одного числового експерименту з пошуку раціональних параметрів дослідник самостійно призначає порядкові номери параметрам проектування. Кожному порядковому номеру відповідає певний рядок таблиці чисельників. Неявна властивість полягає у тому, що у кожному наступному експерименті з розв'язання однієї і тієї ж задачі проектувальник може змінювати порядкові номери параметрів проектування, наприклад, було: 1 – а, 2 – b, 3 – с, 4 – d; стало: 1 – b, 2 – а, 3 – d, 4 – с. Цим досягається можливість отримання у різних експериментах для однієї задачі пробних точок з відмінними координатами. Це дає змогу більш щільно дослідити простір параметрів проектування. Також зазначимо, що порядкові номери можуть обиратися не тільки проектувальником, а й призначатися за псевдовипадковою послідовністю. Якщо кількість змінних проектування значно менша від 51, то можна зсувати ряд порядкових номерів на одну чи декілька позицій, наприклад, було: 1 – а, 2 – b, 3 – с, 4 – d; стало: 2 – а, 3 – b, 4 – с, 5 – d.

Таким чином, використовуючи описані вище підходи, можна поліпшити етап *генерації початкової популяції*, досягти її урізноманітнення та збільшення у декілька (два, три чи більше) разів, що дасть змогу в перспективі знайти кінцевий результат швидше та якісніше. Наприклад, для збільшення початкової популяції у два рази та впровадження фактору випадковості, проектувальник обирає два рядки з таблиці чисельників, за якими розрахо-

вує порядкові номери змінних проектування для двох генерацій пробних точок, які об'єднуються у єдину початкову популяцію (рис. 2).

Обрання *батьківських пар* запропоновано [5] проводити за стратегією ранніксія. Ця стратегія дає змогу сформувати до $\frac{p!}{2 \cdot (p-2)!}$ пар батьків.

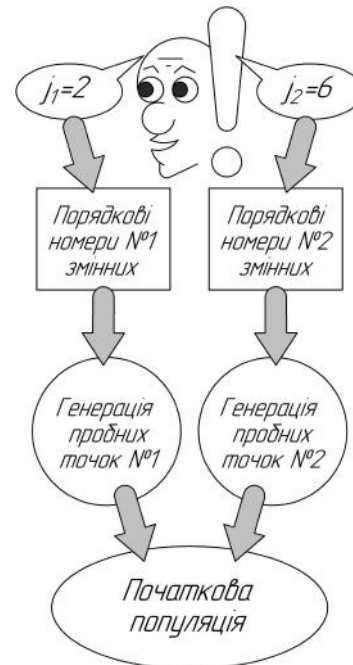


Рисунок 2 – Схема збільшення початкової популяції

Пропонується формувати пари за ЛПт-послідовністю.

Виходячи з тестових розв'язань задачі раціонального проектування, проектувальник призначає кількість партнерів, які утворюють пари з кожною особою поточної популяції.

Особинам, що гідні створити батьківські пари, призначаються порядкові номери, починаючи з 1-го.

Цей порядковий номер особи стає номером рядку таблиці чисельників (j), а обрана проектувальником кількість партнерів – кількістю пробних точок, тобто i . Якщо порядковий номер особи перевищує 51, то j для неї знов починають з 1 і так далі.

Перший та останній порядковий номер особин визначає границі інтервалу для обрання пробних точок, тобто порядкових номерів партнерів. У зв'язку з тим, що порядковий номер є дійсним натуральним числом, а на виході з ЛПт-послідовності маємо раціональне число, то пропонується до нього застосовувати процедуру математичного округлення.

Таким чином, є змога псевдовипадково обирати для кожної особи бажану проектувальником кількість партнерів за їх порядковим номером (рис. 3).

Далі розглянемо використання ЛПт-послідовності при *схрещуванні*.

Для розв'язання задачі раціонального проектування редукторів та коробок передач автори вважають доцільним використовувати наступні стратегії схрещування: багаточкове, однорідне дискретне та

проміжне схрещування [5].

