

П.В. Кузьмін, О.А. Лавров, О.І. Лісовиченко, К.Б. Остапченко, Л.С. Ямпольський

МОДИФІКАЦІЯ АПАРАТА СІТОК ПЕТРІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ З ІЄРАРХІЧНОЮ СЕМАНТИКОЮ ПОДАННЯ ПРОЦЕСІВ

Аналізується еволюція модифікацій апарата сіток Петрі з метою ідентифікації, моделювання та верифікації процесів складних систем, а також запропоновано нові підходи щодо створення інтелектуалізованих гнучких комп'ютеризованих систем.

Ключові слова: сітка Петрі, моделювання, гнучка комп'ютерно-інтегрована система, агрегатна система, інтелектуалізована система, нештатний режим.

І. Вступ

Інтеграція різних матеріальних, енергетичних та інформаційних процесів, що відбуваються в гнучких комп'ютерно-інтегрованих системах (ГКІС), до того ж таких, що характеризуються багатонаменклатурністю оброблюваних виробів, дозволяють розглядати такі системи, як складні, динамічні, паралельні з циклами, які повторюються. До найбільш ефективних засобів подання та дослідження процесів ГКІС можна віднести графо-аналітичні методи, в тому числі і ті, що базуються на теорії сіток Петрі (СП-методи) [1]. Перевагою цієї теорії є те, що вона надає можливість моделювання динаміки ГКІС на різних рівнях абстракції (як на рівні виробничих процесів, так і на рівні алгоритмізації та синхронізації задач керування процесами), а також на різних рівнях інтегрованості ГКІС та їх окремих підсистем, функціональних модулів, елементів і вузлів технологічного обладнання тощо [12].

З іншого боку, ГКІС може розглядатися як логічна система. Типова логічна система складається з потоків товарів (вантажів) та послуг, а також спостереження (вивчення) і керування (регулювання) цими потоками [20]. Серед складових процесів ГКІС найбільш типовими є транспортування, розподілення і власне виготовлення виробів. Координація цих процесів і складових є головним об'єктом керування логічної системи, тобто мета полягає в досягненні добре синхронізованого режиму динамічної взаємодії компонент. Серед багатьох якісних показників (таких, як «вузькі місця» або простоювання), які визначають режим функціонування системи, блокування процесу (тупикові ситуації) з причин наявності «критичного циклу» в послідовності дій [17], а також ймовірності виникнення нештатних режимів роботи системи через вплив на неї надзвичайних факторів [10] відіграють найбільш суттєву роль.

В межах даної статті можна відокремити три основні задачі, розкриття і комплексне урахування яких певною мірою сприятиме розв'язанню загальної проблеми підвищення ефективності створення, дослідження і верифікації ГКІС, а саме:

- ◆ розкриття визначальних властивостей процесів ГКІС і методів формалізованого подання останньої як об'єкта моделювання, планування і керування;
- ◆ обґрунтування апарата сіток Петрі як базового для ідентифікації та верифікації процесів;
- ◆ аналітична систематизація еволюції розвитку основних модифікацій базового СП апарата.

Структурно стаття побудована таким чином, щоб послідовно висвітлити шляхи до розв'язання вище означених задач із застосуванням для цього нових підходів.

II. Гнучка КІС як об'єкт моделювання, планування і керування

Сучасна КІС* являє собою складний науково-виробничий комплекс, який реалізує комплексно-автоматизоване виробництво, що оперативного переналагоджується у визначеному асортименті продукції. Така система характеризується технологічною, структурно-організаційною, параметричною гнучкістю та гнучкістю потужності [15]. Термін «інтегрована» передбачає узгодження складових систем: необхідного і достатнього за своїм технологічним

* Тут і надалі мова йде про системи виробничого призначення. Проте, всі міркування і викладені далі підходи щодо аналізу і синтезу складних систем можуть використовуватись для ГКІС будь-якої природи (організаційних, економічних, технічних тощо).

призначенням для визначеної номенклатури виробів основного устаткування; засобів сервісного обслуговування промислових роботів і упорядкування середовища під групову технологію; матеріальних потоків і засобів їх накопичення, перевантаження і розподілення по обробляючих ресурсах; підсистем автоматизованого проектування керуючих програм, технологічного оснащення та типових технологічних процесів виготовлення виробів і, передусім, власне об'єктів виробництва певної номенклатури.

Отже, має сенс говорити про ГКІС, коли різнономенклатурні матеріальні потоки, відмінне за класом і призначенням устаткування, підсистеми підготовки і керування виробництвом функціонують, а диспетчеризація матеріальних та інформаційних сигналів і керуючих команд здійснюється за допомогою засобів комп'ютерної підтримки і забезпечення складових гнучкості.

Всім стадіям виробничого циклу в ГКІС притаманні три рівня в ієрархії керування: стратегічний, тактичний, виконавчий. Підрозділи ГКІС на стадіях підготовки, освоєння та виготовлення виробів мають близький набір задач: при *плануванні* – оптимальний розподіл об'ємів продукції на календарний період часу по обробляючих ресурсах; при *керуванні* – диспетчерування в реальному часі інформаційних і матеріальних потоків (заготівок, напівфабрикатів, готових виробів, керуючих програм, засобів технічного забезпечення та завдання операторам і лінійному персоналу). Оперативне керування і планування виробництва являє собою тактичний і стратегічний рівні керування. Зокрема, на *виконавчому* рівні ставляться задачі оптимізації функціонування обробляючих ресурсів, а на *тактичному* і *стратегічному* рівнях – відповідно задачі диспетчерування матеріальних та інформаційних потоків і оптимального планування робочих ресурсів. В результаті розв'язання задач диспетчерування на тактичному рівні план адаптується до зміни виробничої ситуації. Для підвищення надійності функціонування ГКІС у цілому необхідно автоматично перерозподіляти матеріальні/інформаційні потоки, що пов'язано з побудовою алгоритмів керування останніми у ГКІС.

Загальноприйнятого визначення диспетчерського керування немає, проте ним успішно користуються розробники автоматизованих систем керування виробництвом. Зокрема, для ГКІС на рівні дільниці задачею диспетчерського керування є координація роботи складових обробляючих модулів такої системи між собою і з автоматизованою транспортно-складською системою (АТСС). Розгляд шляхів розв'язання цієї задачі із загальних позицій дозволяє створити єдиний підхід до розробки різних автоматизованих систем диспетчерського керування в ГКІС, але які забезпечують найвищу ефективність функціонування останніх (максимальне використання обробляючих ресурсів і завантаження компонентів АТСС, а також відсутність простоювань компонентів ГКІС через блокування, пов'язане з використанням ресурсів).

Виробничий процес в ГКІС складається з окремих асинхронних і узгоджених технологічних процесів, що відбуваються одночасно на різних обробляючих ресурсах. Використання паралельних процесів дозволяє легко структурувати систему, а кожний процес подати як самостійну програмну одиницю. При цьому ГКІС легко піддається ідентифікації та дослідженню.

III. Модифіковані сітки Петрі як базовий апарат для моделювання процесів ГКІС

На підставі вищезгаданого можна констатувати наступне. *Перший напрямок* у розвитку методів абстрактного математичного моделювання, пов'язаний з дослідженням абстрактних автоматів, логічних сіток та рекурсивних функцій, спрямований, головним чином, на розв'язання принципових питань абстрактної математичної логіки функціонування дискретних систем.

Другий напрямок пов'язаний, у першу чергу, з теорією і практикою імітаційного моделювання, а також з поданням складних систем і процесів, що в них, відбуваються, формальною мовою високого рівня.

