

Аудит роботи електричного обладнання розподільних та генеруючих мереж

В. О. Разінков, доктор філософії

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0934-0426>; e-mail: razinkov.v.o@opu.ua

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті розглядається тепловізійна діагностика як інструмент технічного огляду електрообладнання в системах електропостачання. Зазначається, що сьогодні тепловізійний контроль є одним з найефективніших методів безконтактного виявлення дефектів контактних з'єднань, електротехнічних пристроїв, з'єднувальних елементів та силових кабелів. Особлива увага приділяється аналізу переваг використання тепловізійної діагностики в профілактичному обслуговуванні, зокрема її здатності виявляти небезпечні ділянки на ранніх стадіях розвитку пошкоджень. Тепловізійний контроль дозволяє швидко виявити потенційні порушення режимів роботи, зниження якості електричних з'єднань, локальний перегрів та інші дефекти, які можуть призвести до надмірних втрат енергії, передчасного зносу обладнання або навіть до аварійних та пожеже небезпечних ситуацій. На відміну від традиційних методів діагностики, тепловізійний аналіз не вимагає зупинки обладнання, що робить його надзвичайно зручним для використання в умовах безперервної роботи об'єктів енергетичної інфраструктури.

Показано, що впровадження систематичного тепловізійного моніторингу підвищує рівень надійності енергопостачання, допомагає запобігти простоям, знижує витрати на аварійне обслуговування та ремонт, а також дозволяє своєчасно виявляти помилки монтажу або виробничі дефекти. Крім того, такий підхід сприяє підвищенню загальної енергоефективності електрообладнання, що особливо актуально в умовах зростання використання відновлюваних джерел енергії, децентралізованої генерації та інтелектуальних мереж. Узагальнення результатів дослідження підкреслює доцільність включення тепловізійного моніторингу до регулярного обслуговування енергетичних об'єктів, а також актуальність подальшого розвитку методів аналізу та обробки тепловізійних даних з метою автоматизації діагностики та підвищення її точності.

Ключові слова: тепловізійне обстеження, ефективність роботи, температурний режим, надійність електропостачання, аварійні ситуації.

Цитування статті: Разінков В. О. (2026). Аудит роботи електричного обладнання розподільних та генеруючих мереж. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 45(121), с.82-88. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.8>

Вступ

Надійність електропостачання значною мірою залежить від технічного стану електротехнічного обладнання, яке експлуатується в умовах зростаючих навантажень та ускладнення інфраструктури. Незважаючи на широке впровадження індустріальних методів будівництва розподільчих пристроїв, що сприяють стандартизації та підвищенню технологічності монтажу, питання ефективного контролю їхнього технічного стану залишається відкритим.

Одним із перспективних напрямів діагностики є тепловізійне обстеження, яке дозволяє опе-

ративно виявляти перегриви елементів, пов'язані з дефектами з'єднань, перевантаженням, деградацією ізоляції. Водночас, практика застосування тепловізійного контролю все ще обмежена, особливо на невеликих ділянках електричних мереж, таких як розподільні щити, малі трансформаторні підстанції та внутрішні абонентські мережі. Це створює додаткові технічні ризики та ускладнює вчасне виявлення потенційно аварійних станів.

Актуальність тепловізійних обстежень електричного обладнання зумовлена необхідністю підвищення надійності, безпеки та ефективності експлуатації електричних мереж. Більшість дефектів у електротехнічних пристроях, таких як

ослаблені контакти, перевантаження, погіршення стану ізоляції або порушення теплового режиму, проявляються у вигляді локального перегріву задовго до настання аварійної ситуації. Тепловізійна діагностика дозволяє своєчасно виявляти такі дефекти без знеструмлення обладнання, що робить її надзвичайно цінним інструментом для профілактичного контролю.

На відміну від традиційних методів, тепловізійне обстеження є безконтактним, оперативним та візуально наочним, що значно спрощує виявлення аномалій навіть у складних технологічних умовах. Застосування цього методу дозволяє знизити ризики аварій, зменшити витрати на ремонт і простої, а також подовжити термін служби обладнання.

