

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**до курсового проектування з дисципліни**  
**"ГНУЧКІ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНІ СИСТЕМИ"**  
**кредитного модуля**  
**"АЛГОРИТМІЗАЦІЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ УПРАВЛІННЯ В ГНУЧКИХ**  
**КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ"**

для студентів напрямку підготовки 6.0914 "Системна інженерія"  
спеціальності 7.091402 "Гнучкі комп'ютеризовані системи та робототехніка"

Затверджено  
на засіданні кафедри технічної кібернетики  
Протокол № 9 від "22" квітня 2008р.

Київ 2008

Алгоритмізація та верифікація управління в гнучких комп'ютеризованих системах: Методичні вказівки до курсового проектування / Складено К.Б.Остапченко. - Київ: НТУУ-КПІ, 2008. - 44с.

## ЗМІСТ

1. Зміст завдання на курсове проектування.....	4
2. Загальні вимоги до структури, обсягу та змісту курсового проекту.....	6
3. Теоретичні положення та математичні засоби, щодо розв'язання поставлених задач .....	9
3.1. Організація оперативного управління ГВС .....	9
3.2. Вихідні дані ГВС як об'єкта оперативного управління .....	11
3.3. Оперативне планування роботи ГВС .....	15
3.4. Організація оперативно-диспетчерського управління ГВС .....	22
3.5. Засоби моделювання дискретних процесів .....	25
4. Література.....	43

## 1. Зміст завдання на курсове проектування

Метою викладання дисципліни “Алгоритмізація і верифікація управління в гнучких комп’ютеризованих системах” є отримання студентами знань в області технології алгоритмізації задач управління інтегрованим виробництвом на різних рівнях його організації, а саме на рівнях від організаційного управління підприємством до технологічного управління групами чи окремими одиницями промислового обладнання виробничих підрозділів. Особливістю проблеми створення алгоритмічного та програмного забезпечення системи управління виробництвом є застосування різних за змістом та призначенням інженерних методів розв’язання комплексу задач проектування та експлуатації інтегрованого виробництва, важливою складовою частиною якого постає гнучка виробнича система (ГВС) цехового рівня.

Тому темою курсового проектування даної дисципліни є створення алгоритмічного та програмного забезпечення системи оперативного управління (СОУ) гнучким автоматизованим підрозділом (цехом, ділянкою, лінією). За змістом завдання постає як комплексне за рахунок послідовного розв’язання взаємопов’язаних задач з розробки підсистем оперативно-календарного планування для організаційного рівня, оперативно-диспетчерського управління для технологічного рівня виробництва та імітаційного моделювання роботи ГВС для виконавчого рівня верифікації роботи обладнання.

Основною організаційною формою ГВС на виробництві є гнучка автоматизована ділянка (Г АД). Г АД – це виробнича система, в якій реалізується автоматизоване групове багатомономенклатурне виробництво, що оперативно переналагоджується у визначеному параметричному діапазоні продукції через синхронну роботу всіх функціональних модулів за допомогою системи оперативного управління. Будь-яка Г АД має у своєму складі такі модулі:

- гнучкі виробничі модулі (ГВМ) основного технологічного обладнання (верстати, складальні машини, тощо);
- автоматизований склад (виробів, напівфабрикатів, комплектуючих, інструментів);
- автоматизовану транспортну систему.

Для забезпечення подавання виробів на ГВМ та організації їх взаємодії з автоматизованим складом в Г АД використовується автоматизована транспортна система в складі транспортних модулів та роботів-штабелерів, які мають транспортні маршрути пересування. ГВМ обов’язково мають в своєму складі вхідний та вихідний накопичувачі, в які деталі надходять для подальшої обробки згідно технології, а після завершення обробки тимчасово зберігаються для подальшого транспортування на інше технологічне обладнання. Це дозволяє спочатку привезти наступну деталь для обробки, а потім вивезти ту, що чекає на подальшу обробку. Проте, на функціонування накопичувачів та роботу ГВМ накладаються деякі обмеження, пов’язані із забезпеченням вимог на порядок ініціювання технологічної операції на обладнанні. Це:

- транспортний модуль не може привезти наступну деталь на обробку, поки завантажений вхідний накопичувач;
- обробка деталі з вхідного накопичувача не може початися на ГВМ, поки зайнятий вихідний накопичувач;
- після завершення обробки деталь одночасно надходить до вихідного накопичувача.

Для створення ефективно діючої СОУ ГАД необхідно в першу чергу визначити технологічні маршрути обробки деталей на ГВМ для заданого номенклатурного переліку виробів, розрахувати порядок запуску деталей у виробництво для визначення часу виробничого циклу і розкладу роботи обладнання, а потім розробити графік проведення транспортних операцій для своєчасного виконання технологічних операцій на ГВМ згідно розкладу їх роботи. Одночасно в ході складання розкладу та графіку обґрунтовується вибір достатньої кількості та призначення (спеціалізації) ГВМ та транспортних модулів, який забезпечить виконання розробленого виробничого циклу обробки деталей. Отримана інформація буде включати дані про початок і завершення різних операцій на ГВМ, транспортних модулях, напрям та їх мету пересування. З метою аналізу можливості реалізації розробленого розкладу та графіку роботи всього устаткування ГАД виконується сіткове моделювання, яке перевіряє умови ініціювання операцій, виконання всього запланованих переліку дій у системі, повернення обладнання в початковий стан, обмеження ресурсів та інше. Крім, того виконується пошук вузьких місць, конфліктів при роботі обладнання. Дослідження завершується виробленням рекомендацій щодо усунення помилок та неточностей, які були припущені при проектуванні структури та алгоритмів функціонування ГАД.

Отже розв'язання задач курсового проекту передбачає виконання таких завдань:

№	Задачі та зміст завдання	Література
1	Розробка підсистеми оперативного обліку ГВС. Створити інформаційну базу даних з нормативно-технологічних показників подання матеріальних, інформаційних процесів і об'єктів ГВС та провести їх розрахунок.	4, Д2
2	Розробка підсистеми оперативного планування ГВС. За визначеним критерієм ефективності роботи автоматизованного підрозділа скласти розклад роботи технологічного обладнання в цьому підрозділі по виготовленню встановленої номенклатури продукції за оперативний інтервал часу – зміну (добу).	1, Д3, Д5, Д7, Д16
3	Розробка підсистеми оперативно-диспетчерського управління ГВС Розробити алгоритм організації транспортного обслуговування змінного завдання, виходячи з того, що необхідно забезпечити мінімальні відхилення від термінів завершення виконання технологічних операцій згідно з	1, Д1, Д2, Д16

№	Задачі та зміст завдання	Література
	побудованого розкладу роботи технологічного обладнання.	
4	Розробка підсистеми імітаційного моделювання ГВС Виконати якісний аналіз коректності розробленого алгоритму, спроектувавши “правильно побудовану” сіткову модель транспортного обслуговування.	4, Д1, Д4, Д13

Вихідними даними для розв'язання цих завдань та створення автоматизованої системи управління визначаються наступні параметри виробництва:

Виробнича програма ГВС - представляється у вигляді номенклатурних планів, встановлених на заданий період роботи.

Технологічні маршрути виготовлення заданої номенклатури виробів - послідовність виконання технологічних операцій на технологічному обладнанні.

Працемісткість (час виконання) основних технологічних операцій (обробки, складання, контролю тощо).

Транспортні маршрути перевезення одиниць матеріальних потоків (виробів, інструмента тощо), які визначаються структурною схемою компонування ГВС.

Час виконання транспортних та обслуговуючих операцій - час руху за участками транспортних маршрутів та перевантаження об'єктів транспортування.

Місткість використаних у ГВС оперативних накопичувачів.

Критерій оцінки ефективності роботи ГВС на заданий період.

## 2. Загальні вимоги до структури, обсягу та змісту курсового проекту

Документація курсового проекту складається з пояснювальної записки та обов'язкового графічного матеріалу (креслень). Крім того, при захисті може використовуватись додатково демонстраційний матеріал в графічному (на папері, плівках), електронному (відеоматеріали, мультимедіа, презентації тощо) або натурному (моделі, програми) вигляді.

Орієнтовний обсяг, з урахуванням викладеного в попередньому пункті, складає:

- пояснювальна записка - 50-70 сторінок;
- обов'язковий графічний (ілюстративний) матеріал - не менше 2 аркушів креслень формату А1.

*Пояснювальна записка* до курсового проекту повинна у стислій та чіткій формі розкривати творчий задум проекту, містити аналіз сучасного стану проблеми, методів вирішення завдань проекту, обґрунтування їх оптимальності, методики та результати розрахунків, опис проведених експериментів, аналіз їх результатів і висновки з них; містити необхідні ілюстрації, ескізи, графіки,

діаграми, таблиці, схеми, малюнки та ін. В ній мають бути відсутні загальновідомі положення, зайві описи, виведення складних формул тощо.

Текст пояснювальної записки складається, як правило, державною або російською (для іноземних студентів) мовою в друкованому вигляді на аркушах формату А4 шрифтом Times New Roman 14 пунктів, міжрядковий інтервал 1,5 Lines.

*Структура пояснювальної записки* умовно поділяється на вступну частину, основну частину та додатки.

Вступна частина:

- титульний аркуш (форма КП-2);
- завдання на курсове проектування (форма КП-3);
- календарний план виконання проекту (форма КП-4)
- реферат (анотація);
- зміст (форма КП-5);
- перелік скорочень, умовних позначень, термінів;
- вступ.

Основна частина:

- розділи, які розкривають основний зміст проекту відповідно до переліку питань, наданих у завданні на курсове проектування;
- закінчення (висновки);
- перелік посилань.

Додатки:

- відомість курсового проекту (форма КП-6);
- технічне завдання на КП (форма КП-7);
- графічний матеріал (креслення);
- інші матеріали, які допомагають більш повно і докладно розкрити задум та шляхи реалізації проекту, в тому числі програмне забезпечення курсового проекту.

Перелік скорочень, вступ, висновки, перелік посилань і додатки, окрім розділів основної частини, не нумеруються.

*Реферат* (анотація) обсягом 0,5-1с. повинен стисло відображати загальну характеристику та основний зміст проекту і містити:

- відомості про обсяг пояснювальної записки, кількість ілюстрацій, таблиць, креслень, додатків і бібліографічних найменувань за переліком посилань;
- мету проекту, використані методи та отримані результати (характеристика об'єкту проектування, нові якісні та кількісні показники, економічний ефект тощо);
- рекомендації щодо використання або (та) результати впровадження розробок або досліджень;
- перелік ключових слів (не більше 20).

*Вступ* повинен відображати актуальність і доцільність проекту та містити:

- обґрунтування необхідності автоматизації існуючого об'єкта проектування на основі аналізу сучасного стану проблеми за даними вітчизняної та зарубіжної науково-технічної літератури;

- обґрунтування основних проектних рішень або напрямків досліджень;
- можливі галузі застосування результатів проекту;
- кінцеву мету проектування.

*Основна частина* пояснювальної записки повинна включати:

- розробку вимог до характеристик об'єкта проектування;
- вибір і обґрунтування оптимальності технічних рішень або теоретичних та експериментальних методів досліджень поставлених задач;
- вибір та обґрунтування можливих варіантів технічної реалізації та методів розрахунків параметрів елементів;
- експериментальні дослідження, розробку методики досліджень, опис розробленого програмного забезпечення, аналіз результатів роботи програмного забезпечення;
- загальні висновки щодо відповідності отриманих результатів завданню на курсове проектування та висунутим вимогам, можливість впровадження або застосування результатів.

Розділи основної частини повинні відтворити наступні питання:

#### 1. Аналіз задач проектування системи оперативного управління ГВС

- 1.1. Опис підрозділа ГВС як об'єкта управління
- 1.2. Постановка задач проектування СОУ ГВС
- 1.3. Аналіз та вибір методів дослідження

#### 2. Проектування алгоритмичного забезпечення системи оперативного управління

- 2.1. Розробка інформаційних структур даних задач проектування
- 2.2. Складання розкладу роботи технологічного обладнання
- 2.3. Розробка алгоритма транспортного обслуговування ГВС
- 2.4. Синтез сіткової моделі функціонування обладнання ГВС

#### 3. Розробка програмного забезпечення підсистем СОУ ГВС

- 3.1. Призначення і область застосування програмного забезпечення
- 3.2. Опис підсистеми вводу і обліку технологічних параметрів ГВС
- 3.3. Опис підсистеми оперативного планування
- 3.4. Опис підсистеми оперативно-диспетчерського управління
- 3.5. Опис підсистеми сіткового моделювання ГВС

У *висновках* формулюються основні результати, оцінки та рекомендації щодо проведеного проектування.

*Документація обов'язкового графічного матеріалу* повинна включати функціональну схему сіткової моделі роботи обладнання ГВС та блок-схеми алгоритмів програмного забезпечення.



### **3. Теоретичні положення та математичні засоби, щодо розв'язання поставлених задач**

#### **3.1. Організація оперативного управління ГВС**

При розв'язанні задачі організаційного управління виробництвом, одним з головних факторів, що регламентують діяльність промислового підприємства є узагальнений розрахунок виробничих потужностей і завантаження обладнання, результатом якого є виробнича програма обсягу виготовлення продукції. В умовах масового і серійного виробництва ефективним методом такого розрахунку, що забезпечує максимальне завантаження обладнання, є лінійне програмування, орієнтоване на побудову лінійних оптимізаційних моделей виробництва. Моделі, які використовуються у розрахунках є статичними, бо вони призначені для аналізу керуючих рішень, які поширюються на певний, попередньо визначений проміжок часу. Сфера застосування таких моделей та методів у теперішній час охоплює широкий спектр функцій організаційного управління [1,Д2]. Типовими задачами виробничого планування обсягу і номенклатури випуску продукції на двох рівнях управління підприємством є задача управління збутом продукції для адміністративного рівня управління і задача оптимального розподілу ресурсів для рівня управління підрозділами [Д7]. Але для ГВС ці задачі тільки визначають початкові данні і тому не є предметом розгляду при проектуванні СОУ.

Організація оперативного управління підприємством неможлива без деталізації виробничої програми випуску продукції за часовими інтервалами в межах встановленого планового періоду. Реалізація цієї функції здійснюється задачею календарного планування, результатом вирішення якої є часове упорядкування комплексу запланованих робіт програми. Часове упорядкування виражається у визначенні строків початку та завершення виконання робіт, тобто календарний план визначає скільки продукції необхідно виготовити у кожному інтервалі встановленого періоду. У ГВС оперативний плановий період, як правило, не перевищує місячного терміну, а строками запуску-випуску є такі часові інтервали: декади, тиждні або дні (добі).

