

Jakub BERNATT<sup>1)</sup>, Jan MRÓZ<sup>2)</sup>, Ryszard RUT<sup>3)</sup>

## NAGRZEWANIE DWUKŁATKOWEGO UZWOJENIA W CZASIE AWARYJNEJ PRACY SILNIKA Z ZABLOKOWANYM WIRNIKIEM

**Streszczenie.** W referacie zostaną pokazane wyniki pomiarów i obliczeń nagrzewania silnika dwukłatkowego w awaryjnym stanie pracy z zablockowanym wirnikiem, o specjalnej konstrukcji klatki zapewniającej obniżenie temperatury w pozapakietowej strefie. Zostanie również przedstawione zabezpieczenie silnika przed skutkami zablockowania wirnika lub zbyt częstymi rozruchami bazującymi na modelu cieplnym prętów klatki.

## THERMAL BEHAVIOUR OF ROTOR CAGE IN DOUBLE CAGE INDUCTION MOTOR WITH LOCKED ROTOR

**Summary.** The paper presents the results of measurements and calculations of heating process of a double squirrel-cage induction motor with the locked rotor. The cage of the analysed motor is of special construction assuring the diminished temperature rise of the bars in the rotor overhanging area. In the paper a way of protection against the results of blocking the rotor (or of too frequent starts) basing on the thermal model of rotor bars is described.

**Key words:** squirrel-cage winding, temperature field, motor protection

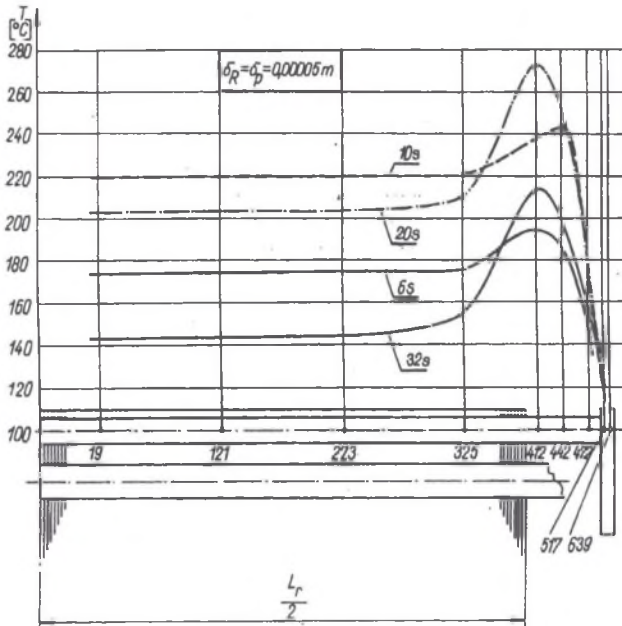
### 1. WSTĘP

W silnikach dwukłatkowych z klatką prętowaną pracujących w trudnych warunkach rozruchowych (długotrwały rozruch, zablockowanie wirnika) dochodzi do silnego nagrzania klatki rozruchowej, a szczególnie jej pozapakietowej części. Problem ten był omawiany w [1], gdzie wykazano, że nawet bardzo dobre dopasowanie prętów do żłobków nie eliminuje zjawiska intensywnego nagrzewania części prętów wystających poza pakiet (rys.1-wartości obliczone). Dopasowanie to obniża znacznie temperaturę prętów w części pakietowej (polepszenie warunków przejmowania ciepła przez rdzeń), jednak temperatura w części pozapakietowej pozostaje nadal wysoka. W skrajnych przypadkach może to doprowadzić do awarii klatki (rys.2). Próby wyrównania rozkładu temperatury wzdłuż prętów klatki rozruchowej były omówione w [3]. Wykazano tam, że nie jest możliwe, poprzez uintensywnienie chłodzenia, obniżenie temperatury pozapakietowych części klatki do poziomu nagrzania części pakietowej. Należałoby znacznie zwiększyć ilość ciepła odprowadzaną z tych części uzwojenia. Pewną poprawę sytuacji osiągnięto poprzez zmniejszenie wysięgu prętów poza pakiet. Wskazano, że „w części pozapakietowej konstrukcji klatki należałoby poszukiwać możliwości dalszego zwiększenia jej odporności”. Naturalną drogą wyrównania temperatury wzdłuż osi pręta byłaby eliminacja miejsc zagrożonych przegrzaniem, a więc skracanie wysięgu prętów poza pakiet. W dalszej części zostaną pokazane wyniki pomiarów i obliczeń nagrzewania silnika z nowym rozwiązaniem konstrukcyjnym pozapakietowej części klatki, w stanie załączenia z zablockowanym wirnikiem. Możliwość pojawienia się takiego awariogennego stanu pracy skłania do podjęcia szeregu działań zabezpieczających silnik przed uszkodzeniem [5]. Jednym z nich może być omówione w niniejszym referacie zabezpieczenie klatki rozruchowej przed skutkami zablockowania wirnika oraz długotrwałym lub zbyt częstym rozruchem, bazującym na modelu cieplnym prętów klatki.

