

## ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ВАРІАНТА ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

**С.А. Шворов, д.т.н.,  
І.М. Болбот, к.т.н., доцент,  
В.М. Штепа, к.т.н.**

*Запропоновано підхід та методичний апарат параметричного синтезу, за допомогою яких визначається раціональний варіант побудови інтелектуальної роботизованої системи спеціального призначення.*

*Методичний апарат, параметричний синтез, параметри, інтелектуальна роботизована система.*

Поява промислових роботів і створення на їх основі автоматизованих технологічних систем або робототехнологічних комплексів (РТК) по суті означає новий якісний стрибок у автоматизації виробничих процесів і накладає додаткові вимоги до якості проектування, тобто призводить до необхідності удосконалення методів та методик проектування. Проектування та впровадження сучасних роботизованих систем (РС) спеціального призначення пов'язані з великими капітальними вкладаннями як на розробку проектів та виконання експериментальних робіт, так і на придбання техніки. Тому доцільності впровадження РС спеціального призначення має передувати всебічне обґрунтування. Важливим завданням початкового етапу проектування РС є формування завдань, що підлягають виконанню роботами-маніпуляторами (РМ), та оптимізація технічного обліку системи. При цьому виникає необхідність в обґрунтуванні параметрів РС на основі рішення задачі багатокритеріального параметричного синтезу.

**Мета досліджень** – розвиток методичного апарату обґрунтування раціонального варіанта побудови інтелектуальної роботизованої системи.

**Матеріал та методика досліджень.** Для всебічного обґрунтування вимог до РС виникає необхідність у вирішенні наступних груп наукових задач:

1. Формулювання концептуальних основ побудови та організації функціонування РС.
2. Розробка методичних основ структурного і параметричного синтезу РС.

При вирішенні наукових задач **першої групи** визначається: мета функціонування РС і розв'язувані нею задачі; умови функціонування.

Основні поняття теорії побудови РС базуються на категоріях загальної теорії систем. При цьому спільність понять теорії систем виявляється в конкретній предметній сфері, у тому числі й стосовно РС. У якості основних елементів РС будуть виступати РМ. При цьому РС являє сукупність РМ,

об'єднаних ієрархічними, інформаційними, керуючими зв'язками, де кожний елемент спрямований на досягнення загальної мети, що поставлена перед РС.

Для задач першої групи характерні такі два етапи проведення досліджень. На першому етапі необхідно побудувати концептуальну модель функціонування РС, а на другому етапі, на базі прийнятої концептуальної моделі, будується математична модель динамічного дискретно-керованого процесу, у якому: об'єктом керування є РМ; керованими параметрами – показники якості діяльності РМ; керуючими впливами – оперативні завдання РМ. Також розробляється система показників і методика оцінки ефективності функціонування РС. Результатом аналізу, проведеного в рамках теорії побудови РС, є моделі процесів їхнього функціонування і закономірності, що властиві цим процесам та системі взагалі. У цьому і є пізнавальна цінність аналізу. Прикладна його цінність обумовлена використанням результатів для постановки задачі синтезу.

У **другій групі** задач теорії побудови РС однією з основних є задача їх оптимального синтезу, яка спрямована на вибір раціонального варіанта побудови системи, що найкраще пристосована для виконання заданих функцій. Вихідними в задачі синтезу є такі дані: функції та завдання системи; перелік обмежень на характеристики системи; критерії ефективності, що встановлюють спосіб оцінки якості системи в цілому. Виходячи з цих відомостей, необхідно визначити структуру системи, параметри елементів і стратегію керування процесами, що повинні задовольняти заданим обмеженням і бути оптимальними щодо змісту критеріїв ефективності. Процедура синтезу РС поділяється на процедури структурного і параметричного синтезу. Метою структурного синтезу є визначення структури побудови системи: типу підсистем, складу елементів і зв'язків між ними. Параметричний синтез полягає у визначенні раціонального варіанта побудови РС, технічних характеристик його підсистем та основних елементів при фіксованій структурній схемі системи. Задача синтезу оптимальної структури розглядається як задача визначення оптимального відображення множини виконуваних функцій РС на множину її взаємозалежних елементів. Відповідно розробляються методи оптимального планування та керування РМ як процесу організації оптимального функціонування динамічної дискретно-керованої системи.

