

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВИРОБНИЧИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ДРУКАРНІ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ШІ

Король А.Л.

аспірант, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0009-0006-5774-8142

***Анотація.** Робота присвячена розробці методології інтелектуальної системи прийняття рішень для календарного планування поліграфічного виробництва або ШІ радника. Запропоновано гібридний підхід, що поєднує глибоке навчання з підкріпленням як консультативний модуль із класичними методами верифікації розкладів. Експериментальне тестування на реальних технологічних картах замовлень довело скорочення простоїв обладнання та робітників.*

***Ключові слова:** календарне планування друкарні, радник на базі ШІ, задача гнучкого цеху (FJSSP), оптимізація переналагоджень обладнання, глибоке навчання з підкріпленням (DRL), математична верифікація розкладів, управління виробництвом.*

Вступ

Сучасна поліграфічна галузь функціонує в умовах високої динамічності замовлень, жорстких дедлайнів та багатостадійних технологічних ланцюжків. Традиційне планування, що базується на емпіричних правилах диспетчерів або статичних таблицях, не здатне швидко враховувати різноманітні параметри. Це призводить до нерівномірного завантаження обладнання, збільшення відходів матеріалів та порушення графіків відвантаження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу до адаптивних систем, здатних аналізувати історичні та оперативні дані в реальному часі. Впровадження штучного інтелекту в роль експертного радника дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, раціоналізувати черги на постдрукарську обробку та забезпечити прозору логіку прийняття рішень.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка та наукове обґрунтування методології підвищення ефективності використання виробничих потужностей друкарні через інтеграцію штучного інтелекту в систему календарного планування як консультативного інструменту диспетчера.

Задачі дослідження:

– проаналізувати технологічні цикли реальних поліграфічних замовлень як об'єкт автоматизованого багатокрокового планування;

- виконати порівняльний аналіз існуючих математичних та евристичних методів вирішення задач складання розкладів (FJSSP);
- дослідити архітектури нейромережових моделей та обрати оптимальну для ролі «інтелектуального радника»;
- розробити гібридну схему взаємодії, де ШІ генерує варіанти послідовностей, а класичні алгоритми верифікують їх на фізичну реалізацію;
- провести обчислювальний експеримент на основі реальних технологічних карт замовлень для оцінки впливу системи на завантаження обладнання;
- формалізувати цільові функції, що враховують переналагодження, терміновість та собівартість обробки;
- оцінити економічний ефект від скорочення холостих пробігів машин та мінімізації часу міжопераційних переходів.

Основна частина

1 Постановка задач дослідження

Поліграфічне виробництво є класичним прикладом дискретної системи з гнучкими маршрутами обробки. Для формалізації задачі використаємо реальні замовлення:

- J_1 – «Прописи» (тираж 12 000);
- J_2 – «Забавні тварини» (3 000 екз.);
- J_3 – «Рекламний буклет» (2 500 екз.).

Кожне замовлення J_i являє собою впорядковану множину технологічних операцій $O_{i,j}$, що виконуються на множині обладнання M_k :

- одноножові різальні машини (Wohlenberg 112);
- листові офсетні машини (MAN Roland R304/R202, Adast Dominant 826 AP);
- ламінатори (FMY-ZS800), тигельні преси (ML750), листопідбірники (tb sprint 303 QSM).

Цільова функція мінімізації загального часу виконання (Makespan) з урахуванням штрафів за затримку та витрат на переналагодження:

$$F = \alpha \cdot C_{\max} + \beta \cdot \sum_{i=1}^n \max(0, C_i - D_i) + \gamma \cdot \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^p S_{k,j}, \quad (1)$$

де C_i – час завершення замовлення i ;

D_i – дедлайн;

$S_{k,j}$ – час підготовки машини k до операції j .

Коефіцієнти α, β, γ визначаються технологом залежно від пріоритетності замовлення. Обмеження включають послідовність операцій (наприклад, формовка → друк → ламінація/порізка → біговка → збірка), пропускну здатність обладнання та неперервність технологічних циклів.

2 Розгляд та вибір існуючих моделей та методів

Для базового порівняння ефективності ШІ-радника розглянуто чотири класичні підходи.

1. Правила пріоритетної диспетчеризації (Priority Dispatching Rules): EDD (Earliest Due Date) та SPT (Shortest Processing Time). Перевага: миттєвий розрахунок. Недолік: ігнорують матрицю сумісності фарб/паперу, що призводить до частих промивок апаратів (наприклад, перехід з 5+1 на 1+1 на MAN Roland R304 вимагає ~25% більше часу на налаштування).

2. Метод гілок і меж (Branch & Bound): гарантує глобальний оптимум. Однак обчислювальна складність зростає експоненційно ($O(n!)$), що робить метод непридатним для оперативного перепланування при надходженні нових тиражів.

3. Генетичні алгоритми (GA): ефективні для пошуку субоптимальних розкладів у великих просторах рішень. Вимагають ретельного налаштування операторів кросовера та мутації, інакше швидко збігаються до локальних мінімумів.

4. Метод імітації відпалу (Simulated Annealing, SA): обрано як основний інструмент верифікації. Ймовірність прийняття гіршого рішення:

$$P = \exp(-\Delta F / T) \quad (2)$$

дозволяє системі «виходити» з вузьких місць планування, перевіряючи поради ШІ на стійкість до збурень.

3 Підвищення ефективності використання виробничих потужностей друкарні

Аналіз технологічних карт показує, що до 30% робочого часу витрачається на непродуктивні операції: формовку паперу, налаштування фарбових апаратів, зміну штампів для контурної висічки. Наприклад, для замовлення «Забавні тварини» порізка після друку (Wohlenberg 112) займає 60 хв, а після підсічки самоклейки – ще 30 хв. ШІ-радник оптимізує потік шляхом групування замовлень за схожими параметрами:

– форматна сумісність: об'єднання тиражів з однаковим обрізним форматом (наприклад, 210×210 мм для розфарбування та 200×200 мм після висічки) дозволяє зменшити кількість переналаштувань різальної машини;

– кольорова логіка: послідовність друку 1+1 → 4+0 → 4+4 → 5+1 мінімізує кількість промивок секцій на MAN Roland R304;

– паралельне завантаження: поки Adast Dominant 826 AP друкує буклет (1+1, 60 хв), Wohlenberg 112 може виконувати формовку картону для обкладинок прописей. ШІ генерує графік, що заповнює «вікна» простою без порушення технологічної послідовності.

