

*silnik indukcyjny,
zwarcia zwojowe uzwojenia stojana,
badania cieplne*

Ludwik ANTAL*, Maciej GWOŹDZIEWICZ*,
Tomasz MARCINIAK*, Maciej ANTAL**

BADANIA SKUTKÓW CIEPLNYCH ZWARĆ ZWOJOWYCH W UZWOJENIACH STOJANA SILNIKA INDUKCYJNEGO

Zbadano przebieg zjawisk cieplnych towarzyszących zwarciom zwojowym w uzwojeniu fazowym stojana indukcyjnego silnika małej mocy. Badania wykonano za pomocą klatkowego silnika indukcyjnego przystosowanego do modelowania zwarć zwojowych w strefie czołowej silnika przez zwarcie odpowiednich wyprowadzeń grup zwojów. Rozpatrzono przypadki zwarć 4, 12, 22, 51 zwojów uzwojenia fazowego o 306 zwojach. Badano nagrzewania się maszyny podczas zwarcia w trakcie pracy z obciążeniem znamionowym. Zarejestrowano narastanie przyrostu temperatury podczas 30 s zwarć zwojowych. Po wyłączeniu badanej maszyny wykonano termogramy strefy połączeń czołowych.

1. WSTĘP

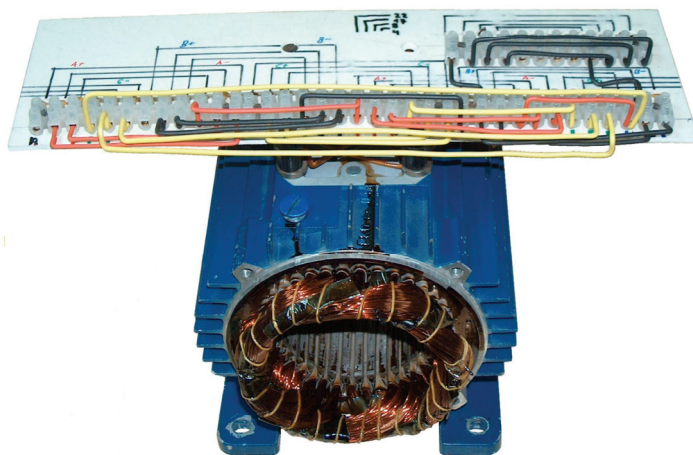
Najczęstszymi uszkodzeniami indukcyjnych silników klatkowych po uszkodzeniach łożysk są elektryczne uszkodzenia uzwojeń stojana [3, 5]. Przyczyną powstawania takich uszkodzeń jest zazwyczaj degradacja izolacji uzwojenia spowodowana trudnymi warunkami pracy bądź długim czasem eksploatacji silnika. Możliwe rodzaje uszkodzeń to zwarcia zwojowe, zwarcia cewek (zezwojów), zwarcia międzyfazowe i zwarcia doziemne [4]. Ich dalszą konsekwencją może być przerwa w uzwojeniu fazowym.

Badaniom cieplnym skutków zwarć zwojowych poddano specjalnie przezwojony silnik umożliwiający modelowanie zwarć zwojowych w strefie połączeń czołowych.

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, ludwik.antal@pwr.wroc.pl, maciej.gwozdziejwicz@pwr.wroc.pl

** Dolnośląska Fabryka Maszyn Elektrycznych, ul. Fabryczna 10, 53-609 Wrocław, maciej.antal@dfme.pl

Na płytę łączeniową wyprowadzono początki i końce poszczególnych cewek uzwojenia stojana (rys. 1). Ponadto jedna z cewek rozdzielona jest na kilka grup zwojów. Tak przygotowany model fizyczny umożliwia symulowanie zwarć całych cewek jak i kilku zwojów jednej cewki. Zwarcie symuluje się przy użyciu stycznika włączonego w obwód uzwojenia. Prąd w zwieranych zwojach rejestrowany jest przetwornikiem cęgowym.

