



DOI: 10.31388/2078-0877-2023-23-2-167-176

УДК 621.3.045.5

О. Ю. Юрченко<sup>1</sup>, ст. викладач

ORCID: 0000-0002-3047-6654

Г. В. Барсукова<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-4261-2182

А. В. Чепіжний<sup>1</sup>, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-7540-8313

В. М. Зубко<sup>1</sup>, д-р техн. наук

ORCID: 0000-0002-2426-2772

Г. А. Тимошенко<sup>1</sup>, інженер,

ORCID: 0000-0003-0451-137X

<sup>1</sup> Сумський національний аграрний університетe-mail: [aleksyurchenko110917@gmail.com](mailto:aleksyurchenko110917@gmail.com), тел.: +380966106782

## ПОШУК МІСЦЯ ПОШКОДЖЕННЯ ОБМОТКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА ЗМІНОЮ РОБОЧОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

*Анотація.* Процес роботи енергетичного обладнання базується на дії магнітних полів. Котушки, що є структурними елементами такого обладнання, зазвичай, є однією із причин виходу зі строю генератора, електричного двигуна тощо. В залежності від того, яку саме обмотку пошкоджено, робота установки буде відрізнятися. Скажімо, пошкоджено пускову чи робочу обмотку статора електричного двигуна. В результаті чітко прогнозованого методу пошуку місця короткого замикання є можливість визначення яку саме котушку пошкоджено. Представлений у даній статті метод пошуку пошкодження обмоток електроенергетичного обладнання з використанням тепловізора дає чітке уявлення щодо швидкого та безпечного пошуку неробочої котушки. Якісний ремонт обладнання базується на гарантовано чіткому визначенні несправностей. Тому, представлений спосіб передбачає якість ремонту і економічний ефект.

*Ключові слова:* тепловізор, температура нагрівання, обмотка, котушка, статор, ротор, генератор, електричний двигун.

*Постановка проблеми.* Для умов сучасного машинобудування і, разом із тим, якісного ремонту машин і обладнання способи реалізації стратегії якості є першочерговими. Внаслідок правильних і раціональних дій у напрямку пошуку несправностей є можливість дотримання належних умов та вимог щодо технічного обслуговування та ремонту обладнання.

Електричний двигун, що є досить розповсюдженим і масовим електроенергетичним пристроєм, складається з певних структурних елементів. Однак, вихід зі строю окремих його частин веде за собою або повну втрату можливості роботи, або часткову. Скажімо, при виході зі строю підшипників, будуть спостерігатися шум, вібрації, нестандартна робота двигуна і т. п. Однак, у варіанті із обмотками, електричний двигун не буде запускатися. У попередніх дослідженнях



автором даної статті було показано способи ремонту електричного двигуна, а саме, - заміну окремих котушок. Не усіх, як це практикують на сьогодні, а лише окремих. Значимим ефектом від такого підходу є економія часу, фізичної праці, коштів на матеріали та обладнання. Крім того, у варіанті із обмотками заводського виконання є можливість їх збереження і заміни лише однієї, несправної котушки електричного двигуна.

Однак, важливим фактором є пошук місця пошкодження обмотки генератора або електричного двигуна. У зв'язку із сучасним машинобудуванням та умовами конвеєру якість укладки обмоток у пази, а також просочення її лаком у переважній більшості випадків не дають можливості пошуку котушки, що вийшла зі строю. Візуальний огляд не дає чіткого уявлення щодо причини поломки, а головне, - її точки.

У зв'язку із цим, актуальним завданням є пошук способів визначення точки виходу зі строю обмотки електроенергетичного обладнання з метою ефективного його ремонту.

*Аналіз останніх досліджень.* Питання повторного використання ресурсів дозволяє значно зменшити наявні невідновні запаси й унеможливити постійне збільшення завданої шкоди навколишньому середовищу. Ремонт електричних двигунів є складним процесом. В разі виходу зі строю обмотки, - є можливість її заміни. Таку операцію реалізують через зменшення витрат для покупки нового електродвигуна і максимального зменшення питання переробки відпрацьованого устаткування.

Для ремонту електродвигуна у домашніх чи лабораторних умовах при умові невеликих масштабів виробництва мається можливість використання різного обладнання, що значно полегшить виконання ремонтних робіт [1].