Тепловізійні обстеження мають дедалі більше ставати невід'ємною складовою сучасної системи технічного обслуговування та моніторингу стану електроустановок, особливо в умовах підвищених вимог до енергоефективності, надійності та безпеки електропостачання.

1 Мета дослідження

Метою даної роботи є аналіз ефективності застосування тепловізійного обстеження електротехнічного обладнання розподільних пристроїв на основі практичного дослідження, спрямованого на виявлення прихованих дефектів та аномалій, які можуть призвести до порушень у роботі системи електропостачання. Особлива увага приділяється оцінці характеру та ступеня потенційних ризиків, пов'язаних з виявленими тепловими відхиленнями, а також визначенню доцільності впровадження тепловізійного контролю як елементу профілактичного технічного обслуговування в малих і середніх електричних мережах.

2 Матеріали та результати дослідження

Для проведення дослідження було обрано елементи системи електропостачання: розподільчих мереж, систем генерації електричної енергії, систем накопичення електроенергії. Тепловізійні обстеження здійснювалися в різні моменти часу за довільних режимів роботи обладнання. В усіх випадках навантаження не досягало максимальних значень, що дозволило оцінити стан обладнання у звичайних експлуатаційних умовах, близьких до типової повсякденної роботи.

При тепловізійному обстеженні рубильника типу РПБ-4П було зафіксовано підвищену температуру на його корпусі, майже 120 °C (Рис.1)

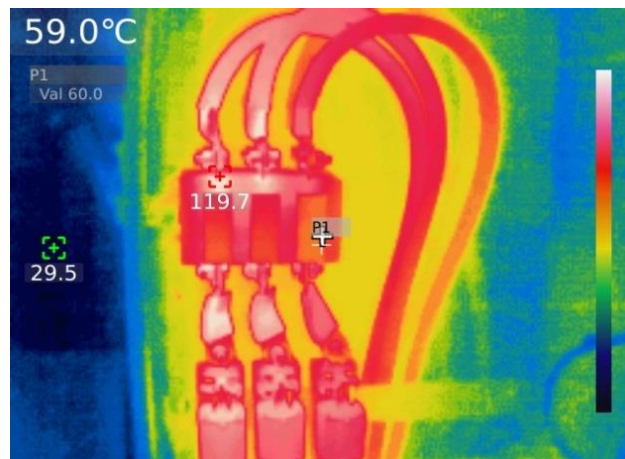


Рис. 1 - Теплограма ввідного рубильника РПБ-4П 400 А

У момент тепловізійного обстеження через рубильник діяв струм 217 А, що становить трохи більше половини від його номінального значення 400 А. Згідно нормативним вимогам, температура контактних з'єднань з міді, яка не має покриття, не повинна перевищувати 80 °C (бути більшою на 45 °C за температуру навколишнього середовища). Варто зазначити, що тепловізійне вимірювання проводилося на поверхні корпусу рубильника, а самі контактні ножі розміщені всередині пристрою. Враховуючи зменшення потоку випромінювання теплової енергії в корпусі апарату можна припустити, що температура всередині корпусу є ще вищою, що беззаперечно свідчить про наявність прихованого дефекту в рубильнику РПБ-4П 400 А. Його розвиток може призвести до втрати електропостачання об'єкту, в результаті чого можливі фінансові збитки за рахунок порушення нормальної діяльності обладнання, до займання, в результаті чого буде пошкоджене й інше обладнання, проте в найменш поганому випадку, фінансові збитки складуть вартість заміни даного обладнання.