Математичною формою уявлення задач даного класу є лінійна дискретна оптимізаційна модель, а методологією розв'язання - цілочисельне програмування.

Організація оперативно-диспетчерського управління виробництвом ґрунтується на деталізації для виконавців раніше розрахованого календарного плану випуску продукції в межах заданого планового інтервалу. Реалізація цієї функції здійснюється задачею оперативного планування, результатом якої є просторове упорядкування комплексу запланованих робіт [1]. Просторове упорядкування виражається у визначенні кожному виконавцю плану робіт з окремих операцій. В ГВС оперативний плановий інтервал, як правило, не перевищує зміни (добі), а виконавцем є технологічне обладнання.

Математичною формою подання задач даного класу є дискретна оптимізаційна модель, а методологією рішення - дискретне лінійне програмування (ДЛП) та імітаційні методи дослідження.

Для реалізації розроблених виробничих програм і календарних графіків необхідна система оперативного контролю і регулювання ходу виробничого процесу. Це зв'язано з тим, що на ход виробничого процесу впливає ряд випадкових факторів, що виключити цілком практично неможливо. До них відносяться поломки устаткування, перебої в постачанні, брак, ступінь забезпеченості трудовими ресурсами, іноді виникаюча необхідність випуску незапланованої продукції.

Оперативний контроль і регулювання (диспетчерування) ходу виробництва здійснюється як у масштабі всього підприємства, так і на рівні виробничих підрозділів. Поряд з функцією, зв'язаною з оперативним усуненням відхилень ходу виробничого процесу від нормальним, передбаченим календарним планом, диспетчерування повинне носити і попереджувальний характер. Це означає, що диспетчерування повинне містити в собі завчасне виявлення й усунення намічених відхилень від розроблених календарних графіків, тобто корегування поточних планів. До того ж, необхідно збалансувати (синхронізувати) роботу основного технологічного обладнання і обслуговуючого – транспортних і накопичувальних засобів, тобто розробити взаємопов'язані розклади роботи всіх видів обладнання підрозділа ГВС, в якому необхідно здійснити оперативно-диспетчерське управління. Результатом розв'язання цієї задачі з урахуванням структурно-компанувальної схеми ГВС буде повністю описана робота дискретної системи обладнання.

Аналіз дискретної системи досить складно здійснити на реальній системі, тому що це зв'язано з великими витратами на її побудову і ніколи немає повної впевненості у тому, що даний варіант є остаточним. Тому для дослідження складних систем будують їхні моделі – спрощені копії, що володіють основними якостями системи, по яких роблять аналіз останніх. Моделювання у ГВС – це не тільки інструмент аналізу але й засіб відлагодження дискретних систем управління, діагностики якісних характеристик процесів і джерел неприпустимих станів.

Аналіз складеного розкладу роботи обладнання ГВС передбачає його сіткове моделювання з використанням апарату сіток Петрі з наступним дослідженням властивостей сіткової моделі, пошуком вузьких місць і конфліктів при роботі устаткування. Дослідження завершується рекомендаціями з налагодження системи оперативного управління ГВС, усунення помилок, допущених при проектуванні. Коректність побудованого розкладу визначається наступними вимогами до управління:

- управляючий процес не повинний приводити до тупикових ситуацій при виконанні виробничого процесу (не можна подавати нову деталь на обладнання не звільнивши його від попередньої деталі);

- управляючий процес не повинний приводити до блокування роботи устаткування (не можна накопичувати на обладнанні деталей більше, ніж задано його можливістю);

- управляючий процес повинний забезпечувати повторне виконання технологічних операцій після їхнього завершення (з врахуванням кількості накопичувачів у гнучкому виробничому модулі (ГВМ), деталь не може бути завантажена до вхідного накопичувача, доти ГВМ не стане вільним, а також деталь не може бути оброблена на ГВМ, доти не звільниться вихідний накопичувач).

### 3.2. Вихідні дані ГВС як об'єкта оперативного управління

#### 3.2.1. Збирання та визначення початковий вихідних даних проектування

Для того, щоб ефективно налагодити систему управління виробничою ділянкою і, звичайно ж, сам ГВС необхідно визначити:

- номенклатуру деталей обробки;
- у якій послідовності і на яком устаткуванні;
- кількість транспортних модулів;
- схему здійснення транспортування об'єктів виробництва.

Дана інформація є вихідної для рішення задачі оперативного планування та диспетчерування, результатом яких є розклад роботи устаткування ділянки протягом виробничого циклу, а також графік роботи транспортних модулів. Ця інформація включає дані про початок і закінчення операцій обробки на окремих верстатах, моменти завантаження і розвантаження виробничих модулів, напрямки і цілі переміщення транспортних пристроїв. У ході складання розкладу на практиці улаштовується вибір того чи іншого числа виробничих модулів і транспортних пристроїв (роботів-штабелерів).

Далі всі значення до вихідних даних наведені для пояснення і як приклади виконання завдання проектування.

Номенклатура деталей, оброблюваних на ділянці, складається із семи найменувань. При цьому кожна деталь проходить наступні технологічні операції:

Д1 - T2T3T4C1Φ1C2P1

Д2 - T1T2T3T4C2P1

Д3 - T5T1T2T3T4

Д4 - T1C2T2T3T4C1Φ1

Д5 - T1C2P1T3T2T4

Д6 - T1C1Φ1T3T2T4C2P1

Д7 - T2T3T4C2P1,

де Tі - токарські операції;

Cі - свердлильні операції;

Φі - фрезерувальні операції;

Pі - операції нарізки різблення.

Номенклатура операцій для кожної деталі зведена в табл. 1.

Табл.1

	T1	T2	T3	T4	T5	31	32	Φ1	P1
Д1		*	*	*		*	*	*	*
Д2	*	*	*	*			*		*

Д3	*	*	*	*	*				
Д4	*	*	*	*		*	*	*	
Д5	*	*	*	*			*		*
Д6	*	*	*	*		*	*	*	*
Д7		*	*	*			*		*

До складу гнучкої виробничої ділянки входять: 4 гнучких виробничих модулів (ГВМ); один автоматизований склад, що виступає в ролі центрального нагромаджувача для проміжного збереження об'єктів виробництва; 5 транспортних модуля (роботи-штабелери - РШ), задачею яких є переміщення об'єктів виробництва між складом і виробничими модулями.

Схема розбивки ГВС на ГВМ представлена на мал. 1.

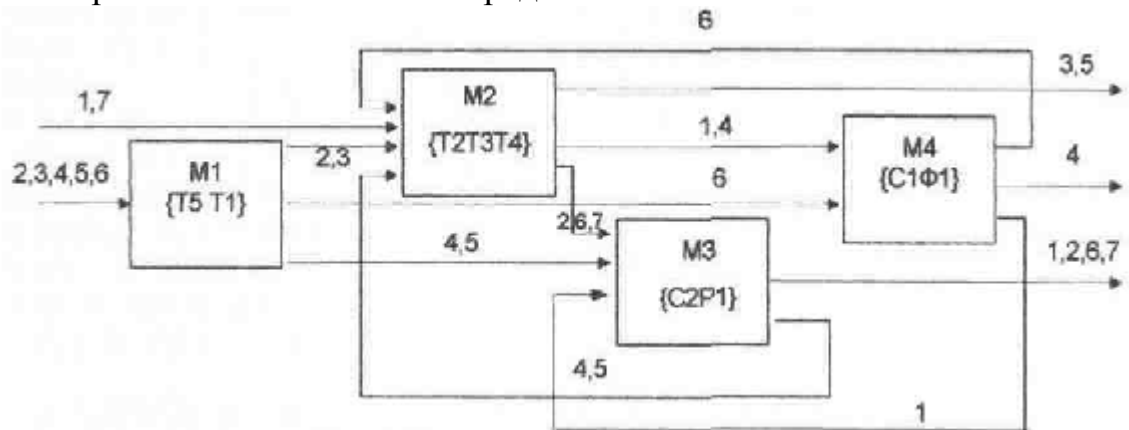


Рис. 1. Структурно-технологічна схема ГВС

Схема виробничої ділянки є складовою частиною структурно-компоновочної схеми гнучкої виробничої системи, розробленої на попередніх етапах проектування ГПС. Схема виробничої ділянки представлена на мал.2.

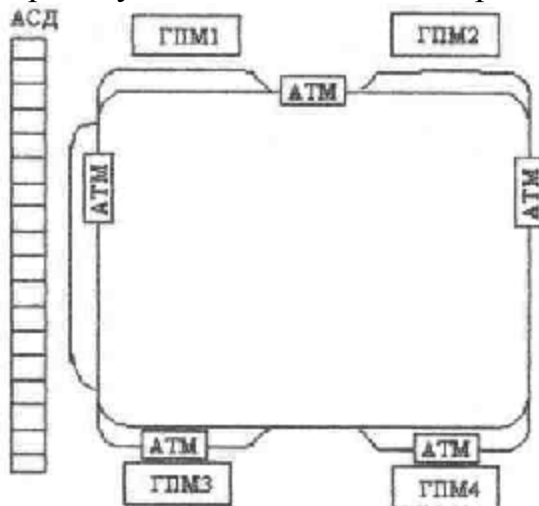


Рис.2. Структурно-компоновальна схема ділянки ГВС

Основні параметри ділянки ГВС представлені в табл.2.

Табл.2.

Найменування параметра	Позначення	Одиниця виміру	Значення
Середня трудомісткість обробки	$t_{об}$	година	0,2

однієї деталеустановки			
Час завантаження ГВМ	$t_3$	мін	6
Час розвантаження ГВМ	$t_p$	мін	4
Середня довжина переміщення РШ	$l_{cp}$	м	35
Середня швидкість переміщення РШ	$V_{cp}$	м/хв	30

Виходячи з параметрів руху транспортних модулів і розміщення модулів ділянки, був визначений час транспортування деталей:

переміщення з АС на ГВМ1	- $t_{cm1} = 1,17$ хв;
переміщення з АС на ГВМ2	- $t_{cm2} = 2,34$ хв;
переміщення з ГВМ1 на ГВМ2	- $t_{m1m2} = 1,17$ хв;
переміщення з ГВМ1 на ГВМ3	- $t_{m1m3} = 3,51$ хв;
переміщення з ГВМ1 на ГВМ4	- $t_{m1m4} = 2,34$ хв;
переміщення з ГВМ2 на ГВМ3	- $t_{m2m3} = 2,34$ хв;
переміщення з ГВМ2 на ГВМ4	- $t_{m2m4} = 1,17$ хв;
переміщення з ГВМ2 на АС	- $t_{m2c} = 3,51$ хв;
переміщення з ГВМ3 на ГВМ2	- $t_{m3m2} = 3,51$ хв;
переміщення з ГВМ3 на АС	- $t_{m3c} = 1,17$ хв;
переміщення з ГВМ4 на ГВМ2	- $t_{m4m2} = 4,68$ хв;
переміщення з ГВМ4 на ГВМ3	- $t_{m4m3} = 1,17$ хв;
переміщення з ГВМ4 на АС	- $t_{m4c} = 2,34$ хв.

Таким чином, до складу початкових вихідних даних для вирішення задач проектування входять:

- номенклатура оброблюваних деталей;
- номенклатура операцій для кожної деталі;
- структурно-технологічна схема ГВС;
- структурно-компонувальна схема ділянки ГВС;
- основні параметри виробничої ділянки ГВС.

### 3.2.2. Обробка і підготовка вихідних даних проектування

Для складання розкладу роботи технологічного устаткування необхідно визначити технологічний маршрут для кожної деталі, що містить у собі порядок проходження її через технологічне устаткування ГВМ і час обробки на одиниці устаткування. Порядок проходження деталей через технологічне устаткування визначається відповідно до переліку операцій, виконуваних над ними і схеми проходження деталей по виробничих модулях. На підставі цих даних, складаємо матрицю розмірністю  $N \times M$ , де  $N$  - кількість усіх можливих операцій, а  $M$  - номенклатура, оброблюваних деталей. На перетинанні рядків і стовпців указуємо номер ГВМ, на якому виконується дана операція:

	Д1	Д2	ЦЗ	Д4	Д5	Д6	Д7
Т1	*	*	2	2	2	*	*
Т2	1	1	1	1	1	1	1
Т3	1	1	1	1	1	1	1

T4	3	*	*	3	3	3	3
T5	*	3	*	3	3	*	3
T6	*	6	*	*	*	*	*
31	*	*	*	2	2	*	*
32	1	1	1	1	1	1	1
Φ2	*	*	*	*	*	5	*
P1	4	*	4	*	*	*	4
P2	4	*	4	*	*	*	4

Після перетворення матриці шляхом об'єднання в один етап обробки операцій, що здійснюються одна за іншою на одному ГВМ, одержимо необхідну матрицю маршрутів:

	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6	Д7
Етап 1	1	1	2	2	2	1	1
Етап 2	3	3	1	1	1	3	3
Етап 3	1	6	4	3	3	1	1
Етап 4	4	1	*	2	2	5	4
Етап 5	*	*	*	1	1	*	*

Де ГВМ1 = {T<sub>2</sub>, Z<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>}; ГВМ2 = {T<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>}; ГВМ3 = {T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub>}; ГВМ4 = {P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>}; ГВМ5 = {Φ<sub>2</sub>}, ГВМ6 = {T<sub>6</sub>}

Час виконання кожної операції залежить від її складності, що визначається типом операції і розмірами оброблюваної поверхні. Самій складній операції із 100% поверхнею обробки присвоюється значення 1. Частіше за все перші операції в технологічній схемі обробки деталей мають найбільшу складність за часом виконання тому, що пов'язані з підготовки поверхні до виконання наступних операцій. Це операції токарської обробки. Всі наступні операції порівнянно з ними мають меншу складність обробки. Слід зазначити, що деякі токарські операції можуть мати однакову складність, якщо виконуються на ГВМ підряд (це випадок виконання на одному ГВМ однакових за функціональним призначенням операцій з двох сторін деталі за дві установки). Свердлильні операції за складністю виконання можна порівняти з токарськими, якщо вони виконуються на повну довжину деталі, в іншому випадку їх складність менша ніж токарських операцій. Фрезерні операції менш складні ніж токарські та свердлильні. Вони дооформлюють оброблювальну поверхню, тому їх витрати часу і відповідна складність складає 0,3-0,6. Операції різблення виконуються на поверхнях, які підготовлені свердлильними операціями, але тільки на частину довжини отвіру. Тому, їх складність треба визначати менше, ніж складність відповідних свердлильних операцій.