Діагностика несправностей електричного двигуна має на меті якісний пошук місць обриву як силового кола, так і кола керування. У роботі [2] показано реалізацію вбудованої системи з виявлення несправностей ротора в режимі реального часу для асинхронного двигуна. Пристрій є прототипом вимірювального пристрою, що може виявляти зламані стрижні ротора у полі без будь-якого додаткового налаштування чи стороннього програмного забезпечення. За мету в дослідженні було поставлено створення нового методу на основі попередніх досліджень із діагностики відмов ротора та розробка вбудованого вимірювального пристрою на базі мікроконтролеру. Новий метод, який поєднує у собі швидке перетворення Фур'є і реляційний аналіз Грея з метою отримання найкращих результатів з діагностики, розроблений для вбудованої системи у компактному й недорогому вимірювальному пристрої.



Циклостаціонарний аналіз отримує теж широке розповсюдження у ролі ефективного інструменту демодуляції при виявленні несправностей машин, які обертаються, на основі аналізу сигнатур вібрації. Дослідження [3] покращує два поточні зрілі циклостаціонарні підходи: спектр циклічної модуляції і швидку спектральну кореляцію. Такий спосіб у поєднанні з новим частотним додатком енергетичного оператора можуть покращити ідентифікацію ознак несправності за меншого обчислювального навантаження. У дослідженні [4] представлено вбудовану апаратну систему, в основі якої лежить вимірювання взаємної інформації й штучних нейронних мереж для діагностики коротких замикань обмоток статора трифазних асинхронних двигунів із синусоїдальним джерелом живлення, підключеним до мережі. В методології використовують міру теорії інформації з метою отримання найважливіших характеристик поточних сигналів фаз. Такі дані передаються до багатопланової нейронної мережі, яка виконує класифікацію шаблонів. Експериментальні випробування із різними умовами експлуатації машини підтверджують надійність й ефективність запропонованої методики.

Асинхронні машини керують багатьма виробничими процесами, а тому їхня несподівана відмова може призводити до великих виробничих втрат. Аналіз спектру струму дає можливість виявити в режимі онлайн характерні ознаки несправності на ранній стадії, уникаючи несподіваних поломок. Тим не менш, аналіз частотної області вимагає стабільних умов роботи, чого не можна сказати про вітрогенератори, двигуни, що приводять в рух змінне навантаження, і т. д. [5]. У статті [6] розглядається аналіз трифазної асинхронної машини із короткозамкненим ротором з несправністю у вигляді міжвиткового короткого замикання і її вплив на пряме керування крутним моментом. Використовувані особливості, такі як поведінка, його стандартний висновок та його характер нелінійного прогноуючого контролера на основі гістерезису, дозволяють вдосконалювати й розробляти альтернативні пояснення явищ. Із метою моделювання на основі еквівалентної схеми Нортонна було розроблено блок, що конфігурується для асиметричного інтермодулю за принципом «пуск/робота». Результати моделювання й експериментів демонструють достовірність проведеного аналізу й теоретичних висновків, які дозволяють проводити подальші дослідження у галузі онлайн-діагностики несправностей і моніторингу стану двигуна з інверторним живленням за такого типу несправностей.

Наявні дослідження з виявлення несправностей статора із використанням нового методу вимірювання радіального потоку [7] та



методу, заснованого на потоці повітряного зазору з метою виявлення міжвиткового замикання й ідентифікації дефектної області [8] перевірені за допомогою моделювання методом кінцевих елементів, а також шляхом проведення кількох експериментальних випробувань. Порівняно, апаратна реалізація методу рекурсивного стаціонарного вейвлет-пакетного перетворення на платі з урахуванням процесора, використовувани для виявлення несправностей асинхронного двигуна за допомоги використання нижчої частоти вибірки й зменшених вибірок струму, дають можливість зменшеного споживання вбудованих ресурсів [9].

Тому, пошук нових методів отримання електричної енергії, раціональних способів в машинобудуванні, використанні енергії [10] та технічному обслуговуванню такого обладнання є важливим завданням.

*Формулювання мети статті.* Метою даного дослідження є випробування способу визначення котушки з коротким замиканням у роботі генератора за допомогою тепловізора. У зв'язку із цим висувуються такі задачі дослідження:

- проведення експериментального дослідження з сучасним обладнанням;
- використання складного якоря генератора з кількома котушками;
- перевірка несправності з подачею напруги;
- зробити висновки щодо практичного застосування та простоти і дешевизни способу по отриманню якісних показників для подальшого ремонту статора генератора.

