

КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

УДК 621.757:681.3.06

СЕМЕНЧЕНКО Валерій Леонідович

**САМОНАВАНТАЖУВАЛЬНІ СІТКОВІ МОДЕЛІ
РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
СКЛАДАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА**

**Спеціальність 05.13.07 — «Автоматизація
технологічних процесів і виробництв
(промисловість)»**

**АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Київ — 1993

ДБ 28.773

Роботу виконано на кафедрі технічної кібернетики Київського політехнічного інституту.

- Науковий керівник — кандидат технічних наук, професор Ямпольський Леонід Стефанович.
- Офіційні опоненти — доктор технічних наук, професор Пуховський Євген Степанович;
- кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Зак Юрій Олександрович.
- Провідна установа — НВО Київський інститут автоматичної.

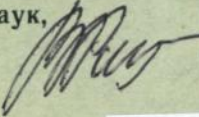
Захист відбудеться „17. січня” 1994 р.
о 15 годині на засіданні спеціалізованої Ради Д 068.14.07 по присудженню наукового ступеня доктора технічних наук при Київському політехнічному інституті.

Відгуки в двох примірниках, засвідчені гербовою печаткою, просимо надсилати за адресою: 252056, Київ-56, проспект Перемоги, 37, Київський політехнічний інститут, вченому секретарю.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського політехнічного інституту.

Автореферат розіслано 8 грудня 1993 р.

Вчений секретар
спеціалізованої Ради
Д 068.14.07
доктор технічних наук,
професор

 В. Д. РОМАНЕНКО



Метою дисертаційної роботи є підвищення рівня автоматизації складальних роботизованих виробництв на базі застосування при організації управління самонавантажувальних сіткових моделей.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішено такі основні задачі:

- розроблено структуру моделі, побудовану на використанні сіток Петрі (СП) з процедурою динамічного самонавантаження переходів часовими атрибутами, значення яких відповідають реальним умовам функціонування заміщеного елемента і формуються за результатами модельного експерименту на нижньому (виконавчому) рівні керування;

- розроблено методи й засоби реалізації динамічного самонавантаження СП-моделей складальних робототехнічних систем (РТС);

- розроблено методи й засоби планування експериментів на нижньому рівні управління РТС для модифікації динамічного навантаження СП-моделі верхнього рівня;

- розроблено методи, алгоритмічне й програмне забезпечення для підвищення швидкості планування рухів роботів при модифікації динамічного навантаження СП-моделі;

- створено й відлагоджено комплекс програм для моделювання робототехнологічних комплексів (РТК) складання та зварювання на базі самонавантажувальних СП-моделей (ССП-моделей).

Автор захищає:

- формалізований апарат представлення ССП-моделей РТС складання;

- детермінований та ймовірносний підходи до функціонування ССП-моделей;

- методи застосування пошукових модулів для програмної реалізації динамічного самонавантаження;

- нову модифікацію сіток Петрі - динамічну СП для планування експерименту на нижньому рівні ССП-моделі;

- методи формування траєкторії, розв'язання задач кінематики роботів у реальному масштабі часу для модифікації динамічного навантаження моделі.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Складальне виробництво є одним з най-

складніших типів виробництв з точки зору його автоматизації. Підвищення рівня автоматизації складального виробництва досягається найбільш повним використанням можливостей РТС на підставі прайзильної організації управління на всіх рівнях ієрархії. Вирішення цієї задачі ускладнюється такими особливостями процесу складання як циклічність, дискретність, паралельність, асинхронність, вітвлення процесів, наявність черг, конкуренція технологічного обладнання за ресурси, одночасний рух декількох видів матеріальних потоків. Врахування цих особливостей реалізується при моделюванні процесів функціонування та управління РТС. Для побудови математичних моделей, що якнайповніше відтворюють перелічені особливості складальних РТС, широко використовуються методи теорії сіток Петрі. На підставі апарату СП розроблений і використовується ряд типових моделей РТС складання, однак недоліком цих моделей є суб'єктивний характер визначення часових параметрів внаслідок застосування наближених або статистичних методів їхньої оцінки, що знижує адекватність моделі об'єкту, вірогідність результатів моделювання, ускладнює й затримує процес моделювання в цілому. Уникнути цього можна, якщо СП-модель буде мати властивості самостійного вибору й корективки часових параметрів у процесі функціонування. Тому задача побудови СП-моделей з процедурою динамічного самонавантаження переходів часовими атрибутами, значення яких відповідають реальним умовам функціонування заміненого елемента й формуються за результатами модельного експерименту на нижньому (виконавчому) рівні управління, є актуальною при моделюванні РТС сітками Петрі.

Методи досліджень. Роботу виконано з застосуванням методів моделювання дискретних систем сітками Петрі, дискретної математики, прикладної механіки, математичного аналізу, аналітичної та диференціальної геометрії, теорії ймовірностей, обчислювальної математики та теорії алгоритмів. Перевірка теоретичних результатів проводилася методами моделювання на ЕОМ і натурального експерименту. Адекватність створених моделей перевірялася порівнянням результатів моделювання та даних про роботу реальних виробничих систем.

Наукова новизна. В процесі проведення теоретичних і експериментальних досліджень автором одержані нові науково-технічні результати.

1. Запропоновано ієрархічну структуру СП-моделей РТС складання що містить інтелектуальні надбудови - пошукові модулі (ПМ).

завданням яких є планування та моделювання проведення експерименту на нижньому рівні моделі; динамічне навантаження верхнього рівня моделі результатами експерименту; синтез і аналіз алгоритмів управління РТС за результатами моделювання.

2. Запропоновано нову модифікацію сіток Петрі - динамічні СП, до складу яких входить функція модифікації динамічного навантаження з областю значень, відображуваною на множину переходів.

3. Розроблено методи й алгоритми планування рухів роботів на виконавчому рівні в реальному часі для модифікації динамічного навантаження, що відрізняються від відомих підвищеною швидкістю.

