DOI: https://doi.org/10.30837/EK.2025.025
Степанова О.В.,
к.е.н., доцент кафедри економічної кібернетики
та управління економічною безпекою,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8579-6276

МЕТОДИ І МОДЕЛІ УДОСКОНАЛЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ КОМБІНОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ ПОТОКІВ У МЕТАЛУРГІЙНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Металургія є стратегічною сферою діяльності промисловості України, яка виробляє матеріали і сировину для машинобудування, транспортної та будівельної галузей. Незважаючи на кризові явища на світових ринках, металургійне виробництво залишається одним з основних джерел наповнення державного бюджету України валютною виручкою, а металургійний комплекс забезпечує робочі місця в металургійній і суміжних галузях та сприяє розвитку української промисловості. Відродження металургії України пов’язане з відновленням, реконструкцією та модернізацією виробництва. Укрупнення металургійних агрегатів, інтенсифікація технологічних процесів приводить до різкого збільшення випуску продукції та зростання інтенсивності матеріальних потоків, що викликає необхідність удосконалення організації виробничих потоків.

Беручи до уваги важливу роль металургії у зміцненні української економіки, ця галузь привертає значну увагу вітчизняних науковців. В Україні створено «Концепцію сталого розвитку чорної металургії до 2050 року» [1], яка визначає основні напрями подальшого розвитку галузі. Серед ключових завдань – відбудова підприємств, зруйнованих унаслідок військової агресії Росії, запуск нових виробничих потужностей, підвищення ефективності використання наявних ресурсів, а також модернізація технічної та технологічної бази. Упровадження положень цієї Концепції сприятиме

підвищенню конкурентоспроможності української металопродукції, задоволенню потреб внутрішнього ринку та розширенню експортних можливостей країни.

Фундаментальні дослідження виробничих потоків у металургійному виробництві вперше провів Приймак І. А. [2]. О. В. Мельник у роботі [3] досліджує тенденції та перспективи розвитку металургійних підприємств. Питанням підвищення ефективності гірничо-металургійних компаній присвячена робота О. В. Поважного, І. В. Шкрабак, О. В. Латищева. [4]. У роботі О. В. Степанова [5] провела дослідження диспропорцій і вузьких місць у комбінованих виробничих потоках. Попри великі теоретичні та практичні досягнення в управлінні й організації виробничих процесів існує ряд невирішених питань. Виникає потреба у вирішенні задач організації комбінованих виробничих потоків, які не були вирішенні ні в теорії організації, ні на практиці. Це такі задачі:

– розрахунку продуктивності комплексу агрегатів і обладнання в комбінованих потоках;

– формалізованого представлення структури виробничих потоків;

– знаходження вузьких місць у комбінованих виробничих потоках.

Мета статті полягає в розробці науково-методичних рекомендацій щодо удосконалення організації комбінованих виробничих потоків металургійного виробництва для підвищення ефективності відродження металургії України.

Для досягнення мети були вирішені такі завдання:

– запропоновано представити структуру виробничих потоків у вигляді графа (або сітки);

– побудовано сіткову модель виробничого процесу доменного цеху;

– запропоновано розрахунок продуктивності комплексу агрегатів і обладнання в комбінованих виробничих потоках проводити шляхом знаходження максимального потоку в сітці;

– вирішення задачі пошуку вузьких місць у комбінованих виробничих потоках проводити шляхом вирішення двоїстої задачі про максимальний потік у сітці.

У роботі були використані такі методи дослідження: аналізу, теорія графів і теорія потоків, моделі і методи лінійного програмування.

У теорії організації виробництва ключову роль відіграють закони, що відображають взаємозв'язки між окремими елементами системи та визначають їхню взаємну поведінку. До основних законів організації виробничої діяльності відносять закони композиції, пропорційності, найменших, синергії, адаптації та інші [6, 7]. Під час аналізу виробничих потоків у роботі застосовано закон пропорційності, який у широкому розумінні характеризує необхідність підтримання певного балансу між складовими частинами системи, їх узгодженість та взаємну залежність. Усі виробничі процеси повинні бути оптимально скоординовані у часі й просторі.

