

УДК 629.488.25:629.463.3

А. Р. МІЛЯНИЧ*

*Каф. «Рухомий склад і колія», Львівська філія Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79052, тел. + 38 (067) 747 46 46, ел. пошта mi-lyan_74@ukr.net, ORCID 0000-0003-3583-792X

ОПТИМАЛЬНЕ ПЛАНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ПРИ ОБМЕЖЕНИХ ТЕРМІНАХ РЕМОНТНИХ РОБІТ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Мета. Метою цієї роботи є розроблення алгоритмів оптимізації для визначення оптимального групового графіку та оптимальних швидкостей різання при ремонтних роботах вантажних вагонів. **Методика.** Для вирішення задачі оптимального планування режимів механічної обробки наведена і проаналізована модель групового планування для поточного багатопозиційного виробництва при обмежених термінах виготовлення відновлених деталей вантажних вагонів. Крім того, у модель групової обробки включено змінний час обробки та витрати, які залежать від режимів технологічної обробки. Запропоновані оптимальні схеми групового планування розроблені в першу чергу із метою мінімізації кількості деталей із збільшенням штучно-операційного часу. Для обчислення нижньої границі сумарного часу технологічного процесу застосовується наступна теорема, яка являє собою поширення теореми Джонсона для двопозиційного планування на метод групового планування. **Результати.** В статті розглядаються два критерії групового планування. Головним критерієм є кількість деталей із збільшеним штучно-операційним часом, який необхідно мінімізувати. Другим критерієм є сумарний час технологічного процесу (цикл обробки), причому сумарний час технологічного процесу являє собою час, який триває від початку обробки першої деталі першої групи до закінчення обробки останньої деталі останньої групи; він також повинен бути мінімізований. При визначенні оптимальних швидкостей різання, після того як встановлена схема оптимального групового планування, швидкості різання можуть бути зміненими для скорочення виробничих витрат, якщо схема планування передбачає міжопераційне затримання (відлежування) деталей на окремих операціях. На основі результатів попереднього аналізу розроблені наступні алгоритми оптимізації для визначення оптимального групового графіку та оптимальних швидкостей різання. **Наукова новизна.** Запропонована модель групового планування, яка ґрунтується на методі групової технології, була розроблена для умов проведення на вагоноремонтних підприємствах відновлювально-реставраційних робіт деталей та вузлів вантажних вагонів серійного багатопозиційного виробництва. При груповому плануванні, коли деталі класифікуються за кількома групами, оптимальне повинно бути отримане у вигляді послідовності груп і деталей у кожній групі. **Практична значимість.** В даному дослідженні був запропонований метод групового планування, який ґрунтується на методі групової технології, що розроблений для потокового багатопозиційного ремонтного виробництва за умови змінних термінів обробки та витратах, які залежать від умов різання металу.

Ключові слова: деталь; вантажний вагон; технологічний процес; оптимальне рішення; групова технологія

Вступ.

За останні роки значно підвищився інтерес при проведенні ремонтно-відновлювальних робіт вагонного парку залізниці до застосування групового технологічного процесу, оскільки він дозволяє значно розширити номенклатуру відновлювальних деталей, скоротити затрати робочого часу на переналагоджування технологічного обладнання та підвищення ефективності його використання. Крім того, групова технологія створює умови для застосування методів серійного та крупносерійного виробництва навіть при незначній кількості деталей, які підлягають ремонту. Особливістю групового

технологічного процесу є також застосування його як на окремих виробничих дільницях, так і цехах централізованого ремонту вузлів і деталей залізничних вагонів.

Загальновідомо, що груповий технологічний процес – це спосіб підвищення ефективності виробництва посередництвом класифікації значної кількості деталей та окремих елементів вагонів, які є подібними за конфігурацією, розмірами або процесом їх механічної обробки [1]. Для повного отримання переваг при впровадженні у вагоноремонтне виробництво групової технології, необхідно також враховувати і особливості планування виробничого процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

При плануванні виробництва у відповідності із принципами групової технології оптимальне рішення повинно бути отримане у вигляді послідовності груп і послідовності деталей у кожній групі. Для вивчення групового планування було проведено ряд досліджень, моделі яких ґрунтувались на варіантах одно та багатопозиційного серійного виробництва та проаналізовані згідно критеріїв сумарного часу технологічного процесу, середнього терміну циклу обробки, сумарного перевищення штучно-операційного часу; були розроблені алгоритми для встановлення оптимальної послідовності груп і деталей [2,3]. У роботі [4] була розроблена модель групового планування для поточного багатопозиційного виробництва із застосуванням часу обробки та витрат, які залежать від умов механічної обробки. Була визначена оптимальна схема груп, які мінімізують сумарний час технологічного процесу із наступним отриманням оптимальних режимів механічної обробки за умови забезпечення мінімального сумарного часу технологічного процесу.

Визначення мети та задачі дослідження.