4. Запропоновано ймовірносний підхід до функціонування ССП-моделей, який дозволяє розширити можливості моделювання РТС із складною виробничою структурою.

Практична цінність роботи полягає в підвищенні рівня й ефективності автоматизації складальних виробництв за рахунок удосконалення організації управління РТС на верхньому рівні, раціонального розподілу матеріальних потоків, мінімізацію простоїв технологічного устаткування, скорочення часу виробничого циклу. Розроблено програмне забезпечення (на мові програмування ARPS в операційній системі VAX, що використовуються в пристроях управління роботами типу "PUMA") ССП-моделювання РТК складання та зварювання.

Реалізація результатів роботи. Розроблені алгоритми та програми використані при організації управління РТК складання та зварювання вузлів рам у Київському інженерному центрі комплексної автоматизації та роботизації. На підставі дисертації на кафедрі технічної кібернетики Київського політехнічного інституту розроблен новий курс лекцій "Штучний інтелект у плануванні та керуванні виробництвом". Матеріали дисертації також включено до відповідного підручника для ВУЗів: Ямпольський Л. С., Лавров А. А. "Штучний інтелект в плануванні та керуванні виробництвом" (Київ: Вища школа), що з'явиться друком в 1994 р.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних конференціях "New Leading-Edge Technologies In Machine Building", Харків, 1992, 1993 рр.; "European Simulation Symposium", Дельфт (Нідерланди), 1993 р.; на науково-технічних семінарах кафедри технічної кібернетики Київського політехнічного інституту, 1993 р.

Публікації, обсяг роботи. За темою дисертації надруковано 4

праці. Дисертація складається із вступу, 4-х розділів, закінчення, списку літератури (97 назв), 2-х додатків, викладених на 137 сторінках машинописного тексту, має 29 рисунків, 2 таблиці.

ЗМІСТ РОБОТИ

Подано аналіз застосування теорії СП для моделювання складальних РТС у разі організації управління. Часові СП (ЧСП) дозволяють більш реалістично відобразити процеси в РТС і розв'язувати задачі типу

$$T_{\Pi}(c_i) \leq [T_{\Pi}(c_i)] / c_i \in c, \quad (1)$$

де T_{Π} - тривалість виконання виробничого завдання; $[T_{\Pi}(c_i)]$ - максимально можлива тривалість виконання виробничого завдання; c_i - варіант план-графіку; c - множина можливих розкладів навантаження устаткування. ЧСП має вигляд: $tn = \langle n, \tau \rangle$. Де $n = \langle p, t, f, n, \mu \rangle$ - звичайне СП (p - множина позицій; t - множина переходів; $f: p \times t \rightarrow \langle 0, 1, 2, \dots \rangle$ - вхідна функція; $n: t \times p \rightarrow \langle 0, 1, 2, \dots \rangle$ - вихідна функція; $\mu_0: p \times k$ - початкова маркіровка; $k = \langle 0, 1, 2, \dots \rangle$; $\tau: t \rightarrow r_0$ - функція часу спрацьовування, яка зіставляє кожному переходу постійний час його спрацьовування $\tau_j \in \theta$; r_0 - множина невід'ємних раціональних чисел; θ - множина часів спрацьовування переходів. Недоліком використання ЧСП для моделювання РТС є те, що $\tau_j = \text{const} \forall j \in \langle 1, 2, \dots, m \rangle$, де m - кількість переходів. В цьому випадку при заданих $p, t, \theta, p \times t, t \times p, p \times k$ задача (1) може не мати розв'язання. Одним з шляхів одержання коректного розв'язання може бути зміна множини $\theta = \langle \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m \rangle$ (визначеної роботою виконавчих пристроїв), динамічного навантаження СП-моделі та повторний синтез алгоритму управління (АУ) шляхом проведення експериментів з СП-моделлю. В термінах ЧСП задача управління РТС формується таким чином. Поставимо у відповідності РТС сітку Петрі (переходи - це дії в РТС, а позиції - умови): $tn = \langle p, t, f, n, \mu_0, \tau \rangle$. Управління РТС можна виразити функцією стану ЧСП: $y = f(x)$, де $x = \langle \mu_j \mid j = \overline{1, m} \rangle$, $y = \langle y_j \mid j = \overline{1, m} \rangle$ - множини станів ЧСП (і РТС). Тоді АУ РТС можна задати як

$$tn_{\alpha} = \langle tn, \mu, \varphi, y, f \rangle \quad (2)$$

при умовах

$$\forall p \in p, \forall \mu \in RCTND: \mu Cp \leq 1; \quad (3)$$

$$\forall \mu_i, \mu_j \in RCTND \exists \sigma_i: \mu_i \xrightarrow{\sigma_i} \mu_j; \quad (4)$$

$$\forall t \in T \exists \mu_k, \mu_l \in RCTN: \mu_k \xrightarrow{\sigma_t} \mu_l, \quad (5)$$

де μ - множина маркіровок (станів РТС), σ_t - послідовність запуску переходів; $\varphi: T \rightarrow 2^\mu$ - функція позначки переходів; 2^μ - множина всіх підмножин μ ; γ - множина операторів управління; $f: \mu \rightarrow \gamma$ - функція, яка кожній маркіровці ставить у рівнозначну відповідність підмножину станів РТС. Наведені умови визначають сітку $T\mu_\alpha$ як вірну, бо вона безпечна (умова (3)), жива (умови (4), (5)). Задача синтезу АУ РТС полягає в знаходженні складових набору (2), що задовольняють умовам (1), (3)-(5). Таким чином, АУ РТС зводиться до управління переходами ЧСП в залежності від маркіровки позицій. Розв'язання поставленої задачі привело до розробки ССП-моделі з структурою, поданою на рис. 1. Характерними рисами даної ССП-моделі є використання двох інтелектуальних надбудов - пошукових модулів для програмної реалізації динамічного самонавантаження на базі взаємодії рівнів моделі. До задач ПМ-1 входить: організація прогону СП-моделі для формування АУ РТС, що задовільняє умовам (1), (3)-(5) (алгоритму управління відповідає послідовність спрацьовування переходів, яка визначається шляхом побудови дерева досяжності СП); в разі неможливості синтезу АУ в цих умовах - виділення переходів, які спричинилися до неї (переходів з найбільшим часом спрацьовування); передача параметрів віділених переходів в складі слова w_1 на нижчий рівень моделі. Математична постановка задач функціонування ПМ-1 формулюється таким чином. 1. Визначити вектор-функцію $\sigma_t^*: T_{\Pi}(\sigma_t^*) = m_k n \tau(\sigma_t)$, при умовах:

