

Termograficzna ocena stanu technicznego wirników silników indukcyjnych

Zbigniew Ławrowski

Wstęp

W artykule przedstawiono wykorzystanie metody termograficznej (termowizyjnej) do identyfikacji uszkodzeń wirników klatkowych.

Stały postęp w dziedzinie metod diagnozowania i aparatury diagnostycznej dostarcza coraz to więcej informacji o stanie technicznym urządzeń. Uzyskiwana w ten sposób duża ilość informacji często budzi pewne trudności interpretacyjne, w szczególności w takim przypadku, gdy trzeba odpowiedzieć, w którym miejscu zlokalizowana jest wcześniej stwierdzona usterka. Pomocą we wskazaniu wcześniej stwierdzonej usterki może być zastosowanie technologii termograficznej o odpowiedniej rozdzielczości. W artykule zostaną przedstawione trzy przykłady wirników, które zostały poddane ocenie termowizyjnej. Są to: 1) wirnik dwuklatkowy silnika typ SZDr-124 u/1 o mocy 650 kW i napięciu $U_n = 6$ kV; 2) wirnik klatkowy z prętami biernymi silnika typ Sf-450 Y4-E o mocy 850 kW i napięciu $U_n = 6$ kV; 3) wirnik klatkowy głęboko żłobkowy silnika typ SYJe-154/02/E o mocy 6,3 MW i $U_n = 6$ kV.

1. Sposoby wykrywania uszkodzeń wirników

Przyczynami uszkodzeń wirników mogą być zjawiska zewnętrzne, takie jak np. przepięcia sieciowe i łączeniowe, odkształcenia napięcia zasilania od kształtu sinusoidalnego, zagrożenia środowiskowe, takie jak zawilgocenie, zapylenie itd. Przyczynami uszkodzeń mogą być też zjawiska związane z normalną eksploatacją silników, a więc rozruchy, a przede wszystkim rozruchy długie lub często powtarzające się po sobie. Przyczyną uszkodzeń mogą być też przeciążenia silników.

W wyniku uszkodzenia klatki silnika indukcyjnego powstaje niesymetria obwodu elektrycznego wirnika. Jest ona przyczyną powstania składowej przeciwnej kolejności pola magnetycznego, a jej skutkiem jest pojawienie się w prądzie zasilania składowych o tzw. częstotliwościach poślizgowych $(1-2s)f$ oraz $(1+2s)f$, gdzie f oznacza częstotliwość napięcia zasilania, a s poślizg wirnika. Pomiar tych diagnostycznych składowych w prądzie zasilania jest możliwy w trakcie normalnej eksploatacji silników, ale wymaga to obciążenia silnika co najmniej połową znamionowego momentu obciążenia. Podczas rozruchu występuje również o zmniejszającej się amplitudzie składowa o częstotliwości $(1-2s)f$, która przy połowie

Streszczenie: W referacie przedstawiono przykładowe defekty w wirnikach silników indukcyjnych dużych mocy oraz termograficznej (termowizyjnej) metody ich wykrywania, opisano także nowatorskie sposoby wymuszania przepływu prądu w klatce wirnika. Referat jest ilustrowany kilkoma przykładami.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, wirnik klatkowy, wirnik z prętami biernymi, żelazo czynne, kamera termowizyjna, wymuszalnik prądowy, regulator napięcia

THERMOGRAPHIC EVALUATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE ROTORS INDUCTION MOTORS

Abstract: The paper presents examples of defects in rotor induction motors and high-power infrared detection methods are also described innovative ways of forcing the flow of current in the cage rotor. The paper is illustrated with a few examples.

Key words: induction motor, squirrel cage rotor, rotor bars of passive, active iron, infrared camera, current controller, voltage regulator

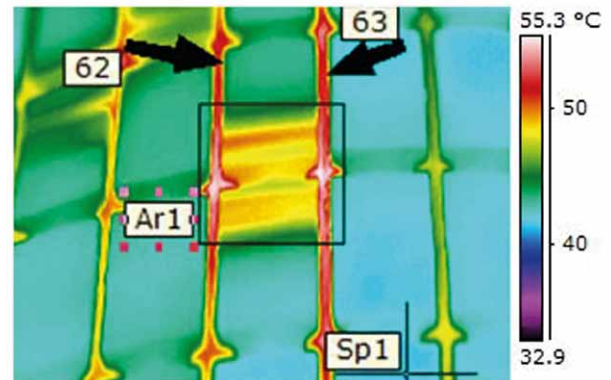
prędkości synchronicznej spada do zera. Obie te metody dobrze się uzupełniają.

W przypadku silników dwuklatkowych obie te metody nie są równoważne, pomiary diagnostyczne prądu rozruchowego dają informację przede wszystkim o stanie klatki górnej (rozruchowej), a pomiary prądu zasilania obciążonego silnika o stanie klatki dolnej (pracy).

