

УДК 621.38(62-52)

62-52

Д.О. Дубина, аспір.

Б.В. Ігнатенко, д.т.н.

Національний технічний університет України "КПІ"

## АВТОМАТИЗОВАНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ГНУЧКОЇ ВИРОБНИЧОЇ СИСТЕМИ

(Представлено проф. Л.С. Ямпольським)

*Пропонується підхід до дослідження ієрархічних об'єктів на основі автоматизованої імітаційної моделі з інтелектуалізованими пошуковими компонентами в її структурі. Особливістю подання об'єкта при цьому є опис дискретно-подійного характеру процесів на його верхніх рівнях з використанням розробленого апарата сіток Петрі, а на нижньому – диференціальних рівнянь динаміки компонент, що входять до складу об'єкта. Наведено результати машинних експериментів над моделлю гнучкого виробничого модуля.*

**Вступ.** Комплексна автоматизація виробництва торкається не тільки технологічних операцій та процесів керування, але й задач аналізу і синтезу гнучкої виробничої системи (ГВС), причому питання проектування та переналагодження технологічного процесу є найбільш актуальними, тому що від них значною мірою залежить майбутня ефективність ГВС у цілому.

Автоматизація синтезу ГВС і аналіз її ефективності супроводжуються створенням математичної моделі, яка адекватно описує процеси, що відбуваються в ній, і в той же час має помірну обчислювальну складність. Такі вимоги не легко задовольнити, використовуючи єдиний формальний підхід до опису всіх аспектів функціонування ГВС, тому для їх ідентифікації використовують автоматизовані імітаційні моделі (АІМ), що дозволяють на різних рівнях ієрархії використовувати відповідні семантичні засоби. Взаємодія між рівнями ієрархії, дослідження і модифікація параметрів таких моделей організовується за допомогою інтелектуалізованих компонент – пошукових модулів (ПМ) [1].

Як на етапі проектування, так і на етапі переналагодження ГВС важливою є проблема максимального використання наявних ресурсів устаткування. Недовикористання виробничих потужностей призводить до зниження ефективності системи і підвищення витрат на виготовлення виробів. Нижче пропонується підхід до збільшення ефективності використання устаткування ГВС за рахунок перерозподілу динамічних ресурсів системи за результатами прогону АІМ. Даний підхід розглядається на прикладі узгодження часу виконання технологічних операцій гнучкого виробничого модуля (ГВМ), що включає в себе промисловий робот (ПР), з цикловим часом виробничої системи.

Для ефективного дослідження роботи ГВМ і його окремих компонент необхідно створити АІМ, що, з одного боку, буде відображати дискретні асинхронні паралельні процеси, що відбуваються в системі (виконання елементарних операцій, рух деталей, інструмента, керуючих сигналів тощо), а з іншого боку – неперервні процеси, що відбуваються у функціонуючому устаткуванні (рух робочого елемента верстата, переміщення схвата ПР, перехідні процеси в двигунах тощо). При створенні такої моделі вирішуються наступні задачі: а) вибір апарата опису дискретних процесів і створення дискретної моделі ГВМ; б) визначення алгоритмів роботи ПМ1, що на підставі аналізу дискретної моделі синтезує ефективне керування ГВМ і організовує взаємодію з нижнім рівнем ієрархії; в) вибір апарата опису неперервних процесів і створення неперервної моделі устаткування; г) визначення алгоритмів роботи ПМ2, що на підставі аналізу неперервної моделі устаткування проводить інтенсифікацію його роботи, тим самим визначаючи нові часові параметри функціонування дискретної моделі; д) практична реалізація АІМ.

**Створення дискретної моделі.** Для опису дискретних асинхронних паралельних процесів у ГВМ авторами була розроблена модифікація сіток Петрі, що відповідає вимогам адекватності й урахування часових параметрів функціонування ГВМ – гнучкої сітки Петрі (ГСП) із властивостями часових та інгібіторних сіток Петрі. Запропоновано алгоритм побудови дерева досяжності й визначення найважливіших властивостей ГСП, таких як обмеженість та живість

[2]. Для обмеженої та живої ГСП (а цими властивостями повинна володіти модель будь-якої працездатної системи) за допомогою дерева досяжності можна визначити всі можливі послідовності зміни стану моделі ГВМ і синтезувати ефективне керування роботою ГВМ. При цьому час роботи ГВМ залежить від часів виконання устаткуванням елементарних рухів і операцій, які у термінах ГСП є атомарними. В АІМ ці часові параметри можуть корегуватися за рахунок дослідження моделей більш низького рівня ієрархії, підвищуючи тим самим загальну продуктивність ГВМ.

