

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-55>

УДК 621.382

ВОЙТЮК ЮРІЙ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0003-1896-5927>

e-mail: voityuk77@gmail.com

ВОЛОЦЬКИЙ АНАТОЛІЙ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0000-5660-6472>

e-mail: volanmil@gmail.com

КУТІНА МАРИНА

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7185-6795>

e-mail: mkytina@gmail.com

ШУЛЛЕ ЮЛІЯ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5516-7543>

e-mail: shullye.y.a@vntu.edu.ua

ОРГАНІЗАЦІЯ РЕМОНТІВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ НА БАЗІ ОПТИМАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ПІДПРИЄМСТВ

В роботі запропоновано та розглянуто один із актуальних методів організації ремонтних робіт електротехнічного обладнання з використанням спеціалізованих електроремонтних підприємств. Пропонується впровадження математичної моделі, що описує оптимальний розподіл ремонтних робіт між спеціалізованими профільними підприємствами з урахуванням економічних, технологічних та експлуатаційних обмежень. Модель сформульована у вигляді задачі цілочесельного лінійного програмування, яка дасть змогу підвищити ефективність планування ремонтів електрообладнання промислових підприємств та енергетичних об'єктів.

Ключові слова: електрообладнання; технічне обслуговування і ремонт; електроремонтні підприємства; оптимізація; надійність; математичне моделювання

VOITYUK YURIY, VOLOTSKYI ANATOLIY, KUTINA MARYNA, SHULLIE IULIYA

Vinnitsia National Technical University

ORGANIZATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT REPAIRS BASED ON OPTIMAL USE OF SPECIALIZED ENTERPRISES

The paper proposes and considers one of the current methods for organizing repair work on electrical equipment using specialized electrical repair enterprises. It is proposed to implement a mathematical model that describes the optimal distribution of repair work between specialized enterprises, taking into account economic, technological and operational constraints. The model is formulated as an integral linear programming problem, which will allow increasing the efficiency of planning repairs of electrical equipment of industrial enterprises and energy facilities.

The current stage of functioning of energy and industrial enterprises of Ukraine is associated with the operation of electrical equipment under martial law, which imposes special requirements for the reliability and uninterrupted operation of their work. Failure of electrical equipment involved in the implementation of basic technological processes and power supply is directly related to production downtime and increased operating costs.

Along with this, modern electrical systems are characterized by increased requirements for electrical equipment, which complicates, and sometimes makes impossible, the processes of their maintenance and repair. In this regard, it is recommended in practice to carry out repairs of certain types and types of electrical equipment with the involvement of specialized electrical repair companies that perform repair or restoration work on certain types of electrical equipment and have the appropriate material and technical base and qualified personnel.

The selection of a repair contractor is usually carried out without taking into account the complex influence of economic, technological and operational factors, which can reduce the efficiency of repairs. This necessitates the development of formalized approaches to the optimal use of specialized electrical repair companies.

Keywords: electrical equipment; maintenance and repair; electrical repair companies; optimization; reliability; mathematical modeling

Стаття надійшла до редакції / Received 12.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.04.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



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

© Войтюк Юрій, Волоцький Анатолій Кутіна Марина, Шулле Юлія

Постановка проблеми

Сучасні умови функціонування енергетичних і промислових підприємств України визначаються підвищеним рівнем технічних та організаційних ризиків, зумовлених експлуатацією електрообладнання в умовах воєнного стану, обмеженості ресурсів та нестабільності логістичних ланцюгів. За таких обставин забезпечення надійності та безперервності роботи електротехнічних систем набуває критичного значення, оскільки їх відмова безпосередньо впливає не лише на економічні показники підприємств, але й на стійкість функціонування енергетичної інфраструктури в цілому.