Методика вирішення задачі параметричного синтезу РС включає такі основні етапи. По-перше – визначаються показники ефективності кожного із варіантів побудови РС на множині умов функціонування системи для вибору найкращих із них. На другому етапі методики вирішується задача класифікації ситуацій за ознакою задоволення прийнятним обмеженням [2]. Під ситуацією в багатомірному факторному просторі розуміється варіант рішення, а також варіант умов його реалізації. Для кожної точки ситуації проводиться розрахунок показників ефективності і порівняння отриманих значень з припустимими. Для звуження множини варіантів рішень на третьому етапі застосовується принцип оптимізації по Парето, що виділяє припустиму Парето-ефективну множину рішень [3]. Подальше звуження множини варіантів рішень пов'язане з концептуальним вибором такого

варіанта побудови РС із всієї множини, який забезпечує достатньо високий (необхідний) рівень показників цільової та економічної ефективності. При цьому оптимальне рішення дозволяє визначити діапазон припустимих значень параметрів РС по виконанню поставлених завдань.

Енциклопедичний словник визначає робота як автоматичну систему, оснащену сенсорами, які сприймають інформацію про навколишнє середовище, та виконавчими механізмами, здатну за допомогою блока керування цілеспрямовано поводити себе в обстановці, що змінюється [4]. Характерною особливістю робота є антропоморфізм – здатність частково або повністю виконувати функції людини.

До основних інтелектуальних характеристик РС належать: автономність (рішення приймається роботом автономно); адаптивність – наявність експертної системи, реагування на ситуаційні зміни; обробка та розпізнавання мовних і зорових образів; створення маршрутів пересування та ін. Основними технічними характеристиками ВР є мобільність, навігація, вогнева міць та ін.

У практиці досліджень з обґрунтування перспектив розвитку складних систем отримала широке поширення тріада критеріїв:

імовірність виконання поставлених перед РС завдань ( $P$ );

вартість системи ( $f_1$ );

час виконання завдань ( $f_2$ ).

У процесі вибору раціонального варіанта РС перевага віддається такому варіанту побудови системи, який має мінімальну вартість ( $f_1$ ) та забезпечує виконання поставлених завдань ( $P$ ) у повному обсязі ( $P_n$ ) при мінімальних часових витратах ( $f_2$ ):

$$\begin{aligned} P &\geq P_n ; \\ f_1 &\rightarrow \min; \\ f_2 &\rightarrow \min . \end{aligned} \quad (1)$$

На початковому етапі проектування роботизованих систем, як правило, користуються обмеженим набором основних технічних характеристик (параметрів) РС. Розширення цього переліку здійснюється з урахуванням специфіки розроблюваної концепції, а також з урахуванням характеристик, що здійснюють істотний вплив на критеріальні показники. Для кількісної оцінки ступеня задоволення вимог, що пред'являються до РС, доцільно виділити показники, які характеризують повноту та якість виконання операцій, котрі пов'язані з навігацією та застосуванням РМ ( $y_1$ ), а також повноту та якість реалізації у РМ інтелектуальних функцій ( $y_2$ ).

Показник  $y_1$  розраховується за формулою

$$y_1 = \sum_{i=1}^s \alpha_i \cdot k_i \cdot \frac{m_i}{M_i}, \quad (2)$$

де  $\alpha_i$  – коефіцієнт, що характеризує значимість операцій  $i$ -го типу (у більшості випадків це очікувана частота появи операцій  $i$ -го типу),

$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ ;  $k_i$  – коефіцієнт, що характеризує якість виконання операцій  $i$ -го типу;  $m_i$  – число реалізованих РМ операцій  $i$ -го типу досліджуваної РС за період виконання поставленого завдання;  $M_i$  – потрібне число операцій  $i$ -го типу, яке повинно бути реалізовано РМ у процесі виконання поставленого завдання;  $s$  – кількість типів операцій, необхідних для виконання поставлених завдань.

Для розрахунку показника (2) складається перелік усіх типів операцій, які підлягають виконанню. Цей перелік має враховувати повний діапазон усіх можливих подій, що прогнозуються в ході роботи РМ.

Показник повноти і якості виконання РС інтелектуальних функцій (реагування на ситуаційні зміни, обробка та розпізнавання мовних і зорових образів, визначення оптимальних траєкторій руху РМ, розпізнавання (виявлення) та вирішення задач розподілу робіт між РМ і т.п.) розраховується за формулою

$$y_2 = \sum_{i=1}^r q_i l_i \frac{n_j}{N_j}, \quad (3)$$

де  $r$  – кількість типів інтелектуальних функцій, які повинні виконуватись РМ;  $q_i$  – коефіцієнт, що характеризує ступінь відповідностей функцій  $i$ -го типу необхідним;  $l_i$  – коефіцієнт, що характеризує вагу функції  $i$ -го типу (у більшості випадків це очікувана частота використання  $i$ -ої функції),  $\sum_{i=1}^n l_i = 1$ ;  $n_i$  – число реалізованих інтелектуальних функцій  $i$ -го типу за певний час;  $N_i$  – загальна кількість реалізацій функцій  $i$ -го типу, що необхідна для виконання поставлених завдань.

