

**М.В. Богдановський, аспір.  
В.А. Кирилович, к.т.н., доц.  
М.О. Ковбаса, магістр  
Т.Є. Нужда, магістр**

*Житомирський державний технологічний університет*

## **МЕТОДИКА АВТОМАТИЗОВАНОГО КІНЕМАТИЧНОГО ФОРМУВАННЯ ПРОГРАМНИХ ТРАЕКТОРІЙ ПЕРЕМІЩЕННЯ СХВАТА ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ ПРИ СИНТЕЗІ РОБОТИЗОВАНИХ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

*Представлена методика автоматизованого кінематичного синтезу програмних траєкторій для механоскладальних технологічних процесів. Відзначені основні проблеми, що виникають при побудові програмної траєкторії, та необхідність їх вирішення при плануванні роботизованих технологічних комплексів. Описано склад та загальний зміст вирішуваних задач відповідно до запропонованої методики, а також відмічено перспективність подальшого її розвитку.*

**Постановка проблеми** Особливістю роботизованого механоскладального виробництва є необхідність обслуговування ПР певної кількості одиниць технологічного обладнання (ТО). При цьому ПР повинен забезпечувати формування необхідного кінематичного стану маніпуляційної системи (МС) або їх сукупності в робочих зонах ТО, обумовлених властивостями досяжності та маніпулятивності, та мати можливість переходу поміж ними. Зважаючи на характер процесу обслуговування, із технологічної точки зору, можливою метою управління ПР є спряження станів МС в такий спосіб, щоб забезпечити безперервність його роботи та максимально зменшити часові втрати в роботі РТК, що обумовлені функціонуванням ПР. При досягненні цієї мети зазвичай виділяються етапи побудови програмного руху у вигляді програмної траєкторії (ПР) переміщення виконавчих механізмів ПР та формування керуючих впливів до приводів ПР.

Побудова ПТ при механоскладальному процесі може бути реалізована людиною-оператором, що методом навчання відтворює у ПР необхідні стани МС у вузлових точках траєкторії та необхідні переходи поміж ними. Це вимагає певного її досвіду, і практично отримана ПТ не є найкращою, а тим більше оптимальною, для конкретного технологічного процесу (ТП). У зв'язку із цим більш досконалими є методи автоматизованого формування ПТ, що дають можливість оптимально щодо заданого критерію її генерувати. Вирішення задачі планування ПТ в повному обсязі із урахуванням кінематичних та динамічних властивостей ПР та навколишнього середовища є досить складною задачею, що залежить від багатьох чинників, таких як параметри та характеристики системи управління ПР, наявність чи відсутність засобів відчуття оточення, вид загальної системи управління РТК тощо.

З врахуванням викладеного вище, значний інтерес представляє кінематичний синтез ПТ переміщення ПР. Під кінематичним синтезом ПТ будемо розуміти побудову ПТ поміж вузловими її точками із зазначеною орієнтацією РО в них з урахуванням обмежень на положення ланок МС ПР та перешкод, а також обмеження на швидкість зміни положення окремих ланок МС. Результати синтезу дають змогу судити про принципову можливість реалізації заданого технологічного маршруту та оцінити його кількісні та якісні показники, якими можуть бути тривалість ПТ та складність реалізації отриманої ПТ, які необхідні при проектуванні РТК та роботизованих технологій, що реалізуються на них.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд відомих методів планування траєкторії, що забезпечують необхідний рух робочого органу ПР і відповідають синтезу управління ПР на тактичному рівні, дозволяє відмітити відсутність серед них таких, що мали б необхідну сукупність властивостей до автоматизованого вирішення, а саме: повнота вирішення зворотних задач кінематики, врахування кінематичних обмежень та перешкод, пошук рішення щодо виходу з „тупикових” ситуацій, які при цьому виникають, оптимізацію планування траєкторій, достатню спрощеність моделі вирішення для можливості залучення сучасних алгоритмізованих методів, що широко використовуються в обчислювальній техніці. Більшість відомих методів планування ПТ ґрунтуються на пошуку параметрів вектора управління, який переводить МС із початкового стану у кінцевий на основі лінеаризованих рівнянь, що описують її поведінку при малих змінах координат механізму. При розв'язанні цих рівнянь виявляється достатньо складним врахування при цьому обмежень на значення узагальнених координат, обумовлених конструктивними особливостями та обмеженнями робочого простору ПР [12], [18]. Планування ПТ може відбуватись у декартовому просторі чи просторі узагальнених координат [5], [8], [9]. У першому випадку планування відбувається за положенням РО ПР шляхом інтерполяції її поміж вузловими точками на дискретному робочому просторі, що умовно формує сітку. Методи опису

прямолінійного руху між послідовними вузловими точками представлені в роботах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 16]. В залежності від наявної системи керування ПР отримана в такий спосіб траєкторія може бути реалізована автоматично за розгалуженням між поточним та заданим положеннями захватного пристрою в декартовому просторі, або бути переведена в простір узагальнених координат шляхом її апроксимації поліномами низького степеня з наступною реалізацією по розгалуженню приєднаних змінних. Такий підхід є достатньо трудомістким, чисельно збитковим та тривалим, особливо при реалізації управління. Більш природнім є планування ПТ в системі узагальнених координат. Цей підхід забезпечує менші (порівняно з першим) обчислювальні затрати, але отримане в результаті лінеаризоване управління потребує подальшої динамічної стабілізації.

**Постановка завдання.** Метою даної статті є ілюстрація основних етапів запропонованої методики автоматизованого синтезу ПТ захватного пристрою із урахуванням кінематичного аспекту.