На металургійних підприємствах виробничий процес має характер спрямованого руху потоку сировини, матеріалів, напівфабрикатів і допоміжних компонентів, що проходять послідовну обробку на дільницях і в цехах. У цих потоках задіяні потужні металургійні агрегати – доменні, мартенівські печі, конвертори, прокатні стани та інше складне обладнання, розміщене на допоміжних виробничих дільницях. Залежно від організаційної структури виробництва потоки поділяються на дві основні форми – просту та комбіновану [2]. Прості потоки характеризуються тим, що виготовлення продукції відбувається на певному агрегаті та його допоміжних дільницях без взаємозв'язку з іншими агрегатами, які виконують аналогічні або відмінні технологічні процеси. Потужність і кількість обладнання на таких дільницях визначається продуктивністю основного агрегату. Така форма організації виробничого процесу вважається найбільш доцільною, оскільки забезпечує зручність контролю й регулювання. На відміну від простої форми, комбіновані потоки охоплюють взаємодію двох або більше основних агрегатів. При цьому кожен із потоків функціонує у межах свого головного агрегату, однак окремі

етапи технологічного процесу можуть виконуватися на дільницях, які одночасно обслуговують кілька потоків. У теорії організації виробництва зазначається, що в межах комбінованих потоків виробничий процес відбувається на [2]:

– наскрізних допоміжних дільницях, які забезпечують функціонування всіх основних агрегатів підприємства;

– вузлових ступенях, що обслуговують обмежену кількість агрегатів, пов’язаних між собою технологічно;

– локальних ступенях, які призначені для обслуговування лише одного основного агрегату.

У складних комбінованих потоках організація виробничого процесу повинна бути орієнтована на забезпечення таких умов, за яких кожна дільниця або цех виконуватиме запланований обсяг робіт у визначений проміжок часу. Одним із ключових завдань економіко-математичного аналізу в цій сфері є комбінування однорідних або різних виробничих процесів задля досягнення максимальної ефективності випуску продукції. Практика управління та організації виробництва свідчить, що оптимізація складних виробничих систем є можливою шляхом створення моделей і дослідження їхньої поведінки в умовах, наближених до реальних. Особливо зручними для цього є графічні моделі, які вирізняються наочністю та простотою побудови. У таких моделях усі операції виробничого процесу подаються у формалізованій формі. Значного поширення при моделюванні виробничих систем набули також математичні моделі. Побудова комплексної моделі виробничих процесів є складним завданням, оскільки передбачає врахування основних, допоміжних і сервісних елементів системи. Для опису структури виробничих потоків доцільно використовувати апарат теорії графів і методи математичного програмування**.** У потрібному ступені деталізації структура виробничого потоку може бути подана у вигляді графа G = [N, A], де **N** – множина вершин, а **A** – множина дуг (ij) [8, 9, 10]. Вершини графа позначають завершення одного процесу і початок наступного, тоді як дуги відображають самі виробничі операції. У науковій

літературі часто застосовується термін «сітка», оскільки кожній дузі відповідає кілька числових характеристик, тоді як у класичній теорії графів дуга лише позначає зв'язок між вузлами. Кожній дузі надається невід'ємне числове значення, яке характеризує її пропускну здатність або продуктивність**.** У сітковій структурі виділяють дві спеціальні вершини: джерело (S) – початок технологічного процесу на дільниці або в цеху; стік (t) – завершення процесу. Інші вершини вважаються проміжними. Усі вершини мають власну нумерацію, з якої випливає нумерація дуг. Потік матеріалу, що переробляється в процесі (i, j) за одиницю часу, позначається як X (i, j) і відображає потік по відповідній дузі. Сукупність усіх потоків від джерела до стоку утворює загальний потік V. Сіткова модель виробничого процесу відображає схему руху різних видів сировини, матеріалів і напівфабрикатів, які піддаються транспортуванню, перевантаженню, усередненню та іншим технологічним операціям. На рисунку 1 наведено приклад сіткової моделі виробничих потоків доменного цеху. Під час побудови цієї моделі враховано певні спрощення реального виробництва –у розрахунок беруться лише основні матеріали, що проходять технологічну обробку, та головний кінцевий продукт плавки – чавун**.**