Отже, складність виконання операцій представлена в табл.4.

Таблиця 4.

Операція	Тип	Оброблювана поверхня. %	Складність	Час
T1	токарська	100	1	19,41176
T2	токарська	90	0,9	17,47059
T3	токарська	80	0,8	15,52941
T4	токарська	70	0,7	13,58824
T5	токарська	60	0,6	11,64706

T6	токарська	50	0,5	9,705882
31	свердлильна	80	0,8	15,52941
32	свердлильна	40	0,4	7,764706
Ф2	фрезерна	20	0,6	11,64706
P1	різблення	40	0,4	7,764706
P2	різблення	30	0,1	1,941176

У відповідності зі складністю обробки розраховується час кожної операції за формулою:

$$t_i = t_{cl} * Kon_{ij}, t_{cl} = n * t_{ob} / \sum K_{clj}, K_{clj} = \sum Kon_i$$

де  $n$  - загальна кількість операцій (деталеустановки),  $t_{ob}$  - середній час обробки однієї деталеустановки,  $t_{cl}$  - час обробки складної операції з  $Kon_i=1$ ,  $K_{clj}$  - коефіцієнт складності  $j$ -ої деталі,  $Kon_i$  - коефіцієнт складності  $i$ -ої операції, що входить в технологічний процес обробки  $j$ -ої деталі.

Результати обчислень приведені в таблиці 4.

На підставі отриманих значень складемо матрицю продолжительностей обробки деталей на ГВМ:

	Д1	Д2	Д3	Д4	Д5	Д6	Д7
Етап 1	40,77	40,77	19,41	19,41	34,94	40,77	11,65
Етап 2	13,59	11,65	40,77	40,77	40,77	13,59	40,77
Етап 3	17,48	9,7	9,71	15,53	25,24	11,65	13,59
Етап 4				25,24		7,77	9,71
Етап 5							

Маючи матрицю технологічних маршрутів і матрицю продолжительностей обробки можна скласти розклад роботи основного технологічного устаткування ГВС у виді діаграми Ганта.

### 3.3. Оперативне планування роботи ГВС

#### 3.3.1. Постановка задачі оперативного планування

Об'єктами процесу планування є роботи - технологічні операції, що виконуються над партіями деталей, для яких необхідно визначити розклад (порядок та час) проходження через обладнання при фіксованих технологічних маршрутах обробки. Технологічний маршрут деталі попередньо встановлює порядок виконання технологічних операцій на обладнанні, але він не визначає термінів надходження деталей. Технологічні маршрути складаються як послідовні або циклічні порядки застосування технологічних операцій та можуть бути повністю або частково однакові для усіх обробляємих деталей.

Формально задача оперативного планування подається таким чином.

Номенклатурний перелік продукції, яка виробляється на  $m$  групах ( $k=1, m$ ) обладнання, складається з  $n$  найменувань ( $j=1, n$ ). Виготовлення партії деталей кожного найменування заздалегідь визначено послідовністю проходження деталей через групи обладнання, яку називають технологічним маршрутом  $G_j=(L_{ij}|i=1, M_j)$ , де  $L_{ij}$  - технологічна операція, яка виконується  $i$ -ою за порядком виготовлення  $j$ -ої деталі;  $M_j$  - кількість операцій, які виконуються над  $j$ -ою

деталлю. У маршруті технологічні операції  $L_{ij}=(Q_{ij},T_{ij})$  мають такі характеристики:

$Q_{ij} = k$  - номер групи обладнання, налагодженого на виконання операції  $L_{ij}$ ;

$T_{ij}$  - нормативна тривалість виконання операції  $L_{ij}$ .

Необхідно скласти розклад  $P=(T_{ij}^H|i=1,M_j; j=1,n)$ , який визначає моменти початку виконання операцій  $L_{ij}$  (моменти запуску партії деталей на одиницях обладнання) і задовольняє системі обмежень:

- умова виконання технологічної послідовності  $T_{ij}^H \geq T_{i-1j}^K$ ;
- умова виконання технологічних маршрутів  $G_j$ ;
- умова виконання операцій без перерв  $T_{ij}^K = T_{ij}^H + T_{ij}$ ;
- умова виконання в кожний момент часу тільки однієї операції на одиниці обладнання

$$\forall L_{i1j1}, L_{i2j2} : (Q_{i1j1} = Q_{i2j2}) \Rightarrow (T_{i1j1}^K = T_{i2j2}^K),$$

де  $T_{ij}^K$  - момент закінчення виконання операції  $L_{ij}$ .

Розклад роботи обладнання з обробки деталей може бути поданий у вигляді часових діаграм Ганта, в яких відтворені паралельні процеси виконання технологічних операцій з обробки деталей на кожній одиниці обладнання. При цьому кожна одиниця обладнання має свій власний процес виконання операцій, який подається як послідовність у часі відрізків - технологічних операцій обробки відповідних деталей, про що робиться відмітка над відрізком. Тобто, у діаграмі горизонтальна координата відтворює час, а вертикальна – номер обладнання.

Пошук найкращого розкладу виконується за критерієм ефективності, вибір якого індивідуально залежить від економічних, організаційних та технічних особливостей роботи конкретного виробничого підрозділу в умовах досягнення найбільших показників господарської діяльності. Відомо, що від структури планованого розподілу деталей по обладнанню (переналадок у просторі) та розміру партій деталей (переналадок у часі) залежать значні виробничо-господарські показники. Тому процес побудови критерію ефективності складається з визначення показника оцінювання та вибору форми виразу оцінки в залежності від економічних умов організації виробництва. Найчастіше показником оцінювання в критерії визначають час виробничого циклу, фондівіддачу обладнання, обсяг незавершеного виробництва, а формою оцінювання - сумарне, максимальне чи мінімальне значення показника або його середнього значення за плановий час.

Найбільш поширеними типами критеріїв є:

1) мінімізація виробничого циклу - часу випуску заданого обсягу продукції як сумарної тривалості обробки всіх деталей:

$$\min(\max_{j,i}\{T_{ij}^K\}), \quad (1.1)$$

$$\min(\max_k\{T_k^P+T_k^H\}), \quad (1.2)$$



$$(1.3) \quad \min(\max\{\sum_j (T_{ij}^{оч} + T_{ij}^p)\}),$$

$j \quad i$

де  $T_k^p$  - сумарний час виконання операцій на  $k$ -й одиниці обладнання,

$T_k^п$  - сумарний час простоїв  $k$ -ої одиниці обладнання,

$T_{ij}^{оч}$  - очікування  $j$ -ої деталі перед обробкою на  $i$ -й операції;

2) оптимізація використання обладнання (фондовіддачі):

- максимізація завантаження обладнання, а саме

$$\text{мінімального} - \max_k(\min\{K_k^3\}), \quad (2.1)$$

$$\text{загального} - \max_k(\sum K_k^3),$$

(2.2)

$k$

де  $K_k^3 = T_k^p / (T_k^p + T_k^п)$  - коефіцієнт завантаження  $k$ -ї одиниці обладнання;

- мінімізація часу простою обладнання, а саме

$$\text{максимального} - \min(\max\{T_k^п\}),$$

(2.3)

$k$

максимального міжопераційного простою обладнання –

$$\min(\max_{j,i}\{T_{ij}^п\}), \quad (2.4)$$

$$\text{загального} - \min_k(\sum T_k^п), \quad (2.5)$$

де  $T_{ij}^п$  – простой  $k$ -ї одиниці обладнання ( $k=Q_{ij}$ ) перед виконанням операції  $L_{ij}$ ,

$$T_k^п = \sum_{(i,j|Q_{ij}=k)} T_{ij}^п - \text{сумарний простой } k\text{-ї одиниці обладнання;}$$

- мінімізація середнього міжопераційного простою обладнання, а саме

$$\text{максимального} - \min(\max\{T_k^п/N_k\}),$$

(2.6)

$k$

$$\text{загального} - \min_k(\sum T_k^п/N_k),$$

(2.7)

$k$

де  $N_k$  – кількість операцій, що виконується на  $k$ -й одиниці обладнання або кількість одиниць простою у випадку, якщо обладнання виконує однакову кількість операцій;

3) мінімізація незавершеного виробництва:

- мінімізація очікування деталей перед обробкою, а саме

$$\text{максимального міжопераційного очікування} - \min(\max\{T_{ij}^{оч}\}),$$

(3.1)

$$\text{максимального подетального очікування - } \min_{j,i}(\max\{\sum T_{ij}^{\text{оч}}\}), \quad (3.2)$$

$$\text{загального очікування - } \min_{j,i}(\sum T_{ij}^{\text{оч}}); \quad (3.3)$$

- мінімізація середнього очікування деталей перед обробкою, а саме максимального –

$$\min_{j,i}(\max\{\sum T_{ij}^{\text{оч}}/M_j\}), \quad (3.4)$$

$$\min_{j,i}(\max\{\sum T_{ij}^{\text{оч}}/N_j\}), \quad (3.5)$$

загального –

$$\min_{j,i}(\sum T_{ij}^{\text{оч}}/M_j), \quad (3.6)$$

$$\min_{j,i}(\sum T_{ij}^{\text{оч}}/N_j), \quad (3.7)$$

де  $N_j$  - кількість одиниць часу очікування  $j$ -ї деталі перед обробкою (може застосовуватися у випадку, якщо  $M_j$  однакове для всіх деталей).

Кожен з наведених типів критеріїв орієнтований на задоволення тільки власного показника ефективності виробництва. Проте, перший є деякою мірою більш загальним та багатофункціональним по відношенню до другого та третього, тому що може їх оптимізувати при різних технологічних умовах організації виробництва. Так, якщо усі деталі обробляються за однаковим технологічним маршрутом, то використання першого критерію означає також оптимізацію використання обладнання, тобто мінімізацію простою.

Частіше в реальних виробничих умовах необхідно вирішувати задачу оперативного планування, враховуючи одночасно декілька критеріїв. Одним з засобів розв'язання багатокритеріальної задачі є створення компромісного критерію. Його створення передбачає наступне:

- для кожного локального критерію ( $E_i | i=1, r$ ) розв'язується задача оптимізації і обчислюється її екстремальне значення  $E_i^*$ ;

- задаються вагові коефіцієнти пріоритету  $I_i$  та визначаються рівняння відхилень  $V_i = E_i - E_i^*$  кожного критерію від свого оптимального значення у кожному іншому випадку розв'язання задачі;

- будується вираз компромісного критерію з використанням адитивної функції  $\min_i(\sum I_i * V_i)$  або функції рівномірного відхилення  $\min_i(\sum I_i * V_i / E_i^*)$ ;

- розв'язується задача із застосуванням компромісного критерію або серед раніше знайдених рішень обирається те, яке оптимізує компромісний критерій.

Важливими показниками якості сформованого розкладу з точки зору його реалізації при оперативно-диспетчерському управлінні виступають простой обладнання, час очікування деталей перед обробкою та локальні резерви часу.

Простій - це інтервал часу між завершенням виконання попередньої операції та початком наступної за розкладом роботи обладнання. Простой бувають доопераційні (час до початку виконання першої операції на обладнанні), міжопераційні та після операційні (час після виконання останньої операції на обладнанні).

Очікування - це інтервал часу між завершенням виконання обробки деталі на попередньої за технологічним маршрутом операції та початком виконання наступної операції.

Локальний резерв - це інтервал часу, на який можна збільшити тривалість операції, не змінюючи момент початку наступної за розкладом робіт операції.

Локальний резерв операції  $L_{ij}$  розраховується як мінімальне значення між простоем обладнання  $k=Q_{ij}$  після виконання операції  $L_{ij}$  та часом очікування  $j$ -ої деталі перед обробкою на операції  $L_{i+1j}$ :

$$\begin{aligned} T_{ij}^{\text{лр}} &= \min\{T_k^{\text{лр}}, T_{i+1j}^{\text{оч}}\}, \\ T_{i+1j}^{\text{оч}} &= T_{i+1j}^{\text{н}} - T_{ij}^{\text{к}}, \\ T_k^{\text{лр}} &= T_{gh}^{\text{н}} - T_{ij}^{\text{к}}, \end{aligned}$$

де  $k=Q_{ij}=Q_{gh}$ , а  $L_{gh}$  - наступна після  $L_{ij}$  операція, що виконується на цьому обладнанні. Резерв створюється як за рахунок неможливості повного завантаження обладнання навіть за умови оптимального розв'язання задачі оптимального планування, так і за рахунок цілеспрямованого введення його у розклад роботи. Основне призначення локального резерву полягає у використанні його в оперативно-диспетчерському управлінні з метою компенсування зовнішніх впливів на час виконання операцій. Також резерви можуть бути використані для включення у розклад роботи додаткових робіт, що не порушують основну структуру розкладу, але підвищують завантаження обладнання.

### 3.3.2. Методи розв'язання задачі складання розкладу роботи обладнання

Усі методи розв'язання задач цього типу умовно розбивають на такі основні класи:

- аналітичні методи, які ґрунтуються на апараті дискретної оптимізації;
- імітаційні методи, які ґрунтуються на імітації роботи об'єкту планування та використання повного або часткового перебору варіантів запуску деталей в обробку;
- комбіновані аналітико-імітаційні методи.

Існуючі аналітичні методи звичайно прямо або непрямо пов'язані з перебором варіантів, але їх працемісткість експоненційно залежить від розмірності задачі. Відомі методи відсіювання варіантів типу "гілок та границь" дозволяють зменшити, іноді суттєво, коефіцієнт пропорційності в залежності між працемісткістю алгоритму та розмірністю задачі і тим самим поширити область практичного застосування переборних алгоритмів. Однак експоненційний характер цих алгоритмів для задач у загальному вигляді

залишається незмінним. Проте існує клас окремих задач оперативного планування, що мають аналітичні алгоритми вирішення не експоненційного характеру складності. Ці задачі мають обмеження у застосуванні, пов'язані з вихідними умовами задачі, наприклад, однаковий час або маршрут обробки, обмежену кількість обладнання - одне, два або три, та інше. Тобто ефективні аналітичні методи існують тільки для простих випадків формулювань задач оперативного планування.