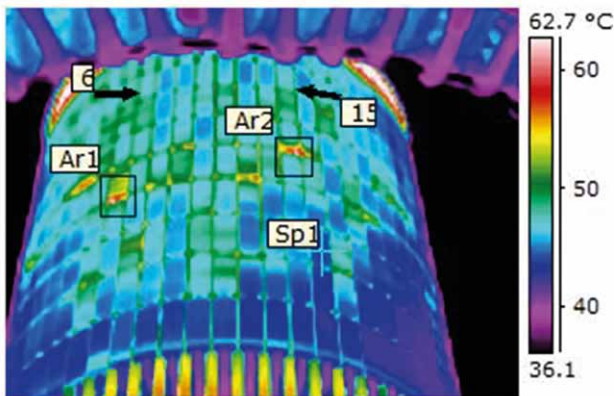
Inną metodą dookreślenia stanu klatki wirnika jest wykorzystanie strumienia poosiowego, powstającego w czasie pracy obciążonego silnika indukcyjnego. Ustawiona cewka pomiarowa po stronie przeciwnapędowej przechwytuje strumień, przekształcając go w sygnał. Sygnał z cewki pomiarowej może być wykorzystany bezpośrednio, jako wartość skuteczna, do porównania ze strumieniem mierzonym poprzednio lub z takiej samej maszyny i wówczas służy jako wstępna ocena stanu wirnika.



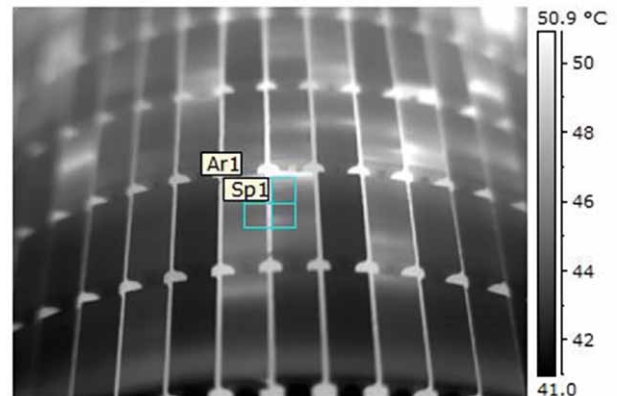
Fot. 1. Nagrzewanie wirnika silnika indukcyjnego w stojanie silnika indukcyjnego o mocy 6,3 MW



Fot. 3. Zwarcia w blachach żelaza czynnego – zbliżenie



Fot. 2. Zwarcia w blachach żelaza czynnego



Fot. 4. Zwarcia w blachach żelaza czynnego – zbliżenie innej części wirnika

Może też posłużyć (jako przebieg czasowy) po odfiltrowaniu do diagnozy stanu klatki podczas rozruchu silnika. Może jako widmo amplitudowo-częstotliwościowe posłużyć do dokładnego określenia prędkości obrotowej i dokładnej diagnozy stanu uzwojenia wirnika lub ekscentryczności w oparciu o charakterystyczne częstotliwości poślizgowe i inne częstotliwości istotne dla diagnostyki w stanie ustalonym [6, 7].

Pomimo tego, że metody te są wystarczające, aby ocenić stan klatki, może zachodzić potrzeba lokalizacji uszkodzenia klatki. Do tego celu dobrze nadaje się metoda termograficzna. Metoda ta pozwala dodatkowo na ocenę stanu obwodu magnetycznego (żelaza wirnika).

2. Lokalizacja uszkodzeń

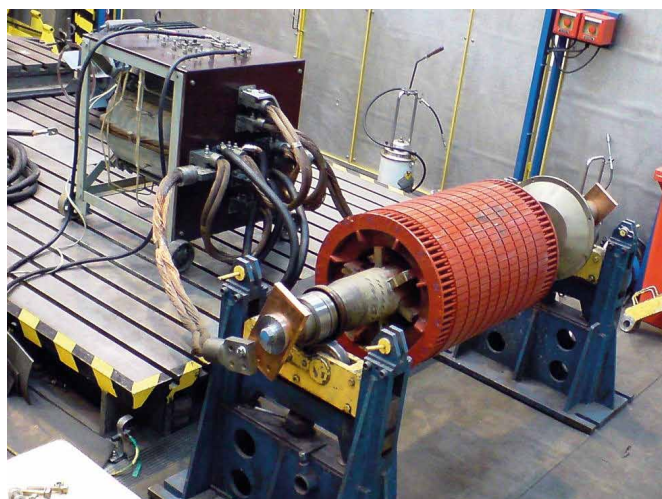
Metoda termograficzna zastosowana do analizy stanu obwodów elektrycznych wirnika zrealizowana została w oparciu o rejestrację rozkładu temperatur (termogramów) kamerą termowizyjną o rozdzielczości $0,05^{\circ}\text{C}$. Istotnym elementem metody jest wymuszenie prądu w obwodach elektrycznych klatki wirnika tak, żeby możliwa była wizualna ocena wszystkich połączeń prętów klatki i blach żelaza czynnego. W tym

celu badane wirniki silników zostały włożone do stojana silnika indukcyjnego typu SYJe-154t/02/E o mocy 6,3 MW. Wirnik został ustawiony symetrycznie w stosunku do osi stojana, sposób włożenia wirnika przedstawiono na fot. 1.