**Алгоритм функціонування ПМ1.** Задачею ПМ1 є постановка серії експериментів над ГСП-моделлю ГВМ, спрямованої на пошук закону керування і параметрів системи, при яких час виконання ГВМ технологічного процесу (ТП) буде узгоджено з заданим тактом синхронізації виробничого процесу ГВС. Для розв'язання цієї задачі використовується алгоритм пошуку критичної операції:

**Вхідні дані:** час такту синхронізації  $[T_u]$ ; ГСП, що описує роботу ГВМ; задані відрізки часу виконання елементарних операцій  $t_{ni}$ ; цільові функції для кожної операції  $f_i(t)$  у вигляді залежностей ступеня використання ресурсів устаткування від часу виконання операції (при  $f_i(t) = 0$  ресурси не використовуються, а при  $f_i(t) = 1$  ресурси використовуються на 100 %); значення  $\Delta f$ , що визначає точність роботи алгоритму і його швидкодію.

#### **Алгоритм 1.**

**Крок 1.** Прийняти  $t_{ni}$  як поточні значення часових параметрів  $t_i$  і визначити значення функцій  $f_i(t_i)$ .

**Крок 2.** Побудувати дерево досяжності та діаграму Ганта ГСП і визначити послідовність критичних операцій  $\theta$  при реалізації ТП.

**Крок 3.** Обчислити час виконання ТП:  $T_u = \sum_{\theta} t_i$ .

**Крок 4.** Якщо  $T_u > [T_u]$ , то перейти до кроку 5, інакше перейти до кроку 10.

**Крок 5.** Визначити операцію  $j$ , для якої  $f_j(t_j) = \min_{\theta} f_i(t_i)$ .

**Крок 6.** Якщо  $f_j(t_j) < 1$ , збільшити значення  $f_j(t_j)$  на  $\Delta f$ , інакше перейти до кроку 10.

**Крок 7.** За відомими  $f_j(t_j)$  відшукати нове значення  $t_j$ .

**Крок 8.** Змінити час реалізації операції  $j$  новим значенням  $t_j$ .

**Крок 9.** Повернутися до кроку 2.

**Крок 10.** Обчислити значення показника якості роботи ГСП у цілому

$$f(T_u) = \sum_{\theta} f_i(t_i) t_i / \sum_{\theta} t_i.$$

**Крок 11.** Закінчити роботу алгоритму.

При синтезі ГВМ можлива модифікація алгоритму, яка шукає розв'язок у вигляді  $T_u > [T_u]$ , при виконанні умови  $\forall i, j : f_i(t_i) = f_j(t_j)$ . У цьому випадку все устаткування, що входить у ГВМ, буде працювати з однаковою віддачею, однак підвищиться обчислювальна складність алгоритму.

Відзначимо, що функція  $f_i(t)$  реалізується ПМ більш низького рівня ієрархії (у т.ч. і ПМ2), при цьому виконання кроків 1 і 7 алгоритму полягає в запуску ПМ і використанні результату його роботи.

**Створення неперервної моделі.** Для моделювання неперервних процесів традиційно використовується апарат диференційного числення. Як об'єкт моделювання був обраний ПР з наступних причин: 1) ПР є динамічно і кінематично найбільш складним елементом ГВМ, тому результати, отримані при його моделюванні, можуть бути поширені на інші типи устаткування ГВМ; 2) ПР у складі ГВМ в основному виконує допоміжні операції, що займають значну частину часу та не зв'язані з технологічними режимами обробки/складання.