При розв'язанні задач планування застосовуються різні критерії, згідно яких оцінюються схеми планування. У виробничих умовах визначення порядку обробки деталей, який забезпечує витримування заданих термінів випуску, є одним із найбільш важливих факторів. У матеріалі даного дослідження наведена і проаналізована модель групового планування для поточного багатопозиційного виробництва при обмежених термінах виготовлення відновлених деталей залізничних вагонів. Крім того, у модель групової обробки включено змінний час обробки та витрати, які залежать від режимів технологічної обробки. Запропоновані оптимальні схеми групового планування розроблені в першу чергу із метою мінімізації кількості деталей із збільшенням штучно-операційного часу.

Моделі групового планування.

Умови. При побудові групового планування виходимо із наступних умов:

1. Деталі, які необхідно відремонтувати (відновити), класифікуються за кількома групами.
2. Обробка всіх деталей повинна починатися одночасно із нульового моменту часу.

3. Всі деталі обробляються поточним методом.

4. Пропуски деталей і груп не допускаються.

5. Груповий час обробки складається із часу групової налагодки та суми часу обробки деталей (партії деталей), яка перебуває у кожній групі.

6. Тривалість обробки партії деталей складається із часу налагоджування на дану деталь та штучного часу обробки, помноженого на розмір партії.

7. Групова налагодка на будь-якому верстаті може проводитись незалежно від обробки даної групи деталей на попередньому верстаті. Налагодка на деталь на будь-якому верстаті може проводитись лише після завершення обробки цієї деталі на попередньому верстаті.

8. Штучний час і виробничі витрати залежать від умов механічної обробки (мова йде про швидкість різання).

Критерії планування. У даному дослідженні розглядаються два критерії групового планування. Головним критерієм є кількість деталей із збільшеним штучно-операційним часом, який необхідно мінімізувати. Другим критерієм є сумарний час технологічного процесу (цикл обробки), причому сумарний час технологічного процесу являє собою час, який триває від початку обробки першої деталі першої групи до закінчення обробки останньої деталі останньої групи; він також повинен бути мінімізований.

Час обробки деталі та груповий час обробки. Нехай J_{ij} ($i = 1, 2, \dots, M$ – індекс групи; $j = 1, 2, \dots, N_i$ – індекс деталі) означає j -ту деталь у групі G_i ($i = 1, 2, \dots, M$) та O_{ijk} ($i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N_i, k = 1, 2, \dots, K$) означає k -ту операцію на позиції (верстаті) M_k , де G_i та O_{ijk} відповідно група i та k -та операція (на k -ій позиції) для j -ої деталі i -ої групи.

Штучний час p_{ijk} (хв/ум) для операції O_{ijk} виражається у функції швидкості обробки V_{ijk} для цієї операції наступним чином [5]:

$$p_{ijk} = a_{ijk} + \frac{\lambda_{ijk}}{V_{ijk}} + \frac{\lambda_{ijk} \cdot b_{ijk}}{C_{ijk}^{1/n_{ijk}}} \cdot V_{ijk}^{1/n_{ijk}-1}, \quad (1)$$

де $i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N_i, k = 1, 2, \dots, K$,

і де в свою чергу: a_{ijk} – підготовчий час для

операції O_{ijk} , (хв/ум); λ_{ijk} – стала виду оброб-

ки для операції O_{ijk} ; V_{ijk} – швидкість різання на операції O_{ijk} , (хв/ум); b_{ijk} – тривалість зміни інструменту для операції O_{ijk} , (хв/ум); c_{ijk} – швидкість різання, яка забезпечує однохвилинну стійкість інструменту на операції O_{ijk} , (хв/ум).

Тоді час P_{ijk} обробки партії деталей J_{ij} і час Q_{ik} обробки групи G_i на позиції M_k матиме наступний вигляд

$$Q_{ik} = S_{ik} + \sum_{j=1}^{N_i} P_{ijk} \quad (2)$$

при умові, що: $i = 1, 2, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, N_i$, $k = 1, 2, \dots, K$,

де S_{ijk} та S_{ik} – час налагоджування на деталь J_{ij} та на групу деталей G_i на верстаті M_k відповідно; l_{ijk} – розмір партії J_{ij} на верстаті M_k .

Виробничі витрати. Питомі витрати q_{ijk} (грн./лит.) на операції O_{ijk} виражається у функції швидкості різання V_{ijk} :

$$q_{ijk} = a_{ijk} \cdot \alpha_{ijk} + (\alpha_{ijk} + \beta_{ijk}) \cdot \frac{\lambda_{ijk}}{V_{ijk}} + (a_{ijk} \alpha_{ijk} + \varepsilon_{ijk}) \cdot \frac{\lambda_{ijk}}{O_{ijk}^{1/n_{ijk}}} V_{ijk}^{1/n_{ijk}-1}, \quad (3)$$

при умові, що: $i = 1, 2, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, N_i$, $k = 1, 2, \dots, K$,

де α_{ijk} – основна заробітна плата та накладні витрати, (грн./хв.); β_{ijk} – виробничі накладні витрати, (грн./хв.); ε_{ijk} – витрати на інструмент, (грн./кромка); λ_{ijk} – стала виду обробки для операції O_{ijk} ; n_{ijk} – кутовий коефіцієнт кривої стійкості інструменту для операції O_{ijk} .