<sup>1)</sup> Dr inż., Branzowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych Komel, 40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188, tel. (032) 2582041, fax (032) 2599948, info@komel.katowice.pl

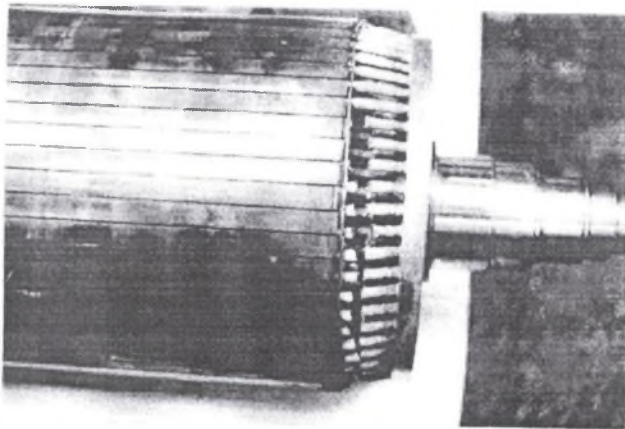
<sup>2)</sup> Dr inż., Politechnika Rzeszowska, ul. W.Pola2, 35-950 Rzeszów, tel/fax (017)8651630, janmroz@prz.rzeszow.pl

<sup>3)</sup> Dr inż., Politechnika Rzeszowska, ul. W.Pola2, 35-950 Rzeszów, tel/fax (017)8651630, rut@prz.rzeszow.pl



Rys. 1. Rozkład temperatury wzdłuż pręty klatki rozruchowej w czasie rozruchu silnika [ 1 ]

Fig.1. Temperature distribution along the starting cage during accelerating time of the motor [ 1 ]

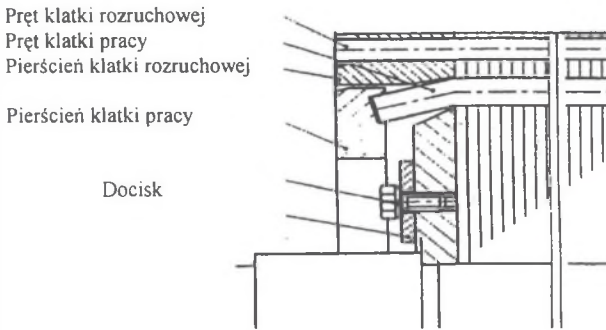


Rys.2. Wytopione pręty klatki rozruchowej silnika 300kW, 1000V, 2p=4

Fig.2. Melted bars of the starting cage of 300 kW, 1000 V, 2p=4 motor

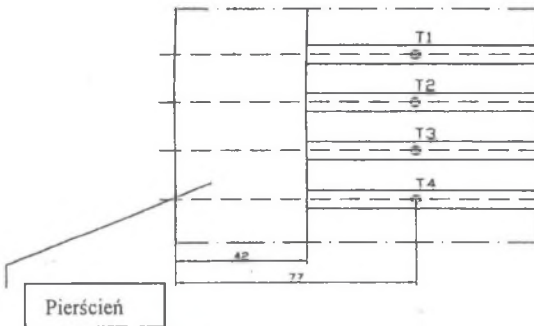
## 2. BADANIA NAGRZEWANIA UZWOJENIA WIRNIKA SILNIKA DWUKLATKOWEGO

Na rys.3 przedstawiono nową konstrukcję pozapakietowej części klatki rozruchowej silnika dwuklatkowego 200kW, 1000V, 2p=4.