Зазначимо основні положення, які підлягають вирішенню в надалі запропонованій методиці планування ПТ, згідно з власною постановкою задачі:

- планування траєкторії відбувається в просторі узагальнених координат як найбільш прийнятний спосіб до автоматизованого її формування в умовах роботизованого механоскладального виробництва;
- критерієм пошуку найкращої траєкторії є найменший час переміщення РО ПР між точками підходу до робочих зон ТО. При цьому додаткові встановлювальні та інші сервісні рухи в робочій зоні не розглядаються, оскільки вони визначаються конструктивними особливостями пристосувань ТО та затискних пристроїв ПР і є незначними складовими при розрахунку тривалості циклу роботи РТК;
- реалізація траєкторії виконується одночасним відпрацюванням ступенів рухомості ПР за умов можливості управління швидкістю за кожним ступенем;
- планування траєкторії відбувається із врахуванням перешкод, в якості яких розглядаються конструктивні елементи нерухомого ТО, можливий самоперетин ланок МС разом або без об'єкта маніпулювання (ОМ).

Для можливості автоматизованої реалізації методики запропонована послідовність вирішення траєкторних задач з врахуванням кінематичного аспекту сформована у вигляді ряду етапів, кожен з яких визначає проміжний результат розв'язку та реалізується у вигляді програмного модуля. Загальна схема послідовності вирішення задачі кінематичного синтезу ПТ наведена на рис 1.

З метою перетворення первинної технологічної та конструкторської інформації до задачі побудови ПТ на кінематичному рівні запропоновано модифікований формалізований опис просторових кінематичних структур (ФО ПКС), який вперше був розроблений у Житомирському державному технологічному університеті [17]. Модифікація його полягає у врахуванні додаткової інформації про геометричні розміри ПР та зміні трактування окремих операторів координатних напрямків для спрощення її представлення та подальшої обробки в контексті поставленої задачі.

Основні вимоги до ФО ПКС, що має бути використаним для задач планування траєкторії з врахуванням кінематичного аспекту, наступні. Представлення типових конструкцій маніпуляторів ПР, описаних за допомогою запропонованого ФО ПКС, повинно бути наочним та зрозумілим для можливості їх неавтоматизованого та в подальшому автоматизованого формування, а також інформаційно незбитковим, компактним щодо вхідної інформації та спрощення її подальшої обробки. ФО повинен бути в достатній мірі універсальним для можливості опису довільної розімкненої кінематичної структури. Для зменшення складності кінематичного аналізу ПР кількість проміжних систем координат повинна бути мінімальною. ФО повинен містити інформацію про геометричні розміри ПР та ОМ.

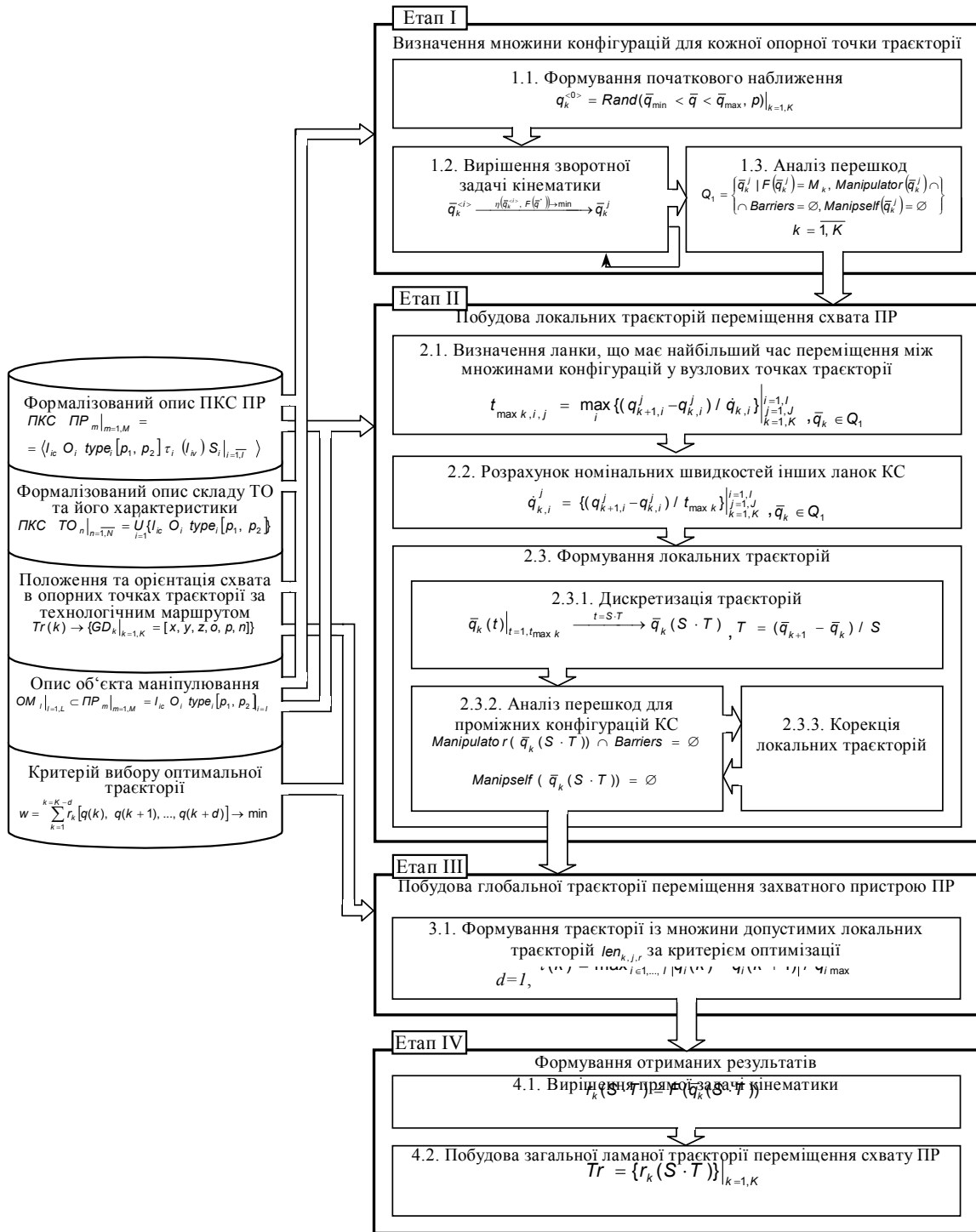


Рис. 1. Загальна схема пропонованої методики автоматизованого формування траєкторії переміщення полюса захватного пристрою ПР із урахуванням кінематичних можливостей