Швидкість різання, яка відповідає максимальній продуктивності та мінімальній вартості обробки. Швидкість різання, яка відповідає максимальній продуктивності, і швидкість різання, яка відповідає мінімальній вартості обробки, визначаються шляхом прирівнювання до нуля похідних від виразів (1) та (3) по V_{ijk} :

$$V_{ijk}^{(t)} = \frac{C_{ijk}}{\left[\left(\frac{1}{n_{ijk}} \right) \cdot b_{ijk} \right]^{n_{ijk}}}; \quad (4)$$

$$V_{ijk}^{(c)} = C_{ijk} \cdot \left[\left(\frac{n_{ijk}}{1-n_{ijk}} \right) \cdot \left(\frac{n_{ijk} + \beta_{ijk}}{1-n_{ijk}} \right) \right]^{n_{ijk}}, \quad (5)$$

при умові, що: $i = 1, 2, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, N_i$, $k = 1, 2, \dots, K$.

Сумарний час технологічного процесу та кількість деталей із збільшеним штучно-операційним часом. Символ $\langle \rangle$ застосовується для позначення порядку груп або деталей при груповому плануванні, отже, $G_{\langle i \rangle}$ позначає

групу, яка займає i -ту позицію у прийнятій схемі планування.

Час обробки $O_{\langle i \rangle \langle j \rangle k}$ становить:

$$E_{\langle i \rangle \langle j \rangle k} = \sum_{\varepsilon=1}^{i-1} \left(\sum_{\eta=1}^{N_{\varepsilon}} g_{\langle \varepsilon \rangle \langle \eta \rangle k} + Q_{\langle \varepsilon \rangle k} \right) + S_{\langle i \rangle k} + \sum_{\eta=1}^j \left(g_{\langle i \rangle \langle \eta \rangle k} + P_{\langle i \rangle \langle \eta \rangle k} \right), \quad (6)$$

де $g_{\langle i \rangle \langle j \rangle k}$ – час міжопераційного пролежування на позиції M_k після обробки на цій позиції $(j-1)$ -ої деталі і перед обробкою j -ої деталі групи $G_{\langle i \rangle}$. Час міжопераційного пролежування M_k представляємо наступним чином:

$$g_{\langle i \rangle \langle j \rangle k} = \begin{cases} F_{\langle i \rangle \langle j \rangle k-1} - F_{\langle i \rangle \langle j-1 \rangle k}; \\ \text{якщо } F_{\langle i \rangle \langle j \rangle k-1} > F_{\langle i \rangle \langle i-1 \rangle k}; \\ 0, \text{ якщо } F_{\langle i \rangle \langle j \rangle k-1} \leq F_{\langle i \rangle \langle j-1 \rangle k}. \end{cases}$$

Тоді час обробки $J_{\langle i \rangle \langle j \rangle}$ буде рівним

$$F_{\langle i \rangle \langle j \rangle} = F_{\langle i \rangle \langle j \rangle k}, \quad (7)$$

де $F_{\langle i \rangle \langle j \rangle}$ та $F_{\langle i \rangle \langle j \rangle k}$ – відповідно, час обробки деталі $J_{\langle i \rangle \langle j \rangle}$, хв та час обробки деталі на операції O_{ijk} , хв.

Отже, сумарний час технологічного процесу (циклу обробки) має вигляд:

$$F = F_{\langle M \rangle \langle N \rangle M}, \quad (8)$$

Перевищення штучно-операційного часу для деталей $J_{\langle i \rangle \langle j \rangle}$ визначається як

$$T_{\langle i \rangle \langle j \rangle} = \max (F_{\langle i \rangle \langle j \rangle} - d_{\langle i \rangle \langle j \rangle}, 0), \quad (9)$$

де $d_{\langle i \rangle \langle j \rangle}$ – гранично допустимий час обробки деталей $J_{\langle i \rangle \langle j \rangle}$, Тоді кількість деталей із збільшеним штучно-операційним часом буде рівним:

$$N_T = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_j} \delta(T_{\langle i \rangle \langle j \rangle}), \quad (10)$$

де $\delta_{(x)} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } x > 0, \\ 0 \text{ наперекір.} \end{cases}$

Основна частина дослідження.

Встановлення оптимальної схеми групового планування.

Вихідна швидкість різання та штучно-операційний час. Для того щоб мінімізувати сумарний час технологічного процесу при найменшій кількості деталей при збільшеному штучно-операційним часом, доцільно в якості вихідних швидкостей різання приймати швидкості, які відповідають максимальній продуктивності. Отже, штучно-операційний час, який є основними показниками, що застосовується

при звичайному методі виробничого планування, визначається підстановкою мінімального штучно-операційного часу $p_{ijk}^{(r)}$ замість штучно-операційного часу p_{ijk} у рівнянні (2).