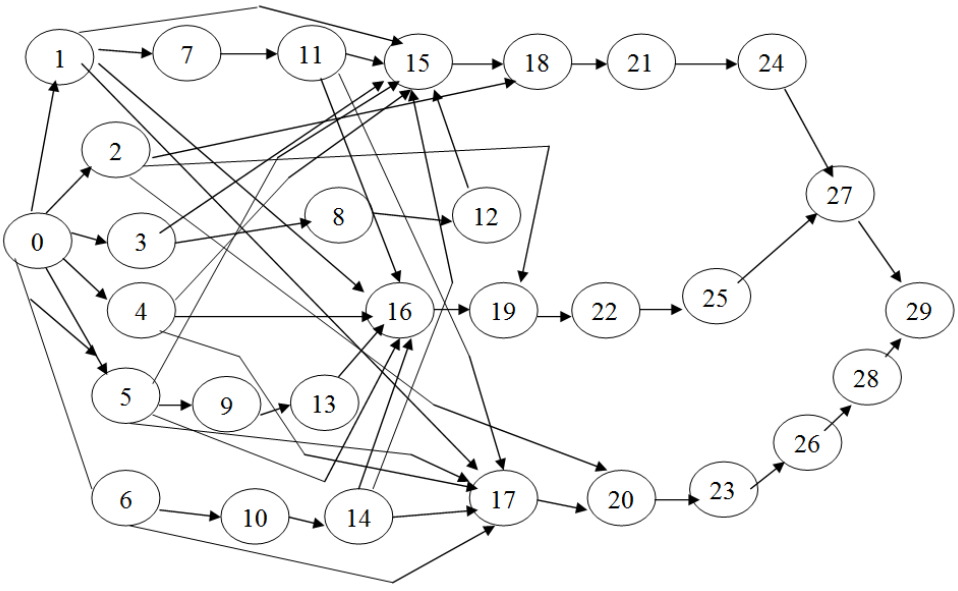

Рисунок 1 – Сіткова модель виробничого процесу доменного цеху

Джерело: розробка автора

Умовні позначення дуг сітки такі:

– (0 - 1), (0 - 2), (0- 3), (0 - 4), (0 - 5), (0 - 6) – прибуття в доменний цех відповідно окатишів, коксу, марганцевої руди, залізної руди, агломерату, вапняку;

– (1 - 15), (1 - 16), (1 - 17), (3 - 15), (4 - 15), (4 - 17), (5 - 15), (5 - 16), (5 - 17) – подача тих самих матеріалів (окрім коксу і вапняку) в бункери бункерної естакади;

– (2 - 18), (2 - 19), (2 - 20) – подача коксу в коксові бункери;

– (1 - 17), (3 - 8), (5 - 9), (6 - 10) – штабелювання і усереднення відповідно окатишів, марганцевої руди, агломерату, вапняку;

– (7 - 11), (8 - 12), (9 - 13) – завантаження тих самих матеріалів у трансферкар;

– (11 - 15), (11 - 16), (11 - 17), (12 - 15), (13 - 16), (14 - 17) – завантаження тих самих матеріалів в бункери доменних печей;

– (15 - 18), (16 - 19), (17 - 20) – забір і завантаження тих самих матеріалів вагон – вагами і подача їх в скіп;

– (18 - 21), (19 - 22), (20 - 23) – подача шихтових матеріалів підйомником на колошник доменних печей;

– (21-24), (22 - 25), (23 - 26) – виплавка чавуну в доменних печах № 1–3;

– (24 - 27), (25 - 27), (26 - 28) – транспортування чавуну в ковшах на розливальні машини і в міксер;

– (27 - 29) – розливка чавуну на розливальних машинах;

– (28 - 29) – злив чавуну в міксер.

Формалізоване подання структури виробничих потоків у вигляді сіткової моделі створює можливості для вирішення низки важливих завдань організації виробництва. Одним із ключових серед них є визначення максимального обсягу випуску продукції цехом або окремою дільницею з урахуванням продуктивності основних агрегатів та пропускної здатності обладнання допоміжних і обслуговуючих підрозділів. Потужність виробничого потоку в першу чергу визначається ефективністю основних металургійних агрегатів, однак її значення також обмежується пропускною спроможністю допоміжного

обладнання та наявністю так званих «вузьких місць» у технологічному ланцюгу. Отже, для обчислення величини потоку необхідно провести оцінку продуктивності та пропускної здатності всього комплексу агрегатів і устаткування, що бере участь у забезпеченні технологічного процесу.