Для кожної обраної батьківської пари, подібно до стратегії, що описана вище, за ЛПт-послідовністю обираємо один з методів схрещування. Це дає змогу наблизити процес формування нащадків до реального еволюційного процесу, коли домінуючий ген є завжди невизначеним, а процес носить випадковий характер. Якщо при проведенні тестових експериментів проектувальник бачить недостатність кількості нащадків, що виявляється у різкому зниженні обсягу популяції, то для збільшення та регулювання чисельності нащадків може призначатися декілька стратегій схрещування до однієї пари (рис. 4).

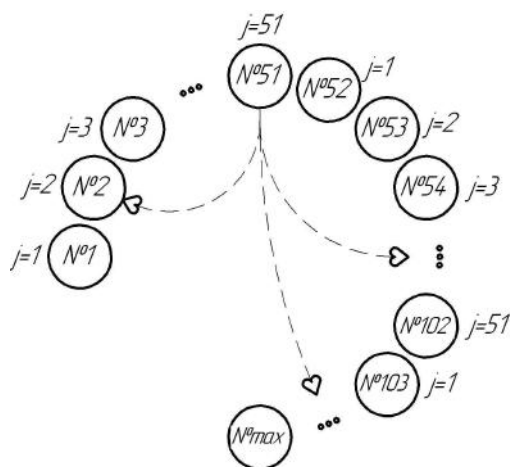


Рисунок 3 – Схема порядкових номерів особин та відповідні значення параметру j при обранні партнерів для створення батьківських пар

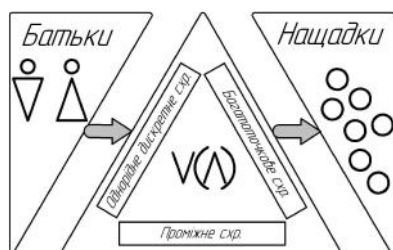


Рисунок 4 – Схема використання стратегій схрещування

У випадку багатоточкового схрещування пропонується обирати для кожної батьківської пари кількість та місця точок розриву геномів для обміну відповідними фрагментами саме за ЛПт-послідовністю. Причому, для однієї батьківської пари можливо застосовувати декілька комбінацій точок розриву, що дасть змогу збільшити популяцію нащадків і урізноманітнити їх (рис. 5).

При однорідному дискретному схрещуванні пропонується обирати за ЛПт-послідовністю для кожної батьківської пари кількість масок, що визначають кількість нащадків, та наповнення цих масок. Рекомендована кількість масок – від двох, щоб кількість нащадків не була меншою від кількості батьків (рис. 6).

Для проміжного схрещування значення гену нащадків визначається в залежності від випадкових

множників, які приймають значення від 0 до 1. Значення цих множників пропонується також обирати за ЛПт-послідовністю. Як і в попередньому випадку, рекомендована кількість масок нащадків – від двох (рис. 7).

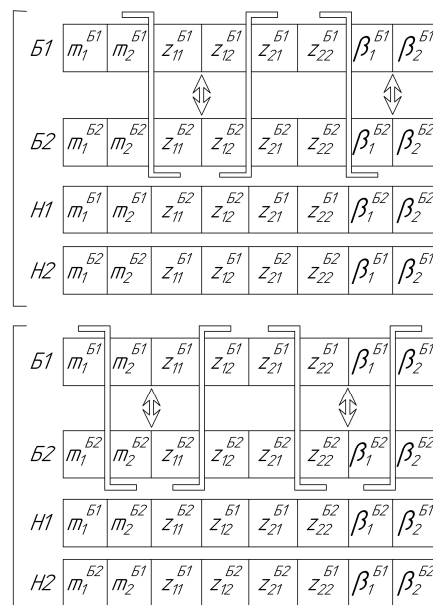


Рисунок 5 – Ілюстрація можливих варіантів при багатоточковому схрещуванні для однієї пари батьків: I – три точки; II – чотири точки