Типовим представником таких задач, в яких відображаються найбільш поширені умови виробництва є задача Джонсона "про два станки", що має оптимальний алгоритм розв'язання. Виробничий участок складається з двох одиниць обладнання, яке обробляє вироби  $n$ -типів за однаковим технологічним маршрутом. Тобто деталі повинні послідовно пройти через усе обладнання. Необхідно визначити черговість запуску-випуску виробів за критерієм мінімізації виробничого циклу (загального часу) виготовлення усіх виробів.

Очевидно, що для отримання оптимального рішення потрібно мінімізувати сумарний час простою другого обладнання в очікуванні завершення обробки деталей на першому. Принципом оптимальності черговості запуску за визначеним критерієм ефективності є  $\min(T_{1k}, T_{2l}) < \min(T_{1l}, T_{2k})$ , якщо деталь  $k$  йде раніше деталі  $l$ . За допомогою цієї нерівності формується наступний алгоритм оптимізації:

- всі деталі поділяються на дві групи. До першої належать деталі в яких  $T_{1k} < T_{2k}$ , а до другої - деталі в яких  $T_{1k} \geq T_{2k}$ ;
- в першій групі деталі впорядковуються за зростання часу  $T_{1k}$ , а в другій - за зменшенням часу  $T_{2k}$ ;
- загальна черговість запуску деталей визначається як послідовність обробки деталей з першої групи, а потім з другої.

Аналогічний алгоритм може застосовуватися і у випадку трьох станків. В цьому випадку принцип оптимальності набуває такий вигляд -  $\min(T_{1k} + T_{2k}, T_{3l} + T_{2l}) < \min(T_{1l} + T_{2l}, T_{3k} + T_{2k})$ , якщо деталь  $k$  йде раніше на обробку деталі  $l$ . Тобто, в першій групі деталі впорядковуються за зростанням часу  $T_{1k} + T_{2k}$ , а в другій - за зменшенням часу  $T_{3k} + T_{2k}$ .

В разі часткового проходження деталей через одиниці обладнання, таку ситуацію також можна звести до вихідної, прийнявши нульовий час роботи обладнання. Проте, якщо кількість обладнання перевищує три одиниці застосований принцип оптимальності та наведений алгоритм не може бути використаний тому, що не дає оптимального вирішення задачі.

Імітаційні методи. Для складних задач (різні технологічні маршрути обробки, кількість обладнання перевищує три та інше) з точки зору практичних цілей отримання результату за короткий термін частіше використовують евристичні алгоритми складання розкладів на базі вирішальних правил в режимі імітації роботи виробничої системи. У цьому режимі виконуються паралельна (одночасна) побудова діаграм Ганта для усіх одиниць технологічного обладнання, які беруть участь у процесі планування. Діаграма Ганта це часовий графік виконання операцій технологічних маршрутів обробки

деталей на визначених одиницях обладнання, тобто проти кожної одиниці обладнання призначені у встановлений час операції обробки.

Алгоритм побудови розкладів за даним методом є таким:

0. Нехай у деякий момент часу  $T = \min(t_{ij}^k)$  верстат  $l = q_{ij}$  закінчив обробку операції  $i$  поточної деталі  $j$ . Цей момент визначається як мінімальний серед усіх встановлених на поточний момент термінів завершення виконання операцій в графіку робіт.

1. Оброблена деталь  $j$  заноситься у портфель робіт наступного за технологічним маршрутом верстата  $l' = q_{i+1j}$ . Портфель робіт це підготовлені (у стані очікування) до виконання на верстаті операції обробки деталей. Якщо є декілька варіантів технологічного маршруту, деталь одночасно заноситься у відповідну кількість портфельів. Якщо виконана операція була останньою за технологічним маршрутом  $i = M_j$ , тоді деталь виключається з розгляду. Цей пункт повторно виконується для всіх верстатів, які к моменту  $T$  закінчили виконання операцій.

2. Якщо портфель робіт верстата  $l$  порожній, то він буде переведений у стан простою. В іншому випадку за допомогою вирішального правила переваги з портфелю вибирається одна деталь  $j'$  та записується як поточна в розклад робіт даного верстата з зазначення часу завершення операції

$$t_{ij'}^k = t_{ij'}^H + t_{ij'}$$

Обрана таким чином деталь виключається з усіх портфельів, в котрих вона містилася. Цей пункт повторно виконується для всіх верстатів, які к моменту  $T$  закінчили виконання операцій.

3. Якщо в разі виконання п.1 з'явилась можливість завантажити верстат, який знаходиться у стані простою, то відповідна деталь записується в розклад робіт цього верстата, для якого формується нове значення часу завершення операції за правилом п.2.

4. Обирається наступний верстат з мінімальним поточним значенням  $T$  та виконується перехід до п.0. Планування ведеться до повного виконання усіх операцій над деталями або до тих пір, поки не буде побудований розклад на потрібний інтервал планування (змину/добу).

В якості вирішальних правил в алгоритмах імітаційного моделювання найчастіше використовуються наступні правила переваги:

1) правило найкоротшої операції – з поточного портфелю робіт, які підготовлені до виконання на поточному верстаті, обирається деталь з мінімальним часом обробки; мета правила – якнайскоріше завантажити роботою наступні за технологічним маршрутом верстати;

2) правило максимальної залишкової трудомісткості – з поточного портфелю робіт, які підготовані до виконання, обирається деталь з максимальною сумою часу обробки на усіх ще невиконаних операціях; мета правила – закінчити обробку усіх деталей приблизно одночасно;

3) правило вирівнювання завантаження верстатів – з портфелю робіт обирається деталь, яка потім надходить на верстат, який має у даний час мінімальний за трудомісткістю портфель підготовлених робіт; мета правила –

рівномірно завантажити верстати (правило можна використовувати при багатоваріантних маршрутах);

4) правило мінімальної залишкової трудомісткості – альтернатива правилу 2;

5) правило найдовшої операції – альтернатива правилу 1.

6) правило призначення у порядку надходження (FIFO) – з поточного портфелю робіт обирається деталь, яка надійшла в чергу на обробку до верстата першою;

7) правило LIFO – альтернатива правилу 6.

Із наведених правил видно, що вони мають евристичний характер, тобто з їх допомогою неможливо встановити та оцінити наближення до оптимальності отриманого рішення, але можна виробити "добре" рішення в залежності від їх призначення по застосуванню чи від критерію функціонування виробничої системи, для якої розробляється розклад роботи.

Аналітико-імітаційні методи будуються за схемою, що передбачає використання одночасно як аналітичних, так і імітаційних процедур. Всі ці методи відрізняються один від одного підходом до черговості застосування аналітичних і імітаційних процедур.

Один з таких підходів передбачає двох-етапне розв'язання задачі. На першому етапі планується обробка невеликої кількості збільшених партій деталей на двох або трьох групах технологічного обладнання. Тобто проводиться зменшення розмірності задачі для того, щоб використати точні аналітичні методи, наприклад алгоритм задачі Джонсона. На другому етапі будуються уточненні календарні плани для кожної з створених груп обладнання з використанням імітаційних методів. Групування обладнання виконується за критерієм мінімізації кількості деталей, що проходять обробку більш, ніж у одній групі. Групування деталей виконується за критерієм мінімізації кількості обладнання, які обробляють більш, ніж одну групу деталей.

Таким чином, декомпозиція задачі планування дозволить суттєво зменшити розмірність, складність та прискорить розв'язання задачі. Проте існує залежність якості рішення від точності оцінок часу обробки збільшених партій деталей, що застосовуються на першому етапі. Тому при використанні такого підходу в аналітико-імітаційних методах необхідно розробляти декілька варіантів виконання першого етапу з метою проведення якісного аналізу отриманих результатів задачі.

### 3.4. Організація оперативно-диспетчерського управління ГВС

Оперативна диспетчеризація пов'язана з визначенням фактичних моментів запуску деталей у виробництво та їх надходження на технологічне устаткування. При цьому враховуються витрати часу на підготовчо-заключні операції, переналагодження, операції обслуговування та транспортування. Оперативна диспетчеризація здійснюється в реальному масштабі часу на підставі результатів оперативного контролю і встановлених оперативним

плануванням планових графіків запуску-випуску деталей. Тому синхронна модель роботи всіх одиниць устаткування (технологічних, транспортних) для використання на стадії оперативного контролю і оптимальна стратегія обслуговування запуску деталей у виробництво при регулюванні ходу виробничого процесу повинні бути результатами спільного розгляду задач оперативного планування й диспетчеризації.

Мове йде про те, що при оперативному плануванні необхідно детально проробити графік роботи всього комплексу обладнання або визначити план роботи тільки технологічного устаткування та встановити стратегію диспетчеризації операцій обслуговування й транспортування, а диспетчеризацію здійснити в режимі застосування синхронної моделі функціонування або в режимі прямої диспетчеризації транспортних операцій відповідно до стратегії обслуговування основного технологічного устаткування.

Отже, реалізація задач оперативного планування та оперативної диспетчеризації тісно взаємопов'язані, оскільки вибір алгоритму організації диспетчерського управління суттєво впливає на тривалість проходження партій деталей через виробничу систему, а саме на заплановані терміни запуску-випуску деталей на технологічному устаткуванні.

Безпосередньо ходом виробничого процесу керує підсистема оперативно-диспетчерського управління, яка відповідно до обраного алгоритму реалізує спланований розклад роботи устаткування.

Задача диспетчеризації полягає у наступному. Порядок проходження деталей (заявок на обробку) через технологічне устаткування відомий з розрахованого попередньо розкладу роботи. Необхідно організувати транспортне обслуговування встановленого порядку робіт із запуску-випуску деталей на технологічному устаткуванні. Критерієм роботи такої системи є дотримання строків запуску-випуску деталей на технологічне устаткування відповідно до розробленого системою оперативного планування розкладу роботи за рахунок своєчасного транспортного обслуговування заявок, що надходять від технологічного устаткування.

Кожний розрахунковий момент у процесі диспетчеризації визначається наявністю заявок на транспортне обслуговування деталей та вільними засобами транспортування. Кожна заявка характеризується місцем доставки деталі, директивним терміном завершення доставки (обумовленим графіком обробки деталі) та переліком можливих засобів її транспортування. Місце доставки визначає тип заявки обслуговування, а наявність декількох заявок або декількох вільних засобів обслуговування породжує конфлікт вибору заявки та призначення їй засобу обслуговування.

Отже, диспетчеризація повинна передбачати розв'язання наступних типів конфліктів:

- обслуговування заявок спільним засобом;
- надання засобів спільній заявці.

Стратегія обслуговування будується на базі послідовного розв'язання конфлікту з вибору заявки та визначення засобу її подальшої реалізації.

Вибір заявки базується на встановленні її типу, серед яких є:

- заявки на обслуговування деталей, які повинні надійти з технологічного устаткування на склад;
- заявки на обслуговування деталей, які повинні надійти з одного технологічного устаткування на інше (у випадку неможливості виконання такого обслуговування воно може бути замінене на обслуговування через склад з тимчасовим зберіганням деталей і подальшим їх відправленням на необхідне устаткування);
- заявки на обслуговування деталей, які повинні надійти зі складу на технологічне устаткування.

Вибір заявки-претендента на обслуговування здійснюється за правилом переваги одного типу над іншим. Наприклад, спочатку розглядаються заявки першого, потім другого і надалі третього типів. Переваги типів заявок визначаються пріоритетом на першочерговий порядок виконання операцій у виробничій системі.

Організація вибору претендента в середині кожного типу заявок здійснюється на базі пріоритетних правил переваги заявок:

- найкоротшої транспортної операції;
- найбільш критичний директивний термін запуску на технологічне устаткування;
- мінімальної залишкової трудомісткості технологічних операцій;
- мінімальної залишкової трудомісткості транспортних операцій;
- правила FIFO, LIFO та ін.

Призначення засобу обслуговування обраної заявки здійснюється на базі пріоритетів на надання устаткування. Стратегія надання може формалізувати один з наступних принципів адресування заявок вільному устаткуванню:

- заявка направляється на устаткування з мінімальним поточним завантаженням;
- заявка направляється на найближче за часом доставки устаткування;
- заявка направляється випадковим чином або за жорстко заданим пріоритетом.

Таким чином, загальний алгоритм диспетчерського управління на базі стратегії транспортного обслуговування складається з наступних етапів:

1. Виконати опитування ГВМ на завершення виконання технологічних операцій (відповідно до розкладу роботи у вигляді діаграми Ганта) і сформувати черги заявок на завантаження транспортних засобів.
2. Визначити порядок обслуговування заявок з черг вільних у поточний момент транспортних засобів відповідно до встановленого пріоритету заявок.
3. Для кожної обраної заявки призначити вільний транспортний засіб відповідно до обраної стратегії адресування заявок.
4. Завантажити транспортне устаткування і скоригувати всі черги завантаження, виключивши обрану заявку.
5. Повторювати алгоритм з п. 1, поки є заявки на транспортне обслуговування.

Результатом алгоритму є діаграма Ганта, в якій відтворені всі одиниці



технологічного і транспортного устаканування, скоординовані всі операції обробки і обслуговування. Таку діаграму найчастіше називають технологічним (розширеним) розкладом роботи ГВС.

### 3.5. Засоби моделювання дискретних процесів

Ефективним засобом моделювання дискретних процесів є сітки Петрі [2,Д1,Д4]. Їх основні властивості полягають у можливості відображення паралелізму, асинхронності, ієрархічності об'єктів, що моделюються, більш простішими засобами. Тому використання сіток Петрі для дослідження ієрархічних дискретних систем, зокрема ГВС, є кращим.

#### 3.5.1. Визначення мережі Петрі

Мережа Петрі - причинно-наслідкова модель уявлення подій, що виникають у процесі роботи дискретної системи [10]. Процеси, які моделюються, подаються як множина подій та умов. Події - це дії (наприклад, виконання технологічних операцій), послідовність наступу яких керується становищами системи. Становища системи визначаються сукупністю умов, серед яких виділяють:

1) передумови - пов'язані з фактом наступу події;

2) післяумови - пов'язані з фактом здійснення події. Таким чином мережа Петрі уявляється сукупністю пов'язаних подій та умов, що виникають у системі яка моделюється.