Метод розгалуження та границь для групового планування. Метод гілок і границь використовується при розв'язуванні задач групового планування у випадках поточного багатопозиційного виробництва точно таким же чином, як наведено у роботі [4]. Метод складається із двох основних процедур: процедури гілкування та процедури обмеження.

1) *Процедура розгалуження.* Множина всіх перестановок груп і деталей у кожній групі багаторазово поділяються на множину невеликого обсягу, а окремі рішення розташовують у формі гілок дерева. При груповому плануванні необхідно проводити розгалуження як для груп, так і для деталей. Отже, існує два виду вузлів: «вузол групи» та «вузол деталей». Процедура розгалуження із вузла групи або вузла деталей полягає у тому, що беруться неупорядковані групи і деталі у порядку черговості та відповідно розташовуються у кінці послідовності. Нехай N_r буде вузлом групи, у якій встановлена послідовність r груп, а N_{rs} буде вузлом деталей, в якому розміщені s деталей у групі $G_{<r>}$. Тоді N_r та N_{rs} називаються вузлом групи рівня r та вузлом деталей рівня s відповідно.

2) *Процедура обмеження.* Для того, щоб встановити оптимальну схему групового планування з метою мінімізації сумарного часу технологічного процесу при найменшій кількості деталей із збільшеним штучно-операційним часом, вводяться два типи нижніх границь.

а) *Нижня границя кількості деталей із збільшеним штучно-операційним часом.* Нижня границя кількості деталей із збільшеним штучно-операційним часом оцінюється наступним чином:

$$N_{N_{rs}} = N_{N_{rs}}^{(a)} + N_{N_{rs}}^{(b)} + N_{N_{rs}}^{(c)}, \quad (11)$$

де $N_{N_{rs}}^{(a)}$, $N_{N_{rs}}^{(b)}$ та $N_{N_{rs}}^{(c)}$ - це кількість деталей із збільшеним штучно-позиційним часом із числа вже упорядкованих груп і деталей, із кількості деталей $R_{N_{rs}}$, які ще не упорядковані в $G_{<r>}$ та із числа ще не упорядкованих груп R_{N_r} відповідно.

Перша із величин залежності (11) вичислюється наступним чином:

$$N_{N_{rs}}^{(a)} = \sum_{i=1}^{r-1} \sum_{j=1}^{N_i} \delta(F_{<i><j>} - d_{<i><j>}) + \sum_{j=1}^s \delta(F_{<r><j>} - d_{<r><j>}). \quad (12)$$

Для обчислення значень $N_{N_{rs}}^{(b)}$ та $N_{N_{rs}}^{(c)}$ слід застосовувати алгоритм Ходгсона [6, 7], який дає оптимальну схему, що мінімізує кількість деталей із збільшеним штучно-операційним часом для однопозиційного планування.

Для забезпечення можливості застосування алгоритму на кожній із позицій припускається гранично допустимий час обробки для операцій O_{ijk} визначається як:

$$d_{<i><k>}^l = d_{<i><j>} - \sum_{h=k+1}^K P_{<i><j>h}. \quad (13)$$

Тоді число операцій із збільшеним штучно-операційним часом $N_{N_{rs}}^{(b)k}$ для деталей $R_{N_{rs}}$ для кожної позиції оцінюється із використанням алгоритму Ходгсона при плануванні кожної позиції. Отже,

$$N_{N_{rs}}^{(b)} = \max_{1 \leq k \leq K} N_{N_{rs}}^{(b)k}. \quad (14)$$

Процедура обчислення кількості операцій із збільшеним штучно-операційним часом $N_{N_{rs}}^{(c)k}$ для деталей R_{N_r} для кожної із позицій, представляє собою поширення алгоритму Ходгсона на групове планування, складається із ряду наступних кроків:

1. Упорядкувати у послідовність операції для деталей R_{N_r} для кожної позиції відповідно до послідовності не спадаючого гранично допустимого терміну обробки незалежно від груп, до яких належать дані деталі.

2. Ввести $(M - r)$ часу групового налагоджування $S_{<i>}^k$ згідно порядку не спадання у послідовності операцій для кожних $N_{<j>}$ деталей так, щоб:

$$N_{<r+1>} \geq N_{<r+2>} \geq \dots \geq N_{<M>}$$

3. Встановити час початку послідовності операцій при $F_{<r><s>} + \sum_{j=s+1}^{N_r} P_{<r><j>k}$ та визна-

чити першу операцію при збільшенні штучно-операційного часу. Припускаємо, що такою є l -та операція в послідовності. Встановити операцію із максимальним часом обробки серед перших l операцій. Відокремити цю операцію із послідовності та розмістити її на місце $N_{N_{rs}}^{(c)k} = N_{N_{rs}}^{(c)k} + 1$. Якщо операції із збільше-

ним штучним часом є відсутніми, то тоді потрібно зупинитись.