Вихід з ладу електрообладнання, що задіяне у виконанні основних технологічних процесів та системах електропостачання, спричиняє комплекс негативних наслідків: простої виробництва, порушення технологічних режимів, зростання витрат на відновлення працездатності та підвищення аварійних ризиків. У сучасних умовах

ці наслідки можуть мати не лише локальний, а й системний характер, впливаючи на суміжні виробничі та енергетичні об'єкти.

Додатковим ускладнюючим фактором є зростання складності електротехнічних систем, широке застосування силової електроніки, мікропроцесорних систем керування та спеціалізованого обладнання. Це обмежує можливість виконання ремонтів власними силами підприємств і зумовлює необхідність залучення спеціалізованих електроремонтних підприємств, що володіють відповідною матеріально-технічною базою, технологічними регламентами та кваліфікованим персоналом.

Водночас аналіз практики організації ремонтних робіт свідчить про відсутність єдиного науково обґрунтованого підходу до вибору виконавців ремонтів. Рішення щодо залучення того чи іншого спеціалізованого підприємства здебільшого приймаються на основі досвіду, попередньої співпраці або мінімізації прямих витрат без комплексного врахування тривалості простою, обмежень виробничих потужностей, рівня відновленої надійності та сукупного економічного ефекту. Такий підхід не забезпечує глобальної оптимальності та може призводити до нераціонального використання фінансових і виробничих ресурсів.

Отже, наявна суперечність між необхідністю забезпечення високої надійності електрообладнання та відсутністю формалізованих механізмів раціонального розподілу ремонтних робіт між спеціалізованими електроремонтними підприємствами. Усунення цієї суперечності потребує розроблення математичних моделей та методів оптимізації, які дозволяють врахувати економічні, технологічні та ресурсні обмеження і забезпечити мінімізацію сумарних витрат при збереженні нормативного рівня надійності.

Таким чином, формування науково обґрунтованого підходу до оптимального використання спеціалізованих електроремонтних підприємств є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню ефективності експлуатації електрообладнання та стійкості функціонування промислових і енергетичних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасним дослідженням у сфері технічного обслуговування і ремонту (ТОiP), присвячено багато різноманітних розробок, що були опубліковані у провідних міжнародних виданнях [1-5], які характеризуються високим рівнем математичної формалізації та широким застосуванням методів оптимізації.

Більшість робіт спрямована на визначення та оптимізацію сукупних витрат в період роботоздатності відповідного електрообладнання [6-8]:

$$C = C_p + C_c + C_d \quad (1)$$

де C_p - витрати на профілактичне технічне обслуговування;

C_c - витрати на усунення аварійних відмов;

C_d - економічні втрати, пов'язані з простоєм обладнання.

Для підвищення точності прогнозування відмов в роботі електрообладнання рекомендується використовувати стохастичні моделі оптимізації. Одночасно значна частина досліджень базується на припущенні повної інформаційної визначеності або стабільності складових математичної моделі, що обмежує їх практичне використання в умовах невизначеності та ресурсних обмежень.

Подібні підходи широко застосовуються в сучасних моделях оптимізації технічного обслуговування, що розглянуті у роботах [6-9], де обґрунтовано доцільність комплексного врахування технічних та економічних показників.

Важливим напрямом розвитку є використання методів стан-орієнтованого технічного обслуговування (Condition-Based Maintenance), відповідно до яких рішення про проведення ремонту приймається на основі оцінки фактичного технічного стану обладнання [7-9]:

$$P_f(t|x) = f(x) \quad (2)$$

де P_f - імовірність відмови обладнання;

x - вектор параметрів технічного стану.

Такий підхід дозволяє більш ефективно використовувати ресурс обладнання та зменшувати кількість передчасних ремонтів.

Останні дослідження також активно використовують багатокритеріальні методи оптимізації, що враховують одночасно економічні та експлуатаційні показники функціонування обладнання [6, 8, 12]:

$$\min\{C, R^{-1}, T_d\} \quad (3)$$

де C - сумарні експлуатаційні витрати;

R - показник надійності обладнання;

T_d - тривалість простою.