Запропонований ФО ПКС представляє собою набір операторів координатних напрямків та приєднаних до них додаткових параметрів, розбитих на окремі фрази, кожна з яких описує елемент конструкції кожної ланки МС ПР в напрямку збільшення їх порядкових номерів від стійки до захватного пристрою ПР.

$$\text{ПКС ПР}_m |_{m=1, M} = \langle l_{ic} O_i \text{ type}_i [\rho_1, \rho_2] \tau_i (l_{iv}) S_i |_{i=1, I} \rangle, \quad (1)$$

де  $l_{ic}$  – величина переміщення початку поточної  $i$ -ої системи координат конструктивного елемента відносно її миттєвого положення вздовж осі  $O_i$ , описаної за допомогою ОКН  $O_i \in \{X, Y, Z, A, B, C\}$  [17];

$type_i$  – тип примітиву, що описує просторові розміри елемента, або тип дії над поточною системою координат:  $type_i \in \{0, 1, 2, 3\}$ , де 0,1 – кодування типу примітиву: паралелепіпед або циліндр відповідно, що описують  $i$ -ту ланку; 2, 3 – кодування дії над зв'язаною системою координат примітиву: зміщення та поворот відповідно;

$\rho_1, \rho_2$  – параметри, що описують геометричні розміри заданого примітиву (якщо  $type_i = 1$ , то  $\rho_1, \rho_2$  – це відповідно ширина і висота примітиву; якщо  $type_i = 2$ , то  $\rho_1, \rho_2$  – це радіус основи і висота циліндра; якщо  $type_i \in \{3, 4\}$  – то задані параметри і квадратні дужки опускаються). Якщо поточний елемент не є кінцевим елементом будь-якої ланки маніпулятора, то для більшої компактності наступні два оператори опускаються;

$\tau_i$  – оператор, що визначає напрямок та тип руху наступної ланки відносно попередньої  $\tau_i \in \{X, Y, Z, A, B, C\}$ ;

$l_{iv}$  – визначає максимальну величину переміщення для  $i$ -тої узагальненої координати. Оскільки для зручності ПКС описується в одному із крайніх положень ланок, то в цьому випадку узагальнена координата описується наступним чином:  $q_i \in [0, l_{iv}]$ . Якщо  $l_{iv} > 0$ , то вважаємо, що рух відбувається в додатному напрямку (для поступальних узагальнених координат – вздовж відповідної осі в додатному напрямку, для обертових – за годинниковою стрілкою, якщо дивитись з кінця відповідної осі), інакше – у від'ємному;

$S_i \in \{\wedge, \vee, \Delta\}$  – оператор, що визначає з'єднання і можливість одночасного руху із сусідніми ланками маніпулятора [17];

$i, m, I, M$  – порядковий номер конструктивного елемента та КС ПР та їх загальна кількість відповідно.

Як і в попередньо розробленому ФО, важливим є використання операторів координатних напрямків (ОКН), проте опис положення, орієнтації та функціональних можливостей окремих ланок ПР, які вони визначають, задаються відносно зв'язаних системи координат попередніх ланок. Початкова система координат є базовою системою координат маніпулятора  $m$ -го ПР, що розміщується в межах даного РТК. В запропонованій методиці передбачається автоматизоване формування ФО ПКС на основі первинної інформації, що попередньо сформована та завантажена у базу даних. Нижче представлено алгоритм побудови просторової кінематичної структури маніпулятора за допомогою запропонованого ФО (рис. 2).

Особливістю опису є довільна деталізація конструктивних елементів ПР та ТО на основі примітивів, що їх описують. Визначення необхідного ступеня деталізації являє собою задачу з багатьма умовами, які виходять за рамки даної методики. Тому цей етап в заданій постановці проблеми покладається на людину-оператора. Бажаним є мінімально необхідний ступінь деталізації, оскільки від нього значною мірою залежить розмірність отриманого ФО, що впливає на час подальших розрахунків ПР (визначає кількість матриць переходів між системами координат при розв'язанні задач кінематики).

Модифікований ФО є достатньо універсальним і використовується для опису оточуючого ТО. У цьому випадку в ньому використовується лише частина параметрів, які відповідають за можливість відносного переміщення конструктивних елементів:

$$ПКС\ ТО_n|_{n=1,N} = \bigcup_{i=1}^I \{l_{ic}\ O_i\ type_i[\rho_1, \rho_2]\}, \quad (2)$$

де позначення мають той же зміст, що і для ПКС ПР [17], за винятком індексів  $i, n$ , що у даному випадку визначають порядкові номери конструктивних елементів, з яких складається ТО, кількість яких дорівнює  $I$ , та порядкові номери ТО із загальної їх кількості, що дорівнює  $N$  відповідно. Це дозволяє створити єдиний апарат перетворення даних для проведення розрахунків. Для опису ТО його застосування дещо обмежене через послідовний характер опису елементів конструкцій ТО, що не дозволяє відтворити складні опуклі ділянки поверхонь. Але практично для розв'язання задачі кінематичного планування ПТ за умов її побудови поміж вузловими точками підходу до робочих зон ПР даний опис є достатнім.

