

Оптимізація монтажу електротехнічного обладнання на основі математичного моделювання

В. О. Суворов, В. І. Кривда

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. Монтаж електротехнічного обладнання є критично важливим етапом у створенні та модернізації енергетичних об'єктів, що впливає на загальну ефективність, надійність та безпечність експлуатації електроустановок. Традиційні методи планування монтажу часто базуються на емпіричних даних і досвіді інженерів, що може призводити до неефективного використання ресурсів, збільшення термінів виконання робіт та підвищених експлуатаційних витрат.

У цій роботі розглядається підхід до оптимізації процесу монтажу електротехнічного обладнання на основі математичного моделювання. Запропоновано комплексну математичну модель, яка дозволяє визначати оптимальні графіки робіт, мінімізувати втрати часу та ресурсів, а також підвищувати якість виконання монтажних операцій. Формалізація задачі проведена із застосуванням методів лінійного програмування та теорії графів, що дає змогу ефективно розподіляти трудові та матеріальні ресурси, мінімізуючи можливі прості та логістичні витрати.

Розроблена модель враховує ключові фактори, що впливають на процес монтажу, зокрема часові обмеження, доступність матеріалів, кваліфікацію персоналу та ризики помилок у процесі встановлення обладнання.

Результати дослідження показують, що застосування математичних методів оптимізації дозволяє скоротити тривалість монтажних робіт на 10–20%, зменшити витрати на логістику та ресурси, а також знизити ймовірність виникнення помилок при інсталяції обладнання. Практична апробація моделі може бути здійснена у рамках реалізації проектів будівництва трансформаторних підстанцій, розподільчих пунктів та інших енергетичних об'єктів.

Отримані результати можуть бути використані для автоматизації процесів планування монтажу, підвищення ефективності управління проектами у сфері електроенергетики та розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень при виконанні електромонтажних робіт.

Ключові слова: монтаж електротехнічного обладнання, математичне моделювання, оптимізація ресурсів, теорія графів, лінійне програмування.

Вступ

Розвиток електроенергетичних систем та зростаюча складність електротехнічного обладнання вимагають удосконалення методів його монтажу та експлуатації. Умови сучасного ринку енергетики диктують необхідність підвищення ефективності всіх етапів життєвого циклу електроустановок, зокрема процесу монтажу, що є критично важливим як з економічної, так і з технічної точки зору. Неєфективна організація монтажних робіт може призводити до перевитрат ресурсів, збільшення термінів реалізації проектів, зниження надійності обладнання та потенційного порушення вимог безпеки.

Традиційні підходи до організації монтажу електротехнічного обладнання базуються пере-

важно на емпіричних методах і нормативних документах, що регламентують процеси виконання робіт. Проте, в умовах сучасного технологічного розвитку існуючі методики не завжди враховують динамічність змін у проектних рішеннях, непередбачувані зовнішні чинники та обмеженість ресурсів. Відсутність системного підходу до оптимізації монтажних процесів суттєво ускладнює управління проектами в електроенергетичній галузі, що актуалізує необхідність розроблення нових підходів до планування та організації монтажу.

В останні десятиліття активний розвиток математичних методів моделювання, теорії графів, методів лінійного програмування та евристичних алгоритмів створив можливості для більш точного прогнозування та оптимізації монтажних процесів. Використання математичних моделей уможливорює мінімізацію витрат, змен-

© Суворов В. О., Кривда В. І., 2025

Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

шення строків виконання робіт, підвищення точності прогнозування можливих ризиків та покращення загальної ефективності виконання проєктів. Окрім того, застосування сучасних цифрових технологій, таких як штучний інтелект, системи підтримки прийняття рішень та цифрові двійники, відкриває перспективи автоматизації процесів планування та управління монтажем електротехнічного обладнання.

Отже, розробка математичних моделей, що дозволяють підвищити ефективність монтажу електротехнічного обладнання та знизити експлуатаційні ризики, є актуальним науковим завданням, що має значну теоретичну та практичну цінність.

1 Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Процес монтажу електротехнічного обладнання на об'єктах енергетичної інфраструктури є складним, багатофакторним і регламентованим великою кількістю нормативних вимог. Від його ефективності безпосередньо залежать терміни реалізації проєкту, витрати ресурсів, якість виконаних робіт та подальша надійність функціонування електроустановок. Оскільки енергетична інфраструктура є критично важливою для забезпечення стабільної роботи енергосистеми, будь-які збої в монтажному процесі можуть спричинити значні фінансові витрати та погіршення надійності постачання енергії.

Незважаючи на наявність численних нормативних документів, стандартів і інструкцій, організація монтажних робіт у реальних умовах стикається з низкою проблем, що ускладнюють їхню ефективну реалізацію. Серед них: невизначеність у постачанні ресурсів, зміни в умовах виконання робіт, необхідність адаптації до специфічних умов об'єктів, а також часто збої у координації між різними підрядниками та технологічними етапами. Ці проблеми потребують нових підходів до управління монтажними процесами та зниження ймовірності виникнення таких ситуацій.