Для завдання мереж Петрі найчастіше використовують такі способи, як теоретико-множинне визначення, графічне уявлення та матричне подання.

#### Теоретико-множинне визначення мереж Петрі.

Формально мережа Петрі  $N$  може бути задана у вигляді наступної п'ятірки елементів:

$$\begin{aligned} N &= (P, T, F, H, Mo), \\ P &= \{P_i | i=1, n\}, \\ T &= \{T_j | j=1, m\}, \\ F: P \times T &\Rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}, \\ H: T \times P &\Rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}, \\ Mo: P &\Rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}, \end{aligned}$$

де  $P$  - множина позицій, які зображають умови в системі;

$T$  - множина переходів, які зображають події в системі;

$F, H$  - функції інцидентів позицій та переходів, що визначають доумови або постумови подій;

$Mo$  - початкове маркірування мережі.

Функція  $F$ , визначивши передумови здійснення подій, призначає кожному переходу вхідну множину позицій  $T_j = \{P_i | F(P_i, T_j) \neq 0\}$ , а функція  $H$ , визначивши післяумови, призначає кожному переходу вихідну множину позицій  $T_j = \{P_i | H(T_j, P_i) \neq 0\}$ . Маркірування  $Mo(P_i)$  означає кількість маркерів у позиції  $P_i$  мережі.

Слід зауважити, що перші чотири елементи визначають структуру системи, а останій елемент - динаміку поведінки системи, її початковий стан.

Динаміка мережі пов'язана з рухом маркерів по позиціях (виконання умов у системі) у результаті спрацьовувань переходів (реалізації дій), внаслідок чого створюються нові маркування позицій  $M(P_i)$ . Тобто динаміка мережі Петрі відображає послідовність виконання запланованих дій, внаслідок яких система змінює своє становище.

#### Графічне уявлення мереж Петрі.

Графічно мережа Петрі - це дводольний орієнтований мультиграф, де:

- дводольність означає наявність двох типів вершин (позицій та переходів);
- орієнтованість означає, що всі дуги мають певний напрямок;
- мультиграф - дуги можуть мати кратність (вона позначається значенням понад дугою або кількістю дуг).

Графічне уявлення пов'язане з теоретико-множинним визначенням наступним чином:

- 1) позиції відображаються кругами;
- 2) переходи відображаються рисками;
- 3) функції  $F$  і  $H$  - орієнтованими дугами, кількість або кратність яких визначається значенням функцій;
- 4) маркування мережі відображається кількістю маркерів у позиціях.

#### Матричне подання.

Матричне подання це аналітичний спосіб уявлення мережі Петрі. У цьому випадку функції інцидентій та початкове маркування зображаються у вигляді матриць розміром  $[n \times m]$

$$F = [F_{ij} | i=1, n; j=1, m],$$

$$H = [H_{ij} | i=1, n; j=1, m]$$

та вектором-стовпчиком розміром  $[n \times 1]$

$$M_o = [M_{oi} | i=1, n],$$

де  $F_{ij} = F(P_i, T_j)$ ,  $H_{ij} = H(T_j, P_i)$ ,  $M_{oi} = M_o(P_i)$ .

### 3.5.2. Правила роботи мережі Петрі

Робота (функціонування) мереж Петрі визначається як послідовність спрацьовування переходів, внаслідок чого відбувається зміна маркувань позицій.

Перехід може спрацьовувати, якщо він є збудженим.

Перехід  $T_j$  вважається збудженим, якщо виконується наступна умова:

$$\text{для усіх } P_i \in {}^{\circ}T_j: M(P_i) \geq F(P_i, T_j).$$

Тобто виконуються доумови здійснення модельованої цим переходом події - у кожній вхідній позиції переходу кількість маркерів не менше кратності дуги, що їх з'єднує.

Тоді умова спрацьовування збудженого переходу  $T_j$  має такий вигляд:

$$\text{для усіх } P_i \in T_j': M'(P_i) = M(P_i) + H(T_j, P_i) - F(P_i, T_j).$$

Тобто при спрацьовуванні збудженого переходу маркування  $M$  замінюється маркуванням  $M'$  за правилом - з вхідних позицій переходу забирається певна кількість маркерів, яка визначається функцією  $F(P_i, T_j)$ , а

вихідні позиції переходу отримують іншу кількість маркерів, яка визначається вже функцією  $H(T_j, P_i)$ .

Необхідно відмітити, що у разі використання матричного способу подання мереж Петрі умова збудження переходу  $T_j$  має вигляд  $M \geq F * U$ , а умова спрацьовування  $M' = M + (H - F) * U$ ,

де  $U = [U_j | j=1, m]$  - вектор-стовпчик розміром  $[m * 1]$ , у якого всі елементи дорівнюють 0, крім  $U_j = 1$ .

У будь-якому стані мережі Петрі може існувати декілька одночасно збуджених переходів. Але послідовність їх спрацьовування не встановлена і може бути будь-яка, але без одночасного спрацьовування переходів. Тому в мережах Петрі визначають декілька прийнятних послідовностей спрацьовувань переходів, що породжують послідовності виникаючих маркувань. Це відображає паралелізм та недетермінізм мереж Петрі.

Таким чином з функціонуванням мережі Петрі пов'язують дві послідовності:

- 1) послідовність спрацьовуючих переходів;
- 2) послідовність виникаючих (досяжних) маркувань. Ці послідовності є взаємопов'язаними.

Два маркірування  $M$  і  $M'$  вважаються безпосередньо досяжними, якщо у функціонуванні мережі існує перехід  $T_j$ , спрацьовування якого переводить мережу з  $M$  у  $M'$ :

$$\begin{array}{c} T_j \\ M \Rightarrow M' \end{array}$$

Два маркування  $M$  і  $M'$  вважаються досяжними, якщо у функціонуванні мережі існує послідовність переходів  $G = (T_{j1}, T_{j2}, \dots, T_{jk})$ , яка переводить мережу з  $M$  у  $M'$ :

$$\begin{array}{c} M \Rightarrow M', \\ \text{тобто виникає послідовність безпосередньо досяжних маркірувань} \\ T_{j1} \quad T_{j2} \quad T_{jk} \\ M \Rightarrow M_1 \Rightarrow M_2 \dots M_k \Rightarrow M'. \end{array}$$

Таким чином, формально функціонування мережі подається:

- мовою мережі Петрі  $L(N)$  - множиною послідовностей спрацьовуючих переходів;

- множиною досягаємості  $R(N)$  - множиною маркувань, досяжних з початкового маркування.

Ці послідовності об'єднуються у рамках єдиної моделі уявлення роботи мережі - графа досягаємості - орієнтованого графа, вершинами якого є маркування з множини  $R(N)$ , а дугами є спрацьовуючі переходи з  $L(N)$ . Початковому маркуванню відповідає коренева вершина дерева, а дуги, відмічені переходами  $T_j$ , з'єднують вершини-маркування, що є безпосередньо досяжними при спрацьовуванні  $T_j$ . Дерево досягаємості в загальному випадку може бути нескінченним з вершинами таких типів: 1) внутрішнє маркування, яке є досяжним з початкового маркування та не є тупиковим; 2) тупикове маркування, з якого не може спрацьовувати ні один перехід; 3) дублююче

маркування  $M_d$ , яке відповідає вже введеному раніше у дерево маркуванню  $M=M_d$  (але якщо на шляху з початкового маркування до  $M_d$  зустрічається маркування  $M$ , то  $M_d$  є маркуванням-циклом); 4) накопичуюче маркування  $M_n$ , відповідно якому на шляху від початкового маркування існує інше маркування  $M$  таке, що  $M \leq M_n$ . Нескінченність дерева можливе тільки у випадку існування накопичуючих маркірувань, які породжують циклічне повторення однакових послідовностей спрацьовуючих переходів.

Для того, щоб побудувати скінченне дерево досягаємості і подати процес нескінченного накопичування маркерів у позиціях мережі, вводиться позначення у вигляді символу  $w$ , володіючого такими властивостями:

$$w + a = w, w - a = w, a < w.$$

Тоді алгоритм побудови скінченного дерева досягаємості базується на наступних положеннях:

1. Алгоритм послідовно обробляє вершини, перетворюючи кожну кінцеву (необроблену) в одну з типових - тупікову чи дублюючу.

2. Якщо поточне маркування  $M$  не кваліфікується як одна з двох наведених, то  $M$  стає внутрішньою для якої формується підмножина безпосередньо досяжних маркувань, котрі у дереві стають кінцевими вершинами. Нові кінцеві маркування  $M'$  визначаються за результатами спрацьовування збуджених у  $M$  переходів за наступними правилами:

- якщо  $M(P_i) = w$ , то  $M'(P_i) = w$ ;

- якщо на шляху з початкового маркування до  $M'$  існує таке маркування  $M''$ , що

$$M'' \leq M' \text{ і } M''(P_i) < M'(P_i), \text{ то } M'(P_i) = w;$$

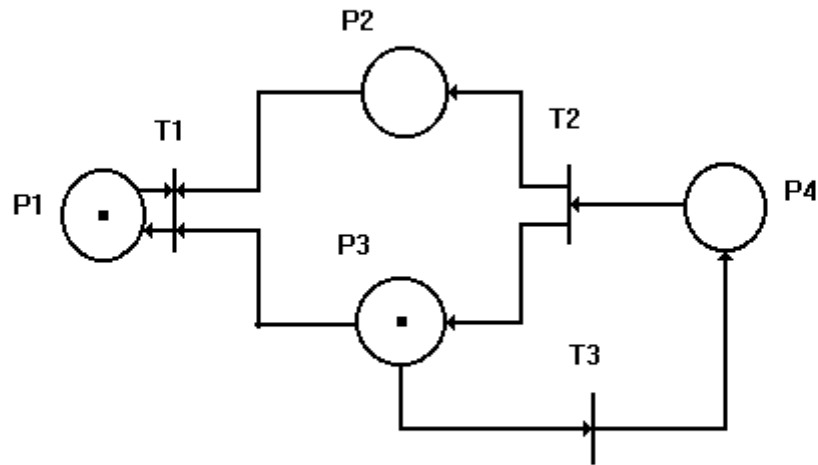
- у противному разі  $M'(P_i)$  зберігає своє значення, отримане внаслідок спрацьовування переходу.

3. Коли усі вершини будуть оброблені алгоритм зупиняється.

Побудова скінченного дерева досягаємості дозволить практично використати його для дослідження властивостей мережі Петрі.

### 3.5.3. Приклад визначення та моделювання роботи мережі Петрі

Подамо за графічним зображенням мережі на мал.5.1 її теоретико-множинне та матричне визначення, побудуємо дерево досяжності і визначимо характеристики роботи мережі.



Мал.5.1

Теоретико-множинне визначення мережі:

$N = (P, T, F, H, Mo)$ ,

$P = \{P1, P2, P3, P4\}$ ,  $T = \{T1, T2, T3\}$ ,

$F(Pi, T1) = 1$  для  $i = 1, 2, 3$ ,  $F(P4, T1) = 0$ ,

$F(P4, T2) = 1$ ,  $F(Pi, T2) = 0$  для  $i = 1, 2, 3$

$F(P3, T3) = 1$ ,  $F(Pi, T3) = 0$  для  $i = 1, 2, 4$

$H(T1, P1) = 1$ ,  $H(T1, Pi) = 0$  для  $i = 2, 3, 4$

$H(T2, Pi) = 1$  для  $i = 2, 3$ ,  $H(T2, Pi) = 0$  для  $i = 1, 4$

$H(T3, P4) = 1$ ,  $H(T3, Pi) = 0$  для  $i = 1, 2, 3$

$Mo(P1) = Mo(P3) = 1$ ,  $Mo(P2) = Mo(P4) = 0$ .

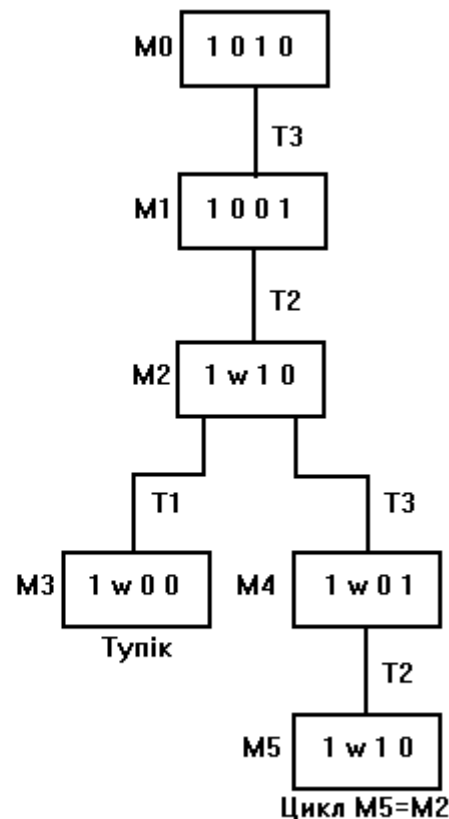
Множини вхідних позицій переходів:  $T1 = \{P1, P2, P3\}$ ,  $T2 = \{P4\}$ ,  $T3 = \{P3\}$ .

Множини вихідних позицій переходів:  $T1' = \{P1\}$ ,  $T2' = \{P2, P3\}$ ,  $T3' = \{P4\}$ .

Матричне подання:

$$F = \begin{bmatrix} 100 \\ 100 \\ 101 \\ 010 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 100 \\ 010 \\ 010 \\ 001 \end{bmatrix} \quad Mo = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Дерево досяжності:



Переходи спрацьовують усі, але є тупікове маркірування M3, циклічне повторення маркірувань  $M2 \Rightarrow M4 \Rightarrow M5$  та початкове маркірування недосяжне з будь-якого іншого у дереві.

#### 3.5.4. Динаміка мереж Петрі

Метою якісного аналізу характеристик є виявлення неприпустимих станів і визначення умов нормального функціонування обладнання систем згідно завдання.