*Основна частина.* Проведення експериментальних досліджень по пошуку котушки з коротким замиканням слід проводити зі зміною напруги. Визначення місця пошкодження потрібно здійснити на робочому статорі генератора. Першочерговим завданням є визначення робочої температури статора генератора при подачі напруги на нього. Потім, з метою визначення нагріву виконати імпровізовану котушку і замкнути накоротко. В дослідженнях нагріву котушок ротора генератора використано тепловізор UTi165A (рис. 1).

З метою якісного зображення експерименту схему сердечника та котушок зображено на рис. 3. Разом із тим, указана вище необхідна для намотки котушка з імпровізованим коротким замиканням схематично зображена на рис. 2, справа.





Рис. 1. Схема проведення експерименту:  
А – тепловізор UTi165A; Б – методика

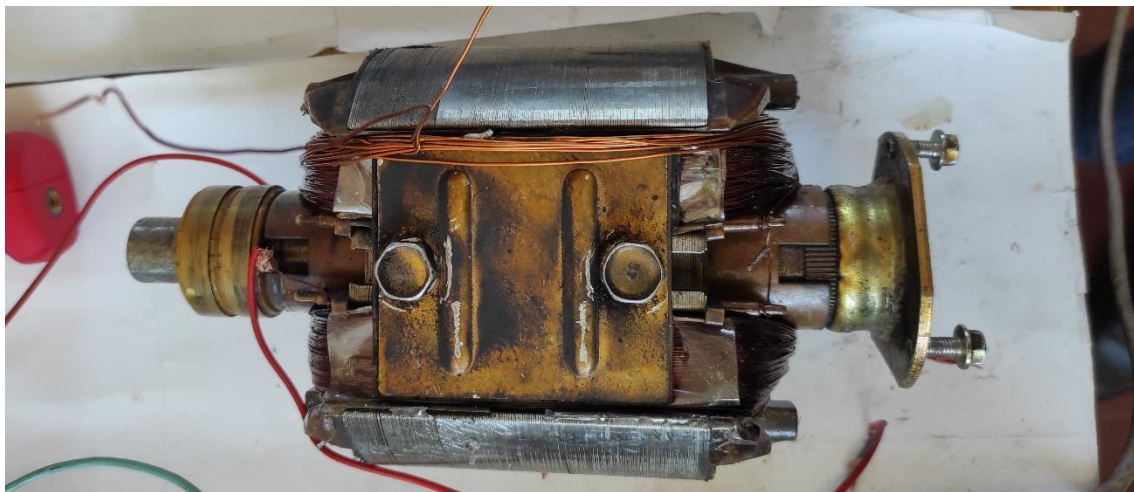


Рис. 2. Досліджуваний статор генератора

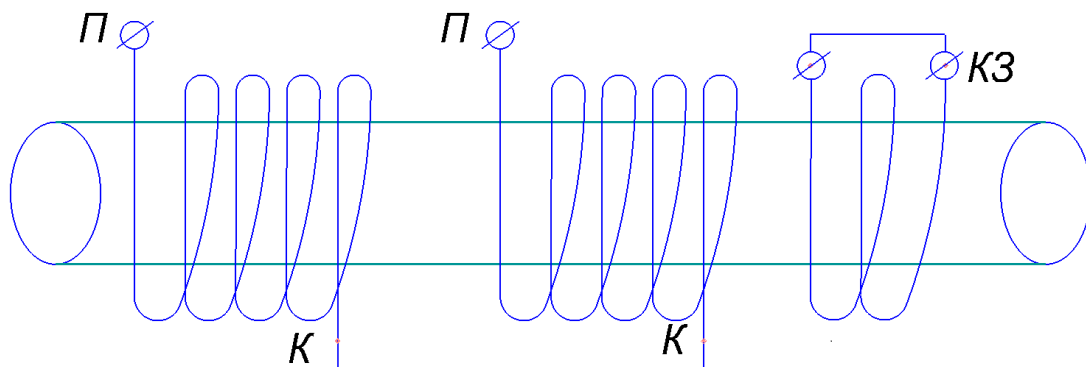


Рис. 3. Схема експериментального ротора генератора

Початок експериментального дослідження із незамкненими накоротко котушками показав нормально холодний їх стан на тепловізорі. За вимкненого стану, без подачі напруги температура обмоток ротора генератора становить  $26^{\circ}\text{C}$ . Послідовна подача напруги до 220 В показує плавний підйом температури обмоток ротора. Однак, це відбувається до робочої допустимої температури без чіткого зображення п'ятна нагріву.