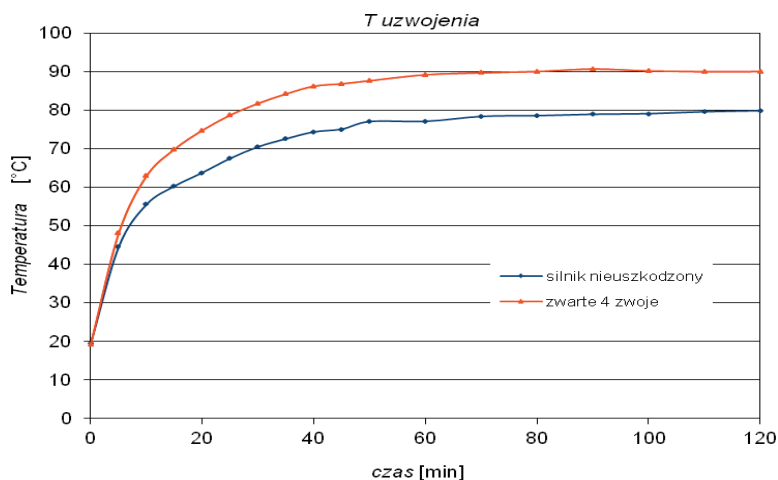


Rys. 1. Indukcyjny silnik klatkowy do symulowania zwarć zwojowych
Fig. 1. Induction motor for inter-turn short-circuit tests

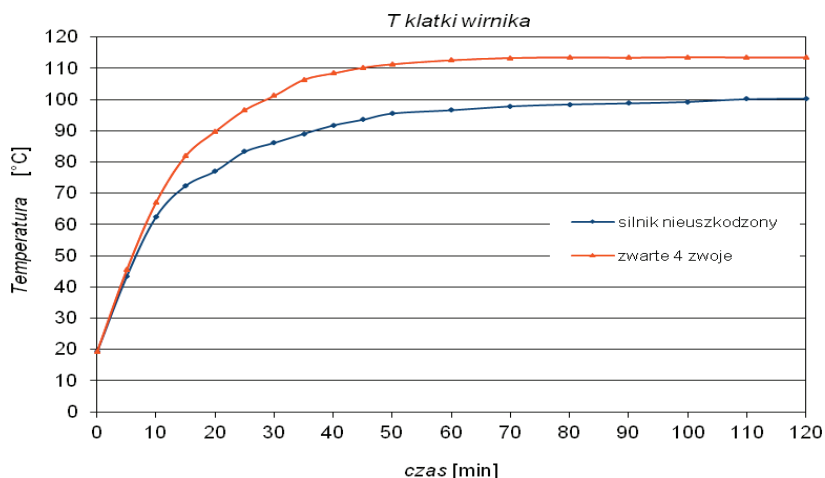
2. BADANIA CIEPLNE SILNIKA ZE ZWARCIAMI ZWOJOWYMI W UZWOJENIU STOJANA

Zwarcia zwojowe uzwojeń stojana powodują nie tylko zakłócenia przebiegów momentu, prędkości, mocy czy prądu [1, 2], ale również są przyczyną nadmiernego nagrzewania silnika. Podczas badań cieplnych wykonano próby nagrzewania oraz rejestracje zmian rezystancji uzwojenia fazowego stojana podczas 30 sekundowych prób zwarć zwojowych. Po zakończeniu każdej z prób krótkotrwałych zwarć wykonano zdjęcie termograficzne czół uzwojenia stojana. Próby nagrzewania przeprowadzono dla dwóch przypadków pracy obciążonego znamionowo silnika, zasilanego bezpośrednio z sieci trójfazowej. Wyznaczono krzywe nagrzewania silnika nieuszkodzonego oraz silnika ze zwartymi czterema zwojami jednej z faz. Wybór niewielkiego zwarcia do wyznaczenia krzywych nagrzewania podyktowany był koniecznością ograniczenia ryzyka zniszczenia uzwojenia twornika. Ryzyko to wzrasta wraz z wielkością zwarcia. Wyniki pomiarów zestawiono na kolejnych rysunkach. Krzy-