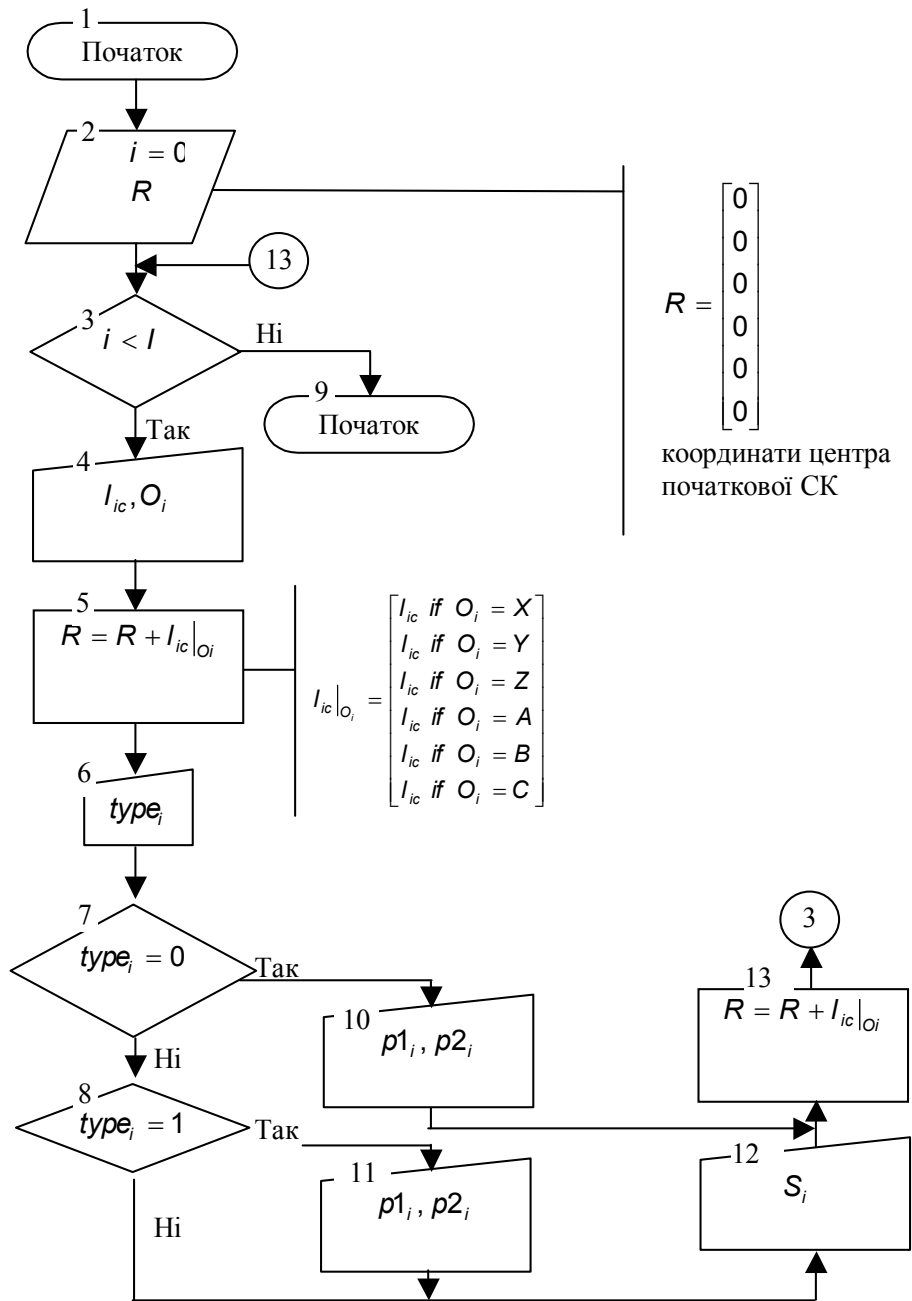


Рис. 2. Алгоритм побудови ФО ПКС маніпулятора

ОМ (якщо він затиснений в затискному пристрої) представляє собою в ПКС ПР останню ланку кінематичного ланцюга, описану відповідним примітивом:

$$OM_{i|_{i=1,L}} \in ПКС ПР_{m|_{m=1,M}} = I_{ic} O_i type_i [p_1, p_2]_{i=1} \tag{3}$$

де  $l$  – індекс, що визначає ОМ із загальної їх кількості.

Отже, загалом запропонований ФО дає універсальний апарат для опису довільних просторових структур, які можна розбити на низку елементарних складових (примітивів), що можуть змінювати відносні положення. У загальному випадку маємо змогу умовно розділити будь-яку просторову конструкцію на елементарні складові, описані примітивами із необхідною деталізацією.

Першим етапом запропонованої методики кінематичного планування ПТ є визначення положення ланок МС у вузлових точках траєкторії переміщення РО ПР, зв'язаних з ТО. З цією метою здійснюється цикл розв'язання прямої та зворотної задач кінематики із урахуванням перешкод. Для представлення конструкції маніпулятора ПР та перешкод відповідно до їх формалізованого опису запропоновано

використовувати апарат R-функцій [14], [15], [16]. В методиці використовується спрощений спосіб запису R-функцій у предикатній формі.