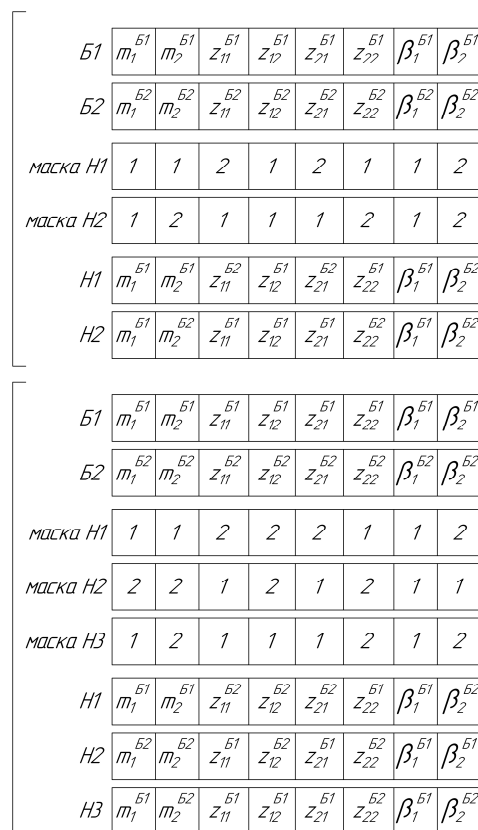


Рисунок 6 – Ілюстрація можливих варіантів для однієї пари батьків при однорідному дискретному схрещуванні: I – дві маски; II – три маски

$B1$	m_1^{B1}	m_2^{B1}	z_{11}^{B1}	z_{12}^{B1}	z_{21}^{B1}	z_{22}^{B1}	β_1^{B1}	β_2^{B1}
$B2$	m_1^{B2}	m_2^{B2}	z_{11}^{B2}	z_{12}^{B2}	z_{21}^{B2}	z_{22}^{B2}	β_1^{B2}	β_2^{B2}
маска H1	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
маска H2	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
H1	m_1^{H1}	m_2^{H1}	z_{11}^{H1}	z_{12}^{H1}	z_{21}^{H1}	z_{22}^{H1}	β_1^{H1}	β_2^{H1}
H2	m_1^{H2}	m_2^{H2}	z_{11}^{H2}	z_{12}^{H2}	z_{21}^{H2}	z_{22}^{H2}	β_1^{H2}	β_2^{H2}

Рисунок 7 – Ілюстрація проміжного схрещування з двома масками нащадків

Як вже зазначалося у [5], більш зручними є наступні оператори **мутації**: крокова та інверсія. У тематиці цієї статті розглянемо мутацію інверсія. Для розв'язання задачі раціонального проектування редукторів та коробок передач необхідно при проведенні операції мутації інверсія не сплутувати ділянки між собою і проводити інверсію локусів пари генів однієї ділянки, бо ділянки несуть окремий змістовний сенс. Для кожної особини, яка піддається дії оператора інверсії, пропонується за ЛПт-последовністю обирати пару сусідніх генів, що належать одній ділянці (рис. 8).