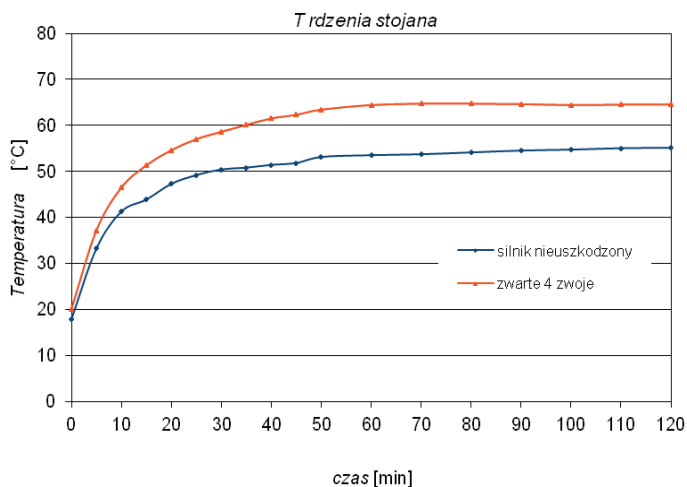
we nagrzewania uzwojenia stojana na rysunku 2, krzywe nagrzewania klatki wirnika na rysunku 3, a krzywe nagrzewania rdzenia stojana na rysunku 4.



Rys. 2. Krzywe nagrzewania uzwojeń stojana silnika nieuszkodzonego oraz ze zwartymi czterema zwojami przy stałym momencie obciążenia i zasilaniu z sieci
Fig. 2. Temperature rise of the induction motor stator winding with undamaged stator winding and with 4 short-circuited stator winding coil turns



Rys. 3. Krzywe nagrzewania klatki wirnika silnika nieuszkodzonego oraz ze zwartymi czterema zwojami przy stałym momencie obciążenia i zasilaniu z sieci
Fig. 3. Temperature rise of the induction motor rotor cage with undamaged stator winding and with 4 short-circuited stator winding coil turns

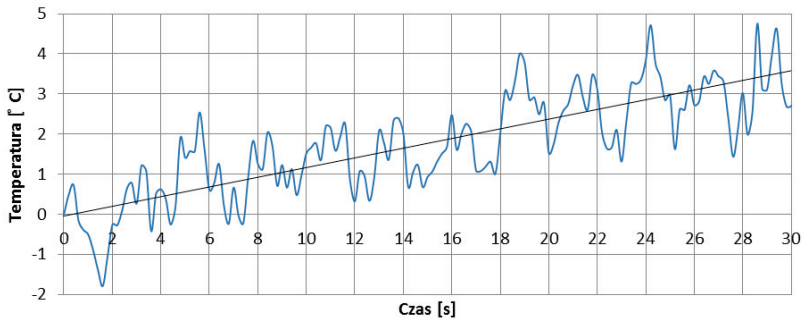


Rys. 4. Krzywe nagrzewania rdzenia stojana silnika nieuszkodzonego oraz ze zwartymi czterema zwojami przy stałym momencie obciążenia i zasilaniu z sieci
 Fig. 4. Temperature rise of the induction motor magnetic core with undamaged stator winding and with 4 short-circuited stator winding coil turns

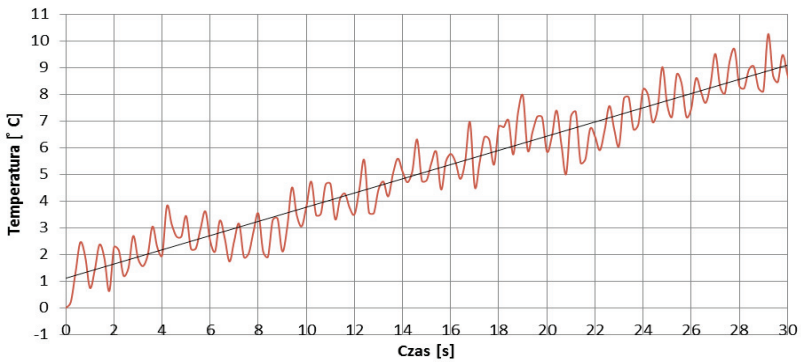
Wzrost wartości prądów fazowych wywołany zwarcie zwojów uzwojenia stojana jest przyczyną przegrzewania uzwojenia stojana. Uzwojenie stojana silnika uszkodzonego, nagrzało się do temperatury 90,1 °C, czyli wyższej o 10,2 °C od ustalonej temperatury silnika nieuszkodzonego (rys. 2). Również wirnik silnika uszkodzonego nagrzało się do temperatury wyższej o około 13,3 °C w stosunku do wirnika silnika nieuszkodzonego (rys. 3). Rdzeń magnetyczny stojana na skutek uszkodzenia uzwojenia stojana, wykazał wzrost temperatury o 9,4 °C, w porównaniu z temperaturą ustaloną silnika nieuszkodzonego (rys. 4).

