

емых при холодной, в том числе и высокоскоростной прокатке относительно тонких лент и полос. Показана целесообразность замены дорогостоящих растительных технологических смазок на более экономичные

синтетические, выявлены диапазоны рационального содержания присадок синтетически жирных спиртов в смазке ЭК-7 соответствующее 1...3 (%).

Литература

1. Капланов В. И. Динамика и трибоника высокоскоростной тонколистовой прокатки. Мировая тенденция и перспектива : монография / В. И. Капланов. – Мариуполь : Изд-во «Рената», 2008. – 456 с.
2. Грудев А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением : справ.изд. / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.
3. Белосевич В. К. Трение, смазка, теплообмен при холодной прокатке листовой стали / В. К. Белосевич. – М. : Металлургия, 1989. – 256 с.
4. Капланов В. И. Высокоскоростная холодная прокатка тонких полос / В. И. Капланов. – К. :Вища школа, 1993. – 254 с.
5. Грудев А. П. Технологические смазки в прокатном производстве /А. П. Грудев, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1975. – 368 с.

*Запропоновано узагальнений генетичний алгоритм формування опорних точок програмних траєкторій для вирішення задачі обходу перепон при синтезі руху робочих органів промислових роботів. Запропоновано функцію пристосування генетичного алгоритму, що враховує динаміку переміщення маніпуляційної системи промислових роботів*

*Ключові слова: програмна траєкторія, генетичний алгоритм, конфігурація*

---

*Предложен обобщенный генетический алгоритм формирования опорных точек программных траекторий для решения задачи обхода препятствий при синтезе движения рабочих органов промышленных роботов. Предложена функция приспособления генетического алгоритма, учитывающая динамику перемещения манипуляционной системы промышленных роботов*

*Ключевые слова: программная траектория, генетический алгоритм, конфигурация*

---

*The general genetic algorithm of program trajectory key points for obstacles avoiding task is considered in this paper. The dynamics of industrial robots manipulation system movements is allow for the adaptation and fitness functions which include the dynamics of industrial robots manipulation system movements*

*Key words: program trajectory, genetic algorithm, configuration*

УДК 621.865.8

# КОРЕГУВАННЯ ПРОГРАМНИХ ТРАЄКТОРІЙ РУХУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ ПРИ ОБХОДІ ПЕРЕПОН

**В. А. Кирилович**  
Асистент\*

Контактний телефон (моб.) (050) 440-77-09  
E-mail: bmart@yandex.ru

**М. В. Богдановський**  
Кандидат технічних наук, доцент

\*Кафедра Автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій  
Житомирський державний технологічний університет  
Контактний телефон (моб.) 385-96-27  
E-mail: kiril\_v@mail.ru

Вступ

Планування програмних траєкторій руху робочих органів маніпуляційної системи промислових роботів (РО МС ПР) в просторі узагальнених координат (конфігураційному просторі) пов'язано із вирішенням задач просторово-часового спряження опорних точок траєкторій, "прив'язаних" до зон обслуговування ос-

новного та допоміжного технологічного обладнання (ТО) із забезпеченням геометричної, кінематичної та динамічної сумісності переміщення РО [1, 2, 3, 4].

Відповідно до відомої методики автоматизованого планування програмного руху [5,6] процес планування розбито на декілька етапів, основними серед яких є формування вихідних конфігурацій МС ПР в зонах обслуговування ТО, планування програмного

руху з урахуванням динаміки МС ПР без урахування можливості зіткнень (колізій) з елементами конструкції одиниць ТО, коригування окремих ділянок програмних траєкторій у випадку наявності колізій першого та другого роду [6,7] та формування циклової траєкторії руху РО МС ПР. Вказана послідовність етапів із урахуванням загальної постановки зазначеної вище задачі планування та прийнятих формалізованих описів (ФО) одиниць ТО і об'єктів маніпулювання (ОМ) [6,7] покликана зменшити трудомісткість та збільшити швидкодійу її вирішення за рахунок процедури корекції програмних траєкторій лише за потреби у випадку колізії елементів конструкції одиниць ТО та ОМ. З іншого боку, коригування за потреби, а саме окремих ділянок програмних траєкторій при зазначеній послідовності етапів планування необхідно виконувати в такий спосіб, щоб забезпечити збереження динамічних характеристик руху РО МС ПР, визначених на попередньому етапі планування.