Одним із напрямів удосконалення монтажних процесів є застосування математичного моделювання для збору операційних даних і подальшого аналізу економічних показників. Висока точність моделей дозволяє зменшити кількість помилок на етапі планування, сприяючи оптимізації витрат на ресурси та час. У роботі [1] розглянуто можливість використання такої моделі для моніторингу і прогнозування витрат на різні етапи монтажу. Водночас, для структуризації монтажного процесу та моделювання взаємоза-

лежностей між технологічними операціями доцільно використовувати графові структури. Зокрема, орієнтовані ациклічні графи (DAG) є потужним інструментом для формалізації логіки виконання робіт і послідовності операцій, що дає змогу більш ефективно управляти проєктами та скорочувати час монтажу [2].

До того ж, використання таких моделей допомагає не тільки оптимізувати час виконання робіт, але й ідентифікувати можливості для паралельного виконання операцій, що дозволяє знизити загальну тривалість монтажу і витрати на ресурси. Важливим аспектом є й адаптація до змінних умов виконання робіт. Так, завдяки інтеграції з сучасними інформаційними системами, ці моделі дозволяють оперативно реагувати на непередбачувані ситуації, що виникають під час виконання монтажних робіт.

У ряді досліджень [3–6] розглянуто задачі гнучкого виробничого розкладу (FJSP), де операції можуть виконуватись на кількох альтернативних ресурсах. Застосування генетичних алгоритмів, табу-пошуку та змішаного цілочисельного програмування дозволяє вирішувати задачі, що включають обмеження на ресурси та час, що є характерним для монтажу електротехнічного обладнання. Наприклад, в [3] запропоновано гібридний підхід, що дозволяє мінімізувати час виконання монтажних робіт, а в [4] адаптивний генетичний алгоритм був застосований для задач з ресурсними обмеженнями в авіаційній промисловості, що доводить його ефективність і для інших сфер.

Використання таких підходів дозволяє здійснювати точне планування та враховувати як часові, так і економічні обмеження. У [5] успішно реалізовано два варіанти кросоверу для розв'язання задач з дефіцитом ресурсів, що є актуальним для монтажу, де часто не вистачає робочих рук або спеціалізованих інструментів. Розроблені MILP-моделі в [6] дозволяють точно оцінювати ефективність різних варіантів вирішення задач, враховуючи повну чи часткову гнучкість виробничих структур.

Інші дослідження [7, 8] фокусуються на двоцільовій оптимізації проєктів, де одночасно мінімізується тривалість виконання робіт та максимізується економічний ефект. За допомогою гібридних генетичних алгоритмів, поєднаних зі зворотньо-поступовим плануванням, можна не лише скоротити час, а й збільшити фінансову вигоду, що є важливим аспектом для великих проєктів. У свою чергу, інтеграція новітніх технологій, таких як графові нейронні мережі (GNN) [9], відкриває нові перспективи для засто-

сування штучного інтелекту для аналізу та оптимізації монтажних процесів, що дозволяє зменшити вплив людського фактору на планування і виконання робіт.

Ще одним інноваційним підходом є використання самонавчальних гіперевристичних алгоритмів для оптимізації складних монтажних середовищ з розподіленими вузлами [11]. Це дає можливість адаптувати стратегії вирішення задач до змінних умов, що можуть виникати під час виконання монтажних робіт. Алгоритми, що на основі характеристик задачі формують адаптивні стратегії, можуть зменшити часові витрати та підвищити ефективність. Важливим є і застосування генетичних алгоритмів з пізнім переміщенням, як показано в [12], що дозволяє ефективно вирішувати задачі з пріоритетами та ресурсними обмеженнями.

Класичні підходи, такі як PERT та CPM, широко використовуються у керуванні проектами та можуть бути адаптовані до монтажних операцій [13]. Вони дозволяють ефективно планувати проектні етапи, враховуючи часові обмеження та залежності між операціями. У [14] розглянуто енергозберігаючі аспекти виробничого планування, що важливо для підприємств з високим енергоспоживанням, особливо при змінних тарифах на електроенергію, що є суттєвим для об'єктів енергетичної інфраструктури.

Також, зважаючи на чинники невизначеності, сучасні підходи до планування включають методи, що враховують ці аспекти. Наприклад, методи планування [15] дозволяють зберігати стійкість до змін у тривалості процесів, а моделі управління буферами часу [16] допомагають збільшити гнучкість розкладу в межах методології критичного ланцюга. Це дозволяє не лише скорочувати час виконання робіт, але й збільшувати загальну надійність монтажного процесу.