Математична модель ПР визначається як залежність  $\mathbf{u} = f(\mathbf{X}, \mathbf{m})$ , де  $\mathbf{u}$  – керуючі впливи на двигуни маніпуляційної системи (МС) ПР,  $\mathbf{X}$  – траєкторія руху схвату в абсолютних координатах,  $\mathbf{m}$  – параметри МС ПР. Обчислення такої залежності реалізується в чотири етапи.

**Етап 1.** Визначення траєкторії руху МС в узагальнених координатах у вигляді  $\mathbf{q} = f(\mathbf{X}, \mathbf{k})$ , де  $\mathbf{k}$  – кінематичні характеристики МС.

*Етап 2.* Визначення сил і моментів, що розвиваються у кінематичних парах, у вигляді  $\mathbf{M} = f(\mathbf{q}, \mathbf{k}, \mathbf{d})$ , де  $\mathbf{d}$  – динамічні характеристики МС.

*Етап 3.* Визначення сил і моментів, що розвиваються двигунами, у вигляді  $\mathbf{Q} = f(\mathbf{M}, \mathbf{p})$ , де  $\mathbf{p}$  – характеристики механізмів передачі руху від двигунів до відповідних ланок МС.

*Етап 4.* Визначення керуючих впливів у вигляді  $\mathbf{u} = f(\mathbf{Q}, \mathbf{e})$ , де  $\mathbf{e}$  – параметри двигунів МС.

У залежності від необхідного ступеня адекватності моделі до об'єкта моделювання можна варіювати кількість факторів, що впливають на функціонування ПР, тим самим змінюючи обчислювальну складність моделі.

**Алгоритм функціонування ПМ2.** Відповідно до алгоритму функціонування ПМ1, ПМ2 повинен виконувати дві задачі: 1) визначення значення функції  $f_i(t)$  за відомим значенням  $t$  (крок 1 алгоритму 1); 2) визначення значення параметра  $t$  за відомим значенням функції  $f_i(t)$  (крок 7 алгоритму 1).

Задача 1 розв'язується за нижченаведеним алгоритмом.

### **Алгоритм 2.**

*Крок 1.* За відомим значенням часу  $t$  обчислити траєкторію руху  $\mathbf{X}$ .

*Крок 2.* За траєкторією  $\mathbf{X}$  і параметрами об'єкта моделювання обчислити керуючі впливи  $\mathbf{u}$  відповідно до математичної моделі.

*Крок 3.* За розрахованим значенням керуючих впливів  $\mathbf{u}$  і відомим граничним значенням керуючих впливів  $\mathbf{u}_{\text{гр}}$  обчислити значення цільової функції  $f_i(t) = \max_j \frac{|u_j|}{u_{\text{сп}j}}$ , де  $j = 1..n$ ,  $n$  – кількість двигунів ПР.

Тут наводиться найпростіший варіант формування цільової функції  $f_i(t)$ , яка, у загальному випадку, може враховувати не тільки обмеження на керуючі впливи двигунів, але й енерговитрати, спрацювання устаткування й інші параметри, що можуть обчислюватися на підставі математичної моделі ПР.

Задачу 2 неможливо розв'язати аналітично, тому що функція  $f_i(t)$  не є взаємно однозначною, а, отже, не має зворотної функції. Тому тут для одержання результату необхідно використовувати чисельні методи розв'язання рівнянь, такі як метод Ньютона, метод січних, метод «золотого перетину» тощо, причому для обчислення значення функції в точці чергового наближення може використовуватися алгоритм 2. Для постановки серії експериментів застосовується наступний алгоритм.

### **Алгоритм 3.**

*Крок 1.* Задати початкові наближення часу  $t$ , точність перебування розв'язання  $\varepsilon$ .

*Крок 2.* Розрахувати значення функції  $f_i(t)$  у точці чергового наближення відповідно до алгоритму 2.

*Крок 3.* Порівняти отримане значення функції  $f_i(t)$  із шуканим.

*Крок 4.* Якщо точність отриманого розв'язання задовільна –  $|f_i(t) - f_u| < \varepsilon$ , закінчити роботу алгоритму.

*Крок 5.* Відповідно до обраного чисельного методу рішення рівнянь визначити значення наступного наближення часу  $t_{i+1}$ .

*Крок 6.* Перейти до кроку 2.