Задача визначення максимального потоку в довільній сітковій моделі належить до класу задач лінійного програмування і формулюється через відповідну цільову функцію [9, 10, 11]:

$$V=\sum_{j} X_{ij} . \tag{1}$$

Потік у сітці підпорядковується таким умовам:

– величина потоку будь-якою дугою обмежується пропускною здатністю дуг b_{ij}

$$O \le X_{ij} \le b_{ij} \text{ для всіх (ij) Є A;} \tag{2}$$

– величина потоку, який приходить до всіх проміжних (крім джерела і стоку) вершин сітки, дорівнює величині потоку, який покидає ці вершини

$$\sum_{i} X_{ij} - \sum X_{jk} = 0 \quad j \neq s,t ; \tag{3}$$

– величина потоку, який виходить із джерела, і величина потоку, який приходить до стоку, рівні між собою величини

$$\sum_{i} X_{ij} - \sum X_{jk} = -V, \quad \textit{коли } j=s; \tag{4}$$

$$\sum_{i} X_{ij} - \sum X_{jk} = V, \quad \textit{коли } j=t; \tag{5}$$

де b_{ij} – пропускна здатність дуги (ij);

X_{ij} – потік по дузі (ij).

Для сітки G = [N, A] з джерелом S і стоком t величини V максимального потоку із S в t є функція тільки пропускної здатності окремих дуг. Тоді величина максимального потоку дорівнює:

$$V = \min_{R=A} \sum b(A_i), \tag{6}$$

Де мінімум береться по всіх розрізах R, які відділяють S і t.

У праці [11] введено поняття «розрізу» у сітковій моделі. Якщо всі вершини сітки поділити на дві неперетинні множини таким чином, щоб джерело (S) належало першій множині, а стік (t) – другій, тоді розрізом сітки вважається сукупність дуг, які виходять із вершин першої множини та входять у вершини другої. Сумарна пропускна здатність усіх дуг, що належать розрізу, визначає пропускну здатність розрізу. Розріз, який має найменше можливе значення цієї здатності для даної сітки, називають мінімальним розрізом. Він відповідає так званому «вузькому місцю» у системі виробничих потоків, тобто тій ділянці, що обмежує загальну потужність виробничого процесу.

З визначенням максимального обсягу випуску продукції безпосередньо пов'язане інше важливе завдання – виявлення вузьких місць у виробничому процесі. Відомо, що кожній задачі лінійного програмування відповідає двоїста задача [9]. Таким чином, пошук вузьких місць може бути поданий у формі двоїстої задачі до задачі про максимальний потік [10, 11]. Якщо до рівнянь (3) – (5) застосувати множник π(i), а до обмеження, яке визначає пропускну здатність (2), – множник γ(ij), то отримаємо систему умов, що описує двоїсту задачу:

$$-\pi(S) + \pi(t) \geq 1; \tag{7}$$

$$\pi(i) - \pi(j) + \gamma(i,j) \geq 0; \tag{8}$$

$$\gamma(i,j) \geq 0 \tag{9}$$

і треба знайти максимум форми

$$\sum b_{ij} * \gamma(i,j) \tag{10}$$

за цих умов.

Оптимальне вирішення двоїстої задачі визначається такими формулами:

$$\pi(i)=\begin{Bmatrix} o & N_i \in X \\ 1 & при \quad N_i \in \overline{X} \end{Bmatrix}, \tag{11}$$

$$\gamma(i,j)=\begin{Bmatrix} o & A_{ij} \in (x,\overline{x}) \\ 1 & при \quad в\ інших\ випадках \end{Bmatrix}. \tag{12}$$

Розв'язання двоїстої задачі про максимальний потік дозволяє ідентифікувати вузькі місця у роботі цеху або окремої дільниці. У структурі комбінованих виробничих потоків поняттю вузького місця відповідає термін «мінімальний розріз сітки». У цьому випадку обмежувальний фактор (вузьке місце) не завжди пов'язаний із конкретною одиницею обладнання, як це характерно для простої форми потоку. Для комбінованих систем вузьким місцем може бути сукупність технологічних процесів, тобто воно має просторово розподілений характер. У праці [6] запропоновано класифікацію вузьких місць у комбінованих потоках відповідно до типів ступенів виробничої системи:

– локальні – відповідають локальному ступеню потоку;

– вузлові – співвідносяться з вузловим ступенем;

– наскрізні – відповідають наскрізному ступеню.

