

## **Розробка моделі побудови виробничих розкладів на базі компонентної постреляційної інформаційної технології для графових перетворень**

*Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»*

### **1. Актуальність та аналіз проблеми, постановка задачі**

У сучасних ринкових умовах України портфель замовлень підприємств динамічно змінюється, що вимагає нових підходів до управління як підприємством у цілому, так і його структурними підрозділами. Для ефективного планування виробничих процесів необхідно скористатися методами, орієнтованими на портфель замовлень, що змінюється.

Сучасне виробництво має складну, ієрархічну структуру, до якої входять різні виробничі об'єкти (цехи, відділи, ділянки тощо). Як такі об'єкти можуть виступати автоматизовані модулі, лінії, транспортні системи, виробничі склади. Планування роботи окремих складових автоматизованих виробничих систем (АВС) можливо при формуванні розкладів, що враховують взаємодію як основного, так і допоміжного обладнання (наприклад, транспортних засобів).

Класичні моделі теорії розкладів [1, 2] використовуються для планування роботи обмеженої кількості обладнання та непридатні для вирішення складних задач із реальними виробничими умовами і обмеженнями, які в тому числі враховують конфліктні ситуації різного характеру, наприклад, використання спільного обладнання при паралельному обслуговуванні замовлень. Тому потрібна розробка таких моделей, які коректно описують взаємодію основного та допоміжного обладнання з урахуванням паралельного обслуговування в умовах сучасного виробництва із частою зміною портфеля замовлень. Одним із можливих шляхів вирішення цієї задачі є використання графових моделей [3], реалізованих за допомогою компонентної інформаційної технології для опису процесу взаємодії основного та допоміжного обладнання для побудови розкладів та автоматизованого управління АВС.

Планування і побудова розкладів роботи автоматизованого обладнання сучасного, орієнтованого на ринок, підприємства пов'язані:

- зі створенням науково обґрунтованих підходів до підготовки і управління виробництвом в умовах портфеля замовлень, що змінюється;
- розробкою моделей і методів побудови розкладів роботи взаємодіючого основного і допоміжного обладнання для автоматизованого управління виробництвом.

Відомі методи, які застосовують у системах оперативного управління за кордоном (R/3, Oracle Applications, Baan IV, Renaissance CS), орієнтовані на побудову планів, а не розкладів роботи обладнання АВС і через специфіку організації виробництва в Україні і країнах СНД вимагають змін і додаткової адаптації до наших умов, що практично неможливо через їх закритість для користувачів. Необхідно також урахувувати високі витрати на придбання даних систем. Існують окремі системи російського виробництва, однак більшість із них маловідомі через слабку маркетингову політику і відсутність кваліфікованого

супроводу продукції. Крім того, перераховані системи використовують застарілі програмні платформи, які не дозволяють робити ефективні перетворення графів для вирішення задач побудови розкладів, і тому використання компонентної технології дозволить перейти до інтерфейсу користувача, побудованого на візуальному перетворенні графових структур.

Аналіз показав, що відомі підходи до побудови розкладів орієнтовані на постійний портфель замовлень і одержання тільки циклічних розкладів для невеликої кількості процесів і тому мало придатні в сучасних економічних умовах. Разом із тим практика розробки і побудови сучасних автоматизованих систем управління виробництвом вимагає розробки нових підходів і методів вирішення задачі побудови розкладів, які б дозволили одержувати розклади виконання замовлень для взаємодіючого основного та допоміжного обладнання за прийнятний час так, щоб можна було здійснювати перепланування АВС у випадку зміни портфеля замовлень або появи термінових замовлень. Таким чином, необхідно розробити графову модель і методи побудови розкладів роботи за допомогою побудови бібліотеки функціональних модулів у рамках постреляційної компонентної технології.

## 2. Розробка моделі та методів побудови розкладів роботи виробничих систем

Аналіз існуючих систем планування виробництва, дослідження їх структурних складових і характеристик дозволили формалізовано подати розклади роботи основного та допоміжного обладнання АВС у вигляді виробничо-часових графів (ВЧГ) [4].

Виробничо-часовий граф – це орієнтований граф  $G$  з  $p$  вершинами, заданими множиною  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$ , і  $q$  ребрами, заданими множиною  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_q\}$ .