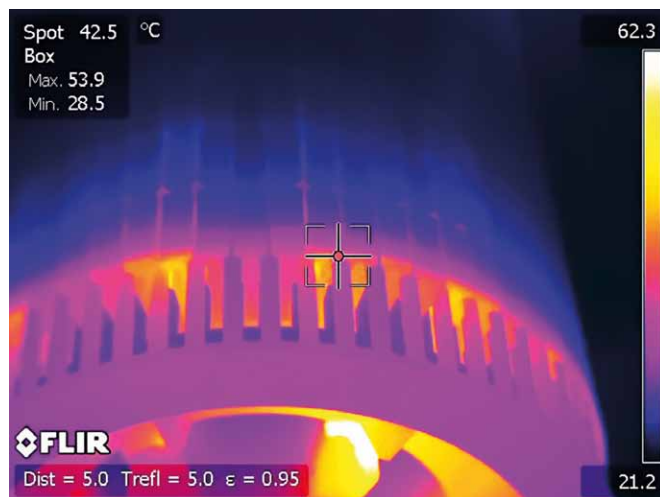
Pierwszym prezentowanym przykładem jest wirnik dwuklatkowy silnika typ SZDr-124 u/1 o mocy 650 kW i napięciu $U_n = 6\text{kV}$. Wcześniej wirnik tego silnika został poddany ocenie w czasie swojej pracy na stanowisku, z uwagi na duże chwilowe zmiany prądu obciążenia. Należy dodać, że wyeliminowano ewentualne naturalne przyczyny tych wahań, jakim by mogły być zmieniające się warunki obciążenia. Widmo prądu obciążenia poddano analizie, z której wynika, że stosunek prądu podstawowego do prądu poślizgowego (f_0 i f_2) wynosi 38 dB, a wartość graniczna wynosi 40 dB. Pomiar i analiza świadczą o uszkodzeniu klatki wirnika.

Na fot. 2, 3, 4 przedstawiono termogramy wirnika, na których uwidoczniona jest stosunkowo duża ilość zwarcia w blachach żelaza czynnego. Zwarcia te mogą powodować nierównomierne nagrzewanie wirnika w czasie pracy.

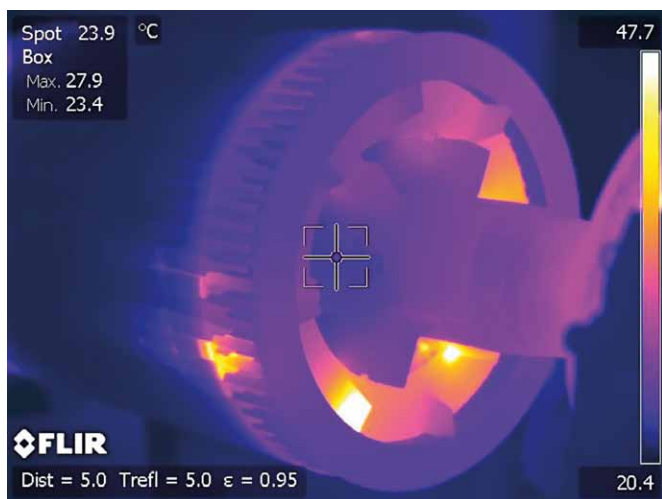
W obwodach klatki rozruchowej takich wyraźnych różnic temperatur nie stwierdzono.



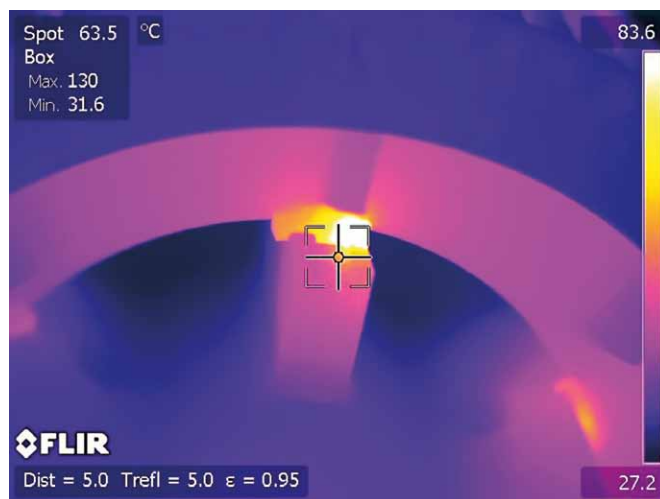
Fot. 5. Wirnik dwuklatkowy silnika o mocy 650 kW