Окрім можливих фінансових ризиків підвищена температура спричиняє додаткові втрати електричної енергії, які за рік можна оцінити за допомогою формули

$$\Delta W_a = 8,76 I^2 \frac{\rho l (t_a - t_d)}{s_a (t_d - t_n)}, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (1)$$

де I – струм, що діє через ділянку, що перегрівається, А;

ρ – питомий опір матеріалу з якого зроблена ділянка, що перегрівається (Ом·мм²)/м;

l – довжина ділянки, що перегрівається, м;

s_a – площа поперечного перерізу ділянки, що перегрівається, m^2 .

t_a – температура перегрітої ділянки, $^{\circ}C$;

t_d – температура ділянки, що має нормальний нагрів, $^{\circ}C$;

t_n – температура оточуючого повітря, $^{\circ}C$;

За результатами обчислення по (1) орієнтовні втрати електричної енергії для даного рубильника складуть близько 35 кВт·год за рік.

При тепловізійному обстеженні електротехнічного обладнання було виявлено локальне перегрівання в зоні болтового з'єднання фази автоматичного вимикача з однією із шин. Підвищена температура спостерігалася безосередньо в області кріплення, що свідчить про можливе послаблення з'єднання або недостатню силу затягування контактної вузла (Рис. 2). Подібні дефекти є типовими причинами зростання контактної опору, надмірного тепловиділення навіть за номінального режиму роботи.

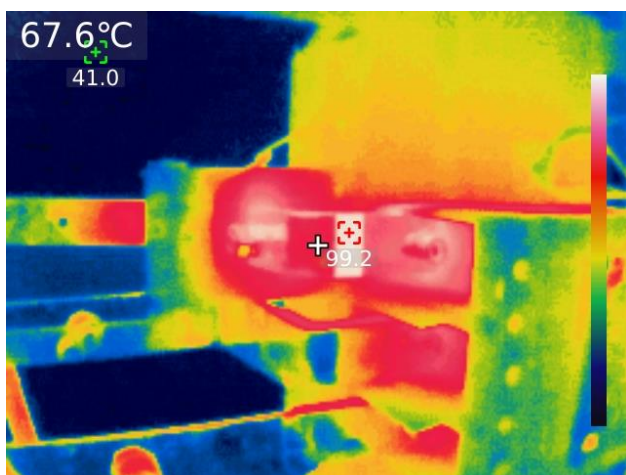


Рис. 2 - Теплограма перегрівання шини в місці кріплення до автоматичного вимикача

Послаблення контактних з'єднань є досить поширеним явищем в експлуатації електроустановок. Такі дефекти можуть виникати як унаслідок термічного розширення металевих елементів під час тривалого циклічного навантаження, так і через недостатню якість затягування контактів на етапі монтажу. Регулярне проведення тепловізійної діагностики дає змогу своєчасно виявляти подібні відхилення без необхідності демонтажу обладнання або переривання його роботи. Це дозволяє не лише мінімізувати експлуатаційні витрати, але й суттєво підвищити загальний рівень надійності та безпеки системи електропостачання.

При тепловізійному обстеженні конденсаторних батарей також було зафіксовано перегрівання розрядних опорів цих батарей. В умовах нормальної експлуатації ці резистори мають бути відключеними в робочому режимі ККУ, однак їх нагрівання до температури $120^{\circ}C$ (Рис. 3) свідчить про їх постійне включення, тобто можливий дефект.

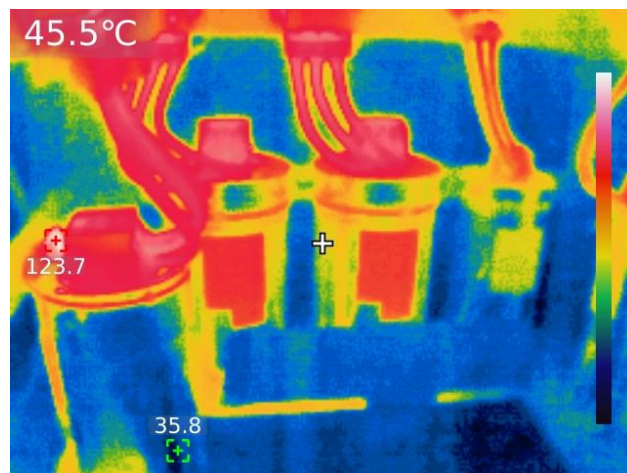


Рис. 3 - Теплограма перегрівання розрядних опорів конденсаторів ККУ

Постійне навантаження на розрядні опори може призвести до прискореного зносу або виходу з ладу самих резисторів й пов'язаних з ними конденсаторів. Наслідком цього може стати тимчасове зниження ефективності компенсації реактивної потужності в мережі, що у свою чергу призведе до фінансових втрат у вигляді платежів за спожиту реактивну енергію.