Мережі Петрі, як математичний засіб опису об'єктів які досліджуються, відображають логічну послідовність подій, що виникають у процесі їх функціонування, до яких відносять і виробничі системи. Ця послідовність подій має характеристики паралельних процесів, якісний аналіз яких потребує визначення виконання у процесі функціонування системи наступних умов: 1) повторна ініціалізація операції в процесі припустима тільки після завершення попереднього виконання її у системі; 2) використання в дискретній системі ресурсів (обладнання) має кількісне обмеження по застосуванню; 3) у взаємодії частин паралельних процесів переміщення матеріальних потоків та надання розподілених ресурсів не повинно з'являтися блокувань розвитку подій, тупікових станів або зацікловань у виконанні послідовних дій. Поява тупікового стану означає, що процес руху матеріальних потоків припиняється або продовжує функціонувати по закнутому циклу не досягнув свого кінцевого стану. Блокування розвитку подій означає, що в процесі надання розподілених

ресурсів було застосовано конкурентне їх використання, яке призвело до неможливості їх надання й надалі.

Перевірка цих умов практично означає встановлення властивостей динаміки роботи мережі Петрі.

#### Визначення властивостей мережі Петрі.

Розглянемо мережу Петрі як математичну систему якісного аналізу динаміки роботи дискретного об'єкту. Визначимо, що структурні елементи мережі можуть інтерпретуватися наступним чином: позиції - це умови виконання або ознаки здійснення дій (операцій) на об'єкті-ресурсі (обладнанні), переходи - це події, що здійснюються на об'єкті у разі виконання необхідних умов, маркування - це поточний стан об'єкту. При описі процесів об'єкту мережами Петрі будь-яке маркування мережі асоціюється з визначеним станом об'єкту який моделюється. Спрацьовування будь-якого переходу  $T_j$  мережі  $N$  пов'язане із зміною його стану (виконанням елементарної дії у процесі). Тому статичні властивості об'єкту визначає графова частина мережі Петрі, а динамічні - початкове маркування і правила збудження-спрацьовування переходів, що відображає моделювання роботи об'єкту.

Основними властивостями маражі Петрі є обмеженість, безпечність, живість, збереженність.

#### 1. Обмеженість та безпечність мережі.

Позицію  $P_i$  називають  $k$ -обмеженою, якщо кількість маркерів у цій позиції не перевищує деяке число  $k$  для усіх досяжних маркувань з множини  $R(N)$ , тобто

$$\text{для усіх } M \in R(N) \text{ існує } k: M(P_i) \leq k.$$

У свою чергу, мережа Петрі є  $k$ -обмеженою, якщо усі позиції мережі є  $k$ -обмеженими. Тобто, якщо у мережі позиції  $P_i$  обмежені числами  $k_1, k_2, \dots$ , то в цілому мережа Петрі буде  $k$ -обмеженою, причому  $k = \max\{k_1, k_2, \dots\}$ . Інакше кажучи, для кожної позиції мережі у всіх маркуваннях з  $R(N)$  існує єдина кінцева кількість маркерів, що з'являються там одночасно.

У випадку, коли  $k=1$ , отримуємо частковий випадок обмеженості - безпечна позиція та безпечна мережа.

Мережа  $N$  вважається безпечною, якщо при всіх досяжних маркуваннях її позиції не можуть мати більше одного маркеру.

Обмеженість свідчить про кінцевий стан окремих елементів системи, яка моделюється мережею Петрі, а безпечність визначає факт виконання умов при роботі об'єкту моделювання. Отже, якщо накопичувач обладнання має обмежену місткість, то позиція яка відображає факт накопичення маркерів-деталей матеріального потоку повинна бути обмеженою, а якщо обладнання зайняте виконання поточної операції, то позиція яка відображає цей факт повинна бути завжди безпечною у мережі Петрі.

#### 2. Збереженність мережі.

Мережа Петрі називається зберігаючою по відношенню до вагового вектору  $Z=(Z_i|i=1,n)$ , якщо для кожного  $M \in R(N)$  виконується умова:

$$\sum [(Z_i * M(P_i)), i=1,n] = \sum [(Z_i * M_0(P_i)), i=1,n] = \text{Const.}$$

Якщо  $Z_i=1$  для усіх  $i=1,n$ , то мережа називається суворо зберігаючою. Необхідною умовою збереження є обмеженість мережі, а достатнім - наявність вектора  $Z$ .

Мережа є зберігаючою, якщо існує рішення системи  $R * S = \text{Const}$ , де рішенням є вектор  $S$ , а  $R$  - матриця досяжних маркірувань з  $R(M)$ .

Зберігання мережі свідчить про неможливість знищення або виникнення додаткових ресурсів у системі яка моделюється. Наприклад, кількість обладнання незмінне до кінця роботи системи, або всі деталі повинні пройти обробку, змінивши свої властивості чи перетворитися у нові деталі.

### 3. Живість мережі.

Живість - це властивість, що пов'язана з відсутністю тупикових ситуацій (блокувань) та зациклювань процесу функціонування мережі. Об'єкти, моделі яких володіють властивістю живості, можуть переходити з будь-якого досяжного стану в інше, у тому числі і в початкове.

Мережу вважають живою, якщо виконуються дві умови:

$T_j$

1) для усіх  $T_j \in T$  існує  $M_l, M_k \in R(N)$ :  $M_l \Rightarrow M_k$ , тобто будь-який перехід повинен спрацювати при моделюванні роботи мережі (отже будь-яка дія буде завжди виконана в системі);

2) для усіх  $M_l, M_k \in R(N)$ :  $M_l \Rightarrow M_k$ , тобто в мережі існує взаємодосяжність маркувань, у тому числі і початкового маркування, що визначає відсутність тупиків та зациклювань у роботі мережі (отже процес функціонування системи завжди завершується нормально, повернувшись у початковий стан).

Маркування  $M \in R(N)$  називають тупиковим, якщо в цьому стані жоден з переходів не може спрацювати. Мережа, що має тупикові маркування є не живою.

Якщо у мережі  $N$  є позиції  $P_i$  для яких  $F(P_i, T_j)=0$  або  $H(T_j, P_i)=0$ , а мережа  $N'$ , що є частиною  $N$  без таких позицій є живою, то мережу  $N$  вважають умовно живою.

### 3.5.5. Методи аналізу властивостей мережі Петрі

Використовуються такі методи аналізу властивостей мережі Петрі:

- 1) дослідження структури дерева досягаємості;
- 2) дослідження матричного подання мережі Петрі;
- 3) редуційні способи аналізу.

Визначення властивостей мережі Петрі на обмеженість та безпечність за допомогою дерева досяжності передбачає дослідження кожної вершини графу на поточну кількість маркерів в кожній позиції, а живість встановлюється за умови виконання наступних вимог:

- в позначках дуг використані усі переходи мережі;
- немає вершин, що позначають тупикові та накопичуючі маркування;
- усі циклічні повторення вершин мають вихід з цього, що веде до початкової вершини;



- існує цикл у початкове маркування.

Проте визначити властивість зберігаємості мережі, використавши дерево досяжності не можливо.

Отже, перевірка властивостей мереж може виконуватись шляхом побудови і аналізу дерева досяжності, але це потребує встановлення усіх досяжних у мережі маркувань, що є важкою задачею повного перебору станів. Тому існує інший спосіб, який уявляє собою структурний аналіз мережі, заснований на матриці інцидентій і початкового маркування [9].

Виходячи із умов збудження та спрацьовування переходів, динаміку мережі в просторі станів (маркувань) можна описати таким рекурентним рівнянням (рівнянням стану мережі):

$$M_k = M_{k-1} + A * U_k ; k = 1, 2, \dots \quad (5.1)$$

де  $M_k$  - стан, у який перейде мережа з стану  $M_{k-1}$  у результаті  $k$ -го впливу  $U_k$  (спрацьовування переходу);  $U_k = [U_{jk}]$  - керуючий вектор, компонента якого  $U_{jk}=1$ , якщо в  $k$ -й момент асинхронного часу виникає спрацьовування переходу  $T_j$ , або  $U_{jk}=0$ , якщо спрацьовування не відбувається;  $A = [A_{ij}]$  - матриця інцидентій позицій та переходів, елементи  $A_{ij}$  якої дорівнюють 1, -1 або 0, коли, відповідно, перехід  $T_j$  має 1 вихідних дуг до позиції  $P_i$ , 1 вхідних дуг з позиції  $P_i$ , або не має зв'язку з позицією  $P_i$ .

Матрицю  $A$  можна розрахувати на підставі операції над матрицями  $F = [F_{ij}]$  і  $H = [H_{ij}]$ , які задають кількість дуг, що виходять відповідно з позицій і переходів

$$A = H - F,$$

тобто елементи  $F_{ij}$  задають кількість маркерів, які потрібно забрати з позиції  $P_i$  при спрацьовуванні переходу  $T_j$ , а елементи  $H_{ij}$  визначають кількість маркерів, які направляються у позицію  $P_i$  при спрацьовуванні переходу  $T_j$ .

Очевидно, що в будь-якому стані компоненти вектора маркування не можуть бути від'ємними. Вони можуть приймати лише нульові або додатні цілочисельні значення. Ця умова у матричному запису має вид  $M_k \geq 0$  для всіх  $k$ . Враховуючи останнє, з рівняння станів одержуємо  $M_{k-1} + A * U_k \geq 0$ , а послідовність маркувань (5.1) можна замінити єдиним виразом через початкове маркування  $M_0$  і вектор підрахунку спрацьовувань:

$$S = \sum [U_k, k=1, 2, 3, \dots]; S = [S_j | j=1, m]. \quad (5.2)$$

Елемент  $S_j$  вказує, яку кількість разів спрацьовує перехід  $T_j$  в послідовності маркувань, яка йде від  $M_0$  к  $M_k$ . Враховуючи рівняння (4.2), з (5.1) одержимо:

$$M_k = M_0 + A * S \quad (5.3)$$

Або увівши вектор зміни маркування

$$dM = M_k - M_0,$$

з рівняння (5.3) одержимо рівняння

$$A * S = dM \quad (5.4)$$

Всі можливі рішення даного рівняння можна отримати за допомогою одного з методів рішення задач цілочисельного програмування.

Розглянемо використання методів лінійної алгебри в розв'язанні рекурентних рівнянь зміни станів моделі мережі. Вони дозволяють на основі математичного дослідження структури біграфа мережі і початкового маркування  $M_0$  оцінити такі якісні характеристики мережі як обмеженість, живість.

Цілочисельний вектор  $X = [X_i | i=1, n]$ , який є рішенням лінійної системи

$$A \sim * X = 0 \quad (5.5)$$

називається  $p$ -інваріантом.

Розглянемо рівняння (5.1), обидві частини якого помножимо на транспонований вектор  $X \sim$  ( $\sim$  - позначка транспонування):

$$X \sim * M = X \sim * M_0 + X \sim * A * S \quad (5.6)$$

Враховуючи (5.5) і те, що  $A \sim * X = X \sim * A$ , з виразу (5.6) одержимо:

$$X \sim * M = X \sim * M_0 \quad (5.7)$$

Тобто, будь-який  $p$ -інваріант характеризує всі досяжні маркування мережі з точки зору збереження деяких властивостей процесів. Якщо позначити

$$X \sim * M_0 = K_0,$$

де  $K_0$  - константа, то інваріантність маркувань мережі представимо у вигляді співвідношення-рівності:

$$X \sim * M = K_0 = \text{const} \quad (5.8)$$

Вектор  $X$  тому називають  $p$ -інваріантом, що він визначає властивості структури мережі у розподілі маркерів за позиціями  $P_i$  незалежно від будь-якого досяжного маркування.

Враховуючи, що система (5.5) може мати нескінченну кількість рішень, фундаментальною системою розв'язків системи лінійних однорідних рівнянь називають таку сукупність рішень, за допомогою якої виражаються всі інші розв'язки. Якщо ранг матриці  $A$  дорівнює числу невідомих ( $r=n$ ), то система (5.5) має тільки нульове рішення. Якщо  $r < n$ , то система (5.5) окрім нульового має нескінченну множину інших рішень, причому фундаментальна система складається з  $(n-r)$  векторів  $X$ . Ранг матриці  $A = [a_{ij}]$  розміром  $(n \times m)$  дорівнює найвищому порядку відмінного від нуля визначника, одержанного викреслюванням  $(n-r)$  стовпців і  $(m-r)$  рядків з матриці  $A$ . Таким чином, всі інваріанти  $X$  для маркувань мережі можна отримати з  $(n-r)$  базисних рішень. Об'єднавши записані у вигляді векторів-рядків рішення фундаментальної системи, одержимо матрицю інваріантів чи базисних рішень  $B$ . Тоді для будь-якого досяжного маркування подібно рівнянню (5.7) матиме

$$B * M = B * M_0 = K_0 \quad (5.9)$$

Якщо всі компоненти  $p$ -інваріанту невід'ємні, його називають  $p$ -ланцюгом. Повний  $p$ -ланцюг - це  $p$ -інваріант, всі компоненти якого додатні, тобто повний  $p$ -ланцюг містить у собі всі позиції мережі. Мережа Петрі інваріантна (зберігаюча), якщо для неї існує повний  $p$ -ланцюг. Повний  $p$ -ланцюг потрібно шукати серед усіх рішень фундаментальної системи  $B$  або їх лінійної комбінації.

Інваріантна мережа Петрі є обмеженою, але обмежена мережа може бути не інваріантною, тобто не мати повного ланцюга. Це впливає з того, що якщо

$X$  - повний  $p$ -ланцюг і  $X \sim M = K_0$ , то зважена сума маркерів за всіма позиціями  $\sum [(X_i * M_i), i=1, n] = K_0$  є обмеженою. А оскільки  $X_i$  - додатні і вся сума обмежена, то і маркування всіх позицій мережі  $M_i \leq K_0 / X_i$  обмежені. Слід зауважити, що якщо повний  $p$ -ланцюг є одиничним вектором і  $K_0 = 1$ , то мережа є безпечною.

Розглянемо наступну характеристику мережі - живість, визначення якої базується на обчисленні  $t$ -інваріантів.

Цілочислений вектор  $Y = [Y_j]_{j=1, m}$  називається  $t$ -інваріантом, якщо він є розв'язком лінійної однорідної системи

$$A * Y = 0 \quad (5.10)$$

Якщо значення  $t$ -інваріанту підставити в рівняння (5.3) замість вектора підрахунку спрацьовувань  $S$ , то виявиться, що

$$M = M_0 + A * Y = M_0.$$

Звідси випливає, що якщо  $Y \neq 0$ , то мережа стійка, тобто після деяких спрацьовувань переходів вона повертається в початковий стан  $M_0$ . Стійкість мережі пов'язана з її циклічною повторюваністю, починаючи зі стану  $M_0$ . Слід зазначити, що серед рішень системи (5.10) можуть бути і такі вектори  $Y$ , компоненти яких від'ємні.