Fot. 7. Wirnik dwuklatkowy - termogram - silnie przegrzane mocowanie wału



Fot. 6. Wirnik dwuklatkowy - termogram od strony przeciwnapędowej



Fot. 8. Wirnik dwuklatkowy - termogram - mocowanie wału

Z uwagi na dużą szczelinę między wirnikiem a uzwojeniem stojana natężenie pola elektromagnetycznego wokół wirnika nie zawsze może być wystarczające. Obwody klatki rozruchowej, a tym bardziej klatki roboczej, nie zawsze mogą odpowiednio szybko się nagrzewać. Duża masa wirnika szybko pochłania ciepło, przyrosty temperatur w ewentualnych defektach mogą się szybko wyrównywać z temperaturą całego wirnika.

Podjęto decyzję o zmianie sposobu wymuszania prądu w obwodach wirnika. Prąd elektryczny przepływający przez przewód na całej swojej długości wytwarza wokół siebie pole elektromagnetyczne. To zjawisko wykorzystano do nagrzewania obwodów klatek wirnika, traktując wał wirnika jako przewód elektryczny. Wirnik został ustawiony na dwóch stojakach (fot. 5) odizolowanych od podłoża. Przez wał wirnika przepuszczono prąd elektryczny o natężeniu kilku kiloamper. Wytworzone pole elektromagnetyczne nie jest polem wirującym, jak

w poprzednim sposobie nagrzewania. Należy zwrócić uwagę, że pręty klatek roboczej i rozruchowej są ułożone równoległe do wału. Strumień elektromagnetyczny wytworzony przez wał będzie się zamykał w obwodach utworzonych przez pręty wymienionych klatek. Natężenie prądu przepuszczanego przez wał można odpowiednio regulować w zależności od wielkości lokalnych przyrostów temperatur.

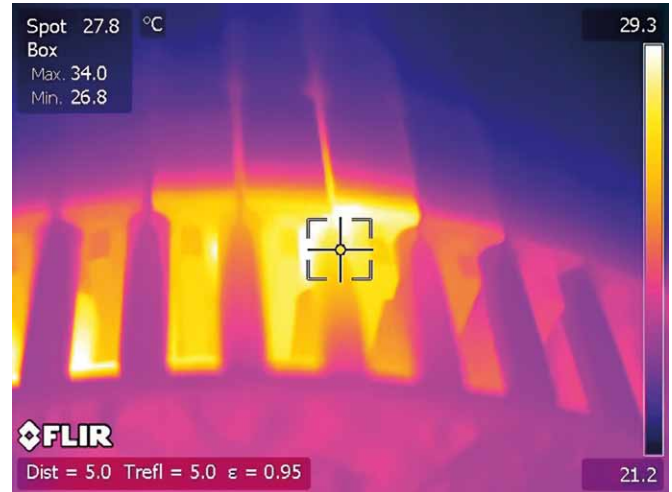
Te lokalne przyrosty temperatur mogą powstawać nie tylko w kłatkach wirnika, ale także w obwodach powstałych przez zespawanie różnych elementów mocujących wał z właściwym wirnikiem.

Dla przykładu fot. 6, 7 i 8 obrazują termogramy elementów konstrukcyjnych mocowania wału, które są wykonane w postaci spawanych połączeń. Na termogramach widać bardzo duże przyrosty temperatur (około 60 stopni).

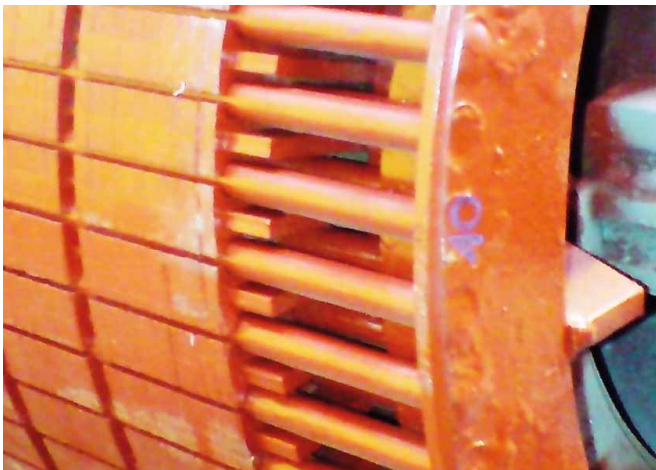
Powyższe przyrosty świadczą o niejednorodnej strukturze badanych połączeń; korzystając z innych technologii