4. Далі у такому випадку необхідно поміняти місцями всі наладки, які йшли після вилученої операції, та всі операції, які йшли безпосередньо після цих наладок. Слід далі перейти до кроку 3. Тоді

$$N_{N_{rs}}^{(c)} = \max_{1 \leq k \leq K} N_{N_{rs}}^{(c)k}. \quad (15)$$

б) *Нижня границя сумарного часу технологічного процесу.* При звичайному плануванні розроблено ряд видів нижніх границь сумарного часу технологічного процесу. Відомо, що комбіновані уточнені нижні границі є ефективнішими нижніх границь, які встановлюються згідно характеристик верстатів або деталей. Однак у дослідженнях окремих авторів [8, 9] наводяться сумніви стосовно того, що комбінована нижня границя є недостатньо ефективною при груповому плануванні. Тому у даному дослідженні застосовується уточнена нижня границя.

Для обчислення нижньої границі сумарного часу технологічного процесу застосовується наступна теорема, яка являє собою поширення теореми Джонсона для двопозиційного планування на метод групового планування [10, 11].

Теорема. При двопозиційному плануванні оптимальний груповий графік досягається за умови виконання певних правил; послідовність деталей повинна відповідати правилу 1, а послідовність груп – правилу 2.

Правило 1. Деталь $J_{j\xi}$ переміщується попередньо деталі $J_{i\eta}$, якщо

$$\min(P_{i\xi 1}, P_{i\xi 2}) < \min(P_{i\eta 1}, P_{i\xi 2}) \quad (16)$$

Правило 2. Група G_i переміщується попередньо групи G_j , якщо

$$\min \left[S_{i1} + \max_{1 \leq v \leq N_i} \left(\sum_{\xi=1}^v P_{i\xi 1} - \sum_{\xi=1}^{v-1} P_{i\xi 2} \right) \cdot \max_{1 \leq v \leq N_i} \left(\sum_{\xi=v}^{N_i} P_{j\xi 2} - \sum_{\xi=v+1}^{N_i} P_{j\xi 1} \right) \right] < \min \left[S_{j1} - S_{j2} + \max_{1 \leq v \leq N_j} \left(\sum_{\xi=1}^v P_{j\xi 1} - \sum_{\xi=1}^{v-1} P_{j\xi 2} \right) \cdot \max_{1 \leq v \leq N_j} \left(\sum_{\xi=v}^{N_j} P_{i\xi 2} - \sum_{\xi=v+1}^{N_j} P_{i\xi 1} \right) \right] \quad (17)$$

Доведення теореми у даному матеріалі ми пропускаємо, оскільки воно детально наведено у роботі [10], як доказ теореми Джонсона.

Уточнена нижня границя сумарного часу технологічного процесу N_{rs} визначається наступним чином:

$$F_{N_{rs}} = \max \left\{ \begin{array}{l} F_{\langle r \rangle < \langle s \rangle} + \sum_{j=s+1}^{N_i} P_{\langle r \rangle < \langle j \rangle} + \sum_{\xi=r+1}^M Q_{\xi > 1} + \min \sum_{h=2}^K P_{\langle i \rangle < \langle j \rangle h}; \\ \max_{2 \leq k \leq K} \left[F_{\langle r \rangle < \langle s \rangle} + \sum_{j=s+1}^{N_i} (g_{\langle r \rangle \langle j \rangle k} + P_{\langle r \rangle \langle j \rangle k}) + \sum_{i=r+1}^M \left[\sum_{j=1}^{N_i} (g_{\langle i \rangle \langle j \rangle k} + P_{\langle i \rangle \langle j \rangle k}) + S_{\langle i \rangle k} \right] + \min \sum_{h=k+1}^K P_{\langle i \rangle \langle j \rangle h} \right]. \end{array} \right. \quad (18)$$

де символ $\{ \}$ вказує на порядок груп або деталей, який визначається шляхом застосування наведеної вище теореми для кожної із двох наступних стадій M_k та M_{k+1} ($k = 1, 2, \dots, K-1$).

Визначення оптимальних швидкостей різання.

Після того як встановлена схема оптимального групового планування, швидкості різання можуть бути зміненими для скорочення виробничих витрат, якщо схема планування передбачає міжопераційне затримування (відлежування) деталей на окремих операціях.

У діапазоні високоєфективних швидкостей ($V_{ijk}^{(c)}, V_{ijk}^{(t)}$) при зменшенні швидкості різання штучно-операційний час зростає, а питома собівартість обробки зменшується. Спочатку швидкості різання встановлюються із розрахунку максимальної продуктивності для забезпечення найменшого сумарного часу технологічного процесу при найменшій кількості деталей із збільшеним штучно-операційним часом. Отже, зменшення швидкостей різання у порівнянні із швидкостями, які забезпечують максимальну продуктивність, та наближення їх до швидкостей, які гарантують мінімальні виробничі витрати, можна здійснити шляхом використання часу між операційного затримування; таким чином можна знизити вартість обробки. Проблема полягає у виборі операції O_{ijk} [k -та операція (на k -ій позиції) для j -ої деталі i -ої групи] для зменшення виробничих витрат. Наступна функція, яку назвемо функцією «ефективність-чутливість», може бути використана для кількісної оцінки при виборі цієї операції, як наводилось у роботі [4]:

$$\gamma_{ijk} = \frac{dq_{ijk}}{dV_{ijk}} \quad (19)$$

Наведена функція (19) кількісно визначає зменшення виробничих витрат, який одержується завдяки збільшенню часу обробки за рахунок зменшення швидкості різання на операції O_{ijk} . Чим більше значення виразу (19), тим значно зменшуються виробничі витрати за рахунок часткового зростання часу обробки.