$$\mu_{i+1}(SP) = \mu_i(SP) - f(SP; T \cup U_i(ST)) + n \tau; P \cup U_i(ST);$$

$$\mu_i(SP) \geq f(SP; T \cup U_i(ST)) \text{ (умова спрацьовування переходу);}$$

$$\tau - \tau_H(t_k) \geq \tau_k(t_k) \text{ (завершення спрацьовування переходу } t_k);$$

i - індекс стану РТС; $\tau_H(t_k)$ - завершення спрацьовування переходу t_k ; τ_k - модельний час; $\sigma_t^* = \langle U_i \mid i = 1, 2, \dots, m \rangle$; $U_i = U_i(t_k)$ - вектор-функція, кожний елемент якої визначає ознаку спрацьовування переходу t_k в i -ому стані РТС (на i -ому кроці моделювання). 2. Якщо $T_{\Pi} > [T_{\Pi}]$, визначити $w_1 = \langle t_m, \tau_m \rangle$; $t_m = m_k \times \tau_k$ ($k = 1, n$), де n - число переходів. В задачі ПМ-2 входить: планування і проведення експериментів з виконавчими пристроями РТС, інтерпретованими переходами з незадовільним часом спрацьовування, для зменшення цього часу; передачу змінених значень часів у складі слова w_2 на верхній

рівень моделі з метою її часового перенавантаження. Математична постановка задачі функціонування ПМ-2 формулюється таким чином.

1. Визначити

$ALG: ALGCW_s) = \langle alg_s \mid s = 1, 2, \dots, l \rangle$, де: $ALGCW_s) -$ множинна алгоритмів для зменшення τ_m .

2. Визначити $S^* : J(alg_{S^*}) = \min_{alg_s} J(alg_s); s = 1, 2, \dots, l$, де:

S, S^* - номери-індекси алгоритмів; l - кількість алгоритмів; J - умовна "вартість" алгоритму (наприклад, обсяг зайнятої пам'яті). Зменшення часу спрацьовування виділеного переходу досягається інтенсифікацією роботи рідг відного виконавчого пристрою. Інтенсифікації можна досягти двома шляхами. Перший шлях полягає в поліпшенні динаміки керування виконавчими пристроями на базі використання методів і засобів теорії автоматичного управління. В роботі розглядається другий шлях, що полягає в поліпшенні законів планування руху виконавчих пристроїв. Функціонування ССП-моделі описане як детерміноване, так і ймовірносне.

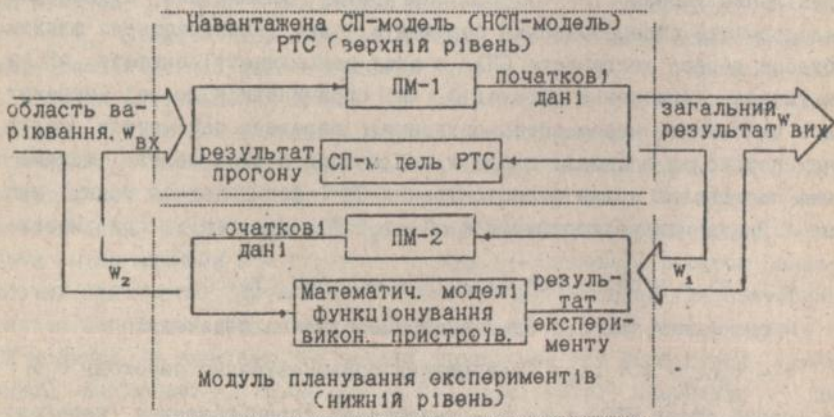


Рис. 1. Структура ССП-моделі РТС.

Детермінований п'єхїд призначений для ССП-моделювання РТС на рівні виробничої комірки, яка являє собою відносно просту виробничу структуру. В цьому випадку найважливішим етапом функціонування ССП-моделі є проведення експериментів на нижньому рівні з метою формування та модифікації параметрів динамічного навантаження моделі. В цій роботі планування експерименту реалізується евристичним шляхом з використанням розробленої для цього динамічної сітки

Петрі.

Визначення 1. Динамічна сітка Петрі (ДСП) – це двійка вигляду $ND = \langle STN, \Phi = fCSR \rangle$, де TN – звичайна сітка Петрі; f – функція, модифікації динамічного навантаження; $R = \langle \langle r_{11}, r_{21}, \dots, r_{m1} \rangle, \langle r_{12}, r_{22}, \dots, r_{m2} \rangle, \dots, \langle r_{1k}, r_{2k}, \dots, r_{mk} \rangle \rangle$ – множина груп двійкових змінних, які визначають властивості ("одиниця" – властивість має місце, "нуль" – в протилежному разі) переходів сітки; $\Phi = \langle fCr_{11}, r_{21}, \dots, r_{m1} \rangle, fCr_{12}, r_{22}, \dots, r_{m2} \rangle, \dots, fCr_{1k}, r_{2k}, \dots, r_{mk} \rangle$ – множина значень функції f , яка визначає шляхи модифікації динамічного навантаження СП; m – кількість властивостей переходів; k – кількість переходів, причому кожному переходу t_i відповідає одна група $\langle r_{1i}, r_{2i}, \dots, r_{mi} \rangle \in R$.