Повний  $t$ -ланцюг - це  $t$ -інваріант, всі компоненти якого додатні. Повний  $t$ -ланцюг включає в собі усі переходи мережі. Якщо мережа має повний  $t$ -ланцюг, то вона стійка, що є тільки необхідною умовою живості при будь-якому початковому маркуванні, оскільки встановлено, що в послідовності маркувань від  $M_0$  до  $M = M_0$  спрацьовують всі переходи, але не визначено чи існують тупікові маркування. Пошук повного  $t$ -ланцюга здійснюється подібно до пошуку повного  $p$ -ланцюга. Таким чином, якщо мережа жива, то вона стійка.

Вирішимо питання знаходження тупікових станів. Тупік це досяжний з початкового маркування стан у якому не збуджений жоден з переходів мережі. Запишемо умову збудження переходу  $T_j$  у наступному виді:

$$\sum [(F_{ij} * M_i), i=1, n] \geq \sum [F_{ij}, i=1, n], j=1, m$$

або

$$F * M \geq F * E,$$

де  $E$  - одиничний вектор.

Оскільки множина досяжних маркувань  $R(N)$  повинна задовольняти умові (5.9), то відсутність збуджуваних переходів для  $M \in R(N)$  слід визначити з розв'язку такої системи

$$\begin{aligned} B * M &= B * M_0 \\ F * M &= F * E - E \end{aligned} \quad (5.11)$$

Якщо ця система має рішення, то деяке її маркування є тупіковим, в іншому випадку мережа не має тупіків і є живою.

Важкість застосування матричного дослідження складається в тому, що розв'язання рівнянь є необхідним для визначення живості і потребує знаходження рангу матриці, що є складною задачею при великій розмірності матриці мережі Петрі. Крім того, розв'язкам можуть відповідати недопустимі послідовності запуску переходів або взагалі декілька послідовностей.

Тому отримали поширення редуційні методи дослідження, що дозволяють застосувати до мережі Петрі структурні перетворення засновані на декомпозиції з метою зменшення розмірності мережі або множини досяжності і спрощення процедури аналізу властивостей динаміки роботи. Редукція - це процедура гомоморфічного перетворення первинної мережі Петрі в її редуцьований образ, в якому зберігаються досліджувані властивості і принципи функціонування оригінальної мережі. Як наслідок, аналіз спрощеної мережі дасть відповідь про властивості первинної. Всі методи проведення редуції в мережах Петрі засновані на різних способах виділення підмереж та подальшого їх заміщення іншими структурними поданнями [7].

Виділення підмереж, які надалі будуть мати назву мережових блоків, базується на таких способах поділу первинної мережі на частини:

- 1) за динамічними ознаками роботи;
- 2) за структурною побудовою.

Редукція за динамічними ознаками полягає у виділенні таких частин-блоків у первинної мережі, які мають досліджувані властивості або функціонування їх заміників не змінює роботу суміжних елементів первинної мережі. Тоді аналіз властивостей буде полягати у їх визначенні в мережових блоках та в редуцьованому образі первинної мережі. Якщо розмір первинної мережі є надто великим, то застосування цього способу виявляється проблематичним у зв'язку з необхідністю визначення властивостей роботи за допомогою одного із наведених раніше методів аналізу у створених мережових блоках та умов взаємодії блоків з іншими елементами первинної мережі. Таким чином, даний спосіб редуції не передбачає формалізованих процедур виділення підмереж і створення мережових блоків.

Редукція за структурною побудовою полягає у виділенні в первинної мережі таких частин, які мають зазделегідь визначену графову структуру з входними і вихідними елементами (позиціями або переходами) однакового типу, в якій гарантовано наявність досліджуваних властивостей і визначено умови коректної взаємодії з зовнішніми елементами первинної мережі. Зокрема, такими графовими структурами побудови мережових блоків можуть бути визначені:

- 1) автоматні блоки - структури з послідовним спрямуванням позицій і переходів від входу до виходу;
- 2) умовні блоки - структури із альтернативним спрямуваннями позицій і переходів від входу до виходу;
- 3) паралельні блоки - структури, внутрішні елементи яких мають спільні входи і спільні виходи;
- 4) циклічні блоки - автоматні структури, в яких додатково визначено повертаючі послідовності, що зв'яжуть вихід із входом.

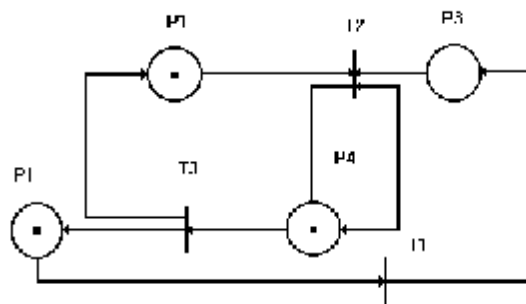
Характерною ознакою коректної побудови блоків для дотримання властивостей роботи є взаємодія блоку з зовнішніми елементами первинної мережі тільки через входи та виходи, тобто відсутні зв'язки внутрішніх елементів з зовнішніми елементами.

Заміщення виділених блоків на спрощення їх подання виконується при умові, якщо це не призведе до зміни функціонування суміжних елементів первинної мережі, тобто не зміниться порядок спрацьовування переходів і маркування позицій. Найчастіше виділені мережові блоки подаються макро-позиціями, макро-переходами у випадку, якщо входи і виходи блоків є одного типу, або об'єднувальними дугами в іншому випадку. Проте вхідні або вихідні елементи блоку завжди є одного типу - позиції чи переходи. Макро-позиції використовуються для заміщення структур блоків з граничними елементами - позиціями, що мають зв'язок з зовнішніми елементами - переходами. Макро-переходи використовуються для заміщення структур блоків з граничними елементами - переходами, що мають зв'язок з зовнішніми елементами - позиціями. Об'єднання дуг використовується для заміщення структур блоків з граничними елементами різних типів і подається як зв'язка "позиція-переход" або "переход-позиція", де позиція і перехід відображають відповідні граничні елементи блоку.

Таким чином, редуційні способи аналізу можна вважати комбінованими методами дослідження властивостей мереж, що дозволяють зменшивши розмір мережі ефективно застосувати методи аналізу дерева досяжності чи матричного подання.

### 3.5.6. Приклад аналізу мережі Петрі

Розглянемо на прикладі наведеної мережі (мал.5.2) можливості викладеного матричного підходу до аналізу властивостей.



Мал. 5.2

Для заданої мережі відповідно до рівняння (5.5) р-інваріант  $X$  є цілочисленим розв'язком системи:

$$-X_1 + X_3 = X_2 + X_3 = X_1 + X_2 - X_4 = 0$$

Ранг матриці  $A$  (табл.1) системи  $A * X = 0$  дорівнює 3, тому дана система має лише одне базисне рішення ( $n-r = 4-3 = 1$ )

$$X \sim = [1 \ -1 \ 1 \ 0].$$

Виходячі з цього не можна зробити висновок, що досліджувана мережа є обмеженою.

Таблиця 1

Матриця  $A_{\sim}$ 

	позиції, $P_i$			
Переходи $T_j$	1	2	3	4
1	-1	0	1	0
2	0	-1	-1	0
3	1	1	0	-1

Таблиця 2

Матриця  $F$ 

	позиції, $P_i$			
Переходи $T_j$	1	2	3	4
1	1	0	0	0
2	0	1	1	1
3	0	0	0	1

Розрахуємо  $t$ -інваріант  $Y$ . З системи (5.10) одержимо систему рівнянь:

$$-Y_1 + Y_3 = -Y_2 + Y_3 = Y_1 - Y_2 = -Y_3 = 0.$$

Система має лише нульове рішення  $Y_{\sim} = [0 \ 0 \ 0]$ , тому в даній мережі не існує маркувань, які пов'язані циклами у графі станів. Маркування  $M$  співпадає з початковим, якщо тільки не спрацює жоден з переходів мережі, оскільки всі компоненти вектора нульові. Інакше кажучи, оскільки  $Y = 0$ , то послідовність станів не має повернень і мережа є нестійкою, а тому і неживою.

В зв'язку з одержаними особливостями доцільно визначити, чи має тупик вказана безповоротня послідовність маркірувань. Система (5.11) має вид:

$$M_1 - M_2 + M_3 = M_1 = M_4 = 0; M_2 + M_3 + M_4 = 2.$$

Оскільки система має не нульове рішення, то можна зробити висновок, що досліджувана мережа є тупіковою. А тупіковими маркіруваннями досяжними з початкового будуть такі, що задовольняють співвідношенням  $M_1 = M_4 = 0, M_2 = M_3 = \text{Const} > 0$ .

Отже, застосувавши вище розглянутий підхід до аналізу мережі Петрі, можна впевнитись в тому що вона нежива і тупікова.

### 3.5.7. Модифікації мереж Петрі

Мережі Петрі, як математичний засіб опису досліджуваних дискретних об'єктів, відображають логічну послідовність подій, що виникають у процесі їх функціонування, до яких відносять і виробничі системи. Ця послідовність подій має характеристики паралельних процесів, кількісний аналіз яких потребує визначення у моделі часових характеристик об'єкта моделювання, динамічно змінюючих властивостей дискретних об'єктів, фіксованого (пріоритетного) порядку виконання запланованих дій та інше.

Окрім класичного апарату мережі Петрі для опису роботи виробничих багатомономенклатурних систем використовуються такі її модифікації:

### 1. Кольорові мережі

В цих мережах маркери є засобами уявлення динамічних об'єктів, які характеризуються набором атрибутів. Кожному атрибуту ставиться у відповідність колір маркеру, а правила збудження та спрацювання переходів враховують комбінації кольорів, що з'являються у позиціях мережі. Правило збудження переходу у кольоровій мережі доповнюється умовою, що передбачає вибір маркерів тільки визначених кольорів з вхідних позицій цього переходу. Спрацювання переходу доповнюється умовою розміщення у вихідних позиціях маркерів відповідних кольорів.

Формально кольорова мережа визначається множиною елементів [7,8]:

$$CN=(P,T,F,H,C,\lambda,\psi,M),$$

де  $C=\{Cl|l=1,q\}$  - множина кольорів маркерів мережі,

$\lambda:(P \times C) \times T \rightarrow (0,1)$  - функція допустимих розподілень кольорових маркерів по вхідним позиціям переходів, що визначає варіанти їх збудження;

$\psi:T \times (P \times C) \rightarrow (0,1)$  - функція допустимих розподілень кольорових маркерів по вихідним позиціям переходів, що визначає результат їх спрацювання;

$M:(P \times C) \rightarrow \{0,1,2,\dots\}$  - маркування позицій кольоровими маркерами.

Отже, при збудженні переходу функція  $F$  визначає скільки необхідно мати маркерів у вхідних позиціях, а функція  $\lambda$  - якого вони кольору. В результаті спрацювання переходу функція  $H$  визначає скільки маркерів буде у вихідних позиціях, а функція  $\psi$  - якого вони будуть кольору.

Таким чином, якщо маркер кольору  $Cl$  у позиції  $P_i$  приймає участь у збудженні переходу  $T_j$ , то  $\lambda_j(P_i, Cl)=1$  (умовно кажучи дуга з позиції  $P_i$  до переходу  $T_j$  пофарбована у колір  $Cl$ ), а якщо переход  $T_j$  спрацює, то допустимому розподіленню кольорових маркерів по вхідним позиціям ставиться у відповідність вихідне розподілення для якого  $\psi_j(P_i, Cl)=1$  і з вхідних позицій відповідні кольорові маркери забираються, а вихідні позиції  $P_i$  отримують маркери  $Cl$ .

При моделюванні роботи дискретних процесів виробничої системи кольорові маркери можуть відображати різні елементи матеріальних потоків, зокрема типи обробляємих деталей, інструмент, або елементи інформаційних потоків, наприклад, функціональний стан обладнання.

Для кольорових мереж існують аналогічні методи аналізу властивостей роботи, що розглядалися у п.5.4.

Наведемо тільки відмінності у застосуванні, що існують для методу аналізу матричного подання при знаходженні інваріант кольорової мережі [9].

Динаміка руху маркерів у кольоровій мережі подають рівнянням:

$$M_k = M_{k-1} + D * U_k,$$

де  $D=[D_{ij}|D_{ij}=(d_{ijl}, l=1,q)]$ ,  $i=1,n; j=1,m$  - клітинна трьохвимірвальна матриця, елементи якої  $D_{ij}$  подаються у вигляді векторів-рядків довжиною  $q$ . Якщо позиція  $P_i$  має вихідні дуги кольору  $Cl$  до переходу  $T_j$ , то  $d_{ijl}=-1$ , якщо позиція  $P_i$  має вхідні дуги кольору  $Cl$  з переходу  $T_j$ , то  $d_{ijl}=1$ , якщо не має дуг

цього кольору, то  $d_{ijl}=0$ . Тобто матриця  $D$  формується на базі функцій  $F$  і  $H$  з урахуванням функцій  $\lambda$  і  $\psi$ .

Властивості мережі встановлюють наступним чином.

Для визначення обмеженості розв'язують систему

$$D \sim * V = 0,$$

де  $V=[V_i]$  - вектор-стовбець  $r$ -інваріанти, компоненти якого подаються як  $V_i=(v_{il} | l=1,q)$ . Фундаментальна система  $B$  має  $(n-rq)$  розв'язань, якщо  $r$  - ранг матриці  $D$ ,  $n$  - кількість позицій,  $q$  - кількість кольорових маркерів.

Для визначення живості розв'язують систему

$$D * W = 0,$$

де  $W=[W_j]$  - вектор-стовбець  $t$ -інваріанти, компоненти якого подаються як  $W_j=(w_{jl} | l=1,q)$ .

Умова існування тупіків в кольоровій мережі знаходиться з аналізу системи:

$$B * M = B * M_0;$$

$$O * M \leq O * E' - E,$$

де  $O=[O_{ij} | O_{ij}=(O_{ijl}, l=1,q)]$ ;  $O_{ijl}=1$ , якщо існує дуга кольору  $C_l$  з  $P_i$  в  $T_j$ ,

$E'=[E_j]$  - клітковий вектор, компоненти якого подані наборами з  $q$  одиниць.

