

О. Г. Жданова¹
В. Д. Попенко¹
Л. В. Рибачук¹
О. В. Савчук¹

ЗАДАЧА СКЛАДАННЯ ПЛАНУ РЕМОНТУ ОБ'ЄКТІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Розглянуто задачу двокритеріального планування робіт з відновлення електропостачання після аварійного відключення в умовах обмежених ресурсів — ремонтних бригад, які працюють паралельно. Така ситуація є типовою для міських інфраструктурних систем у критичних умовах, коли необхідно швидко ухвалювати рішення з урахуванням кількох суперечливих цілей. Математична постановка задачі враховує два критерії: мінімізацію середнього зваженого часу перебування громадян без електропостачання та мінімізацію загального часу роботи ремонтних бригад (*takespan*). Запропонована модель належить до класу задач складання розкладу на паралельних машинах з роботами, що мають ваги, які відображають соціальну значущість кожної роботи. Для розв'язання цієї задачі розроблено три алгоритми: евристичний, алгоритм локального пошуку з переміщенням робіт (АЛП1) та алгоритм локального пошуку з обміном робіт (АЛП2). Евристичний алгоритм поєднує підходи до оптимального складання розкладу на одній машині (за критерієм середнього зваженого часу) та ідеї балансування навантаження на кількох машинах (LPT-алгоритм). АЛП1 базується на поступовому поліпшенні початкового розкладу шляхом переміщення робіт між бригадами з оцінкою компромісу між двома критеріями. АЛП2 реалізує випадкові обміни парами робіт між машинами з відбором поліпшень за принципом справедливого компромісу, що забезпечує нижчу обчислювальну складність зі збереженням високої якості розв'язків. Проведено обчислювальні експерименти, які підтвердили ефективність розроблених алгоритмів. Встановлено, що АЛП1 та АЛП2 забезпечують поліпшення результатів, отриманих евристичним алгоритмом, у середньому на 3,5...5 %. Експерименти з різними параметрами задачі продемонстрували закономірне зростання часу роботи алгоритмів з розмірністю задачі, а також перевагу АЛП2 у швидкодії порівняно з АЛП1 завдяки обмеженню кількості локальних змін. Запропонований підхід дозволяє ефективно розв'язувати задачу планування відновлення електропостачання, поєднуючи класичні методи теорії розкладів з урахуванням соціально важливих аспектів.

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація, теорія розкладів, паралельні машини, множини, евристичний алгоритм, локальний пошук, компромісний розв'язок.

Вступ

У сучасних умовах зростання складності інфраструктурних систем особливої ваги набувають задачі, пов'язані з ефективним розподілом обмежених ресурсів у критичних ситуаціях. Однією з таких задач є оперативне планування відновлення електропостачання після аварійного відключення у міських районах. Своєчасне відновлення впливає на безпеку громадян, економічну стабільність та функціонування критичної інфраструктури. Прийняття рішень у таких умовах супроводжується необхідністю одночасного врахування кількох суперечливих критеріїв.

Подібні задачі належать до класу багатокритеріальних задач оптимізації, які активно досліджуються в сучасній теорії розкладів, зокрема в контексті систем з паралельними машинами. Сучасні дослідження [1]—[4] демонструють інтенсивний розвиток методів багатокритеріальної оптимізації, включно з евристикою, локальним пошуком, еволюційними алгоритмами та гібридними підходами. Більшість наявних моделей фокусуються на виробничих або сервісних системах і мало враховують соціально-критичний контекст, властивий задачам відновлення після надзвичайних подій.

В роботі запропоновано задачу двокритеріального планування відновлення електропостачання, її особливістю є одночасне врахування соціального критерію (мінімізації середнього зваженого часу перебування громадян без електропостачання) та операційного критерію (мінімізації загального часу роботи бригад). Досліджувана задача є поєднанням двох класичних задач теорії розкладів $P \parallel C_{\max}$ та $P \parallel \sum w_j C_j$ [5], у якій обидва критерії мають рівнозначну важливість. Для порівняння розв'язків запропоновано використовувати принцип справедливого компромісу, який відповідає сучасним підходам, що розвиваються [4], [6]. Цей принцип передбачає збалансоване врахування обох критеріїв на основі їхніх відносних змін.