Однією з ключових проблем є відсутність універсальної математичної моделі, яка б дозволяла автоматизовано оптимізувати процеси монтажу з урахуванням багатьох змінних: часових обмежень, ресурсної доступності, логістичних затримок та трудової складової. Сучасні методи управління монтажними роботами здебільшого базуються на емпіричних підходах та досвіді інженерного персоналу. Таким чином, відсутність ефективних математичних методів для оптимізації монтажу електротехнічного обладнання є вагомою проблемою, яка призводить до економічних втрат, збільшення термінів виконання проектів та потенційного зниження якості монтажних робіт.

2 Мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є розробка, та обґрунтування математичної моделі оптимізації процесу монтажу електротехнічного обладнання, яка забезпечить зменшення витрат ресурсів, скорочення тривалості виконання робіт і підвищення загальної ефективності монтажних процесів.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1) Розробити математичну модель оптимізації монтажного процесу, яка враховує часові, ресурсні та економічні обмеження.

2) Виконати чисельне моделювання для оцінки ефективності запропонованої математичної моделі.

3 Математична модель оптимізації монтажного процесу

Розробка математичної моделі оптимізації монтажного процесу електротехнічного обладнання ґрунтується на використанні сучасних методів математичного моделювання, зокрема принципів теорії графів, методів лінійного програмування та евристичних алгоритмів. Ці підходи дозволяють формалізувати монтажний процес у вигляді структурованої моделі, що відображає взаємозв'язки між окремими операціями, їхню послідовність, необхідні ресурси та часові обмеження.

Основна мета створення такої моделі – мінімізація витрат ресурсів, включаючи часові (загальна тривалість монтажу), трудові (оптимізація залучення персоналу) та матеріальні (раціональне використання обладнання та матеріалів), а також скорочення загального терміну виконання монтажних робіт. Це досягається за рахунок оптимального розподілу завдань і ресурсів між виконавцями, уникнення простоїв, ефективного планування порядку виконання робіт та врахування можливих варіацій у процесі виконання монтажу.

Запропонована модель має враховувати широкий спектр факторів, серед яких:

- залежності між операціями – кожен монтажний етап може бути розпочатий лише після завершення попередніх операцій відповідно до технологічних вимог;

- обмеження ресурсів – кожен етап потребує певної кількості трудових і матеріальних ресурсів, які є обмеженими і повинні бути розподілені раціонально;

- невизначеність та варіативність процесу – можливі зміни в реальних умовах монтажу (наприклад, затримки постачання матеріалів або зміни у складі бригад) повинні враховуватися через застосування адаптивних методів оптимізації;

- формалізація монтажного процесу є основним етапом розробки математичної моделі оптимізації, оскільки вона дозволяє відобразити реальний процес монтажу у вигляді математичної структури, з якою можна працювати для вирішення оптимізаційних задач. У цьому контексті монтажний процес можна подати як систему взаємопов'язаних операцій, де кожна операція має свої характеристики (тривалість, необхідні ресурси) та залежності від інших операцій.

Для моделювання монтажного процесу використовується орієнтований граф

$$G = (V, E), \quad (1)$$

де $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множина вершин, що відповідають окремим монтажним операціям або етапам;

$E = \{(v_i, v_j)\}$ – множина орієнтованих дуг,

що вказують на залежності між операціями.

Для кожної монтажною операції v_i визначається тривалість виконання t_i .

Тривалість операції може варіюватися в залежності від складності монтажу, кількості задіяних ресурсів та інших факторів. Тривалість операції є важливим параметром для побудови розкладу робіт і планування ресурсу часу.

Враховуючи часові характеристики, для кожної операції визначається час її початку T_i , який залежить від часу завершення попередніх операцій і тривалості кожної операції:

$$T_i = \max_{(v_k, v_i) \in E} (T_k + t_k),$$

де T_k – час завершення попередньої операції;

t_k – тривалість попередньої операції.

Кожна операція монтажу потребує певної кількості ресурсів. Ресурси можуть бути різними: трудові ресурси, матеріальні ресурси, технічні ресурси.

Позначимо ресурсну вимогу для операції v_i як p_i , де p_i – це кількість кожного з ресурсів, необхідних для виконання операції v_i .

Множина доступних ресурсів позначається як

$$R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\},$$

де кожний ресурс r_k має певну кількість доступних одиниць A_k , яку не можна перевищувати.

Для правильного виконання монтажу, враховуючи залежності між операціями, важливо встановити порядок виконання робіт. Введемо бінарні змінні y_{ij} , де $y_{ij} = 1$, якщо операція v_i ви-

конується до операції v_j та $y_{ij} = 0$, якщо операція v_i може бути виконана одночасно з v_j .

Ці змінні використовуються для забезпечення правильного порядку виконання робіт. Наприклад, якщо операція v_i має завершитися перед початком v_j , то повинно бути виконано таке обмеження:

$$T_j \geq T_i + t_i - M(1 - y_{ij}),$$

де M – велике число, яке гарантує, що умова виконується тільки тоді, коли $y_{ij} = 1$.