Для формування множини конфігурацій у процесі корекції ділянок траєкторій в області колізій елементів конструкції ТО та ОМ використовується генетичний алгоритм (ГА) [6]. Для надання процедурі формування більш спрямованого характеру пропонується модифікація функції пристосування ГА шляхом урахування метричної відстані між елементами конструкції ТО та ОМ [7].

#### Стан проблеми

Традиційні методи багатовимірної оптимізації є методами локального пошуку, які суттєво залежать від вибору початкових умов пошуку та накладають додаткові обмеження на властивості цільової функції оптимізації [8, 9, 10]. Їх застосування для знаходження глобального оптимуму цільової функції в багатовимірному просторі керованих координат, яким є конфігураційний простір МС ПР, ускладнюється через кінематичні та динамічні залежності, які накладаються на узагальнені координати МС ПР, а також нелінійні обмеження, що визначаються умовами безперешкодного руху РО при досягненні наступної опорної точки траєкторії. Для вирішення оптимізаційних задач, що виникають у процесі синтезу ділянок програмних траєкторій переміщення РО ПР, доцільним є використання генетичних методів, покликаних вирішити вище зазначені проблеми, які є методами еволюційного пошуку й поєднують комп'ютерні методи моделювання генетичних процесів у природних і штучних системах.

ГА, який використовується для формування множини конфігурацій в області колізій, має класичну структуру, що передбачає: створення вихідної популяції особин, в якості яких виступають випадкові набори векторів узагальнених координат ланок МС ПР; виконання відбору, заснованому на перевірці пристосованості кожної особини за умов відсутності колізій та мінімуму часу спряження опорних точок новоутворених ділянок траєкторій; виконання селекції за методом рулетки; виконання схрещування за методом односточкового кросовера; застосування мутацій з вірогідністю, меншою за 1%, що полягає у випадковій зміні одного з генів (узагальненої координати) особин з

метою подолання виродженого характеру формування рішень (популяції) у процесі оптимізації [6].

Необхідність перевірки геометричної та кінематичної придатності проміжних конфігурацій при формуванні ділянок траєкторій в областях колізій, заснованої на оцінці метричної відстані [7], та урахування динамічних параметрів переміщення МС ПР визначили мету даної роботи, що є наступною: Запропонувати структуру та функцію пристосування ГА формування опорних точок програмних траєкторій, для підвищення ефективності процесу синтезу руху РО ПР за рахунок оцінки метричної відстані між елементами конструкції технологічного обладнання та динаміки МС ПР при обході перепон.

#### Виклад основної частини

Узагальнено поставлене завдання даної роботи може бути зведене до наступного: якщо між двома конфігураціями МС ПР, заданими векторами узагальнених координат, що відповідають послідовно розташованим опорним точкам попередньо спланованої програмної траєкторії, існує перешкода (зона заборони), необхідно визначити додаткові опорні точки локальної ділянки траєкторії для безперешкодного їх спряження, забезпечивши при цьому найкращі динамічні характеристики руху МС ПР.

*Ініціалізація та запуск генетичного пошуку.* При реалізації ГА необхідно [8,9,10]:

- визначити параметри, що оптимізуються, залежно від вирішуваної задачі, вибрати спосіб кодування (представлення інформації в хромосомі) параметрів, що оптимізуються;
- задати цільову функцію;
- визначити правила ініціалізації початкової популяції;
- вибрати оператори відбору, схрещування і мутації, а також задати їх параметри;
- визначити критерії зупинки.