Неузгодженість цих напрямків полягає в тому, що абстрактність теоретичних досліджень і узагальнень першого напрямку утруднює використання їх методології та результатів при розв'язанні задач не тільки структурного синтезу і аналізу складних систем, а й визначення і перевірки кількісних та якісних характеристик останніх. В той же час, обмеженість підходів і можливості використання результатів другого напрямку розвитку моделювання виявляється при необхідності розкриття структурованої сутності об'єкта досліджень, а також значно гіршого, з точки зору наочності, відбиття логічних (і функціональних) зв'язків і особливостей взаємодії між компонентами об'єкта досліджень.

Ось чому формальний апарат моделювання, який базується на сіткових і графо-аналітичних методах, займає проміжну нішу між наведеними вище напрямками. Чи не найпоширенішими на сьогодні і не найефективнішими і потужними в цій ніші є формалізми сіток Петрі та їх розширення (модифікації) як універсального, так і конкретного (прикладного) застосування. Дійсно, класичні СП-методи наближаються до описаних можливостей абстрактних кінцевих автоматів, відбиваючи при цьому і логічну сутність процесів, що мають місце в об'єкті моделювання (ОМ). Разом з тим, різноманітні розширення класичних СП-методів дозволяють досліджувати саме кількісні та якісні характеристики складних систем, в тому числі і розв'язувати питання підвищення ефективності функціонування через механізми прийняття рішень щодо спрямованості дії на вході останніх.

Розглянемо ретроспективно деякі основні модифікації СП-методів, які спрямовані, з одного боку, на адаптацію їх до ефективного розв'язання прикладних задач моделювання ГКІС, а з іншого – на підвищення власне їх виразних спроможностей та моделюючої потужності.

Класична СП-модель. В СП як базова інформація використовуються дані про логічний взаємозв'язок подій, а причинно-наслідковий зв'язок подій дається множиною відношень виду «умова (в СП, наприклад, це позиція P)-подія (наприклад, перехід T)». Послідовності подій відбиваються спрацюванням переходів. Виконання якоїсь умови пов'язане з появою маркера у відповідній позиції. Погодження про правила спрацювання переходів є засобом відбиття концепції причинно-наслідкових зв'язків між умовами та подіями в ОМ.

Означення 6.1. Сітка Петрі – це п'ятірка [6], [19]

$$N = (P, T, F, H, \mu_0), \quad (1)$$

де $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ – кінцеві непорожні множини позицій (станів місць) і переходів (подій) відповідно, причому $P \cap T = \emptyset$; $F: P \times T \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$, $H: T \times P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ – вхідна та вихідна функції відповідно (це функції інцидентності); $\mu_0: P \times K \rightarrow (0, 1, 2, \dots)$ – логічна функція початкового маркірування (розмітка) сітки; K – множина невід'ємних цілих чисел.

Графічним уявленням СП є дводольний орієнтований граф, що володіє двома типами вузлів-позицій і переходів, які спрямовано з'єднуються дугами таким чином, що дуга від p_i до t_j визначає цю позицію як вихідну. В СП допускається існування кратних вхідних і вихідних дуг (відповідно $\#(p_i, F(t_j))$ та $\#(p_i, H(t_j))$). Функції входу і виходу задаються множиною одинарних дуг-ребер, що зв'язують вершини мультиграфа, а саме: (t_j, p_i) та (p_i, t_j) . Маркування в СП може зображатися n -вимірним вектором $\mu = (\mu(p_1), \mu(p_2), \dots, \mu(p_n))$, де $\mu(p_i)$ – маркування i -ї позиції. Маркування СП, яке показують графічно маркерами-фішками в позиціях, може змінюватися в результаті спрацювання (запуску) переходу. Останній визначається запуском, якщо він є дозволеним, тобто коли $\mu(p_i) \geq \#f(p_i, F(t_j))$ для всіх p_i , які входять в $F(t_j)$. Результатом запуску будь-якого дозволеного переходу t_j є утворення нового маркування μ' . Рух маркерів у СП розпочинається при наявності бодай одного збудженого переходу в початковому маркіруванні. Якщо в СП є декілька одночасно збуджених переходів, то порядок їх спрацювання є невизначеним, і тоді можна сформулювати декілька послідовностей спрацювання переходів. Тому дуже важливим для аналізу роботи СП є поняття *досяжності* маркірування μ' безпосередньо з маркіруванням μ (тобто $\mu \xrightarrow{t_j} \mu'$), що є наслідком дії, в результаті якої після спрацювання переходу t_j з усіх його позицій виключається $F(p_i, t_j)$, а в кожному вхідну позицію додається $H(t_j, p_i)$ маркерів [12], [13].

Отже, функціонування СП – це послідовна зміна маркірувань при спрацюванні збуджених переходів, що визначається *функцією слідування* $z(\mu_j)$, яка вказує на можливість безпосереднього переходу μ до μ' . Можливі варіанти функціонування СП описує граф досяжності зі спрямованою дугою $\mu \xrightarrow{t_j} \mu'$, де $t_j \in T$. Якщо ж для деякого маркірування жоден з переходів спрацювати не може, то таке маркірування має назву *тупикового*. Перевірка умов досяжності (або коректності складення СП) є дуже трудомісткою задачею, яка і за умов її комп'ютерного розв'язання потребує значних часових і машинних витрат. Деякі з наведених далі у статті розширень СП-апарата стосуються саме проблеми створення коректних СП-моделей.

Інші модифікації, що розглядаються далі, є так би мовити, проблемно-орієнтованими і спрямовані на дослідження властивостей ОМ за умов обмеженості ресурсів або їх неефективного використання, а також при наявності елементів невизначеності.

Не удаючись тут до детального опису особливостей формалізованого подання процесів у ГКІС за допомогою модифікацій СП-апарата, як приклад коротко розглянемо спрощену формальну постановку задачі керування в ГКІС. Нехай модель ГКІС задано у вигляді СП (1), стан якої визначається маркіруванням μ . Керування в ГКІС можна задати функцією стану $Y = f(X)$, де $X = \{\mu_i | i = 1, m\}$, $Y = \{y_j | j = 1, n\}$ – множини станів ОМ і операторів керування переходами сітки в залежності від маркірування її позицій. Тоді алгоритм керування в ГКІС можна задати у формі модифікованої СП, а саме: $N_a = (N, \mu, \varphi, Y, f)$ при умовах $\forall p \in P$, $\forall \mu \in R(N): \mu(p) \leq 1 \quad \forall \mu_i, \mu_j \in R(N): \mu_i \rightarrow \mu_j$, $\forall t \in T \exists \mu_k, \mu_l \in R(N): \mu_k \xrightarrow{t} \mu_l$, причому N – є СП, що визначає структуру алгоритму керування; μ – множина станів ОМ; $\varphi: T \rightarrow 2^\mu$ – функція помітки переходів, яка ставить в однозначну відповідність підмножину станів ОМ; 2^μ – множина всіх підмножин μ ; Y – множина операторів керування; $f: \mu \rightarrow Y$ – функція, яка кожному маркіруванню ставить в однозначну відповідність оператор або сукупність операторів алгоритму керування.

Перевагою такого підходу є можливість формалізації процесів планування і керування на кожному з рівнів ієрархії структури задач ГКІС на єдиній методологічній і математичній основі.