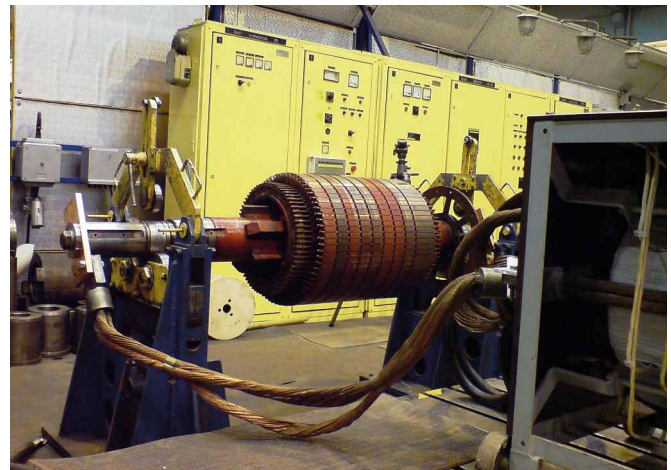
Fot. 9. Wirnik dwuklatkowy - termogram - zwarcie pręta klatki rozruchowej



Fot. 11. Wirnik dwuklatkowy - termogram - zwarcie pręta klatki roboczej z żelazem oraz zwarcie pręta klatki rozruchowej z żelazem



Fot. 10. Wirnik dwuklatkowy - fragment wirnika



Fot. 12. Nagrzewanie wirnika silnika z prętami biernymi o mocy 850 kW

sprawdzania (np. penetrantów), powinno się określić poprawność ich wykonania.

Termogram na fot. 9 przedstawia pręt klatki rozruchowej, który zwiera dwa zakończenia żelaza czynnego wraz z rozwarstwionymi blachami na ich końcach. Przyrost temperatur jest rzędu 20°C. Kolejnymi wykrytymi zwarciami są zwarcia przedstawione na termogramie z fot. 11, który przedstawia po lewej stronie zwarcie pręta klatki roboczej w głębi oraz na środku termogramu zwarcie pręta klatki rozruchowej z końcami żelaza czynnego. Te dwa zwarcia są względnie blisko siebie i najprawdopodobniej tworzą wspólny obwód elektryczny.

Przedstawione powyżej termogramy zostały wykonane na wirniku dwuklatkowym o mocy 650 kW. Wykryto w nich anomalie temperaturowe zarówno w blachach żelaza czynnego, w połączeniach klatki rozruchowej, jak i w połączeniach klatki roboczej.

Należałoby wykonać teraz szczegółowe analizy, na ile te ujawnione defekty znacząco wpływają na „pulsowanie” prądu

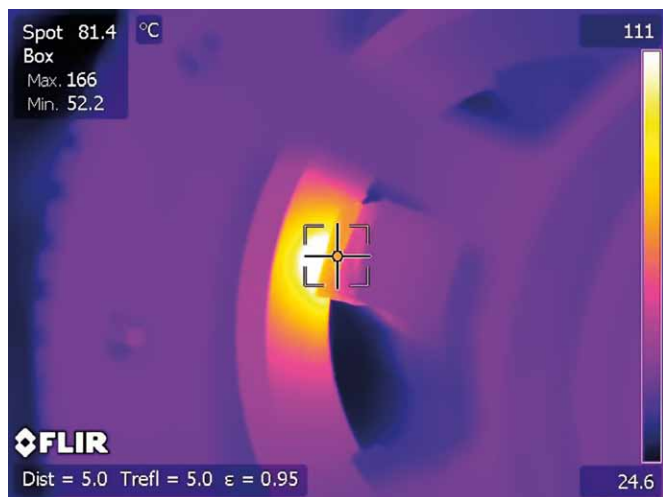
obciążenia, które było powodem odstawienia silnika do remontu.

W artykule tym przedstawia się metodę, która ujawnia miejscowe defekty w częściach konstrukcyjnych wirników, a przeprowadzenie szczegółowych analiz może być przedmiotem odrębnego opracowania.

W dalszej części zostanie przedstawiony kolejny wirnik, tym razem w wykonaniu głęboko żłobkowym z biernymi prętami rozruchowymi. Powodem skierowania wirnika do oceny technicznej było ujawnienie się głośnej pracy silnika i zwiększenie drgań trzy razy w stosunku do pierwotnych pomiarów.

Fot. 12 przedstawia wirnik silnika o mocy 850 kW, który jest ustawiony na stojakach i jest przygotowany do grzania prądem elektrycznym wymuszonym przez jego wał.