*Визначення та кодування параметрів, що оптимізуються.* Будь-який організм може бути поданий своїм фенотипом, який фактично визначає, чим є об'єкт в реальному світі, і генотипом, який містить всю інформацію про об'єкт на рівні хромосомного набору. Для задачі планування програмних траєкторій фенотипом є конфігурація МС ПР у заданий момент часу, а генотипом – узагальнені координати ланок МС ПР. Структура вхідної інформації для роботи ГА наведена на рис. 1.

Кожен ген як елемент інформації генотипу має своє відображення у фенотипі. Для використання ГА необхідно подати кожному ознаку (атрибут, вхідну змінну, параметр) об'єкту у певному закодованому вигляді. Подальше функціонування механізмів генетичного пошуку проводиться на рівні генотипу, не потребує інформації про внутрішню структуру об'єкту і обумовлює широке застосування генетичного пошуку в різних задачах, зокрема, у задачі синтезу локальних ділянок програмних траєкторій РО МС ПР.

Для вирішення задачі корегування ділянок траєкторій значення узагальнених координат ланок ПР представляються у бінарному коді, формуючи хромосоми [8,9].

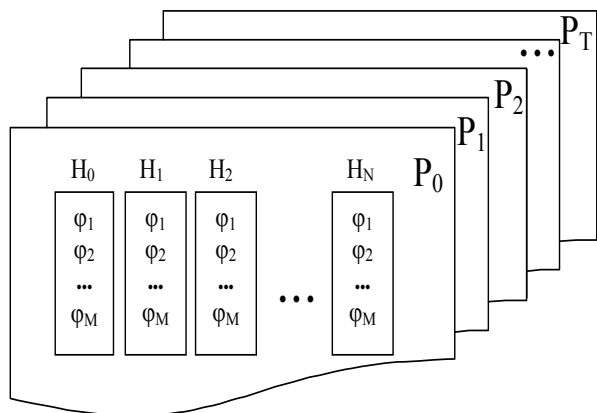


Рис. 1. Структура вхідної інформації для роботи ГА:  $\phi_M$  – ген (узагальнені координати ланки ПР);  $M$  – кількість генів у хромосомі (кількість узагальнених координат);  $N$  – хромосома (конфігурація МС ПР);  $N_N$  – кількість хромосом (кількість конфігурацій);  $P_T$  – покоління, що складається із  $N$  особин (набір конфігурацій на  $T$ -ій ітерації роботи ГА);  $T$  – кількість поколінь.

Процес кодування параметрів, що оптимізуються, відбувається за наступні 3 кроки:

1. Визначаються керовані параметри – гени. Для задач оптимізації функції за використанням ГА доцільно обрати в якості генів незалежні змінні, якими є узагальнені координати МС ПР.

2. Визначається число розрядів в кожному гені. Для визначення числа розрядів приймаємо максимальні безрозмірні числові значення узагальнених координат, що підлягають кодуванню: для кінематичних пар кутового переміщення: 360 із кроком переміщення 1; для кінематичних пар лінійного переміщення: 500, що буде відповідати похибці визначення положення ланок лінійного переміщення у 0,8% від максимально можливого переміщення ланок.

Кількість розрядів  $r$  в гені для кодування ознаки визначається за формулою [10]:

$$r = \text{ceil} \left( \log_2 \frac{w_{\max} - w_{\min}}{\epsilon} \right) \quad (1)$$

де  $\text{ceil}(x)$  – функція, що визначає найближче більше або рівне  $x$  ціле число;

$w_{\max}$  та  $w_{\min}$  – максимально і мінімально можливі значення кодуваної ознаки (параметра, незалежної змінної);

$\epsilon$  – задана похибка, що допускається при кодуванні ознаки.

Таким чином, для кодування значень узагальнених координат знадобиться 8 біт інформації, кожен ген буде описуватись 8-розрядним бінарним числом.