В складальних РТС основним елементом, найбільш суттєво впливаючим на зміну параметрів динамічного навантаження ССП-моделі, є робот, який являє собою складну механічну систему з багатопроцесорним пристроєм керування. Тому для переходів СП, що описують дії не роботів, а інших виконавчих пристроїв РТС, значення функції f дорівнюють нулю. Для переходів, що описують дії роботів, функція f задається таблично:

t_i			r_{1i}	r_{2i}	r_{3i}
0	0	0	1	0	0
1	0	0	0	0	0
1	0	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	1	0
-	-	-	0	0	1
-	-	-	0	1	0
-	-	-	0	1	1

$$r_{1i} = \begin{cases} 1, & \text{якщо реалізується} \\ & \text{контурне управління} \\ & \text{якщо реалізується} \\ & \text{позиційне управління;} \\ 0, & \text{в протилежному разі;} \end{cases}$$

$$r_{2i} = \begin{cases} 1, & \text{якщо допускається} \\ & \text{можливість модифікації} \\ & \text{геометричної траєкторії;} \\ 0, & \text{в протилежному разі;} \end{cases}$$

$$r_{3i} = \begin{cases} 1, & \text{якщо допускається} \\ & \text{можливість модифікації} \\ & \text{фазової траєкторії;} \\ 0, & \text{в протилежному разі;} \end{cases}$$

$$t_i = \begin{cases} \begin{cases} 1 & \text{(установка на модифікацію розв'язання задач кінематики)} \\ 0 & \text{(в протилежному разі)} \end{cases} \\ \begin{cases} 1 & \text{(установка на модифікацію геометричної траєкторії)} \\ 0 & \text{(в протилежному разі)} \end{cases} \\ \begin{cases} 1 & \text{(установка на модифікацію фазової траєкторії)} \\ 0 & \text{(в протилежному разі)} \end{cases} \end{cases}$$

Таким чином, в термінах динамічних сіток Петрі планування експерименту полягає в тому, що ПМ-2 проводить аналіз значень переходу t_i , з W_i і приймає рішення про використання відповідного алгоритму (з бібліотеки алгоритмів планування рухів, що зберігаються в довготривалій пам'яті системи управління РТС) для інтенсифікації роботи

робота. Одержане нове (зменшене) значення τ_1 передається на верхній рівень ССП-моделі у складі слова w_2 для динамічного навантаження відповідного переходу. В дисертації розроблено модифіковані методи планування рухів роботів (методи формування геометричних і фазових траєкторій і розв'язання оберненої задачі кінематики (ОЗК)), які відрізняються від традиційних підвищеною швидкодією при програмній реалізації, що дозволяє в разі необхідності використати їх під час проведення експерименту з метою зменшення навантаження τ_1 верхнього рівня моделі.

Формування геометричних траєкторій руху роботів. В роботі запропоновано підхід з використанням параболічної інтерполяції. Щоб уникнути зупинки (яка є причиною зростання часу руху) робочого органу (РО) робота в точці злому траєкторії під час руху, відрізки прямих сполучаються параболою. Рівняння параболі, виведене в роботі методами диференціальної геометрії, має вигляд

$$y = -\frac{\cos(\theta/2)}{2l \sin^2(\theta/2)} x^2 - \frac{1}{2} \cos(\theta/2),$$

де θ - кут злому, l - межа допуску приближення траєкторії (визначається технологічними умовами). Якщо розбити параболу на $2n$ (парне число) ділянок, то після n відлітків стан РО на траєкторії визначається як $x_m = (m/n-1)l \sin(\theta/2)$; $y_m = -((m/n-1)^2 + 1) \frac{1}{2} \cos(\theta/2)$. Відсутність змінних радикальних і тригонометричних залежностей підвищує обчислювальну ефективність підходу порівняно з використанням в системах управління роботами круговою інтерполяцією.

Формування базових траєкторій рухів роботів. Зменшення часу функціонування робота можливе за рахунок збільшення швидкості його переміщення, тобто формування оптимальної за швидкодією фазової траєкторії, що являє собою залежність швидкості руху РО від його положення на геометричній траєкторії. В роботі розроблено метод планування оптимальних фазових траєкторій (критерій оптимальності - максимізація швидкості руху РО), що характеризується підвищеною швидкодією у порівнянні з відомими ітераційними підходами. При відсутності тертя та інших збурень динаміка жорсткого робота може бути описана рівнянням

$$H(q)\ddot{q} + q^T C(q)\dot{q} + g(q) = M, \quad (6)$$

де q - n -мірний вектор узагальнених координат; M - n -мірний вектор моментів, $H(q)$ - матриця інерції $n \times n$; $C(q)\dot{q}$ - тензор розміру $n \times n \times n$; $g(q)$ - n -мірний вектор гравітації. Для формування фазових

траєкторія на основі виразу (6) в роботі виведено загальне параметризоване відносно s рівняння динаміки роботів для робочого та конфігураційного простору: $a_i \ddot{s} + b_i \dot{s}^2 + c_i = M_i$ де a_i , b_i и c_i - коефіцієнти належності до простору; $i = 1, n$; n - число степенів рухомості. Якщо $M_i^{min} \leq M_i \leq M_i^{max}$, то $\alpha_i CS, \dot{s} \leq \dot{s} \leq \beta_i CS, \dot{s}$, де $\alpha_i = (M_i^{min} - b_i \dot{s}^2 - c_i) / a_i$; $\beta_i = (M_i^{max} - b_i \dot{s}^2 - c_i) / a_i$, причому

$$M_i^\alpha = \begin{cases} M_i^{min}, & \text{якщо } a_i > 0 \\ M_i^{max}, & \text{якщо } a_i < 0 \end{cases}; \quad M_i^\beta = \begin{cases} M_i^{max}, & \text{якщо } a_i > 0 \\ M_i^{min}, & \text{якщо } a_i < 0 \end{cases}$$