Слід зазначити, що ефективність алгоритму прямо залежить від ефективності обраного методу чисельного розв'язання рівнянь.

**Основи побудови й інформаційного обміну АІМ.** Розглянемо структуру і склад програмного комплексу, що включає ПМ1 і ПМ2 як підпрограми та забезпечуючого їх функціонування (рис. 1): *інтерфейс користувача* забезпечує взаємодію користувача з системою керування та базою даних; *система керування* призначена для ініціювання початку роботи ПМ і диспетчеризації потоків даних; *система інтерпретації рішення* призначена для оцінки результатів роботи ПМ1 і формування рекомендацій щодо удосконалення об'єкта моделювання з точки зору розв'язання поставленої перед АІМ задачі; *блоки ПМ1 і ПМ2*, задачі й алгоритми функціонування яких докладно розглянуті раніше; *блоки ІМ1 і ІМ2*, що є блоками імітації, у яких реалізовані моделі ГВМ (ГСП – у ІМ1 і неперервна модель устаткування – у ІМ2). База

даних – система збереження і пошуку інформації – організовується за допомогою сучасного ПО типу FoxPro, Oracle тощо.

Для практичної реалізації інформаційного обміну в АІМ необхідно визначити схему обміну інформацією між різними блоками, а також вхідні та вихідні слова для ПМ1, ПМ2 і системи інтерпретації результату.

Безпосередня передача всіх необхідних даних від блоку до блоку при практичній реалізації спричинила б необхідність викликів підпрограм із занадто великою кількістю параметрів, що небажано. Тому пропонується схема обміну інформацією, за якою передаються не самі дані, а посилання на них, наприклад, замість усіх кінематичних і динамічних параметрів ПР у ПМ2 передається номер моделі, за яким з бази даних визначаються необхідні параметри. Крім того, при такому підході спрощується визначення вхідних і вихідних слів різних блоків.