Запропоновано позначення виробничо-часового графа  $G$  у вигляді такої четвірки параметрів:  $G = \{V, B, W, R\}$ , де  $V$  - множина вершин,  $B = \{B^1, B^2, \dots, B^p\}$

- множина часових інтервалів вершин ( $B^i = \{b_1^i, b_2^i, \dots, b_k^i\}$ ),  $W$  - множина ребер,

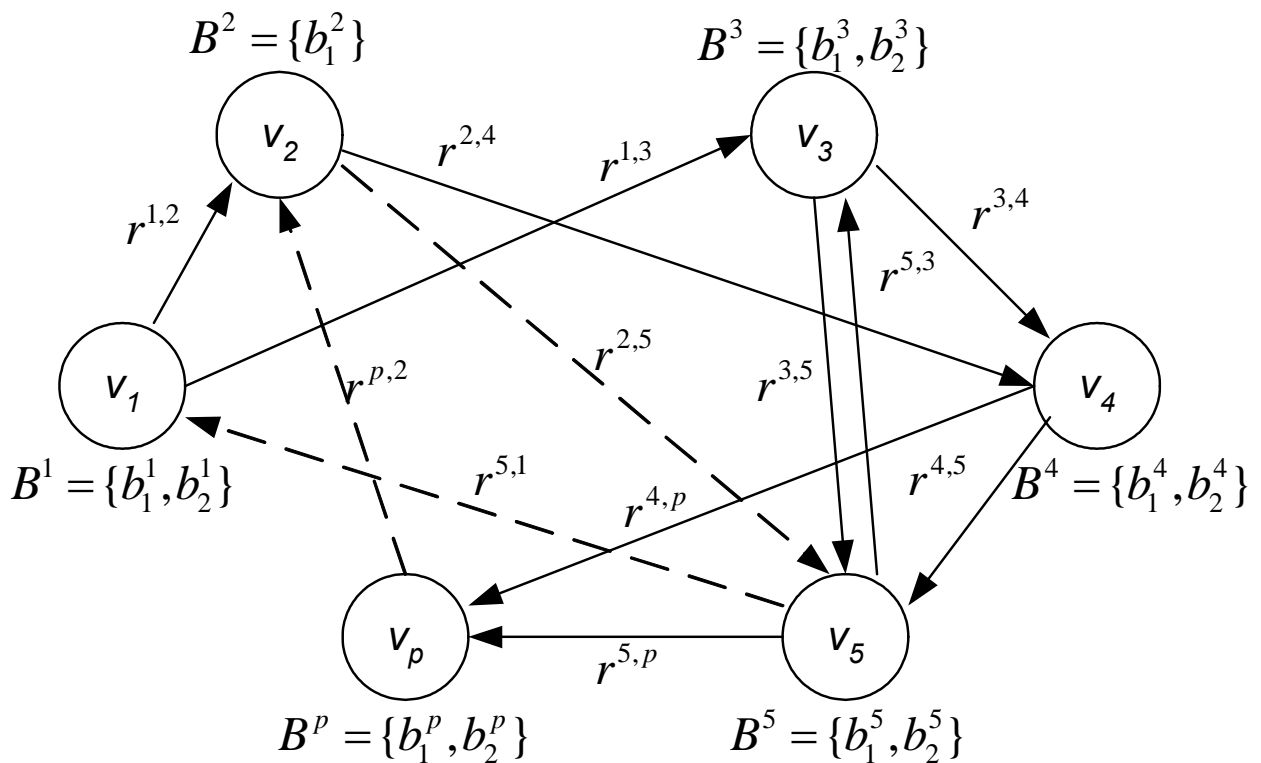
$R = \{r_1, r_2, \dots, r_q\}$  - множина часових інтервалів ребер (рис. 1).

Множина вершин  $V$  розбита на неперетинні підмножини, причому вершини, що належать до однієї підмножини, називаються тотожними.

Виробничо-часовий граф  $G$  може складатися з  $\mu$  підграфів ( $G_1, G_2, \dots, G_\mu$ ). Запропоновані поняття ізольованих вершин, нульового ( $G^0$ ) і оберненого ( $G^{-1}$ ) графів.

Описано два види переміщень між об'єктами виробництва: робочі й холості переходи. Робочим переміщенням відповідають на виробничо-часовому графі ребра, що належать множині  $W^P$ , холостим – ребра, що належать множині  $W^X$ ,  $W^P \cap W^X = \emptyset$ ,  $W = \{W^P, W^X\}$ .