Разом з тим результати аналізу наукових публікацій свідчать, що більшість досліджень спрямована на оптимізацію процесів технічного обслуговування в межах одного підприємства. У значно меншій мірі досліджено питання організації ремонтів із залученням спеціалізованих ремонтних підприємств, які можуть відрізнитися за рівнем технічної оснащеності, вартістю виконання робіт та термінами їх реалізації.

Недостатня формалізація цих факторів у існуючих моделях оптимізації зумовлює необхідність розроблення математичних моделей, що дозволяють визначати оптимальний розподіл ремонтних робіт між спеціалізованими електроремонтними підприємствами з урахуванням економічних, технологічних та

експлуатаційних обмежень.

Метою роботи є: розроблення математичної моделі оптимального використання спеціалізованих електроремонтних підприємств при виконанні ремонтів окремих видів електрообладнання, яка забезпечує мінімізацію сумарних експлуатаційних витрат підприємства з урахуванням вартості ремонтних робіт, часу їх виконання, виробничих обмежень ремонтних підприємств та впливу ремонтів на показники надійності електрообладнання.

Виклад основного матеріалу

У процесі експлуатації електрообладнання енергетичних та промислових підприємств відбувається поступове зниження його технічного ресурсу, що обумовлює необхідність проведення планових або відновлювальних ремонтів. Виконання ремонтних робіт може здійснюватися як власними ремонтними підрозділами підприємства, так і із залученням спеціалізованих електроремонтних підприємств, які мають відповідну матеріально-технічну базу, технологічне обладнання та кваліфікований персонал.

Разом з тим різні ремонтні підприємства характеризуються різними економічними та технологічними параметрами виконання ремонтів, зокрема: вартістю ремонтних робіт, тривалістю виконання ремонту, виробничою потужністю, рівнем відновлення технічного ресурсу обладнання, логістичними витратами.

У зв'язку з цим виникає задача оптимального розподілу ремонтних робіт між спеціалізованими електроремонтними підприємствами з урахуванням економічних, технологічних та організаційних обмежень.

Нехай на підприємстві експлуатується множина електрообладнання:

$$E = \{E_1, E_2, \dots, E_n\}, \quad (4)$$

частина якого потребує проведення ремонтних робіт. Для виконання ремонтів можуть бути залучені спеціалізовані електроремонтні підприємства:

$$R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}. \quad (5)$$

Для формалізації задачі введемо такі параметри:

C_{ij} - вартість ремонту і-го виду обладнання на j-му підприємстві;

T_{ij} - тривалість виконання ремонту;

L_{ij} - логістичні витрати транспортування обладнання;

D_i - економічні втрати від простою і-го обладнання за одиницю часу;

K_j - виробнича потужність j-го ремонтного підприємства;

R_{ij} - коефіцієнт відновлення надійності обладнання після ремонту.

Для визначення виконавця ремонту введемо бінарну змінну [13]:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad (6)$$

яка свідчить про: якщо 1, то ремонт і-го обладнання виконується j-м підприємством, 0 – інакше.

Метою оптимізації є мінімізація сумарних витрат підприємства, що включають витрати на ремонт, логістичні витрати та втрати від простою обладнання:

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} (C_{ij} + L_{ij} + D_i T_{ij}) \rightarrow \min \quad (7)$$

При цьому повинні виконуватися такі обмеження:

1. Умова виконання ремонту кожної одиниці обладнання. Кожна одиниця обладнання повинна бути відремонтована одним виконавцем:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

2. Обмеження виробничих потужностей ремонтних підприємств. Кількість ремонтів, що виконуються кожним підприємством, не повинна перевищувати його виробничих можливостей:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq K_j \quad j = 1, \dots, m \quad (9)$$

3. Обмеження допустимого часу простою обладнання. Тривалість ремонту не повинна перевищувати максимально допустимий час простою:

$$T_{ij} \leq T_i^{max} \quad (10)$$

4. Умова забезпечення необхідного рівня надійності. Після ремонту повинно забезпечуватися мінімально допустиме значення показника надійності:

$$R_{ij} \leq R_i^{max} \quad (11)$$

Таким чином, задача оптимального використання спеціалізованих електроремонтних підприємств зводиться до визначення значень змінних x_{ij} , які мінімізують сумарні витрати експлуатації електрообладнання при дотриманні технічних, економічних та організаційних обмежень.