Модифікації щодо структурного перетворення СП. Як вище зазначалося, при моделюванні складних ОМ типу ГКІС за допомогою СП-підходів виникають труднощі з перевіркою умов коректності побудови відбиваючої властивості об'єкта сіткової моделі, причому задачі синтезу і аналізу СП-моделей великої розмірності можуть бути віднесені до задач на повне перебирання, до NP-складних (дерево досяжності експотенціально зростає). Це, у свою чергу, утруднює виявлення і запобігання тупикових ситуацій (або «вузьких» місць) у ГКІС. Для розв'язання цієї проблеми було запропоновано три основні модифікації СП, які полягають у впровадженні правил структурного перетворення сіток на основі типових сіткових блоків (ТСБ) [12], складових типових елементів процесів (ТЕП), а також сіткових конструкцій (СК) [13].

Суть першої модифікації цього спрямування полягає у виділенні окремих фрагментів ТСБ, що описують послідовні, паралельні, альтернативні та безумовні виконання дискретних процесів. Далі, на підставі обмеженої кількості ТСБ, в аналізі коректності функціонування (або планування чи керування) процесів ГКІС у сітковій інтерпретації за допомогою запропонованого підходу здійснюється перетворення сіткової структури моделі в ієрархічну систему ТСБ. Через коректність ТСБ, за означенням, аналіз СП-моделі у цілому полягає в побудуванні дерева досяжності маркірувань для вершин ієрархії, що значно скорочує його тривалість.

Друга модифікація базується на типових складових елементах процесів ГКІС, які коректно за означенням інтерпретуються або безпосередньо складом ТСБ, або їх простими сполученнями. Тоді процедура синтезу/аналізу будь-якого процесу ГКІС полягатиме у деталізації процесу та ідентифікації виділених ТЕП з наступною їх інтерпретацією через ТСБ у висхідному (для задач синтезу) і низхідному (для задач аналізу) режимах. Введення ТЕП дозволяє не тільки значно скоротити часові та машинні витрати на верифікацію коректності СП-моделі, але й розширити можливості СП-підходів щодо розв'язання задач автоматизованого керування коректних процесів ГКІС.

Основою нововведень *третьої модифікації* є запровадження СК для ієрархічних перетворень в СП-моделі. Суть полягає у створенні можливості автоматизованого синтезу структур коректних алгоритмів планування, керування і функціонування ГКІС. Введенням предикатів розвиток цієї модифікації дозволяє формувати умови спрацювання переходів СП-моделі при розв'язанні конфліктних ситуацій. Як результат, одержуємо сітку, яка адекватно відбиває алгоритм взаємодії компонентів у ГКІС, тобто забезпечує реалізацію конкретної стратегії дій (при цьому дерево досяжності не будується, а отже, ще більшою мірою знижується трудомісткість задач синтезу/аналізу складних ОМ). Перед розкриттям сутності нових модифікацій, зупинимось на деяких інтерпретаціях класичного СП-методу. Для подання за допомогою СП процесів ГКІС необхідно мати засіб, який забороняє повторне ініціювання операцій під час їх виконання. Сітки, які володіють такою властивістю, називають

безконтактними [21]. Ми скористаємося поняттям інгібіторних (заперечуючих) дуг, які перевіряють сітку на нульове маркірування, а сітки з такими дугами мають назву *інгібіторних* [1], [12].

Означення 6.2. Інгібіторна сітка (ІСП) являє собою СП, доповнену спеціальною функцією інцидентності $F_I: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$, яка вводить інгібіторні дуги для пар (p, t) , у яких $F_I(p, t) = 1$.

Тоді правило спрацювання переходу в ІСП має вигляд

$$\forall p \in {}^*t : \mu(p) \geq F(p, t) \wedge \mu(p)F(p, t) = 0, \quad (2)$$

де *t – множина вхідних позицій переходу t .

Крім цього, при поданні сітками Петрі процесів ГКІС необхідно розрізняти маркери, що відповідають об'єктам матеріальних та інформаційних потоків у системі (дані, деталі, інструмент тощо). Для цього запроваджуються множини кольорової досяжності, а відповідні сітки називаються *розфарбованими* СП [1, 12, 16].

Означення 6.3. Розфарбована СП (РСП) – це набір виду $N_p = (N, \Omega, \lambda, \varphi, \mu_0)$, де $\Omega = \{\omega\}$ – непорожня кінцева множина кольорів маркерів; $\lambda: (P \times \Omega) \times T \rightarrow \{0, 1\}$ та $\varphi: T \times (P \times \Omega)$ – функції розподілення кольорів маркерів по вхідних позиціях переходів сітки і вихідних позиціях сітки відповідно. Ці функції відповідно описують умови спрацювання переходів і нове маркірування сітки після цього спрацювання.

Умова спрацювання переходу $t \in T$ за деяким маркіруванням μ має вигляд

$$\begin{aligned} \forall p_{i_k} \in {}^*t : \omega_{j_k} \in \Omega : \mu(p_{i_k}, \omega_{j_k}) \geq F(p_{i_k}, t), \\ \lambda_k \times ((p_{i_1}, \omega_{j_1}), \dots, (p_{i_n}, \omega_{j_n})) = 1, \quad k = 1, n, n = |{}^*t|, j = 1, |\Omega|. \end{aligned} \quad (3)$$

До РСП-сіток застосовні поняття безнечності, досяжності та живості.

Означення 6.4 Сітковим блоком N_b називається РСП-сітка, N_p для якої $T = T_c = T_c^* \cup T_c^b \cup T_c^c$ – множина переходів, причому

$T_c^* = \{t^* \mid \exists p_k, p_l \in P_c: F_c(p_k, t^*) = 1 \wedge H_c(t^*, p_l) = 1\}$ – множина внутрішніх переходів;

$T_c^b = \{t^b \mid \forall p_k \in P_c: F_c(p_k, t^b) = 0 \wedge H_c(t^b, p_k) = 1\}$ – множина витоків;

$T_c^c = \{t^c \mid \forall p_k \in P_c \exists p_k \in P_c: H_c(t^c, p_k) = 0 \wedge F_c(p_k, t^c) = 1\}$ – множина стоків;

$\Omega = \Omega_c = \{\omega \mid l = 1, r\}$ – множина кольорів маркерів,

функції $F = F_c, H = H_c, \lambda = \lambda_c, \varphi = \varphi_c, \mu_0 = \mu_0^c$ без змін по відношенню до розфарбованої СП.

Таким чином, є всі умови, щоб дати означення СП, яка зв'язує сіткові блоки (як такі можуть використовуватися будь-які СК, в тому числі і ТСБ) у загальну *зв'язуючу сітку Петрі* (ЗСП).

Означення 6.5. Зв'язуючою сіткою $N_{zв}$ по відношенню до блока N_b є така РСП, яка утворюється з блока N_b додаванням до нього позиції p_0 , що іменується як нульова, та дуг, що ведуть з p_0 в усі витоків і з усіх стоків в p_0 . Отже, зв'язуюча сітка $N_{zв}$ не має жодного витоків t^b і жодного стоків t^c . Оскільки метою даних модифікацій є створення умов для одержання структури СП-моделі, яка є безпечною, досяжною і живою, тобто коректно сформованою, дамо означення коректно сформованого блока.