Для перетворення ВЧГ введені спеціальні операції об'єднання  $\cup_G$  і перетину  $\cap_G$ . Виділені вершинні й реберні компоненти ВЧГ, які є елементарними складовими цих графів [4].



Приклад виробничо-часового графа

На множині компонентів введені операції зрушення. Зрушенням кінця інтервалу вершинного компонента називається операція перетворення компонента вигляду  $E^i(N^i, K^i)$  у компонент вигляду  $E^i(N^i, K^i + t^i)$ , де  $t^i$  – величина зрушення правої границі  $i$ -го компонента. Зрушенням компонента називається операція перетворення вершинного або реберного компонента  $E^i(N^i, K^i)$  у компонент вигляду  $E^i(N^i + t^i, K^i + t^i)$ . Показано, що введені раніше операції на графах можна подати через компоненти.

Досліджені виробничо-часові графи спеціального вигляду – елементарні графи, які складаються з упорядкованих у часі вершинних і реберних компонентів, що послідовно чергуються. На множині елементарних графів задано відношення тотожності. Елементарний граф  $G_2$  називається 1-тотожним графу  $G_1$ , якщо він отриманий із графа  $G_1$  шляхом заміни його вершин на тотожні. Елементарний граф  $G_2$  називається 2-тотожним графу  $G_1$ , якщо він отриманий із графа  $G_1$  шляхом застосування до його компонентів операцій зрушення.

Виробничо-часові графи, тотожні перетворення і операції на графах дозволили формально подати побудову розкладів у вигляді формульної залежності. Введено поняття проміжного розкладу [5]. Під проміжним розкладом розуміємо структурний об'єкт, поданий виробничо-часовим графом  $Q$ , формально отриманим з виробничо-часових графів  $G_1, G_2, \dots, G_n$  у такий спосіб:

$$Q = (G_1^* \cup_G G_2^* \cup_G \dots \cup_G G_n^*) \cup_G (G_1 \cap_G G_2 \cap_G \dots \cap_G G_n),$$

де  $G_i^* = G_i \cup_G (G_i^X)^{-1}$  - граф, що отриманий із графа  $G_i$  шляхом видалення підмножини реберних компонентів  $E^X \subset W^X$ .

Виконання дій за наведеною формулою дозволяє одержати деякий проміжний розклад, який у загальному випадку не обов'язково задовольняє необхідним умови реалізованості розкладу. Множина умов реалізованості розкладу (наприклад, відсутність взаємного перетинання вершинних компонентів у кожній вершині, реберних компонентів усередині підграфів і т.д.) утворює множину перевірок реалізованості  $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_S\}$ . Проміжні розклади, які відповідають всім перевіркам множини  $\pi$ , утворюють підмножину реалізованих проміжних розкладів, тобто власне розкладів, а проміжні розклади, які задовольняють окрему перевірку  $\pi_\alpha, \alpha = \overline{1, S}$ , утворюють підмножину  $\alpha$ -реалізованих проміжних розкладів.

Зазначено фактори, які визначають специфіку організації роботи лінії в умовах портфеля замовлень, що змінюється (оперативний режим). Ці фактори формують ряд особливостей побудови оперативних розкладів, а саме:

- відсутня можливість априорно розподіляти зони обслуговування транспортних робіт;
- змінний потік виробів за різними замовленнями вимагає достатньої кількості технологічних супутників;
- послідовний характер запуску замовлень дозволяє одержувати інформацію про маршрути руху транспортних робіт і використання основного обладнання тільки на деякому інтервалі часу (наприклад, між двома послідовними запусками виробів).

Розроблено метод побудови оперативних розкладів, що враховує зазначені особливості і містить такі основні етапи:

1. Розрахунок тривалості реберних компонентів ВЧГ.
2. Розподіл реберних компонентів між підграфами ВЧГ.
3. Побудова оперативного розкладу на рівні компонентів ВЧГ.
4. Перевірка реалізованості вершинних і реберних компонентів на множині перевірок  $\pi$ .
5. Тотожні перетворення компонентів ВЧГ.
6. Одержання реалізованого розкладу.

Особливості оперативного режиму роботи АВС визначають набір перевірок побудованого проміжного розкладу  $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3\}$ .

Перевірки дозволяють оцінити побудований проміжний розклад. Невиконання умов будь-якої з перевірок викликає необхідність переходу на етап тотожних перетворень, на якому здійснюються перетворення елементарного графа з метою одержання реалізованого оперативного розкладу.