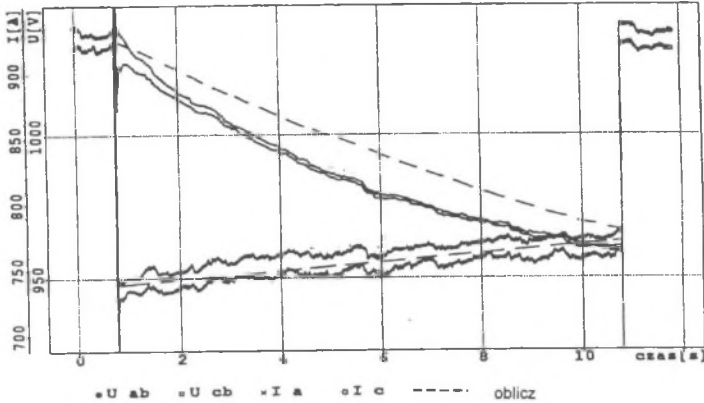
Rys.3. Konstrukcja pozapakietowej części klatki badanego silnika 200kW  
Fig. 3. Overhanging area of the rotor of 200 kW motor

W prętach klatki rozruchowej badanego silnika zainstalowano termoelementy Cu-Co jak na rys.4.



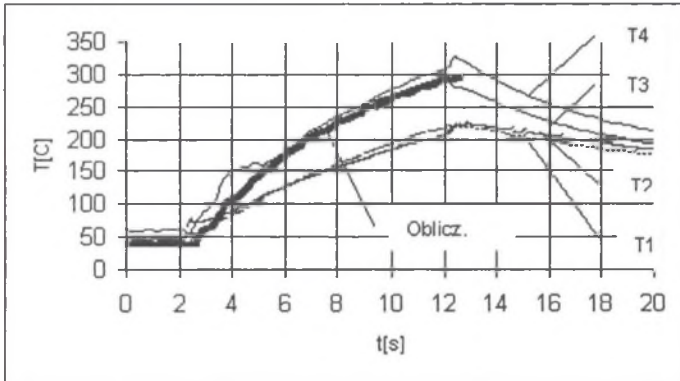
Rys.4. Rozmieszczenie termoelementów pomiarowych w klatce silnika  
Fig.4. Distribution of measuring thermocouples in the cage

Silnik z zablokowanym wirnikiem załączono na pełne napięcie sieci przez okres 10s. Zarejestrowane w tym czasie wartości skuteczne prądu stojana i napięcia na zaciskach silnika przedstawiono na rys.5.



Rys.5. Prąd i napięcie zasilania w czasie badania silnika  
Fig.5. Supply voltage and stator current during tests of the motor

Za pomocą karty pomiarowej AX5210 firmy Axiom mierzono sygnały z termoelementów pomiarowych rozmieszczonych zgodnie z rys.4, wzmacniane i filtrowane wzmacniaczem separacyjnym MSC1030. Rejestracji pomiarów dokonano z wykorzystaniem oprogramowania NotebookPro firmy Labtech. Wyniki pomiarów temperatury czterech sąsiednich prętów klatki rozruchowej przedstawiono na rys.6.



Rys.6. Zmiana temperatury prętów klatki rozruchowej w czasie badania zablokowanego silnika  
Fig.6. Temperature of the motor starting cage at locked rotor

### 3. OBLICZENIE POLA TEMPERATURY WIRNIKA

Pomiarowe określenie pola temperatury badanego silnika wymagałoby instalowania dużej ilości termoelementów i zastosowania wielokanałowych urządzeń rejestrujących. Z uwagi na wysokie koszty takich badań informacje o rozkładzie temperatury w wirniku silnika uzyskano metodą obliczeniową. W tym celu wykorzystany został model termokinetyczny silnika bazujący na metodzie bilansów elementarnych [6], przedstawiony w [2]. Obszar 3D wirnika podzielono na szereg elementów o węzłach umieszczonych w ich środkach ciężkości i dla każdego z nich sporządzono bilans energii. Ostatecznie uzyskano układ równań w postaci:

$$\sum_j \frac{1}{R_{ij}} T_j + \frac{1}{R_{i0}} T_{Fi} - \left( \frac{1}{R_{i0}} + \sum_j \frac{1}{R_{ij}} \right) T_i + v_i q_{vi} = v_i c_{pi} \gamma_i \frac{dT_i}{dt}, \quad (1)$$

gdzie:  $R_{ij}$  – opór cieplny na drodze przepływu ciepła z węzła  $j$  do  $i$ ,  $R_{i0}$  – opór cieplny na drodze przyjmowania ciepła z zewnętrznej powierzchni elementu  $i$ ,  $T_i$ ,  $T_{Fi}$  – średnia temperatura elementu  $i$  i średnia temperatura otoczenia elementu brzegowego  $v_i$  – objętość elementu  $i$ ,  $q_{vi}$  – gęstość objętościowa źródeł ciepła w elemencie  $i$   $c_{pi}$  – pojemność cieplna właściwa,  $\gamma_i$  – gęstość materiału elementu  $i$ .

