

С. О. КОСИЛОВ, асп. ДонНТУ, Донецьк

РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ ТА АЛГОРИТМІВ СИСТЕМИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ПЛАНУВАННІ ВИКОНАННЯ ЗАМОВЛЕНЬ ЛИСТОПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА

Розробляється система підтримки прийняття рішень при розв'язанні задачі оптимального планування для класу технологічних об'єктів конвеєрного типу з технологічною паузою перед обробкою на агрегатах і обмеженнями по часу виконання замовлень. На прикладі листопрокатного виробництва представлено результат такої розробки у вигляді структури та алгоритму роботи системи оптимального планування виконання замовлень. Пропонується метод урахування обмежень по часу при розв'язанні задачі оптимального планування.

Ключові слова: оптимальне планування, математичні моделі, система підтримки прийняття рішень, критерій оптимізації, функціонал, час запізнення, алгоритм.

Вступ. Використання методів інформаційних технологій при розв'язуванні задач планування виробництва є одним з сучасних засобів підвищення ефективності виробництва. Але багатofакторність технологічних процесів, особливість підприємств та велика кількість технологічних обмежень обумовлюють відсутність універсального способу розв'язання таких задач. Метою дослідження є розробка методів, моделей і алгоритмів прийняття рішень при плануванні виконання замовлень, які можливо застосовувати для класу підприємств, де виробництво організовано у вигляді конвеєрної системи з технологічними паузами перед обробкою матеріалів і обмеженнями по часу випуску.

Аналіз основних досягнень і літератури. Технологічні основи листопрокатного виробництва, технологічні обмеження, задіяні на усіх листопрокатних підприємствах та принципи їх функціонування досліджені у [1], [2]. Для ряду підприємств при створенні автоматизованих систем управління було запропоновано алгоритми розв'язання окремих задач планування, які представлено у [3] – [6]; алгоритму універсального розв'язку задач для таких систем з обмеженнями по часу виконання замовлень не існує. Проблеми задач планування, що вирішуються за допомогою математичного апарату оптимізації та інструментів оперативного аналізу даних (OLAP), викладено у [7], [8], але для досліджуваного у роботі класу об'єктів не існує готового інструментарію розв'язання задач планування.

Мета дослідження, постановка задачі. За допомогою методів інформаційних технологій і з урахуванням зробленої у роботі [9] формалізації задачі планування виконання замовлень на листопрокатному виробництві, а також запропонованих у [10] алгоритмів її розв'язання, розробити структуру

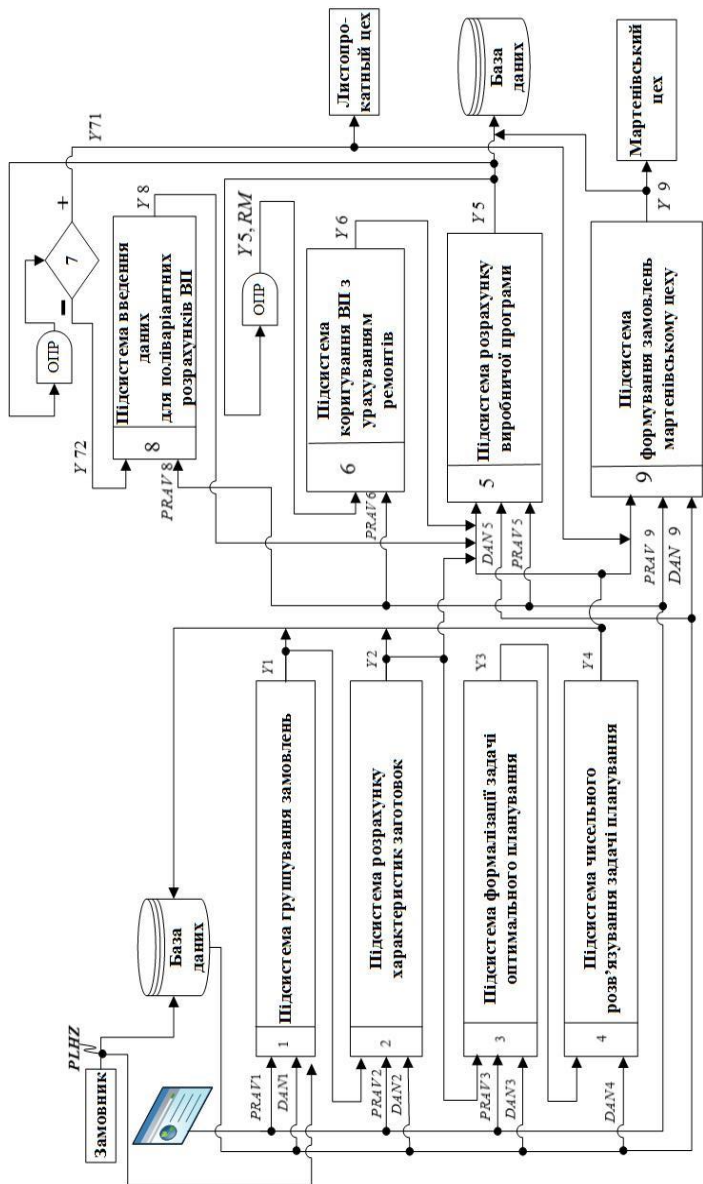
системи планування виробничої програми листопрокатного виробництва. З метою урахування обмежень по часу виконання замовлень, відкоригувати попередньо розроблений у [10] алгоритм та цільовий функціонал задачі оптимального планування.

