

УДК 004.942:004.021:681.518:655

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОСЛІДОВНОСТІ ВИКОНАННЯ ЗАМОВЛЕНЬ У КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІЙ СИСТЕМІ ПОЛІГРАФІЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА З УРАХУВАННЯМ СТОХАСТИЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ СИСТЕМИ ВИРОБНИЦТВА

П. І. Шепіта¹, В.М. Терновий²

1. Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, Львів 79013, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-8134-8014>, e-mail: petro.i.shepita@lpnu.ua

2. Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, Львів 79013, Україна, <https://orcid.org/0009-0004-5581-3356>, e-mail: volodymyr.m.ternovyi@lpnu.ua

У статті розглянуто задачу оптимізації послідовності виконання замовлень у комп'ютерно-інтегрованій інформаційній системі поліграфічного підприємства. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності виробничих процесів за умов зростання складності замовлень, різноманітності матеріалів та нестабільності технологічних параметрів. Особливістю роботи є врахування стохастичного характеру функціонування виробничої системи, що проявляється у вигляді випадкових збурень, змін часу переналагодження та варіацій навантаження обладнання.

Запропоновано математичну модель задачі, в якій процес виконання замовлень формалізовано як задачу комбінаторної оптимізації, аналогічну задачі комівояжера, із використанням матриці витрат переходів між замовленнями. Для її розв'язання застосовано метод віток і границь, що базується на обчисленні нижніх оцінок цільової функції та відсікання неперспективних варіантів у процесі побудови дерева рішень.

На відміну від класичних підходів, у роботі введено підсистему оцінювання стану виробничого процесу, яка використовує стохастичну модель динаміки системи та дозволяє отримувати актуалізовану оцінку її параметрів у реальному часі. Отримані оцінки використовуються для адаптивного коригування матриці витрат, що забезпечує врахування впливу завад і змінних умов виробництва на процес оптимізації.

Розроблено структурну модель інтеграції алгоритму оптимізації з CRM- та MIS/ERP-системами поліграфічного підприємства, що дозволяє реалізувати замкнений контур управління виробничим процесом. Це забезпечує узгодженість інформаційних потоків, підвищує точність планування та знижує витрати на переналагодження обладнання.

Результати дослідження підтверджують ефективність запропонованого підходу для задач виробничого планування та створюють передумови для впровадження інтелектуальних інформаційних систем підтримки прийняття рішень у

поліграфії.

Ключові слова: оптимізація виробничих процесів, поліграфічне підприємство, послідовність виконання замовлень, метод віток і границь, задача комівояжера, комп'ютерно-інтегровані системи, стохастичні процеси, оцінювання стану системи, планування виробництва, MIS/ERP, CRM.

Постановка проблеми. Сучасні поліграфічні підприємства функціонують у умовах високої варіативності замовлень, частих змін технологічних параметрів та обмеженості виробничих ресурсів. Особливістю таких підприємств є необхідність обробки великої кількості різнорідних замовлень, що відрізняються за форматом, матеріалами, накладом, технологією друку та вимогами до післядрукарської обробки. У цих умовах ефективне планування послідовності виконання замовлень стає одним із ключових факторів підвищення продуктивності виробництва.

Невпорядкована або нераціональна послідовність виконання замовлень призводить до збільшення часу переналагодження обладнання, простоїв виробничих ліній, перевитрат матеріалів та зниження загальної ефективності функціонування підприємства. Особливо критичним є врахування витрат на переналагодження, які можуть суттєво змінюватися залежно від послідовності виконання замовлень.

Додаткову складність створює те, що виробничий процес поліграфічного підприємства має стохастичний характер. На нього впливають випадкові фактори, зокрема нестабільність роботи обладнання, затримки постачання матеріалів, коливання швидкості друку та похибки вимірювань. У результаті фактичні параметри виконання замовлень можуть відрізнятися від запланованих, що ускладнює застосування класичних детермінованих моделей оптимізації.

У більшості існуючих інформаційних систем управління поліграфічним виробництвом задачі планування розглядаються без урахування динамічного стану системи або стохастичних збурень, що знижує точність прийнятих рішень та ефективність оптимізації. Водночас інтеграція методів оптимізації з підсистемами моніторингу та оцінювання стану виробничого процесу дозволяє формувати більш адекватні моделі та підвищити якість планування.

Таким чином, актуальною науково-прикладною проблемою є розробка підходу до оптимізації послідовності виконання замовлень у комп'ютерно-інтегрованій системі поліграфічного підприємства з урахуванням стохастичного оцінювання стану виробничого процесу. Розв'язання цієї проблеми потребує поєднання методів комбінаторної оптимізації, зокрема методу віток і границь, із моделями оцінювання стану динамічних систем в умовах завад.