Це забезпечує правильну послідовність операцій.

Задача оптимізації полягає в мінімізації загальної тривалості монтажу за допомогою відповідного розподілу ресурсів і правильного порядку виконання операцій. Для цього використовуються методи лінійного програмування або евристичні підходи, які дозволяють знаходити найбільш ефективне рішення для реальних умов монтажного процесу.

4 Визначення економічного ефекту

Оптимальне використання ресурсів є одним із ключових питань ефективного управління монтажним процесом електротехнічного обладнання. В умовах обмеженості ресурсів (трудова, матеріальна, технічна) важливо розробити модель, яка дозволить досягти максимальної ефективності при мінімальних витратах.

У монтажному процесі електротехнічного обладнання задіяні такі основні види ресурсів:

- трудові ресурси: кількість монтажників або робочих бригад, кваліфікаційний рівень персоналу, робочий графік та можливість паралельного виконання завдань;

- матеріальні ресурси: кабелі, трансформатори, щитові установки та інші електротехнічні елементи, спеціальні кріплення, кабельні лотки, розподільні коробки, витратні матеріали (ізолятори, монтажна піна, кріплення);

- технічні ресурси: підйомні механізми, крани, автовишки, інструменти, засоби транспортування та логістики;

- часові ресурси: час виконання окремих монтажних операцій, загальна тривалість монтажу.

Кожен із цих ресурсів має свою вартість, кількісні обмеження та часові рамки використання, які необхідно враховувати в оптимізаційній моделі.

Задача оптимізації розподілу ресурсів може бути представлена як задача лінійного програмування, у якій потрібно мінімізувати витрати або час виконання монтажних робіт за умови дотримання всіх обмежень.

Позначимо основні параметри:

n – кількість монтажних операцій;

m – кількість доступних ресурсів;

$R_{i,j}$ – кількість ресурсу j , необхідного для виконання операції i ;

A_j – загальна доступна кількість ресурсу j ;

T_j – час початку операції i ;

D_i – тривалість операції i ;

C_i – вартість виконання операції i ;

X_i – бінарна змінна, яка вказує, чи виконується операція i (1 – виконується, 0 – не виконується).

Загальна функція мінімізації витрат на монтажні роботи може бути представлена як:

$$\min \sum_{i=1}^n C_i X_i,$$

де C_i включає в себе всі витрати на матеріали, робочу силу та технічні ресурси для виконання операції i .

Кожен вид ресурсу j повинен використовуватися в межах його доступної кількості

$$\sum_{i=1}^n R_{i,j} X_i \leq A_j, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}.$$

Це гарантує, що сумарне споживання ресурсу не перевищує його наявну кількість.

Час початку кожної операції залежить від завершення попередніх операцій та тривалості їх виконання

$$T_i \geq T_k + D_k, \quad \forall (v_k, v_i) \in E,$$

де (v_k, v_i) – технологічні залежності між операціями.

Якщо деякі операції не можуть виконуватися одночасно через спільне використання тих самих ресурсів, це враховується умовами

$$T_i \geq T_j + D_j,$$

$$T_j \geq T_i + D_i, \text{ якщо } R_{i,k} + R_{j,k} > A_k,$$

де $R_{i,k}$ і $R_{j,k}$ – кількість ресурсу k , необхідного для операцій i та j .

У реальних умовах монтажний процес часто має невизначеність, пов'язану зі змінними обставинами (затримки постачання матеріалів, зміни складу бригад тощо).

Тому класичні методи лінійного програмування можуть бути доповнені іншими алгоритмами.

5 Результати дослідження

Для перевірки ефективності запропонованої математичної моделі оптимізації монтажного процесу електротехнічного обладнання проводиться чисельний експеримент. В експерименті моделюється виконання монтажних робіт для умовного об'єкта, включаючи технологічні обмеження, ресурсні обмеження та час виконання операцій.

Для аналізу монтажного процесу представимо його у вигляді графу (1), де вершини V – це монтажні операції, дуги E – зв'язки між операціями. Граф монтажного процесу зображено на рисунку 1.

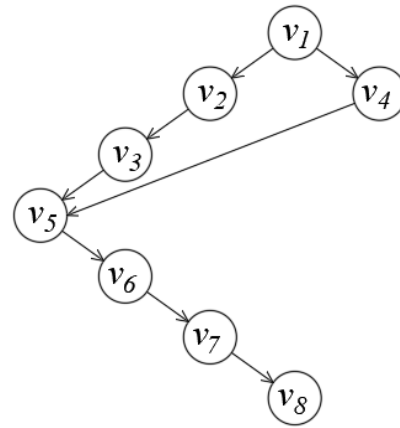


Рис. 1 - Граф монтажного процесу

В таблиці 1 наведена інформація стосовно монтажного процесу електротехнічного обладнання промислового об'єкта.

Метод критичного шляху (CPM) передбачає розрахунки раннього початку та завершення операцій, пізнього початку та завершення операцій та резервів часу.