Матеріали досліджень. В ході попередньої формалізації та розробки алгоритму розв'язання задачі планування виконання замовлень листопрокатного виробництва, результати якого приведено у [10], було запропоновано метод багатоетапної декомпозиції задачі, за допомогою якого структура розв'язання була представлена у вигляді чотирьох етапів. Декомпозиція дозволила розробити систему планування виробничої програми виконання замовлень у вигляді автоматизованого робочого місця (АРМ), користувачем якого будуть керівники виробничого та планово-економічного відділів заводууправління. Створене програмне забезпечення для роботи системи дає можливість користувачу АРМ вводити характеристики замовлень на листовий прокат і отримувати як виробничу програму роботи листопрокатного цеху, що забезпечує виконання замовлень за мінімальний час, так і характеристики замовлення мартенівському цеху на виробництво заготовок для прокату. Система планування також передбачає можливість отримання користувачем поліваріантних розрахунків виробничої програми для оцінки наслідків реалізації кожного з варіантів. Вироблена системою планування виробнича програма направляє користувачем у листопрокатний цех для виконання.

Основні етапи функціонування системи планування виконання замовлень для листопрокатного виробництва, реалізованої у вигляді АРМ планово-виробничих служб, проілюстровано на рис.1 у вигляді функціональної схеми пов'язаних підсистем (блоків). Обмін інформацією між блоками представлено як передача значень вхідних і вихідних змінних Y безпосередньо між підсистемами блоків або із використанням бази даних системи у якості тимчасового сховища даних *DAN*. Розрахунок значень змінних у блоках виконується за допомогою правил *PRAV*, які зберігаються у базі знань і використовуються підсистемами згідно алгоритму роботи системи.

Далі наведено стислий опис алгоритму роботи системи.

Формування бази даних та бази знань системи. У відділ збуту готової продукції поступають замовлення на листовий прокат, у яких замовник зазначає типорозміри прокатних листів, масу та час виконання замовлення. Користувач АРМ вносить їх у базу даних у вигляді наборів змінних *PLHZ*. Крім того, до бази даних заносяться технологічні нормативи даного підприємства у вигляді наборів змінних *DAN*, що включають в себе значення припуску на торцевий обріз, кількість прокатних листів у одному кратному слябі, продуктивність прокатки на клітях та ін. База знань формується з правил *PRAV* перетворень вхідних змінних у вихідні для кожної підсистеми, які формалізовано у [10].



ВП- виробнича програма роботи листопрокатного цеху по виконанню замовлень

Рис. 1 – Функціональна схема системи планування виконання замовлень на листопрокатному виробництві

Алгоритм роботи системи оптимального планування передбачає виконання певних функцій кожною підсистемою.