3. Обирається метод кодування. При визначенні структури хромосоми в роботі за основу було прийнято фенотипічну ознаку МС ПР – вектор узагальнених координат. Враховуючи, що для більшості маніпуляційних операцій, кількість ступенів рухомості МС ПР не перевищує 6 та виходячи із загальних рекомендацій щодо довжини хромосоми [9,10], хромосома являє собою бінарну послідовність, отриману з генів сталої розрядності. Тоді розрядність хромосоми  $L$  визначиться наступним чином:

$$L = p \cdot r = p \cdot 8 \quad (2)$$

де  $p$  – кількість узагальнених координат МС ПР, що розглядається.

Для кодування інформації у хромосомі використовується код Грея. Перевага застосування коду Грея полягає в тому, що одиничній різниці числових значень керованих параметрів у прийнятій системі вимірювань відповідає зміна лише одного біта при представленні цих чисел у код Грея. Кодування та декодування із бінарного коду в код Грея здійснюється шляхом копіювання старшого розряду кодуваного числа в старший розряд декодуваного та застосовується операція додавання по модулю 2 (XOR) над окремими розрядами за використанням наступних виразів [10]:

$$\begin{aligned} G[i] &= \text{XOR}(B[i+1], B[i]); \\ B[i] &= \text{XOR}(G[i+1], G[i]), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $G[i]$  –  $i$ -ий розряд коду Грея;  
 $B[i]$  –  $i$ -ий розряд бінарного коду.

Для оцінки ступеню придатності новоутворених конфігурацій відповідно до поставленої мети даної роботи виконується обчислення цільової функції для кожної хромосоми поточної популяції. Вигляд цільової функції визначається в першу чергу змістом самої задачі, для розв'язання якої використовується генетичний пошук. Для розв'язання задачі корекції ділянок програмних траєкторій переміщення РО МС ПР цільова функція має наступний загальний вигляд:

$$O = f(D_z, T) \quad (4)$$

де  $D_z$  – параметр, який характеризує метричну відстань між МС ПР та ТО [7], що слугує для виявлення колізій;

$T$  – параметр, що характеризує сумарний момент (силу), що створюється приводами МС ПР [11].

Функція  $O$  повинна бути однозначною та мати пологий рельєф, щоб її мінімальна чи максимальна оцінка дозволяла отримати сукупність проміжних рішень на наступній ітерації пошуку.

За даних умов, структура кожного параметра, що входить до складу цільової функції  $O$  (4), визначається з наступних міркувань. Параметр  $D_z$  виражає метричну відстань між елементами конструкції ТО, до складу якого входить ПР. При генерації сукупності векторів узагальнених координат в області колізії для корекції, притримуючись принципу найменшого відхилення від попередньо спланованої програмної траєкторії, необхідно забезпечити обхід перепон в такий спосіб, щоб метрична відстань від МС ПР до оточуючого його ТО була мінімальною. Таким чином, складова функції пристосування особин (4) за параметром метричної відстані може бути оцінена наступним чином:

$$D_z = \frac{(d_z)_i}{(d_z)_{\max}} \quad (5)$$

де  $(d_z)_i$  – значення метричної відстані між ПР та ТО для  $i$ -ої хромосоми;

$(d_z)_{\max}$  – максимальне значення метричної відстані між ПР та ТО, обране із всіх хромосом даної популяції.

Вираз (5) прийматиме нормованих значення на проміжку [0...1].

Параметр Т безрозмірно виражає сукупні зусилля, які необхідно прикласти для забезпечення руху РО МС ПР вздовж заданої програмної траєкторії. За наявності перепонов при корекції ділянок попередньо спланованих програмних траєкторій зміна даного параметру може відбуватися лише в бік зростання його числових значень у зв'язку з появою додаткових зовнішніх сил корегування. Слідуючи принципу найменшого відхилення від попередньо визначених значень τ, оцінку придатності осіб за даним параметром можна визначити наступним чином:

$$T = \frac{\tau_i^{CK} - \tau_i^0}{\tau_i^0} \quad (6)$$

де τ<sub>i</sub><sup>0</sup> – значення сумарного моменту (сили), що створюється приводами зчленувань МС ПР для конфігурації в і-ій точці траєкторії до корекції;

τ<sub>i</sub><sup>А</sup> – значення сумарного моменту (сили), що

створюється приводами зчленувань ПР для конфігурації і-ої точки скорегованої траєкторії. Отриманий вираз приймає додатні значення.