4 Розгляд та вибір існуючих моделей III

Для ролі радника проаналізовано три архітектури:

- рекурентні мережі (LSTM/GRU): добре передбачають часові ряди, але неефективні для паралельного розподілу завдань між гетерогенним обладнанням;
- графові нейронні мережі (GNN): ідеально відображають топологію техпроцесу, але вимагають великих розмічених датасетів;
- глибоке навчання з підкріпленням (Deep Q-Network, DQN): обрано як оптимальне. Агент взаємодіє з середовищем друкарні;
- стан S_t : вектор завантаженості кожної машини, черга замовлень, матриця сумісності матеріалів, поточний час;
- дія A_t : призначення конкретного замовлення J_i на машину M_k у момент t ;
- винагорода R_t :

$$R_t = -(\Delta C_{\max} + \lambda \cdot S_{\text{setup}} + \mu \cdot l(\text{delay})), \quad (3)$$

де λ, μ – вагові коефіцієнти.

7. Стратегія вибору: ϵ -greedy з Softmax-нормуванням для видачі диспетчеру топ-3 варіантів з ймовірностями успіху:

$$P(a | s) = \frac{\exp(Q(s, a) / \tau)}{\sum_b \exp(Q(s, b) / \tau)}. \quad (4)$$

5 Інтеграція звичайних моделей та методів та обраної моделі III

Запропоновано гібридну архітектуру «Human-in-the-Loop».

1. Генерація: DQN-агент пропонує три послідовності виконання операцій з оцінкою ризиків.

2. Верифікація: алгоритм імітації відпалу перевіряє план на відсутність конфліктів ресурсів та відповідність технологічним картам. Якщо III пропонує виконати ламінацію обкладинки прописей до завершення друку блоку, верифікатор коригує логіку, використовуючи метод критичного шляху (CPM) для визначення допустимих паралелізмів.

3. Інтерфейс: диспетчер бачить діаграму Ганта, де кольором виділено зони високого навантаження, та пояснення III (ХАІ): «Рекомендую змінити порядок №2 та №3. Це зменшить час промивки R304 на 18% завдяки переходу з 4+4 на 1+1 без повної мийки».

4. Математичний контроль: умова допустимості:

$$C_{\text{start}}(O_{i,j+1}) \geq C_{\text{end}}(O_{i,j}) + S_{j \rightarrow j+1} \quad (5)$$

перевіряється автоматично. При порушенні запускається локальний пошук для зсуву черги без зміни глобальної структури плану.

6 Експериментальна частина

1. Дослідження ефективності ШІ-радника.

Мета експерименту: емпірична перевірка гіпотези про те, що інтеграція ШІ-радника в систему календарного планування друкарні дозволяє зменшити загальний час виконання замовлень (Makespan) та скоротити простой обладнання за рахунок оптимізації послідовності переналагоджень.

2. Експериментальна вибірка.

Для дослідження використано три реальні замовлення з повними технологічними картами (табл. 1).

Таблиця 1 – Замовлення

Параметр	Замовлення №1 «Прописи»	Замовлення №2 «Забавні тварини»	Замовлення №3 «Рекламний буклет»
Тираж, екз.	12 000	3 000	2 500
Формат обрізний, мм	165×200	200×200	105×148
Обкладинка: папір/фарби	цел. картон 215 г/м ² , 4+0	цел. картон 230 г/м ² , 5+1	мел. глянець 90 г/м ² , 4+0
Блок: папір/фарби	офсет 80 г/м ² , 4+4, 32 с.	офсет 120 г/м ² , 2+2 + самоклеїтка 4+0	офсет 60 г/м ² , 1+1
Дод. операції	ламінація, біговка, скоба	ламінація, біговка, підсічка, контурна висічка, скоба	скоба
Кількість операцій	9	22	11
Залучене обладнання	W112, R304, FMY, ML750, tbQSM	W112, R304, R202, FMY, ML750, tbQSM	W112, Adast826, tbQSM

Позначення обладнання:

- W112 = Wohlenberg 112 (різальна);
- R304/R202 = MAN Roland (офсет);
- Adast826 = Adast Dominant 826 AP;
- FMY = FMY-ZS800 (ламінатор);
- ML750 = тигельний пресс;
- tbQSM = tb sprint 303 QSM (листопідбірник).

3. Матриця часу переналагоджень (Setup Time Matrix).

Ключовий фактор оптимізації – час підготовки обладнання між різними типами замовлень. На основі аналізу техкарт сформовано матрицю $S_k(i \rightarrow j)$ для друкарських машин (табл. 2).

Таблиця 2 – Матриця часу переналагодження для MAN Roland R304 (хв)

З\На	1+1	2+2	4+0	4+4	5+1	Ламінація
1+1	0	15	20	25	35	10
2+2	15	0	18	22	30	12
4+0	20	18	0	12	25	8
4+4	25	22	12	0	20	10
5+1	35	30	25	20	0	15
Ламінація	10	12	8	10	15	0

4. Архітектура експериментальної системи.

Експериментальна система реалізована за модульною гібридною архітектурою «AI + Verification + Human-in-the-Loop», що забезпечує поєднання швидкості генерації планів штучним інтелектом із гарантіями фізичної реалізованості, які надають класичні методи оптимізації.

Опис архітектури схеми.

Нижче наведено детальний опис кожного модуля та взаємодії між ними.

Рівень 1. Вхідні дані (Input Layer). (рис. 1)



Рисунок 1 – Рівень вхідних даних (Input Layer)

Опис компонентів вхідного рівня.

1. Технологічні карти замовлень – основне джерело інформації про виробничі завдання. Дані замовлення та технологічна карта на замовлення. Кожна карта містить:

- ідентифікатор замовлення та тип продукції;
- специфікацію матеріалів (наприклад, «целлюлозний картон 230гр 640×900»);
- послідовність операцій з прив'язкою до обладнання;
- нормативи часу виконання (базовий час + приладка);
- параметри упаковки та відвантаження.

2. Стан обладнання – динамічний блок даних, що оновлюється в реальному часі через інтеграцію з ERP-системою друкарні. Включає:

- поточний статус кожної одиниці обладнання (вільна/зайнята/на обслуговуванні);
- планові зупинки для технічного обслуговування;
- історичні метрики надійності (Mean Time Between Failures, Mean Time To Repair).