1. Підсистема групування замовлень (блок 1, рис.1). Для визначення маси замовлень однакових типорозмірів реалізується об'єднання замовлень у групи на основі правил *PRAV1* бази знань. Кожна група (далі – позиція портфеля замовлень) включає в себе усі замовлення з однаковими типорозмірами, які передаються до бази даних як вихідні змінні **Y1** підсистеми і використовуються для подальших розрахунків.

2. Підсистема розрахунку характеристик заготовок (блок 2, рис.1). Для кожної з позицій портфеля замовлень на основі правил *PRAV2* перетворення листа у сляб визначаються типорозміри групи необхідних заготовок (мірних та кратних слябів), маси мірних та кратних слябів кожної групи. Результати разом з технологічними нормативами (припустимим часом нагріву в печах, тривалістю прокатки слябів групи та ін.) передаються як вихідні змінні **Y2** до підсистеми формалізації задачі оптимального планування та до бази даних системи.

3. Підсистема формалізації задачі оптимального планування (блок 3, рис.1). Для визначення порядку задання у прокат сформованих груп заготовок (кратних слябів) з урахуванням технологічних обмежень виробництва необхідно визначити масу і типорозмір партій, на які розбиваються групи кратних слябів та послідовність направлення партій у виробництва. Послідовність направлення задається об'єднанням партій у набори для прокатки партій кожного набору у окремій кампанії валків прокатних клітей та упорядкуванням партій у наборах. У попередньому дослідженні [10] представлена формальна постановка задачі оптимального планування, яку в даній роботі доповнено обмеженням на час виконання кожного замовлення, в результаті чого отримано наступну формальну постановку задачі:

Визначити оптимальну кількість *PRAV2* наборів (кампаній валків) партій кратних слябів, необхідних для прокатки портфеля замовлень та масу кожної партії $m_{l,n}$, де $l = \overline{1, Nl}$ – порядковий номер кампанії валків протягом планового періоду, $n = \overline{1, Nn}$ – номер типорозміру замовленого листа, що отримують при прокатці партії масою $m_{l,n}$, які мінімізують функціонал J , наведений у (1) та задовольняють обмеженням (2):

$$J = \sum_{l=1}^M (40 + \sum_{n=1}^{Nn} (m_{l,n} / PPR_n + TP_n(x_{l,n}) \times kf(m_{l,n})) + TVZ)$$

$$J1 = J1(M) \rightarrow \min_M, \quad M = \left\| m_{l,n} \right\|, \quad l = \overline{1, Nl}, \quad n = \overline{1, Nn}, \quad (1)$$

де PPR_n – продуктивність прокатки позиції портфелю замовлень на клітях;

$TP_n(x_{l,n})$ – поліноми, що задають тривалість технологічної паузи перед обробкою на клітках партії масою $m_{l,n}$, $x_{l,n}$ – змінна стану системи перед обробкою цієї партії, формування поліномів детально представлено у [10];

$kf(m_{l,n})$ – коефіцієнт присутності партії n -го типорозміру у l -ї кампанії валків;

TVZ – штрафна функція, мінімізація якої під час вирішення задачі планування, забезпечує реалізацію обмеження по часу виконання замовлень.

Обмеження на маси партій кратних слябів, які обумовлені технологічними особливостями виробництва, визначаються згідно (2):

$$P123(m_{l,n}) : \begin{cases} m_{l,n} \times (m_{l,n} - \overline{MIN}_n) \geq 0 \\ m_{l,n} \times (m_{l,n} - \overline{MAX}_n) \leq 0, l = \overline{1, Nl}, n = \overline{1, Nn}, \\ m_{l,n} \geq 0 \end{cases}$$

$$P_4(m_{l,n}) : \sum_{n=1}^{Nn} m_{l,n} \leq 1\,800\,000, l = \overline{1, Nl}, P_5(m_{l,n}) : \sum_{l=1}^{Nl} m_{l,n} = \overline{MKG}_n, n = \overline{1, Nn},$$

$$m_{l,n} = h \times \overline{MS}_n, h = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

де $\overline{MIN}_n, \overline{MAX}_n$ – мінімально та максимально допустима маса партії n -го типорозміру (технологічний норматив);

$\overline{MS}_n, \overline{MKG}_n$ – маса одного та усіх кратних слябів, які використовують для прокатки усіх замовлень n -ї позиції портфелю.