На підставі виразів (5-6) конкретний вигляд цільової функції, що визначає пристосованість особин, наступний:

$$O = \min \left( \frac{(d_z)_i}{(d_z)_{max}} + \frac{\tau_i^{CK} - \tau_i^0}{\tau_i^0} \right) \quad (7)$$

В процесі генетичного пошуку може виникнути ситуація значного розкиду значень цільової функції хромосом популяції, що призводить до надмірного зменшення ймовірності відбору більшості хромосом для схрещування.

Для подолання цієї проблеми необхідно привести значення цільової функції хромосом в популяції до єдиного порядку. Для цього цільова функція О відображається у фітнес-функцію fс шляхом перерахунку її значень для кожної хромосоми. Фітнес-функція повинна відповідати наступним вимогам [10]:

- адекватно відображати простір керованих параметрів у процесі пошуку рішення;
- не містити ділянок типу “плато” (не повинна мати однакові значення в певній області);
- не повинна бути занадто “гострою” (проблема “вузького горла”);
- бути якомога більш простою з точки зору обчислювальних витрат;
- мати мінімальну кількість локальних екстремумів.

З огляду на зазначені вимоги та прийнятний вигляд цільової функції (7) фітнес-функцію можна визначити наступним чином:

$$f_c(H_i) = O(H_i) - O_{min} \quad (8)$$

де O(H<sub>i</sub>) – значення цільової функції і-тої хромосоми (конфігурації);

O<sub>min</sub> – найменше значення цільової функції (7).

Чим меншою є величина fс(H<sub>i</sub>), тим хромосома H<sub>i</sub> вважається більш пристосованою.

**Ініціалізація.** Робота ГА починається з ініціалізації, тобто формування початкової популяції P<sub>0</sub> – скінченного набору допустимих рішень задачі: P<sub>0</sub> = {H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, ..., H<sub>N</sub>};

де N – розмір популяції; H<sub>n</sub> = {h<sub>1n</sub>, h<sub>2n</sub>, ..., h<sub>Mn</sub>} – n-та хромосома, що складається з M генів; h<sub>mn</sub> – значення m-го гену n-ої хромосоми, w<sub>min,m</sub> ≤ h<sub>mn</sub> ≤ w<sub>max,m</sub>; w<sub>min,m</sub> та w<sub>max,m</sub> – мінімальне й максимальне значення і-го параметру у вирішуваний за допомогою генетичного методу задачі.

Формування вихідної популяції для генетичного пошуку для коригування програмної траєкторії пропонується виконувати шляхом випадкової генерації значень узагальнених координат в межах обмежень на їх значення, обумовлених конструктивними властивостями кінематичних пар ланок МС ПР.

**Генетичні оператори. Відбір.** Оператор відбору (селекції) є механізмом, на основі якого відбувається вибір хромосом для застосування до них того або іншого еволюційного оператора, а також для формування нової популяції. Для поставленої задачі оператор відбору використовується для вибору хромосом-батьків для схрещування. При цьому хромосоми вибираються на основі значення цільової функції так, щоб з ненульовою ймовірністю будь-який елемент популяції міг би бути вибраний як один з батьків для схрещування.