Формально множину розв'язків зворотної задачі кінематики для  $k$ -ої вузлової точки траєкторії можна представити як:

$$Q_k = \{\bar{q}_k^j \mid F(\bar{q}_k^j) = M_k, Manipulator(\bar{q}_k^j) \cap Barriers = \emptyset, Manipself(\bar{q}_k^j) = \emptyset\}, \quad (4)$$

де  $M_k$  – задана матриця положення та орієнтації захватного пристрою в  $k$ -ій вузловій точці траєкторії, розрахована за значеннями кутів Ейлера в цій точці;

$F(\bar{q}_k^j)$  – матричне рівняння, що пов'язує кінцеву матрицю маніпулятора ПР із заданим значенням вектора узагальнених координат (стану) маніпулятора ПР;

$Manipulator(\bar{q}_k^j)$  – скінчена множина в просторі, яку займає конструкція маніпулятора ПР при заданому значенні вектора узагальнених координат. У свою чергу,  $Manipulator(\bar{q}_k^j) = \{x, y, z \mid ManipulatorRFunc(x, y, z, q) \geq 0\}$ , де  $ManipulatorRFunc(x, y, z, q)$  – значення R-функції маніпулятора ПР;

$Barriers$  – скінчена множина в просторі, яку займає сукупність конструкцій всіх елементів, що виступають у якості перешкод для маніпулятора ПР. Аналогічно,  $Barriers = \{x, y, z \mid BarriersRFunc(x, y, z) \geq 0\}$ , де  $BarriersRFunc(x, y, z)$  – значення R-функції сукупності перешкод;

$Manipself(\bar{q}_k^j) = Manipulator(q_{k,i}^j) \cap Manipulator(q_{k,i+2}^j) \cap Manipulator(q_{k,i-2}^j) \Big|_{i=1,l}$ ;

$j$  – порядковий номер рішення оберненої задачі для  $k$ -ої вузлової точки траєкторії;

$i$  – порядковий номер кінематичної ланки ПР для  $k$ -ої вузлової точки траєкторії.

Ставлячи у відповідність кожному примітиву, що зображує конструктивний елемент, відповідну R-функцію, що дає змогу визначити належність певної точки простору даному елементу, маємо можливість описати диз'юнкцію усіх R-функцій елементарних конструктивних елементів загальною R-функцією всієї зображуючої конструкції ПР або ТО. Побудова простору, що займає ПР або ТО за наявними кінематичними зв'язків на підставі їх ФО, виконується шляхом підстановки замість аргументу базової системи координат R-функції, яким є вектор  $(x, y, z, 1)^T$  відповідної зворотної матриці  $A^{-1}$  переходу між зв'язаними системами координат. Аналіз перетину конструкції ПР та ТО відбувається через знаходження максимуму результуючої R-функції від R-функцій обладнання, додатний результат якої свідчитиме про наявність перетину.

Розв'язок зворотної задачі кінематики у вузлових точках здійснюється із застосуванням чисельного методу, за основу якого взято метод циклічного покоординатного спуску. Метод забезпечує швидке сходження із заданого значення вектора узагальнених координат до кореня системи нелінійних рівнянь, сформованих на основі розв'язання прямої задачі кінематики. При цьому за початковою інформацією з ФО про діапазон, в границях якого може приймати свої значення вектор узагальнених координат для  $i$ -ої вузлової точки траєкторії, формується множина довільних його значень, що слугують для ліквідації локального характеру наближення (задача 1.1 на рис. 1):

$$q_k^{<0>} = Rand(\bar{q}_{\min} < q < \bar{q}_{\max}, p) \Big|_{k=1,K}, \quad (5)$$

де  $p$  – кількість початкових довільних конфігурацій МС ПР, що генеруються.

З практичних міркувань для розв'язання зазначеної задачі достатньо використання близько сотні початкових конфігурацій. Узагальнені координати слугують для визначення матриці маніпулятора  $n$ -го ПР на підставі формалізованого опису його кінематичної структури (КС), що дозволяє скласти рівняння в матричному вигляді виду:

$$T_n = \prod_{i=1}^n A_i, \quad (6)$$

де  $A_i$  – матриці перетворення однорідних координат;

$i$  – порядковий номер кінематичної ланки.

Фіксуючи значення усіх узагальнених координат, крім однієї, розпочинаючи в порядку зростання номера кінематичної пари, та мінімізуючи функцію нев'язки виду:

$$\left( \left( \bar{q}_k^{<i>, F(\bar{q}^*) \right) = \left[ F(\bar{q}_k^{<i>}) - F(\bar{q}^*) \right]^2 \right) \rightarrow \min, \quad (7)$$

де  $q_{pi}$  – поточний вектор узагальнених координат на  $i$ -ій ітерації;

$q^*$  – шукане значення вектора узагальнених координат,

відбувається поступове наближення до шуканого її значення (задача 1.2 на рис. 1). Разом із тим відбувається перевірка належності точок простору МО до ПР через аналіз значення результуючої  $R$ -функції (задача 1.3 на рис. 1). Процес пошуку відбувається доти, доки функція нев'язки не приймає значення, що задовольняє точності розв'язання зворотної задачі кінематики для заданої вузлової точки.

Матриця маніпулятора  $Tn$ , що визначає вузлову точку траєкторії, до якої відбувається наближення, задається через положення в глобальній системі координат ПР та кути Ейлера наступним чином:

$$\begin{bmatrix} \cos(O) \cdot \cos(P) & -\cos(O) \cdot \sin(P) \cdot \cos(N) + \sin(O) \cdot \sin(N) & \cos(O) \cdot \sin(P) \cdot \sin(N) + \sin(O) \cdot \cos(N) & p_x \\ \sin(P) & \cos(P) \cdot \cos(N) & -\cos(P) \cdot \sin(N) & p_y \\ -\sin(O) \cdot \cos(P) & \sin(O) \cdot \sin(P) \cdot \cos(N) + \cos(O) \cdot \sin(N) & -\sin(O) \cdot \sin(P) \cdot \sin(N) + \cos(O) \cdot \cos(N) & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

де  $O, P, N$  – кути орієнтації, підходу та нормалі відповідно, що описують положення кінцевої ланки КС ПР.