Запропонована математична постановка дозволяє формалізувати процес прийняття управлінських рішень щодо вибору виконавців ремонтних робіт та може бути використана для побудови алгоритмів оптимального планування ремонтів електрообладнання.

У межах даного дослідження основна увага зосереджена на розробленні та формалізації математичної моделі оптимального використання спеціалізованих електроремонтних підприємств під час виконання ремонтів електрообладнання. Запропонована модель має узагальнений характер і орієнтована на використання для широкого спектра енергетичних та промислових підприємств, які можуть відрізнятися за структурою обладнання, обсягами ремонтних робіт, виробничими обмеженнями та економічними умовами функціонування.

Побудова повноцінного числового прикладу потребує використання достовірних статистичних даних щодо вартості ремонтів, тривалості виконання робіт, показників надійності обладнання та виробничих можливостей спеціалізованих ремонтних підприємств. Такі дані, як правило, є індивідуальними для конкретних підприємств і часто належать до категорії виробничої або комерційної інформації з обмеженим доступом.

У зв'язку з цим у даній статті основний акцент зроблено на формалізації задачі та розробленні універсальної математичної моделі, яка може бути адаптована до конкретних умов експлуатації електрообладнання шляхом підстановки відповідних параметрів. Практична апробація моделі з використанням реальних виробничих даних може бути предметом подальших досліджень.

Висновки

У результаті проведеного дослідження проаналізовано сучасні підходи до організації технічного обслуговування та ремонту електрообладнання, що застосовуються на енергетичних і промислових підприємствах. Показано, що більшість існуючих досліджень спрямована на оптимізацію процесів технічного обслуговування в межах окремого підприємства, тоді як питання оптимального використання спеціалізованих електроремонтних підприємств залишаються недостатньо формалізованими.

На основі проведеного аналізу сформульовано задачу оптимального розподілу ремонтних робіт між спеціалізованими електроремонтними підприємствами з урахуванням економічних, технологічних та організаційних факторів. Запропоновано математичну модель, що дозволяє мінімізувати сумарні витрати підприємства, які включають витрати на ремонт, логістичні витрати та втрати від простою електрообладнання.

У моделі враховано обмеження виробничих потужностей ремонтних підприємств, тривалість виконання ремонтних робіт, допустимий час простою обладнання та вимоги до рівня відновленої надійності. Це дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень щодо вибору виконавців ремонтних робіт та оптимізації процесів технічної експлуатації електрообладнання.

Запропонований підхід може бути використаний як інструмент підтримки прийняття рішень під час планування ремонтів електрообладнання на підприємствах енергетичної та промислової галузей. Подальші дослідження доцільно спрямувати на апробацію моделі з використанням реальних виробничих даних та розроблення алгоритмів її практичної реалізації у системах управління технічним обслуговуванням.