Серед найбільш поширених операторів відбору було обрано пропорційний відбір, що реалізується методом рулетки з умов простоти реалізації та невеликих обчислювальних витрат з огляду на складний характер функції пристосування [8,9,10]. Пропорційний відбір реалізується наступною реалізацією кроків:

1. Обчислення значення фітнес-функції кожної особини f<sub>n</sub>;
2. Визначення середнього арифметичного значення фітнес-функції f<sub>cp</sub> популяції всіх N особин:

$$f_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n \quad (9)$$

3. Обчислення для кожної особини наступного відношення:

$$P_s(n) = \frac{f_n}{f_{cp}} \quad (10)$$

4. В залежності від величини P<sub>s</sub>(n) формування масиви особин, допущених до схрещування.

Простий пропорційний відбір – рулетка – відбирає особини за допомогою N запусків рулетки. Колесо рулетки містить по одному сектору для кожного особи популяції. Розмір n-го сектора пропорційний величині P<sub>s</sub>(n). Особина одержує нащадків, якщо випадково згенероване число в межах від 0 до 2π потрапляє в сектор, що відповідає цій особині. При такому відборі члени популяції з вищою пристосованістю з більшою ймовірністю частіше вибиратимуться, ніж особини з низькою пристосованістю.

При реалізації відбору рулеткою доцільно замінити колесо рулетки інтервалом [0...1] у зв'язку з тим, що в такому разі немає необхідності обчислювати ширину кожного сектора. Кожній особині відповідає напівінтервал [x<sub>n-1</sub>, x<sub>n</sub>], де x<sub>n-1</sub> – x<sub>n</sub> = P<sub>s</sub>(n), x<sub>0</sub>=0, x<sub>N</sub>=1. До схрещування допускається особина з номером n, де n: x<sub>rnd</sub> ∈ [x<sub>n-1</sub>, x<sub>n</sub>], а число x<sub>rnd</sub> генерується кожного разу випадковою функцією з рівномірним розподілом щільності ймовірності на відрізьку [0..1].

**Схрещування.** У теорії еволюції важливу роль відіграє те, яким чином ознаки батьків передаються нащадкам. У генетичних методах за передачу ознак батьків нащадкам відповідає оператор схрещування (кросовер). Цей оператор моделює процес схрещування особин і визначає передачу ознак батьків нащадкам.

Метою оператора схрещування є породження з наявної множини рішень нового, в якому кожна хромосома буде нащадком деяких двох елементів попередньої популяції, тобто нести в собі частково інформацію кожного батька. Допускається ситуація, коли обидва батьків подані одним і тим же елементом популяції.

Вибираючи кожного разу для схрещування найбільш пристосовані особини, можна з певним ступенем впевненості стверджувати, що нащадки будуть або не набагато гірші, ніж батьки, або кращі за них. Серед найбільш розповсюджених операторів схрещування, виходячи з умов вирішуваної задачі та простоти реалізації, було обрано одноточковий кросовер, який реалізується шляхом розбиття на 2 частини обраної пари хромосом із наступним обміном однією із частин між собою [10].

**Мутація.** В роботі пропонується проста мутація. Суть її полягає у зміні значення випадково обраного гену. Алгоритм простої мутації для бінарних і гомологічних числових хромосом передбачає наступні дії [10]:

1. копіюється батьківська хромосома в хромосому-нащадка;
2. із заданою ймовірністю вибирається випадковим чином ген, що мутує;
3. виконується зміна значення гена (одиниці на нуль чи навпаки).

**Формування нового покоління.** Після схрещування і мутації необхідно створити нову популяцію. Види операторів формування нового покоління (репродукції) практично співпадають з видами операторів відбору батьків, що передбачають формування проміжного масиву особин, допущених до схрещування.

Необхідно визначити, які з нових особин увійдуть до наступного покоління, а які – ні. У зв'язку з недоліком способу, за якого нащадки займають місце своїх батьків (можливість втрати найбільш пристосованої особини попереднього покоління) в даній роботі пропонується використовувати принцип елітизму, який полягає в тому, що хромосоми з найбільшою пристосованістю гарантовано переходять в нову популяцію. Кількість елітних особин  $k_e$ , які гарантовано перейдуть в наступну популяцію, може бути обчислена наступним чином [10]:

$$k_e = (1 - S_0) \cdot N \quad (11)$$

де  $S_0$  – ступінь оновлення популяції, що знаходиться в інтервалі  $[0,95; 1,0]$ .