Отримана у результаті циклу наближень та переборів сукупність векторів узагальнених координат у вузлових точках траєкторії перевіряється на наявність однакових рішень, що відрізняються один від одного на величину похибки розв'язку, та формується множина розв'язків  $Q_1$  даного етапу.

Другим етапом формування ПТ є побудова траєкторії поміж вузловими її точками, що через свій характер була названа локальною. За змістом даний етап представляє собою напрямлений пошук найкоротших в конфігураційному просторі відрізків, що сполучають набори векторів узагальнених координат із множини  $Q_1$ , між послідовними за маршрутом вузловими точками траєкторії.

Побудову локально-оптимальних за часом траєкторій переміщення поміж вузловими точками запропоновано вирішувати в наступній послідовності. За визначеними з попереднього етапу значеннями відповідних узагальнених координат на кінцях локального відрізка траєкторії між вузловими її точками та заданими номінальними законами їх зміни визначається найбільший час переведення по кожній із них (задача 2.1 на рис. 1). При цьому під номінальним законом переміщення розуміється рух ланок із постійною швидкістю. На основі визначеного найбільшого (мінімального щодо зміни вектора узагальнених координат) часу визначаються номінальні закони переміщення інших ланок МС (задача 2.2 на рис. 1). Таким чином, локальна траєкторія попередньо нормалізується у часі за окремими ступенями рухомості МС ПР. Наступною задачею (задача 2.3 на рис. 1) етапу є аналіз отриманих локальних траєкторій на можливість зіткнення з перешкодами. З цією метою відбувається дискретизація за часом отриманої локальної траєкторії РО ПР (задача 2.3.1 на рис. 1). Ступінь дискретизації визначається необхідною точністю аналізу зон заборони при переміщенні ПР і залежить від ряду чинників, основними серед яких є геометричні розміри ПР та ТО та ступінь їх деталізованого опису елементарними об'єктами – примітивами. Отримані в результаті дискретизації проміжкові конфігурації МС із залученням однотипного апарату  $R$ -функцій перевіряються на можливість перетину ПР разом або без ОМ із ТО та самоперетину. У випадку можливості реалізації локальної траєкторії, що розглядається, зберігається значення векторів узагальнених координат у вузлових точках траєкторії, які вона сполучила, та час переміщення поміж ними. Якщо виконання переміщення для даної локальної траєкторії неможливе, для розв'язання задачі обходу перешкод запропоновано використовувати один з різновидів генетичних алгоритмів (ГА) [7], [19] (задача 2.3.3 на рис. 1).

У загальних рисах роботи (ГА) можна описати так: він створює популяції особин, кожна із яких є розв'язком певної задачі, а потім ці особини еволюціонують за принципом “виживає сильніший”, тобто залишаються лише найоптимальніші розв'язки. Опишемо основні етапи роботи ГА при його застосуванні до корекції отриманих локальних траєкторій, що не задовольняють умові обходу перешкод. Першим кроком розв'язання даної задачі є створення популяції особин. Кожна особина представляє собою масив елементів – генів, якими в даному випадку виступають випадкові набори векторів узагальнених координат. Кількість генів кожної особини є однаковою і може коливатись від декількох одиниць до десятків, що впливає на розмірність задачі та час її розв'язання. Тому, зважаючи на характер технологічної операції механоскладання, пропонується брати кількість генів від 3 до 10. Кількість особин в початковій популяції може також коливатися в широкому діапазоні. Вона визначає кількість початкових відліків локальної траєкторії, що коригується. Після генерації початкової популяції

відбувається перевірка її особи на можливість їх реалізації. Для цього будується модифікована локальна траєкторія шляхом сполучення її проміжних конфігурацій на підставі визначених законів зміни узагальнених координат. Для кожної проміжної конфігурації, отриманої після дискретизації кожної ділянки локальної траєкторії, відбувається перевірка на потрапляння її в зону заборони, аналогічно до того, як це робилось при побудові самих локальних траєкторій до корекції. Для кожної отриманої особи після аналізу визначається функція пристосованості, яка полягає у степені придатності отриманої траєкторії для обходу перешкод. Вона обернено пропорційна часу переходу між двома вузловими точками по траєкторії, побудованій по генотипу заданої особи. Якщо ж при русі РО по отриманій траєкторії відбувається перетин конструкції маніпулятора з перешкодами чи самоперетин його ланок, то пристосованість вибирається малою, але більшою нуля для забезпечення працездатності ГА.

Наступним етапом роботи ГА є селекція, яка полягає у відборі особин. Найпростішим та поширеним методом селекції є метод рулетки. Сутність методу полягає в тому, що випадковим чином виконується відбір однієї особи з популяції, причому ймовірність потрапляння особи з більшою функцією пристосованості є більшою. Кількість ітерацій процесу відбору дорівнює кількості особин в популяції. Після селекції відбувається схрещування отриманих особин. Найпростішим і в той же час найефективнішим методом схрещування є одноточковий кросовер. Сутність методу полягає у створенні нової варіації локальної траєкторії на основі обміну проміжними конфігураціями між варіаціями локальної траєкторії, що пройшли процес селекції. При цьому обмін полягає в заміщенні однієї групи проміжних конфігурацій іншою із двох можливих, отриманих у результаті довільного поділу локальної траєкторії. Заключним етапом ГА є так звана мутація отриманого набору локальних траєкторій, яка полягає у випадковій зміні однієї з узагальнених координат у проміжних конфігураціях. Дана властивість характерна для природних процесів, де вона не перевищує 1 % від загальної кількості особин. Оскільки метою застосування ГА в запропонованій методиці є виявлення найкращого варіанта обходу перешкод серед усіх можливих, даним етапом можна знехтувати. При реалізації всіх зазначених процедур в циклі є змога після певного числа ітерацій отримати розв'язок поставленої задачі, який буде близьким до оптимального, але не завжди найоптимальнішим, що є недоліком застосування ГА. Проте при його використанні можливим є сканування всього конфігураційного простору ПР при великій кількості ступенів його рухомості. В результаті вирішення даного етапу отримується масив переходу від  $j$ -го розв'язання, що відповідає  $k$ -ій вузловій точці траєкторії, до  $r$ -го розв'язання, що відповідає  $(k + 1)$ -ій вузловій точці траєкторії  $len_{k,j,r}$  в якому зазначаються часи, за які відбувається переміщення.