Означення 6.6. Блок N_b є коректно сформованим, якщо:

- ♦ його зв'язуюча сітка $N_{zв}$ при початковому нульовому маркіруванні $\mu(p_0, \omega)$ безпечна в цілому (за всіма кольорами), тобто $\forall p \in N_{zв}, \forall \omega \in \Omega: \mu(p, \omega) \leq 1$, а $\forall \mu$ – послідовність, яка реалізується у блоці з непорожнього початкового маркірування $\mu_0(p_0, \omega)$, закінчується порожнім маркіруванням лише за умови $|t^b| = |t^c|$;

- ♦ як початкове маркірування $\mu_{поч}(p, \omega)$ використовуються лише такі, для яких мають місце співвідношення

$$\begin{aligned} \forall \mu_{поч}(p, \omega) \in R(N_b): \mu_0(p_0, \omega) \xrightarrow{t^b} \mu_{поч}(p, \omega); \\ \forall p_0 \in {}^*t^b \exists \lambda_{t^b}(p_0, \omega) : \lambda_{t^b}(p_0, \omega) = 1, \end{aligned} \quad (4)$$

де $R(N_b)$ – множина усіх маркірувань, що є досяжними з початкового маркірування.

Наслідок 6.1. Локалізованим вузлом називається коректно сформований сітковий блок N_b , в якому кожний крайовий перехід є або витокком t^b , або стоком k^b , а серед внутрішніх переходів у блоці N_b немає ні витоків, ні стоків.

З урахуванням введених понять можна дати означення ієрархічної розфарбованої СП.

Означення 6.7. Ієрархічною розфарбованою СП (ІРСП) є сітка, яка складається з кінцевої множини коректно сформованих сіткових блоків $N_{i,p} = \{N_b\}$.

Наприкінці огляду модифікацій *першого напрямку – структурних перетворень*, узагальнимо зміст поняття коректної СП-моделі, який впливає з аналізу її властивостей. Він полягає у перевірці безпеки (обмеженості) позицій, правильності параметризації (розфарбованість дуг, переходів, маркерів), структуризації моделі (відсутність взаємоблокувань через конкуренцію). Ті ж самі вимоги залишаються в силі щодо ОМ, які подаються СП-моделями. Отже, розглянуті умови, що дають можливість формування коректних моделей, є справедливими і по відношенню до процесів ГКІС, які успадковують властивості коректно сформованих їх моделей.

Умова безпеки. Кожна "позиція-ресурс" $p_r \in \bigcup_{i=0}^r P_{pi}$ та пов'язані з нею через вхідні та вихідні переходи "позиції-операції" $p_c \in \tilde{P}_c$ утворюють у типовій розфарбованій сітці (ТРСП-сітці) замкнені кільцеподібні підсітки, які є обмеженими через виконання умов

$$\Delta = \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{p_r \in \tilde{P}_c \cup \{p_r\}} \mu(p, \omega) = \sum_{\omega \in \Omega} \sum_{p_r \in \{p_r\}} \mu_c(p, \omega). \text{ Якщо } \Delta = 1, \text{ то позиція } p_c \in \tilde{P}_c \text{ є}$$

безпечною. Тому для забезпечення першої умови коректності необхідно для відповідних "позицій-операцій" (складання, налагоджування, транспортування тощо) ввести "позиції-ресурси" з безпечним початковим маркіруванням лише за одним з кольорів, а для останніх "позицій-операцій" (зокрема, зберігання) – з обмеженням за загальною кількістю маркерів початковим маркіруванням.

Умова живості. Якщо типові процеси мають власні ресурси ГКІС, тобто сіткова модель процесу задовольняє умові $\forall N_i, N_j \in N : N_i \cap N_j = \emptyset$, то можна завідомо синтезувати сітковий опис із властивістю живості через те, що якщо всі сіткові $N_j \in N$ і старша компонента N_0 є живими, то живою є і вся ТРСП-сітка (тут N_i – i -й типовий сітковий блок N – ТРСП-сітка).

При наявності загальних ресурсів у типових процесах ГКІС, тобто коли сіткова модель задовольняє умові $\forall N_i, N_j \in N : N_i \cap N_j \subseteq \bigcup_{i=0}^r P_{pi}$, живість сіткових компонентів не гарантує виконання другої умови коректності, і необхідним є перевірка параметризації та структуризації моделі в цілому.

Правильність параметризації СП-моделі встановлюється за результатами аналізу процедур надання підпроцесам і операціям виробничого процесу загальних виробничих ресурсів.

Процес формування керування рухом матеріальних або інформаційних потоків по обробляючим ресурсам в ГКІС полягає у визначенні в конфліктних ситуаціях заявки-предмета виробництва і засобів її обслуговування. Відповідно до такого уявлення конфліктної ситуації в процесах ГКІС можна виділити наступні випадки: обслуговування заявок загальним засобом; надання засобів загальній заявці; виконання незалежних одна від одної операцій. Таким ситуаціям в СП-моделях має місце своє формалізоване подання у вигляді наступних типових конфліктів K на переходах T [12, 13]:

1. Конфлікт K_1 – зв'язаний доступом до загального ресурсу p_r заявок ω_{ki}, ω_{kj} . Цей випадок має два породження: конфлікт K'_1 заявок від тієї ж самої операції за виконання іншої загальної операції; конфлікт K_1 заявок від різних операцій за виконання загальної операції. Для розв'язання конфліктів такого виду встановлюються пріоритети на обслуговування $PN_1: D \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ на основі правил надання переваги (найкоротшої операції; мінімізації виробничого циклу; мінімальної трудоемкості операцій виготовлення, що залишилися; призначення за порядком надходження; фіксованих пріоритетів);

2. Конфлікт K_2 різних ресурсів p_{ri}, p_{rj} за заявку ω_{ki} . Для розв'язання конфліктів цього виду встановлюються пріоритети на послідовність надання устаткування $PN_2: M \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ на основі відомих принципів адресування заявок до вільного ресурсу (за найближчим за часом доставляння ресурсом; за найменш поточно завантаженим ресурсом; за випадковим вибором ресурсу).

3. Конфлікт K_3 заявок ω_{ki} та ω_{kj} , що незалежно виконуються. Цей вид конфліктів пов'язаний з орієнтацією СП-підходу на подання паралельних підпроцесів в умовах послідовного прийняття керуючих рішень. Для розв'язання таких конфліктів призначаються пріоритети $PN_3: \{O_i | i = 1, N\} \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ виходячи з прийнятого першочергового порядку виконання незалежно активованих операцій і підпроцесів у ГКІС.

Але, враховуючи те, що будь-який перехід СП-моделі може одночасно належати декільком різним типовим конфліктам, це відображення на множині переходів подається сукупністю предикатів PR умов спрацювання, співвідношення для яких формується на базі ієрархічної системи розв'язання типових конфліктів ("обслуговування заявки" – "надання ресурсу" – "вибір незалежних заявок"). Тобто на кожному рівні ієрархії типових конфліктів формується значення локального предиката умови спрацювання переходу з врахуванням результатів розв'язання на попередніх рівнях.

Означення 6.8. Сітковою моделлю керуючого процесу є предикатна ТРСП-сітка наступного виду:

$$N_k = (N_{c,np}, PR), \quad (5)$$

де $PR = \{pr_j | pr_j = B(t_j), j = 1, |T|\}$ – множина предикатів умов спрацювання переходів; $N_{c,np}$ – СП-модель процесу в ГКІС.

При формалізації і побудованні СП-моделей алгоритмів керування на підставі керуючого процесу необхідно забезпечити асинхронне узгодження взаємодій між операторами керування так, щоб моменти ініціювання виробничих операцій визначалися лише готовністю необхідних даних про ОМ. При цьому керуюча підсистема ГКІС формує керуючі дії y_k у вигляді команд активізації виконання відповідних виробничих операцій в ОМ, після чого останній працює автономно, а керуюча підсистема чекає на сигнал x_c про закінчення виконання цих операцій.