В таблиці 2 наведені результати розрахунку за методом критичного шляху.

Отже, критичний шлях проходить через операції 1-2-3-5-6-7-8 і його тривалість становить 26 години.

Щоб зменшити загальну тривалість процесу, використовується метод паралельного виконання операцій, тобто операції 2 і 4 можуть виконуватися паралельно, бо не мають спільних обмежень та операції 3 і 4 також можуть бути розташовані ефективніше, а саме: операція 3 може стартувати після операції 2, а операція 5 після закінчення 3 та 4.

Після оптимізації критична тривалість складає 24 годин. На рисунку 2 наведений графік оптимізованого розкладу у вигляді діаграми Ганта.

Таблиця 1
Монтажний процес електротехнічного обладнання

№ операції	Опис операції	Тривалість (год)	Попередні операції
1	Доставка обладнання	2	-
2	Монтаж кабельних лотків	3	1
3	Прокладання силових кабелів	4	2
4	Монтаж силових шаф	5	1
5	Підключення кабелів	3	3,4
6	Налаштування автоматики	6	5
7	Перевірка підключень	2	6
8	Проведення випробування	4	7

Таблиця 2
Результати розрахунку за методом критичного шляху

№ операції	Опис операції	Тривалість	Ранній початок,	Раннє завершення,
		D_i	ES_i	EF_i
1	Доставка обладнання	2	0	2
2	Монтаж кабельних лотків	3	2	5
4	Монтаж силових шаф	5		7
3	Прокладання силових кабелів	4	7	11
5	Підключення кабелів	3	11	14
6	Налаштування автоматики	6	14	20
7	Перевірка підключень	2	20	22
8	Проведення випробування	4	22	26

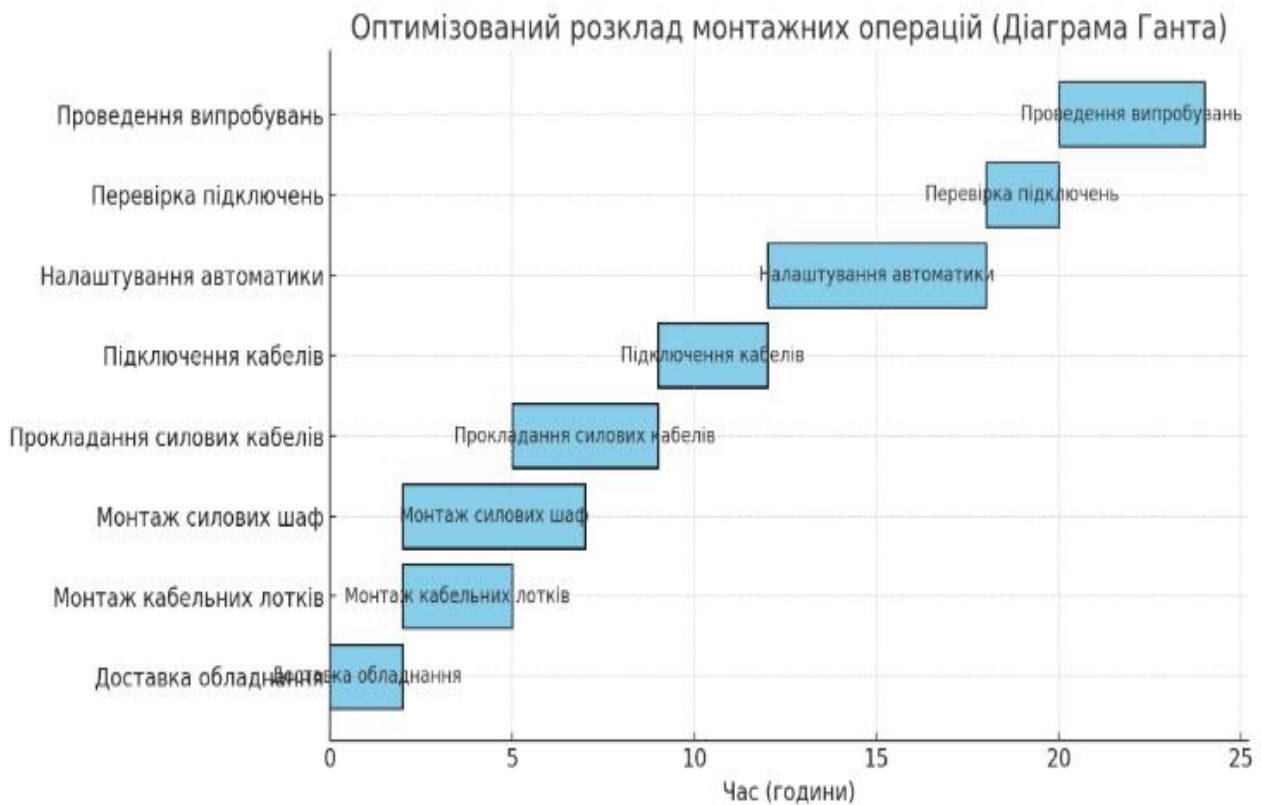


Рис. 2 - Оптимізований розклад монтажних операцій.