Poza krzywymi nagrzewania podstawowych elementów silnika dla najmniejszego z badanych zwarc zwojowych, zarejestrowano dynamiczne zmiany przyrostu temperatury uzwojenia stojana w trakcie zwarc zwojowych o różnej wielkości (4, 12, 22, 51 zwojów).

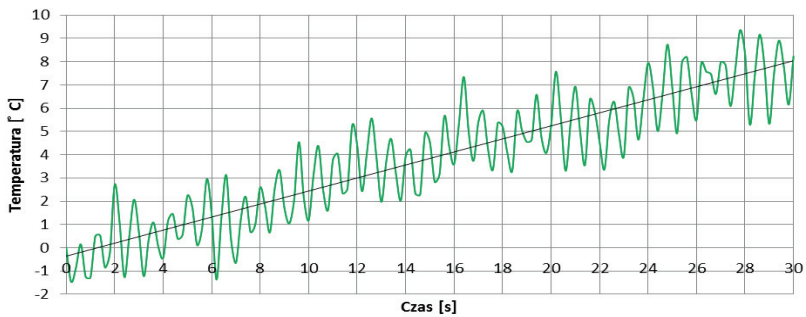
Przyrost temperatury zmierzono metodą oporową przy pomocy dodatkowej składowej stałej prądu stojana o niewielkiej wartości, nałożonej na prąd fazowy jednej z faz. Taki sygnał zasilający uzyskano z programowalnego źródła mocy. Pomiar zostały wykonane dla zwarc trwających 30 s. Przy takim czasie zwarcia przyrost temperatury był na tyle widoczny, że możliwe było określenie szybkości jego narastania. Wyniki rejestracji dla zwarc o różnych wielkościach przedstawiono na rysunkach 5,



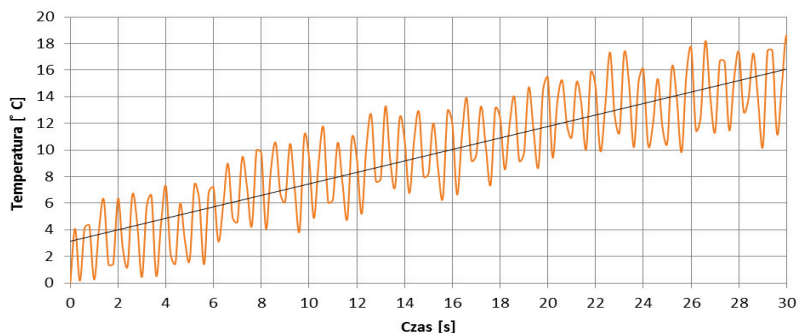
Rys. 5. Przyrost temperatury uzwojenia stojana dla 4 zwartych zwojów
 Fig. 5. Temperature rise of the induction motor stator winding
 with 4 short-circuited stator winding coil turns



Rys. 6. Przyrost temperatury uzwojenia stojana dla 12 zwartych zwojów
 Fig. 6. Temperature rise of the induction motor stator winding
 with 12 short-circuited stator winding coil turns