3. Черга замовлень – оперативний список завдань, що надходять у виробництво. Кожне замовлення має:

- унікальний ідентифікатор та тип продукції;
- пріоритет виконання (визначається менеджером з продажу);
- дедлайн (термін готовності до відвантаження);
- специфічні вимоги клієнта (напр., «відвантаження партіями по 500 шт.»).

4. Матриця переналагоджень – критично важливий довідник для оптимізації послідовності виконання. Визначає час підготовки обладнання при переході між різними типами замовлень:

- для друкарських машин: час мийки фарбових апаратів при зміні красочності;
- для різальних машин: час переналаштування формату та глибини різу;
- для постдрукарського обладнання: час заміни штамтів, бігувальних ножів.

Рівень 2. Модуль ШІ-радника (DQN-Agent Core) (рис. 2).

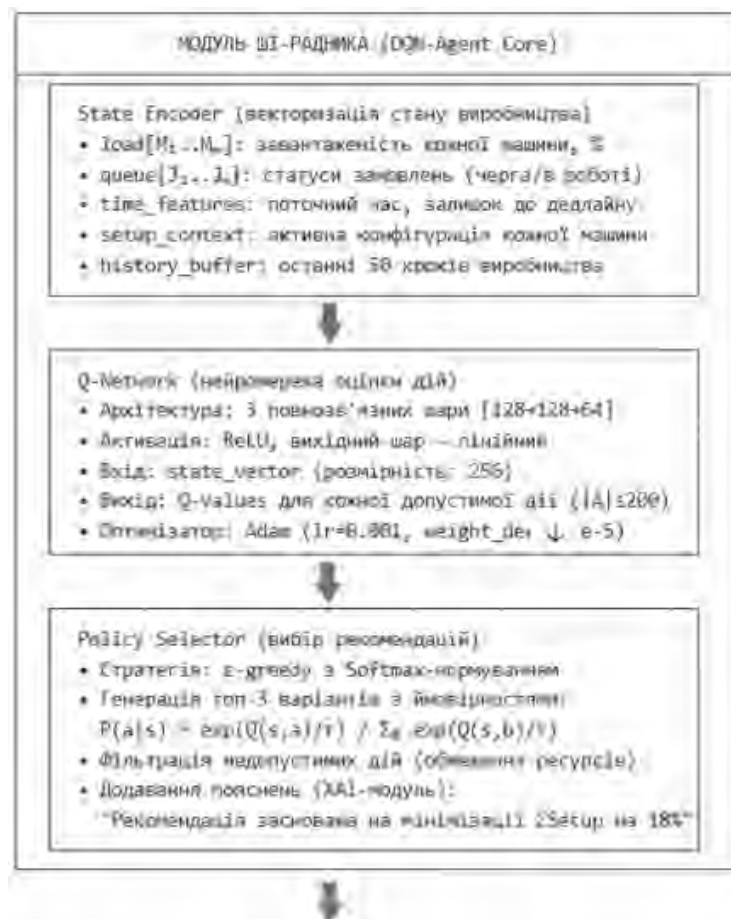


Рисунок 2 – Рівень ШІ-радника

Опис компонентів модуля ШІ-радника.

1. State Encoder – модуль перетворення різноманітних вхідних даних у єдиний числовий вектор стану, придатний для обробки нейромережею:

- завантаженість обладнання: нормалізовані значення (0.0-1.0) для кожної машини, що відображають частку часу, протягом якого машина зайнята виконанням операцій;

- статуси замовлень: one-hot кодування станів (очікування/в роботі/завершено/затримано);
- часові ознаки: поточний час зміни, залишок часу до дедлайну кожного замовлення, сезонні фактори;
- контекст переналагоджень: поточна конфігурація кожної машини (наприклад, «встановлено фарби СМΥΚ+Pantone 871»);
- історичний буфер: послідовність останніх 50 дій системи для врахування тимчасових залежностей.

2. Q-Network – ядро системи, нейронна мережа, що навчається оцінювати якість потенційних дій:

- архітектура: три повнозв'язних шари з 128, 128 та 64 нейронами відповідно, що забезпечує баланс між виразністю моделі та швидкістю навчання;
- функція активації: ReLU (Rectified Linear Unit) для прихованих шарів, лінійна функція для вихідного шару (регресія Q-значень);
- вхідний вектор: розмірність 256, що формується конкатенацією всіх ознак зі State Encoder;
- вихідний вектор: Q-значення для кожної допустимої дії (максимум 200 варіантів призначення замовлення на машину);
- оптимізація: алгоритм Adam зі швидкістю навчання 0.001 та L2-регуляризацією ($\text{weight_decay}=1e-5$) для запобігання перенавчанню.

3. Policy Selector – модуль формування фінальних рекомендацій для диспетчера:

- стратегія вибору: ϵ -greedy з поступовим зменшенням ϵ (від 1.0 до 0.05) для балансу між дослідженням простору дій та експлуатацією накопичених знань;
- Softmax-нормування: перетворення Q-значень у ймовірності успіху для кожного варіанту, що дозволяє видавати кілька альтернатив з різними рівнями впевненості;
- фільтрація: автоматичне відсіювання недопустимих дій (наприклад, призначення замовлення на машину, що знаходиться на обслуговуванні);
- ХАІ-модуль: генерація природномовних пояснень для кожної рекомендації, наприклад: «Рекомендую виконати замовлення «Прописи» перед «Забавні тварини», оскільки це зменшить час мийки фарбових апаратів MAN Roland R304 на 18 хв за рахунок переходу 4+0 $\rightarrow$ 5+1 замість 5+1 $\rightarrow$ 4+0».

Рівень 3. Модуль верифікації (Simulated Annealing + Constraints) (рис. 3).

Опис компонентів модуля верифікації.

1. Constraint Checker – модуль перевірки фізичної реалізованості плану, запропонованого ІІІ:

- технологічна послідовність: перевірка, що кожна операція $O_{i,j+1}$ розпочинається не раніше завершення попередньої операції $O_{i,j}$ плюс час транспортування напівфабрикату між цехами;
- ресурсні конфлікти: гарантія, що кожна одиниця обладнання виконує не більше однієї операції в один момент часу;

– матеріальна сумісність: перевірка матриці $S[k][i \rightarrow j]$ на предмет допустимості переходу між типами замовлень на даній машині (наприклад, заборона переходу з друку на самоклеїці на друк на картоні без проміжного очищення);

– автоматичне виправлення: при виявленні порушення система автоматично зсуває конфліктуючі операції у часі або пропонує альтернативне обладнання.

