

І. Ю. Леснікова, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та технологій Університету митної справи та фінансів

Є. П. Медведєв, старший викладач кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Н. В. Халіпова, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та технологій Університету митної справи та фінансів

А. І. Кузьменко, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та технологій Університету митної справи та фінансів

С. А. Разгонов, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та технологій Університету митної справи та фінансів

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТНОГО СПРЯМУВАННЯ В ОПТИМІЗАЦІЇ СХЕМ ВИРОБНИЦТВА ТА ПОСТАЧАННЯ СИРОВИНИ

Розглянуто питання оптимізації виробничих процесів шляхом застосування задач транспортного спрямування (транспортної задачі, задачі про кільцевий маршрут та задачі про максимальний потік). Розроблено адаптовану під сучасні виробничі умови модель, яка включає вирішення питань, пов'язаних із вибором оптимального маршруту, побудовою економічно ефективних режимів постачання, розрахунком мінімальних простойв обладнання, попередньою оптимізацією наявної транспортної мережі, виробництвом необхідної кількості продукції з мінімальними затратами.

Ключові слова: виробничі ситуації; моделювання транспортних потоків; оптимізаційна модель.

© **І. Ю. Леснікова, Є. П. Медведєв, Н. В. Халіпова, А. І. Кузьменко, С. А. Разгонов, 2019**

Рассмотрены вопросы оптимизации производственных процессов за счет применения задач транспортного направления (транспортной задачи, задачи о кольцевом маршруте и задачи о максимальном потоке). Разработана модель, адаптированная под современные производственные условия, которая включает решение вопросов, связанных с выбором оптимального маршрута, построением экономически эффективных режимов поставки, нахождением минимальных простоев оборудования, предварительной оптимизацией существующей транспортной сети, производством необходимого количества продукции с минимальными затратами.

Ключевые слова: производственные ситуации; моделирование транспортных потоков; оптимизационная модель.

Considered the problem of production processes optimization by application of transport direction tasks. The development of approaches to improve the existing production process based on the calculation of rolling mill capacity to ensure the production of the required number of kits during the month is analyzed. An optimization problem is investigated in order to minimize the total time for preparatory operations for assembly of metal structures, taking into account the location of the existing transport network of the region.

With the help of the maximum flow task determined the possibility of the required production volume delivery from a certain point of manufacture to a specific warehouse in accordance with the existing production schemes of the enterprise. In the mathematical model to solve this problem, a linear programming problem proposed to find the volume of production when using certain equipment; the restriction specifies the possibility of supplying the workpiece of certain products.

Using the circular route problem, established a sequence of operations with minimization of the costs for equipment reconfiguration in the process of the enterprise's planned task execution.

The developed methodology provides formation and systematic analysis of basic factors, such as the production of the required quantity of certain products.

Developed the model adapted to modern production conditions, which includes solving issues related to the optimal route choice, creation of cost-effective supply modes, finding minimal equipment downtime, pre-optimization of the existing transport network, production of the required quantity of products with minimal costs.

By analyzing the results obtained at each step of the specified problem solving for the purpose of further optimization, the proposed mathematical model can be implemented in the manufacturing process of any enterprise. Such model

allows complex optimization of the enterprise processes as well as to achieve the set goals by adjusting the existing transport network.

Key words: production situation; modeling of traffic flows; optimization model.

Постановка проблеми. Сучасний стан економічних відносин не просто ставить перед галуззю транспорту завдання з виконання переміщення вантажів, але й потребує глибокої інтеграції у виробничі, постачальницькі та збутові процеси. Подібне розширення ролі зазначеної сфери приводить до впровадження задач транспортного спрямування для подальшої оптимізації виробничо-перевізного процесу і потребує застосування інноваційних інформаційних технологій.

На стадії проектування необхідно виконати розрахунки і знайти оптимальний варіант будівництва промислового комплексу для виробництва металоконструкцій та складання їх у комплект для опор мереж електропередач. При цьому необхідно враховувати діючу транспортну мережу регіону та розміщення підприємств, що постачатимуть вихідну заготовку для проєктувального промислового комплексу.