У межах дослідження розроблено три ефективних алгоритми — евристичний, а також два варіанти локального пошуку (з переміщенням та обміном робіт), які поєднують класичні підходи до розв'язання задач теорії розкладів та враховують специфіку цільових функцій. Такий підхід є узгодженим з сучасними тенденціями, орієнтованими на пошук Парето-ефективних рішень з урахуванням структури задачі [7]—[11].

Таким чином, ця робота — це практичний внесок у розробку інструментів для прийняття рішень у кризових умовах, що є актуальним напрямом як в інформатиці, так і в управлінні критичними інфраструктурами.

Мета дослідження полягає у розробленні та порівняльному аналізі алгоритмів, призначених для задачі складання плану ремонту об'єктів електричної мережі.

Постановка задачі

Змістова постановка задачі. В n районах міста за певних причин відбулось аварійне відключення електропостачання. Для ліквідації наслідків аварій є m ($m \geq 2$) бригад ремонтників. Відомо, що в i -му районі орієнтовно проживає u_i громадян, а час, необхідний ремонтникам для відновлення електропостачання району, становить p_i годин (часом переміщення бригад з об'єкту на об'єкт можна знехтувати). Штат бригад є таким, що дозволяє працювати їм в режимі 24/7.

Скласти такий план ремонту об'єктів електричної мережі, за якого досягає мінімуму: середній час перебування громадян без електропостачання та загальний час роботи ремонтних бригад.

Математична постановка задачі

Вхідні дані: n — кількість районів міста; $J = \{1, 2, \dots, n\}$ — множина районів міста; m — кількість бригад ремонтників; u_i — кількість громадян, що проживають в районі i ; p_i — час, необхідний ремонтникам для відновлення електропостачання району i ($i = 1, 2, \dots, n$). Бригади працюють паралельно та є взаємозамінними у тому сенсі, що кожна з бригад може виконувати будь-яку роботу з відновлення електропостачання району. Передбачається, перебіг процесу відновлення електропостачання кожного району безперервний до його завершення. Необхідно знайти розклад, за якого досягає мінімуму середній час перебування громадян без світла та загальний час роботи ремонтних бригад.

Ця задача відноситься до задач теорії розкладів. З урахуванням усталеної термінології теорії розкладів, будуючи математичну модель, під *роботою* будемо розуміти відновлення електропостачання району, а *машинами* будемо називати ремонтні бригади.

Змінні (шукані величини). Необхідно знайти $S = \{S_1, \dots, S_m\}$ — розклад виконання робіт (множину підмножин робіт), де упорядкована множина робіт $S_j = (i_1^j, \dots, i_{n_j}^j)$ — розклад виконання робіт машиною j , де n_j — кількість робіт, що виконується цією машиною ($j = 1, 2, \dots, m$). Розклад S для кожної роботи r ($r = 1, 2, \dots, n$) однозначно визначає тривалість її виконання F_r (ці величини в сукупності визначають значення цільової функції). Тривалість виконання роботи в розкладі S визначається номером машини, яка виконує цю роботу, і порядковим номером роботи в розкладі цієї машини. Тривалість виконання роботи, що стоїть в позиції r в розкладі S_j j -ї машини позначимо так:

$$F_{[r]}^j = \sum_{k=1}^r p_{i_k^j}.$$

Обмеження. Розклад має задовольняти такі умови:

$$\sum_{j=1}^m n_j = n, \{i_1^1, \dots, i_{n_1}^1, \dots, i_1^m, \dots, i_{n_m}^m\} = \{1, 2, \dots, n\}.$$

Цільова функція (ЦФ). Необхідно знайти такий розклад, за якого:

– досягає мінімуму середній час перебування громадян без електропостачання (середній зважений час виконання робіт) (ЦФ1)

$$\bar{F}_u = \frac{1}{\sum_{q=1}^n u_q} \sum_{r=1}^n u_r F_r = \frac{1}{\sum_{q=1}^n u_q} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{n_j} u_{i_j} F_{i_j} \rightarrow \min ;$$

– досягає мінімуму загальний час роботи ремонтних бригад (максимальний час завершення робіт) (ЦФ2)

$$F_{\max} = \max \left\{ \sum_{k=1}^{n_1} p_{i_k}^1, \dots, \sum_{k=1}^{n_m} p_{i_k}^m \right\} \rightarrow \min .$$

В англійській літературі ЦФ2 називають *makespan*.