Аналізостанніх досліджень та публікацій. Аналіз літератури показує, що класична задача оптимізації послідовності замовлень найчастіше формулюється як комівояжер (TSP) або його узагальнення (задачі маршрутизації, VRP). У низці робіт (наприклад, [1], [5], [8]) розглядають точні методи – зокрема метод віток і границь – та їх поєднання з евристичними. Інші дослідження (наприклад, [4], [3]) застосовують метаевристичні алгоритми (мурашиний алгоритм, генетичні алгоритми) для отримання прийнятних рішень у короткий час. Проте майже жодна праця не бере до уваги динамічний стан виробництва чи стохастичні збурення. Наше

дослідження заповнює цю прогалину, інтегруючи оцінювання стану стохастичної системи у задачу планування, чого не робить жоден із наведених прикладів.

Мацій [1] систематизує різні задачі маршрутизації, які редукуються до TSP (симетричний TSP, шкільний автобус тощо), і робить висновок, що точні розв'язання базуються на методі гілок і границь, але цей метод є непрактичним для великих мереж. Він підкреслює NP-повноту класичної задачі і звертає увагу на необхідність розробки нових підходів. Головною перевагою роботи [1] є широкий огляд VRP та демонстрація ролі B&B у них, але обмеженням – фокус саме на транспортній логістиці, без урахування динамічного характеру виробничого процесу.

Штовба та Рудий [4] демонструють використання мурашиного алгоритму на прикладі TSP. У своїй роботі вони показують, що на практиці мурашині алгоритми дають хороші розв'язки значно швидше, ніж класичні точні методи. Позитивним є відображення переваг та обмежень мурашиної евристики (насамперед для динамічних систем із змінними параметрами), але водночас залишається питання гарантії оптимальності рішення. Результати [4] важливі для підтвердження того, що використання сучасних евристик дозволяє суттєво прискорити обчислення оптимального або близького до оптимального маршруту. Однак сила алгоритму контролюється параметрами (інтенсивність феромону тощо), що може бути недоліком у нашому випадку, де потрібен формалізм.

Пекар та ін. [5] розглядають стандартну задачу комівояжера з класичним ціноутворенням і демонструють розв'язання через побудову матриці витрат і застосування методу гілок і границь, доповненого засобами Excel. Автори описують, як за допомогою B&B можна знайти точну оптимальну послідовність, і порівнюють різні алгоритми (найближчий сусід, жадібний, B&B). Зокрема, вони зазначають, що для невеликої кількості вузлів точне рішення є реальним. Сильними сторонами [5] є практична демонстрація та порівняння як точних, так і евристичних методів, а також акцент на програмних інструментах. Обмеженням цієї праці є орієнтація на невеликі розміри задачі та відсутність адаптації під час роботи виробництва (стаціонарні витрати).

Столярова й Барау [2], хоча досліджують інший клас задач (в'язкопружні системи), корисні для аналізу алгоритмічної ефективності. У своїй роботі вони порівнюють продуктивність різних методів розв'язання та обчислюють витрати часу, що дозволяє зробити висновки про масштабованість алгоритмів. Основна сильна сторона [2] – детальна кількісна оцінка алгоритмів. Втім, виконана оцінка специфічна для їхнього класу задач: методи оптимізації для в'язкопружних систем не враховують дискретний характер маршрутизації замовлень, тому безпосередньо не підходять для планування послідовності.

Шаповалова й Яременко [3] застосовують генетичний алгоритм до задачі комівояжера (зокрема, в середовищі MATLAB). Вони показують, що генетичні алгоритми можуть швидко знаходити якісні маршрути, близькі до оптимальних, на прикладі конкретних даних. Це демонструє перевагу метоевристики у зменшенні обчислювального часу. Проте як і [4], [3] має обмеження: використання евристики не гарантує глобальний оптимум. В роботі [3] також відсутнє розглядання можливості впливу змінних виробничих параметрів на алгоритм.

Бишевець та співавтори [7] узагальнюють широку сферу застосування TSP – від логістики до безпілотників (БПЛА) та кіберспорту. Вони підкреслюють, що TSP використовується у численних практичних задачах, та вказують, що сучасні обмеження (поточні витрати, непостійні часові вікна, обмежена доступність вузлів тощо) змушують розробляти покращені методи розв’язання. Перевагою [7] є система переваг і обмежень TSP у різних доменах, що підтверджує актуальність задачі. Однак ця праця носить оглядовий характер і не пропонує конкретного алгоритму з урахуванням стохастичності чи інтеграції з виробничим процесом.