Питання моделювання такого виробничого процесу, який включає в себе процеси перевезення, важливе та перспективне у розв'язанні поточних виробничих проблем для подальшого вдосконалення процесу виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні проблеми оптимізації виробничої програми підприємства в різний час досліджували такі відомі зарубіжні й вітчизняні вчені, як А. Гранберг, Дж. Данциг, Л. Канторович, В. Новожилов, О. Орлов, В. Царьов та ін. [1–7]. Проте, незважаючи на велику кількість фундаментальних праць і прикладних робіт з оптимального планування, цей математичний апарат дотепер не застосовується в практиці планової роботи на підприємствах. Як показали проведені дослідження, широкому використанню оптимізаційних розрахунків у процесі формування виробничої програми нині перешкоджає наявність цілого ряду методологічних і методичних проблем, а також недостатнє опрацювання прикладних аспектів застосування методів оптимального планування на промислових підприємствах. Так, нині немає чіткості у визначенні місця оптимізаційних розрахунків у процесі формування поточних і перспективних виробничих планів. Не визначена сфера застосування методів одноцільової та багатоцільової оптимізації виробничої програми. Не існує теоретично обґрунтованих рекомендацій щодо практичного використання багатоцільового підходу до оптимізації виробничої програми промислового підприємства.

Мета статті – розвиток підходів для вдосконалення наявного виробничого процесу завдяки розрахунку потужностей прокатних станів з метою

забезпечення виробництва необхідної кількості комплектів протягом місяця з мінімізацією загального часу на підготовчі операції для складання комплектів металокопструкцій з урахуванням розміщення діючої транспортної мережі регіону.

Виклад основного матеріалу. Для розв'язання поставлених задач були використані математичні методи, що дозволяють оптимізувати виробничий процес та отримати позитивні економічні результати роботи підприємства.

Змістова постановка ситуації така. З вихідної заготовки необхідно виробити 4 види кутка заданої мірної довжини. Види кутка виробляються прокатним станом, для кожного з яких відомі коефіцієнти витрат металу для виробництва кінцевої продукції.

Загальна схема розподілу вихідної заготовки між прокатними станами зображена на рис. 1. Постачання заготовок виконується від сталеливарного заводу через проміжні склади, використовуючи наявну мережу залізниці із заданими пропускними можливостями S_{ij} .

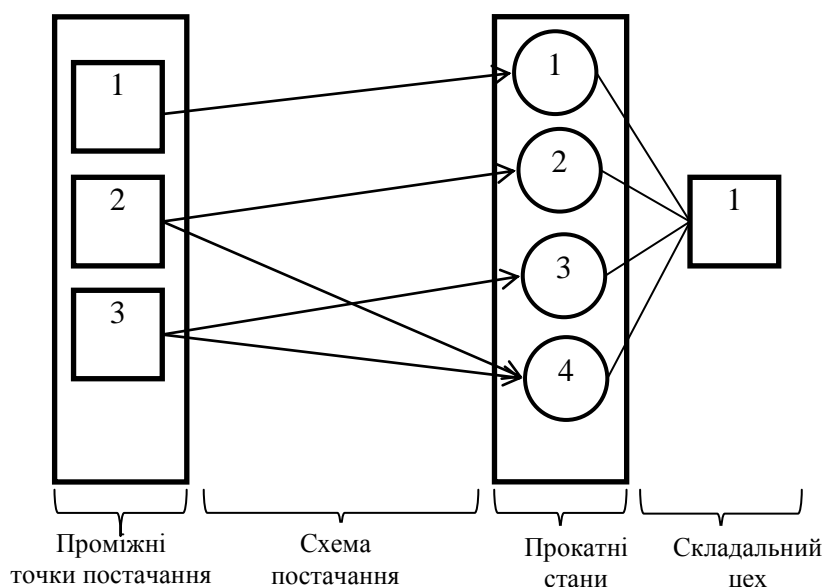


Рис. 1. Схема розподілу вихідної заготовки між прокатними станами

Після обробки заготовок прокатними станами кутки мірної довжини направляються до складального цеху промислового комплексу для складання комплектів металокопструкції опор мереж електропередач. Для складання комплектів взаємозв'язаних металокопструкцій необхідно, щоб виробництво кутків було лише у заданих співвідношеннях: $\gamma_1 : \gamma_2 : \gamma_3 : \gamma_4 = 1 : 4 : 3 : 2$ (шт.).