Для обґрунтування вимог до вищевказаних показників на основі рішення багатокритеріальної задачі оптимізації (1) скористаємося наступним підходом [3]. Усі можливі варіанти побудови РС формально описуються координатами точки в багатовимірному просторі параметрів. Кожній точці цієї області (тобто варіанту РС) ставляться відповідно чисельні значення зазначених показників ефективності (1). Визначення показників ефективності здійснюється за допомогою теоретико-експериментального методу на основі використання експериментальних макетів системи, спеціальних методик оцінки ефективності та моделей функціонування РС. Знайдені критеріальні функції відображають залежність  $i$ -го показника ефективності від досліджуваних параметрів системи ( $y_1$ ,  $y_2$ ). Аналіз впливу різних параметрів на показники ефективності та виявлення основних закономірностей і прихованих чинників, що впливають на ефективність варіантів РС, проводяться методами прикладного статистичного аналізу.

У результаті обчислювальних експериментів формується сукупність чисельних значень параметрів і показників ефективності, яка утворює базу даних для пошуку і вибору раціональної концепції побудови перспективної РС. Основна ідея пошуку такої концепції полягає у використанні наступного принципу: раціональний варіант побудови РС слід шукати поблизу точок

вибіркової множини, що мають досить високий рівень показників цільової та економічної ефективності. Таким чином, задані критеріальні функції носять чітко виражений вартісний (часовий) характер і визначаються в класі квадратичних поліномів, методи дослідження яких добре відомі [3].

Нехай РС описується двома параметрами  $y_1$  і  $y_2$ , а порівняння можливих варіантів РС здійснюється за двома критеріями  $f_1$  і  $f_2$ , які правомірно застосовувати в усьому діапазоні зміни параметрів  $y_1$  і  $y_2$ .

$$f_1 = A_0^1 + 2A_1^1 y + y^T A_2^1 y, \quad (4)$$

$$f_2 = A_0^2 + 2A_1^2 y + y^T A_2^2 y,$$

де  $A_0^1 = [\alpha_{00}^1]$ ;  $A_0^2 = [\alpha_{00}^2]$ ;  $A_1^1 = [\alpha_{01}^1 \alpha_{02}^1]$ ;  $A_1^2 = [\alpha_{01}^2 \alpha_{02}^2]$  – вільні члени апроксимуючого полінома, а також вектора апроксимуючих коефіцієнтів при перших ступенях параметрів;  $A_2^1 = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^1 & \alpha_{12}^1 \\ \alpha_{12}^1 & \alpha_{22}^1 \end{bmatrix}$ ;  $A_2^2 = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^2 & \alpha_{12}^2 \\ \alpha_{12}^2 & \alpha_{22}^2 \end{bmatrix}$  – симетричні позитивно визначені матриці квадратичної форми, які складаються з апроксимуючих коефіцієнтів при других ступенях параметрів РС;  $y = [y_1 y_2]^T$  – вектор параметрів системи.

Тут і надалі верхні індекси коефіцієнтів відповідають порядковому номеру приватного критерію, а нижні – номеру параметра РС.

Використовуючи правила матричного диференціювання, маємо

$$\frac{df_1}{dy} = \left[ \frac{df_1}{dy_1} \quad \frac{df_1}{dy_2} \right] = 2A_1^1 + y^T A_2^1; \quad (5)$$

$$\frac{df_2}{dy} = \left[ \frac{df_2}{dy_1} \quad \frac{df_2}{dy_2} \right] = 2A_1^2 + y^T A_2^2.$$

Координати безумовних екстремумів критеріальних функцій  $f_1$  та  $f_2$  визначаються таким чином:

$$\frac{df_1}{dy} = 0 \Leftrightarrow 2A_1^1 + y^T A_2^1 = 0 \Rightarrow opt y_1^T = -2A_1^1 (A_2^1)^{-1}; \quad (6)$$

$$\frac{df_2}{dy} = 0 \Leftrightarrow 2A_1^2 + y^T A_2^2 = 0 \Rightarrow opt y_2^T = -2A_1^2 (A_2^2)^{-1}.$$

Відповідно до критерію Сильвестра з позитивної визначеності симетричних матриць  $A_1^1$  та  $A_2^1$  виходить, що  $a_{11}^1 > 0$ ,  $a_{22}^1 > 0$ . Отже  $\frac{d^2 f_1}{dy_i^2} > 0$  і безумовні екстремуми критеріальних функцій  $f_i$  є мінімумами. Причому, відповідно до цього ж критерію матриці  $A_1^2$  та  $A_2^2$  невироджені, тобто рішення (6) існує і єдине [3].