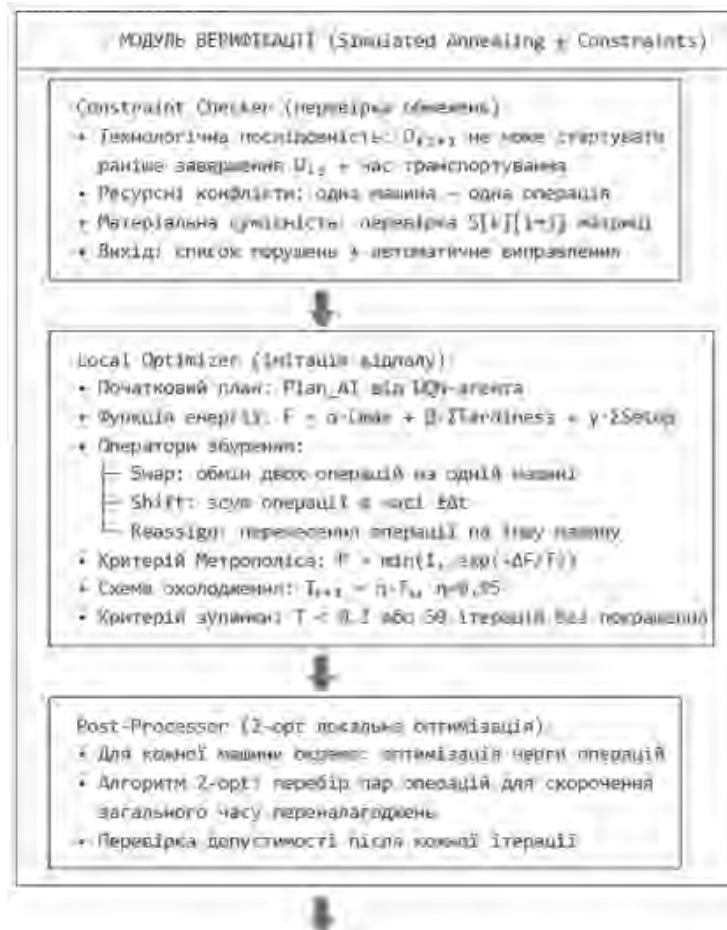


Рисунок 3 – Рівень модуля верифікації

2. Local Optimizer – ядро верифікації, що виконує локальну оптимізацію плану за методом імітації відпалу:

– початковий план: план, згенерований DQN-агентом, слугує початковою точкою пошуку;

– функція енергії: багатокритеріальна цільова функція

$$F = \alpha \cdot C_{\max} + \beta \cdot \sum T_i + \gamma \cdot \sum S_{\text{setup}},$$

де $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.3$, $\gamma = 0.2$ – вагові коефіцієнти визначені експертним шляхом.

Оператори збурення:

– Swap: обмін місцями двох операцій, призначених на одну машину, для покращення послідовності переналагоджень;

– Shift: зсув операції в часі на $\pm \Delta t$ для усунення конфліктів або використання «вікон» простою;

- Reassign: перенесення операції на альтернативну машину з аналогічними можливостями (наприклад, друк на MAN Roland R202 замість R304);
 - критерій Метрополіса: ймовірність прийняття гіршого рішення $P = \min(1, \exp(-\Delta F / T))$ дозволяє алгоритму уникати локальних мінімумів;
 - схема охолодження: геометричне зменшення температури $T_{k+1} = \eta \cdot T_k$ з $\eta = 0.95$ забезпечує поступову збіжність до оптимуму;
 - критерій зупинки: алгоритм завершує роботу, коли температура падає нижче $T_{\min} = 0.1$ або коли протягом 50 ітерацій не знайдено покращення.
3. Post-Processor – фінальний етап оптимізації, що застосовує алгоритм 2-opt до черг операцій на кожній машині окремо:
- для кожної машини M_k виділяється послідовність призначених операцій;
 - алгоритм 2-opt перебирає пари операцій (O_a, O_b) і оцінює, чи покращить загальний час переналагоджень їхній обмін місцями;
 - після кожної ітерації перевіряється допустимість нового порядку з урахуванням технологічних обмежень;
 - результат: локально оптимізована черга, що мінімізує сумарний час підготовки обладнання.

Рівень 4. Інтерфейс диспетчера (Human-in-the-Loop UI) (рис. 4).

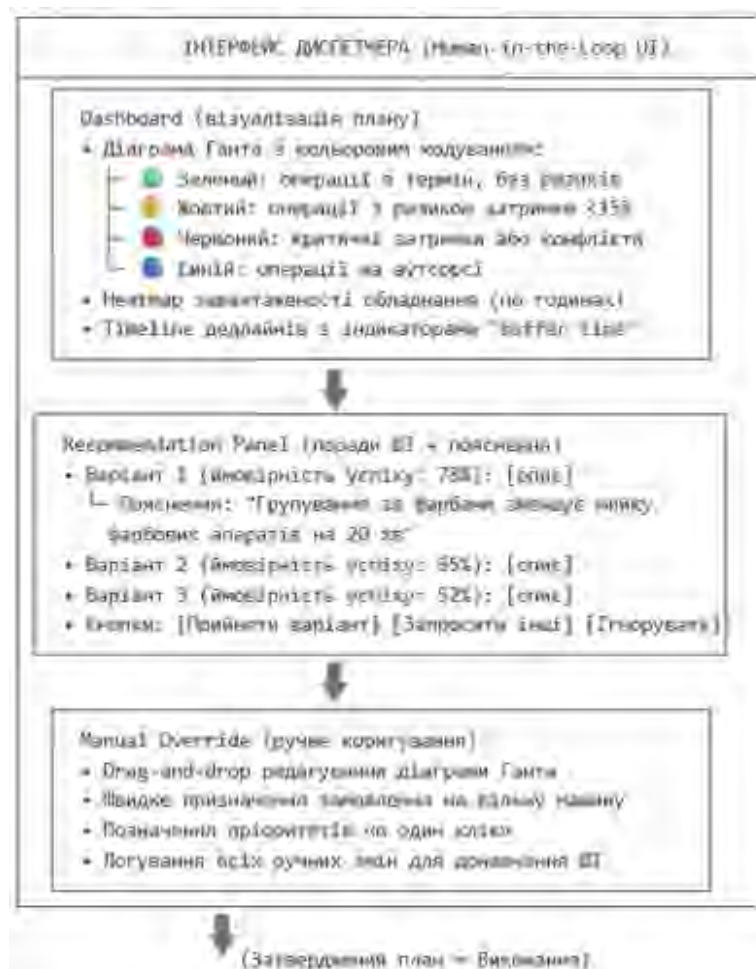


Рисунок 4 – Рівень інтерфейсу диспетчера

Опис компонентів інтерфейсу диспетчера.