Алгоритми розв'язання задачі

Ця задача належить до класу задач багатокритеріальної оптимізації, а саме є задачею складання розкладу з паралельними машинами та двома критеріями оптимізації. Розроблено такі алгоритми: евристичний (ЕА); алгоритм локального пошуку з переміщенням робіт (далі — АЛП1); алгоритм локального пошуку з обміном роботами (далі — АЛП2).

Розробка евристичного алгоритму

Ідея розробленого ЕА базується на двох положеннях: 1) у випадку однієї машини (бригади), розклад, у якому роботи (райони) впорядковані за неспаданням відношення p_i/u_i є оптимальним щодо першої цільової функції — середнього зваженого часу завершення робіт [5]; 2) у випадку кількох паралельних машин (бригад), для мінімізації максимального часу завершення робіт (*makespan*, тобто другої цільової функції), добрі результати демонструє алгоритм LPT (*Longest Processing Time First*) [5]. Суть алгоритму: усі роботи впорядковуються за незростанням p_i (тобто тривалості відновлення), після чого по черзі призначаються на машину (бригаду), яка на цей момент має найменше завантаження.

Схема ЕА

```

1  Вхід:  $m, n, u = (u_1, \dots, u_n), p = (p_1, \dots, p_n)$ 
2  Вихід:  $S = (S_1, \dots, S_j, \dots, S_m), \bar{F}_u, F_{\max}$ 
3  for  $j$  to  $m$  do //Ініціалізація розкладу
4       $S_j = \emptyset$ 
5       $F_j = 0$  //Тривалість проходження робіт на машині  $j$ 
6  end for
7  Відсортувати роботи множини  $J$  за не спаданням значення  $(p_i/u_i)$ 
8  for  $i$  in  $J$  do
9      Вибрати машину  $j$ , яка має найменшу поточну тривалість проходження робіт  $F_j$ 
10      $S_j = S_j \cup \{i\}$  //Призначити роботу  $i$  на машину  $j$ 
11      $F_j = F_j + p_i$  //Перерахувати тривалість проходження роботи  $i$  на машині  $j$ 
12 end for
13 Обчислити значення ЦФ для розкладу  $S$ :  $\bar{F}_u, F_{\max}$ 
```

Складність алгоритму становить $O(n \log n)$.

Розробка алгоритму локального пошуку з переміщенням

Ідея алгоритму ЛП1 полягає в поліпшенні початкового розкладу, отриманого за розробленим ЕА, шляхом локальних змін — переміщення робіт між машинами.

Пари машин переглядаються одна за одною. Для кожної пари намагаємось поліпшити розклад,

переміщуючи роботи з однієї машини на іншу, розміщуючи їх у новій машині за зростанням відношення тривалості до кількості мешканців. Якщо такий обмін зменшує значення хоча б однієї цільової функції без суттєвого погіршення іншої (за принципом справедливого компромісу), зміни зберігаються. Процес триває, поки всі пари машин не будуть переглянуті.

У контексті задачі планування відновлення електропостачання в міських районах, де дві цільові функції — мінімізація середнього часу перебування громадян без світла (середньозважений час завершення робіт) та мінімізація загального часу роботи ремонтних бригад (час завершення останньої роботи) — можуть бути взаємно суперечливими, принцип справедливого компромісу передбачає збалансоване врахування обох критеріїв на основі їхніх відносних змін.

Такий підхід допускає незначне погіршення одного з критеріїв лише за умови, що інший поліпшується суттєвіше (у відсотковому вираженні), що дозволяє зберегти баланс інтересів між сторонами — громадянами та ремонтними бригадами.

Схема АЛП1

```

1   Вхід:  $m, n, u = (u_1, \dots, u_n), p = (p_1, \dots, p_n)$ 
2   Вихід:  $S_{best} = (S_1, \dots, S_j, \dots, S_m), \bar{F}_u, F_{max}$ 
   Побудувати початковий розклад  $S$  за допомогою ЕА
3    $S_{best} = S$ 
4   for  $j = 1$  to  $m$  do
5       for  $k = 1$  to  $m$  do
6           if  $j = k$  then continue
7           for  $i$  in  $S_j$  do
8               Перемістити роботу  $i$  з  $S_j$  в  $S_k$ 
9               Відсортувати роботи  $S_k$  за  $p_i/u_i$ 
10              Обчислити значення ЦФ для отриманого розкладу  $S_{temp}$ 
11              if  $S_{temp}$  кращий за  $S_{best}$  за принципом справедливого компромісу
12                  then  $S_{best} = S_{temp}$ 
13
14   end for
15   end for
16   end for

```

Теоретична оцінка трудомісткості алгоритму становить $O(m^2 n \log n)$.