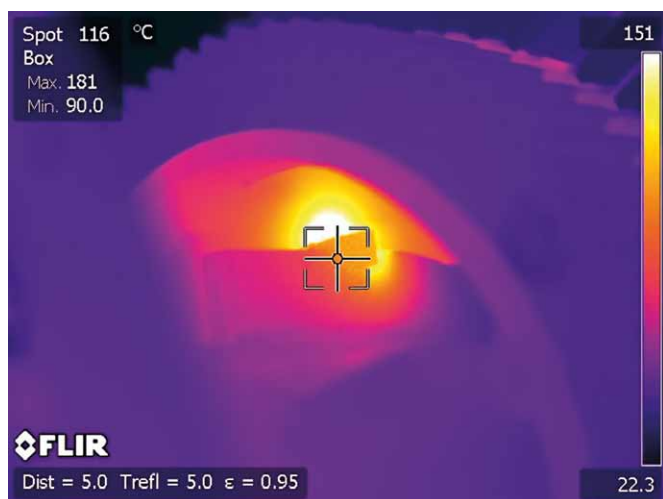
Na fot. 13 i 14 termogramy ujawniają wysoką temperaturę w okolicach mocowania wału do klatki wirnika; trzeba zaznaczyć, że nie są symetrycznie rozmieszczone wokół wału. Gdyby



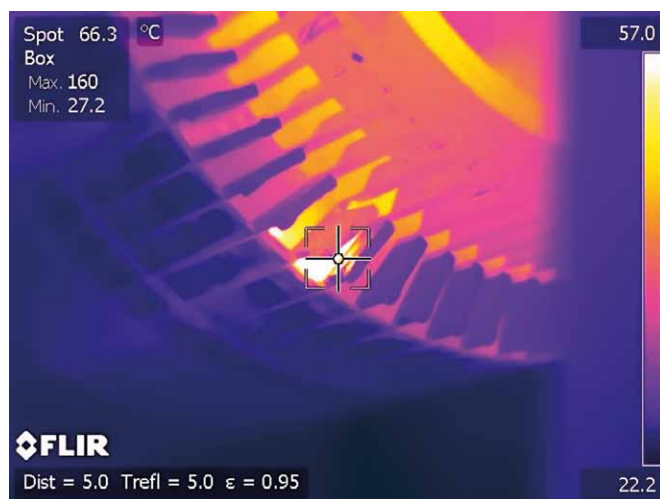
Fot. 13. Termogram przedstawia połączenie wału z konstrukcją wirnika



Fot. 15. Zwarcie blach żelaza czynnego przy luźnym przęcie biernym



Fot. 14. Termogram przedstawia połączenie wału z konstrukcją wirnika



Fot. 16. Zwarcie blach żelaza czynnego przy luźnym przęcie biernym

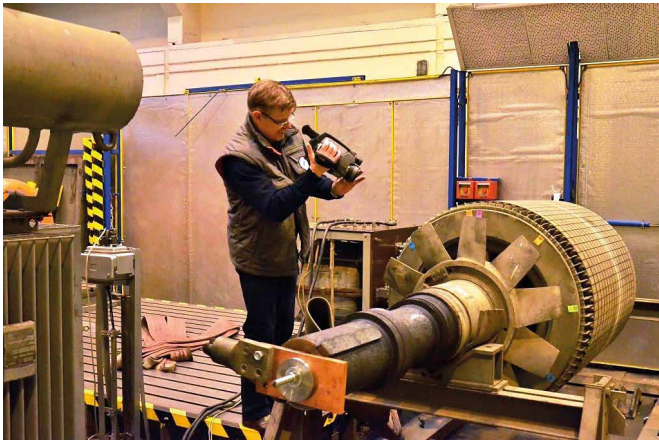
miejsca te były rozmieszczone symetrycznie, można by podejrzewać, że sam sposób mocowania narzuca taki rozkład temperatur. Powstanie tych lokalnych przegrzewów świadczy o różnej właściwości wykonanych połączeń spawanych. Podwyższona temperatura świadczy o innej oporności elektrycznej niż sam materiał, z którego wykonany jest spaw. Spawy te mogą być popękane lub mieć ukryte szczeliny z wtrącinami gazowymi, powstałe zapewne podczas długotrwałej eksploatacji.

Należałoby zbadać czy ujawnione defekty tych połączeń mają wpływ na wielkość drgań silnika.

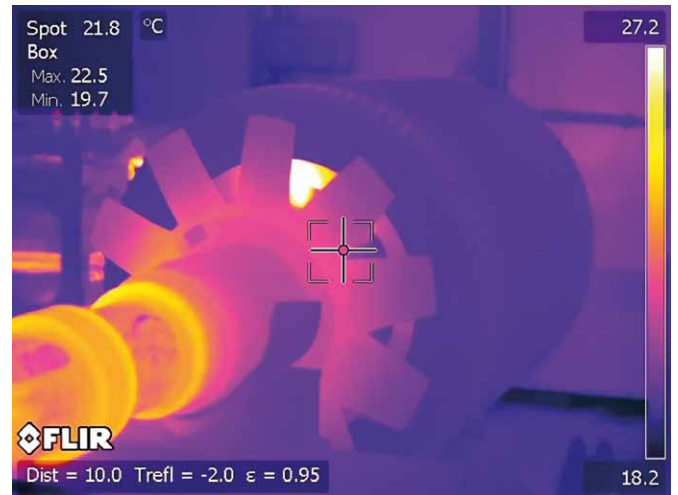
Zdjęcia 15 i 16 obrazują termogramy, które przedstawiają zwarcia luźnych prętów klatki biernej z żelazem czynnym wirnika. Zwarcia te powstały w wyniku obluźowania się prętów biernych i obcierania się ich o blachy żelaza czynnego. Podczas długoletniej eksploatacji silnik wykonał kilka tysięcy ciężkich rozruchów, które najprawdopodobniej doprowadziły do obluźowania wspomnianych prętów.