Для формалізації обмеження на час виконання замовлень (розрахований при вирішенні задачі планування час $TK_{l,n}$ закінчення прокатки кожної партії має забезпечувати виконання кожного замовлення до часу, вказаного замовником) методом штрафних функцій, формуються наступні об'єкти:

а) вектори змінних $MZV(n) = \|mvz(n)_i\|, n = \overline{1, Nn}, i = \overline{1, Ni_n}$, де n – номер типорозміру у портфелі замовлень, i – номер замовлення n -го типорозміру, $mvz(n)_i$ визначає суму мас $\overline{MAS}_{n,i}$ тих замовлень n -го типорозміру, для яких указаний замовником час виконання $TV_{n,i}$ не більше часу $\overline{TV}_{n,i}$ виконання i -го замовлення:

$$mvz(n)_i = \sum_{i1} \overline{MAS}_{n,i1}, i1, i : TV_{n,i1} \leq \overline{TV}_{n,i}, \quad n = \overline{1, Nn}, \quad (3)$$

б) змінні $T_{l,n,i}$, кожна з яких приймає найменше значення -1 при такій сумарній масі $m_{l,n}$ усіх партій n -го типорозміру, що задаються у прокат на

протязі l кампаній валків, яка не більше, ніж розрахована згідно (3) маса $mvz(n)_i$:

$$T_{l,n,i} = \begin{cases} 1 \text{ при } mvz(n)_i > \sum_{l=1}^l m_{l,n} \\ -1 \text{ при } mvz(n)_i \leq \sum_{l=1}^l m_{l,n} \end{cases} = (mvz(n)_i - \sum_{l=1}^l m_{l,n}) / \left| mvz(n)_i - \sum_{l=1}^l m_{l,n} \right|,$$

$$l = \overline{1, Nl}, n = \overline{1, Nn}, i = \overline{1, Ni_n}, \quad (4)$$

б) змінні $T_{l,n,i}$, кожна з яких приймає найменше значення, якщо задовольняється обмеження на час виконання i -го замовлення n -го типорозміру:

$$T_{l,n,i} = \begin{cases} 1000 \times T_{l,n,i} \text{ при } TV_{n,i} \in [TK_{l,n}; TK_{l+1,n}] \\ 0 \text{ при } TV_{n,i} \notin [TK_{l,n}; TK_{l+1,n}] \end{cases}. \quad (5)$$

Тоді визначимо штрафну функцію TVZ , яка забезпечує виконання обмежень на час замовлення при мінімізації функціоналу (1), як суму усіх функцій $T_{l,n,i}$ згідно (6):

$$TVZ = \sum_{l=1}^{Nl} \sum_{n=1}^{Nn} \sum_{i=1}^{Ni_n} T_{l,n,i}. \quad (6)$$

Формалізована таким чином задача оптимального планування враховує технологічні обмеження та обмеження по часу виконання замовлень і передається як вихідна змінна $Y3$ до блоку чисельного розв'язання задачі.

4. Підсистема чисельного розв'язання задачі планування (блок 4, рис.1). При розв'язанні задачі планування здійснюється пошук глобального екстремуму на множині змінних, які приймають дискретні значення. Неможливість пошуку екстремуму градієнтними методами обумовлюється багатоекстремальністю цільового функціоналу, великою кількістю змінних і наявністю нелінійних обмежень. Тому пошук мінімуму виконується за допомогою генетичного алгоритму, що включає в себе метод штрафних функцій, засобами пакету «Матлаб-2012». Встановлюються опції алгоритму (задаються значення елітного номеру, кросоверної частки, розміру популяції, визначаються функція мутації і швидкість зміни середнього числа мутацій, критерій зупину алгоритму). Результати передаються до підсистем розрахунку виробничої програми та підсистеми формування замовлення мартенівському цеху як вихідна змінна $Y4$, що включає розраховані маси $m_{l,n}$ партій, послідовність їх направлення у прокат та типорозміри кратних слябів для кожної партії.