На основі результатів попереднього аналізу побудову оперативних розкладів АВС здійснено на рівні операцій над компонентами виробничо-часових графів з урахуванням послідовної побудови вершинних і реберних компонентів

елементарного графа  $G_j$  до вже побудованого розкладу  $Q_{r-1}$  для елементарних графів  $G_1, \dots, G_{j-1}$ . Послідовність побудови оперативного розкладу з урахуванням вказаного складу перевірок формально подається у такий спосіб:

$$Q_1 = (E_1^1 \cup_G G^0) | \pi_1 \cup_G ((E_2^1 \cup_G G^0) | \pi_2 \cup_G (E_2^1 \cap_G G^0)) | \pi_3,$$

...

$$Q_{\frac{K_1}{2}} = (E_{K_1-1}^1 \cup_G Q_{\frac{K_1-1}{2}}) | \pi_1 \cup_G ((E_{K_1}^1 \cup_G Q_{\frac{K_1-1}{2}}) | \pi_2 \cup_G$$

$$\cup_G (E_{K_1} \cap_G Q_{\frac{K_1-1}{2}})) | \pi_3,$$

...

$$Q_{\frac{K_1}{2} + \dots + \frac{K_{m-1}}{2} + 1} = (E_1^m \cup_G Q_{\frac{K_1}{2} + \dots + \frac{K_{m-1}}{2}}) | \pi_1 \cup_G ((E_2^m \cup_G$$

$$\cup_G Q_{\frac{K_1}{2} + \dots + \frac{K_{m-1}}{2}}) | \pi_2 \cup_G (E_2^m \cap_G Q_{\frac{K_1}{2} + \dots + \frac{K_{m-1}}{2}})) | \pi_3,$$

...

$$Q_{\frac{K_1}{2} + \dots + \frac{K_m}{2}} = (E_{K_m-1}^m \cup_G Q_{\frac{K_1}{2} + \dots + \frac{K_{m-1}}{2}}) | \pi_1 \cup_G ((E_{K_m}^m \cup_G$$

$$\cup_G Q_{\frac{K_1}{2} + \dots + \frac{K_{m-1}}{2}}) | \pi_2 \cup_G (E_{K_m}^m \cap_G Q_{\frac{K_1}{2} + \dots + \frac{K_{m-1}}{2}})) | \pi_3,$$

де  $Q_r$  - оперативний розклад на  $r$ -му кроці побудови,  $r = \overline{1, K_1/2 + K_m/2}$

(при  $r = 1: Q_{r-1} = G^0$ );

$E_i^j$  -  $i$ -й компонент  $j$ -го елементарного графа,  $i = \overline{1, K_j}$ ;

$K_j$  - кількість компонентів  $j$ -го елементарного графа,  $j = \overline{1, m}$ ;

$|_{\pi_\alpha}$  - виконання перевірки  $\pi_\alpha$  для відповідного елемента формули ( $\alpha = \overline{1, 3}$ ).

Розглянуто питання організації планування ABC в умовах постійного портфеля замовлень, що дозволяє будувати розклади заздалегідь і робити їх повторюваними (циклічними), що зручно для автоматичних режимів управління роботою обладнання [5].

Метод побудови циклічного розкладу на рівні операцій над компонентами ВЧГ оснований, як і для оперативного розкладу, на послідовній побудові вершинних і реберних компонентів елементарного графа  $G_j$  до вже побудованого розкладу  $Q_{r-1}$  для елементарних графів  $G_1, \dots, G_{j-1}$ . Послідовність побудови циклічного розкладу на  $r$ -му кроці з урахуванням конкретного складу перевірок  $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_6\}$  може бути записана в такий спосіб:

$$Q_r = \left( Q_{r-1} \cup_G E_{2i-1}^j \Big|_{\pi_4} \right) \Big|_{\pi_1} \cup_G \left( (Q_{r-1} \cup_G E_{2i}^j) \cup_G (Q_{r-1} \cap_G E_{2i}^j) \right) \Big|_{\pi_2, \pi_3, \pi_5, \pi_6},$$

де  $Q_r$  - циклічний розклад на  $r$ -му кроці побудови (при  $r = 1: Q_{r-1} = G^0$ );

$i$  - номер пари компонентів  $j$ -го елементарного графа,  $i = \overline{1, K_j/2}$ ;

$K_j$  - кількість компонентів  $j$ -го елементарного графа,  $j = \overline{1, m}$ ;

$\Big|_{\pi_\alpha}$  - виконання перевірки  $\pi_\alpha$  для відповідного елемента формули ( $\alpha = \overline{1, 6}$ ).