Ostatnim przykładem wykorzystania technologii termograficznej do lokalizacji uszkodzeń w wirnikach silników indukcyjnych są termogramy wirnika silnika typ SYJe-154/02/E o mocy 6,3 MW i $U_n = 6$ kV, masa tego wirnika wynosiła około 10 ton. Wirnik ten był wirnikiem rezerwowym, który nigdy nie pracował. Poddano go badaniom w celu zdobycia danych porównawczych w stosunku do wirników przedstawionych powyżej. Wirnik ten ze względu na swoje rozmiary mógł być nagrzewany tylko prądem elektrycznym przepuszczonym przez jego wał (fot. 17). Analizując termogramy, nie stwierdzono żadnych anomalii w połączeniach klatki wirnika. Można je było zauważyć jedynie przy spawanych połączeniach wału z klatką wirnika, były one rozłożone symetrycznie wokół wału.

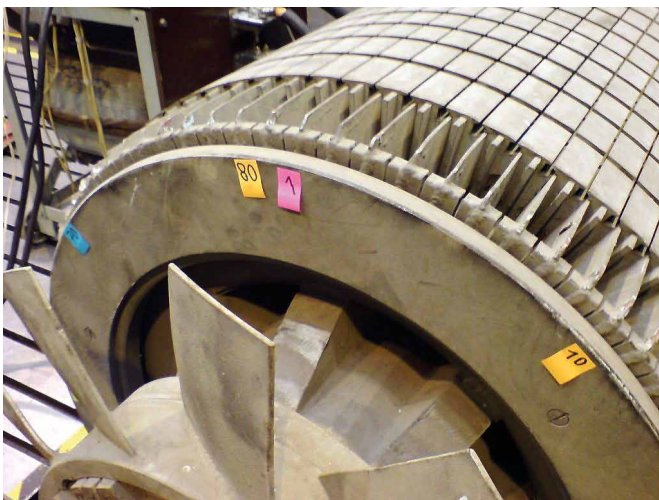
Symetryczne rozłożenie wspomnianych przegrzewów połączeń spawanych jest prawdopodobnie pewną cechą charakterystyczną dla tego typu wirnika. Wirnik ten nigdy wcześniej nie pracował, a jeżeli jest to wada, to zapewne wynikająca ze



Fot. 17. Wirnik głęboko żłobkowy silnika o mocy 6,3 MW grzany wymuszonym prądem elektrycznym, przepływającym przez wał wirnika



Fot. 20. Termogram wirnika silnika indukcyjnego o mocy 6,3 MW



Fot. 18. Wirnik głęboko żłobkowy silnika o mocy 6,3 MW



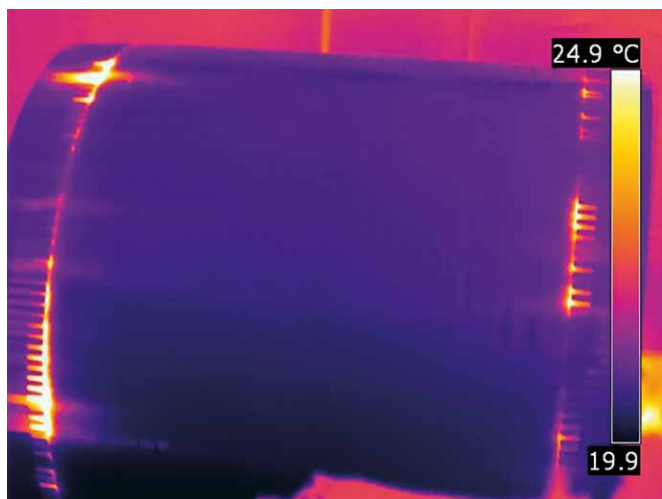
Fot. 21. Wirnik głęboko żłobkowy silnika o mocy 6,3 MW – termogram; miejsce mocowania wału wirnika



