

УДК 681.3

Олександр Мацулевич, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерної механіки та комп'ютерного проєктування,
Олександр Вершков, кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри інженерної механіки та комп'ютерного проєктування,
Ілля Тетервак, асистент
кафедри інженерної механіки та комп'ютерного проєктування,
Максим Супрун, асистент
кафедри інженерної механіки та комп'ютерного проєктування,
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного,
м. Запоріжжя, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВИРОБНИЧИХ ДІЛЯНОК

Анотація. У роботі розглядається методика оптимізації роботи виробничих ділянок для підвищення завантаження технологічного встаткування. Застосування мурашиного алгоритму в рішенні поставленого завдання дозволяє врахувати динаміку машинобудівного виробництва, швидко, оперативно, реагувати на вихід з ладу встаткування, без втрат у часі включати у виробництво високотехнологічні машини, гнучкі виробничі системи й по максимуму використовувати їхні можливості в роботі.

Ключові слова: виробнича ділянка, математична постановка завдання, критерії оптимізації, програмний комплекс, мурашиний алгоритм.

Abstract. The paper considers a methodology for optimizing the operation of production areas to increase the load on technological equipment. The use of the ant algorithm in solving the task allows us to take into account the dynamics of machine-building production, quickly and efficiently respond to equipment failure, without loss of time to include high-tech machines and flexible production systems in production and to use their capabilities to the maximum in work.

Keywords: production area, mathematical formulation of the problem, optimization criteria, software complex, ant algorithm.

Виробничий процес розбивається на окремі технологічні етапи. Припустимо, що на даній виробничій ділянці обробляються n партій деталей, позначених як d_i (де i набуває значень від 1 до n). Довільну операцію, необхідну для виконання над деталлю d_i , позначимо як O_{ij} (де j змінюється від 1 до m_i , а m_i є загальною кількістю операцій, що мають бути виконані над d_i).

Кожна операція O_{ij} однозначно визначається впорядкованою парою символів:

$$O_{ij} = (I_{ij}, T_{ij}),$$

де I_{ij} – вказує на номер групи обладнання, на якій може бути здійснена операція O_{ij} ; T_{ij} – являє собою тривалість виконання цієї операції на типовому робочому місці, що є еталонним для даної групи обладнання.

Послідовність робочих місць, через які проходить деталь у процесі її обробки, або ж упорядкований перелік виконуваних над нею операцій, зазвичай визначається як технологічний маршрут деталі:

$$M_i = (O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{imi}) \quad (1)$$

У випадку послідовного виконання операцій передбачається чітко визначена структура технологічного маршруту. Операція O_{ij} повинна розпочинатися і виконуватися без будь-яких перерв. Якщо час початку обробки операції O_{ij} позначити як t_{ij} , а момент завершення її обробки як $*t_{ij}$ то для стандартного верстата завжди має виконуватися співвідношення:

$$*t_{ij} = t_{ij} + T_{ij} \quad (2)$$

Очевидно, що момент початку виконання певної операції залежить від часу завершення попередніх операцій. Зокрема, для технологічного маршруту, описаного рівнянням (1), завжди має виконуватися умова:

$$t_{ij} \leq t_{ij+1} \quad (3)$$

У загальному випадку можна припустити існування алгоритму, який дозволяє розрахувати можливий час початку виконання операції, якщо відомі часові параметри виконання попередніх операцій.

Вважатимемо також, що на кожному окремому робочому місці в будь-який момент часу може виконуватися не більше однієї операції. Іншими словами, для

будь-яких двох операцій O_{i1j1} і O_{i2j2} , що виконуються на одному й тому ж робочому місці, не повинна мати місце нерівність:

$$t_{i1j1} \leq t_{i2j2} < *t_{i1j1}$$

4)

Завдання оперативного планування полягає в тому, щоб для виробничої ділянки із заданими технологічними маршрутами обробки деталей побудувати певний календарний план, який задовольняє сформульованим умовам. Очевидно, побудова такого графіка еквівалентна визначенню чисел t_{ij} – моментів початку операції O_{ij} . Таким чином, величини t_{ij} є невідомими в нашій задачі і їх варто знайти, виходячи з наведеного формулювання завдання з урахуванням обмежень (3) - (4).