Obliczenie skutecznych wartości prądów w klatce silnika, niezbędnych do wyznaczenia gęstości objętościowej źródeł ciepła, wykonano na podstawie schematu zastępczego silnika dwuklatkowego, w którym uwzględnia się zmianę rezystancji wraz z temperaturą zgodnie z (2) oraz nasycenie dróg strumieni rozproszenia.

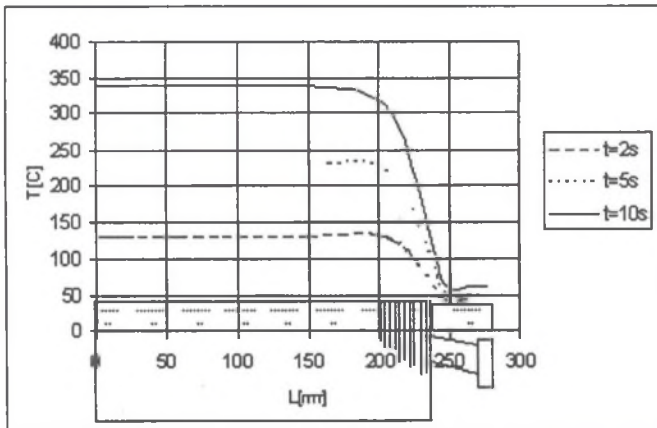
$$R = \frac{k}{S^2} \sum_i v_i \rho_{0i} (1 + \alpha_i \Delta \vartheta_i), \quad (2)$$

gdzie:  $R$  – rezystancja pręta lub pierścienia,  $S$  – powierzchnia przekroju pręta lub pierścienia,  $k$  – współczynnik związany z przyjętym do analizy obszarem wirnika (dla pręta  $k=4$ , dla pierścienia  $k=2$  połowa długości pręta, połowa długości podziałki zębłkowej [2]),  $\rho_{0i}$  – rezystywność materiału elementu  $i$  w temperaturze otoczenia,  $\alpha_i$  – temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji materiału elementu  $i$  dla temperatury otoczenia,  $\Delta \vartheta_i$  – przyrost temperatury elementu  $i$ .

Układ równań (1) rozwiązano za pomocą schematu jawnego, z krokiem czasowym zapewniającym stabilność i fizyczną poprawność modelu [6]:

$$\Delta \tau \leq \min_i \left( \frac{v_i \gamma_i c_{pi}}{\frac{1}{R_{i0}} + \sum_j \frac{1}{R_{ij}}} \right), \quad (3)$$

Wyniki obliczeń nagrzewania pręta klatki w czasie pracy z zablokowanym wirnikiem przedstawia krzywa poprowadzona linią pogrubioną na rys.6. Obliczony rozkład temperatury wzdłuż osi pręta klatki rozruchowej przedstawiono na rys. 7.



Rys.7. Rozkład temperatury wzdłuż osi pręta klatki rozruchowej

Fig.7. Temperature distribution along the motor starting cage at locked rotor

#### 4. ZABEZPIECZENIE KLATKI PRZED SKUTKAMI ZABLOKOWANIA WIRNIKA

Ponieważ w warunkach eksploatacyjnych nie jest technicznie uzasadnione umieszczanie w wirniku czujników temperatury, więc aby zabezpieczyć silnik przed awariami będącymi skutkiem zbytznego nagrzania klatki rozruchowej należy w sposób ciągły śledzić stan jej nagrzania. Stan nagrzania klatki wirnika można w przybliżeniu opisać za pomocą równania :

$$P_{(t)} = \left[ \left( \frac{I_r}{I_{rb}} \right)^2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{TAU}} \right) + P_{(t-1)} e^{-\frac{t}{TAU}} \right] \cdot 100\% , \quad (4)$$

gdzie:

$I_r$  – prąd płynący w pręcie klatki rozruchowej [A],

$I_{rb}$  – prąd odniesienia pręta klatki rozruchowej [A],

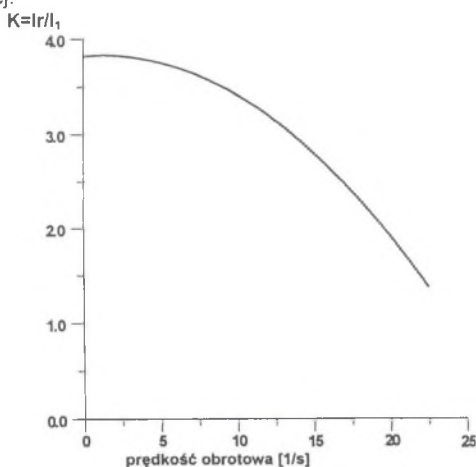
$t$  - czas [sekundy],

TAU - termiczna stała czasowa prętów klatki rozruchowej [s].