Запропонований спосіб визначення нижньої границі тривалості циклу  $T$ , який враховує множину часових інтервалів вершин елементарних ВЧГ  $G_j$ ,  $j = \overline{1, m}$ .

При побудові розкладу для заданого виробничо-часового графа  $Q$ , що складається з  $\mu$  підграфів, виникає задача розподілу реберних компонентів елементарних графів  $G_j$ ,  $j = \overline{1, m}$  між підграфами  $Q_g$ ,  $g = \overline{1, \mu}$ . Ця задача вирішується шляхом декомпозиції графа  $Q$  на підграфи за критерієм рівномірного розподілу реберних компонентів  $E^p \subset W^p$  множини елементарних ВЧГ.

Запропоновано перетворення, які забезпечують побудову реалізованого проміжного розкладу, і виділено три фази перетворення розкладу. Перші дві фази пов'язані з тотожними перетвореннями вершинних і реберних компонентів елементарних ВЧГ, поєднаних у розклад (виробничо-часовий граф). Запропоновано спосіб виконання тотожних перетворень компонентів елементарних графів, звертання до якого відбувається у випадку невиконання умов реалізованості, що задаються множиною перевірок  $\pi$ .

Третя фаза перетворення розкладу пов'язана зі зміною тривалості циклу  $T$ . Вона є завершальною і забезпечує побудову реалізованого розкладу. Остаточний аналіз реалізованості виконується методами імітаційного моделювання. Показано, що процес перетворення розкладу є кінцевим і результативним.

Розроблено інструментальні засоби побудови АРМ «Розклад» для задач підготовки виробництва [6].

Розроблений АРМ дозволяє на етапі підготовки виробництва за допомогою виробничо-часових графів подати структуру АВС і на підставі запропонованих

моделі і методів побудувати розклад роботи обладнання ABC. При формуванні розкладу використані як оригінальні методики, так і методи імітаційного моделювання. Для зберігання інформації використовують бази даних, для управління якими застосовують високопродуктивну постреляційну технологію на основі СУБД Caché, що найбільш ефективно і з високим ступенем адекватності дозволяє подати графову модель ABC у зручному для комп'ютерної обробки вигляді.

### 3. Висновки

Таким чином, у статті наведено вирішення актуальної науково-технічної задачі аналізу, планування і побудови розкладів роботи ABC в умовах портфеля замовлень, що змінюється. Побудовано модель виробництва у вигляді виробничо-часового графа, що уявляє роботу ABC у реальному просторово-часовому аспекті. Запропоновано спеціальні операції щодо перетворення виробничо-часових графів у задачах побудови розкладів роботи ABC, які розширюють можливості графових моделей для розглянутої прикладної області. Розроблено бібліотеку функціональних елементів за допомогою компонентної постреляційної технології для перетворення графових структур розкладів.

Ця задача має важливе практичне значення для ефективної роботи ABC в аерокосмічній, машинобудівній, приладобудівній та іншій галузях промисловості України, що працюють в умовах частотої зміни замовлень.

Отримані наукові та практичні результати роботи можуть бути використані для задач підготовки виробництва, а також при створенні систем планування і управління автоматизованими виробничими комплексами в різних галузях народного господарства.

### Список літератури

1. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. – М.: Наука, 1975. – 260 с.
2. Танаев В.С., Шкурба В.В. Введение в теорию расписаний. – М.: Наука, 1975. – 256 с.
3. Харрари Ф. Теория графов. – М.: Мир, 1973. – 340 с.
4. Губка А.С. Модель построения расписаний работы производственных объектов // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць.– Харків: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т». – 2002. – Вип.27. – С. 212-216.
5. Федорович О.Е., Губка А.С. Формализация задачи оперативного управления автоматизированными производственными комплексами // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. праць.– К.: Інститут проблем моделювання в енергетиці НАН України. – 2003. – Вип.22. – С. 200-205.
6. Комп'ютерна програма «Програма для конструктивного перерахування варіантів побудови розкладів» // О.С. Губка: Свід. Держ. реєстр. прав автора на твір № 11359. – Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Мін. освіти і науки України 20.10.2004 р.