Надалі, сукупність значень $\{t_{ij}\}$ (де i варіюється від 1 до n , а j – від 1 до m_i), що відповідають попередньо визначеним умовам та обмеженням, будемо іменувати календарним планом функціонування виробничої ділянки або її графіком, позначаючи символом G . Графіком $G(i)$ обробки конкретної деталі d_i називатимемо набір значень $\{t_{ij}\}$ (де j змінюється від 1 до m_i), обто при фіксованому значенні індексу i [1].

Очевидно, існує безліч можливих графіків, що задовольняють встановленим вимогам та обмеженням. Наприклад, якщо $\{t_{ij}\}$ є одним із таких графіків (G), то й модифікований графік $\{t_{ij} + h\}$ (G'), де h – будь-яке додатне число, також буде валідним. Таким чином, постає задача вибору оптимального графіка згідно з певним критерієм. Для розв'язання задач оптимального календарного планування необхідно ввести числову функцію F (функцію-критерій), визначену для всіх допустимих графіків G , яка кожному графіку G ставить у відповідність конкретне число $F(G)$. При цьому найкращий графік повинен відповідати екстремальному значенню цієї функції F .

Загальна задача полягає у побудові такого графіка, який би задовольняв усі сформульовані в завданні умови та обмеження і для якого значення функції $F(G)$ досягає свого екстремуму:

$$F(G) = \text{extr } F(G)$$

Слід зазначити, що вибір конкретної функції-критерію може варіюватися залежно від специфічних умов виробництва. У даній статті оптимізація роботи виробничої ділянки розглядається за такими критеріями:

Мінімізація часу очікування обробки (залежність між операціями для деталей):

$$K_1 = \min_i \left(\sum_{j \in I_s} W_{ij} \right),$$

де W_{ij} – часовий інтервал між завершенням $(j-1)$ -ї та початком j -ї операції для i -ї деталі; I_s – множина деталей, що входять до замовлення s .

Мінімізація простоїв обладнання (максимізація завантаження):

$$K_2 = \min_{i \in I_s} (q_{ik} - \sum F_{iks}),$$

де q_{ik} – трудомісткість виконання операції над i -ою деталлю на k -тому верстаті, $F_i = (W_{ij} + p_i)$ – загальна тривалість перебування i -ї деталі в системі, включаючи час очікування; $p_i = \sum p_{ij}$ – сумарна тривалість усіх операцій над i -ою деталлю; p_{ij} – тривалість виконання окремої операції.

Порівняльний аналіз існуючих моделей формалізації функціонування виробничих ділянок виявив, що найбільш дієвими є підходи, які використовують мережі та графи, об'єктно-орієнтоване моделювання або імітаційне моделювання.

Для забезпечення ефективної роботи виробничої ділянки необхідно розробити оптимальний графік використання обладнання. Питанням пошуку методів побудови таких графіків присвячено значну кількість наукових досліджень. Однак універсальне рішення для цієї задачі в загальному випадку відсутнє. Складність складання розкладів обладнання зростає пропорційно збільшенню масштабу завдання. Час, відведений на прийняття рішень, є обмеженим. Рішення щодо складання розкладів, отримані традиційними методами або за допомогою евристичних підходів, часто є недостатньо ефективними.