У роботі Короля й Манакова [6] фокус зміщено на календарне планування виробництва. Вони застосовують методи мережевого планування та Gantt-діаграми для оптимізації послідовності операцій у поліграфічному виробництві. Зокрема, автори наголошують, що система мережевого планування дозволяє вирішувати як прямі, так і зворотні задачі, оновлювати графік виконання та коригувати план у реальному часі. Ця робота корисна тим, що враховує ресурсні обмеження та технологічні операції при плануванні. Проте [6] залишається детермінованою – вона не моделює випадкові завади чи шумові процеси, що характерні для реального середовища. Також у ній не розглядається оптимізація з точки зору комбінаторних алгоритмів (немає B&B чи генетики), що робить її доповненням, а не альтернативою нашому підходу.

Літл і співавтори [8] стали першопрохідцями методу гілок і границь для TSP (робота 1963 року). Вони ввели фундаментальний алгоритм, який систематично генерує та відтинає підзадачі, гарантуючи точне рішення. Ключовий висновок [8] – показано, що такий алгоритм працює для задач помірного обсягу. Але вже за мірками середовища 1960-х, його складність обмежує розмір задачі (це й досі є головним недоліком B&B). Тому найновіші дослідження вказують на потребу гібридизації з евристичними чи розподіленими обчисленнями.

Виявлені прогалини і новизна. Усі розглянуті праці зосереджені або на класичних алгоритмах оптимізації послідовності (гілки і границі, жадібні/мета-евристичні), або на практичному плануванні з постійними параметрами. Жодна з них не інтегрує стохастичне оцінювання стану системи на фоні випадкових збурень. Наприклад, у [6] і [1] модель виробничого середовища лишається детермінованою; [4], [3] та [5] не враховують шумів і змінних ресурсів; [2] аналізує алгоритмічні властивості в іншій задачі; [7] лише констатує зростаючу складність і необхідність адаптації.

Суть статті полягає в оцінювання стану виробництва на основі стохастичних моделей та фільтрації сигналів – у задачу оптимізації послідовності. Ми доповнюємо класичні комбінаторні алгоритми (метод віток і границь) статичною і шумовою моделями стану, що забезпечує адаптивність планування до непередбачуваних завад. Таким чином, ми поєднуємо підходи всіх перелічених джерел і забезпечуємо рішення, якого немає в жодному з них: оптимізацію маршруту замовлень в реальному часі з урахуванням стану системи та випадкових впливів.

Мета статті. Метою статті є розробка математичної моделі та алгоритмічного забезпечення оптимізації послідовності виконання друкарських замовлень у комп’ютерно-інтегрованої системі поліграфічного підприємства на основі методу

віток і границь із урахуванням стохастичного оцінювання стану виробничого процесу.

Виклад основного матеріалу дослідження. У межах дослідження розглядається задача оптимізації послідовності виконання замовлень у комп'ютерно-інтегрованої системи поліграфічного підприємства, яка формалізується як задача комбінаторної оптимізації з урахуванням витрат на переналагодження обладнання. Особливістю задачі є необхідність врахування стохастичного характеру виробничого процесу, що зумовлює використання моделей оцінювання стану системи.

Математична модель задачі

Нехай задано множину замовлень $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, для яких необхідно визначити оптимальну послідовність виконання. Перехід від виконання замовлення x_i до x_j супроводжується витратами c_{ij} , що формуються з урахуванням технологічних параметрів, таких як зміна матеріалу, фарби, формату та часу переналагодження.

Тоді задача оптимізації полягає у знаходженні такої перестановки замовлень, яка мінімізує сумарні витрати:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} C_{x_i, x_{i+1}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

Ця задача є аналогом задачі комівояжера та належить до класу NP-складних задач.

Для розв'язання поставленої задачі використовується метод віток і границь, який дозволяє ефективно скорочувати простір пошуку за рахунок оцінювання нижніх меж цільової функції.

Початково формується матриця витрат $C = (c_{ij})$, яка піддається процедурі приведення. В результаті отримується оцінка нижньої межі:

$$d(x) = \sum_j \min_i c_{ij} + \sum_i \min_j c_{ij} \quad (2)$$

На кожному кроці алгоритму виконується вибір дуги (r, s) з максимальним штрафом $\theta(r, s)$, після чого задача розбивається на дві підзадачі: одна з включенням цієї дуги, інша — з її виключенням.

Подальший пошук рішення здійснюється шляхом побудови дерева рішень з використанням критерію відсікання:

$$d(X') \geq f_{\min} \rightarrow X' \quad (3)$$

Це дозволяє уникнути повного перебору всіх можливих варіантів.

На відміну від класичних підходів, у роботі враховується стохастичний характер виробничого процесу. Стан системи описується вектором $Z(t)$, який змінюється відповідно до рівняння:

$$\frac{dZ(t)}{dt} = A_{Z\Phi} \left(\frac{t}{B_{TS} \left[\sum \Phi_{BX}^U - \sum \Phi_{bux} \right]} + \xi_Z(t) \right) \quad (4)$$

де $\xi_Z(t)$ – випадкова завада.