Для розв'язання загальної задачі лінійного програмування застосовується симплекс-метод [9]. Проте для задачі, що стосується визначення максимального потоку в сітці, розроблено більш ефективний алгоритм – метод розстановки позначок [11]. З метою практичної реалізації поставлених завдань було здійснено розрахунок продуктивності доменних печей і пропускної здатності технологічного обладнання, яке бере участь у виробничому процесі. Продуктивність доменних печей визначалась у тонах готового чавуну, тоді як пропускна здатність допоміжного обладнання – у натуральних одиницях, тобто за масою матеріалу, який переробляється на відповідній дільниці. Оскільки для побудови сіткової моделі необхідно використовувати єдину систему

вимірювання, було введено витратні коефіцієнти, що дозволяють виразити пропускну здатність кожної дільниці у тонах чавуну. Розрахунок максимального потоку в сітці доменного цеху проведено за двома варіантами: при плановій (проєктній) продуктивності доменних печей; при підвищенні продуктивності на 20%. Отримані результати показали, що за умов планового навантаження допоміжні та обслуговуючі дільниці повністю забезпечують стабільне функціонування доменного цеху. Водночас збільшення продуктивності доменних печей на 20% призводить до появи вузького місця у виробничому потоці – ним виявилася дільниця шихтоподачі, а саме пропускна здатність скіпового підйомника доменних печей, яка обмежує подальше зростання загального обсягу виробництва.

Запропоновані методи та моделі для аналізу виробничих потоків дозволяють ефективно вирішувати низку завдань організації виробництва. Сформульовані задачі узагальнюють і розвивають існуючі теоретичні положення щодо управління виробничими потоками будь-якої складності. Використання потокової сіткової моделі для формалізованого представлення структури виробничих потоків надає значні переваги при плануванні та оптимізації процесів. Зокрема, з’являється можливість враховувати різні фактори, такі як продуктивність основних агрегатів та пропускна здатність допоміжного і обслуговуючого обладнання.

Розв’язання двоїстої задачі лінійного програмування дає змогу визначати вузькі місця у виробничих потоках. Водночас основне завдання організації виробництва полягає не лише у виявленні та усуненні таких обмежень, а передусім – у запобіганні їх виникненню. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на оптимізацію організації складних виробничих потоків у просторі та часі, а також на оцінку впливу вузьких і широких місць на ефективність роботи підприємства.

Перелік джерел посилання

1. Тубольцев Л. Г., Меркулов О. Е., Пригунова А. Г., Нарівський А. В. Концепція сталого розвитку чорної металургії України в сучасних умовах:

Журнал. Дніпро: *Метал та лиття України.* 2022. Ч. 30. № 4. С. 8-19.

2. Приймак І. А. Основи організації виробничих потоків. Київ: Техніка, 1960. 152 с.

3. Мельник О. В. Тенденції та перспективи розвитку металургійних підприємств України. *Ефективна економіка.* 2017. № 8. С. 44-58. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek_2017_8_39

4. Поважний О. С., Шкрабак І. В., Латишева О. В. Управління змінами в проєктах підвищення операційної ефективності гірничо-металургійних компаній. *Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємництво*. 2023. № 2 (128). С. 37-44. URL: https://doi.org/10.32782/1814-1161/2023-2-5

5. Степанова О. В. Диспропорції та вузькі місця у комбінованих виробничих потоках металургійного виробництва *Адаптивне управління: теорія і практика Серія «Економіка».* 2019. Том 7. № 14. URL: https://doi.org/10.33296/2707-0654-7(14)-06

6. Монастирський Г.Л. Теорія організації: підручник. Тернопіль: ТНЕУ, 2014. 288 с. URL: https://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/31431/1/2014-Monastyrskyjniz.pdf

7. Організація виробництва: підручник / А. І. Яковлєв [та ін.]; ред.: А. І. Яковлєв, С. П. Сударкіна, М. І. Ларка; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків: НТУ «ХПІ», 2016. 436 с. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/28324

8. Berzh K. Graph theory and its application / per. A.A. Zykov. M: Foreign Literature Publishing House, 1965. 410 c.

9. Dantzig G.B. Linear Programming and Extensions, Princeton University Press, Princeton, N.I., 1962.

10. Hu T.C. Integer Programming and Network Flow. Adison – Wesloy Publing Company, 1970.

11. Ford L. R., Fulkerson D. R., Maximal Flow through a Network, Rand Rep. RM 1400, 1954.