Алгоритми оптимізації.

На основі результатів попереднього аналізу розроблені наступні алгоритми оптимізації для визначення оптимального групового графіку та оптимальних швидкостей різання:

Стадія 1. Алгоритм, оснований на методі розгалуження та границь для визначення оптимального групового графіку.

Крок 1. Встановити на всіх позиціях і для всіх деталей швидкості різання, які забезпечують максимальну продуктивність $V_{ijk}^{(t)}$. Перейти до кроку 2.

Крок 2. Прийняти рівень групи $r = 0$, найменша ймовірна кількість деталей із збільшеним штучно-операційним часом $N^* = \infty$, а найменший ймовірний сумарний час технологічного процесу $F^* = \infty$. Перейти до кроку 3.

Крок 3. Поділити даний вузол груп на $(M - r)$ вузлів груп N_r посередництвом переміщення кожної досі не розміщеної групи в кінці вже встановленої послідовності. Встановити $(r = r + 1)$ та перейти до кроку 4.

Крок 4. Для кожного із вузлів груп N_r утворити вузли деталей N_{rs} із рівнем деталей $s = 1$ шляхом розташовування кожної із деталей в кінці вже визначеної послідовності. Перейти до кроку 5.

Крок 5. Вирахувати нижні границі $N_{N_{rs}}$ для нових вузлів деталей. Перейти до кроку 6.

Крок 6. Визначити вузол деталей, який має мінімальне значення N_{rs} серед вузлів деталей, сформованих у кроці 4 або 9, а у випадку коли $N^* = \infty$, або серед всіх активних вузлів деталей, у випадку коли $N^* \neq \infty$. Якщо $N^* \neq \infty$ та існує більше двох вузлів, які мають мінімальне $N_{N_{rs}}$, вирахувати $F_{N_{rs}}$ цих вузлів і вибрати вузол деталей, що мають мінімальне $F_{N_{rs}}$. У випадках рівності вибираємо вузол із найбільшим значенням, по-перше, рівня групи r та, по-друге, рівня деталей s . Нехай рівень груп і рівень деталей вузла будуть r та s відповідно, а $N_{N_{rs}}^* = N_{N_{rs}}$ та $F_{N_{rs}}^* = F_{N_{rs}}$. Перейти до кроку 7.

Крок 7. Якщо $N_{N_{rs}}^* > N^*$ або $N_{N_{rs}}^* = N^*$, а $F_{N_{rs}}^* > F^*$, тоді схема групового планування вузла, який має N^* та F^* , буде оптимальною. Далі перейти до стадії 2. При невідповідності наведених умов далі слід перейти до кроку 8.

Крок 8. Якщо $s < N_{<r>}$, то далі слід перейти до кроку 9. При невтримуванні наведених умов слід перейти до кроку 10.

Крок 9. Поділити вузол деталей N_{rs} на $(N_{<r>} - s)$ вузлів шляхом розміщення кожної деталі, яка ще не упорядкована у групі $G_{<n>}$, на кінець вже сформованої послідовності. Покласти $(s = s + 1)$ і повертатися до кроку 5.

Крок 10. Якщо $r < M$, то повернутись до кроку 3. При невідповідності наведеної умови слід $N^* = N_{N_{rs}}^*$ та $F^* = F_{N_{rs}}^*$, після чого слід повернутись до кроку 6.

Стадія 2. Алгоритм встановлення оптимальних швидкостей різання.

Крок 1. Нехай D означає сукупність таких значень індексів i, j та k , при яких операції не є лімітованими при оптимальному плануванні. Вирахувати «ефективність-чутливість» для O_{ijk} згідно наступної формули:

$$\hat{\gamma}_{ijk} = \gamma_{ijk} \left| V_{ijk}^{(t)} - \Delta V \right|,$$

де $\Delta V (\geq 0)$ – приріст швидкості.

Далі переходимо до кроку 2.

Крок 2. Якщо відомо, що $\gamma = \max_{ijk \in D} \hat{\gamma}_{ijk}$. Нехай U означає сукупність таких значень індексів i, j та k , при яких $\gamma = \max \hat{\gamma}_{ijk}$ та $\gamma = \gamma - \Delta \gamma$, де $\Delta \gamma$ - приріст. Переходимо до кроку 3.

Крок 3. Враховуємо, що $U = U + \{i_0 j_0 k_0\}$, де $\{i_0 j_0 k_0\}$ – сукупність таких значень індексів, при яких $\gamma \leq \hat{\gamma}_{ijk}$. Далі переходимо до кроку 4.