Місячний план кількості готових комплектів проектувального промислового комплексу становить $N = 82$ одиниці.

Таблиця 1

	1	2	3	4	5	6
1	∞	20	26	22	40	32
2	38	∞	25	32	34	40
3	28	16	∞	26	38	26
4	22	32	30	∞	30	31
5	42	34	30	26	∞	37
6	34	45	28	30	32	∞

Протягом складання опор усі кутки повинні пройти підготовчі операції (свердління дірок, обрізка металу за конфігураціями, зварювання тощо) – усього 6 операцій. Витрати часу на переналагодження з однієї операції на іншу відомі й задані в табл. 1 (у хвилинали).

Взаємозв'язок задач для вирішення даної виробничої ситуації зображено на рис. 2.

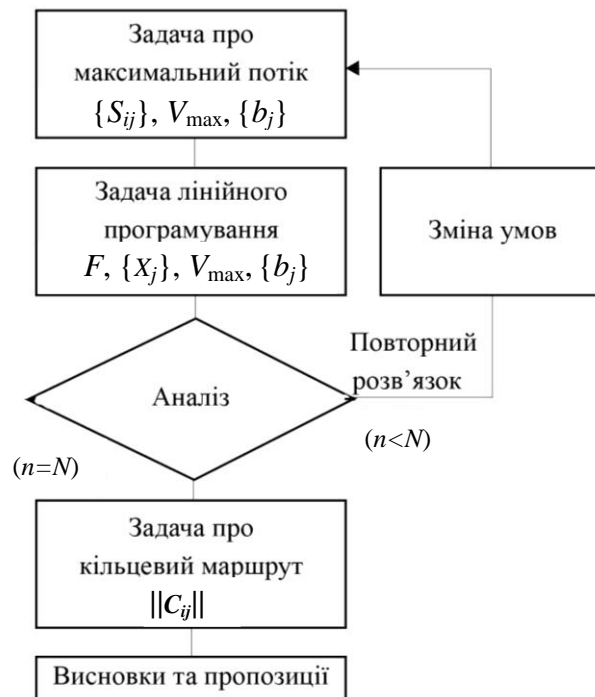


Рис. 2. Схема взаємозв'язку задач

Схема розподілу вихідних заготовок зображена на рис. 3.

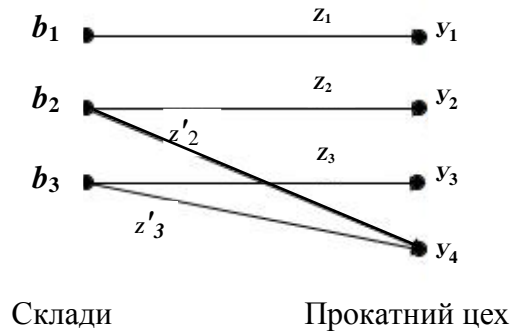


Рис. 3. Схема розподілу вихідних заготовок

Кількість кутків (у шт. мірної довжини) дорівнює:

$$\begin{aligned} \frac{z_1}{l_1} &= y_1; \frac{z_2}{l_2} = y_2; \frac{z_3}{l_3} = y_3; \\ \frac{z_4}{l_4} &= \frac{z_2}{l_4} + \frac{z_3}{l_4} = y_4 = y_2 + y_3; \end{aligned} \quad (1)$$

де z_j – загальна довжина кутка, яка повинна вироблятися j -м прокатним станом;

l_j – мірна довжина кутка на j -му прокатному стані;

y_j – кількість кутка мірної довжини на j -му прокатному стані (шт).

Відповідно до цього:

$$k_1 y_1 \leq b_1; k_2 y_2 + k_2' y_2' \leq b_2; k_3 y_3 + k_3' y_3' \leq b_3, \quad (2)$$

де k_j – коефіцієнт витрат на виробництво одного кутка на j -му прокатному стані;

b_j – можливість постачання заготовки j -го прокатного стану.