Stala TAU wyznaczona jest z pomiarów lub obliczeń i przyjmuje różne wartości dla stanu nagrzewania się pręta i stanu stygnięcia.

Wartość natężenia prądu w klatce wirnika zarówno rozruchowej, jak i klatce pracy można wyznaczyć znając wartość prądu płynącego w uzwojeniu stojana, prędkość obrotową wirnika oraz podstawowe dane konstrukcyjne silnika - (m.in. ilość i geometryczne wymiary żłobków i pierścieni zwierających wirnika, dane nawojowe stojana).

W sumie korelacja między prądem w uzwojeniu stojana a prądem w klatce rozruchowej jest zależnością złożoną; dla omawianego silnika przedstawiona jest ona na rys 8. Wartość prądu płynącego w klatce rozruchowej szybko maleje wraz ze wzrostem prędkości wirowania wirnika. Zatem oczywisty jest fakt, iż stan zablokowania wirnika jest znacznie bardziej niebezpieczny dla klatki rozruchowej od stanu, w którym silnik ruszył, ale nie uzyskał jeszcze prędkości wirowania zbliżonej do znamionowej.



Rys. 8. Korelacja między prądem fazowym  $I_1$ , a prądem w prętach klatki rozruchowej  $I_r$ , silnika 200 kW w zależności od jego prędkości obrotowej

Fig. 8. Correlation between the stator current and the current of the starting cage bar for 200 kW motor as a function of rotational speed

Omawiany silnik o mocy 200 kW posiada czujniki prędkości obrotowej zabudowane na wale oraz przekładniki prądowe w fazach uzwojenia stojana; wykorzystując ich sygnały można w każdej chwili, znając korelację przedstawioną na rys 8, wyznaczyć natężenie prądu w prętach klatki rozruchowej. Wbudowany w silniku układ elektroniczny pozwala śledzić stan nagrzania klatki (zgodnie z zależnością 4) i w razie konieczności powoduje wyłączenie silnika.



Przedstawiony sposób zabezpieczenia klatki wirnika przed przegrzaniem „rozdzielnia” zagrożenia powodowane przez zablokowanie wirnika od zagrożeń powodowanych wydłużonym rozruchem. Ponadto wykorzystana jest informacja o stanie nagrzania klatki przed rozpoczęciem rozruchu, co pozwala dokładnie określić dopuszczalną liczbę i czas trwania rozruchów oraz czas niezbędnej przerwy w pracy po zadziałaniu zabezpieczenia.

Opisany sposób działania zabezpieczenia termicznego klatki wirnika jest przedmiotem zgłoszenia patentowego.

## 5. WNIOSKI

W silnikach indukcyjnych pracujących w trudnych warunkach rozruchowych narażenia uzwojenia klatkowego na uszkodzenia są szczególnie duże [4]. Przedstawione na rys.6 rezultaty pomiaru temperatury wykazują, że poszczególne pręty klatki nie nagrzewają się jednakowo. Wirnik był zablokowany w takim położeniu, że pręty z temperaturą T1, T2 były położone naprzeciw zębów stojana, a pręty z temperaturą T3, T4 – naprzeciw żłobków stojana. Wskutek różnych otoczeń magnetycznych prętów płyną w nich różne prądy. Takie niejednakowe nagrzewanie prętów klatki wywołuje różne wydłużenia prętów i jest źródłem dodatkowych naprężeń w klatce. W silnikach dwuklatkowych z klatką prętowaną stosuje się powszechnie odsunięcie pierścieni zwierających od pakietu. Jest to związane głównie ze względami wykonawczymi oraz ma na celu obniżenie naprężeń na styku pręt – pierścień wywołanych dylatacjami cieplnymi pierścienia zwierającego. Konsekwencją takiego rozwiązania jest fakt, że najwyższą temperaturę klatka uzyskuje właśnie w części pozapakietowej, gdzie narażona jest na największe naprężenia i tu najczęściej dochodzi do awarii. Z porównania rys.1 i rys.7 wynika, że w badanym silniku o innym sposobie ukształtowania pozapakietowej części efekt maksymalnej temperatury w tej części klatki nie występuje, co stwarza szansę zwiększenia odporności klatki na skutki pracy z zablokowanym wirnikiem lub długotrwałym rozruchem. Ponieważ nie ma obecnie doświadczeń eksploatacyjnych z tego typu rozwiązaniem, trudno na razie powiedzieć czy bezpośrednie przyleganie pierścienia do rdzenia i tym samym ograniczenie możliwości osiowego przemieszczania uzwojenia nie zwiększy naprężeń pochodzenia termicznego na styku pręta z pierścieniem. Ponadto, przy niewłaściwym doborze luzu pręta w żłobku, rozszerzanie cieplne pierścienia zwierającego może powodować pęknięcie bądź ucinanie prętów. Należy się także liczyć z bardzo nierównomiernym nagrzewaniem pierścienia wskutek bezpośredniej bliskości rdzenia magnetycznego (efekt wypierania prądu).