Третім етапом запропонованої методики є побудова глобальної ПТ. Узагальнений критерій якості ПТ може бути представлений наступним чином:

$$w = \sum_{k=1}^{k=K-d} r_k [q(k), q(k+1), \dots, q(k+s)] \rightarrow \min, \quad (9)$$

де  $q(k) \in Q_1, k = \overline{1, K}, 1 \leq d \leq K - 1$ .

При  $d=1$  цільова функція  $w$  представляє собою суму втрат  $r_k$  на ділянках між двома послідовними станами. За отриманою із попереднього етапу інформацією про множини конфігурацій у вузлових точках траєкторії та локальних траєкторій, що їх з'єднують, задача побудови глобальної ПТ зводиться до визначення найкоротшого шляху, який би з'єднував вузлові точки та давав би найменший час циклової ПТ ПР, тобто був оптимальним за швидкістю. При мінімізації загального часу глобальної траєкторії функція втрат поміж вузловими точками траєкторії може бути представлена наступною величиною:

$$\tau(k) = \max_{i \in \{1, \dots, l\}} |q_i(k) - q_i(k+1)| / \dot{q}_{i \max}, \quad (10)$$

де  $\dot{q}_{i \max}$  – максимальне значення швидкості  $i$ -го привода.

Для розв'язування даного етапу методики запропоновано використовувати метод дискретного динамічного програмування. Суть його до розв'язку даного етапу зводиться до аналізу графу можливих переходів між його вузлами, якими є вузлові точки траєкторії від кінцевої до початкової, а вагами ребер виступають часові інтервали локальних траєкторій, що їх з'єднують. В результаті аналізу формується масив переходу, що має найменший час. Дана процедура аналізу відбувається для інших початкових конфігурацій, серед яких визначається така, що дає найменший час загалом і являє собою оптимальну за швидкістю ПТ (задача 3.1 на рис. 1).



Заключним четвертим етапом є здійснення переходу від узагальнених до декартових координат (положення та орієнтації) шляхом розв'язання прямої задачі кінематики. Для переходу використовується матричний метод перетворення систем координат. В якості матриць використовуються відомі матриці четвертого порядку [9], [12], що описують положення та орієнтацію кожної ланки КС у ПР, зв'язаній з попередньою ланкою системою координат.

Для скорочення операцій множення матриць за рахунок виключення нульових елементів пропонується визначати результуючу матрицю наступним чином:

$$c_{i,j} = \sum_{k=0}^2 a_{i,k} \cdot b_{k,j},$$

$$c_{m,3} = \sum_{k=0}^2 a_{m,k} \cdot b_{k,3} + a_{m,3},$$
(11)

де  $i, j \in [0..2]$ .

При цьому час, що потребують операції множення та додавання, зменшується в 1,8 раза.

В результаті перемноження матриць взаємного розташування для кожної проміжної конфігурації отримуємо загальну ПТ траєкторію, що описує переміщення РО ПР в робочому його просторі (задачі 4.1, 4.2 на рис. 1).

**Висновки.** Отже, результатом поетапного вирішення наведеної методики є синтез ПТ, що ґрунтується на кінематичному її аспекті. Розв'язок даної задачі є необхідним та базовим для розв'язання таких задач, як формування управління ПР за векторами положення та швидкості при обслуговуванні ТО, аналіз динамічних характеристик та розв'язання задачі динамічної стабілізації через параметризацію режиму роботи ПР за попередньо синтезованою ПТ тощо. Дані задачі можуть доповнити дану методику, що є перспективою її розв'язку. З метою перевірки її працездатності при автоматизованій реалізації було розв'язано ряд тестових задач.

Результатом створення подібного методичного та алгоритмічного забезпечення є підвищення якості конструктивно-технологічних рішень, що приймаються на етапі проектування роботизованих ТП, а також скорочення тривалості процесу проектування РТК.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Беленков В.Д., Гусев С.В., Зотов Ю.К., Ружанский В.И., Тимофеев А.В., Фролов В.М., Якубович В.А. Адаптивная система управления автономным подвижным роботом // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1978. – № 6. – С. 52–64.
2. Геометрическое моделирование и машинная графика в САПР : Учебник / В.Е. Михайленко, В.Н. Кислоокій, А.А. Лященко и др. – К.: Выща шк., 1991.–374 с.
3. Горанский Г.К., Губич Л.В., Махнач В.И., Медведев С.В., Ракович А.Г., Стрельцов А.И., Швед О.Л. Автоматизация проектирования технологических процессов и средств оснащения / Под ред. А.Г. Раковича. – Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1997. – 276 с.
4. Ерош И.Л. Применение преобразований Крестенсона для определения параметров положения объектов по плоским проекциям // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1981. – № 3.– С. 46–53.
5. Кобринский А.А., Кобринский А.Е. К построению движений манипуляционных систем // Докл. АН СССР. – 1975. – Т. 224. – № 4,5,6. – С. 1030.
6. Колодницький М.М. Елементи теорії САПР складних систем: Навч. посібник. – Житомир: ЖІТІ, 1999. – 512 с.
7. Коренюшкин А. Генетические алгоритмы // Программист. – № 2. – 2003. – С. 74.
8. Малышев В.А. Один способ построения программных движений манипулятора. – Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1980. – № 6. – С. 50–55.
9. Малышев В.А. Представление внешней среды, планирование и построение программных движений манипулятора // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1981. – № 3. – С. 53–56.
10. Малышев В.А., Тимофеев А.В. Алгоритмы построения программных движений манипуляторов с учетом конструктивных ограничений и препятствий // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1978. – № 6. – С. 64–73.
11. Охоцимский Д.Е., Платонов А.К., Пряничников В.Е. Методика моделирования робота, перемещающегося в пространственной среде // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1980. – № 1. – С. 46–55.