Окрім розподільчих мереж було проведено тепловізійне обстеження елементів електрообладнання сонячних електростанцій. В результаті виявлено сім конекторів типу MC4 (які з'єднують між собою сонячні панелі) з температурою понад $100^{\circ}C$. Це суттєво перевищує характерні значення для аналогічних з'єднань (інших конекторів) у тому ж стрінгу, температура яких не перевищувала $55^{\circ}C$.

Максимальна зафіксована температура становила $160^{\circ}C$ (Рис. 4), що вказує на значне зростання перехідного опору в окремих з'єднаннях. За умови, що номінальний перехідний опір справного контакту MC4 становить близько 5 мОм, а температура при нормальній роботі не перевищує $60^{\circ}C$, таке перегрівання може відповідати збільшенню перехідного опору приблизно на 40 % і більше.

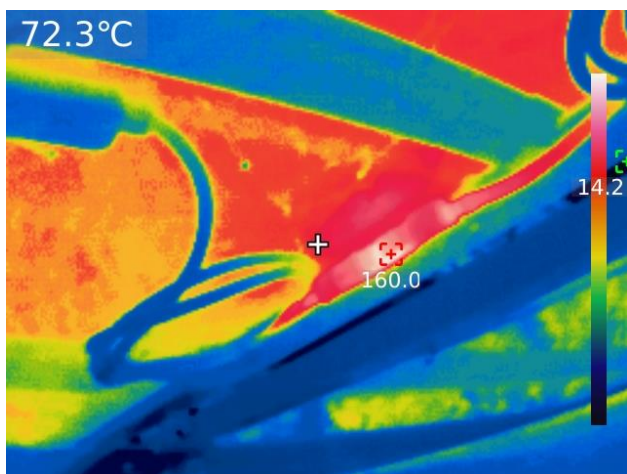


Рис. 4 - Теплограма перегрівання конектора сонячних панелей МС4

Подібне теплове перевантаження свідчить про деградацію контактної поверхні або неповне з'єднання, що створює потенційну загрозу виходу з ладу з'єднувача, втрат виробітку електроенергії та навіть ризику займання.

За розрахунком, через такий дефект на одному конекторі, за робочий день сонячної електростанції в середньому втрачається близько 70 Вт електроенергії. З урахуванням того, що при обстеженні сонячної електростанції було виявлено дефекти на сьоми таких конекторах, сумарні втрати електроенергії за добу при сонячній погоді може скласти близько 500 Вт·год.

Досить показовими виявилися також результати тепловізійного обстеження ділянки приєднання сонячних збірок безпосередньо до інвертора. З'єднання здійснюється за допомогою стандартного конектора типу МС4, однак термограма виявила нерівномірність нагрівання його частин (Рис. 5).