Розробка алгоритму локального пошуку з обміном

АЛП2 базується на обміні парами робіт між машинами з метою поліпшення поточного розкладу, отриманого ЕА. Для кожної пари машин (j, k) , де $j \neq k$, виконується до p випадкових обмінів пар робіт (i_j, i_k) , де $i_j \in S_j, i_k \in S_k, p = \min(|S_j|, |S_k|)$ — кількість ітерацій обміну (тобто менша з двох кількостей робіт, що виконуються цими машинами). Для вибраної пари машин випадково вибирається по одній роботі з кожної машини; виконується обмін цих робіт; на кожній машині підсумкова послідовність робіт сортується за неспаданням p_i/u_i ; обчислюються значення обох цільових функцій; якщо новий розклад поліпшує хоча б один критерій (у відносних змінах) без значного погіршення іншого — він зберігається як новий поточний найкращий. В розробленому АЛП2 перебираються не всі можливі обміни, а лише певна кількість випадкових, що оснований на таких міркуваннях. Повний перебір усіх можливих обмінів призведе до значної трудомісткості і може бути неприйнятним для задач з великим n . У задачах теорії розкладів та комбінаторної оптимізації доведено (зокрема у [5], [12] та ін.), що випадковий локальний пошук з обмеженою кількістю ітерацій дає хороші наближені розв'язки за значно меншою обчислювальною складністю. Обмін — це сильніша операція, ніж переміщення. Один обмін змінює два елементи одночасно, а це вже досить велика локальна зміна, тому немає необхідності масово переглядати всі обміни — кількох «влучних» обмінів цілком достатньо. Це означає, що ми свідомо нехтуємо повнотою локального пошуку, щоби отримати кращий компроміс між якістю розв'язку та швидкодією.

Дослідження розроблених алгоритмів

Результати дослідження впливу параметрів задачі на ефективність алгоритмів

Проведено експеримент для дослідження впливу тривалостей робіт p_i на ефективність алгоритмів. У рамках експерименту розглядалися: задачі з відносно малими тривалостями робіт у межах $[1,3]$ (далі — задачі типу M), та задачі з відносно великими тривалостями у межах $[10,50]$ (далі — задачі типу L), при цьому в обох випадках використовувалися однакові характеристики розкиду значень ваг u_i . Показником ефективності слугувало відносне поліпшення розв'язку за принципом справедливих компромісів у разі переходу від розкладу, отриманого евристичним алгоритмом, до розкладу, сформованого одним з алгоритмів локального пошуку. Згенеровано по 200 задач кожного типу. В результаті: для задач типу M середнє сумарне відносне поліпшення за принципом справедливих компромісів становило 5 %, для задач типу L — 3,5 %.

Часова складність алгоритмів

Проведено експерименти з метою визначення залежності часу роботи алгоритмів від кількості машин m та кількості робіт n . Для цього кількість машин m змінювалася з кроком 10 у межах від 10 до 400, а кількість робіт n — з кроком 50 у межах від 50 до 2000. Як можемо бачити на графіку (рис. 1), зі збільшенням розмірності задачі спостерігається відповідне зростання часу виконання. Алгоритми локального пошуку — як з переміщенням (АЛП1), так і з обміном (АЛП2) — демонструють подібну часову складність, яка суттєво перевищує швидкодню евристичного алгоритму. Водночас зі зростанням розмірності АЛП2 виявляється дещо швидшим, що пояснюється специфікою його реалізації: обміни виконуються лише для частини робіт (випадково вибраних пар), тоді як у АЛП1 розглядаються всі можливі переміщення. Таким чином, АЛП2 виконує менше перевірок, що забезпечує йому перевагу за часом, хоча і за рахунок неповного перегляду простору розв'язків.

