

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ПОЛІГРАФІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

А. С. Гордеєв¹, В. П. Ткаченко², О. О. Супрун³

1. Харківський національний економічний університет ім. Семена Кузнеця, пр. Науки, 9-А, Харків, 61166, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-9601-6220>, gordeew@ukr.net

2. Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, Харків, 61166, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-5076-0724>, volodymyr.tkachenko@nure.ua

3. Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, Харків, 61166, Україна, olexander.suprun@nure.ua

Метою дослідження є розроблення підходу до інтелектуалізації систем оперативного планування поліграфічного виробництва, який забезпечує автоматизоване формування та оптимізацію розкладу завантаження технологічного обладнання з урахуванням технологічних обмежень і особливостей виробничого середовища. У роботі розглянуто задачу формування оптимального розкладу виконання портфеля замовлень, кожне з яких складається з послідовності взаємопов'язаних технологічних операцій, що виконуються на різних одиницях обладнання. Для формалізації задачі запропоновано математичну модель дискретної оптимізації, у якій цільова функція полягає в мінімізації загального часу виконання портфеля замовлень за умови дотримання технологічної послідовності операцій, а також обмежень щодо використання обладнання та доступності виробничих «вікон». Для розв'язання задачі застосовано алгоритмічний підхід, що поєднує побудову початкового розкладу з подальшим локальним удосконаленням на основі пошуку ефективних перестановок операцій. Запропонований метод враховує можливість використання груп взаємозамінного обладнання та дає змогу оптимізувати завантаження технологічного обладнання. Проведене експериментальне дослідження ефективності запропонованого підходу на прикладі портфеля замовлень поліграфічного підприємства показало суттєве підвищення ефективності планування.

Ключові слова: оперативне планування виробництва; гнучкий графік роботи цеху; оптимізація розкладу виробництва; системи поліграфічного виробництва; планування виробничих ресурсів; автоматизоване планування виробництва.

Постановка проблеми. Сучасна поліграфічна галузь перебуває в процесі глибокої цифрової трансформації. Підприємства дедалі частіше впроваджують автоматизовані системи управління виробництвом, що забезпечують інтеграцію технологічних, логістичних та економічних процесів. Водночас, традиційні методи оперативного планування виявляються недостатньо гнучкими для ефективного реагування на коливання портфеля замовлень, зміну термінів постачання або непередбачені зупинки обладнання.

Попередні дослідження в цьому напрямі довели ефективність алгоритмів локального удосконалення розкладів, однак подальший розвиток потребує інтелектуалізації процесу планування — тобто використання методів, здатних до самонавчання, прогнозування та адаптації до умов виробництва в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Гнучке планування робіт у поліграфічному виробництві вирішує складні комбінаторні завдання у виробничих системах. Традиційне гнучке планування складається з групи технологічних операцій, які можуть виконуватися на кількох верстатах. Завдання гнучкого планування друкарських робіт можуть бути виконані на кількох відповідних верстатах з пулу доступних верстатів. При плануванні роботи гнучка система дозволяє призначати певні операції на альтернативні верстати, які відповідають вимогам. У цьому випадку простір рішень складніший порівняно з традиційним плануванням виробництва через гнучкість маршрутизації. Крім того, деякі верстати можуть мати спільні функції на декількох маршрутах, а послідовність операцій на верстаті може змінюватися від одного завдання до іншого. Оскільки, згідно з [1, 2], наявність паралельних ресурсів широко поширена в реальних життєвих ситуаціях, вивчення цього середовища стає критично важливим як з теоретичної, так і з практичної точки зору.