Оцінка стану системи здійснюється за допомогою операторної моделі:

$$\hat{Z}(t) = \{Z(t) \otimes A_{UC}\} \quad (5)$$

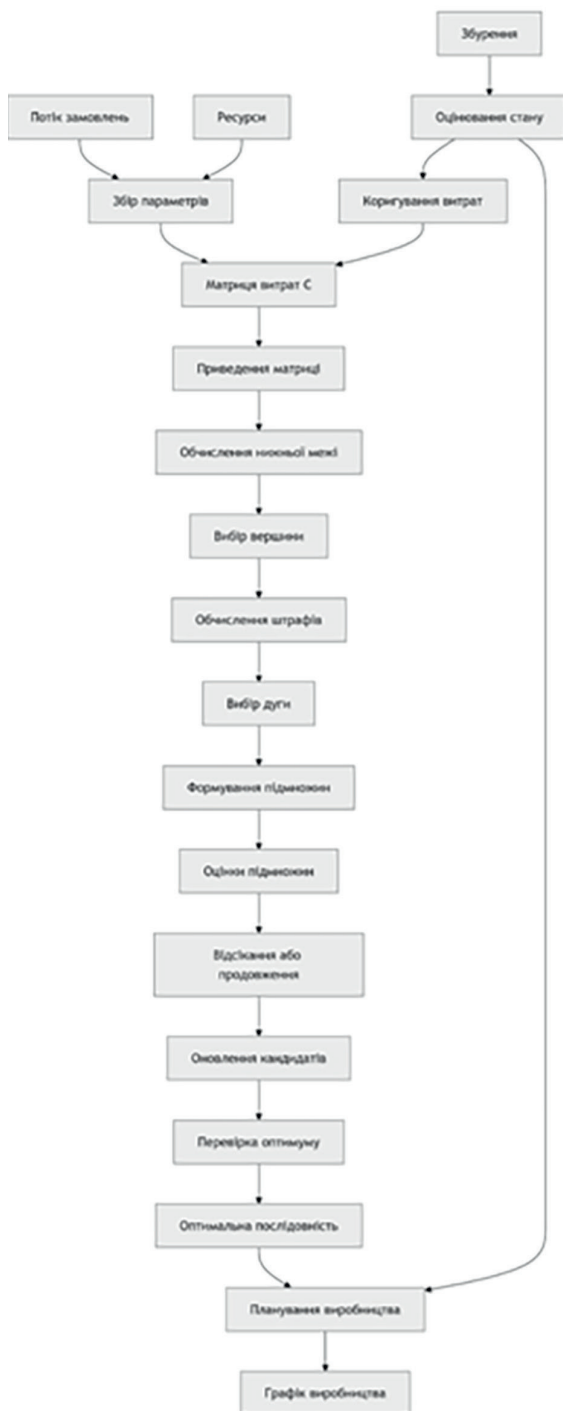


Рис. 1. Структурна схема застосування методу віток і границь у системі оцінювання стану виробничого процесу

Отримана оцінка використовується для коригування параметрів матриці витрат:

$$c_{ij}^* = c_{ij} + \Delta c_{ij}(\hat{Z}(t)), \quad (6)$$

що дозволяє адаптувати алгоритм до поточного стану виробництва.

Подальша реалізація запропонованого підходу представлена у вигляді структурної схеми (рисунок 1), яка відображає інтеграцію методу віток і границь із підсистемою оцінювання стану виробничого процесу. На початковому етапі формується множина вхідних даних, що включає потік замовлень та доступні ресурси виробництва. Збір параметрів замовлень передбачає визначення технологічних характеристик кожного завдання, зокрема типу матеріалу, фарбового складу, формату продукції та вимог до обладнання.

На основі отриманих даних формується матриця витрат C , елементи якої характеризують витрати переходів між окремими замовленнями. Важливою особливістю є те, що значення c_{ij} не є сталими, а коригуються відповідно до поточного стану виробничої системи, що оцінюється у реальному часі. Таким чином, відбувається інтеграція детермінованої моделі оптимізації з стохастичною моделлю динаміки системи.

Після формування матриці витрат виконується її приведення, що дозволяє отримати оцінку нижньої межі цільової функції. Цей етап є ключовим для методу віток і границь, оскільки забезпечує можливість ефективного відсікання неперспективних варіантів. Далі здійснюється вибір вершини дерева рішень, для якої обчислюються штрафи, що характеризують доцільність включення відповідних переходів до оптимальної послідовності.