Крок 4. Даний крок розглядаємо поетапно:

1). Для $O_{ijk} (ijk \in U)$ розрахувати швидкості різання \hat{V}_{ijk} та штучний час на операцію \hat{P}_{ijk} такі, щоб $\gamma = \hat{\gamma}_{ijk}$.

2). Вирахувати терміни тривалості міжопераційних відстоювань деталей t_{sijk} для $O_{ijk} (ijk \in U)$ згідно наступної формули:

$$t_{sijk} = t_{Lijk} - t_{Eijk} - \hat{P}_{ijk},$$

де t_{Eijk} та t_{Lijk} – найбільш ранній час та найбільш пізній час закінчення обробки відповідно при плануванні із найменшим сумарним технологічним часом і найменшою кількістю деталей із збільшеним штучно-операційним часом.

3). Якщо існує будь-яка операція $O_{ijk} (ijk \in U)$, така, що $t_{sijk} < 0$, то $\gamma = \gamma + \Delta \dot{\gamma}$ (наприклад, $\Delta \dot{\gamma} = 0,5 \cdot \Delta \gamma$) необхідно повернутися до кроку 3. При невідповідності умови, що $O_{i_0 j_0 k_0}$ при $t_{s i_0 j_0 k_0} = 0$, оптимальні швидкості обробки $V_{i_0 j_0 k_0}^*$ задаються при посередництві \hat{V}_{ijk} .

$$U = U - \{i_o j_o k_o\}; D = D - \{i_o j_o k_o\}.$$

де U – сукупність значень i, j та k за умови, що $\max_{ijk \in D} \hat{\gamma}_{ijk} \leq \gamma_{ijk}$;

D – сукупність значень i, j та k за умови, що операція O_{ijk} не є лімітованою у схемі планування.

4) Якщо $D \neq \emptyset$, перейти до кроку 5. При невідповідності даної умови далі необхідно припинити розрахунки.

Крок 5. Якщо $\gamma = 0$, оптимальні швидкості різання V_{ijk}^* для O_{ijk} ($ijk \in U$), задаються при посередництві $V_{ijk}^{(c)}$. Обчислення зупиняється. Якщо $\gamma \neq 0$, то $\gamma = \gamma - \Delta\gamma$ та повернутись до кроку 3.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.

Модель групового планування, яка ґрунтується на методі групової технології, була розроблена для умов проведення на вагоноремонтних підприємствах відновлювально-реставраційних робіт деталей та вузлів вантажних вагонів серійного багатопозиційного виробництва. При груповому плануванні, коли деталі класифікуються за кількома групами, оптимальне повинно бути отримане у вигляді послідовності груп і деталей у кожній групі.

Методи групового планування, які ґрунтуються на методі групової технології, розроблені для потокового багатопозиційного ремонтного виробництва за умови змінних термінах обробки та витратах, які залежать від умов різання металу. В свою чергу, схема оптимального групового планування (оптимальна послідовність груп і оптимальна послідовність деталей), який відповідає мінімальному сумарному часу технологічного процесу при мінімальній кількості деталей із збільшенням штучно-операційним часом, яка встановлена згідно алгоритму, який ґрунтується на методі розгалужень та границь.

Оптимальні швидкості різання, які мінімізують виробничі витрати, встановлені із використанням часу міжопераційного відстоювання при оптимальній схемі планування.

А. Р. МИЛЯНИЧ

ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ СРОКАХ РЕМОНТНЫХ РАБОТ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Цель. Целью настоящей работы является разработка алгоритмов оптимизации для определения оптимального группового графика и оптимальных скоростей резания при ремонтных работах грузовых вагонов. **Методика.** Для решения задачи оптимального планирования режимов механической обработки приведена и проанализирована модель группового планирования для текущего многопозиционного производства при

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бухалков М.И. Организация производства на предприятиях машиностроения: учебник / М.И.Бухалков. – М.: ИНФРА-М, 2010. 511с.
2. Yoshida T., Nakamura N., Hitomi K. «Optimization of Group Scheduling for a Single Stage Production», Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 89, No 322, 1983, pp. 1993-2003.
3. Невлюдов И.Ш. Логическая модель проектирования технологического процесса сборки [Текст] / И.Ш. Невлюдов, А.М. Цымбал, С.С. Милютин // Вісті академії інженерних наук України. — 2007. — № 3(33). — С. 95–98.
4. Туровец О.Г., Родионова В.Н. Совершенствование организации производства как фактор модернизации промышленных предприятий // Организатор производства, 2010, №1. С.21-24.
5. Hitomi K. «Economical and Optimal-Seeking Machining», Metal Processing Machine Tools, Instituto per le Ricerche di Tecnologia Meccanica, Vico, Canavese, Italy, 1980, pp. 137-153.
6. Лазарев А.А., Шульгина О.Н. Полиномиально разрешимые частные случаи задачи минимизации максимального временного смещения // Ред. Журн. «Изв. Вузов. Математика». – Казан. ун-т, Казань, 2011 с – Деп. в ВИНТИ 28.11.00, № 3019-800.
7. Алгоритмы и программы восстановления зависимости / Под ред. В.Н. Вапника. М.: Наука, 1984. – 816 с.
8. Yoshida T., Nakamura N., Hitomi K. «A Study of Group Scheduling», Transactions of Japan Industrial Management Association, Vol. 28, No. 3, 1981.
9. Танаев В.С., Гордон В.С., Шафранский Я.М. Теория расписаний. Одностадийные системы. – М.: Наука, 1984. – 412 с.
10. Левин В.И. «Задача Джонсона-Беллмана для конвейерных систем с переменным порядком работ» // Вест. Тамбовского гос техн. ун-та, № 3, том 9, 2003. – С. 457-466.
11. Левин В.И. К задаче Беллмана-Джонсона // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1999. - № 1. – С. 99-105.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н. Кузним М. О. (Україна)