Для розробки оптимальних графіків роботи, на відміну від традиційних методів, що включають імітаційне моделювання та алгоритми оптимізації, було

прийнято рішення застосувати систему мурашиних колоній (ant colony system) [2]. Цей підхід дозволяє відстежувати переміщення деталей відповідно до їхніх технологічних маршрутів і водночас є оптимізаційним алгоритмом. Застосування мурашиного алгоритму є ефективним для оптимізації роботи виробничих ділянок завдяки його перевагам при вирішенні динамічно змінних завдань і його здатності оперувати задачами, що можуть бути представлені у вигляді графа. Ефективність цього алгоритму зростає зі збільшенням складності завдання [3]. Таким чином, для моделювання та оптимізації функціонування виробничих ділянок пропонується схема, зображена на рис.1.

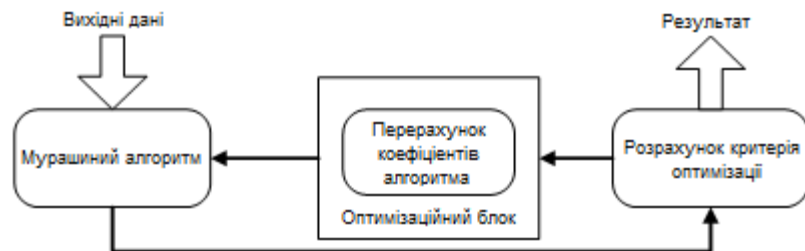


Рисунок 1 – Схема рішення завдання оптимізації роботи виробничої ділянки з використанням мурашиного алгоритму

Розроблений програмний комплекс характеризується модульною архітектурою та включає наступні ключові підсистеми:

- Підсистема, що здійснює моделювання функціонування виробничої ділянки
- Підсистема, призначена для аналізу ключових показників ефективності виробничої ділянки

Підсистема моделювання являє собою програмну імплементацію алгоритму пошуку найкоротшого шляху в орієнтованому графі, заснованого на методі мурашиної колонії.

Для імітації поведінки штучних мурах було розроблено спеціалізований клас об'єктів TANT, який включає набір властивостей та функцій, що дозволяють визначати наступну вершину графа з урахуванням параметрів мурашиного алгоритму та запобігати зацикленню пошукового процесу. Крім того, було

розроблено модифіковану версію алгоритму, яка забезпечує дотримання послідовності операцій, визначеної технологічним маршрутом обробки деталей на виробничій ділянці.

Для моделювання змін, що відбуваються в процесі знаходження найкращого маршруту, створено клас об'єктів TGRAPH, який здійснює функції перерахунку концентрації феромону на ребрах графа та довжин ребер графа на основі даних про виробничу ділянку з бази даних.

Робота алгоритму починається з початкового завантаження. При цьому ребра матриці відстаней відповідають часу транспортування заготовок деталей з приймального пункту до обладнання. За умови, що група обладнання є гнучкою виробничою системою та на ній може виконуватися перша за технологічним маршрутом операція, граф доповнюється вершинами, ребра яких спочатку дорівнюють часу транспортування плюс часу налагодження обладнання. Початкове розташування мурах відповідає пріоритету запуску партій деталей на обробку (найвищий пріоритет у партії, що не встигла пройти обробку в попередню зміну).

Після початкового завантаження починається процес моделювання роботи мурашиної колонії. Мурахи відповідно до коефіцієнтів алгоритму вибирають наступну вершину графа, після чого відбувається перерахунок змінених ребер графа, їхніх довжин та концентрації феромону. Процес триває до знаходження всіх маршрутів. У результаті роботи формуються шляхи проходження партіями деталей обладнання відповідно до технологічного маршруту, на основі яких розраховуються коефіцієнти оптимізації та робиться висновок про ефективність роботи виробничої ділянки.

База даних призначена для зберігання інформації про структуру та параметри обладнання виробничої ділянки. База даних складається з 13 таблиць формату СУБД Firebird і зберігається у вигляді файлу з розширенням *.GDB. Таблиці бази даних зберігають дані про: ділянки, обладнання, деталі, технологічні операції, технологічні маршрути, приналежність обладнання до ділянки,

виконувати обладнанням технологічні операції; також до бази даних заносяться результати моделювання роботи виробничої ділянки, а саме отримані маршрути та коефіцієнти роботи.