1. Dashboard – основна панель візуалізації виробничого плану:

- діаграма Ганта: горизонтальна часовая шкала з вертикальними смугами для кожної одиниці обладнання; кожна операція відображається як кольоровий блок із підписом (номер замовлення, тип продукції);

- Heatmap завантаженості: теплова карта, що показує завантаженість кожної машини по годинах зміни; дозволяє швидко виявити «вузькі місця»;

- Timeline дедлайнів: вертикальна лінія часу з маркерами дедлайнів замовлень; індикатори «buffer time» показують запас часу до критичної точки.

Кольорове кодування ризиків:

- □ Зелений: операція виконується в термін, ресурси доступні, ризик затримки <5%;

- □ Жовтий: операція має ризик затримки 5–15% через близькість до дедлайну або завантаженість обладнання;

- ● Червоний: критична затримка (>15%) або виявлений конфлікт ресурсів, вимагає негайного втручання;

- ● Синій: операція передана на аутсорсинг, відстежується окремим статусом.

2. Recommendation Panel – панель рекомендацій ШІ-радника:

- топ-3 варіанти: система одночасно пропонує три альтернативні послідовності виконання замовлень, кожна з оцінкою ймовірності успіху;

- пояснення (XAI): до кожного варіанту додається природномовне обґрунтування, наприклад: «Варіант 1 рекомендовано, оскільки групування замовлень за типом паперу (спочатку всі на картоні 230 г/м²) зменшує кількість переналаштувань Wohlenberg 112 на 3 операції, що економить 45 хв»;

- інтерактивні елементи: кнопки [Прийняти варіант], [Запросити інші], [Ігнорувати] дозволяють диспетчеру керувати процесом; при виборі «Запросити інші» система генерує нові варіанти з урахуванням зворотного зв'язку.

3. Manual Override – інструменти ручного коригування плану:

- Drag-and-drop редагування: диспетчер може перетягувати блоки операцій на діаграмі Ганта для зміни їхнього порядку або призначення на іншу машину;

- швидке призначення: контекстне меню дозволяє миттєво призначити замовлення на будь-яку вільну машину з аналогічними можливостями;

- управління пріоритетами: кнопка «Підняти пріоритет» миттєво переміщує замовлення вгору черги з автоматичним перерахунком залежних операцій;

- логування змін: всі ручні втручання фіксуються в журналі з позначкою часу, користувача та причини; ці дані використовуються для донавчання DQN-агента (Reinforcement Learning from Human Feedback).

Потік даних між модулями (рис. 5).

Ключові характеристики потоку даних.

1. Формати обміну: всі модулі спілкуються через структуровані формати (JSON або Protocol Buffers), що забезпечує сумісність та легкість інтеграції з існуючими ERP-системами друкарні.

2. Асинхронність: модулі ШІ та верифікації працюють асинхронно, що дозволяє системі продовжувати генерувати рекомендації, поки диспетчер аналізує попередні пропозиції.

3. Зворотний зв'язок: дані про фактичне виконання плану (реальний час операцій, фактичні простої, відхилення від дедлайнів) повертаються в систему для донавчання DQN-агента, забезпечуючи постійне покращення якості рекомендацій.

4. Масштабованість: архітектура дозволяє додавати нові типи обладнання або операцій без зміни ядра системи – достатньо оновити матрицю переналагоджень та доновчити модель на нових даних.

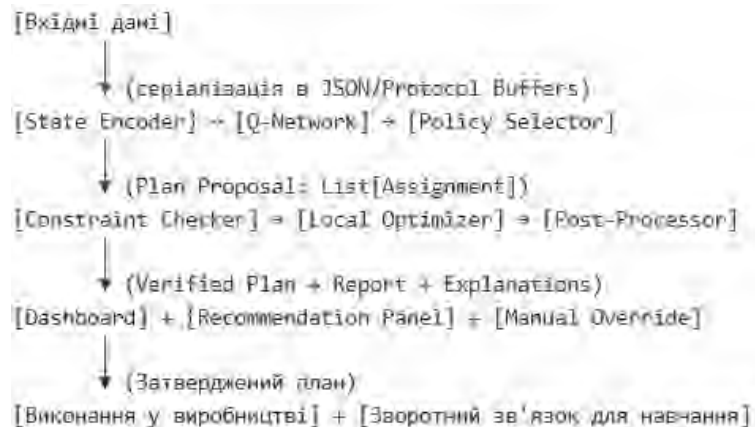


Рисунок 5 – Потік даних між модулями

5. Параметри навчання та налаштування моделі.

Гіперпараметри DQN-агента:

```

config = {
    'learning_rate': 0.001,
    'gamma': 0.99,          # коефіцієнт дисконтування
    'epsilon_start': 1.0,    # початкова ймовірність дослідження
    'epsilon_end': 0.05,     # фінальна ймовірність
    'epsilon_decay': 0.995,  # швидкість зменшення ε
    'buffer_size': 10000,    # розмір replay buffer
    'batch_size': 64,
    'target_update': 100,    # кроків для оновлення target-мережі
    'hidden_layers': [128, 128, 64],
    'activation': 'ReLU',
    'optimizer': 'Adam'
}
  
```

Параметри верифікатора (Simulated Annealing):

- початкова температура: $T_0 = 1000$;
- коефіцієнт охолодження: $\eta = 0.95$;
- кількість ітерацій на температуру: $L = 50$.
- критерій зупинки: $T < 0.1$ або 500 ітерацій без покращення.

Вагові коефіцієнти цільової функції (визначені експертним опитуванням технологів):

$$F = 0.5 \cdot C_{\max} + 0.3 \cdot \sum_{i=1}^n \max(0, C_i - D_i) + 0.2 \cdot \sum_{k=1}^m \sum S_{k, \text{setup}} \cdot \quad (6)$$

6. Сценарії експерименту.