Тоді кожний оператор-дія, який виконує процедуру з керування деякою виробничою операцією визначеної тривалості, в СП-моделі процесу в ГКІС замінюється сітковим фрагментом із зовнішніми позиціями $P_{z,k}$, $P_{z,c}$, що відбивають відповідно видачу керуючої дії і прийняття сигналу x_c про стан КО (зокрема, устаткування ГКІС).

Означення 6.9. Сітковою моделлю алгоритму керування є розгортка предикатної ТРСП-сітки, що задається набором виду

$$N_A = (N_r, X, Y, P_{z,k}, P_{z,c}, g, f), \quad (6)$$

де $X = \{x_c | x_c = (b_1, b_2, b_3, b_4), c = \overline{1, C}\}$ – множина сигналів про стан ОК (тут b_1, \dots, b_4 – логічні змінні, що відповідно вказують на несправність, зайнятість, налагодженість і стан роботи); $Y = \{y_k | k = \overline{1, K}\}$ – множина керуючих дій; $g: P_{z,k} \times \prod_{i=0}^t \Omega_i \rightarrow X$; $f: P_{z,in} \times \prod_{i=0}^t \Omega_i \rightarrow Y$.

Таким чином, наведені в цьому розділі модифікації структурних перетворень СП-апарата та їх адаптація щодо подання процесів і можливості керування ними дозволяють будувати коректно сформовані СП-моделі, які задовольняють умовам живості і безпеки. Іншими словами, з впровадженням розширень класичного апарата СП отримано, з одного боку, універсально більш досконаліший і продуктивний засіб моделювання ОМ різної природи, з другого – добре адаптований до інтерпретації явищ і подій, що відбуваються в ГКІС як на всіх стадіях їх життєвого циклу, так і на ієрархічних рівнях функціонування системи, набір формалізмів.

Проблемно-орієнтовані розширення апарата СП. За традиційною схемою організації моделювання, коли інформаційними потоками обмінюється дослідник та ІМ, зворотний зв'язок за результатами моделювання здійснює зовнішня відносно системи ІМ ланка – людина з залученням допоміжних засобів програмного забезпечення [2], [22]. Таким чином, і дослідник у системах ІМ, і оператор в системах з автоматичного керування ОМ відіграє своєрідну роль експерта з функціями інтерпретатора поточної ситуації з прийняттям відповідних рішень щодо подальших керуючих дій, коректність яких визначається кваліфікацією дослідника (оператора) і загаюванням у прийнятті рішень. Тому дуже важливу гілку напрямку з розширення апарата СП відіграють модифікації останнього, пов'язані з удосконаленням власне теорії

автоматизованого моделювання [11], а також інтелектуалізації СП-моделювання [3], [13], [14], [18], [19].

Інтелектуальні системи моделювання. Автоматизація керування експериментами приспужає створення замкненого програмно реалізованого контуру керування ІМ в межах засобів зовнішнього програмного забезпечення [14], [22].

Твердження 6.1. Сукупність алгоритмічних і програмних засобів, які забезпечують процес автоматизованого моделювання з розв'язанням задачі оптимізації $f(x) \rightarrow \max(\min)x \in X$, де f

– цільова функція, подана алгоритмічно; $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор параметрів ОМ; X – множина допустимих значень параметрів, утворює *систему автоматизованого ІМ (САІМ)*.

Оскільки користувач не вводить кожний набір початкових даних $W_{вх}$ для чергового прогону ІМ і лише зазначає мету (критерій) та область варіювання параметрів $Dw_{вх}$, в той час як пошук прийнятих розв'язків задач моделювання виконується за допомогою САІМ автоматично, є всі підстави застосувати до останньої термін *інтелектуальної системи моделювання*.

Твердження 6.2. Необхідними умовами функціонування АІМ є: існування непорожньої множини $D_0 = D_{вх} \cap D_{вих}$; збіжність алгоритму автоматизованого ІМ (Алг ІМ) в D_0 ; несуперечність варіювання вхідних параметрів для ІМ (тут $D_{вх}$, $D_{вих}$ – відповідно області варіювання вхідних параметрів $D_{вх}$ і результатів $D_{вих}$ експерименту).

Для обміну взаємозв'язку параметрів вводяться спеціальні формалізми (характеристичні множини та графи параметрів ОМ) і на цій основі визначаються вимоги до основних компонентів організації експерименту, пов'язані з варіюванням значень параметрів і задаванням вхідного слова $D_{вх}$. Розгорнутий граф параметрів $Gw_{вх}$ містить вершини $x_{вх}^j$ з приписаними їм конкретними значеннями з множини допустимих значень $A_i = \{a^1_i, a^2_i, \dots, a^i_i\}$, кожне з яких визначається комбінацією значень a_j^* всіх параметрів $x^j \in X_{ом}$. В загальному випадку кожному a_j^* можна поставити у відповідність деяку множину C_j^* таких комбінацій.

Означення 6.10. Вершина $x_{вх}^j$ графа $Gw_{вх}$ що має значення a^j_i , вважається несуперечною, якщо значення a^m_i усіх вершин $x_{вх}^j \in X_{ом}^i$ утворюють комбінацію, яка належить C^i . Граф $Gw_{вх}$ вхідного слова $W_{вх}$ називається несуперечним, якщо всі його вершини є несуперечними; цей випадок є необхідною і достатньою умовою узгодження даних ОМ і ІМ.

Для реалізації процедури логічного вивчення як у межах пропозиційної логіки, так і в більш загальному випадку логіки предикатів запропоновано модифікації СП, які називаються *логічними СП (ЛСП)* [11], [20], [21].

Означення 6.11. Простою ЛСП (ПЛСП) є сітка Петрі N , в основі якої лежить відповідність переходів сітки ТСБ продукційним правилам, вхідних позицій переходів, логічним умовам (посиланням), а вихідних позицій – наслідкам (виведенням), тобто:

$$N_{л.п.} = \langle P, T, F, H, \mu_0, C, S, \beta, \gamma \rangle, \quad (7)$$

де P, T – кінцеві множини позицій і переходів відповідно (причому, $|P| = n$; $|T| = m$); $F: P \times T \rightarrow (0, 1)$, $H: T \times P(0, 1)$ – вхідна та вихідна функції відповідно (функції інцидентності); $\mu_0: P \rightarrow \{0, 1\}$ – початкове маркірування; C, S – кінцеві множини пропорційних змінних і продукційних правил відповідно (причому, $|C| = n$; $|S| = m$. Антецедент кожного з правил подається кон'юнкцією тверджень $c_j | c_j \in C$; консеквент – також твердження, що належить S); $\beta: P \rightarrow C$; $\gamma: T \rightarrow S$ – функції позначень (відповідності позицій пропорційним змінним і переходів – продукційним правилам). Позиції, що асоціюються з початковими умовами (істинні значення – маркірування яких встановлюється перед виконанням виведення), називаються *позиціями джерелами*.

Означення 6.12. Нечіткою ЛСП (НЛСП) є проста ПЛСП, для якої вводяться додатково вагова h та граничного рівня спрацювання переходу d функції, а саме:

$$N_{л.н.} = (N_{л.п.}, h, d), \quad (8)$$

де $h: P \times T \rightarrow [0, 1]$; $(\forall p_i, t_j: (F(p_i, t_j) = 0) \rightarrow (h(p_i, t_j) = 0))$; $d: T \rightarrow [0, 1]$. Крім того, $\mu_0: P \rightarrow [0, 1]$, але не $\{0, 1\}$. Маркірування $\mu(p_{ii})$ задає в НЛСП нечітке значення істинності c_i (іншими

словами, можна вважати, що маркірування в НЛСП задає ступінь належності фактичного стану НЛСП нечіткій множині станів, яка відповідає змінній c_i .