Випадок $a_i = 0$ повинен бути обговорений окремо. В результаті одержимо $\alpha CS, \dot{s} \leq \dot{s} \leq \beta CS, \dot{s}$, де $\alpha CS, \dot{s} = \max \langle \alpha_i CS, \dot{s} \rangle$, $\beta CS, \dot{s} = \min \langle \beta_i CS, \dot{s} \rangle$. Вводиться поняття "характеристичних точок переключення" (ХТП), в яких фазова траєкторія потрапляє на криву максимальної швидкості $\alpha CS, \dot{s} = \beta CS, \dot{s}$ без порушення обмежень, і наводяться методи знаходження цих точок. Випадок 1. Якщо $\exists s: a_i CS = 0$, то ХТП знаходяться з виразів для a_i . Випадок 2. Якщо $\forall i: a_i CS \neq 0$ й $\frac{d}{ds} \frac{\dot{s}}{s}$ безперервна, то ХТП визначаються знаходженням значень \dot{s} , в яких $\frac{d}{ds} \frac{\dot{s}}{s}$ розривна. Випадок 3. Якщо $\dot{s} CS$ безперервна та диференціальна, то з рівняння $F_1 CS \dot{s} + F_2 CS = 0$, де

$$F_1 CS = \frac{d\eta_1}{ds} - 2\eta_1 \frac{b_k}{a_k}, \quad F_2 CS = \frac{d\eta_2}{ds} - 2\eta_2 \frac{b_k}{a_k},$$

$$\eta_1 CS = b_m - b_k a_m / a_k, \quad \eta_2 CS = c_m - c_k a_m / a_k,$$

m - привод, що потрапляє на насичення в ХТП, k - привод, який знаходився на насиченні раніш, можна одержати значення \dot{s} і знайти відповідне s з умови

$$M_m = \begin{cases} M_m^{max}, & \text{якщо } a_m > 0 \\ M_m^{min}, & \text{якщо } a_m < 0 \end{cases}$$

Точка CS, \dot{s} буде ХТП. Через те, що $k \neq m$, існує тільки $n(n-1)/2$ можливих комбінацій номерів зчленувань. Ці комбінації розглядаються паралельно та незалежно. Далі в роботі розглядається процедура знаходження інших точок переключення. Оптимальна траєкторія визначається інтегруванням рівнянь $\ddot{s} = \alpha CS, \dot{s}$ (в оберненому часі) і $\ddot{s} = \beta CS, \dot{s}$ (в прямому часі) між точками переключень до порушення обмежень на моменти. Запропонований метод виграє у швидкодії порівняно з відомими за рахунок того, що не треба явної побудови кривої $\alpha = \beta$ та ітеративних процедур.

Рішення обернених задач кінематики роботів В роботі розроб-

лено чисельний алгоритм з використанням прогнозатора узагальнених координат виду $q_{n+4} = q_{n+3} + (\Delta t/24)(55\dot{q}_{n+3} - 59\dot{q}_{n+2} + 37\dot{q}_{n+1} - 9\dot{q}_n)$ та їхнього коректора виду $q_{n+4} = q_{n+3} + (\Delta t/24)(9\ddot{q}_{n+4} + 19\ddot{q}_{n+3} - 5\ddot{q}_{n+2} + \ddot{q}_{n+1})$ (вирази для прогнозатора та коректора були отримані експериментальним шляхом), де q_i - вектор узагальнених координат в i -ому положенні робота, Δt - інтервал часу між переміщеннями РО. Застосування прогнозатора та коректора збільшує швидкість збіжності та зменшує число ітерацій. Проведені експериментальні дослідження з роботами типу рума (вітчизняний аналог - робот РМ-01 з мультипроцесорними системами керування Сфера-36, Сфера-56) і АSEA (вітчизняний аналог - робот ТУР-10КМ з мультипроцесорними системами керування Прогрес 1-8) виявили переваги (за швидкодією) розроблених методів і алгоритмів порівняно з використовуваними в сучасних системах керування роботами в 1,5-7 разів (в залежності від виду переміщень РО). Результати експериментів наведені в додатках до дисертації.

Моделювання РТС на рівні складальної ділянки і вище є більш складною задачею, ніж моделювання на рівні комірки, тому що різко збільшується розмірність (на порядок і вище) сітки Петрі, що утруднює її аналіз традиційними методами (деревом досяженості та матричними рівняннями) для синтезу алгоритма керування. Крім того, із збільшенням розмірності об'єкту моделювання виникає стохастичність в його поведінці. Наприклад, в залежності від величини відхилень розмірів деталей, що збираються змінюються режими збирання, тобто змінюється стан РТС як об'єкта керування. Стохастичність також виникає при використанні систем технічного зору для розпізнавання елементів складання (в цьому випадку стан РТС змінюється в залежності від результатів розпізнавання). При моделюванні складальних РТС також може виникнути необхідність обліку ймовірності відмови устаткування, яка суттєво збільшується зі збільшенням розмірності системи. Для цих випадків розроблено ймовірнісний підхід до функціонування ССП-моделей.

Ймовірнісний підхід. Середовище робочого простору РТС ймовірнісно моделюється сіткою Петрі. Вибір послідовності спрацьовування переходів для найкращого переведення РТС у заданий стан здійснює ПМ-1 за допомогою матричних перетворень і серії тестів на сумісність і повноту. На нижньому рівні моделюється реалізація подій в РТС і формуються параметри динамічного навантаження (часи та ймовірності

спрацьовування переходів СП, що передаються на верхній рівень моделі. Кожна з m введених команд b_n ($n = \overline{1, m}$) користувача (команд переводу РТС у заданий стан) має апріорну ймовірність $\text{Pr}(b_n)$ і передається на верхній рівень ССП-моделі РТС у вигляді умовної величини v_n , до того ж v_n забруднено адитивним шумом, що вважається безперервною випадковою величиною λ_1 , яка підкоряється закону нормального розподілу Гауса. Шум вводиться штучно для відображення невизначеності поведінки РТС. Команда ω (команда, що поступає на вхід моделі після дії шуму) квантується з постійними часовими інтервалами, і одержується Q значень $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_Q$, що відображають кожну b_n в точку Q -мірного простору спостережень.