За заданим співвідношенням: $y_1 : y_2 : y_3 : y_4 = g_1 : g_2 : g_3 : g_4$ маємо:

$$\frac{y_3}{y_2 + y_3} = \frac{\gamma_3}{\gamma_4}, \text{ тобто } -\gamma_3 y_2' - \gamma_3 y_3' + \gamma_4 y_3 = 0,$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}, \text{ тобто } \gamma_2 y_1 - \gamma_1 y_2 = 0,$$

$$\frac{y_2}{y_3} = \frac{\gamma_2}{\gamma_3}, \text{ тобто } \gamma_3 y_2 - \gamma_2 y_3 = 0,$$

де γ_j – коефіцієнт співвідношення.

Максимізацію кількості комплектів металоконструкцій запишемо у такий вираз:

$$F = y_1 + y_2 + y_3 + y_2' + y_3' \rightarrow \max. \quad (3)$$

Виконаємо переіндексацію змінних:

$$y_1 = x_1, y_2 = x_2, y_3 = x_3, \\ y_2' = x_4, y_3' = x_5.$$

Тоді отримуємо таку математичну модель лінійного програмування:

$$F = \sum_{i=1}^5 x_i \rightarrow \max, \\ \gamma_4 x_3 - \gamma_3 x_4 - \gamma_3 x_5 = 0, \\ \gamma_2 x_1 - \gamma_1 x_2 = 0, \\ \gamma_3 x_2 - \gamma_2 x_3 = 0, \quad (4) \\ k_1 x_1 \leq b_1, \\ k_2 x_2 + k_2' x_4 \leq b_2, \\ k_3 x_3 + k_3' x_5 \leq b_3.$$

Така математична модель розв'язується симплексним методом, для якої треба знайти величини b_1 , b_2 та b_3 .

Для віднаходження величин b_1 , b_2 та b_3 розв'язується задача про максимальний потік згідно із заданою транспортною мережею.

Для цієї мережі є один вхід – сталеливарний завод, а кінцевих пунктів – три (рис. 4).

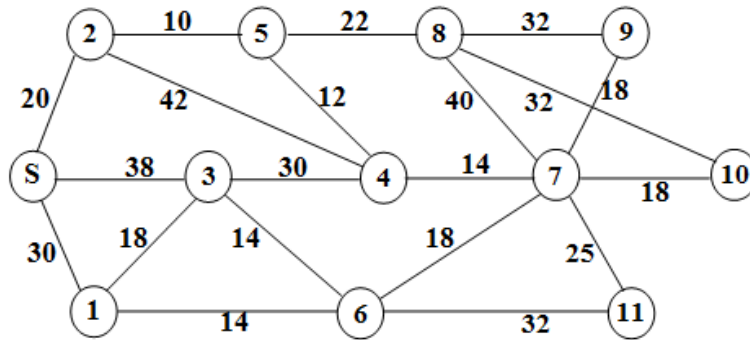


Рис. 4. Діюча транспортна мережа

Для розв'язування задачі про максимальний потік вводиться один фіктивний кінцевий пункт t з умовними зв'язками (рис. 5).

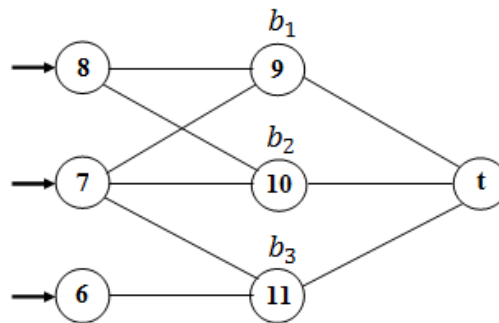


Рис. 5. Переналадження транспортної мережі

Пропускную можливість пункту t взяти за суму вхідних можливостей $S_{i,j}$ від кінцевих складів:

$$S_{9,t} = S_{8,9} + S_{7,9} = 32 + 18 = 50,$$

$$S_{10,t} = S_{7,10} + S_{8,10} = 18 + 32 = 50,$$

$$S_{11,t} = S_{6,11} + S_{7,11} = 32 + 25 = 57.$$

Кінцева матриця потоків така:

s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	t	
s	X	26	10	14									
1		X		12		14							
2			X		10								
3				X	26								
4					X	12	14						
5						X		22					
6							X				14		
7								X		14			
8									X	22			
9										X		22	
10											X	14	
11												X	14
T													X