Організація виведення на основі ЛСП аналогічна традиційній схемі функціонування СП і полягає у послідовному виконанні всіх можливих спрацювань переходів до стану, коли збуджених переходів немає.

Твердження 6.3. Нехай N_a – ЛСП; μ^G – кінцеве маркірування, що утворилося після застосування загального алгоритму виведення до N_a ; μ^A – маркірування, що утворилося після застосування до N_a будь-якої іншої процедури виконання дій в ЛСП. Якщо при μ^A збуджених переходів немає, то $\mu^A = \mu^G$.

Висновок 6.2. Якщо ЛСП N'_a і N''_a однакові, а їх поточні маркірування не мають збуджених переходів, то ці маркірування будуть однаковими за умови, що вихідні маркірування збігаються (інакше кажучи, різні процедури виконання ЛСП, що призводять до стану без збуджених переходів, якщо вони застосовуються до однакових сіток, дають однакові кінцеві маркірування).

Саме твердження 6.3 і висновок 6.2 лежать в основі побудови логічних виведень за допомогою відповідних модифікацій ЛСП. При цьому загальний алгоритм виведення є доцільним при наявності циклів у ЛСП, тоді як для ациклічних ЛСП з метою підвищення ефективності виведення застосовуються запропоновані у роботі [14] схеми "швидких" алгоритмів матричного і блочного виведень в ЛСП.

Самонавантажувальні сіткові моделі. Тепер з'ясуємо можливості СП-моделювання при інтерпретації ієрархічних розподілених процесів в ГКІС і відображенні динаміки їх проходження. Зокрема, при описі ГКІС за допомогою СП для розв'язання задач оперативного керування істотним обмеженням може бути наявність у кожній партії деталей власного технологічного маршруту (ТМ), відповідні до цього номери інструментальних налагоджень, неоднорідність за складом і кількістю носіїв деталей на окремих станах ТМ, необхідність призначення відносних пріоритетів різним партіям і урахування тривалості переналагоджувань тощо. В цьому випадку звичайні СП і розглянуті вище розширення не відбивають усієї множинності відзначених властивостей ГКІС. Тому аналогічно мові навантажених графів (Р-технології проектування послідовних програм), для подання моделей розподілених структур процесів, ресурсів, алгоритмів і програм впроваджено мову, побудовану на основі модифікованих навантажених СП [6], [12], [13].

Означення 6.13. Навантаженою N_H сіткою Петрі (НСП) є звичайна сітка Петрі N , доповнена функціями E навантажувального відображення і τ визначення часу спрацювання переходів, а саме:

$$N_H = (N, Q, E, \tau), \tag{9}$$

де Q – множина описувачів маркерів; $\tau: T \times q_t \rightarrow R$ (R – множина невід'ємних раціональних чисел; q_t – атрибут мітки m , який керує часом). Для $E \in$ справедливим $E_1: A_1 \rightarrow \eta_1$, $E_2: A_2 \rightarrow \eta_2$, $E = E_1 \cup E_2$, $\eta_1 = \{\nu\}$ – множина керуючих функцій, $\eta_2 = \{\eta_{ij}\}$ – множина операційних функцій.

За умов, коли в НСП має місце $D = F = \emptyset$, термін НСП звужується до поняття часової СП (ЧСП), формальне подання якої може здійснюватися за двома принципами. *Перший* полягає в тому, що кожному переходу t ставиться у відповідність пара величин a та l таких, що $0 \leq a \leq l$ [9]. Якщо перехід t активізований на момент часу τ , то він не може бути реалізований раніше, ніж у момент часу $(\tau + a)$, але повинен бути реалізований до або в момент часу $(\tau + l)$, якщо тільки умови його активізації не зміняться в цей проміжок через реалізацію інших переходів. Це так звані *таймаутні СП*. Їх використовують для опису і перевірки протоколів обчислювальних мереж з механізмами тайм-аутів, а також для опису систем із властивостями відновлення.

Для побудови ЧСП-моделей ГКІС застосовується другий принцип, коли кожному переходу СП ставиться у відповідність певний інтервал часу τ_t , що дорівнює тривалості його реалізації, тобто довгочасності зіставленої з ним операції [8].

Означення 6.14. Часовою N_q сіткою Петрі є звичайна сітка Петрі N , доповнена функцією $\tau: T \rightarrow R$ часів спрацювання переходів, за якою для кожного переходу зіставляється постійний час спрацювання $\tau_t \in \Theta$ (Θ – множина часів спрацювання переходів), тобто

$$N_q = (N_q, \tau). \quad (10)$$

Множини P , T та їх відображення однозначно визначаються структурою ГКІС, що описується, а множина Θ і функція τ – часовими показниками роботи компонентів ГКІС на виконавчому рівні керування останньою.

Обмеженнями другого принципу формального подання ГКІС у вигляді ЧСП є: апріорна незмінність часів $\tau_j \in \Theta$ виконання основних і допоміжних виробничих операцій; використання найближчих і усереднюючих статистичних оцінок тривалості роботи технологічного устаткування (в результаті знижується ступінь адекватності ЧСП-моделі ОМ щодо неоптимальності за швидкістю керування реальною ГКІС, а не моделлю); можливість виникнення випадків неіснування розв'язку задачі організації оперативного керування ГКІС при необхідності синхронізації роботи устаткування в умовах мінімізації часу на виконання виробничого завдання: $\tau_2(v_i) \leq |\tau_0(v_i)| \forall v_i \in V$ (тут τ_i – тривалість виконання завдання; $|\tau_2(v_i)|$ – максимально допустима довготочасність його виконання; v_i – варіант план-графіка; V – множина допустимих розкладів завантаження устаткування). Один із шляхів здобуття коректного розв'язку такої задачі полягає в оперативній зміні складових набору $\Theta = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$ і проведенні повторного динамічного навантаження СП-моделі ГКІС, що досягається, зокрема, зміною або методів керування компонентами ОМ, або параметрів останніх на виконавчому рівні. Модифікована таким чином НСП-модель дістала назву *ієрархічної НСП-моделі* (НСП-модель) ГКІС [14], [22].

Означення 6.15. Динамічне навантаження СП-моделі – це таке відображення двох кінцевих непорожніх множин переходів $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ і часів спрацювань переходів $\Theta = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$ сітки, що $T \times \Theta \equiv \Theta \times T$.

Означення 6.16. Навантажена (часова) СП-модель ГКІС – це модель, яку здобуто за допомогою процедури динамічного навантаження СП-моделі, що відповідає ГКІС.

Означення 6.17. НСП-модель ГКІС – це модель, побудована на основі аналізу процесів, які відбуваються на рівнях керування ГКІС, та взаємодії цих процесів. При цьому, можливості роботи НСП-моделі в реальному часі забезпечуються автоматизацією динамічного навантаження СП-моделей виконавчого рівня ГКІС, яке може бути реалізованим шляхом використання модуля планування експериментів (МПЕ), що примусує побудову замкненого контуру керування експериментами в межах власних засобів зовнішнього програмного забезпечення (див. Твердження 6.1 і 6.2). При цьому, функції дослідника і експерта на відповідному ієрархічному рівні НСП-моделі виконує спеціально введений до складу зовнішнього програмного забезпечення пошуковий модуль ПМ, що є інтелектуальною надбудовою МПЕ і до складу задач якого входять формування множини $\Theta = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n\}$ і динамічне навантаження СП-моделі верхнього рівня керування ГКІС обґрунтованими значеннями складових Θ .