Теорема 1. Умовний ризик рівняння $\text{Risk}(b_j^s/\omega)$, що b_n класифікується як b_j^s при заданому ω , дорівнює $\sum_{n \neq j} \text{Pr}(b_n/\omega)$, де b_j^s - справжня вхідна команда з простору спостережень Q .

Доведення засноване на методах теорії ймовірностей. Алгоритм функціонування моделі складається з шести кроків, описуючих один робочий цикл.

Крок 1. Класифікація вхідної команди на верхній рівень моделі. Результатом виконання кроку є ідентифікація b_n як команди b_j^s з максимальною ймовірністю на підставі теореми 1 (програмою реалізується через ПМ-1)

Шаг 2. Модельне мислення здійснює ПМ-1. Команді b_j^s відповідає максимум $(2^N - 1)$ послідовностей $A_{j,m}$ ($m = 1, 2, \dots, (2^N - 1)$) запусків переходів. Кожне $A_{j,m}$ зображується матрицею-рядком двійкових випадкових змінних $X_{j,m} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]_m$ з початковою ймовірністю

$$\text{Pr}(b_j^s X_{j,m}) = \frac{1}{2^N - 1} \quad (N - \text{число переходів СП}),$$

яка потім коректується за допомогою навчального рівняння (крок 6). Кожному переходу t_i ($i = 1, 2, \dots, N$) відповідає змінна

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } t_i \text{ збудований} \\ 0, & \text{в противному разі} \end{cases}$$

Результатом виконання кроку 2 є ідентифікація з максимальною ймовірністю переходів, які необхідно запустити для переводу СП в заданий стан. При цьому послідовність запуску не визначається.

Крок 3. Модельне планування програмово реалізується за допомогою ПМ-1 формуванням з максимальною ймовірністю послідовності запусків переходів $A_{j,mr} = X_{j,m} R_{j,mr}$ ($m=1, 2, \dots, (2^N-1)$; $r = 1, 2, \dots, d!$), де $R_{j,mr}$ - та матриця перестановки (розміру $m \times n$ з елементами 1

і 0; в кожному стовпчику і кожному рядку - одна одиниця) рядка $x_{j,m}$; d - число збурених переходів в $A_{j,m}$. Після серії тестів на сумісність і повноту вибирається ψ планів (послідовностей $A_{j,m}$). Таким чином, результатом кроку 3 є визначення всіх можливих послідовностей запусків переходів для перевodu СП і РТС у заданий стан.

Крок 4. Прийняття рішення здійснює ПМ-1, розв'язуючи задачу

$$\max_{\psi} \text{Prob}(A_{j,m}(\psi) / b_j^{\psi}).$$

Результатом є вибір найкращої послідовності запусків.

Крок 5. Реалізація рішення й динамічне самонавантаження моделі. ПМ-2 аналізує значення переходів (з матриць-рядків $A_{j,m}$) і приймає рішення про проведення експериментів (аналогічно з детермінованим підходом) і потім проводить експерименти для визначення справжніх (модифікованих) часів спрацьовування переходів. Обчислюється повна "вартість" виконання плану перевodu РТС в заданий стан $J_c = \sum_i J_i$, де $J_i = J_i' + J_i'' + \dots = k\tau_i$, τ_i - час спрацьовування переходу τ_i , k - число його запусків у плані. Результатом кроку 5 є визначення часу перевodu СП і РТС у заданий стан.

Крок 6. Модифікація динамічного навантаження. В даному підході термін "динамічне навантаження" розглядається в більш широкому розумінні і передбачає визнання всіх ймовірносних засобів верхнього рівня й часів τ_i . На цьому кроці ПМ-1 порівнює одержані τ_i' з τ_i і коректує інформацію про ймовірності:

$$\text{Prob}(\psi+1 / b_j^{\psi+1}) = \text{Prob}(\psi / b_j^{\psi}) + G_{i+1} [\xi - \text{Prob}(\psi / b_j^{\psi})], \text{ де}$$

$$\xi = \begin{cases} 1; & \text{якщо } J' = \min J_c \\ 0; & \text{в іншому разі} \end{cases}$$

ψ - номер ітерації; G_{i+1} - послідовність, яка задовольняє умові збіжності алгоритму; $\text{Prob}(\psi / b_j^{\psi})$ и $\text{Prob}(\psi+1 / b_j^{\psi+1})$ - умовні ймовірності команди b_j^{ψ} , відповідні ψ -й і $(\psi+1)$ -й ітерації; J' - фактична "вартість" виконання сформульованого плану.

Далі цикл алгоритму повторюється до того часу, поки не перестануть коректуватися ймовірності. Для моделювання проведення експерименту на нижньому рівні ймовірносної ССП-моделі з метою одержання умов максимальної продуктивності контурного робота в дисертації розроблено підхід, який програмово реалізується за допомогою МП-2.

Визначення 2. Ймовірністю успіху експерименту зветься чисельна характеристика ступеню можливості появи прийнятої якості траєк-

торію при проведенні експерименту.

Твердження 1. Продуктивність моделі робота при русі вздовж безперервної траєкторії прямо пропорційна ймовірності успіху експерименту.

При доведенні твердження одержано вираз для визначення ймовірності успіху експерименту

$$\text{Prob}(\text{ск. м. г. с}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N F_j(\text{ск. м. г. с})$$

і продуктивності моделі

$$\text{Prod}(\text{ск. м. г. с}) = \frac{1}{T_p} \text{Prob}(\text{ск. м. г. с})$$

де T_p - час однієї проби; N - кількість проб в експерименті; k - число вузлових точок наближення траєкторії; m - тип методу наближення; g - рівень замкненості системи; c - вектор мір допусків ефективності; $F_j(\text{ск. м. г. с})$ - двійкова функція успіху:

$$F_j(\text{ск. м. г. с}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо проба } j \text{ успішна} \\ 0, & \text{в протилежному разі} \end{cases}$$

Будується оптимізаційна модель $\text{Max Prod}(\text{ск. м. г. с}) / v_{kmg} \leq v^*$. де v_{kmg} - максимальна швидкість переміщення РО; v^* - обмеження швидкості функціонування. За допомогою стохастичного методу пошуку відшукуються k , m і g , що приводить до максимальної продуктивності робота і зменшення часових атрибутів ССП-моделі РТС.