## 2. Часові мережі

Ці мережі використовуються для реалістичного відображення процесів та подій, які вимагають для свого звершення певного часу. В часових мережах кожній позиції визначається час затримки маркера при виконанні процедури збудження переходів. Тобто якщо маркер надійшов до позиції, то на протязі встановленого часу цей маркер не враховується у правилі збудження будь-якого переходу мережі. Часові мережі частіше використовуються у випадках, коли необхідно виконати певні розрахунки часу роботи модельованих об'єктів або виконати кількісний аналіз роботи системи.

## 3. Предикатні (пріоритетні) мережі.

Ця модифікація мереж Петрі використовується для моделювання детермінованої поведінки виробничих систем. В цих мережах вибір переходу, котрий повинен спрацьовувати, задається предикатом (пріоритетом), який додатково визначає умови спрацьовування кожного переходу, що перебуває у конфлікті за маркери у мережі відносно інших збуджених переходів. Таким чином, предикат визначає пріоритетність витрат маркерів збудженими переходами та черговість їх спрацьовування.

### 3.5.8. Методика мережного моделювання процесів функціонування виробничих систем

Оснву формалізованого подання функціонування виробничої системи при вирішенні задач оперативного управління складає принцип відображення в моделі матеріально-транспортних зв'язків виробничих процесів при організації обслуговування роботи основного технологічного обладнання [Д1]. Цей принцип передбачає, що процедура побудови моделі задовольняє вимогам



модульності і структурної подібності. Модульність визначає поділ модельованого об'єкту на елементи (модулі), для кожного з яких будується власна модель. Модуль уявляє собою достатньо автономний з технологічної точки зору об'єкт, тобто з відносно невеликою кількістю зв'язків цього об'єкту з іншими. Структурна подібність полягає у тому, що кожному значущому структурному елементу об'єкта ставиться у відповідність набір елементів моделі, інформаційний стан яких однозначно визначає функціональний стан об'єкту. Моделі модулів агрегуються для отримання узагальненої моделі системи. Такий підхід до подання дозволить сформувати модель інваріантну до технологій виробничих процесів, одиниць матеріальних потоків, станів виробничого обладнання, які будуть виступати в якості параметрів моделі.

Зміст методики розкриємо на прикладі опису роботи роботизованої системи з двох верстатів, одного транспортного роботу, вхідних та вихідних накопичувачів деталей і готової продукції. Кожен верстат має вхідний накопичувач, де знаходиться партія оброблюваних деталей, та вихідний накопичувач, у який буде складовано результати обробки. Транспортний робіт виконує операції завантаження робочої позиції верстата детал'ю з вхідного накопичувача та розвантаження готової продукції у вихідний накопичувач. На верстаті одночасно може оброблятися тільки одна деталь, тобто на робочій позиції має бути не більше однієї деталі.

Складання моделі функціонування системи здійснюється поетапно.

1. Визначення схем руху предметів виробництва по обробним ресурсам і виділення типових операцій і процесів.

1) Визначити склад операцій процесів функціонування окремих елементів системи:

$t_1, t_2$  - операції завантаження робочої позиції верстата 1,2 з вхідних накопичувачів;

$t_3, t_4$  - операції обробки деталей на верстатах;

$t_5, t_6$  - операції розвантаження готової продукції з верстатів у вихідні накопичувачі.

2) Визначити умови виконання операцій:

$p_1, p_2$  - стан завантаження вхідних накопичувачів верстатів 1,2 деталями для обробки;

$p_3, p_4$  - завершення завантаження робочої позиції верстатів і запит обробки;

$p_5, p_6$  - завершення обробки і очікування розвантаження робочої позиції верстатів;

$p_7, p_8$  - стан завантаження вихідних накопичувачів готової продукції;

$p_9, p_{10}$  - стан готовності верстатів до обробки - "Верстат вільний";

$p_{11}$  - стан готовності транспортного роботу до операцій завантаження-розвантаження.

3) Скласти граф (діаграму) взаємозв'язків операцій процесів функціонування кожного елементу системи:

верстат 1 - послідовно виконує операції  $t_1 \rightarrow t_3 \rightarrow t_5$  і повертається у стан готовності;

верстат 2 - послідовно виконує операції  $t_2 \rightarrow t_4 \rightarrow t_6$  і повертається у стан готовності;

робот - виконує одну з операцій  $t_1, t_2, t_5, t_6$  і повертається у стан готовності.

## 2. Структуризація повного опису функціонування системи.

Виконується композиція графів процесів у єдину модель-сітку функціонування системи. Композиція проводиться через об'єднання спільних операцій і умов їх виконання. У сітки операції подаються переходами, умови - позиціями, а в цілому модель є сітка Петрі з невизначеним початковим маркіруванням і без кольорових маркерів. Тому ця модель буде відображати множину варіантів транспортного обслуговування верстатів роботом і може застосовуватися для визначення організації оперативного управління рухом деталей. Якщо алгоритм транспортного обслуговування встановлен, то необхідно його формалізувати у параметрах моделі.

## 3. Формування опису матеріальних потоків і станів виробничих ресурсів.

Проводиться формалізація кольоровими маркерами станів деталей і виробничих елементів системи - верстатів і робота. Визначено такі стани:

$c_1, c_2, c_3, c_4$  - готовність робота до виконання відповідних операцій  $t_1, t_2, t_5, t_6$ ;

$c_5$  - готовність верстатів до виконання операцій завантаження  $t_1$  або  $t_2$ ;

$c_6$  - оброблювана деталь.

## 4. Параметризація моделі згідно з визначеними технологіями виготовлення і допустимими схемами руху матеріальних потоків.

Параметризація моделі означає формування в кольоровій сітки для кожного переходу функцій допустимих розподілень  $\lambda, \psi$ . Виходячі, що встановлений алгоритм транспортного обслуговування верстатів передбачає циклічне виконання послідовності операцій  $t_1, t_2, t_5, t_6$ , значення функцій "пофарбування дуг" мають бути такими:

$$I_1(p_1, c_6) = I_1(p_{11}, c_1) = I_1(p_9, c_5) = 1, Y_1(p_3, c_6) = Y_1(p_{11}, c_2) = 1;$$

$$I_2(p_2, c_6) = I_2(p_{11}, c_1) = I_2(p_{10}, c_5) = 1, Y_2(p_4, c_6) = Y_2(p_{11}, c_3) = 1;$$

$$I_3(p_3, c_6) = I_4(p_4, c_6) = 1, Y_3(p_5, c_6) = Y_4(p_6, c_6) = 1;$$

$$I_5(p_5, c_6) = I_5(p_{11}, c_3) = 1, Y_5(p_7, c_6) = Y_5(p_{11}, c_4) = Y_5(p_9, c_5) = 1;$$

$$I_6(p_6, c_6) = I_6(p_{11}, c_4) = 1, Y_6(p_8, c_6) = Y_6(p_{11}, c_1) = Y_6(p_{10}, c_5) = 1.$$

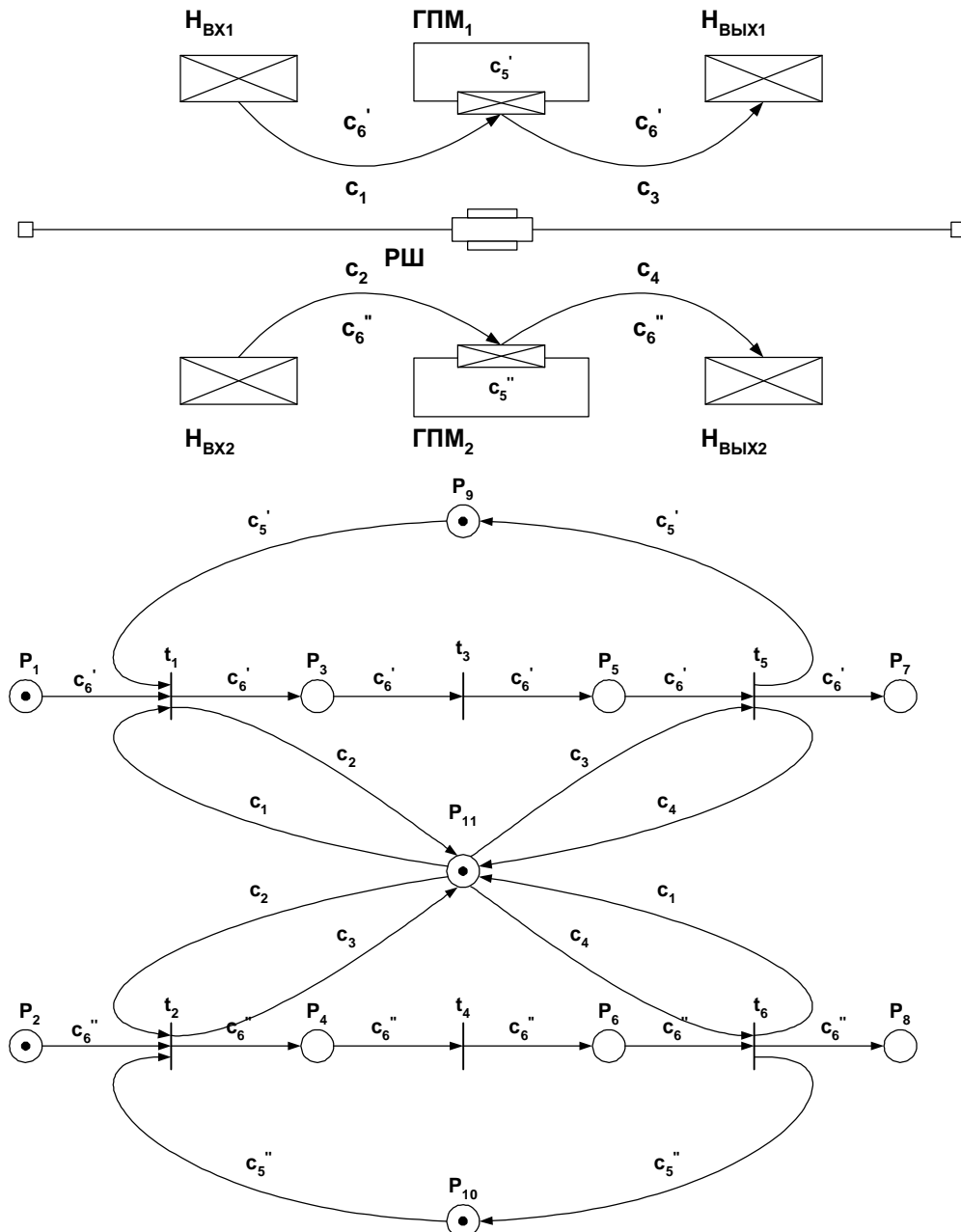
Всі інші значення функцій дорівнюють 0.

## 5. Визначення початкового стану системи.

Початковий стан системи подається як початкове маркірування позицій кольоровими маркерами і визначає завдання на обробку деталей та поточний функціональний стан обладнання. Нехай вхідні накопичувачі мають по одній деталі, верстати готові до завантаження і робот очікує виконання першої операції. Тому початкове маркірування сітки має вигляд:

$$M_0(p_1, c_6) = 1, M_0(p_9, c_5) = M_0(p_{10}, c_5) = 1, M_0(p_{11}, c_1) = 1.$$

В цілому модель роботизованої системи подано на рис. 3.26. Побудована сітка є обмеженою та умовно живою, тобто структура сітки без позицій



$P_1, P_2, P_7, P_8$  є живою, тому що виробниче обладнання системи після обробки деталей повертається у початковий стан.

Рис 3.26 Агрегатна модель двухстаночної роботизованої системи

## 4. Література

### 4.1. Перелік основної літератури

1. Основы автоматизации управления производством/Под ред. И.М.Макарова, - М.:Выш.шк., 1983. -504с.
2. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. - М.: Мир, 1984. - 325с.

3.Сосонкин В.Л. Программное управление технологическим оборудованием.- М.:Высш.шк., 1991.- 512с.

4.Ямпольский Л.С., Банахак З. Автоматизация проектирования и управления в гибком производстве. - К.: Техника, Варшава: Научно-техническое издательство, 1989. -268с.

#### **4.2. Перелік додаткової літератури**

Д1.Управление дискретными процессами в ГПС/Под ред. Ямпольского Л.С. -К.: Техника, 1992. -251с.

Д2.Управление ГПС: модели и алгоритмы/Под общ. ред. С.В.Емельянова. - М.: Машиностроение, 1987. -368с.

Д3.Робототехника и ГАП. В 9-ти кн. Кн.3. Управление робототехническими системами и гибкими автоматизированными производствами / Под ред. Макарова И.М. -М.:Высш.шк., 1986. -159с.

Д4.Робототехника и ГАП. В 9-ти кн. Кн.5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств / Под ред. Макарова И.М. -М.:Высш.шк., 1986. -159с.

Д5.Блехерман М.Х. Оперативно-производственное планирование гибких производственных систем. - М.:Высш.шк., 1989. -95с.

Д6.Васильев В.В., Кузьмук В.В. Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем. – К.: Наукова думка, 1990.- 216с.

Д7.Зайченко Ю.П. Дослідження операцій.- Київ : Вища школа, 1988.

Д8.Коровин Б.Г., Прокофьев Г.И., Рассудов Л.Н. Системы программного управления промышленными установками и робототехническими комплексами.– Л.: Энергоатомиздат, 1990. –352с.

Д9.Косовский В.Л., Козырев Ю.Г. Программное управление станками и промышленными роботами.- М.:Высш.шк., 1989.- 287с.

Д10.Котов В.Е. Сети Петри. - М.: Наука, 1984. - 245с.

Д11.Лазарев В.Г., Пийль Е.И. Синтез управляющих автоматов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. -328с.

Д12.Лысенко Э.В. Проектирование автоматизированных систем управления технологическими процессами.- М.:Радио и связь, 1987.- 272с.

Д13.Слепцов А.И., Юрасов А.А. Автоматизация проектирования управляющих систем гибких автоматизированных производств. -К.: Техника, 1986. -110с.

Д14.Соломенцев Ю.М., Сосонкин В.Л. Управление гибкими производственными системами.- М.:Машиностроение, 1988.- 352с.

Д15.Юдицкий С.А., Магергут В.З. Логическое управление дискретными процессами. Модели, анализ, синтез. -М.: Машиностроение, 1987. -176с.

Д16.Шкурба В.В. Задачи календарного планирования и методы их решения.- К.:Наукова думка, 1966