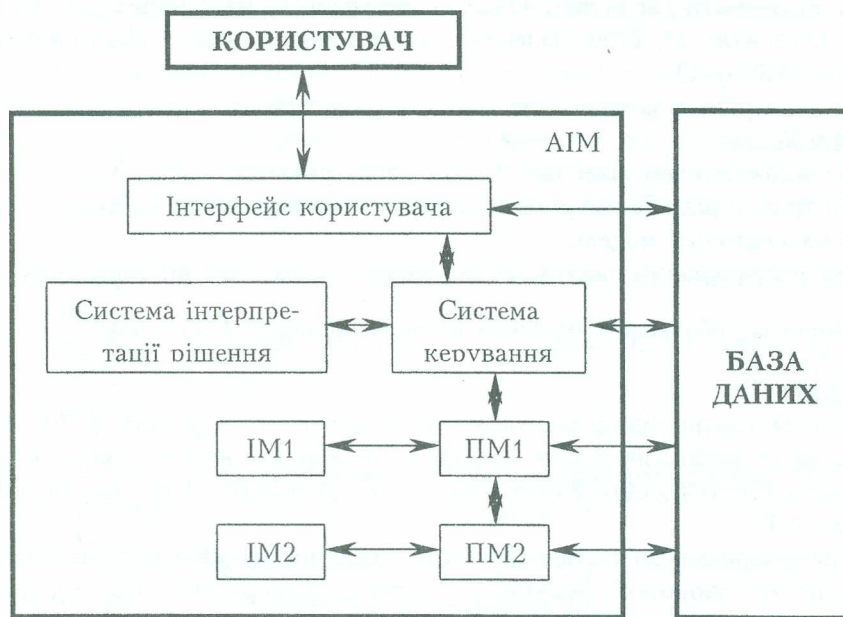


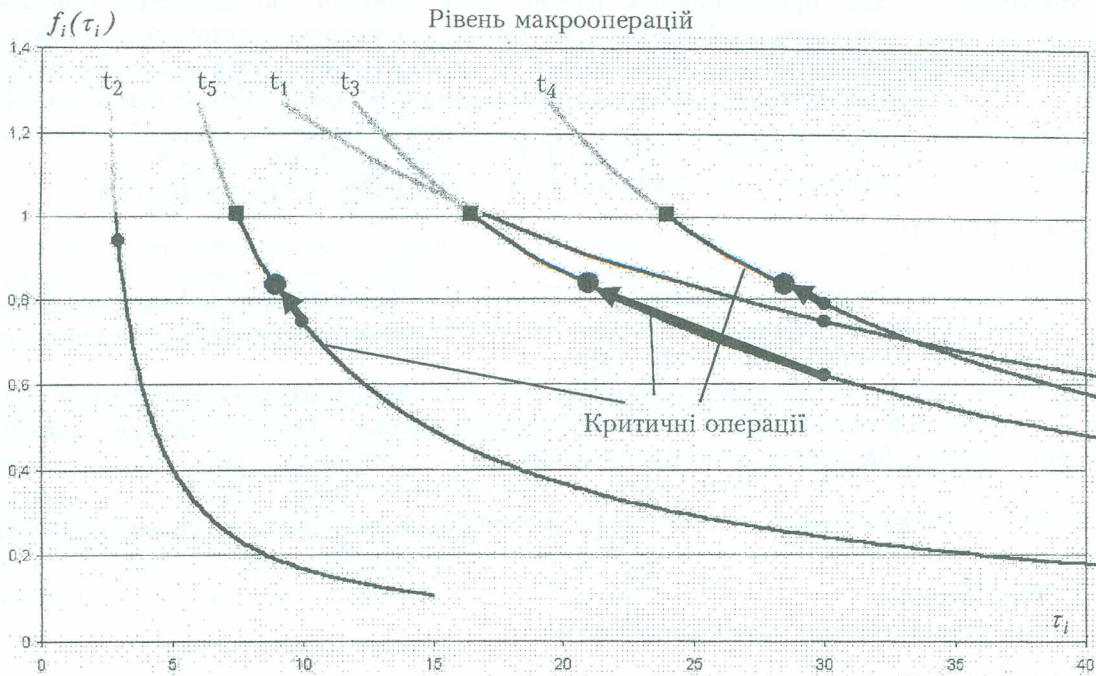
Рис. 1. Структура АІМ

**Функціонування АІМ.** Як об'єкт моделювання розглянутий ГВМ складання і зварювання. Ієрархічна модель ГВМ містить у собі п'ять рівнів подання: макрооперацій, елементарних операцій, макрорухів, елементарних рухів і рівень динамічних моделей. Перші (верхні) чотири рівні описані за допомогою ГСП-моделей, п'ятий (нижній) – за допомогою диференціальних рівнянь динаміки устаткування.

Дослідження моделі ГВМ на рівнях подання його у вигляді ГСП проводить ПМ1 відповідно до алгоритму 1. В задачу ПМ1 входить пошук критичних операцій у досліджуваній моделі, інтенсифікація їх за допомогою ПМ2 або ПМ1, що досліджує модель більш низького рівня, і навантаження (тобто корегування параметрів) отриманим результатом моделі більш високого рівня ієрархії.

На нижньому, п'ятому, рівні ієрархії неперервну модель устаткування досліджує ПМ2 за алгоритмом постановки серії експериментів (алгоритм 3), забезпечуючи тим самим інтенсифікацію роботи досліджуваного устаткування, яке виконує заданий рух. Отриманим значенням часу виконання заданого руху навантажується ГСП-модель більш високого, четвертого, рівня.

Таким чином, за допомогою пошукових модулів модель четвертого рівня ієрархії корегується шляхом дослідження моделей п'ятого рівня, модель третього рівня – шляхом дослідження моделей четвертого тощо. Інтенсифіковані часові значення, отримані для першого рівня (рівня макрооперацій), дозволяють одержати рішення для ГВМ у цілому. На рис. 2 проілюстрований хід інтенсифікації критичних макрооперацій ( $t_3, t_4, t_5$  на верхньому графіку) і рішення, з урахуванням проведеної інтенсифікації, задачі узгодження часу виконання технологічних операцій ГВМ ( $T_u = 70$  с) із цикловим часом системи  $[T_u] = 60$  с (нижній графік).