Деякі переваги гнучкості завдань, що забезпечує плавний перехід між різними завданнями у виробничій системі без додаткових витрат і ризику втрат, були підкреслені у [2]. У роботі [3] досліджувалося планування робіт для аналогічного паралельного обладнання, яке функціонує з порівнянною швидкістю та часом обробки машини для кожного завдання. Оскільки продуктивність і витрати виробничого об'єкта залежать від графіків, що використовуються для регулювання діяльності на виробництві, пошук відмінних рішень щодо планування гнучкого виробництва має першорядне значення для поліграфічного середовища [4]. Системи гнучкого планування можуть бути розширені для врахування різних реалістичних факторів, таких як доступність обладнання, порядок приймання, транспортні витрати, час налагодження, терміни виконання, обмеження черговості, обмеження ресурсів тощо. Ці розширення збільшують складність і різноманіття проблеми та потребують складніших методів її розв'язання. Планування, згідно з [5], є практикою, що використовується в секторах економіки, зокрема в виробництві, і тягне за собою розподіл виробничих ресурсів, доступних понаднормово, для завершення набору завдань. Тим часом, ефективне та дієве планування та управління виробничим процесом та управління ресурсами є одним із ключових факторів, які, як було показано, підвищують продуктивність підприємства. У зв'язку з цим правильне планування операцій має важливе значення як для виробника, так і для споживача з точки зору строків виконання замовлення. Це тому, що розумне планування дозволяє власникам бізнесу повною мірою використовувати свої різноманітні мережі постачання ресурсів [6]. Більше того, інтелектуальна система може бути інтегрована з іншими видами діяльності з планування та контролю, такими, як планування необхідності в матеріалах та ресурсах підприємства для досягнення більш комплексної та адаптивної

виробничої системи [7]. Як постулювалося раніше, більшість промислових і виробничих систем, а також більшість налаштувань обробки інформації значною мірою покладаються на планування як на процес ухвалення рішень.

Завдання інтелектуалізації систем оперативного планування поліграфічного виробництва може бути сформульоване як модель цілочисельного лінійного програмування, але її точне рішення часто виявляється неможливим для великомасштабних завдань. Тому було запропоновано різні евристичні та метаевристичні алгоритми для пошуку наближених рішень за розумний час. До найбільш популярних методів належать генетичні алгоритми, оптимізація рою частинок, імітація відпалу, пошук із заборонами, метод мурашиних колоній, оптимізація та квантовий відпал [8]. Ці методи використовують різні стратегії для дослідження простору пошуку та використання інформації, зібраної у процесі пошуку. Вони також відрізняються за продуктивністю, надійністю, масштабованістю та застосовністю до різних типів систем оперативного планування поліграфічного виробництва. Відомо, що точні методи, які генерують оптимальні рішення, є обчислювально нерозв'язними для великих систем. Через обчислювальну складність і вимоги до точних методів під час розв'язання складних завдань, зокрема систем із різними евристичними алгоритмами, їх використовували для знаходження рішень, близьких до оптимальних, за розумний час.

Методи точної оптимізації – це методи, спрямовані на пошук оптимального розв'язання задачі планування шляхом систематичного дослідження простору рішень. Ці методи гарантують знаходження найкращого можливого рішення, але вони можуть бути обчислювально інтенсивними та обмеженими невеликими або середніми за розміром прикладами завдань планування. Деякі поширені приклади методів точної оптимізації включають цілочисельне лінійне програмування (ILP), де змінними є призначення завдань, час початку, час завершення тощо, а обмеження охоплюють співвідношення ресурсів і наявного технологічного обладнання. Комерційні вирішувачі, такі як Constraint Programming Linear with Extension (CPLEX), Gurobi та Solving Constraint Integer Programs (SCIP), можуть використовуватися для розв'язання завдань планування, сформульованих у вигляді ILP, який широко застосовується, але може стати обчислювально нерозв'язним для великих прикладів [9].