Рис. 6

$$V_{max} = 26 + 10 + 14 = 50,$$

$$b_1 = x_{8,9} + x_{7,9} = 22 + 0 = 22,$$

$$b_2 = x_{7,10} + x_{8,10} = 14 + 0 = 14,$$

$$b_3 = x_{6,11} + x_{7,11} = 14 + 0 = 14.$$

Одержані таким чином пропускі можливості x_{jt} до фіктивного кінцевого пункту t дорівнюють значенням b_{3j} :

$$x_{1,t} = b_1, x_{2,t} = b_2, x_{3,t} = b_3.$$

Після цього розв'язується задача лінійного програмування.

$$F = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \rightarrow \max,$$

$$1,1x_1 \leq 22,$$

$$1,08x_2 + 1,12x_4 \leq 14,$$

$$1,12x_3 + 1,12x_5 \leq 14.$$

Результати розв'язування: $x_1 = 2,82$; $x_2 = 11,29$; $x_3 = 8,46$; $x_4 = 4,032$; $x_5 = 28,23$.

Виробництво кількості кутків (шт.):

$$\begin{aligned}y_1 &= x_1 = 2,82, \\y_2 &= x_2 = 11,29, \\y_3 &= x_3 = 8,46, \\y_4 &= x_4 + x_5 = 1,61 + 4,032 = 5,632.\end{aligned}$$

За знайденими величинами y_1 , y_2 , y_3 та y_4 і заданим співвідношенням комплектації обчислюється кількість комплектів n , котрі можна одержати за проведеними розрахунками (Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4). Тоді перший куток має коефіцієнт $y_1 = 1$, тому кількість комплектів за добу – 2,82 шт.

Виробництво кутків за місяць дорівнює (у цілочислових значеннях):

$$\begin{aligned}y_1 &= 24 \cdot y_1 = 24 \cdot 2,82 = 67,68 \equiv 67 \text{ шт.} \\y_2 &= 24 \cdot y_2 = 24 \cdot 11,29 = 270,96 \equiv 270 \text{ шт.} \\y_3 &= 24 \cdot y_3 = 24 \cdot 8,46 = 203,04 \equiv 203 \text{ шт.} \\y_4 &= 24 \cdot y_4 = 24 \cdot 5,632 = 135,168 \equiv 135 \text{ шт.}\end{aligned}$$

Оскільки за планом потрібно $N = 82$ шт., а одержано тільки 67 шт. ($n = y_1 < N$), то в цьому випадку потрібно провести аналіз завантаження транспортної мережі, запропонувати зміни значення $S_{i,j}$ для деяких зв'язків мережі (або змінити структуру цієї мережі), тобто запропонувати шлях збільшення максимального потоку постачання заготовок від сталеливарного заводу.

Перевіряється поведінка обмежень математичної моделі лінійного програмування шляхом підстановки результатів розв'язку:

$$1.1 \quad x_1 = 1,1 \cdot 2,82 = 3,102 < 22,$$

$$1,08 x_2 + 1,12 x_4 = 1,08 \cdot 11,29 + 1,12 \cdot 1,61 = 13,99 \approx 14,0,$$

$$1,12 x_3 + 1,12 x_5 = 1,12 \cdot 8,46 + 1,12 \cdot 4,032 = 13,99 \approx 14,0.$$

Таким чином, вживаються заходи, для збільшення значень b_2 та b_3 , тому що вони є вузьким місцем у виробничій ситуації, а величина $b_1 = 22$ є в достатній кількості.

В результаті аналізу фактичного завантаження транспортної мережі визначається, що збільшення значень b_2 та b_3 можливе за рахунок зростання пропускних можливостей зв'язків (47) та (16) згідно із транспортною мережею. Таким чином, для виконання планових завдань ($N = 82$) вживаються заходи для збільшення величин b_2 та b_3 за рахунок $S_{4,7}$ та $S_{1,6}$.

Виконуються заміни $S_{4,7} = 14$ на $S_{4,7} = 18$, а $S_{1,6} = 14$ на $S_{1,6} = 18$.