В таблиці 3 наведений перерахунок монтажного процесу після оптимізації.

Таблиця 3
Результати розрахунку після оптимізації

№ операції	Опис операції	Тривалість	Ранній початок	Раннє завершення
		D_i	ES_i	EF_i
1	Доставка обладнання	2	0	2
2	Монтаж кабельних лотків	3	2	5
4	Монтаж силових шаф	5		7
3	Прокладання силових кабелів	4	5	9
5	Підключення кабелів	3	9	12
6	Налаштування автоматики	6	12	18
7	Перевірка підключень	2	18	20
8	Проведення випробування	4	20	24
3	Прокладання силових кабелів	4	5	9
5	Підключення кабелів	3	9	12

Висновки

У ході дослідження було виконано комплексну розробку математичної моделі оптимізації монтажного процесу електротехнічного обладнання з урахуванням обмежень послідовності технологічних операцій, обмеженості ресурсів та цільової функції мінімізації загальної тривалості виконання робіт.

У процесі формалізації монтажного процесу електротехнічного обладнання вдалося представити технологічну послідовність робіт у вигляді орієнтованого графа, вершинами якого є окремі монтажні операції, а дугами – залежності між ними. Такий підхід дозволив чітко структурувати етапи монтажу, врахувати логічні зв'язки та умови попередності. Це стало важливою основою для подальшого математичного моделювання, оскільки дозволяє застосовувати алгоритми критичного шляху, а також здійснювати обчислювальний аналіз з метою оптимізації. Графічне подання монтажного процесу також спрощує виявлення вузьких місць, можливостей для паралелі-

зації операцій та візуалізацію конфліктів у розкладі.

Математична модель, розроблена у рамках цього дослідження, ґрунтується на поєднанні принципів теорії графів та методів лінійного програмування. Модель враховує низку важливих факторів: тривалість окремих операцій, обмеження послідовності, можливість паралельного виконання, обмеження за ресурсами (людськими та матеріальними). Цільовою функцією моделі обрано мінімізацію сумарної тривалості монтажного процесу, що відповідає реальним вимогам проектної та виробничої практики. Це дозволило забезпечити гнучкість моделі, її адаптивність до різних умов реалізації монтажних проектів і можливість масштабування для складніших об'єктів.

На основі побудованого графа технологічних залежностей було виконано оптимізацію монтажного розкладу методом критичного шляху. У початковому варіанті розкладу монтажні операції виконувались послідовно, що забезпечувало повну технологічну відповідність, але не враховувало можливості скорочення тривалості шляхом паралельного виконання несуміжних операцій. Оптимізаційний аналіз дозволив ідентифікувати операції, які не мають жорстких зв'язків між собою, та реорганізувати розклад так, щоб виконання відбувалося паралельно. Це призвело до скорочення загального часу реалізації проекту – з 26 до 24 годин.

Після оптимізації було побудовано діаграму Ганта, що візуалізує покращений розклад і демонструє досягнуте скорочення загальної тривалості монтажу. Таким чином, експериментально підтверджено ефективність запропонованої моделі, її придатність для практичного використання та здатність підвищити організаційну ефективність монтажних процесів у галузі електротехніки.

Список використаної літератури

1. Frank Yifan Wang, Zhuoxu Chen, Zechun Hu (2024). Comprehensive optimization of electrical heavy-duty truck battery swap stations with a SOC-dependent charge scheduling method. *Energy*, Volume 308, 2024, 132773, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132773>.
2. Otala, J., Minard, A., Madraki, G., & Mousavian, S. (2021). Graph-Based Modeling in Shop Scheduling Problems: Review and Extensions. *Applied Sciences*, 11(11), 4741. <https://doi.org/10.3390/app11114741>
3. Fekih, A., Hadda, H., Kacem, I., & Hadj-Alouane, A. B. (2020). A hybrid genetic Tabu search algorithm for minimising total completion