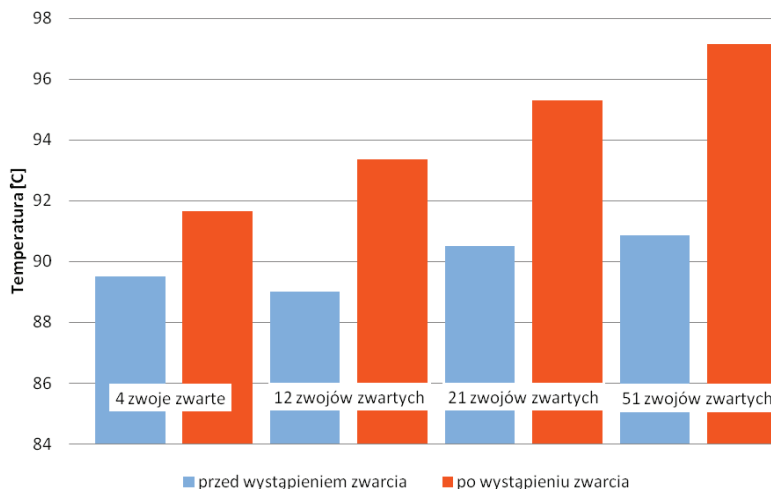
Rys. 7. Przyrost temperatury uzwojenia stojana dla 22 zwartych zwojów
 Fig. 7. Temperature rise of the induction motor stator winding
 with 22 short-circuited stator winding coil turns



Rys. 8. Przyrost temperatury uzwojenia stojana dla 51 zwartych zwojów
 Fig. 8. Temperature rise of the induction motor stator winding
 with 51 short-circuited stator winding coil turns

Przy zwarciu trwającym 30 s, dla 4 zwartych zwojów przyrost temperatury wyniósł 3,5 °C, dla zwarć 12 oraz 22 zwojów przyrost wynosił odpowiednio 9 °C i 8 °C. Największy przyrost temperatury wystąpił przy zwarciu całej cewki (51 zwojów) i wyniósł 16 °C.

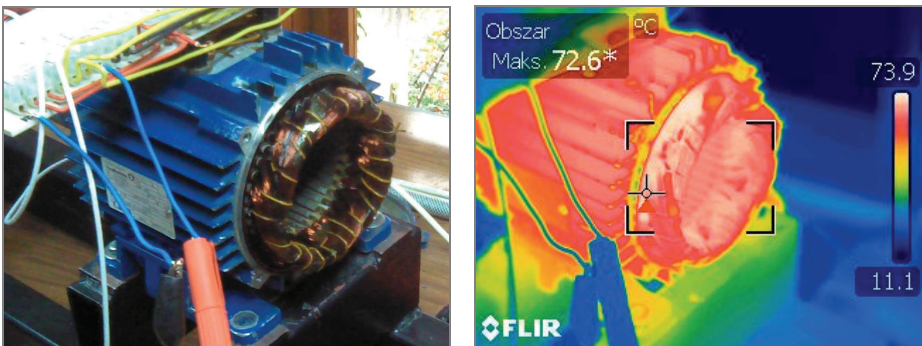
W trakcie prób rejestrowano również temperaturę pierścienia zwierającego klatki wirnika, przy pomocy dwóch pirometrów miniaturowych osadzonych w czołowej tarczy silnika. Mierzono temperaturę wirnika przed zwarciem (wynosiła średnio 90°C) i po jego zakończeniu. Wyniki pomiarów średniej temperatury pierścienia zwierającego klatki wirnika pokazano na rysunku 9.



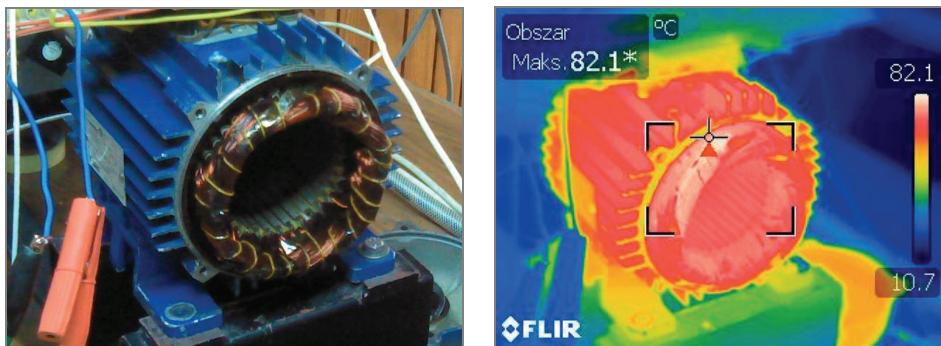
Rys. 9. Przyrosty temperatury wirnika po 30 s zwarciach zwojowych uzwojenia stojana
 Fig. 9. Temperature rise of the induction motor rotor after 30 seconds inter-turns short circuit