На підставі запропонованих підходів розроблено програмове забезпечення (ПЗ) ССП-моделювання РТК складання і зварювання, реалізоване на мові програмування ALPS в операційній системі VAX, що використовуються в мультипроцесорних системах управління роботами типу рима. Для перевірки правильності теоретичних положень і ПЗ, що розроблені в дисертаційній роботі, проведено експериментальні дослідження з використанням РТК складання і зварювання вузлів рам, до складу якого входять роботи РМ-01 і ТУР-10КМ. За рахунок використання ССП-моделювання було забезпечено оптимальну за швидкістю організацію управління на верхньому рівні моделі (на рівні ситуаційного управління) і інтенсифіковані процеси, які моделюються на нижньому рівні ССП, на підставі зміни законів планування руху виконавчих пристроїв. Збільшення при цьому продуктивності РТК на 25% якісно підтвердило вірогідність одержаних в роботі результатів.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ

1. Проведено аналіз методів моделювання складальних РТС ст-

ками Петрі, який дозволив конкретизувати напрямок модифікації СП для підвищення ефективності моделювання.

2. Запропоновано підхід до моделювання складальних РТС модифікованими ієрархічними навантаженими СП з перемінним динамічним навантаженням переходів. Визначено структуру самонавантажувальної СП-моделі, яка відрізняється від традиційних СП-моделей використанням двох інтелектуальних надбудов - пошукових модулів для 1) обліку особливостей нижнього рівня управління РТС і впливу на динаміку виконавчих пристроїв, що описуються СП-переходами, при синтезі і/чи аналізі алгоритму управління на верхньому рівні ССП-моделі РТС; 2) відображення взаємодії рівней, формування і модифікації динамічного навантаження СП за результатами модельного експерименту; 3) прогону ССП-моделі в автоматичному режимі. Запропонована структура ССП-моделі дозволяє підвищити ступінь адекватності моделі об'єкту за рахунок одержання коректних часових показників динаміки виконавчих пристроїв і синтезувати оптимальний за швидкістю алгоритм керування РТС за рахунок як можливості варіювання цими показниками (на нижньому рівні моделі), так і раціональної організації послідовностей для устаткування (верхній рівень моделі).

3. Для модифікації динамічного навантаження ССП-моделі, розроблено наступні алгоритми планування руху роботів (на нижньому рівні управління РТС) в реальному масштабі часу: 1) алгоритм планування оптимальних за швидкістю фазових траєкторій руху роботів, заснований на використанні виведених в роботі загальних рівнянь динаміки роботів для побудови граничних кривих припустимої області положення траєкторії на фазовій площині; перевага над відомими алгоритмами в тому, що не потрібно будувати криву максимальної швидкості в явному вигляді та ітеративних процедур пошуку, тому підвищується швидкість обчислень; 2) алгоритм параболічної інтерполяції для згладжування кутових ділянок геометричної траєкторії руху робота, які є причиною тимчасової зупинки робочого органу при русі; відмінною алгоритму від традиційно використовуваної в системах керування роботами кругової інтерполяції є відсутність змінних тригонометричних і радикальних залежностей, що дозволяє збільшити швидкість і працювати в реальному часі; 3) чисельний алгоритм розв'язання оберненої задачі кінематики робота, заснований на принципі подібності переміщень і обчислення якобіана швидкостей; алго-

рити відрізняється від відомих застосуванням формул прогнозатора і коректора узагальнених координат в процесі руху робота, що підвищує обчислювальну ефективність алгоритму за рахунок збільшення швидкості збіжності та зменшення максимального числа ітерацій. Такі алгоритми дозволяють при проведенні експериментів на нижньому рівні моделей інтенсифікувати роботу окремо взятого робота а, відтак, зменшити час спрацьовування відповідного переходу на нижньому рівні ССП-моделі.

4. Розроблено алгоритм детермінованого функціонування ССП-моделі, зоснований на логіці міжрівневих взаємодій, здійснених за допомогою використання в рамках зовнішнього ПЗ двох пошукових модулів. Алгоритм реалізує прогон ССП-моделі; формування стратегії проведення експериментів на нижньому рівні ССП-моделі (при цьому застосовується запропонована в роботі нова модифікація СП - динамічна сітка Петрі, переходи якої є областю двійкових значень введеної функції модифікації динамічного навантаження, що дозволяє формувати стратегію проведення експерименту з аналізу значень переходів); проведення експериментів згідно сформованої стратегії (у режимах ON-LINE, OFF-LINE або з використанням розробленого в роботі алгоритму ймовірного моделювання проведення експерименту); динамічне самонавантаження моделі; синтез коректного оптимального за швидкодією алгоритму управління РТС з урахуванням реальних динамічних параметрів роботи виконавчих пристроїв, визначених за результатами модельного експерименту.

5. Розроблено ітераційний алгоритм ймовірного функціонування ССП-моделі, який використовує ймовірну СП-модель з максимальною початковою невизначеністю спрацьовування переходів, яка зменшується після кожного прогону моделі та модифікації динамічного (часового та ймовірного) навантаження. Відміною запропонованого ймовірного підходу від відомих є використання функції ймовірностей і ентропії як аналітичних мір функціонування моделі, що дозволяє розширити можливості застосування сіток для моделювання складних складальних РТС з недетермінованим середовищем робочого простору.

6. Розроблено алгоритми і ПЗ ССП-моделювання складальних РТС, використання яких при організації управління дозволяє підвищити продуктивність РТС. Коректність розроблених методів і ПЗ експериментально підтверджено на робототехнологічних комплексах складен-

ня та зварювання, складених з різних типів роботів.