Обчислення ключових метрик функціонування виробничої ділянки здійснюється на основі маршрутів переміщення партій деталей, отриманих від підсистеми моделювання. Підсистема аналізу надає можливість визначити коефіцієнти завантаження та простою обладнання, проаналізувати довжину черг, середній час простою обладнання, середній час очікування деталей та візуалізувати ці дані у зручному форматі (гістограми, зведені таблиці).

Після завершення етапу моделювання роботи виробничої ділянки, підсистема аналізу обчислює коефіцієнти оптимізації, коригує параметри мурашиного алгоритму та ініціює наступний цикл моделювання. Після його завершення проводиться порівняння показників отриманих моделей, і в разі незначних розбіжностей підсистема видає кінцевий результат – оптимальний розклад роботи виробничої ділянки.

Основними критеріями оцінки ефективності розроблених розкладів є:

1. Мінімальна тривалість виробничого циклу (T_{min}).
2. Максимальний середній коефіцієнт завантаження технологічного обладнання ($K_z \max$).

Програмний комплекс реалізовано за допомогою мови візуального програмування Borland C++ Builder 6. Для забезпечення роботи програми з довільною структурою виробничих ділянок розроблено та реалізовано у форматі СУБД Firebird (з використанням сервера Firebird 1.5) базу даних, у якій передбачено зберігання компонувальних, технічних та інформаційних параметрів про модельовані виробничі ділянки.

Висновки. Розроблена модель для вирішення задачі оптимізації роботи виробничої ділянки в машинобудуванні може бути застосована на стадії проектування та експлуатації виробничих ділянок. Моделювання роботи виробничих ділянок дозволяє отримувати оцінки завантаження всіх видів

обладнання та виявляти причини зниження ефективності його роботи. Проведення аналізу різних варіантів завантаження обладнання технологічної ділянки дозволяє розробити методику для підвищення завантаження технологічного обладнання. Застосування мурашиного алгоритму в рішенні поставленого завдання дозволяє врахувати динаміку машинобудівного виробництва, швидко й оперативно реагувати на вихід обладнання з ладу, своєчасно включати у виробництво високотехнологічні машини, гнучкі виробничі системи та максимально використовувати їхні можливості в роботі. Програмний комплекс дозволяє максимально підвищити завантаження обладнання, знизити тривалість виробничого циклу обробки деталей, що забезпечує високу ефективність роботи виробничої ділянки машинобудівного виробництва.

Список використаних джерел

1. Dorigo M., Gambardella L. M. Ant Colony System[^] A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*. 1997. Vol. 1(1). P. 53-66.
2. Крушевский А. В. Справочник по экономико-математическим моделям и методам. Киев: Техника, 1982. 208 с.
3. Мацулевич О. Є. Застосування спеціалізованої PLM-системи Technologi CS при розробці автоматизованої системи ведення конструкторсько-технологічних баз даних підприємства сільськогосподарського машинобудування. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Вип. 24, т. 1 <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-13>.
4. Мацулевич О. Є., Гавриленко Є. А., Мірошніченко М. Ю., Гешева Г. В. Набуття навичок комп'ютерної обробки аудіо сигналів з використанням програмного забезпечення Adobe Audition. *Розвиток сучасної науки та освіти : матеріали IV Міжнародної наук.-практ. Інтернет-конф. (Запоріжжя, 29-31 травня 2023 р.)*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. С. 80-86.
5. Вершков О. О., Мацулевич О. Є., Дереза О. О. Загальні налаштування системи MASTERCAM для виконання завдань з розробки управляючих програм токарної обробки валів. *Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації : матеріали V Міжнародної наук.-практ. інтернет-конф. (м. Запоріжжя, 29-31 травня 2024 р.)*. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. С. 100-105.