Таблиця 1

## Показники нагріву котушок ротора

№ п/п	Час подачі напруги, сек	Робоча температура, °С
1.	5	26,3
2.	10	26,5
3.	15	26,6
4.	20	26,8
5.	25	26,9
6.	30	27
7.	35	27,2
8.	40	27,5

Другою частиною експерименту є створення імпровізованого витка на сердечнику ротора.

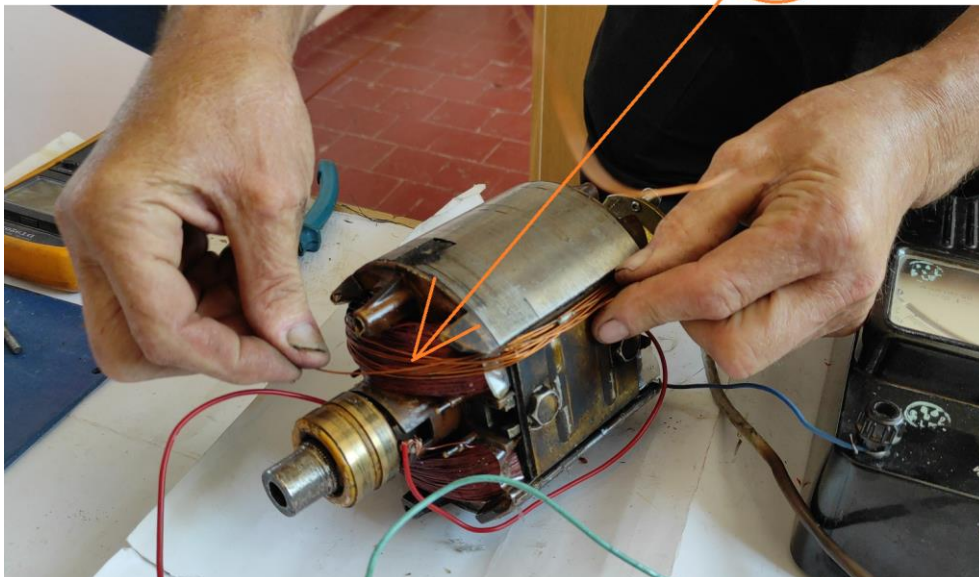
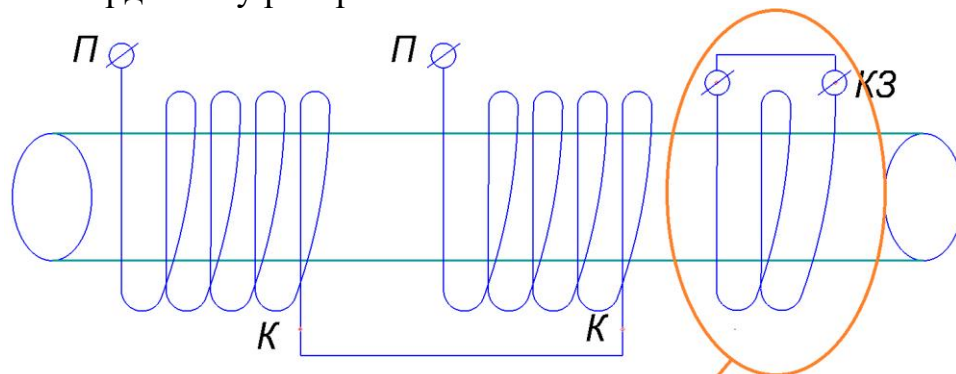


Рис. 4. Створення імпровізованої короткозамкненої котушки

При подачі напруги 220 В у коло ротора тепловізор показує нагрів кола ротора. Особливо це помітно відображається на екрані тепловізора з зображенням котушки, на якій відбувається нагрів. Досить ефективним є те, що інші котушки на екрані тепловізора

залишаються зеленого кольору, тобто, їх температура знаходиться в межах допустимої. А саме імпровізований виток, замкнути накоротко відображається на екрані тепловізора червоним кольором і з постійним збільшенням температури обмотки статора.