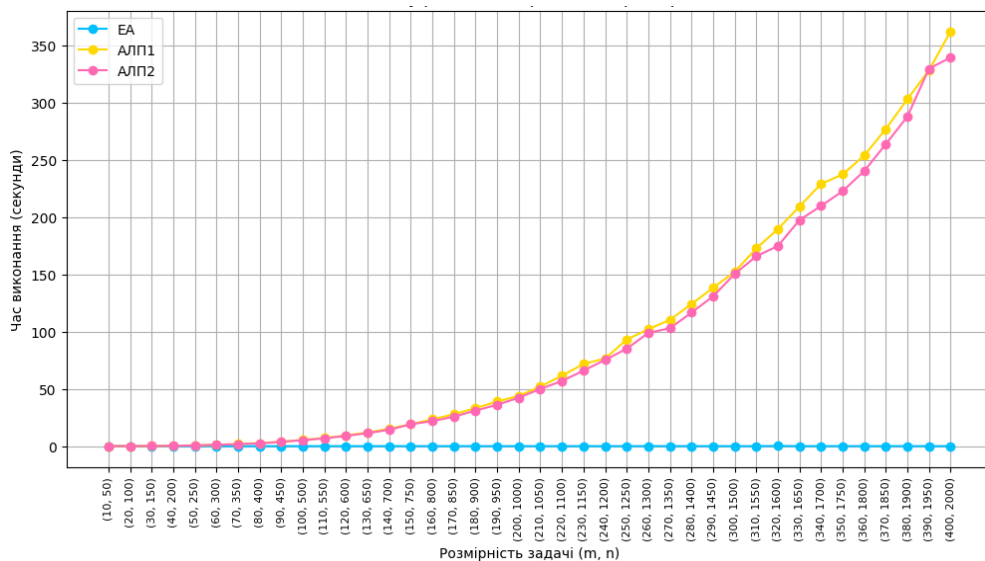


Рис. 1. Залежність часу роботи алгоритмів від розмірності задачі

Порівняння алгоритмів за точністю

Метою експериментів є дослідження впливу розмірності задачі — кількості машин m та кількості робіт n — на точність алгоритмів. Як показник точності використано значення відносного поліпшення розв'язку за принципом справедливих компромісів порівняно з результатом ЕА. У межах експерименту параметр m змінювався з кроком 10 у межах від 10 до 100, а параметр n — з кроком 50 у межах від 50 до 500. Значення тривалостей робіт вибирались у діапазоні $[10; 80]$, а ваги — у діапазоні $[10; 100]$. Для кожної пари (m, n) згенеровано 40 задач, які розв'язано за допомогою трьох алгоритмів: ЕА, АЛП1 та АЛП2. За результатами кожного запуску фіксувалися час виконання та значення обох цільових функцій. Для побудови графіків (рис. 2) використовувалися усереднені значення результатів, що дозволило зменшити вплив випадковості під час генерації даних та зробити висновки статистично обґрунтованими.

Усі три алгоритми: ЕА, АЛП1 та АЛП2, — демонструють дуже схожі результати за значенням ЦФ1.