Основні положення дисертації надруковані в таких роботах.

1. Семенченко В. Л., Ямпольский Л. С. Вероятностное планирование эксперимента в самонагружаемых сетевых моделях робототехнических систем / В сб. Вестник Киевского политехнического института, серия Техническая кибернетика, Київ: Либідь, 1993, с. 23-30.

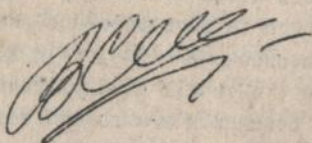
2. Ямпольский Л. С., Лавров А. А., Самохатко Д. В., Семенченко В. Л. Многоуровневые модели сборочных роботизированных производств / В кн.: Proceedings of The 1-st International Conference "New Leading Edge Technologies In Machine Building". -Kharkov: KhAI, 1992. - pp. 71-75.

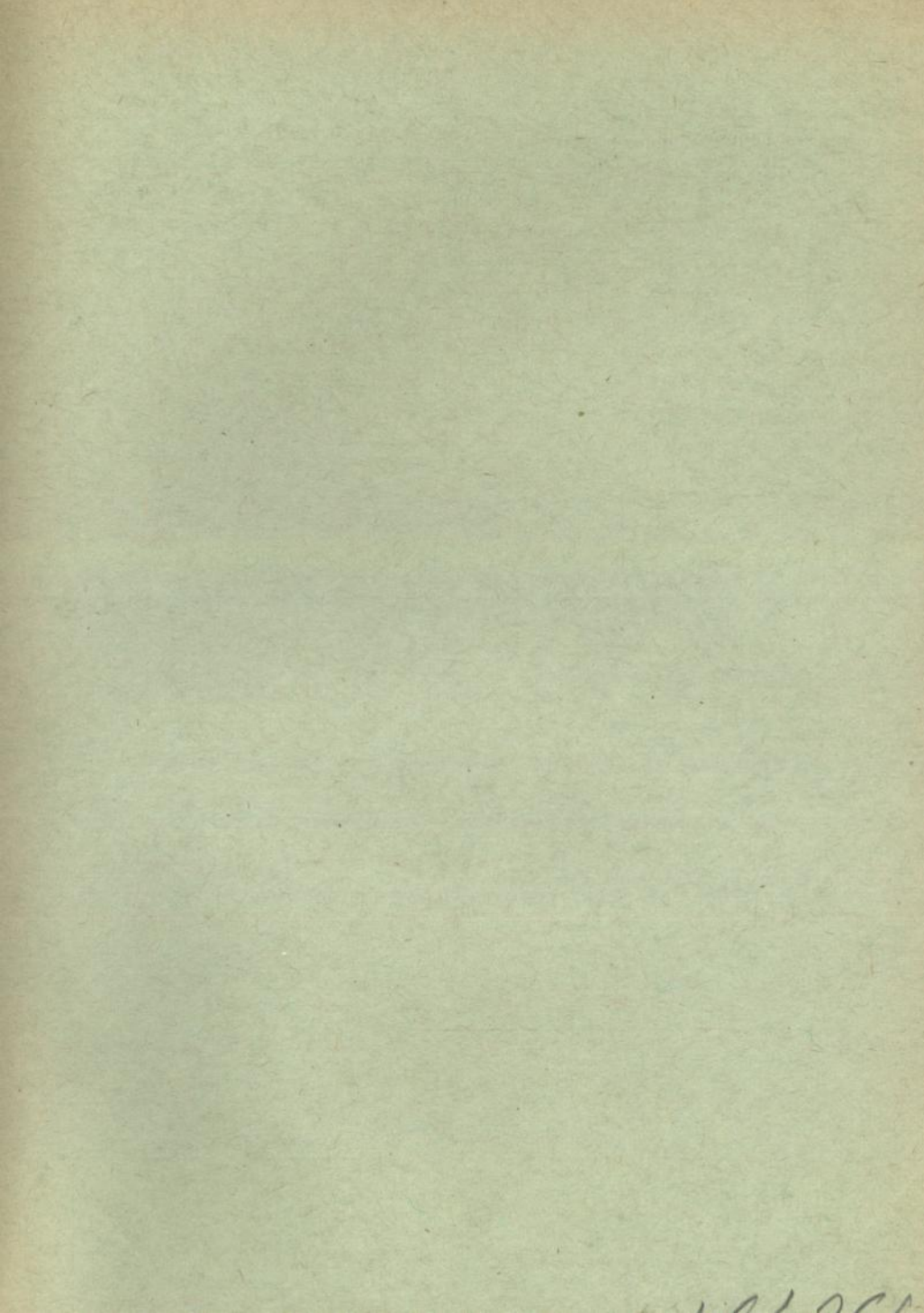
3. Yampolsky L.S., Lavrov A.A., Semenchenko V.L., Kuzmin P.V. Intelligent Dynamic Models of CIM Systems // Proceedings of The 2-nd International Conference "New Leading-Edge Technologies In Machine Building". -Kharkov: KhAI, 1993. - pp. 97-102.

4. Yampolsky L.S., Semenchenko V.L., Lavrov A.A. Intelligent Dynamic Net Models of Computer Integrated Manufacturing Systems // Proceedings of The European Simulation Symposium, The Netherlands, Delft, 1993, pp. 123-125.

5. Семенченко В. Л. Комбіновані інтегровані системи / В кн. Ямпольський Л. С., Лавров А. А. Штучний інтелект в керуванні і плануванні виробництвом, Київ: Вища школа (з'явиться друком в 1994 р.).

6. Семенченко В. Л. Алгоритмічне забезпечення СНСП-моделей / В кн. Ямпольський Л. С., Лавров А. А. Штучний інтелект в керуванні і плануванні виробництвом, Київ: Вища школа, (з'явиться друком в 1994 р.).





AB 28.775