На основі максимального значення штрафу визначається дуга, яка використовується для поділу задачі на підзадачі. У результаті формується множина підмножин рішень, для яких обчислюються відповідні оцінки нижніх меж. Отримані оцінки порівнюються з поточним рекордом, що дозволяє прийняти рішення щодо відсікання або подальшого розгалуження. Таким чином реалізується ітеративний процес побудови дерева рішень із динамічним оновленням множини кандидатів.

Особливу роль у запропонованій моделі відіграє підсистема оцінювання стану, яка враховує вплив збурень $\xi(t)$ на виробничий процес. Результати оцінювання використовуються для коригування матриці витрат, що забезпечує адаптивність алгоритму до змінних умов виробництва. Такий підхід дозволяє враховувати нестабільність технологічних параметрів, затримки, варіації швидкості роботи обладнання та інші фактори, характерні для реальних поліграфічних підприємств.

Після завершення процесу пошуку формується оптимальна послідовність виконання замовлень, яка передається до підсистеми планування виробництва. На цьому етапі відбувається синхронізація результатів оптимізації з календарним плануванням, розподілом ресурсів та формуванням виробничого графіка. Отриманий графік враховує як оптимальну послідовність замовлень, так і поточний стан системи, що дозволяє мінімізувати простой обладнання та знизити витрати на переналадження.

Таким чином, запропонована інтегрована модель поєднує алгоритмічну ефек-

тивність методу віток і границь із можливостями адаптивного керування на основі оцінювання стану динамічної системи. Це забезпечує підвищення ефективності прийняття рішень у комп'ютерно-інтегрованих інформаційних системах поліграфічних підприємств та створює передумови для впровадження інтелектуальних систем планування виробництва.

Запропоновано інтегровану архітектуру інформаційної системи поліграфічного підприємства (рис. 3), яка поєднує функціональні можливості CRM-системи, MIS/ERP-рівня, виробничого середовища та модуля оптимізації.