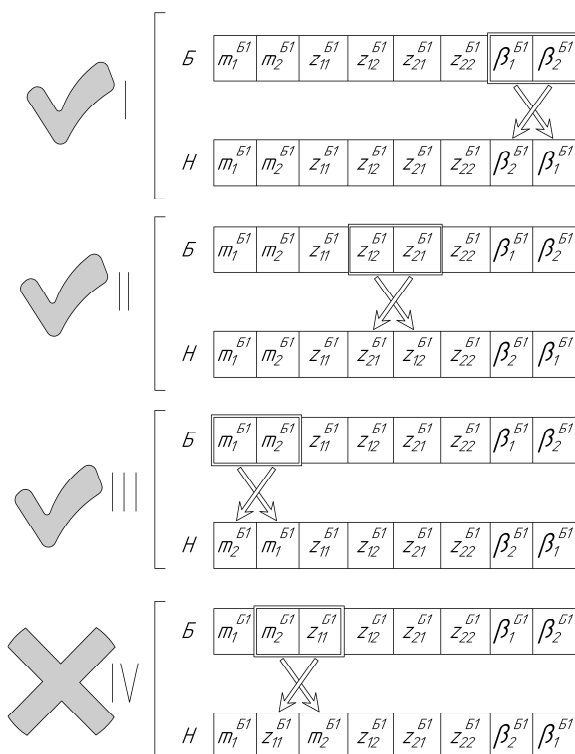


Рисунок 8 – Ілюстрація мутації інверсія:
I–III – правильні варіанти (одна ділянка);
IV – неправильний варіант (різні ділянки)

Висновки:

1. Розглянута актуальність поставленої задачі та доведена доцільність використання псевдовипадкових последовностей в еволюційних алгоритмах при раціональному проектуванні зубчастих циліндричних редукторів та коробок передач.

2. Виконано огляд основних теоретичних викладок рівномірно розподілених последовностей та ЛПт-последовностей, які дають змогу оцінити їхні можливості та проаналізувати перспективи застосування при реалізації еволюційних алгоритмів.

3. Наведені основні теоретичні викладки, що стосуються ЕА. Описано алгоритмічну схему класичного ЕА, яка наочно ілюструє його роботу та функціонування. Це дало змогу критично оцінити можливі етапи, на яких актуально використовувати ЛПт-последовності як псевдовипадковий фактор. Запропоновано віддати на розсуд псевдовипадковості наступні етапи: генерацію початкової популяції, підбір батьківських пар, схрещування та мутацію.

4. Проаналізовано «внутрішні» можливості ЛПт-последовності, а саме використовувати таблиці чисельників для отримання пробних точок з відмінними координатами у різних експериментах у межах однієї задачі. Це дає змогу більш щільно дослідити простір параметрів проектування та поліпшити етап генерації початкової популяції, досягти її урізноманітнення та збільшення у декілька разів, завдяки цьому кінцевий результат досягається швидше та якісніше.

5. Розглянуто особливості використання ЛПт-последовності при схрещуванні. Рекомендовано для кожної обраної батьківської пари обирати один з описаних методів схрещування саме за ЛПт-последовністю. Це дає змогу наблизити процес формування нащадків до реального еволюційного процесу, коли він носить випадковий характер. Розглянуто особливості та наочно проілюстровано використання ЛПт-последовностей при реалізації рекомендованих генетичних операторів схрещування для батьківських пар.

6. Розглянуто особливості та наочно проілюстровано використання ЛПт-последовностей при реалізації рекомендованого генетичного оператора мутації.

Список літератури

- Бондаренко О.В., Устиненко О.В. Оптимізації співвісних ступінчастих приводів машин по масогабаритними характеристиками на прикладі тривальних коробок. *Вісник Національного Політехнічного Інституту "Харківський Політехнічний Інститут"* : збірник наукових праць : тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". Харків: НТУ "ХПІ", 2012. №22. С. 16–27.
- Соболь И.М., Статников Р.Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. Москва: Наука, 1981. 107 с.
- Бондаренко О.В., Устиненко О.В., Серіков В.І. Раціональне проектування зубчастих циліндричних двоступінчастих редукторів з урахуванням рівня напруженості зацеплень. *Вісник Національного Політехнічного Інституту "Харківський Політехнічний Інститут"* : збірник наукових праць : тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". Харків: НТУ "ХПІ", 2015. №15. С. 23–27.
- Бондаренко О.В. Суміщення методів ЛПт-пошуку та звуження околів при оптимізації тривальних коробок передач. *Механіка та машинобудування*. Харків: НТУ "ХПІ", 2010. №1. С. 78–84.
- Бондаренко О.В., Устиненко О.В., Серіков В.І. Раціональне проектування зубчастих циліндричних двоступінчастих ре-