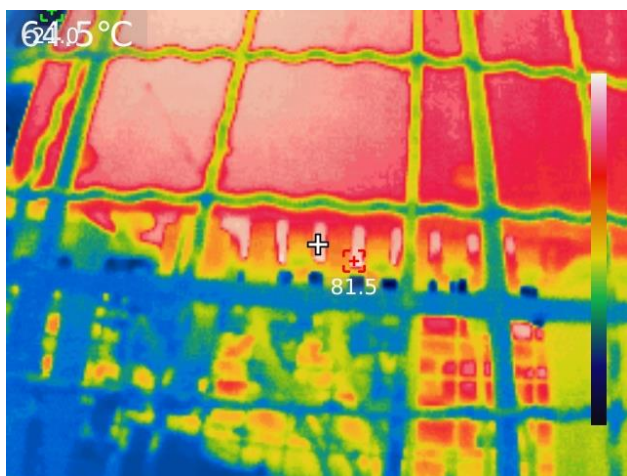


Рис. 5 - Теплограма нагрівання місць приєднання сонячних збірок

Зокрема, частина з'єднання, що встановлена та закріплена безпосередньо в корпусі інвертора і постачається в заводській комплектації, показала температуру до 82 °С, у той час як інша частина цього ж з'єднувача, яка приєднується зі сторони сонячної збірки, мала температуру на рівні типових значень для справних конекторів МС4, близько 55 °С.

Подібна різниця у температурних показниках в межах одного з'єднання свідчить про можливі дефекти заводського складання або неконтрольовані відхилення у процесі виробництва сонячних збірок, оскільки ці з'єднання не змінювались у процесі монтажу сонячних електростанцій і залишаються у первісному вигляді з моменту постачання елементів обладнання.

Виявлення подібних аномалій вказує на доцільність впровадження попередніх випробувань контактної опору заводських з'єднань до моменту введення сонячної електростанції в експлуатацію. З огляду на те, що зазначені частини інвертора після монтажу часто стають важкодоступними для огляду або обслуговування, наявність дефектів контактних з'єднань в самих комплектуючих елементах електрообладнання сонячних електростанцій може залишитися непоміченою. А це негативно впливає на надійність роботи всієї системи електропостачання, створює потенційні ризики виходу з ладу елементів сонячної електростанції та може погіршити якість виробленої електроенергії.

Серед виявлених температурних дефектів також привернуло увагу перегрівання кабельної перемички, яка з'єднує в послідовну збірку висковольтні акумуляторні батареї у складі системи накопичення енергії, що працює разом із сонячною електростанцією (Рис. 6).

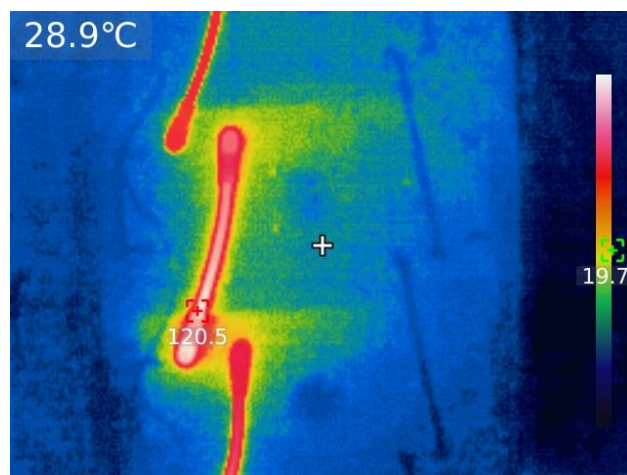


Рис. 6 - Теплограма нагрівання кабельної перемички АКБ

Під час тепловізійного обстеження було зафіксовано локальний перегрів у місці приєднання кабелю до клеми акумулятора з температурою 120 °С.

Водночас тепловізійний аналіз самих акумуляторних батарей не показав ознак перегріву, що виключає ймовірність внутрішньої несправності елементів живлення. Крім того, за температурним режимом акумуляторів у реальному часі постійно стежить вбудована BMS-плата, яка автоматично відключає акумуляторний блок у разі перевищення критичних температур. Враховуючи ці фактори, виявлене перегрівання з великою ймовірністю є наслідком недостатньо надійного контактного з'єднання, зумовленого заводським дефектом або відсутністю належного контролю якості. Це припущення побудовано на тому, що кабельні перемички постачалися разом з АКБ у складі стандартного комплекту і не змінювались під час монтажу сонячної електростанції.