Означення 6.18. Самонавантажувальна СП-модель (СНСП-модель) – це ієрархічна автоматизована СП-модель, що взаємодіє з МПЕ на виконавчому рівні керування через програмно-реалізовані інтелектуальні надбудови – ПМ. Метою функціонування СНСП-моделі є розв'язання задачі синтезу алгоритму оперативного керування ГКІС з одночасним впливом на динаміку процесів, які відбуваються на виконавчому рівні керування.

Детермінований та ймовірнісний підходи до моделювання ієрархічних структур ГКІС. Отже, структуру СНСП-моделі ГКІС визначає ієрархічна сукупність НСП-моделі верхнього рівня керування ГКІС (організаційно-технічне, оперативне керування) та МПЕ на виконавчому рівні керування ГКІС, причому ці рівні взаємодіють один з одним через пошукові модулі ПМ. До задач вищого рівня входять організація прогону СП-моделі для формування алгоритму оперативного керування ГКІС і призначення переходів СП з незадовільними для заданої якості керування часовими показниками; задачею нижчого рівня є організація серії експериментів на ньому з незадовольняючими компонентами ГКІС (Алг МПЕ). При цьому узагальнений алгоритм СНСП-моделі (Алг СНП) є композицією Алг СНСП та Алг МПЕ [7]. Така схема взаємодії останніх визначає *детермінований підхід* до моделювання ГКІС.

Ймовірнісний підхід дає змогу підвищити "рівень інтелекту" моделі порівняно з детермінованим моделюванням і є ефективним при побудові складних інтегрованих систем керування ОМ з елементами штучного інтелекту [7], [14]. Ймовірнісне моделювання інтелектуальних складних ГКІС ґрунтується на побудові ієрархічної тривірневої ймовірнісної моделі з функціями ймовірності та ентропії як аналітичними мірами. При цьому структура

моделі повністю відповідає класичній ієрархії задач керування ГКІС на стратегічному, тактичному і виконавчому рівнях. Середовище робочого простору ГКІС імовірно моделюється в термінах множини неповторюваних і повторюваних примітивних подій, які складають область завдань системи і показують її можливості. Далі найкращий план переноситься на тактичний рівень, де розробляється детальний сценарій його виконання, відбитий в різних функціях координуючих засобів. Система починає функціонувати зі стану максимальної невизначеності, вираженого спочатку функціями рівномірного розподілу ймовірностей, які послідовно коректуються за допомогою навчальних алгоритмів кожного робочого циклу, завдяки чому невизначеності системи асимптотично зменшуються. До того ж, стратегічний рівень забезпечений деякою кількістю означень, які встановлюють його робочий простір, і множиною операційних процедур (правил), що керують його функціями. Як і при використанні детермінованого підходу, ймовірнісної СНСП-моделі ГКІС відповідає узагальнений алг. СНСП-моделі, на вхід якого надходить вхідне слово W_{ex} (вхідні команди).

Означення 6.19. Множина систематизованих за допомогою ПМ компільованих вхідних команд – це множина $U = \{u_1, u_2, \dots, u_z\}$ з відповідними ймовірностями $I(u_j / u_n / j = \bar{1}, \bar{z}, n = \bar{1}, \bar{z}, z = const)$, які вважаються істинними входами верхнього рівня моделі. Запис, вигляду $I(A / B)$, означає умовну ймовірність виникнення подій A за умов здійснення подій B , що визначається аксіомами: а) ймовірність поєднання умов $A \cap B$ становить $I(A \cap B) = I(B)I(A / B)$; б) ймовірність $I(A / B)$ є невизначеною, якщо $I(B) = 0$.

Означення 6.20. Область задавання СНСП-моделі ГКІС – це множина незалежних взаємовиключаючих диз'юнктивних підмножин переходів СП, які відповідають неповторюваним і повторюваним примітивним подіям у ГКІС $T = \{T_{nr}, T_r\} = \{t_1, t_2, \dots, t_{k-1}, t_{k-1}, \dots, t_k\}$, де $K = const$, $(K - L)$, L – відповідно кількості переходів, що відповідають неповторюваним (тобто таким, що зустрічаються у плані тільки один раз) і повторюваним (які можуть з'являтися у плані більш як один раз) примітивним подіям.

Означення 6.21. Дія a_{jm} – це послідовність переходів СП, що відповідає групі примітивних подій, взаємозв'язок яких утворює складне завдання для модельної ГКІС.

Згідно з цим означення m -ї дії a_{jm} , що відповідає команді u_j , можна подати у вигляді матриці-рядка двійкових випадкових $X_{jm} = [x_1, x_2, \dots, x_k]_m$, де $m = 1, (2^k - 1)$, причому кожній компільованій команді u_j відповідає максимальна кількість $(2^k - 1)$ дій, крім того, кожна дія $a_{jm}(x_{jm})$ має ймовірність $I(x_{jm} / u_j)$.

Означення 6.22. Модельне мислення – це поєднання компільованої вхідної команди $u_j \in U$ і множини придатних матриць-рядків дій.

Означення 6.23. Модельне планування – це визначення повних і сумісних упорядкованих рядків дій для виконання виробничого завдання модельованої ГКІС і відхилення несумісних, а також непевних упорядкованих установлень з метою зменшення вимірності моделі.

Означення 6.24. Зворотний зв'язок між рівнями моделі – це обчислення різних функцій вартості, що відповідають розв'язку задач кожного рівня для виконання виробничого завдання, і використання перспективних ймовірностей.

З урахуванням означень 6.19–6.24 можна окреслити алгоритм функціонування ймовірнісної СНСП-моделі ГКІС: "Класифікація вхідної команди на верхньому рівні моделі (крок 1) – модельне мислення (крок 2) – модельне планування (крок 3) – модельне прийняття рішень (крок 4) – реалізація рішень і динамічне навантаження моделі (крок 5) – модифікація динамічного навантаження моделі (крок 6)".

Завдяки використанню алгоритму з наведеною схемою моделлю накопичуються інформація і досвід, що забезпечує асимптотичне зменшення її невизначеності за принципом зростаючої точності при поступовому зниженні необхідного на перших етапах функціонування рівня інтелекту.

Просторові ієрархічні моделі ГКІС. СП-моделі будуються для дослідження систем типу ГКІС, базуються на використанні розширень СП-апарата і мають одновекторний (за часом, послідовністю подій) або двовекторний (ще і за ієрархією подання) вимір і відбивають властивості ОМ в одному агрегатному стані, що відповідає нештатному режиму роботи.

Проте, у процесі функціонування складних систем виникають нештатні ситуації, які суттєво змінюють стан складових і системи в цілому [10]. Множина нештатних (і навіть екстремальних) ситуацій (НС) в загальному випадку може бути безмежною. Тому для моделювання ГКІС з урахуванням нештатних режимів їх роботи є доцільним розширити область подання ОМ ще, принаймні, одним виміром – простором агрегатних станів (АС) [3]. Тоді дослідження ОМ з НС вимагатиме створення моделей для кожного з таких станів (простір

моделей АС), ідентифікаторів умов (у вигляді інформаційних масивів), що спричиняють виникнення НС, формалізмів логічного виведення щодо ідентифікації НС за умов ймовірності інтерпретації нечіткої визначеності апріорної інформації про належність до нового стану, алгоритму синтезу оптимальної траєкторії в гіперпросторі станів ОМ (тобто траєкторії переходу ОМ з одного проміжного АС в інший за критеріями швидкої дії або найменшої втрати основного показника функціонування ОМ у зв'язку з переходом на керування в нештатному режимі).