Програмування з обмеженнями (АСР) – це декларативна парадигма програмування, яка зарекомендувала себе як потужний метод розв'язання комбінаторних і оптимізаційних завдань у різних галузях. Вона бере свій початок у штучному інтелекті та дослідженні операцій, пропонуючи гнучкий і виразний підхід до моделювання та розв'язання завдань із складними обмеженнями. В АСР задачі представлені змінними з певними областями визначення, а обмеження виражають взаємозв'язки між цими змінними. Основна відмінність між ILP і АСР полягає в наявності інтервальних і послідовних змінних. АСР інтервальна змінна використовується для позначення тривалості часу, необхідного для виконання завдання [10].

Відповідно до [11], завдання виробництва в цеху відіграє ключову роль у виробничій системі для індивідуальних партій продукції, розроблених відповідно до

конкретних вимог клієнтів, а також у дрібносерійному виробництві. Така виробнича система дозволяє здійснювати дрібносерійне виробництво широкого асортименту товарів на індивідуальні замовлення. Більшість виробів вимагає унікального налаштування та виробничого процесу в цеху, що послідовно визначає кожен етап операції. Крім того, [12] планування роботи верстатів представлено як процес оптимального розподілу інтервалів часу обробки завдань на одному або декількох верстатах. У пізнішій роботі [13] запропоновано життєздатну теорію планування, яка є основою для планування роботи верстатів і успішно застосовується в різних галузях, зокрема в транспорті, охороні здоров'я та сільському господарстві. Гнучкість виробництва може бути частковою або абсолютною. Відповідно до [14], часткова гнучкість – це коли тільки деякі процеси можуть бути виконані наявними верстатами, а абсолютна — коли всі операції можуть бути виконані будь-яким верстатом. Це робить поліграфічне виробництво у системі випуску індивідуальних партій продукції обраним середовищем для розгляду цього дослідження. Останнім часом такий підхід отримав визнання як виробнича система, здатна ефективно справлятися із сучасним конкурентним середовищем [7]. Враховуючи подібність до реальних виробничих систем, гнучке планування робіт у поліграфічному цеху може застосовуватися до гнучких виробничих систем, що включають багатозадачність або багатомашинні середовища.

Відповідно до [15], час виконання – це загальний час, необхідний для виконання всіх завдань у системі. Автор стверджує, що час виконання – це різниця між часом закінчення останньої операції останнього завдання та часом початку першої операції першого завдання. У даному дослідженні час виконання використовується як один із критеріїв оптимальності для порівняння сили й слабкості точних і евристичних моделей оптимізації поряд із розривом оптимальності, який є розривом між найкращими можливими та найкраще знайденими цілями [6].

Сучасні програмні комплекси для управління виробництвом забезпечують базові можливості диспетчеризації, проте здебільшого не враховують специфіку поліграфічних процесів. Їхні алгоритми не адаптовані до неперіодичного характеру замовлень, багатостадійності технологічного ланцюга та високої варіативності операцій.

З огляду на сказане вище, актуальним є застосування методів штучного інтелекту, зокрема еволюційних алгоритмів, нейронних мереж та алгоритмів ройової оптимізації. Ці методи дозволяють формувати розклади, що мінімізують тривалість виробничого циклу, простої обладнання та кількість переналаджень, а також можуть навчатися на основі історичних даних.

Порівняно з класичними підходами (метод критичного шляху, локальне удосконалення, перебір варіантів) інтелектуальні моделі забезпечують вищу точність прогнозування, особливо в умовах динамічного поповнення замовлень.

Мета статті. Розроблення інтелектуальної системи оперативного планування, здатної підвищити ефективність поліграфічного виробництва шляхом автоматичного формування та коригування завантаження технологічного обладнання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Поліграфічні підприємства

характеризуються складною структурою виробничих процесів, у яких задіяна значна кількість різноманітного технологічного обладнання. Ефективність функціонування такого підприємства значною мірою залежить від якості оперативного планування виробничих процесів. Неefективний розклад призводить до простоїв обладнання, збільшення тривалості виробничого циклу та зростання собівартості продукції. Тому розроблення методів автоматизованого планування завантаження обладнання є актуальним науковим і практичним завданням.