Висновки

Проведене тепловізійне обстеження різних типів електротехнічного обладнання в системах розподіленого електропостачання, відновлюваних джерел енергії та системах накопичення енергії підтвердило, що тепловізійний контроль є ефективним, надійним і доступним методом діагностики, який дозволяє виявляти аварійно небезпечні ділянки на ранніх стадіях їх розвитку. Виявлені випадки перегріву свідчать про наявність прихованих дефектів, що не мають зовнішніх проявів, але можуть призвести до серйозних позаштатних ситуацій, таких як аварії, пожежі або відмови систем електропостачання.

Тепловізійна діагностика дозволяє запобігати порушенням у роботі обладнання до моменту їхнього критичного розвитку, тим самим значно знижуючи ризики простоїв, втрат генерації чи пошкодження інфраструктури. Крім підвищення технічної безпеки, своєчасне виявлення дефектів сприяє оптимізації режимів роботи, зменшенню втрат енергії, а також забезпечує економію витрат, які в іншому випадку були б спрямовані на ремонт, заміну чи модернізацію обладнання після настання аварії.

Таким чином, впровадження регулярного тепловізійного контролю в систему технічного

обслуговування електротехнічних комплексів є доцільним, економічно обґрунтованим та критично важливим заходом, що напряму впливає на надійність, енергоефективність і довговічність електроенергетичної інфраструктури, особливо в умовах активного використання розподіленої генерації та відновлюваних джерел енергії.

Конфлікт інтересів

Автор цієї наукової статті заявляє про відсутність будь-якого конфлікту інтересів: фінансових, майнових, професійних, особистих або інших обставин, які могли б прямо чи опосередковано вплинути на процес дослідження, об'єктивність аналізу, інтерпретацію отриманих результатів або висновки, представлені в даній роботі. Усі матеріали подано неупереджено та відповідно до принципів наукової доброчесності.

Фінансування

Дане дослідження проводилося без зовнішнього фінансування, всі витрати пов'язані з процесом виконання дослідження, були покриті за рахунок власних коштів.

Наявність даних

Усі основні, найбільш значущі результати дослідження на думку автора, представлені безпосередньо в тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Штучний інтелект був залучений виключно для попереднього пошуку інформації, всі наведені аналізи, формулювання та висновки є виключно власною думкою та позицією автора і не мають ніякого відношення до діяльності штучного інтелекту.

Внесок автора

Разінков В. О.: Проведення інструментального обстеження, аналітичні висновки, висвітлення результатів для широкого кола фахівців, фахова оцінка можливих причин виникнення дефектів та надання рекомендацій щодо недопущення або попередження виявлених в дослідженні проблем в електричних мережах.

Список використаної літератури

1. Budstandart.com. (2019). *ГКД 34.20.507-2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила (у редакції наказу від 21.06.2019 № 271)*. [online] Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=86234 [Дата перегляду 17 березня 2026].
2. Budstandart.com. (2026). *СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007 Технічне діагностування електрообладнання та контактних з'єднань електроустановок і повітряних ліній електропередачі за допомогою інфрачервоної техніки*. [онлайн]. Доступно за адресою: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=57533 [Дата перегляду 17 березня 2026].
3. Xia, C., Ren, M., Wang, B., Dong, M., Xu, G., Xie, J. and Zhang, C. (2020). Infrared thermography-based diagnostics on power equipment: State-of-the-art. *High Voltage*, 6(3), pp.387–407. doi:<https://doi.org/10.1049/hve2.12023>.
4. Lvov, M.Yu., Nikinina, S.D., Lvov, Yu.N., Lesiv, A.V., Serebryannikov, E.E., Ryabikov, A.I. and Nazarov, A.A. (2024). Methods for Control and Detection of Fire-Hazardous Defects of Contacts and Contact Connections During Operation of Electrical Installations. *Power Technology and Engineering*, 58(3), pp.547–556. doi:<https://doi.org/10.1007/s10749-024-01846-3>.