Кінцева матриця потоків така:

	s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	T
s	X	30	10	18									
1		X		12			18						
2			X			10							
3				X	30								
4					X	12		18					
5						X			22				
6							X					18	
7								X			18		
8									X	22			
9										X			22
10											X		18
11												X	18
t													X

Рис. 7

$$V_{max} = 58,$$

$$b_1 = 22,$$

$$b_2 = 18,$$

$$b_3 = 18.$$

Транспортна мережа із фактичним навантаженням зображена на рис. 8 (у дужках наведені планові потужності):

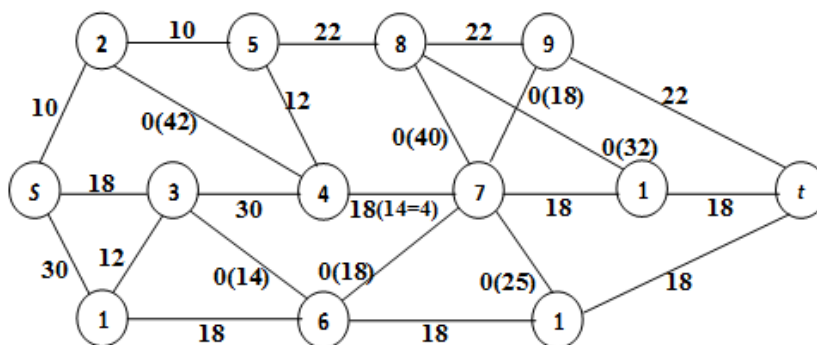


Рис. 8. Транспортна мережа із фактичним навантаженням

Розв'язок задачі лінійного програмування із цими даними такий:
 $x_1 = 3,55, x_2 = 14,55, x_3 = 10,67, x_4 = 2,158, x_5 = 4,95, F = 35,57$.
 Виробництво кількості кутків у нових умовах (за добу):

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1 = 3,55, \\ y_2 &= x_2 = 14,55, \\ y_3 &= x_3 = 10,67, \\ y_4 &= x_4 + x_5 = 2,158 + 4,95 = 7,108 \text{ шт.} \end{aligned}$$

Виробництво кутків за місяць (цілочислове):

$$\begin{aligned} y_1 &= 24 \cdot 3,55 = 85,2 \equiv 85 \text{ шт.} \\ y_2 &= 24 \cdot 14,55 = 349,2 \equiv 349 \text{ шт.} \\ y_3 &= 24 \cdot 10,67 = 256,08 \equiv 256 \text{ шт.} \\ y_4 &= 24 \cdot 7,108 = 170,592 \equiv 170 \text{ шт.} \end{aligned}$$

Таким чином, виробничий комплекс протягом місяця має можливість випускати 85 комплектів металоконструкцій для опор мереж електропередач. Мети досягнуто, тобто виконується співвідношення $n \geq N$.

Для розрахунку мінімальних простоїв обладнання використовується математична модель задачі про кільцевий маршрут:

$$F = \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$\sum_i x_{ij} = 1; \sum_j x_{ij} = 1,$$

$$x_{ij}(1 - x_{ij}) = 0; c_{ij} = \infty (i = j); c_{kl} = \infty.$$

де $x_{ij} = \begin{cases} 0, \\ 1, \end{cases}$

c_{ij} – витрати часу на переналагодження обладнання у разі переходу з i -ої на j -ту операцію;

c_{kl} – зв'язок, який дає неповний кільцевий маршрут.

Схема розв'язування така (рис. 9).

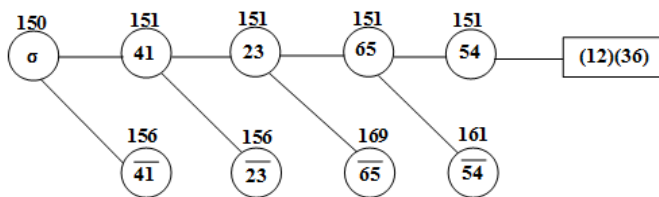


Рис. 9. Схема задачі про кільцевий маршрут

Розв'язок: $F = 151$ (хвилин), $\sigma = (1236541)$.