- - вхідне значення
- - значення після інтенсифікації
- - граничне значення

$$f(T_u) = \frac{\sum_i f_i(t_i)t_i}{\sum_i t_i}$$

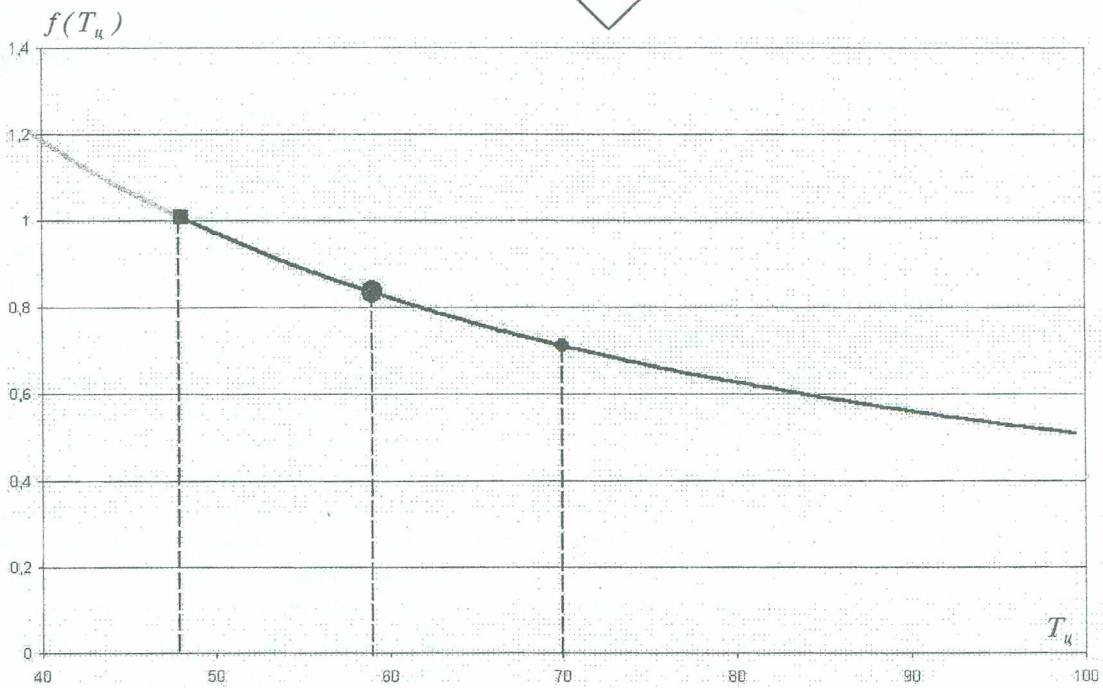


Рис. 2. Результат інтенсифікації ГПМ

**Висновки.** У ході проведених досліджень було показано, що адекватно моделювати і розв'язувати задачу інтенсифікації роботи ГВС можна, застосовуючи автоматизовані імітаційні моделі, які сполучають у собі ієрархічну модель об'єкта з різною семантикою опису функціонування на різних рівнях ієрархії з пошуковими модулями, в задачу яких входить корегування параметрів моделей верхніх рівнів ієрархії за допомогою дослідження моделей більш низьких рівнів.

#### **ЛІТЕРАТУРА:**

1. Управление дискретными процессами в ГПС / Л.С. Ямпольский, З. Банашак, К. Хасагава, Б. Круг, К. Такахаши, А.В. Борусан. – К.: Техника; Вроцлав: Изд-во Вроцлав. политехн. ин-та; Токио: Токосё, 1992. – 251 с.
2. Дубина Д. А., Ямпольский Л.С., Пуховский Е.С. Использование модифицированных сетей Петри при моделировании гибких производственных систем // Автоматизация виробничих процесів. – 2001. № 2(13). – С. 68–74.

ДУБИНА Денис Олександрович – аспірант Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– моделювання гнучких виробничих систем.

ІГНАТЕНКО Борис Васильович – доктор технічних наук Національного технічного університету України “КПІ”, завідувач відділу Науково-дослідного інституту системних технологій.

Наукові інтереси:

– програмні технології створення систем управління базами даних;  
– нові інформаційні технології.

Подано 19.09.2001