Література

1. Y. Lu, S. Wang, C. Zhang, R. Chen, and H. Dui, "Adaptive maintenance window-based opportunistic maintenance optimization considering operational reliability and cost," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 245, p. 110292, 2024.
2. H. Zhang, Y. F. Huang, and Z. Huang, "Reliability-based maintenance scheduling and inspection planning for multi-component systems," *Applied Soft Computing*, vol. 128, p. 110620, 2023.
3. L. Wang, J. Yang, and L. Peng, "Condition-based maintenance modeling with imperfect inspection and uncertainty," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 72, no. 1, pp. 33–45, 2023.
4. X. Zhang, Q. X. Xu, and Y. Li, "Maintenance optimization of multi-state systems with preventive and corrective actions considering economic dependence," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 214, p. 107804, 2022.
5. J. Luo and J. Yang, "Maintenance optimization for multi-unit systems with group maintenance policy," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 208, p. 107386, 2021.
6. S. Wang, B. Sharma, and A. Mukherjee, "Risk-based maintenance optimization under multiple failure modes and stochastic deterioration," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 70, no. 2, pp. 490–504, 2021.
7. R. Singh and B. Sharma, "Multi-objective maintenance optimization using genetic algorithms: A survey and case studies," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 2–33, 2020.
8. K. Yang, Z. Li, X. Song, and C. Xu, "An opportunistic maintenance policy for multi-component systems based on condition monitoring," *European Journal of Operational Research*, vol. 284, no. 2, pp. 738–753, 2020.
9. P. Basu and M. Xie, "Optimum maintenance modeling: A review and comparative analysis," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 223–245, 2019.
10. L. Pintelon, P. Muchiri, and A. Van Horenbeek, "Maintenance decision-making — A review and research agenda," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 69–98, 2019.
11. P. A. Scarf and Y. Li, "Maintenance modelling: A review and some recent developments," *European Journal of Operational Research*, vol. 272, no. 3, pp. 801–828, 2018.
12. A. K. S. Jardine and A. H. C. Tsang, *Maintenance, replacement, and reliability: Theory and applications*, CRC Press, 2015.
13. Ю.П. Зайченко. Дослідження операцій. Підручник. Сьоме видання, перероблене та доповнене. – К.: Видавничий Дім «Слово», 2006. – 816с.

References

1. Y. Lu, S. Wang, C. Zhang, R. Chen, and H. Dui, "Adaptive maintenance window-based opportunistic maintenance optimization considering operational reliability and cost," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 245, p. 110292, 2024.
2. H. Zhang, Y. F. Huang, and Z. Huang, "Reliability-based maintenance scheduling and inspection planning for multi-component systems," *Applied Soft Computing*, vol. 128, p. 110620, 2023.
3. L. Wang, J. Yang, and L. Peng, "Condition-based maintenance modeling with imperfect inspection and uncertainty," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 72, no. 1, pp. 33–45, 2023.
4. X. Zhang, Q. X. Xu, and Y. Li, "Maintenance optimization of multi-state systems with preventive and corrective actions considering economic dependence," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 214, p. 107804, 2022.
5. J. Luo and J. Yang, "Maintenance optimization for multi-unit systems with group maintenance policy," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 208, p. 107386, 2021.
6. S. Wang, B. Sharma, and A. Mukherjee, "Risk-based maintenance optimization under multiple failure modes and stochastic deterioration," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 70, no. 2, pp. 490–504, 2021.
7. R. Singh and B. Sharma, "Multi-objective maintenance optimization using genetic algorithms: A survey and case studies," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 26, no. 1, pp. 2–33, 2020.
8. K. Yang, Z. Li, X. Song, and C. Xu, "An opportunistic maintenance policy for multi-component systems based on condition monitoring," *European Journal of Operational Research*, vol. 284, no. 2, pp. 738–753, 2020.
9. P. Basu and M. Xie, "Optimum maintenance modeling: A review and comparative analysis," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 223–245, 2019.
10. L. Pintelon, P. Muchiri, and A. Van Horenbeek, "Maintenance decision-making — A review and research agenda," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 69–98, 2019.
11. P. A. Scarf and Y. Li, "Maintenance modelling: A review and some recent developments," *European Journal of Operational Research*, vol. 272, no. 3, pp. 801–828, 2018.
12. A. K. S. Jardine and A. H. C. Tsang, *Maintenance, replacement, and reliability: Theory and applications*, CRC Press, 2015.
13. Yu.P. Zaichenko. Operations Research. Textbook. Seventh edition, revised and supplemented. – Kyiv: Publishing House "Slovo", 2006. – 816p.