References

1. Budstandart.com. (2019). *HKD 34.20.507-2003 Tekhnichna ekspluatatsiya elektrostansiy ta merezh. Pravyla (zi zminamy, vnesenymy nakazom vid 21.06.2019№ 271) [GKD 34.20.507-2003 Technical operation of power plants and networks. Rules (as amended by the order of 21.06.2019 № 271№ 271)]*. [online]. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=86234 [Accessed 17 Mar. 2026].
2. Budstandart.com. (2026). *SOU-N EE 20.577:2007 Tekhnichna diahnostyka elektroobladnannya ta kontaknykh z'yednan' elektroustanovok i povitryanykh liniy elektroperedach z vykorystannyam infrachervonoyi tekhnolohiyi [Technical diagnostics of electrical equipment and contact connections of electrical installations and overhead power lines using infrared technology]*. [онлайн]. Доступно за адресою: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=57533 [Accessed 17 Mar. 2026].
3. Xia, C., Ren, M., Wang, B., Dong, M., Xu, G., Xie, J. and Zhang, C. (2020). Infrared thermography-based diagnostics on power equipment: State-of-the-art. *High Voltage*, 6(3), pp.387–407. doi:<https://doi.org/10.1049/hve2.12023>.
4. Lvov, M.Yu., Nikinina, S.D., Lvov, Yu.N., Lesiv, A.V., Serebryannikov, E.E., Ryabikov, A.I. and Nazarov, A.A. (2024). Methods for Control and Detection of Fire-Hazardous Defects of Contacts and Contact Connections During Operation of Electrical Installations. *Power Technology and Engineering*, 58(3), pp.547–556. doi:<https://doi.org/10.1007/s10749-024-01846-3>.

Отримано (Received) 23.09.2025

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 16.02.2026

Прийнято (Accepted) 17.03.2026

Опубліковано (Published) 23.04.2026

Audit of the Operation of Electrical Equipment of Distribution and Generating Networks

V. O. Razinkov, PhD

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0934-0426>; e-mail: razinkov.v.o@opu.ua

Odesa Polytechnic National University

Abstract. *The article considers thermal imaging diagnostics as a tool for technical inspection of electrical equipment in power supply systems. It is noted that today thermal imaging inspection is one of the most effective methods for non-contact detection of defects in contact connections, electrical devices, connecting elements and power cables. Particular attention is paid to the analysis of the advantages of using thermal imaging diagnostics in preventive maintenance, in particular its ability to detect hazardous areas at the early stages of damage development. Thermal imaging inspection allows you to quickly detect potential violations of operating modes, a decrease in the quality of electrical connections, local overheating and*

other defects that can lead to excessive energy losses, premature wear of equipment or even to emergency and fire-hazardous situations. Unlike traditional diagnostic methods, thermal imaging analysis does not require stopping the equipment, which makes it extremely convenient for use in conditions of continuous operation of energy infrastructure facilities.

It has been shown that the implementation of systematic thermal imaging monitoring increases the level of reliability of energy supply, helps prevent downtime, reduces the cost of emergency maintenance and repairs, and also allows for timely detection of installation errors or manufacturing defects. In addition, this approach contributes to increasing the overall energy efficiency of electrical equipment, which is especially relevant in the context of increasing use of renewable energy sources, decentralized generation and smart grids. The generalization of the research results emphasizes the feasibility of including thermal imaging monitoring in the regular maintenance of energy facilities, as well as the relevance of further development of methods for analyzing and processing thermal imaging data in order to automate diagnostics and increase its accuracy.

Keywords: *thermal imaging inspection, work efficiency, temperature regime, power supply reliability, emergency situations.*

Article citation: Razinkov V. O. (2026). Audit of the operation of electrical equipment of distribution and generating networks. *Electrotechnic and computer systems*, 45(121), pp.82-88. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.8>

Про автора (About the author)



Разінков Владислав Олексійович, доктор філософії, старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: razinkov.v.o@opu.ua; тел.: +38 048 705 8512

Razinkov Vladyslav Oleksiiiovych, PhD, Senior Teacher of the Department of Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: razinkov.v.o@opu.ua; ph.: +38 048 705 8512

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0934-0426>