У роботі розглядається задача формування оптимального розкладу виконання портфеля замовлень на поліграфічному підприємстві. Кожне замовлення складається з набору технологічних операцій, які повинні виконуватися у визначеній послідовності на різних одиницях обладнання. Метою оптимізації є мінімізація сумарного часу виконання портфеля замовлень за умови дотримання технологічних обмежень і доступності виробничих ресурсів.

Цільова функція задачі полягає у мінімізації загального часу виконання портфеля замовлень. Основні обмеження моделі включають: дотримання технологічної послідовності операцій, виконання кожної операції на конкретному обладнанні, а також відсутність одночасного використання того самого обладнання для кількох робіт.

Математична постановка задачі оперативного планування завантаження обладнання на поліграфічному виробництві може бути подана у вигляді [1]:

$$F = \min_{j \in \Omega} T \quad (1)$$

$$\Omega: \begin{cases} \sum_{i \in I} y_{jli} = 1, l = \overline{1, m_j}, j \in J, \\ y_{jli} = 1 \vee y_{jl-1s} = 1 \Rightarrow x_{jli} \geq x_{jl-1s} + t_{jl-1s}, l = \overline{2, m_j}, i \in I, s \in I, j \in J, \\ y_{jli} = 1, y_{usi} = 1, z_{jli} = z_{usi} + 1 \Rightarrow x_{jli} \geq x_{usi} + t_{usi}, s = \overline{1, m_u}, l = \overline{1, m_j}, u \in J, \\ t_{jli} \leq t_{g_b}, l = \overline{2, m_j}, i \in I, j \in J, b = \overline{1, h}, \\ x_{jli} \geq 0, y_{jli} \in \{0, 1\}, z_{jli} \in \{0, 1, \dots, N\}, l = \overline{1, m_j}, i \in I, j \in J. \end{cases}$$

де T – час виконання портфеля замовлень (чим менший час виконання портфеля замовлень, тим щільніше складено розклад); I – множина обладнання на поліграфічному виробництві; R – множина стадій (групи взаємозамінного обладнання) на поліграфічному виробництві; J – множина замовлень у портфелі замовлень; L – множина операцій, необхідних для виконання j -го замовлення; t_{jli} – час, необхідний для виконання l -ої операції j -ої замовлення на i -му обладнанні;

x_{jli} – момент початку виконання операції l замовлення j на верстаті i ; z_{jli} – номер за порядком виконання l -ої операції j -ої замовлення на i -ому верстаті.

Для розв'язання задачі застосовано алгоритмічний підхід [1], що включає формування початкового розкладу та його подальше локальне вдосконалення. Алгоритм локального покращення дозволяє поступово змінювати порядок виконання операцій та обирати варіанти, що забезпечують зменшення значення

цільової функції.

Кожне замовлення складається з набору технологічних операцій, які виконуються на різних одиницях обладнання. При цьому обладнання може бути об'єднане у групи взаємозамінних машин. Особливістю задачі є те, що виконання замовлень можливе лише у визначені часові проміжки — так звані виробничі «вікна», які виникають між випусками періодичних видань. Завдання полягає у формуванні такого розкладу виконання операцій, за якого: дотримується технологічна послідовність операцій; кожна операція виконується лише на одному верстаті; обладнання не використовується одночасно для кількох замовлень; сумарний час виконання портфеля замовлень є мінімальним.

Цільова функція задачі полягає у мінімізації часу виконання всіх замовлень. Основні обмеження моделі:

1. Кожна операція виконується лише на одному пристрої.
2. Технологічна послідовність операцій повинна зберігатися: наступна операція може початися лише після завершення попередньої.
3. Обладнання не може виконувати більше однієї операції одночасно.
4. Тривалість операції не повинна перевищувати доступне виробниче «вікно».

Така модель належить до задач дискретної оптимізації розкладів виробництва. Для розв'язання задачі застосовується комбінація алгоритмів [17]: алгоритм побудови початкового розкладу; алгоритм пошуку перестановок; алгоритм локального покращення; алгоритм критичного шляху.