Використання принципу елітизму зазвичай дозволяє прискорити збіжність генетичного пошуку. Недолік використання даної стратегії полягає в тому, що підвищується ймовірність попадання методу в локальний оптимум.

**Критерій зупинення.** Очевидно, що еволюція – нескінченний процес, в ході якого пристосованість особин поступово підвищується. Примусово зупинивши цей процес через достатньо довгий час після його початку і вибравши найбільш пристосовану особину в поточному поколінні, можна одержати не абсолютну точне, але близьке до оптимального рішення задачі. Як правило, як критерій зупинення застосовується обмеження на максимальну кількість ітерацій застосування операторів методу (обмеження на кількість поколінь). Зупинка роботи ГА може також виконуватись шляхом визначення різниці оцінок функції пристосування особин попереднього та наступного поколінь, але даний метод зупинки застосовується при розв'язанні специфічних задач, функція пристосування яких має зазвичай просту та алгебраїчну форму представлення та можливо надати адекватну оцінку спрямованості процесу пошуку. З огляду на складний характер функції пристосування та необхідність генерації цілого сімейства розв'язків з метою вирішення наступних задач планування програмних траєкторій, в якості критерію зупинки в даній роботі обрано кількість ітерацій  $T$ , конкретне значення якому буде надано після постановки та проведення чисельних експериментів над ГА.

На основі попередньо викладеного матеріалу було розроблено узагальнений ГА, що використовується для корекції локальних ділянок програмних траєкторій РО МС ПР, представлений на рис. 2.

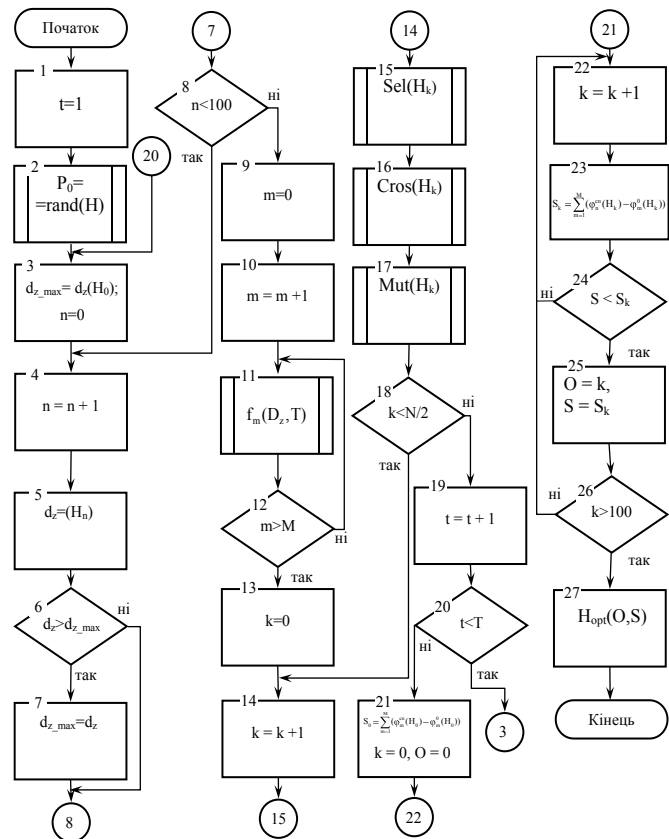


Рис. 2. Блок-схема узагальненого ГА формування опорних точок програмних траєкторії РО МС ПР

Сутність роботи розробленого ГА полягає у наступному. Для кожного дискретного інтервалу часу в області колізії при синтезі опорної точки траєкторії формується випадковим чином вихідна популяція (блок 2) загальною кількістю 100 особин. Для кожної особини вихідної популяції визначається метрична відстань, знаходиться найбільша з них (блок 3 – 8) та визначається функція пристосування (блок 9 – 12). Виконується відбір, схрещування та мутація хромосом (блоки 15,16,17 відповідно), формуючи наступне покоління.