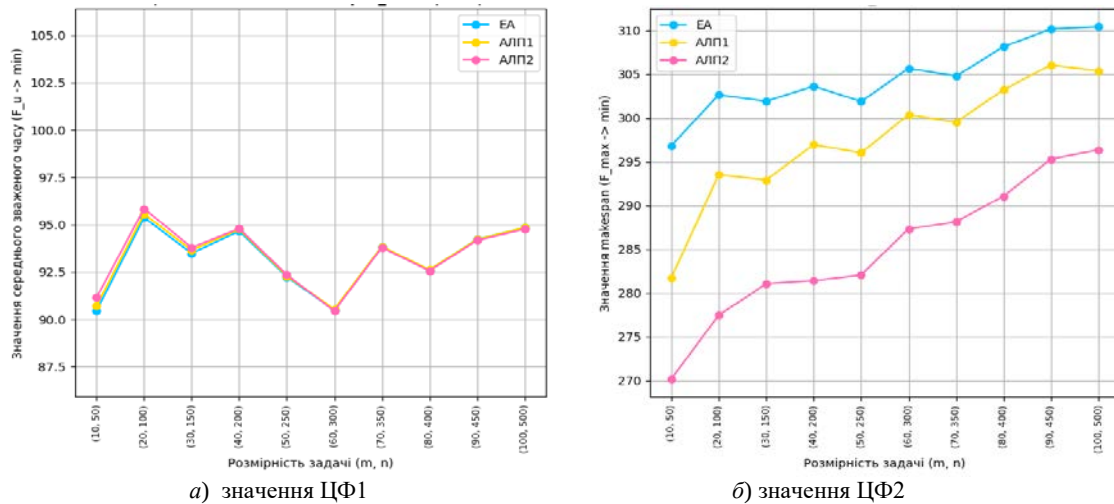


Рис. 2. Вплив розмірності задач на значення ЦФ

Ця подібність пояснюється тим, що ЕА формує розв'язки з уже досить низьким значенням ЦФ1, що залишає АЛП1 і АЛП2 мінімальні можливості для подальшого поліпшення цього критерію. Натомість у напрямку поліпшення ЦФ2 локальний пошук виявився ефективним, оскільки дозволяє суттєвіше зменшити загальний час завершення робіт за рахунок перебудови розкладу та перерозподілу навантаження між бригадами.

Висновки

У роботі розглянуто задачу двокритеріального планування робіт з відновлення електропостачання в умовах обмежених ресурсів — ремонтних бригад, що працюють паралельно. Особливістю постановки є необхідність одночасної мінімізації середнього часу перебування громадян без електропостачання та загального часу роботи бригад. Такий підхід формує багатокритеріальну задачу розкладу на паралельних машинах з ваговими коефіцієнтами, які відображають соціальну значущість кожної роботи (району). За нотацією Грехема маємо задачу $P \parallel \sum w_j C_j + C_{\max}$.

Запропоновані алгоритми базуються на принципі справедливого компромісу між двома цільовими функціями, що дозволяє забезпечити збалансованість розв'язків у контексті суперечливих інтересів — швидке відновлення електропостачання для громадян та ефективне використання ресурсів ремонтних служб.

Для розв'язання задачі розроблено три алгоритми:

- евристичний алгоритм, який поєднує ідеї методів розв'язання задачі складання розкладу для однієї машини виконання робіт з різними вагами та балансування навантаження на машинах;
- алгоритм локального пошуку з переміщенням робіт, що дозволяє поступово поліпшувати розклад, переміщуючи роботи між машинами з метою досягнення компромісного розв'язку;
- алгоритм локального пошуку з обміном, який передбачає перестановку пар робіт між машинами з метою досягнення компромісного розв'язку.

Проведені дослідження засвідчили, що алгоритми локального пошуку (АЛП1 та АЛП2) забезпечують поліпшення розв'язків, отриманих евристичним методом, головним чином за рахунок зменшення значення ЦФ2 (makespan), іноді при цьому супроводжуючись незначним погіршенням першої цільової функції.

Запропонований підхід доповнює наявні моделі, пропонуючи як нову прикладну інтерпретацію, так і ефективні алгоритмічні рішення, які можуть бути адаптовані до інших сценаріїв відновлення інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Y. K. Lin, and T. Y. Yin, "Generating bicriteria schedules for correlated parallel machines involving tardy jobs and weighted completion time," *Annals of Operations Research*, vol. 319, pp. 1655-1688, 2022, <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04043-x>.
- [2] X. Liu, Y. Feng, N. Ding, R. Li, and X. Chen, "Multi-criteria scheduling in parallel environment with learning effect," *Foundations of Computing and Decision Sciences*, vol. 49, no. 1, pp. 3-20, 2024, <https://doi.org/10.2478/fcds-2024-0001>.
- [3] C. H. Liu, and W. N. Tsai, "Multi-objective parallel machine scheduling problems by considering controllable processing times," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 67, no. 4, pp. 654-663, 2016, <https://doi.org/10.1057/jors.2015.82>.
- [4] J. Mar-Ortiz, A. J. Ruiz Torres, and B. Adenso-Díaz, "Scheduling in parallel machines with two objectives: Analysis of factors that influence the Pareto frontier," *Operational Research*, vol. 22, pp. 4585-4605, 2022, <https://doi.org/10.1007/s12351-021-00684-9>.
- [5] M. L. Pinedo, *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*, 5th ed. New York, NY, USA: Springer, 2016,

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-26580-3>.