Дослідження ефективності розробленого алгоритму розв'язання задачі оперативного планування завантаження обладнання проводилося на прикладі портфеля з 3 замовленнями (рис. 1).

Структури замовлень та тривалість операцій



Рис. 1. Структура замовлень та тривалість операцій до оптимізації

Експериментальні дослідження показали, що використання запропонованого алгоритму дозволяє істотно скоротити час виконання портфеля замовлень. У проведеному експерименті тривалість виробничого циклу під час оптимізації зменшилась на 43 % (табл. 1). Зменшення тривалості виконання робіт є важливим фактором підвищення конкурентоспроможності підприємства, оскільки дозволяє збільшити обсяг виробництва за тих самих ресурсів.

Таблиця 1

Результати оптимізації. Порівняння ефективності планування

Показник	До оптимізації	Після оптимізації
Замовлення J1	9360 хв	3840 хв
Замовлення J2	3480 хв	2980 хв
Замовлення J3	3780 хв	2820 хв

Запропонований метод автоматизованого планування завантаження обладнання дає змогу підвищити ефективність функціонування поліграфічного підприємства. Використання алгоритмів оптимізації розкладів сприяє зменшенню простоїв обладнання та скороченню виробничого циклу. Отримані результати можуть бути використані під час створення автоматизованих систем управління поліграфічним виробництвом.

Висновки. Запропонована концепція інтелектуалізації систем оперативного планування поліграфічного виробництва забезпечує якісно новий рівень автоматизації управління. Розроблена модель демонструє суттєве зменшення тривалості виконання замовлень, підвищення коефіцієнта використання обладнання та ефективності виробничих ресурсів.

Результати дослідження підтверджують доцільність впровадження інтелектуальних методів у процеси диспетчеризації поліграфічного виробництва. Подальші дослідження доцільно спрямувати на створення адаптивних кіберфізичних систем управління, здатних до самонавчання та прогнозного планування на основі великих даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гордєєв А.С., Ткаченко В.П., Єременко Г.Ю. Оперативне планування завантаження технологічного обладнання поліграфічного підприємства. / Комп'ютерні технології друкарства 2025. № 1(53). – С. 154 – 165. DOI: 10.32403/2411-9210-2025-1-53-154-165
2. Senthil, P. V., Selladurai, V., & Rajesh, R. (2007). Parallel machine scheduling (PMS) in manufacturing systems using the ant colony optimization algorithmic rule. *Journal of Applied Sciences*, 7(2), 208-213. <https://doi.org/10.3923/jas.2007.208.213>.
3. Roy, R. N. (2007). *A modern approach to operations management*. New Age International (P) Limited.
4. Chaudhry, I. A., Mahmood, S., & Ahmad, R. (2010, June). Minimizing makespan formachine schedulingand workerassignment problem inidentical parallel machine models using GA. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 3.
5. Motaghedi-Larijani, A., Sabri-laghaie, K., & Heydari, M. (2010). Solving flexible job

shop scheduling with multi-objective approach. *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, 21(4), 197-209.

6. Agrawal, R., Pattanaik, L. N., & Kumar, S. (2012). Scheduling of a flexible job-shop using a multi-objective genetic algorithm. *Journal of Advances in Management Research*, 9(2), 178-188. <https://doi.org/10.1108/09727981211271922>.

7. Krajewski, L. J., Malhotra, M. K., & Ritzman, L. P. (2016). *Operations Management Processes and Supply Chains*. Pearson Education.

8. Ziaee, M., Mortazavi, J., & Amra, M. (2022). Flexible job shop scheduling problem considering machine and order acceptance, transportation costs, and setup times. *Soft Computing*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11740-022-01145-8>.