Означення 6.25. Агрегатом є ГКІС (або окрема її досліджувана компонента), яка визначається множинами $A = \{\Theta, X, U, Y, S, H, D\}$, де $\Theta = \{\epsilon_\beta | \beta = \overline{1, \rho}\}$, $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$, $U = \{u_l | l = \overline{1, e}\}$, $Y = \{y_\lambda | \lambda = \overline{1, b}\}$, $S = \{s_\vartheta | \vartheta = \overline{1, \omega}\}$, $D = \{b_r | r = \overline{1, h}\}$ – множини моментів часу, вхідних керуючих, вихідних сигналів, внутрішніх станів, а також просторових параметрів агрегату відповідно; H та D – оператори переходів та виходів, що реалізують функції $s(t)$, $x(t)$, $u(t)$, $u(t)$.

Означення 6.26. Система – це впорядкована сукупність агрегатів A_1, A_2, \dots, A_p , множин фіктивних каналів $[X_j^{(p)}]_{\lambda^{m+e}}$ та $[Y_\lambda^{(p)}]_{\lambda^r}$, що характеризують зовнішнє середовище, і оператора R , що визначає модель сполучення в системі через елементарні канали.

Означення 6.27. Правильними є стани ГКІС, що передбачені алгоритмами штатних режимів функціонування (тобто такі, в яких відсутні НС).

Означення 6.28. Проміжними є стани, в яких система ще може працювати з певними обмеженнями згідно з алгоритмами функціонування, але які не є правильними станами і які займають перехідне положення на шляху від правильних до нештатних станів, та навпаки.

Загальна схема обробки НС полягає, таким чином, у пошуку базової траєкторії виходу у множині типових, попередньо сформованих "екземплярів". Кінцеве підстроювання (синтез) виконується як розв'язання задачі нечіткої умовної оптимізації. Після формування траєкторії реєструється змодельована упорядкована послідовність маркірувань СП, яка надалі інтерпретується відповідним алгоритмом у послідовність керуючих сигналів. Останні, у свою чергу, і повертають систему до бажаного стану. В разі наявності умов, які не дозволяють це зробити, керування зводиться до дотримання вимог, закладених в "екземплярі" даної НС, з метою реалізації хоча і не оптимальних (визначених для штатних режимів функціонування системи), але досяжних для даного АС показників якості.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
2. Максимай И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 232 с.
3. Кузьмін П.В., Остапченко К.Б., Лавров О.А., Банашак З., Ямпольський Л.С. Нові підходи до моделювання і управління в гнучких комп'ютеризованих системах // Вісник Київського політехнічного інституту. Адаптивні системи автоматичного управління, 1988. – Вип. 21. – С. 27–39.
4. Оре О. Теория графов. – М.: Наука, 1980. – 336 с.
5. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
6. Пантюшкин С.В., Назаретов В.М., Тягунов О.А. и др. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9 книгах. Книга 5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств / Под ред. Макарева И.М. – М.: Высшая школа, 1986. – 175 с.
7. Семенченко В.Л., Ямпольский Л.С. Вероятностное планирование эксперимента в самонагружающихся сетевых моделях РТС // Вестник Киевского политехнического института. Техническая кибернетика, 1993. – Вып. 17. – С. 12–14.
8. Слепцов А.И., Юрасов А.А. Автоматизация проектирования управляющих систем гибких автоматизированных производств / Под ред. Малиновского Б.Н. – К.: Техника, 1984. – 110 с.
9. Управление ГПС: Модели и алгоритмы / Под ред. Емельянова. – М.: Машиностроение, 1987. – 368 с.
10. Шостак В.Ф. Модели и методы управления сложными технологическими комплексами в нештатных (экстремальных) режимах работы в АСУТП // Автоматика и телемеханика, 1994. – № 10. – С. 158–164.

11. Ямпольський Л.С. Проблема автоматизації моделювання і управління в сборочному виробництві // Робототехніка: новий етап розвитку. – М.: Наука, 1993. – С. 60–73. (Кибернетика – неограниченные возможности и возможные ограничения.)
12. Ямпольський Л.С., Банашак З. Автоматизація проектування і управління в гнучкому виробництві. – К.: Техніка; Варшава: Научно-техн. изд-во, 1989. – 214 с.
13. Ямпольський Л.С., Банашак З., Хасегава Х., Крог Б., Такахаши К., Борусан А.В. Управління дискретними процесами в ГПС. – К.: Техніка; Вроцлав: Изд-во Вроцлав Политехнического института; Токио: Токося, 1992. – 251 с.
14. Ямпольський Л.С., Лавров О.А. Штучний інтелект в моделюванні та управлінні виробництвом. – К.: Вища школа, 1995.
15. Ямпольський Л.С., Поліщук М.М., Ткач М.М. Елементи робототехнічних пристроїв і модулі ГВС / За ред. Ямпольського Л.С. – К.: Вища школа, 1992. – 431 с.
16. Jensen K. Coloured Petri Nets. A way to Describe and Analyse Real World System – Without Drowning in Unnecessary Details // The Proceedings of the 5'th International Conference on Systems Engineering. – Dayton, 1987. – P. 395–401.
17. Krogh B.H., Sreenivas R.S. Essentially Decission Free Petri Nets for Reak-Time Resource Allocation // The proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEE Computer Society Press. – Washington: DC, 1987. – P. 1005–1010.
18. Lavrov A. Modular Knowledge-Based Conrol System // Mildesheimer Informatiic-Berichte, 1994. – V. 21. – 24 p.
19. Lavrov A.A., Kuzmin P.V. and Yampolsky L.S. Virtual Agents and Formal Methods: An Approach to Real – Time Decision Making in CIM // Proceeding of the Fourth International Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR'97). – Miedzzydrojc: Poland, 1997. – V. 3. – P. 1049–1052.
20. Lemmer K., Schnieder E. Modeling and Control of complex logistic system for manufacturing // Jansen K. (ED) Application and Theory of Petri Nrts. – Berlin: Springer-Verlag, 1992. – P. 373–378.
21. Reasing W. Petrinetze – Eine Einführung, überarbeitete und erweiterte Auflage. – Berlin: Springer, 1986. – 137 p.
22. Yampolsky L.S., Lavrov A.A., Semenchenko V.L. and Kusmin P.V. Intelligent Dinamic Models of Computer-Integrated Manufacturing System // Proceeding of the 1993 European Simulation Sumposium. – Delft, 1993. – P. 161–163.

КУЗЬМІН Павло Валерійович – аспірант НТУ України “Київський політехнічний інститут”.

Наукові інтереси:

– моделювання складних систем.

ЛАВРОВ Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, докторант НТУ України “Київський політехнічний інститут”.

Наукові інтереси:

– ідентифікація і верифікація процесів в ГВС.

ЛІСОВИЧЕНКО Олег Іванович – магістрант НТУ України “Київський політехнічний інститут”.

Наукові інтереси:

– моделювання складних систем.

ОСТАПЧЕНКО Костянтин Борисович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної кібернетики НТУ України “Київський політехнічний інститут”.

Наукові інтереси:

– математичне моделювання, системи підтримки прийняття рішень.

ЯМПОЛЬСЬКИЙ Леонід Стефанович – кандидат технічних наук, професор кафедри технічної кібернетики НТУ України “КПІ”, лауреат державної премії України в галузі науки і техніки.

Наукові інтереси:

– робототехніка і гнучкі комп'ютеризовані системи;

– системи моделювання, управління і підтримки прийняття рішень.