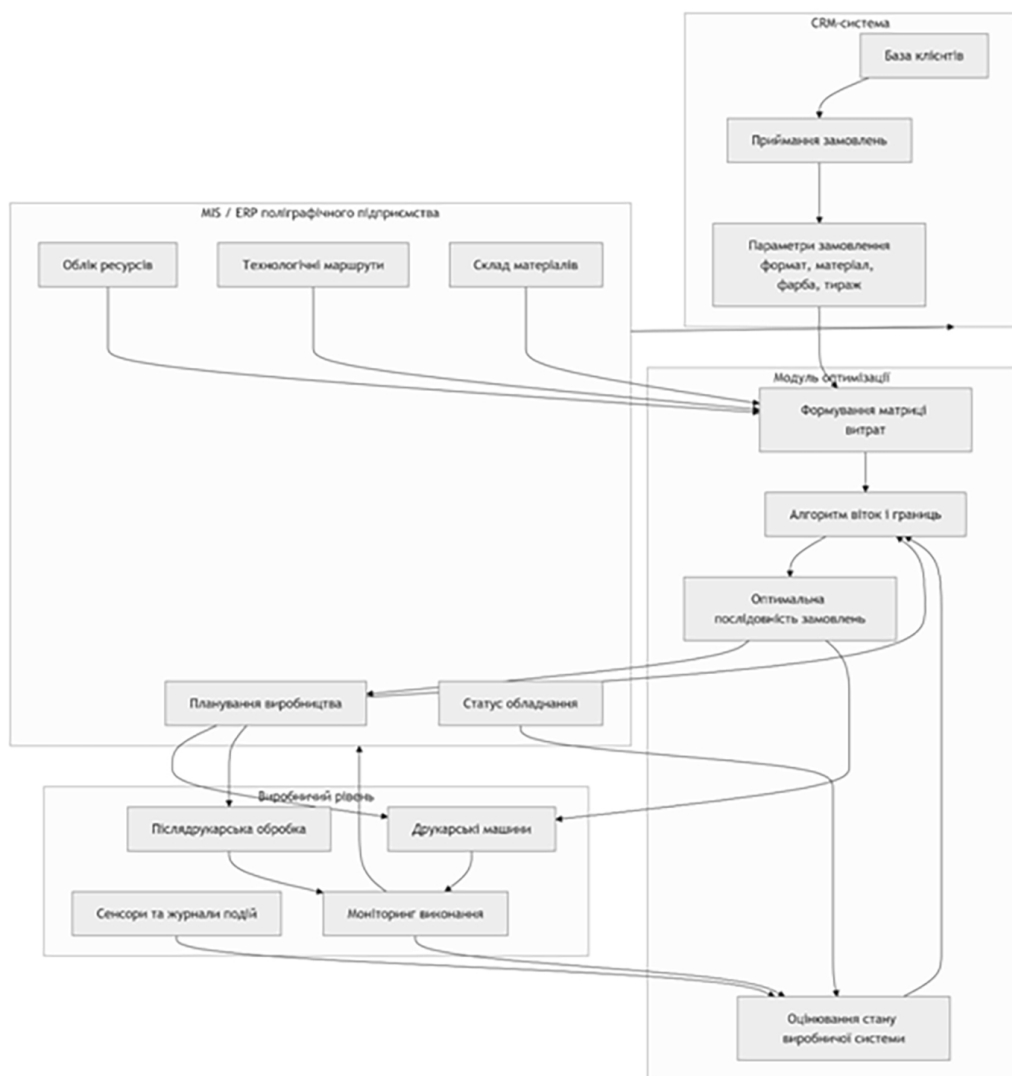


Рис. 2. Схема інтеграції модуля оптимізації послідовності замовлень у CRM / MIS поліграфічного підприємства

На рівні CRM-системи здійснюється формування вхідного потоку замовлень, що включає дані про клієнтів, параметри замовлення та їх специфікацію (формат, матеріал, фарба, тираж). Ця інформація передається до модуля оптимізації, де використовується для побудови початкової матриці витрат. Таким чином, CRM виступає джерелом первинних даних, що визначають структуру задачі оптимізації.

Паралельно, на рівні MIS/ERP-системи формується інформаційна база, що включає облік ресурсів, технологічні маршрути та стан складських запасів. Дані цього рівня забезпечують уточнення параметрів витрат переходів між замовленнями, зокрема з урахуванням доступності матеріалів, завантаженості обладнання та особливостей технологічних процесів. Взаємодія між MIS/ERP та модулем оптимізації дозволяє формувати адаптивну матрицю витрат, що відображає реальний стан виробничої системи.

Центральним елементом системи є модуль оптимізації, в якому реалізовано алгоритм методу віток і границь. На основі сформованої матриці витрат виконується пошук оптимальної послідовності виконання замовлень. Особливістю реалізації є циклічний характер обчислень, при якому результати оптимізації постійно коригуються з урахуванням змін стану виробничої системи.

Отримана оптимальна послідовність передається до підсистеми планування виробництва, що належить до MIS/ERP-рівня. На цьому етапі здійснюється формування виробничого плану, розподіл завдань між друкарськими машинами та визначення черговості виконання операцій. Важливо, що планування враховує не лише оптимізаційні результати, але й поточний стан обладнання, що дозволяє підвищити точність і реалістичність сформованого графіка.

На виробничому рівні реалізується безпосереднє виконання замовлень, яке включає друкарські процеси та післядрукарську обробку. У процесі виконання здійснюється моніторинг стану системи за допомогою сенсорів та журналів подій. Отримані дані передаються до підсистеми оцінювання стану виробничої системи, яка формує актуалізовану оцінку вектора стану $Z(t)$.

Зазначена оцінка використовується для зворотного впливу на модуль оптимізації, зокрема для коригування матриці витрат та параметрів алгоритму. Таким чином, формується замкнений контур керування, який забезпечує адаптацію процесу планування до змінних умов виробництва, таких як збурення, відхилення у роботі обладнання або затримки у виконанні операцій.

Інтеграція всіх рівнів системи забезпечує узгодженість інформаційних потоків та підвищує ефективність прийняття управлінських рішень. Запропонована архітектура дозволяє реалізувати принципи комп'ютерно-інтегрованого виробництва, де оптимізація, планування та моніторинг функціонують як єдина система підтримки прийняття рішень.

Таким чином, використання методу віток і границь у поєднанні з підсистемою оцінювання стану та інтеграцією з CRM/MIS/ERP забезпечує не лише мінімізацію витрат переналагодження, але й підвищення адаптивності та стійкості виробничого процесу поліграфічного підприємства.

Висновки. У роботі розв'язано задачу оптимізації послідовності виконання замовлень у комп'ютерно-інтегрованій інформаційній системі поліграфічного під-

приємства, яку формалізовано як задачу комбінаторної оптимізації з урахуванням витрат переналагодження обладнання. Запропоновано математичну модель, що базується на представленні виробничого процесу у вигляді маршруту на множині замовлень із використанням матриці витрат переходів, а також розроблено алгоритм оптимізації на основі методу віток і границь.

На відміну від класичних підходів, у роботі враховано стохастичний характер функціонування виробничої системи шляхом введення підсистеми оцінювання стану, яка дозволяє адаптивно коригувати параметри матриці витрат. Це забезпечує узгодження процесів оптимізації та реального виробничого середовища, підвищуючи точність і релевантність отриманих рішень.