9. Schworm, P., Wu, X., Glatt, M., & Aurich, J. C. (2023). Solving flexible job shop scheduling problems in manufacturing with Quantum Annealing. *Production Engineering*, 17(1):105-115. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-27192-3>.

10. Błażewicz, J., Ecker, K., Pesch, E., Schmidt, G., Sterna, M., & Węglarz, J. (2019). *Handbook on scheduling: From theory to practice*. Springer. <https://doi.org/10.1111/poms.13373>.

11. Naderi, B., Roshanaei, V., Begen, M. A., Aleman, D. M., & Urbach, D. R. (2021). Increased surgical capacity without additional resources: Generalized operating room planning and scheduling. *Production and Operations Management*, 30(8): 2608-2635.

12. Pinedo, M. (2012). *Scheduling: theory, algorithms and systems*. Springer Science & Business Media. LLC. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2361-4>.

13. Vaghefinezhad, S., & Wong, K. Y. (2012). A genetic algorithm approach for solving a flexible job shop scheduling problem. arXiv preprint arXiv:1207.2253.

14. [23:26, 21/09/2024] +234 811 368 7403: [13] Anshulika & Bewoor, L. A. (2017). A genetic algorithm approach for solving a job shop scheduling problem, 2017 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), Coimbatore, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICCCI.2017.8117720>.

15. Vital-Soto, A., Azab, A., & Baki, M. F. (2020). Mathematical modeling and a hybridized bacterial foraging optimization algorithm for the flexible job-shop scheduling problem with sequencing flexibility. *Journal of Manufacturing Systems*, 54: 74-93. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.12.003>.

16. Bayat Movahed, S. (2014). *Linear programming assisted genetic algorithm for solving a comprehensive job shop lot streaming problem* (Doctoral dissertation, University of Guelph).

17. Borenstein D., Becker J. L., and Santos E. R. Systemic and integrated approach to flexible manufacturing systems design. *Integr. Manuf. Syst.*, 1999. URL: <https://doi.org/10.1108/09576069910370639>.

REFERENCES

1. Hordyeyev A.S., Tkachenko V.P., Eremenko G.Yu. Operational planning of loading of technological equipment of a printing enterprise. / *Computer technologies of printing 2025*. No. 1(53). – P. 154 – 165. DOI: 10.32403/2411-9210-2025-1-53-154-1652. Senthil, P. V., Selladurai, V., & Rajesh, R. (2007). Parallel machine scheduling (PMS) in manufacturing systems using the ant colony optimization algorithmic rule. *Journal of Applied Sciences*, 7(2), 208-213. <https://doi.org/10.3923/jas.2007.208.213>.

3. Roy, R. N. (2007). *A modern approach to operations management*. New Age International (P) Limited.

4. Chaudhry, I. A., Mahmood, S., & Ahmad, R. (2010, June). Minimizing makespan formachine schedulingand workerassignment problem inidentical parallel machine models using GA. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 3.