Opracowane zabezpieczenie termiczne wirnika umożliwia śledzenie stanu nagrzania elementów klatki w różnych stanach pracy silnika oraz pozwala uchronić silnik przed awariami powodowanymi zbyt częstymi lub zbyt długotrwałymi rozruchami. Zabezpieczenie może być stosowane dla dowolnych silników dwuklatkowych po określeniu wartości cieplnych stałych czasowych klatki wirnika oraz współczynnika korelacji między prądem stojana a prądem wirnika. Wymagana jest jedynie informacja o prędkości obrotowej wirnika.

## LITERATURA

1. Mróz J.: Wymiana ciepła w uzwojeniu dwuklatkowym silnika indukcyjnego w czasie rozruchu, Zeszyty Problemowe BOBRME Komel 58/1999, s.88-90.
2. Mróz J.: Badania i obliczenia stanu nagrzania silnika dwuklatkowego napędów dolowych w stanie zwarcia, Zeszyty Problemowe BOBRME Komel 51/1995, s.45-50.
3. Mróz J.: Możliwości wyrównania rozkładu temperatury w prętach klatki rozruchowej wzdłuż osi silnika indukcyjnego dwuklatkowego, Przegląd Elektrotechniczny 12/1998, s.314-317.
4. Rut R.: Awaryjność silników indukcyjnych dużej mocy eksploatowanych w trudnych warunkach rozruchowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Elektrotechnika 18/1996, s.139-150.
5. Nestler H., Sattler PH. K.: On-line-estimation of temperatures in electrical machines by an observer, Electric Machines and Power Systems, 21:39-50,1993.
6. Szargut J.: Modelowanie numeryczne pól temperatury, WNT, Warszawa 1992.

Recenzent: Doc. dr inż. Jerzy Mukosiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 lutego 2001 r.

**Abstract**

Double cage motors with fabricated cages are used in drives for hard starting conditions. The long accelerating time or the locked rotor time expose the motor to overheating and damage the starting cage. In consequence of different conditions of thermal energy flow from the bars in the iron core area and the overhanging area the temperature along the bar axis is unstable. The temperature of the bars of the overhanging area is the highest (Fig. 1). It often causes final damages, while temperature of the bar in the slot zone does not exceed critical value. The paper presents the results of measurements and calculations of heating process of a double cage induction motor at the locked rotor. The rotor cage is of special construction (Fig. 3) assuring the lower temperature rise in the overhanging area (Fig. 7). The motor with the locked rotor was grid fed during the time of 10s; the temperature of the bars was recorded by thermocouples. The measured signals after amplification, filtration and separation were recorded by PC computer. The cage temperature during this time was calculated as well. The calculations were based on the method of 3D elementary balances which resulted in the equality (1). The calculations results show that in the investigated motor having special design of the starting cage the effect of high temperature rise in the overhanging area was eliminated. It should be expected that such a design of the rotor will better bear hard starting conditions.

To protect the motor against damages caused by the described conditions of work the thermal model of the rotor bars was worked out. The temperature of the bars is calculated on the basis of the current value in the bars and time constants - Eq. (4). The value of the current in the bars depends on the rotational speed of the motor and the phase current (Fig.8). The elaborated protection unit can be implemented into other double cage motors after calculating the correlation between the phase current and the rotor current. The time constants have to be measured or calculated. The method of protection of the double cage motors is a subject of Polish patent, 2000 (pending).