При виконанні умови завершення еволюції (блок 20) якою є досягнення 100 поколінь ( $T = 100$ ), визначається кінцевий варіант скоректованої траєкторії, для якої сума різниць  $S$  узагальнених координат МС ПР попередньо визначених конфігурації та тих, що були отримані під час корекції програмної траєкторії є мінімальною (12):

$$S = \sum_{m=1}^M (\varphi_m^{\text{СП}}(H_k) - \varphi_m^0(H_k)) \quad (12)$$

де  $\varphi_m^{\text{СП}}(H_k)$  та  $\varphi_m^0(H_k)$  –  $m$ -ий ген  $k$ -ої спланованої

та  $k$ -ої спланованої та базової хромосоми відповідно.

Оцінка  $S$  забезпечує вибір розв'язку, який не містить в собі вироджених конфігурацій у будь-який момент часу, формуючи сімейство особин (блок 27) – векторів узагальнених координат, що є розв'язком вирішуваної задачі.

---

#### Висновки та напрямки подальших досліджень

---

Результатом проведеної роботи є узагальнений ГА формування опорних точок локальних траєкторії в області колізій елементів конструкцій ТО, що враховує динаміку руху РО МС ПР. Напрямами подальших досліджень є розробка алгоритму дискретизації конфігураційного простору МС ПР з метою підвищення ефективності процесу синтезу програмних траєкторій,

---

#### Література

1. Костюк В.И. Промышленные роботы: Конструирование, управление, эксплуатация / В.И. Костюк, А.П. Гавриш, Л.С. Ямпольский, А.Г. Карлов. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1985. – 359 с.
2. Кобринский А.А. Манипуляционные системы роботов: Основы устройства, элементы теории / А.А. Кобринский, А.Е. Кобринский. – М.: Наука, 1988. – 344 с.
3. Зенкевич С.Л. Управление роботами. Основы управления манипуляционными роботами: Учеб. для вузов / С.Л. Зенкевич, А.С. Ющенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 400с.
4. Тимофеев А.В. Управление роботами: Учеб. пособие / А.В. Тимофеев. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1986. – 240 с.
5. Kyrylovich V. Zagadnienia zautomatyzowanego planowania ruchow robotow przemyslowych w elastycznych systemach montazowych / V. Kyrylovich, M. Bogdanovskiy // Technologia i automatyzacja montazu. Kwartalnik naukowo-techniczny. – Poland, Warsaw – NR 1/2009. – P. 18 – 23.
6. Методика автоматизованого кінематичного формування програмних траєкторій переміщення схвату промислового робота при синтезі роботизованих механоскладальних технологій / М.В. Богдановський, В.А. Кирилович, Н.А. Ковбаса, Т.Е. Нужда // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – 2004. – №4(31). – С. 92 – 101.
7. Визначення метричної відстані між одиницями технологічного обладнання механообробних гнучких виробничих комірок при плануванні програмних траєкторій промислових роботів / М.В. Богдановський, А.В. Євгенєв, В.А. Кирилович, В.В. Чухов // Технологічні комплекси. – Луцьк. – 2011. № – 1(3). – С.23 – 31
8. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев. – Х.: Основа, 1997. – 112с.
9. Еремеев А. В. Генетические алгоритмы и оптимизация: учеб. пособие для вузов / А. В. Еремеев; Ом. гос. ун-т им. Ф. М. Достоевского. - Омск: Изд-во ОмГУ, 2008. – 47 с.
10. Субботін С. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія / А. О. Олійник, О. О. Олійник. Під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375 с.
11. Фу К. Робототехника / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624с.