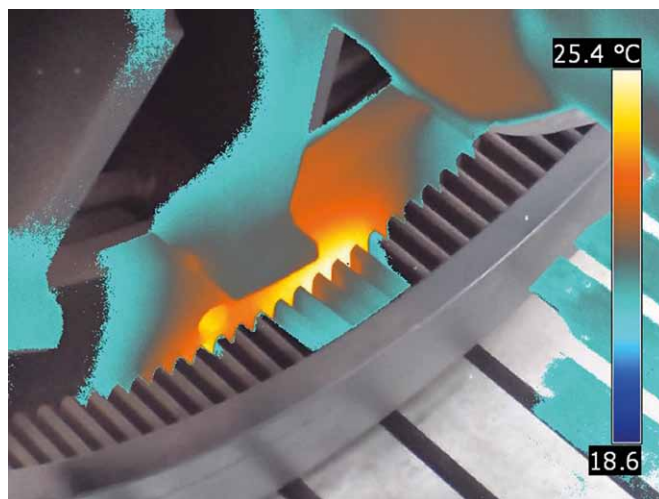
Fot. 19. Termogram wirnika głęboko żłobkowego silnika o mocy 6,3 MW



Fot. 22. Wirnik głęboko żłobkowy silnika o mocy 6,3 MW – termogram; miejsce mocowania wału wirnika



Fot. 23. Wirnik 3,7 MW – zwarcia prętów klatki z blachami żelaza czynnego



Fot. 24. Wirnik 3,7 MW – zwarcia prętów klatki z blachami żelaza czynnego od strony wewnętrznej

sposobu wykonania tych połączeń, czyli jest wadą produkcyjną. Warto by się zastanowić, czy nie należałoby przeprowadzać termograficznych badań odbiorczych nowych wirników.

Metoda nagrzewania wirnika poprzez wymuszenie przepływu prądu przez wał wirnika pokazuje wyraźnie, że w pakiecie wirnika może dochodzić do zwarć z prętami klatki. Gdy miejsca tych zwarć są rozłożone niesymetrycznie po obwodzie wirnika, generują zjawiska (prądy skrośne płynące wzdłuż osi wału, mostkujące częściowo pręty wirnika) niekompensujące się i wzmacniające niesymetrię elektromagnetyczną wirnika.

Na fot. 23 i 24 pokazano przykłady zwarć wykrytych w wirniku silnika o mocy 3,7 MW i prędkości obrotowej 372 obr./min.

Wnioski

1. Wykorzystanie technologii termograficznej (termowizyjnej) do identyfikacji uszkodzeń w wirnikach silników indukcyjnych jest metodą skuteczną.
2. W zależności od sposobu wymuszania przepływu prądu w obwodach wirnika można badać efektywnie jego części składowe, takie jak żelazo czynne, połączenia klatki roboczej, połączenia klatki rozruchowej itd.
3. Niektóre wykryte techniką termograficzną anomalie powinno się potwierdzać innymi technikami badań nieniszczących, między innymi chodzi o mocowania wału z klatką wirnika.
4. Reasumując, każdy nowo wyprodukowany wirnik dla silników indukcyjnych dużej mocy powinien być poddany odbiorczym badaniom termograficznym, zwłaszcza dotyczy to wirników silników energooszczędnych.

Literatura

- [1] ŁAWROWSKI Z.: *Zastosowanie techniki termowizyjnej do diagnostyki aparatury elektroenergetycznej w Elektrowni Opole*. „Wiadomości Elektrotechniczne” 12/1996.
- [2] ŁAWROWSKI Z.: *Diagnostyka silników klatkowych wysokiego napięcia w energetyce*. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1999.
- [3] HICKIEWICZ J., ŁAWROWSKI Z.: *Przykłady badań diagnostycznych transformatorów i maszyn elektrycznych w energetyce*. Mat. Konf. SME 2005, 14–17 czerwiec 2005, Jarnołtówek.
- [4] ŁAWROWSKI Z., BOJAR M., HERMAN W.: *Monitorowanie rozwijającego się uszkodzenia w transformatorze blokowym przy wykorzystaniu termowizji i badań wibroakustycznych*. Polska Akademia Nauk, Podstawowe problemy metrologii, Krynica-Zdrój, czerwiec 2012.
- [5] RAMS W., RUSEK J.: *Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych*. „Zeszyty Problemowe KOMEL” 68/2004.
- [6] DUDA A., PETRYNA J., SUŁOWICZ M., GUZIEC K.: *Metoda wstępnej oceny stanu wirnika silnika indukcyjnego przy pomocy dedykowanego przyrządu opartego na pomiarze strumienia poosiowego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2015.
- [7] PETRYNA J., SUŁOWICZ M., DUDA A., GUZIEC K.: *Możliwości wykorzystania strumienia unipolarnego w diagnostyce maszyn prądu przemiennego*. „Napędy i Sterowanie” 5/2014.

dr inż. Zbigniew Ławrowski - Energotest-Diagnostyka
e-mail: zlawrowski@energotest-diagnostyka.pl

artykuł recenzowany