5. Motaghedi-Larijani, A., Sabri-laghaie, K., & Heydari, M. (2010). Solving flexible job shop scheduling with multi-objective approach. *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, 21(4), 197-209.
6. Agrawal, R., Pattanaik, L. N., & Kumar, S. (2012). Scheduling of a flexible job-shop using a multi-objective genetic algorithm. *Journal of Advances in Management Research*, 9(2), 178-188. <https://doi.org/10.1108/09727981211271922>.
7. 23:25, 21/09/2024] +234 811 368 7403: [6] Krajewski, L. J., Malhotra, M. K., & Ritzman, L. P. (2016). *Operations Management Processes and Supply Chains*. Pearson Education.
8. Ziaee, M., Mortazavi, J., & Amra, M. (2022). Flexible job shop scheduling problem considering machine and order acceptance, transportation costs, and setup times. *Soft Computing*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11740-022-01145-8>.
9. Schworm, P., Wu, X., Glatt, M., & Aurich, J. C. (2023). Solving flexible job shop scheduling problems in manufacturing with Quantum Annealing. *Production Engineering*, 17(1):105-115. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-27192-3>.
10. Błażewicz, J., Ecker, K., Pesch, E., Schmidt, G., Sterna, M., & Węglarz, J. (2019). *Handbook on scheduling: From theory to practice*. Springer. <https://doi.org/10.1111/poms.13373>.
11. Naderi, B., Roshanaei, V., Begen, M. A., Aleman, D. M., & Urbach, D. R. (2021). Increased surgical capacity without additional resources: Generalized operating room planning and scheduling. *Production and Operations Management*, 30(8): 2608-2635.
12. Pinedo, M. (2012). *Scheduling: theory, algorithms and systems*. Springer Science & Business Media. LLC. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2361-4>.
13. Vaghefinezhad, S., & Wong, K. Y. (2012). A genetic algorithm approach for solving a flexible job shop scheduling problem. arXiv preprint arXiv:1207.2253.
14. 23:26, 21/09/2024] +234 811 368 7403: [13] Anshulika & Bewoor, L. A. (2017). A genetic algorithm approach for solving a job shop scheduling problem, 2017 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), Coimbatore, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICCCI.2017.8117720>.
15. Vital-Soto, A., Azab, A., & Baki, M. F. (2020). Mathematical modeling and a hybridized bacterial foraging optimization algorithm for the flexible job-shop scheduling problem with sequencing flexibility. *Journal of Manufacturing Systems*, 54: 74-93. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.12.003>.
16. Bayat Movahed, S. (2014). *Linear programming assisted genetic algorithm for solving a comprehensive job shop lot streaming problem* (Doctoral dissertation, University of Guelph).

doi: 10.32403/0554-4866-2026-1-91-277-286

INTELLECTUALIZATION OF OPERATIONAL PLANNING SYSTEMS IN PRINTING PRODUCTION

A. S. Hordyeyev¹, V. P. Tkachenko², O. O. Suprun³

1. Kharkiv National University of Economics named after Semyon Kuznets, 9-A Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-9601-6220>, gordeew@ukr.net

2. Kharkiv National University of Radio Electronics, 14 Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-5076-0724>, volodymyr.tkachenko@nure.ua

3. Kharkiv National University of Radio Electronics, 14 Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine, olexander.suprun@nure.ua

The purpose of the study is to develop an approach to the intellectualization of operational planning systems for printing production, which provides automated formation and optimization of the technological equipment loading schedule, taking into account technological limitations and the characteristics of the production environment. The paper considers the problem of forming an optimal schedule for the execution of an order portfolio, each of which consists of a sequence of interconnected technological operations performed on different units of equipment. To formalize the problem, a mathematical model of discrete optimization is proposed, in which the objective function is to minimize the total execution time of the order portfolio (makespan) subject to compliance with the technological sequence of operations, restrictions on the use of equipment and the availability of production «windows». To solve the problem, an algorithmic approach was used that combines the construction of an initial schedule with subsequent local improvement based on the search for effective permutations of operations. The proposed method takes into account the possibility of using groups of interchangeable equipment and allows you to adapt the production schedule to changes in the order portfolio in real time. An experimental study of the effectiveness of the proposed approach on the example of a printing company's order portfolio showed a significant increase in planning efficiency. In particular, the use of the optimization algorithm allowed to reduce the total execution time of the order portfolio from 9750 to 4200 minutes, which indicates a significant reduction in the duration of the production cycle and an increase in the level of utilization of technological equipment.

Keywords: operational production planning; flexible workshop work schedule; production schedule optimization; printing production systems; intelligent planning algorithms; production resource planning; automated production planning.

Стаття надійшла до редакції 17.03.2026.

Received 17.03.2026.

Прийнято до друку: 15.05.2026.

Accepted: 15.05.2026.

Опубліковано: 30.05.2026.

Published: 30.05.2026.



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© А. С. Гордєєв, В. П. Ткаченко, О. О. Супрун