- дукторів з урахуванням рівня напруженості зачеплень. *Вісник Національного Політехнічного Інституту "Харківський Політехнічний Інститут" : збірник наукових праць : тематичний випуск "Машинознавство та САПР"*. Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 7(1332). С. 23–29.
- John H. Hollan. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor : University of Michigan Press, 1975. 183 p.
 - Панченко Т.В. *Генетические алгоритмы*. Астрахань: Астраханский университет, 2007. 87 с.
 - Lance Chambers *The Practical Handbook of GENETIC ALGORITHMS*. CRC Press, Inc, 1998. 592 p.
 - Goldber David E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989. 414 p.
 - Еремеев А.В. *Генетические алгоритмы и оптимизация: Учебное пособие*. – Омск : Издательство Омского государственного университета, 2008. 36с.
 - Koza J.R. *Genetic Programming*. Cambridge: The MIT Press, 1998. 609 p.
 - Mitchell M. *An Introduction to Genetic Algorithms*. – Cambridge: MIT Press, 1999. 158 p.
- References (transliterated)**
- Bondarenko O.V., Ustinenko O.V. Оптимизация спивисних ступинчистих приводів машин по масогабаритними характеристиками на прикладі тривал'них коробок. *Вісник Національного Політехнічного Інституту "Харківський Політехнічний Інститут" : збірник наукових праць : тематичний випуск "Проблеми механічного приводу"*. Kharkiv : NTU " KhPI", 2012, no. 22, pp. 16–27.
 - Sobol' I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami*. Moscow: Nauka, 1981. 107 p.
 - Bondarenko O.V., Ustinenko O.V., Serikov V.I. Racional'ne proektuvannya zubchastih cilindrichnih dvostupinchastih re-
 - дукторів з урахуванням рівня напруженості зачеплень. *Вісник Національного Політехнічного Інституту "Харківський Політехнічний Інститут" : збірник наукових праць : тематичний випуск "Проблеми механічного приводу"*. Kharkiv : NTU " KhPI", 2015, no. 15, pp. 23–27.
 - Bondarenko O.V. Cumishhennja metodiv LPt-poshuku ta zvuzhennja okoliv pri optimizacii trival'nih korobok peredach. *Mehanika ta mashinobuduvannja*. Kharkiv : NTU " KhPI", 2010, no. 1, pp. 78–84.
 - Bondarenko O.V., Ustinenko O.V., Serikov V.I. Racional'ne proektuvannya zubchasty'x cy'lindry'chny'x dvostupinchasty'x reduktoriv z uraxuvannyam rivnya napruzhenosti zacheplen'. *Вісник Національного Політехнічного Інституту "Харківський Політехнічний Інститут" : збірник наукових праць : тематичний випуск "Mashynoznavstvo ta SAPR"*. Kharkiv : NTU " KhPI", 2019, no. 7(1332), pp. 23–29.
 - John H. Hollan. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor : University of Michigan Press, 1975. P. 183.
 - Panchenko T.V. *Geneticheskie algoritmy*. Astrahan: Astrahanskij universitet, 2007. 87 p.
 - Lance Chambers *The Practical Handbook of GENETIC ALGORITHMS / Lance Chambers*. CRC Press, Inc, 1998. 592 p.
 - Goldber, David E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989. 414 p.
 - Eremeev A.V. *Geneticheskie algoritmy i optimizaciya: Uchebnoe posobie*. – Омск: Izdatel'stvo Omskogo gosudarstvennogo universiteta, 2008. 36 p.
 - Koza J.R. *Genetic Programming*. Cambridge: The MIT Press, 1998. 609 p.
 - Mitchell M. *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge: MIT Press, 1999. 158 p.

Надійшло (received) 05.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бондаренко Олексій Вікторович (Бондаренко Алексей Викторович, Bondarenko Olexiy) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри ТММ і САПР; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2693-5301>; тел.: (067) 189-97-00; e-mail: avbondko@gmail.com.

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