Podobnie jak w uzwojeniu stojana przyrost temperatury klatki wirnika zależy od wielkości zwarcia zwojowego uzwojenia stojana. Największy przyrost temperatury wirnika towarzyszy zwarceniu całej cewki (51 zwojów) i wynosi $6,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Również szybkość narastania temperatury zależy od wielkości zwarcia zwojowego i w przeprowadzonych badaniach dochodziła do $0,21\text{ }^{\circ}\text{C/s}$.

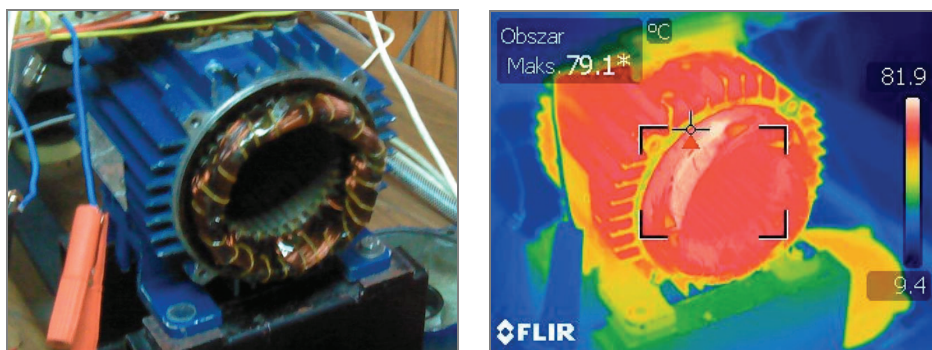
Po zakończeniu każdej z prób zwarcia zwojowego wykonano kamerą termowizyjną termogramy uzwojenia stojana po zdemontowaniu tarczy łożyskowej i wyjęciu wirnika. Działania poprzedzające zdjęcie termiczne trwały około minuty, co oczywiście powodowało stygnięcie nagrzanego maszyny, jednak zarejestrowane kamerą różnice temperatury w obszarze połączeń czołowych były wyraźne. W trakcie pomiaru kamera wykonywała serię zdjęć termicznych oraz zsynchronizowane z nimi zdjęcia normalne. Zdjęcia (rys. 10–13) pokazują rozkład temperatury i maksymalną temperaturę uzwojenie stojana. Wskazują również miejsce, w którym temperatura uzyskuje wartość maksymalną. Jest to oczywiście miejsce występowania zwarcia, a dokładniej połączenia czołowe zwojów zwartych. Uzyskane termogramy pozwalają na porównanie maksymalnych temperatur w uzwojeniu stojana przy różnych ilościach zwieranych zwojów. Maksymalna temperatura została osiągnięta podczas zwarcia 51 zwojów (czyli jednej z sześciu cewek uzwojenia fazowego) i wynosiła $95,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Natomiast najniższa temperatura występuje podczas zwarcia 4 zwojów i wynosi $74,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tak więc wraz z wielkością uszkodzenia wzrasta temperatura miejsca zwarcia, ale wzrost ten nie jest liniowy. Maksymalne temperatury dla 12 i 22 zwojów zwartych są porównywalne. Wyniki te odpowiadają zmierzonym przyrostom temperatury w uzwojeniu fazowym stojana podczas 30 sekundowych zwarc zwojowych. Charakter zmian maksymalnej temperatury i przyrostów temperatury w zależności od wielkości zwarcia zwojowego jest w obu przypadkach taki sam.