Рис. 5. Зміна температури обмотки. А, Б – виміри робочої обмотки; В, Г, Д, Е – короткозамкнена обмотка (32,4; 33,2; 34,3; 36,8°C відповідно)

Таблиця 2

Показники нагріву котушок ротора

№ п/п	Час подачі напруги, сек	Робоча температура, °C
1.	5	27,2
2.	10	28,7
3.	15	30
4.	20	31
5.	25	33
6.	30	35
7.	35	37,5
8.	40	39



Як бачимо з таблиці 2 – стрімкий ріст температури обмотки ротора супроводжується зміною кольору обмотки на екрані тепловізора. В такий спосіб є можливість визначення несправної обмотки статора або ротора електроенергетичного обладнання з метою ремонту або заміни лише однієї котушки, а не одразу усіх.

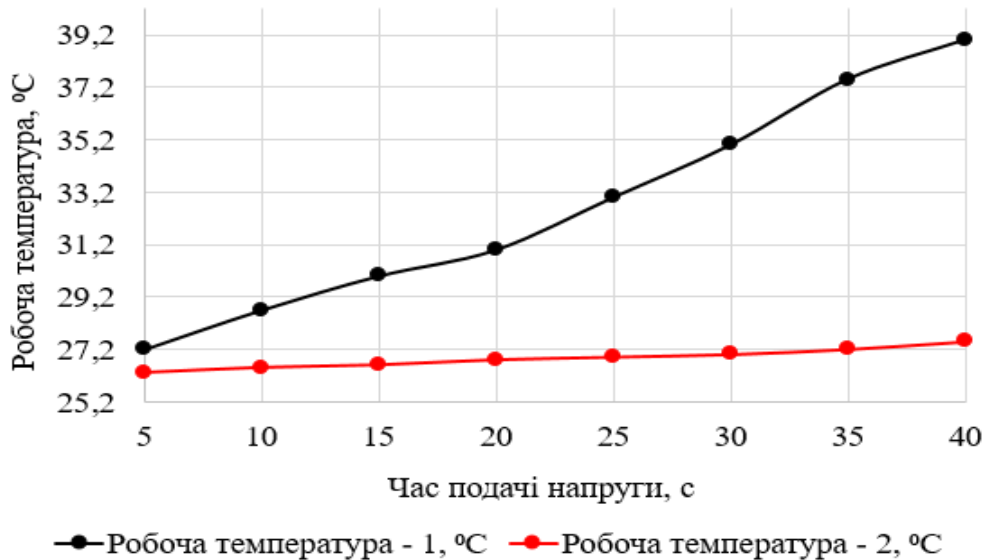


Рис. 6. Графік підйому температури за двох дослідів

Порівняльний аналіз двох дослідів з рисунку 6 показав, що робоча обмотка електротехнологічного пристрою майже не змінює робочої температури за умови відсутності перевантаження. З іншого боку, у разі короткого замикання, робоча температура збільшується. Цим самим, відбувається нагрів обмоток. У випадку використання тепловізора є можливість не лише визначити температуру кожної з обмоток, а і візуально бачити їх.

*Висновки.* В результаті проведення досліджень з виявлення обмотки з коротким замиканням в роторі генератора визначено, що одним із простих та ефективних способів є спосіб визначення температури котушки тепловізором. Ефективність такого методу пошуку несправності підтверджується одразу кількома факторами:

- гарантованістю результату;
- економією часу на ремонт внаслідок заміни лише однієї котушки замість кількох;
- економія на матеріали та обладнання (в даному випадку провід для перемотування обмотки);
- менша кількість відходів, що зменшує згубний вплив на навколишнє середовище.

Тому, одним із найбільш ефективних способів для домашніх або лабораторних умов пошуку місця пошкодження обмотки статора або ротора електроенергетичного обладнання є спосіб використання тепловізора.