Загальні витрати часу за місяць на переналагодження становлять:

$$t_n = 151 \cdot 3,55 \cdot 24 = 12\,865,2 \text{ хв} = 214,42 \text{ год} = 8,9 \text{ діб.}$$

Таким чином, кількість годин на виробництво підготовчої операції та складання опор за місяць дорівнює: 567,1 год, або 98,4 % від загальних ресурсів часу.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Розглянуто актуальне питання оптимізації виробничого процесу з використанням задач транспортного спрямування. У розробленій методиці передбачено формування та системний аналіз базових факторів, таких як виробництво необхідної кількості певної продукції.

За допомогою задачі про максимальний потік визначено можливість поставки необхідного обсягу продукції від певної точки виробництва до конкретного складу відповідно до наявних виробничих схем підприємства.

У запропонованій математичній моделі для розв'язання поставленої проблеми запропоновано задачу лінійного програмування для розрахунку обсягу виробництва з використанням певного обладнання; як обмеження вказано можливість постачання заготовки певної продукції.

Проаналізовано результати, отримані після формулювання задачі лінійного програмування. Згідно із цим виконано переоцінку завантаження транспортної мережі та її подальшого переналагодження з метою досягнення цілей виробництва (виробничого плану).

За допомогою використання задачі про кільцевий маршрут знайдено послідовність проведення операцій з мінімізацією витрат на переналагодження обладнання у процесі виконання планового завдання підприємства.

Виконуючи аналіз отриманих результатів на кожному етапі розв'язання зазначеної проблеми з метою подальшої оптимізації, запропоновану математичну модель можна впроваджувати у виробничий процес будь-якого підприємства. Така модель дає змогу комплексно оптимізувати процеси підприємства і досягти поставлених цілей шляхом коригування наявної транспортної мережі.

Список використаних джерел:

1. Бідняк М. Н., Біліченко В. В. Виробничі системи на транспорті: теорія і практика: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. 176 с.
2. Наконечний С. І., Савіна С. С. Математичне програмування: навч. посіб. Київ: КНЕУ, 2003. 452 с.

3. Орлов О. О. Планування діяльності промислового підприємства: підручник. Київ: Скарби, 2002. 336 с.

4. Царев В. В. Внутрифирменное планирование. Санкт-Петербург: Питер, 2002. 496 с.

5. Таха Хэмди А. Введение в исследование операций. 6-е издание: пер. с англ. Москва: Вильямс, 2001. 912 с.

6. Дорохов О. В. Розробка моделей для удосконалення взаємодії споживачів і виробників послуг на транспортних ринках вантажних перевезень: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: Харків, 2005.

7. Лашкевич А. А. Моделі управління ланцюгами поставок експрес-вантажів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. економ. наук. Санкт-Петербург, 2012.

References:

1. Bidniak M. N. and Bilichenko V. V. (2006), *Vyrobnychi systemy na transporti: teoriia i praktyka* [Production systems in transport: theory and practice], Press UNIVERSUM-Vinnytsia, 176 p. [Ukraine].

2. Nakonechnyi S. I. and Savina S. S. (2003), *Matematychnе prohramuvannia* [Mathematical programming], Press KNEU, Kiev, 452 p. [Ukraine]

3. Orlov O. O. (2002), *Planuvannia diialnosti promyslovoho pidpriemstva*. [Planning of activity of industrial enterprise], Press Skarby, Kiev, 336 p. [Ukraine]

4. Tsarev V. V. (2002), *Vnutryfyrmennoe planirovaniye* [Inter-company planning], Press Pyter, Sankt-Peterburh, pp. 496–518, [Russia]

5. Taha Hemdi A. (2001), *Vvedenie v issledovanie operacij*, 6-e izdanie [Introduction to Operations Research, 6th Edition], Press Izdatelskij dom “Vilyams”, Moscow, 912 p. [Russia]

6. Dorokhov O. V. (2005), *Rozrobka modelei dlia udoskonalennia vzaiemodii spozhyvachiv i vyrobnykiv posluh na transportnykh rynkakh vantazhnykh perevezen* [Development of models for improving the interaction between consumers and service providers in the freight transport markets], Kharkiv, 24 p. [Ukraine]

7. Lashkevych A. A. (2012), *Modeli upravlinnia lantsiuhamy postavok ekspres-vantazhiv* [Models of management of a chain of express cargo deliveries], Sankt-Peterburh, 22 p. [Russia]