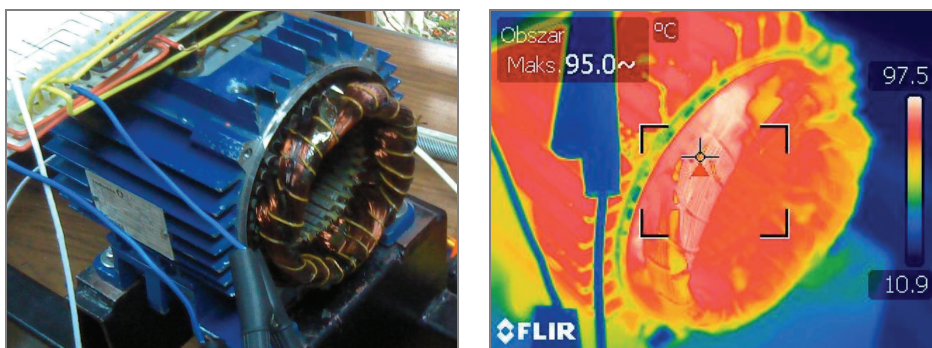
Rys. 10. Termogram połączeń czołowych uzwojenia stojana przy 4 zwojach zwartych
 Fig. 10. Thermogram of the induction motor stator winding
 with 4 short-circuited stator winding coil turns



Rys. 11. Termogram połączeń czołowych uzwojenia stojana przy 12 zwojach zwartych
 Fig. 11. Thermogram of the induction motor stator winding
 with 12 short-circuited stator winding coil turns



Rys. 12. Termogram połączeń czołowych uzwojenia stojana przy 21 zwojach zwartych
 Fig. 12. Thermogram of the induction motor stator winding
 with 21 short-circuited stator winding coil turns



Rys. 13. Termogram połączeń czołowych uzwojenia stojana przy 51 zwojach zwartych
 Fig. 13. Thermogram of the induction motor stator winding
 with 51 short-circuited stator winding coil turns

3. PODSUMOWANIE

Wzrost wartości prądów fazowych i ich niesymetria wywołane zwarcie zwojów uzwojenia stojana silnika indukcyjnego są przyczyną przegrzewania uzwojenia stojana. Nadmiernie nagrzewają się również inne główne elementy silnika: klatka wirnika i rdzeń stojana. Już niewielkie zwarcie zwojowe (1,3%) uzwojenia fazowego stojana powoduje ~10% wzrost temperatury tych elementów.

Badania 30 sekundowych zwarć zwojowych wykazały, że zarówno przyrost temperatury uzwojenia stojana jak i klatki wirnika, zwiększają się nieliniowo ze wzrostem ilości zwartych zwojów uzwojenia fazowego stojana. Ze wzrostem uszkodzenia rośnie również szybkość narastania temperatury uzwojenia.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2012 jako projekt badawczy N N510 328637.

LITERATURA

- [1] ANTAL M., ANTAL L., *Zwarcia zwojowe w uzwojeniu stojana klatkowego silnika indukcyjnego*, Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 59, Studia i Materiały, Oficyna Wydaw. PWr., Wrocław 2006, 78–89.
- [2] ANTAL M., *Badania skutków zwarć zwojowych w uzwojeniach stojana silnika indukcyjnego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, 2010, Nr 30, 105–113.
- [3] BENBOUZID M.E.H., KLIMAN G.B., *What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?*, IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2003, Vol. 18, Issue 2, 238–244.
- [4] KOWALSKI Cz.T., *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 57, Monografie Nr 18, Wrocław 2005.
- [5] MIRAFZAL B., DEMERDASH N.A.O., *On innovative methods of induction motor interturn and broken-bar fault diagnostics*, IEEE Transactions on Industry Applications, March–April 2006, Vol. 42, Iss. 2, 405–414.

EFFECTS OF INTER-TURNS SHORT-CIRCUITS IN STATOR WINDING OF SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR

Phenomena associated with inter-turn short-circuit in stator winding of low power squirrel-cage motor were investigated. Investigations were realized with physical model of the motor with adapted stator winding coil with terminals to make inter-turns short-circuit. During laboratory tests 4, 12, 22 and 51 turns of the 306 phase stator winding were short-circuited. Thermal phenomena during 30 seconds short-circuits were investigated. After short-circuits thermograms of the stator winding were recorded.