- time in a flexible job-shop scheduling problem. *European Journal of Industrial Engineering*, 14(6), 763–781.
<https://doi.org/10.1504/EJIE.2020.112479>
4. Shan, S., Hu, Z., Liu, Z., Shi, J., & Wang, L. (2017). An adaptive genetic algorithm for demand-driven and resource-constrained project scheduling in aircraft assembly. *Information Technology and Management*, 18(1), 41–53.
<https://doi.org/10.1007/s10799-015-0223-7>
5. Goncharov, E.N., Leonov, V.V. Genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. *Autom Remote Control* 78, 1101–1114 (2017).
<https://doi.org/10.1134/S0005117917060108>
6. Roshanaei, V., Azab, A., & ElMaraghy, H. (2013). Mathematical modelling and a meta-heuristic for flexible job shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 51(20), 6247–6274.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2013.827806>
7. Kucuksayacigil, F., Ulusoy, G (2020). Hybrid genetic algorithm for bi-objective resource-constrained project scheduling. *Front. Eng. Manag.* 7, 426–446.
<https://doi.org/10.1007/s42524-020-0100-x>
8. Nguyen, Su & Thiruvady, Dhananjay & Sun, Yuan & Zhang, Mengjie. (2024). Genetic-based Constraint Programming for Resource Constrained Job Scheduling. 942-951.
<https://doi.org/10.1145/3638529.3654046>
9. Smit, I. G., Zhou, J., Reijnen, R., Wu, Y., Chen, J., Zhang, C., Bukhsh, Z., Nuijten, W. P. M., & Zhang, Y. (2024). Graph Neural Networks for Job Shop Scheduling Problems: A Survey. *arXiv.org*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.14096>
10. Rasool Motahari, Zeinolabedin Alavifar, Abdullah Zareh Andaryan, Maxwell Chipulu, Morteza Saberi (2023). A multi-objective linear programming model for scheduling part families and designing a group layout in cellular manufacturing systems. *Computers & Operations Research*, Volume 151,106090, ISSN 0305-0548.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106090>
11. Fuqing Zhao, Shilu Di, Ling Wang, Tianpeng Xu, Ningning Zhu, Jonrinaldi (2022). A self-learning hyper-heuristic for the distributed assembly blocking flow shop scheduling problem with total flowtime criterion. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 116, 105418, ISSN 0952-1976.
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105418>
12. Yongping Liu, Lizhen Huang, Xiufeng Liu, Guomin Ji, Xu Cheng, Erling Onstein (2023). A late-mover genetic algorithm for resource-constrained project-scheduling problems. *European Journal of Industrial Engineering*, 14(6), Information Sciences, Volume 642, 119164, ISSN 0020-0255.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119164>
13. Yongchang Ren, Jun Li (2023). Research on Software Project Schedule Planning Technology Based on the Integration of PERT and CPM. *Procedia Computer Science*, Volume 228, Pages 253-261, ISSN 1877-0509.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.11.029>
14. Hao Zhang, Fu Zhao, John W. Sutherland (2015). Energy-efficient scheduling of multiple manufacturing factories under real-time electricity pricing. *CIRP Annals*, Volume 64, Issue 1, Pages 41-44, ISSN 0007-8506.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.049>
15. Arie M.C.A. Koster, Jenny Segsneider, Nicole Ventsch (2024). Γ -robust optimization of project scheduling problems, *Computers & Operations Research*, Volume 161, 106453, ISSN 0305-0548.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106453>
16. Parviz Ghoddousi, Ramin Ansari, Ahmad Makui (2017). A risk-oriented buffer allocation model based on critical chain project management. *KSCIE Journal of Civil Engineering*, Volume 21, Issue 5, Pages 1536-1548, ISSN 1226-7988.
<https://doi.org/10.1007/s12205-016-0039-y>

References

1. Frank Yifan Wang, Zhuoxu Chen, Zechun Hu (2024). Comprehensive optimization of electrical heavy-duty truck battery swap stations with a SOC-dependent charge scheduling method. *Energy*, Volume 308, 2024, 132773, ISSN 0360-5442,
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132773>
2. Ojala, J., Minard, A., Madraki, G., & Mousavian, S. (2021). Graph-Based Modeling in Shop Scheduling Problems: Review and Extensions. *Applied Sciences*, 11(11), 4741.
<https://doi.org/10.3390/app11114741>
3. Fekih, A., Hadda, H., Kacem, I., & Hadj-Alouane, A. B. (2020). A hybrid genetic Tabu search algorithm for minimising total completion time in a flexible job-shop scheduling problem. *European Journal of Industrial Engineering*, 14(6), 763–781.
<https://doi.org/10.1504/EJIE.2020.112479>
4. Shan, S., Hu, Z., Liu, Z., Shi, J., & Wang, L. (2017). An adaptive genetic algorithm for demand-driven and resource-constrained project scheduling in aircraft assembly. *Information Technology and Management*, 18(1), 41–53.
<https://doi.org/10.1007/s10799-015-0223-7>
5. Goncharov, E.N., Leonov, V.V. Genetic algorithm for the resource-constrained project