Таким чином, варіанти РС зі знайденими характеристиками, які відповідають точці А ( $opt y_1^1$ ;  $opt y_2^1$ ) і точці В ( $opt y_1^2$ ;  $opt y_2^2$ ) є оптимальними

за критеріями  $f_1$  та  $f_2$  відповідно, якщо вони належать області допустимих рішень. У тому випадку, коли точки А або В не належать області допустимих рішень, необхідно провести пошук раціонального варіанта системи в області існування паретооптимальних РС. Для нашого випадку паретооптимальна лінія АВ (між т. А і т. В) знаходиться всередині області, обмеженої головними осями не вироджених сімейств ліній другого порядку  $f_1$  і  $f_2$ . При повороті координатних осей завжди можна добитися їх паралельності головним осям сімейства  $f_2$ . Тому в повернутій системі координат чисельне значення змінної  $y_1$  завжди буде знаходитися в діапазоні  $[opt y_1^1, opt y_2^1]$ . Крім того, при використанні ще й перетворень системи координат що «розтягуються», чисельні значення усіх паретооптимальних змінних  $Z_j$  знаходяться всередині багатовимірного паралелепіпеда  $[opt Z_j^1, opt Z_j^2]$ ,  $\forall j = [1, q]$ . Будь-якому значенню  $Z_1$  (що знаходиться в діапазоні  $[opt Z_1^1, opt Z_2^1]$ ) відповідає цілком конкретне значення  $Z_2$  (яке знаходиться в діапазоні  $[opt Z_1^1, opt Z_2^1]$ ), що забезпечує точці з координатами  $(Z_1, Z_2)$  властивість належати області рішень, ефективних по Парето:

$$\forall \{Z_1 \mid Z_1 \in [opt Z_1^1, opt Z_2^1]\} \exists \{Z_2 \mid Z_2 \in [opt Z_2^1, opt Z_2^2]\} \Rightarrow (Z_1, Z_2) \in \Pi(Y), \quad (7)$$

де  $\Pi(Y) \in H$  – область паретооптимальних рішень.

При цьому чисельне значення критеріїв у будь-якій точці допустимого перетвореного простору параметрів визначається за формулами

$$\begin{aligned} f_1 &= \sum_{j=1}^2 (Z_j - Z_{0j})^2 + k_1, \\ f_2 &= \sum_{j=1}^2 \lambda_j Z_j^2 + k_2, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $Z_j$  - змінні в новій системі координат;  $Z_{0j}$  – координати центру критеріальної гіперсфери;  $\lambda_j$  – власні значення квадратичної форми  $f_2$ ;  $k_1$  – екстремальне значення критерію  $f_1$  в центрі гіперсфери;  $k_2$  – екстремальне значення критерію  $f_2$  в центрі гіпереліпсоїда ( $Z_{0j}=0$ ) [3].

Знаючи координати центру сімейства гіперсфери ( $Z_{0j}$ ), власні значення квадратичної форми  $f_2(\lambda_j)$  і варіюючи значеннями координати  $Z_1$  в діапазоні  $[0, Z_{01}]$ , можна знайти інші координати точок, що належать лінії Парето. Застосування зворотних перетворень системи координат дозволяє визначити паретооптимальні параметри РС у вихідній системі координат.

### Висновки

Таким чином, за допомогою запропонованого методичного апарату параметричного синтезу РС, реалізованого на ПЕОМ, визначаються оптимальні (паретооптимальні) параметри і здійснюється вибір раціонального варіанта побудови інтелектуальної РС, що забезпечить гарантоване виконання поставлених завдань у повному обсязі при мінімальних вартісних і часових витратах.

### Список літератури

1. Ямпольский Л.С. Система автоматизированного проектирования робототехнологических комплексов / Ямпольский Л.С., Калинин О.М. – К: Знание, 1982. – 18 с.
2. Герасимов Б.М. Человеко-машинные системы принятия решений с элементами искусственного интеллекта / Герасимов Б.М., Тарасов В.А., Токарев И.В. – К: Наук. думка, 1993. – 184 с.
3. Сложные технические и эргатические системы: Методы исследования : [Монография] /А.Н. Воронин, Ю.К. Зиатдинов, А.В. Харченко, В.В. Осташевский. – Харьков: Факт, 1997. – 240 с.
4. Военный энциклопедический словарь / Пред. Гл. ред. комиссии Н.В. Огарков. – М.: Воениздат, 1983. – 863 с.

### Аннотация

*Предложен подход и методический аппарат параметрического синтеза, с помощью которых определяется рациональный вариант построения интеллектуальной роботизированной системы специального назначения.*

***Методический аппарат, параметрический синтез, параметры, интеллектуальная роботизированная система.***

### Annotation

*The approach and methodological apparatus of parametric synthesis, which is determined by using a rational way of developing intelligent robotic system for special purposes.*

***Methodological apparatus, parametric synthesis parameters, intellectual robotic system.***