*Список використаних джерел*

1. Юрченко О., Лівенко Т., Матвеев О., Беркут Р. & Бугайов В. Технологія ремонту електродвигунів різного призначення. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2023. Вип. 13(2). URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/433> (дата звернення 03.09.2023).
2. Guven Y., & Atis S. Implementation of an embedded system for real-time detection of rotor bar failures in induction motors. *ISA transactions*. 2018. Vol. 81. P. 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.08.004>.
3. Wang Z. M., Yang J., Li H., Zhen D., Gu F. & Ball, A. Improved cyclostationary analysis method based on TKEO and its application on the faults diagnosis of induction motors. *ISA transactions*. 2021. Vol. 10. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2021.10.026>.
4. Bazan G. H., Goedtel A., Scalassara P. R., Endo W., Nunes E. A., Takase V. T., Guedes J. J. & Gentil, M. G. An Embedded System for Stator Short-Circuit Diagnosis in Three-Phase Induction Motors Using Information Theory and Artificial Neural Networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2022. Vol. 52. P. 6582-6592. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2022.3149851>.
5. Burriel-Valencia J., Puche-Panadero R., Martínez-Román J., Sapena-Bano A., Riera-Guasp M. & Pineda-Sánchez M. Multi-Band Frequency Window for Time-Frequency Fault Diagnosis of Induction Machines. *Energies*. 2019. <https://doi.org/10.3390/en12173361>.
6. Berzoy A., Mohammed O. A. & Restrepo J. Analysis of the Impact of Stator Interturn Short-Circuit Faults on Induction Machines Driven by Direct Torque Control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018. Vol. 33. P. 1463-1474. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2827170>.
7. Surya G. N., Khan Z. J., Ballal M. S. & Suryawanshi H. M. A Simplified Frequency-Domain Detection of Stator Turn Fault in Squirrel-Cage Induction Motors Using an Observer Coil Technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017. Vol. 64. P. 1495-1506. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2611585>.
8. Dehghan H., Haghjoo F. & Cruz S. M. A Flux-Based Differential Technique for Turn-to-Turn Fault Detection and Defective Region Identification in Line-Connected and Inverter-Fed Induction Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2018. Vol. 33. P. 1876-1885. <https://doi.org/10.1109/TEC.2018.2837389>.
9. Hmida M. A. & Braham A. ARM based RSWPT implementation for embedded condition monitoring of induction motor. IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016. P.1464-1469. <https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7794066>.



10. Yurchenko O., Radchuk O., Barsukova H., Savchenko-Pererva M., Ivchenko O., Kolodnenko V. & Fesenko D. Determining a model of the blade in a wind turbine for regions with low wind speeds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 2(8 (122)). P. 44–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277896>.

*Стаття надійшла до редакції 12.09.2023 р.*

**O. Yurchenko<sup>1</sup>, H. Barsukova<sup>1</sup>, A. Chepizhnyy<sup>1</sup>, H. Tymoshenko<sup>1</sup>, V. Zubko<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>**Sumy National Agrarian University**

### **SEARCH FOR THE LOCATION OF DAMAGE TO THE ELECTRICAL EQUIPMENT WINDING DUE TO A CHANGE IN THE WORKING TEMPERATURE**

#### *Summary*

For the conditions of modern mechanical engineering and, at the same time, high-quality repair of machines and equipment, methods of implementing the quality strategy are of primary importance. As a result of correct and rational actions in the direction of fault finding, it is possible to comply with the proper conditions and requirements for maintenance and repair of equipment. The process of operation of energy equipment is based on the action of magnetic fields. Coils, which are structural elements of such equipment, are usually one of the reasons for failure of a generator, electric motor, etc. Depending on which winding is damaged, the operation of the installation will differ. For example, the starting or working winding of the stator of an electric motor is damaged. As a result of a clearly predicted method of finding the place of a short circuit, it is possible to determine which coil is damaged. The method of finding damage to the windings of electrical power equipment presented in this article using a thermal imager gives a clear idea of how to quickly and safely find a non-working coil. High-quality equipment repair is based on guaranteed clear identification of malfunctions. A comparative analysis of the two experiments from Figure 8 showed that the working winding of the electrotechnological device almost does not change the working temperature in the absence of overload. On the other hand, in the event of a short circuit, the operating temperature increases. By this, the windings are heated. In the case of using a thermal imager, it is possible not only to determine the temperature of each of the windings, but also to visually see them. Therefore, the presented method provides repair quality and economic effect. As a result of conducting research on the detection of a winding with a short circuit in the rotor of the generator, it was determined that one of the simple and effective methods is the method of determining the temperature of the coil with a thermal imager. The effectiveness of this method of finding a fault is confirmed by several factors at once. Therefore, one of the most effective ways for home or laboratory conditions to find the place of damage to the stator winding or rotor of electric power equipment is the method of using a thermal imager.

**Keywords:** thermal imager, heating temperature, winding, coil, stator, rotor, generator, electric motor.