5. Підсистема розрахунку виробничої програми (блок 5, рис.1). На основі математичних моделей *PRAV5* прогнозу часу перетворення партій кратних слябів на технологічному обладнанні листопрокатного цеху формується виробнича програма *Y5* роботи листопрокатного цеху на плановий період, що містить в собі характеристики часу прокатки портфеля замовлень на окремих агрегатах та пристроях усього цеху. Розроблена виробнича програма направляє особі, що приймає рішення (ОПР), яка на основі її та технологічних норм проведення ремонтів прокатного стану визначає час проведення ремонтів у вигляді пар $RM_k = (RM1_k, RM2_k)$, $k = \overline{1, Nk}$, де $RM1_k$ – час початку ремонту стану, а $RM2_k$ – час завершення ремонту стану. Ці дані поступають до підсистеми коригування виробничої програми (блок 6, рис.1), де розраховують характеристики *Y6* програми прокатки та ремонтів прокатного стану.

6. Підсистема аналізу виробничої програми (блок 7, рис.1). Отримана виробнича програма вивчається ОПР, яка або приймає рішення *Y71* про направлення цієї програми до листопрокатного цеху для виконання, або змінює маси та типорозміри деяких партій і послідовність направлення їх у виробництво та передає інформацію *Y72* про таку зміну до підсистеми введення даних для поліваріантних розрахунків виробничої програми.

7. Підсистема введення даних для поліваріантних розрахунків виробничої програми (блок 8, рис.1). Для внесених ОПР типорозмірів та мас партій виконується перевірка технологічних обмежень і на підставі характеристик обчислюються значення змінних *Y8*, які необхідні для розрахунку виробничої програми. Змінні *Y8* направляються до блоку 5 в якості вхідних для розрахунку нової виробничої програми. Отримані поліваріантні розрахунки виробничої програми розглядаються користувачем, який аналізує їх, затверджує один з варіантів, і направляє його в листопрокатний цех для виконання.

8. Підсистема формування замовлень мартенівському цеху (блок 9, рис.1). На основі затвердженої ОПР виробничої програми розраховуються характеристики замовлення, до якого включаються маси і типорозміри мірних слябів кожної з партій, що задаються у виробництво для виконання замовлень і планований час поставки мартенівським цехом мірних слябів для кожної партії.

Висновки. Реалізоване на підставі вищеописаного алгоритму програмне забезпечення є інструментарієм прийняття рішень персоналом планово-виробничих служб при поліваріантності завданні виконання замовлень, представленим у вигляді АРМ планово-виробничих служб. Інструментарій дає керівництву підприємства можливість вибрати оптимальну стратегію виконання замовлень, що дозволить підвищити ефективність виробництва.