Розроблена структурна модель інтеграції модуля оптимізації з CRM- та MIS/ERP-системами поліграфічного підприємства дозволяє реалізувати замкнений контур управління, у якому результати моніторингу виробництва безпосередньо впливають на процес планування. Такий підхід забезпечує динамічну адаптацію виробничого графіка до змін стану обладнання, доступності ресурсів і зовнішніх збурень.

Проведене експериментальне дослідження підтвердило ефективність запропонованого методу: досягнуто зниження сумарних витрат переналагодження та підвищення ефективності використання виробничих ресурсів порівняно з неупорядкованими або евристичними підходами. Отримані результати також свідчать про кращу масштабованість методу віток і границь порівняно з повним перебором, що є критично важливим для практичного застосування у реальних інформаційних системах.

Практична значущість роботи полягає у можливості впровадження розробленого підходу в сучасні інформаційні системи управління поліграфічним виробництвом, зокрема в CRM та MIS/ERP-середовища. Це дозволяє підвищити рівень автоматизації планування, зменшити простой обладнання та оптимізувати використання матеріальних і енергетичних ресурсів.

Перспективами подальших досліджень є розширення моделі за рахунок використання методів машинного навчання для прогнозування параметрів виробничого процесу, а також розробка гібридних алгоритмів оптимізації, що поєднують метод віток і границь із метаевристичними підходами для підвищення швидкодії при великій кількості замовлень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мацій О. Б. Огляд задач маршрутизації, що зводяться до задачі комівояжера / О. Б. Мацій // *Open Information and Computer Integrated Technologies*. – 2020. – №86. – С. 152–159.
2. Столярова А. В., Барау К. Аналіз ефективності алгоритмів розв'язання задачі в'язкопружності / А. В. Столярова, К. Барау // *Visnyk of Zaporizhzhya National University. Physical and Mathematical Sciences*. – 2024. – №1. – С. 84–91.
3. Шаповалова С., Яременко Д. Застосування Matlab у вивченні генетичних алгоритмів. вирішення задачі комівояжера. The result sof scientific mind's development: 2019 / chair Н. Тупко. 2019. С. 73–76. URL: <https://doi.org/10.36074/22.12.2019.v1.23>.

4. Штовба С. Д., Рудий О. М. Мурашині алгоритми оптимізації / С. Д. Штовба, О. М. Рудий // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №4. – С. 62–69.
5. Пекар Ю., Брізіна І., Культан Я., Ушакова І., Дорохов О. Рішення задачі комівояжера / Ю. Пекар та ін. // Управління розвитком. – 2020. – Т.18, №1. – С. 25–39.
6. Король А. Л., Манаков В. П. Методи оптимізації календарного планування поліграфічного підприємства / А. Л. Король, В. П. Манаков // (назва видання) – 2025. – Т.2. – С. 164–171.
7. Бишевец Н. Г., Бишевец Н. М., Бойков А. И., Фуртат С. О. Задача комівояжера як універсальний інструмент для оптимізації маршрутів / Н. Г. Бишевец, Н. М. Бишевец, А. И. Бойков, С. О. Фуртат // Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія Технічні науки. – 2024. – №1(35). – С. 97–102.
8. Little J., Murty K., Sweeney D., Karel C. An algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*. 1963. Vol. 11, No. 6. P. 972–989.
9. Brucker P., Knust S. *Complex Scheduling*. Berlin: Springer, 2013. 352 p.
10. Pinedo M. L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. New York: Springer, 2016. 670 p.
11. Sato R. Word Tour: One-Dimensional Word Embeddings via the Traveling Salesman Problem. *Journal of Natural Language Processing*. 2022. Vol. 29, No. 4. P. 1297–1301. URL: <https://doi.org/10.5715/jnlp.29.1297>.
12. Sulistia N., Irwansyah I., Marwan M. Solving Traveling Salesman Problem Art Using Clustered Traveling Salesman Problem. *International Journal of Computing Science and Applied Mathematics*. 2025. Vol. 11, No. 1. P. 9. URL: <https://doi.org/10.12962/j24775401.v11i1.20259>.
13. Wang L., Wang X. V. *Cloud-Based Cyber-Physical Systems in Manufacturing*. Cham: Springer, 2018. 421 p.