Надійшла до редколегії 17.05.2019.

Прийнята до друку 04.06.2019.

ограниченных сроках изготовления восстановленных деталей грузовых вагонов. Кроме того, модель групповой обработки включает сменное время обработки и затраты, которые зависят от режимов технологической обработки. Предложенные оптимальные схемы группового планирования разработаны в первую очередь с целью минимизации количества деталей с увеличением искусственно-операционного времени. Для вычисления нижней границы суммарного времени технологического процесса применяется следующая теорема, которая представляет собой распространение теоремы Джонсона для двухпозиционного планирования на метод группового планирования. **Результаты.** В статье рассматриваются два критерия группового планирования. Главным критерием является количество деталей с увеличенным искусственно-операционным временем, который необходимо минимизировать. Вторым критерием является суммарное время технологического процесса (цикл обработки), причем суммарное время технологического процесса представляет собой время, которое длится от начала обработки первой детали первой группы до окончания обработки последней детали последней группы; он также должен быть минимизирован. При определении оптимальных скоростей резания, после того как установлена схема оптимального группового планирования, скорости резания могут быть изменены для сокращения производственных расходов, если схема планирования предусматривает межоперационную задержку (отслеживания) деталей на отдельных операциях. На основе результатов предварительного анализа разработаны следующие алгоритмы оптимизации для определения оптимального группового графика и оптимальных скоростей резания. **Научная новизна.** Предложенная модель группового планирования, основанная на методе групповой технологии, была разработана для условий проведения на вагоноремонтных предприятиях восстановительно-реставрационных работ деталей и узлов грузовых вагонов серийного многопозиционного производства. При групповом планировании, когда детали классифицируются по нескольким группам, оптимальное должно быть получено в виде последовательности групп и деталей в каждой группе. **Практическая значимость.** В данном исследовании был предложен метод группового планирования, основанный на методе групповой технологии, разработан для потокового многопозиционного ремонтного производства при переменных сроках обработки и расходах, которые зависят от условий резания металла.

Ключевые слова: деталь, грузовой вагон, технологический процесс, оптимальное решение, групповая технология.

A. R. MILYANYCH

OPTIMAL PLANNING OF TECHNOLOGICAL MODES OF MECHANICAL WORK AT A LIMITED TERM REPAIRS FREIGHT WAGONS

Purpose. The purpose of this work is to develop optimization algorithms for determining the optimal group schedule and optimal cutting speeds during the repair work of freight wagon. **Methodology.** To solve the problem of optimal planning of machining regimes, the group planning model for the current multi-site production is given and analyzed with limited production time periods for the restored parts of freight cars. In addition, the batch processing model includes interchangeable processing times and costs, which depend on the processing conditions. The proposed optimal group planning schemes were developed primarily to minimize the number of parts with an increase in artificial operational time. To calculate the lower limit of the total time of the technological process, the following theorem is used, which represents the extension of the Johnson theorem for two-stage planning to the group planning method. **Results.** The article discusses two criteria for group planning. The main criterion is the number of parts with increased artificial operating time, which must be minimized. The second criterion is the total time of the technological process (processing cycle), the total time of the technological process being the time that lasts from the beginning of processing the first part of the first group to the end of processing the last part of the last group; it should also be minimized. When determining the optimal cutting speeds, after the optimal group planning scheme has been established, cutting speeds can be changed to reduce production costs, if the planning scheme provides for inter-operation delay (tracking) of parts in individual operations. Based on the results of the preliminary analysis, the following optimization algorithms have been developed to determine the optimal group graph and optimal cutting speeds. **Scientific novelty.** The proposed group planning model, based on the group technology method, was developed for the conditions for carrying out restoration and restoration works on parts and assemblies of freight cars for mass-production production at car-repair enterprises. In group planning, when parts are classified into several groups, the optimal should be obtained as a sequence of groups and details in each group. **Practical significance.** In this study, a group planning method based on the group technology method was proposed. It was developed for streaming multi-site repair production with variable processing times and costs that depend on the cutting conditions of the metal.

Keywords: item, freight wagon, technological process, optimal solution, group technology.