12. Промышленные роботы: Конструирование, управление, эксплуатация / В.И. Костюк, А.П. Гавриш, Л.С. Ямпольский, А.Г. Карлов. – К.: Вища шк., 1985.– 359 с.
13. *Пяткин В.П., Сиротенко В.Я.* Планирование трассы роботом // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1978. – № 6. – С. 73–80.
14. *Рвачев В.Л., Курпа Л.В.* R-функции в задачах теории пластин. – К.: Наукова думка, 1987.–175 с.
15. *Рвачев В.Л.* Геометрические приложения алгебры логики. – К., 1967. – 212 с.
16. *Рвачев В.Л.* Проблемно-ориентированные языки и системы для инженерных расчетов. – К.: Вища шк., 1993. – 414 с.
17. *Сачук И.В.* Алгоритмічне забезпечення автоматизованого вибору АМ ПР.: Магістерська атестаційна робота. – Житомир: ЖІТІ, 2000. – 208 с.
18. *Тимофеев А.В.* Адаптивные робототехнические комплексы. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 332 с.: ил.
19. *Gen M., Cheng R.* Genetic Algorithm and Engineering Design –John Wiley & Sons. – 1997. – 352 p.

БОГДАНОВСЬКИЙ Мартін Віталійович – аспірант Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання кінематики та динаміки ПР;
- дослідження динамічної точності ПР.

Тел. д.: 38/0412-49-50-57.

E-mail: [bmart@ukr.net](mailto:bmart@ukr.net)

КИРИЛОВИЧ Валерій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету інформаційно-комп'ютерних технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- автоматизація технологічної підготовки механоскладального машино- та приладобудівного автоматизованого виробництва;
- автоматизація технологічних процесів.

Тел. д.: 38/0412-33-89-78.

E-mail: [kiril\\_v@ziet.zhitomir.ua](mailto:kiril_v@ziet.zhitomir.ua)

КОВБАСА Микола Олександрович – магістрант Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- динамічне програмування гнучких автоматизованих виробництв.

Тел. д.: 38/0412-26-18-17.

E-mail: [nickko@krian.com.ua](mailto:nickko@krian.com.ua)

НУЖДА Тетяна Євгенівна – магістрант Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- автоматизація технологічних процесів.

Тел. д.: 38/0412-24-14-17.

E-mail: [pal\\_mira@mail.ru](mailto:pal_mira@mail.ru)

Подано 11.11.2004

**Богдановський М.В., Кирилович В.А., Колбаса М.О., Нужда Т.Е.** Методика автоматизованого кінематичного формування програмних траєкторій переміщення схвата промислових роботів при синтезі роботизованих механоскладальних технологій

**Богдановський М.В., Кирилович В.А., Колбаса Н.А., Нужда Т.Е.** Методика автоматизованого кінематичного формування програмних траєкторій переміщення схвата промислових роботів при синтезі роботизованих механосборочних технологій

**Bogdanovsky M.V., Kyrylovich V.A., Kovbasa M.O., Nuzhda T.E.** The Methods of automated kinematical forming of industrial robots program trajectory of gripping device for robotic assembly technology synthesis.

УДК 621.865.8

**Методика автоматизованого кінематичного формування програмних траєкторій переміщення схвата промислових роботів при синтезі роботизованих механоскладальних технологій // М.В. Богдановський, В.А. Кирилович, М.О. Колбаса, Т.Е. Нужда.**

Представлена методика автоматизованого кінематичного синтезу програмних траєкторій для механоскладальних технологічних процесів. Відзначені основні проблеми, що виникають при побудові програмної траєкторії, та необхідність їх вирішення при плануванні роботизованих технологічних комплексів. Описано склад та загальний зміст вирішувалих задач відповідно до запропонованої методики, а також відмічено перспективність подальшого її розвитку.

УДК 621.865.8

**М.В. Богдановський, В.А. Кирилович, Н.А. Колбаса, Т.Е. Нужда.** Методика автоматизованого кінематичного формування програмних траєкторій переміщення схвата промислових роботів при синтезі роботизованих механосборочних технологій.

Представлена методика автоматизованого кінематичного синтеза програмних траєкторій для механосборочных технологических процессов. Отмечены основные проблемы, возникающие при построении программных траєкторий и необходимость их решения при планировании роботизованных технологических комплексов. Описан состав и общее содержание решаемых задач в соответствии с предлагаемой методикой, а также отмечена перспективность ее дальнейшего развития.

УДК 621.865.8

**M.V. Bogdanovsky, V.A. Kyrylovich, M. O. Kovbasa, T. E. Nuzhda.** The Methods of automated kinematical forming of industrial robots program trajectory of gripping device for robotic assembly technology synthesis.

The methods of automated kinematical forming of industrial robots program trajectory for robotic assembly technology synthesis has been presented. The main problems of program trajectory's building and necessity to solve them in robotic technological complexes planning have been considered. The structure and content of solving tasks according to suggested methods and future development trends have been described.