[6] J. Xu, and R. Nagi, "Identical parallel machine scheduling to minimise makespan and total weighted completion time: A column generation approach," *International Journal of Production Research*, vol. 51, no. 23-24, pp. 7091-7104, 2013, <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.825379>.

[7] P.-F. Dutot, L. Eyraud, G. Mounié, and D. Trystram, "Bi-criteria algorithm for scheduling jobs on cluster platforms," *arXiv:cs/0405006*, 2004, <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0405006>.

[8] X. Zhu, J. Xu, J. Ge, Y. Wang, and Z. Xie, "Multi-objective parallel machine scheduling with eligibility constraints for the kitting of metal structural parts," *Machines*, vol. 10, no. 10, p. 836, 2022, <https://doi.org/10.3390/machines10100836>.

[9] W. Li, W. Zhai, and X. Chai, "Online bi-criteria scheduling on batch machines with machine costs," *Mathematics*, vol. 7, no. 10, p. 960, 2019, <https://doi.org/10.3390/math7100960>.

[10] J. Rocholl, L. Mönch, and J. Fowler, "Bi-criteria parallel batch machine scheduling to minimize total weighted tardiness and electricity cost," *Journal of Business Economics*, vol. 90, pp. 1345-1381, 2020, <https://doi.org/10.1007/s11573-020-00970-6>.

[11] A. Aalaee, V. Kayvanfar, and H. Davoudpour, "A multi-objective optimization for preemptive identical parallel machines scheduling problem," *Comput. and Applied Mathematics*, vol. 36, pp. 1367-1387, 2017, <https://doi.org/10.1007/s40314-015-0298-0>.

[12] E.-G. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2009, <https://doi.org/10.1002/9780470496916>.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 11.04.2025

Жданова Олена Григорівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій;
Попенко Володимир Дмитрович — канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних систем та технологій;
Рибачук Людмила Віталіївна — канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій, e-mail: rybachuk.liudmyla@lil.kpi.ua ;

Савчук Олена Володимирівна — канд. техн. наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри інформаційних систем та технологій.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

O. H. Zhdanova¹
V. D. Popenko¹
L. V. Rybachuk¹
O. V. Savchuk¹

The Problem of Scheduling the Maintenance of Power Grid Facilities

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

This paper addresses a bi-criteria scheduling problem for restoring power supply after an emergency outage under limited resources — specifically, repair crews operating in parallel. Such situations are typical for urban infrastructure systems under critical conditions, where rapid decision-making is required while simultaneously considering multiple conflicting objectives. The mathematical formulation of the problem involves two objectives: minimizing the average weighted blackout time for citizens and minimizing the total working time of the repair crews (makespan). The proposed model belongs to the class of parallel machine scheduling problems with weighted jobs, where weights reflect the social importance of each task (district). To solve this problem, three algorithms have been developed: a heuristic algorithm, a local search algorithm with job relocation (LS1), and a local search algorithm with job exchange (LS2). The heuristic algorithm combines strategies for optimal single-machine scheduling (based on average weighted completion time) with load-balancing techniques for parallel machines (LPT algorithm). LS1 is based on the step-by-step improvement of the initial schedule by relocating jobs between crews while evaluating trade-offs between the two objectives. LS2 performs randomized exchanges of job pairs between machines and retains improvements based on the principle of fair compromise, which ensures lower computational complexity while maintaining high solution quality. Computational experiments confirm the effectiveness of the developed algorithms. It was found that LS1 and LS2 improve upon the heuristic solution by an average of 3.5...5 %. Experiments with different problem sizes showed consistent increases in execution time as task complexity grows, with LS2 outperforming LS1 in runtime due to its limited number of local modifications. The proposed approach enables efficient power restoration planning by integrating classical scheduling techniques with socially meaningful decision criteria.

Keywords: multi-objective optimization, scheduling theory, parallel machines, sets, heuristic algorithm, local search, compromise solution.

Zhdanova Olena H. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Information Systems and Technologies;

Popenko Volodymyr D. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Information Systems and Technologies;

Rybachuk Liudmyla V. — Cand. Sc. (Phys-Math.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Information Systems and Technologies, e-mail: rybachuk.liudmyla@lil.kpi.ua ;

Savchuk Olena V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Associate Professor of the Chair of Information Systems and Technologies