- scheduling problem. *Autom Remote Control* 78, 1101–1114 (2017).
<https://doi.org/10.1134/S0005117917060108>
6. Roshanaei, V., Azab, A., & ElMaraghy, H. (2013). Mathematical modelling and a meta-heuristic for flexible job shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 51(20), 6247–6274.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2013.827806>
7. Kucuksayacigil, F., Ulusoy, G (2020). Hybrid genetic algorithm for bi-objective resource-constrained project scheduling. *Front. Eng. Manag.* 7, 426–446.
<https://doi.org/10.1007/s42524-020-0100-x>
8. Nguyen, Su & Thiruvady, Dhananjay & Sun, Yuan & Zhang, Mengjie. (2024). Genetic-based Constraint Programming for Resource Constrained Job Scheduling. 942-951.
<https://doi.org/10.1145/3638529.3654046>
9. Smit, I. G., Zhou, J., Reijnen, R., Wu, Y., Chen, J., Zhang, C., Bukhsh, Z., Nuijten, W. P. M., & Zhang, Y. (2024). Graph Neural Networks for Job Shop Scheduling Problems: A Survey. *arXiv.org*.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.14096>
10. Rasool Motahari, Zeinolabedin Alavifar, Abdullah Zareh Andaryan, Maxwell Chipulu, Morteza Saberi (2023). A multi-objective linear programming model for scheduling part families and designing a group layout in cellular manufacturing systems. *Computers & Operations Research*, Volume 151, 106090, ISSN 0305-0548.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106090>
11. Fuqing Zhao, Shilu Di, Ling Wang, Tianpeng Xu, Ningning Zhu, Jonrinaldi (2022). A self-learning hyper-heuristic for the distributed assembly blocking flow shop scheduling problem with total flowtime criterion. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 116, 105418, ISSN 0952-1976.
<https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105418>
12. Yongping Liu, Lizhen Huang, Xiufeng Liu, Guomin Ji, Xu Cheng, Erling Onstein (2023). A late-mover genetic algorithm for resource-constrained project-scheduling problems. *Information Sciences*, Volume 642, 119164, ISSN 0020-0255.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119164>
13. Yongchang Ren, Jun Li (2023). Research on Software Project Schedule Planning Technology Based on the Integration of PERT and CPM. *Procedia Computer Science*, Volume 228, Pages 253-261, ISSN 1877-0509
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.11.029>
14. Hao Zhang, Fu Zhao, John W. Sutherland (2015). Energy-efficient scheduling of multiple manufacturing factories under real-time electricity pricing. *CIRP Annals*, Volume 64, Issue 1, Pages 41-44, ISSN 0007-8506.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.049>
15. Arie M.C.A. Koster, Jenny Segsneider, Nicole Ventsch (2024). Γ -robust optimization of project scheduling problems, *Computers & Operations Research*, Volume 161, 106453, ISSN 0305-0548.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106453>
16. Parviz Ghoddousi, Ramin Ansari, Ahmad Makui (2017). A risk-oriented buffer allocation model based on critical chain project management. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Volume 21, Issue 5, Pages 1536-1548, ISSN 1226-7988.
<https://doi.org/10.1007/s12205-016-0039-y>

Optimization of Electro Technical Equipment Installation Based on Mathematical Modeling

V. O. Suvorov, V. I. Kryvda

Odesa Polytechnic National University

Abstract. *Installation of electro technical equipment is a critically important stage in the construction and modernization of energy facilities, directly influencing the overall efficiency, reliability, and safety of electrical installations. Traditional installation planning methods often rely on empirical data and the experience of engineers, which can lead to inefficient resource use, extended project timelines, and increased operational costs.*

This paper presents an approach to optimizing the installation process of electro technical equipment based on mathematical modeling. A comprehensive mathematical model is proposed that enables the determination of optimal work schedules, minimizes time and resource losses, and improves the quality of installation operations. The problem is formalized using linear programming methods and graph theory, which allows for efficient allocation of labor and material resources while minimizing potential downtimes and logistical expenses.

The developed model considers key factors influencing the installation process, including time constraints, material availability, personnel qualifications, and risks of errors during equipment installation.

Research results show that the application of mathematical optimization methods can reduce the duration of installation work by 10–20%, lower logistics and resource costs, and decrease the likelihood of errors during equipment setup. Practical implementation of the model can be carried out within projects involving the construction of transformer substations, distribution points, and other energy facilities.

The obtained results can be used to automate installation planning processes, improve project management efficiency in the power industry, and develop intelligent decision support systems for performing electrical installation works.

Keywords: *Installation of electro technical equipment, Mathematical modeling, Resource optimization, Graph theory, Linear programming.*

Отримано 25.09.2025



Суворов Владислав Олегович, доктор філософії, старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: suvorov@op.edu.ua; тел.: +38 063 593 94 91

Vladyslav Suvorov, PhD, senior lecture of the Department of Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: suvorov@op.edu.ua; ph.: +38 063 593 94 91

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2842-887X>



Кривда Вікторія Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, завідувач відділу аспірантури і докторантури, Національний університет «Одеська Політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: kryvda@op.edu.ua; тел.: +38 048 705 73 88

Viktoriia I. Kryvda, Ph.D technical, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Power Supply and Energy Management, Head of the Department of Postgraduate and Doctoral Studies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: kryvda@op.edu.ua; ph.: +38 048 705 73 88

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0930-1163>