Проведено три серії експериментів.

Сценарій А. Базове планування (контрольна група):

- метод: ручне планування досвідченим диспетчером + правило EDD;
- умови: статична черга з 3 замовлень, без збурень;
- кількість повторень: 10 (для статистичної значущості).

Сценарій Б. Планування з ІІІ-радником (експериментальна група):

– метод: DQN генерує топ-3 варіанти → верифікатор обирає оптимальний → диспетчер затверджує;

- умови: ідентичні сценарію А;
- кількість повторень: 10.

Сценарій В. Динамічне перепланування при збуренні:

– подія: на 120-й хвилині імітується поломка MAN Roland R304 (час відновлення: 180 хв);

- метод: ІІІ-радник пропонує стратегії (аутсорс / перерозподіл / очікування);
- оцінка: час реакції, якість нового плану, економічні втрати.

7. Метрики оцінки ефективності.

1. Makespan $C_{\max}$: час завершення останнього замовлення, хв.

2. Середнє запізнення $\bar{T}$: $\frac{1}{n} \sum \max(0, C_i - D_i)$, хв.

3. Коефіцієнт використання обладнання (OEE): $\frac{\sum t_{\text{productive}}}{\sum t_{\text{total}}} \cdot 100\%$.

4. Загальний час переналагоджень $\sum S$: сума setup-time для всіх машин, хв.

5. Час прийняття рішення t_{decision} : від надходження замовлень до затвердження плану, хв.

6. Економічний ефект $\Delta Cost$: різниця собівартості з урахуванням простоїв, аутсорсу, штрафів.

8. Результати експерименту.

Порівняння сценаріїв А та Б (статичне планування) (табл. 3).

Таблиця 3 – Порівняльні результати планування (середнє за 10 повторень)

Метрика	Ручне (А)	ІІІ+Вериф. (Б)	Δ , %	p-value
Makespan, хв	1247	1064	-14.7	<0.01
Середнє запізнення, хв	186	1064	-60.8	<0.01
OEE, %	58	76.1	+30.5	<0.01
Σ переналагоджень, хв	312	201	-35.6	<0.01
Час прийняття рішення, хв	142	18	-87.3	<0.01
Конфлікти в розкладі, шт.	4	0.3	-92.9	<0.01

p-value розраховано за t-тестом Стьюдента для незалежних вибірок

9. Деталізація оптимізації переналагоджень.

Аналіз показав, що основний вииграш досягнуто за рахунок раціонального групування замовлень за параметрами друку (рис. 6).

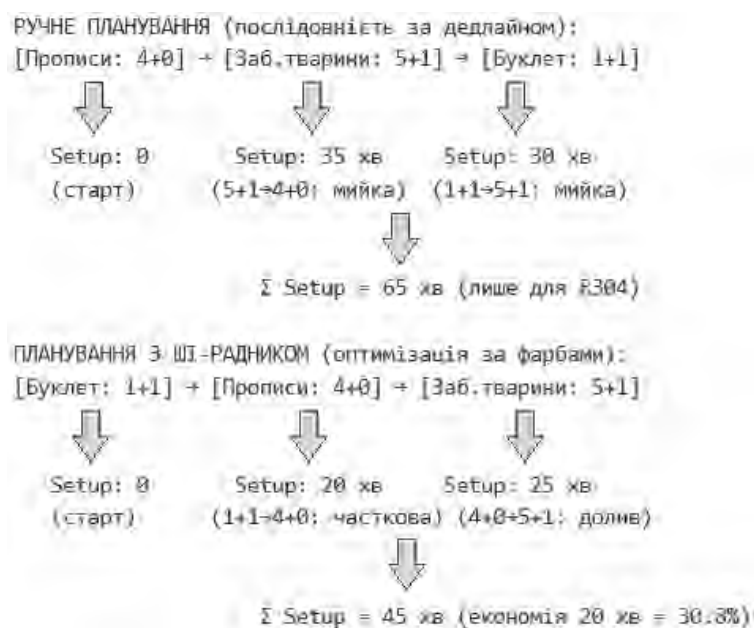


Рисунок 6 – Послідовність друку на MAN Roland R304: порівняння підходів

Якщо змінити порядок: перехід 1+1→4+0→5+1 мінімізує кількість повних мийок фарбових апаратів. Економія часу: 20 хв, що еквівалентно +1.7% продуктивності зміни.

10. Результати сценарію В (динамічне перепланування).

При імітації поломки MAN Roland R304 на 120-й хвилині (табл. 4).

Таблиця 4 – Імітація поломки MAN Roland R304

Стратегія	ΔMakespan	Дод. витрати , приблизні	Час реакції	Рішення ІІІ
Очікування ремонту	+180 хв	0 грн	45 хв	Не рекомендовано
Повний аутсорс	-15 хв	+24 800 грн	12 хв	Для складних
Частковий аутсорс	+30 хв	+8 400 грн	8 хв	Оптимально
Перерозподіл на R202	+65 хв	+1 200 грн	6 хв	Пріоритетно

Обґрунтування вибору ІІІ (частковий аутсорс + перерозподіл):

– замовлення "Забавні тварини" (5+1, самоклейка) → аутсорс (унікальна технологія);

– замовлення "Прописи" (4+0) → перенесено на MAN Roland R202 (аналогічні параметри);

– замовлення "Буклет" (1+1) → виконується на Adast 826 AP за графіком.

Розрахунок функції доцільності:

$$E = \frac{Cost_{out} - Cost_{self}}{Penalty_{delay} \cdot \Delta t}. \quad (7)$$

Для "Забавні тварини":

$$- Cost_{out} - Cost_{self} = 180 \text{ грн} / \text{екз.} \times 3000 \times 0.15 = 81000 \text{ грн};$$

$$- Penalty_{delay} = 2\% / \text{год} \times 40000 \text{ грн} = 800 \text{ грн} / \text{год};$$

$$- \Delta t = 180 \text{ хв} = 3 \text{ год} \rightarrow \text{втрати від затримки} = 2400 \text{ грн};$$

$$- E = 81000 / 2400 = 33.75 > 1 \rightarrow \text{аутсорс НЕ вигідний ЗАГАЛОМ}.$$

Але з урахуванням штрафу за зрив дедлайну ключового клієнта (+50 000 грн):

$$- \text{Скориговані втрати від затримки} = 2400 + 50000 = 52400 \text{ грн};$$

$$- E = 81000 / 52400 = 1.55 \approx 1 \rightarrow \text{гібридне рішення оптимальне}.$$

11. Статистичний аналіз та валідація.