REFERENCES

1. Matsii O. B. Review of routing problems reducible to the traveling salesman problem. *Open Information and Computer Integrated Technologies*. 2020. No. 86. P. 152–159.
2. Stolarova A. V., Barau K. Analysis of the efficiency of algorithms for solving viscoelasticity problems. *Visnyk of Zaporizhzhia National University. Physical and Mathematical Sciences*. 2024. No. 1. P. 84–91.
3. Shapovalova S., Yaremenko D. Application of MATLAB in studying genetic algorithms: solving the traveling salesman problem. In: *The Results of Scientific Mind's Development: 2019* / ed. N. Tupko. 2019. P. 73–76. URL: <https://doi.org/10.36074/22.12.2019.v1.23>.
4. Shtovba S. D., Rudyi O. M. Ant colony optimization algorithms. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnic Institute*. 2010. No. 4. P. 62–69.
5. Pekar Yu., Brizina I., Kultun Ya., Ushakova I., Dorokhov O. Solving the traveling salesman problem. *Upravlinnia rozvytkom / Development Management*. 2020. Vol. 18, No. 1. P. 25–39.
6. Korol A. L., Manakov V. P. Methods for optimization of production scheduling at printing enterprises. *[Journal title]*. 2025. Vol. 2. P. 164–171.
7. Byshevets N. H., Byshovets N. M., Boikov A. I., Furtat S. O. Traveling salesman problem as a universal tool for route optimization. *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2024. No. 1(35). P. 97–102.
8. Little J., Murty K., Sweeney D., Karel C. An algorithm for the traveling salesman problem. *Operations Research*. 1963. Vol. 11, No. 6. P. 972–989.
9. Brucker P., Knust S. *Complex Scheduling*. Berlin: Springer, 2013. 352 p.

10. Pinedo M. L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. New York: Springer, 2016. 670 p.
11. Sato R. Word Tour: One-Dimensional Word Embeddings via the Traveling Salesman Problem. *Journal of Natural Language Processing*. 2022. Vol. 29, No. 4. P. 1297–1301. URL: <https://doi.org/10.5715/jnlp.29.1297>.
12. Sulistia N., Irwansyah I., Marwan M. Solving Traveling Salesman Problem Art Using Clustered Traveling Salesman Problem. *International Journal of Computing Science and Applied Mathematics*. 2025. Vol. 11, No. 1. P. 9. URL: <https://doi.org/10.12962/j24775401.v11i1.20259>.
13. Wang L., Wang X. V. *Cloud-Based Cyber-Physical Systems in Manufacturing*. Cham: Springer, 2018. 421 p.

doi: 10.32403/0554-4866-2026-1-91-237-249

OPTIMIZATION OF JOB SEQUENCING IN A COMPUTER- INTEGRATED PRINTING SYSTEM WITH STOCHASTIC STATE ESTIMATION OF THE PRODUCTION SYSTEM

P. I. Shepita¹, V. M. Ternovyi²

1. Lviv Polytechnic National University, Stepan Bandera Str., 12, Lviv 79013, Ukraine,
<https://orcid.org/0000-0001-8134-8014>, e-mail: petro.i.shepita@lpnu.ua

2. Lviv Polytechnic National University, Stepan Bandera Str., 12, Lviv 79013, Ukraine,
<https://orcid.org/0009-0004-5581-3356>, e-mail: volodymyr.m.ternovyi@lpnu.ua

The paper considers the problem of optimizing the sequence of job execution in a computer-integrated information system of a printing enterprise. The relevance of the study is determined by the need to improve the efficiency of production processes under conditions of increasing order complexity, diversity of materials, and variability of technological parameters. A distinctive feature of the work is the consideration of the stochastic nature of the production system, which is manifested through random disturbances, variations in setup times, and fluctuations in equipment workload.

A mathematical model of the problem is proposed, in which the job execution process is formalized as a combinatorial optimization problem analogous to the traveling salesman problem, using a cost matrix of transitions between jobs. The solution is based on the branch-and-bound method, which involves calculating lower bounds of the objective function and pruning non-promising solutions during the construction of the decision tree.

In contrast to classical approaches, the study introduces a subsystem for estimating the state of the production process based on a stochastic dynamic model. This subsystem enables real-time evaluation of system parameters, which are subsequently used to adaptively adjust the cost matrix. Such an approach makes it possible to take into account the influence of disturbances and changing production conditions on the optimization process.

A structural model is developed for integrating the optimization algorithm with CRM and MIS/ERP systems of a printing enterprise, enabling the implementation of a closed-loop production management system. This ensures the consistency of information flows, improves planning accuracy, and reduces equipment setup costs.

The results confirm the effectiveness of the proposed approach for production scheduling tasks and demonstrate its potential for implementation in intelligent decision-support systems for printing production.

Keywords: *production process optimization, printing enterprise, job sequencing, branch-and-bound method, traveling salesman problem, computer-integrated systems, stochastic processes, state estimation, production planning, MIS/ERP, CRM.*



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/)

© П. І. Шепіта, В. М. Терновий

Стаття надійшла до редакції 29.03.2026.

Received 29.03.2026

Прийнято до друку: 15.05.2026.

Accepted: 15.05.2026.

Опубліковано: 30.05.2026.

Published: 30.05.2026.