Список літератури: 1. Шаталов Р. Л. Автоматизация технологических процессов прокатки и термообработки металлов и сплавов / Р. Л. Шаталов, Т. А. Коынов, Н. Н. Литвинова. – М. : ЗАО «Металлургиядат», 2010. – 368 с. 2. Коновалов Ю. В. *Металлургия: учебное пособие в 3 кн.* К. 2. *Металловедение и основы термической обработки металлов. Теоретические основы обработки металлов давлением. Сортамент прокатной продукции. Производство заготовок, листопрокатное производство* / Ю. В. Коновалов, А. А. Минаев. – Донецк : ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – С. 352–488. 3. Гудвин Г. К. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребе, М. Э. Сальгадо. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с. 4. Таха, Хэмди А. Введение в исследование операций / Хэмди А. Таха. – М. : Вильямс, 2007. – 912 с. 5. Колпаков С. С. Проблемы разработки интегрированных АСУ листопрокатным производством: научное издание для студентов и аспирантов / С. С. Колпаков, С. Б. Кузнецова, В. К. Потемкин. – М. : ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 1997. – 27 с. 6. Лодон Дж. Управление информационными системами / Дж. Лодон, К. Лодон – СПб. : Питер, 2005. – 912 с. 7. Макленне Дж. Microsoft SQL Server 2008: Data Mining – интеллектуальный анализ данных: Пер. с англ. / Дж. Макленнен, Чж. Танг, Б. Криват. – СПб. : БХВ-Петербург, 2009. – 720 с. 8. Девятков Д. Х. Эвристическая оптимизационная модель для NP-полных задач разбиений с ограничениями, возникающими при оперативном планировании листопрокатного производства / Д. Х. Девятков, С. И. Файнштейн, А. Б. Беляевский, // Информационные технологии. – 2009. – № 9. – С. 16-20. 9. Криводубский О. А. Определение временных характеристик листопрокатного процесса / О. А. Криводубский, С. А. Косилов, А. В. Ильчишин // Научно-практические донецкого национального технического университета. – 2010. – № 11(164). – С. 172–180. 10. Криводубский О. А. Решение задачи оптимального планирования выполнения заказов на листопрокатном производстве / О. А. Криводубский, С. А. Косилов // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. темат. вып.: Системный анализ, управление и информационные технологии. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2013. – № 2(976). – С. 13–21.

Bibliography (transliterated): 1. Shatalov, R. L., T. A. Koynov and N. N. Lytvynova. *Avtomatyzatsyya tekhnolohycheskykh protsessov prokatky y termoobrabotky metallov y splyavov*. – Moscow: ZAO "Metallurhizdat", 2010. Print. 2. Konvalov, Yu. V. *Metallurhiya: uchebnoe posobyie. Metallovedeniye y osnovy termycheskoy obrabotky metallov. Teoreticheskiye osnovy obrabotky metallov davleniyem. Sortament prokatnoy produktsyyi. Proyzvodstvo zahotovok, lystoprokatnoe proyzvodstvo*. Vol. 2. Donetsk: HVUZ "DonNTU", 2012. 3 vols. Print. 3. Hudvyn, H. K., S. F. Hrebe and M. E. Sal'hado *Proektyrovanye system upravlenyya*. Moscow: BYNOM. Laboratoryya znanyy, 2004. Print. 4. Taha, Hjemdi A. *Vvedeniye v issledovaniye operacij*. Moscow: Vil'jams, 2007. Print. 5. Kolpakov, S. S., S. B. Kuznecova and V. K. Potemkin. *Problemy razrabotki integrirovannyh ASU listoprokatnym proyzvodstvom: nauchnoe izdanie dlja studentov i aspiratov*. Moscow: INTERMET INZhINIRING, 1997. Print. 6. Lodon, Dzh., and K. Lodon. *Upravleniye informacionnyimi sistemami*. SPb.: Piter, 2005. Print. 7. Maklennen, Dzh., et al. *Microsoft SQL Server 2008: Data Mining – intellektual'nyj analiz damnyh*. SPb.: BHV-Peterburg, 2009. Print. 8. Devjatov D. H., et al. "Jevristicheseskaja optimizacionnaja model' dlja NP-polnyh zadach razbieniij s ogranichenijami, voznikajushhimi pri operativnom planirovanii listoprokatnogo proyzvodstva." *Informacionnye tehnologii*. Moscow: "Novye tehnologii". No 9. 2009. 16-20. Print. 9. Krivodubskij, O. A., S. A. Kosilov and A. Il'chishin. "Opredeleniye vremennyh karakteristik listoprokatnogo processa." *Naukovi pratsi donets'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu*. No 11 (176). 2011. 172–180. Print. 10. Krivodubskij, O. A., and S. A. Kosilov. "Resheniye zadachi optimal'nogo planirovanija vypolnenija zakazov na listoprokatnom proyzvodstve." *Vestn. Har'k. politehn. in-ta. Ser.: Sistemnyj analiz, upravleniye i informacionnye tehnologii*. Har'kov : NTU "HPI". No 2 (976). 2013. 13–21. Print.

Надійшла (received) 17.12.2014