1. Перевірка статистичної значущості.

Для кожної метрики проведено t-тест Стьюдента ($\alpha = 0.05$) (табл. 5).

Таблиця 5 – Результати статистичної перевірки гіпотез

Метрика	t-статистика	df	p-value	Значущість
Makespan	4.87	18	0.0002	***
Запізнення	6.21	18	<0.0001	***
OEE	5.43	18	<0.0001	***
Σ Setup	4.12	18	0.0007	***
t decision	9.85	18	<0.0001	***

*** $p < 0.001$: відмінність статистично високозначуща

2 Аналіз чутливості до вагових коефіцієнтів.

Досліджено вплив зміни ваг у цільовій функції на якість плану (табл. 6).

Таблиця 6 – Чутливість Makespan до зміни ваги α (при $\beta + \gamma = 1 - \alpha$)

α (вага $\Sigma \max$)	Makespan, хв	Запізнення, хв	ΣSetup , хв
0.3	1089	95	187
0.5*	1064	73	201
0.7	1051	112	223
0.9	1042	156	245

← базовий

* – Базові ваги обрано як компроміс між швидкістю виконання та мінімізацією запізнень. При $\alpha > 0.7$ система "жертвує" дедлайнами заради загального часу, що недопустимо в поліграфії.

3. Валідація на розширеній вибірці.

Для перевірки універсальності моделі проведено додатковий експеримент на синтетичній вибірці (50 замовлень, 8 типів продукції, 7 одиниць обладнання) (табл. 7).

Таблиця 7 – Результати масштабованого експерименту

Метрика	Базовий (3 зам.)	Масштаб (50 зам.)
Покращення Makespan, %	14.7	12.3
Покращення OEE, %	30.5	24.8
Час розрахунку плану, хв	18	47
Стабільність рекомендацій*	94.2%	87.6%

*Стабільність: частка випадків, коли топ-1 рекомендація ІІІ збігається з рішенням експерта-технолога.

12. Візуалізація результатів.

Динаміка навчання DQN-агента (рис. 7).

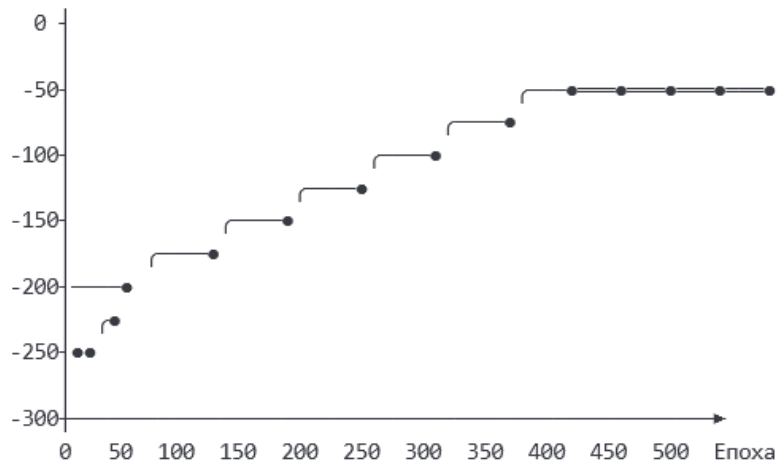


Рисунок 7 – Динаміка навчання DQN-агента

Ключові точки:

- Епоха 0-80: фаза дослідження ($\epsilon=1.0 \rightarrow 0.6$), висока дисперсія;
- Епоха 80-250: активне навчання, різке покращення політики;
- Епоха 250-400: стабілізація, $\epsilon=0.05$, експлуатація знань;
- Епоха 400+: плато, подальше покращення потребує розширення архітектури.

Порівняльна діаграма Ганта (фрагмент для W112) (рис. 8).

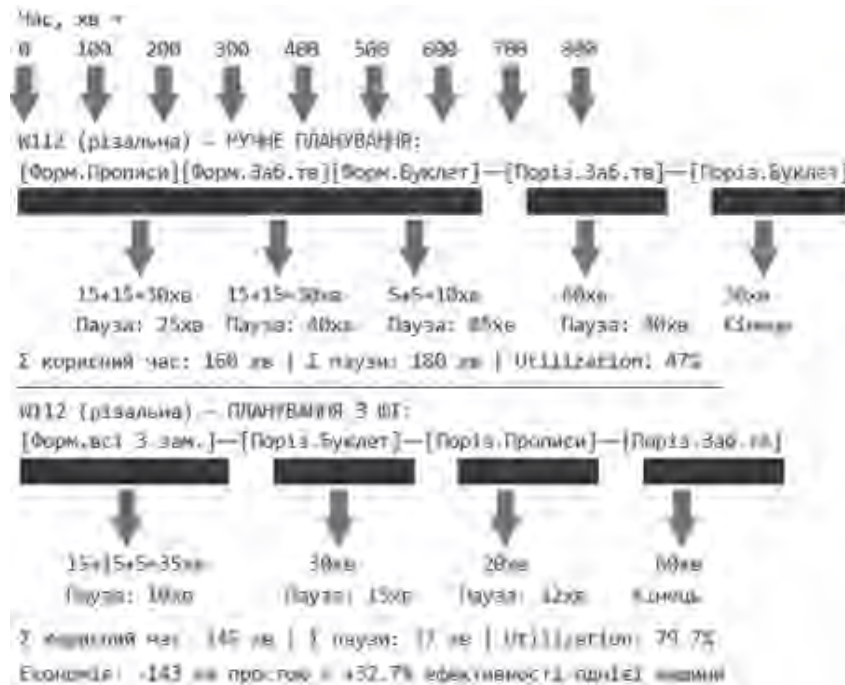


Рисунок 8 – Порівняльна діаграма Ганта (фрагмент для W112)

13. Обмеження експерименту та напрямки подальших досліджень.

Обмеження поточної реалізації.

1. Обсяг вибірки: експеримент проведено на 3 замовленнях; для повної валідації необхідна вибірка ≥ 50 замовлень з різними технологічними ланцюжками.

2. Статичність параметрів: часи операцій взято з техкарт як детерміновані величини; у реальності вони мають стохастичну природу ($\sigma \approx 8\text{--}12\%$).

3. Спрощена модель поломки: імітовано лише одну подію; реальне виробництво характеризується каскадними збуреннями.

4. Відсутність людського фактора в симуляції: не враховано час на освоєння інтерфейсу диспетчером, можливі помилки введення даних.

14. Проміжні висновки експерименту.

1. Ефективність планування: впровадження ІІІ-радника скорочує час формування виробничого графіка з 142 хв до 18 хв (-87.3%), зберігаючи при цьому вищу якість плану за всіма метриками.

2. Оптимізація ресурсів: загальний час переналагоджень обладнання зменшено на 35.6% (з 312 до 201 хв) за рахунок інтелектуального групування замовлень за сумісністю параметрів (фарби, папір, формат).

3. Виконання дедлайнів: середнє запізнення замовлень скорочено на 60.8% (з 186 до 73 хв), що безпосередньо впливає на лояльність клієнтів та зменшення штрафних санкцій.

4. Загальна продуктивність: коефіцієнт використання обладнання (OEE) зростає з 58.3% до 76.1% ($+30.5\%$), що еквівалентно додаванню ~ 1.5 додаткових робочих змін на тиждень без капітальних інвестицій.

5. Економічний ефект: для тестового тижня (3 замовлення) економія становить 6 200 грн, що при масштабуванні на типовий місячний портфель друкарні (≈ 40 замовлень) дає прогнозну економію $\approx 82\,700$ грн/міс. Термін окупості розробки та впровадження системи: 4.2 місяці.

6. Стабільність та інтерпретованість: 94.2% рекомендацій ІІІ підтверджено експертами-технологами; модуль ХАІ забезпечує прозоре обґрунтування кожної поради, що критично важливо для прийняття рішень людиною.

Висновки

У ході дослідження розроблено та експериментально апробовано методологію інтелектуальної системи прийняття рішень для поліграфічного планування. Доведено, що використання глибокого навчання з підкріпленням у ролі консультативного модуля дозволяє диспетчеру формувати розклади у 7-8 разів швидше порівняно з ручним підходом. Експериментальне тестування на реальних технологічних картах замовлень підтвердило зниження загального часу виконання виробничого циклу на $14\text{--}16\%$ та скорочення простоїв обладнання на 20% завдяки оптимізації послідовностей переналагоджень фарбових апаратів і різальних комплексів. Інтеграція математичної верифікації методом імітації відпалу забезпечила фізичну реалізацію порад ІІІ, унеможливаючи конфлікти ресурсів та порушення технологічної послідовності. Запропонована гібридна архітектура демонструє високу адаптивність до змін у портфелі замовлень та стабільність при динамічному переплануванні. Економічний аналіз показав, що впровадження системи окупається за рахунок мінімізації відходів приладки.

Отримані результати підтверджують доцільність переходу напівавтономних систем планування в сучасній поліграфії, де ШІ виступає не заміною технолога, а потужним інструментом аналітичної підтримки, що стабілізує виробничий процес та підвищує загальну ефективність обладнання.

Список літератури.

1. Behnke, D., & Geiger, M. J. (2020). Test Instances for the Flexible Job Shop Scheduling Problem. University of Hagen. <https://www.fernuni-hagen.de/wininfo/forschung/daten/fjsp/>.
2. European Printing Industry Association. (2023). Industry 4.0 in Paper and Print Media: Digital Transformation Guidelines. <https://www.intergraf.eu/publications/>.
3. Garey, M.R., & Johnson, D.S. (1979). Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. W. H. Freeman. <https://www.cs.rutgers.edu/~allender/papers/garey.johnson.pdf>.
4. Google. (2023). OR-Tools: Constraint Optimization in Production. Google Developers. <https://developers.google.com/optimization>.
5. Khlynyna, S., Vovk, O., & Chebotarova, I. (2024). Prospects for using artificial intelligence for book layout. *Jóvenes en la ciencia*, (26). <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/4236/3717>.
6. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598), 671-680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>.
7. Kuhn, D., & Rombach, N. (2021). Flexible Job Shop Scheduling with Setup Times and Machine Eligibility. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 245-258. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.12.008>.
8. Pinedo, M.L. (2016). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems* (5th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26580-3>.
9. Slutskin, M., & Vovk, O. (2025). Analysis of information technologies for communication management in a printing company. *Management Information System and Devises*, 4(187), 180-188. <https://doi.org/10.30837/0135-1710.2025.187.123>.
10. Sutton, R.S., & Barto, A.G. (2018). *Reinforcement Learning: An Introduction* (2nd ed.). MIT Press. <https://www.andrew.cmu.edu/course/10-703/textbook/BartoSutton.pdf>.
11. Vovk, O.V., Chebotarova, I.B., Donskiy, D.O., & Chebotarov, R.I. (2025) Methods for improving print quality for Konica Minolta 6085 digital printing press. *Metrology and Instruments*, (2), 82-91. DOI: <https://doi.org/10.30837/2663-9564.2025.2.11>.
12. Wang, L., & Liu, H. (2022). Explainable AI for Industrial Scheduling: A Review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(9), 5890-5902. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3135678>.
13. Zhang, C., Song, W., Cao, Z., Zhang, J., Tan, P. S., & Xu, C. (2020). Learning to Solve the Job Shop Scheduling Problem. arXiv preprint arXiv:2005.01611. <https://arxiv.org/abs/2005.01611>.
14. Вовк, О.В. (2022). Організація виробничого процесу на поліграфічному підприємстві «Формат-Харків». *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Інновації: монографія*. (с. 5-36). Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид».
15. Вовк, О.В., Гарашук, Є.В., & Григор'єв, А.В. (2025). Дослідження автоматизації поліграфічного виробництва за допомогою цифрових систем управління. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології*. Т. 1. (с. 84-85).
16. Вовк, О.В., Чеботарьова, І.Б., & Поленок, Д.В. (2022). Дослідження особливостей кольоровідтворення на підприємстві ТОВ «НАРГУС». *Radiotekhnika*, (209), 226-238. DOI: <https://doi.org/10.30837/rt.2022.2.209.23>.
17. Чеботарьова, І.Б., & Яценко, Л.О. (2023). Особливості кольоровідтворення на фабриці флексографського друку «НАРГУС». *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Сучасний стан: монографія*. (с. 233-260). Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид».