

Maciej Antal*, Jerzy Chamerski*, Wojciech Pilat*, Ludwik Antal**

*Dolnośląska Fabryka Maszyn Elektrycznych Sp. z o. o., Wrocław

**Politechnika Wroclawska, Wrocław

TECHNOLOGICZNE I EKSPLOATACYJNE SKUTKI ZMIAN KSZTAŁTU PRĘTA KLATKI SILNIKA INDUKCYJNEGO DUŻEJ MOCY

TECHNOLOGICAL AND OPERATING EFFECTS OF ROTOR BAR SHAPE MODIFICATION IN HIGH POWER INDUCTION MOTOR

Abstract: Field-circuit model of electric machine can be used for investigation of its structural components shape influence on operating characteristics. The high power induction motor model was applied to examine effects of rotor bar shape modification, consisting in replacement the trapezium shape bar with rectangular bar. Torque and current characteristics and characteristic quantity of start-up torque and current, maximum torque and critical slip were determined with field-circuit model. Electromagnetic torque, currents and rotational speed, as function of time during motor start, were determined also. The effect of rotor bar height change were examined in similar way. All rotor bar shape modifications were realized with constant cross-sectional area. The results confirm, that the exchange of bars in considered design will bring economic profits and won't cause significant deterioration of operating features.

1. Wstęp

W projektowaniu maszyn elektrycznych w coraz szerszym stopniu stosowane są różne metody optymalizacji konstrukcji [5, 6, 7, 8]. Szczególne znaczenie wydaje się mieć modelowanie polowo-obwodowe, które umożliwia nie tylko optymalizowanie wymiarów konstrukcji, ale również kształtu elementów. Zazwyczaj celem takich działań jest zwiększenie sprawności bądź zmniejszenie zużycia materiału. Można jednak użyć tego sposobu modelowania do zbadania wpływu zmian technologicznych na właściwości eksploatacyjne budowanej maszyny. Przykładem takiego zastosowania może być zmiana kształtu prętów klatki wirnika silnika indukcyjnego podyktowana względami ekonomicznymi. Zmiana pręta o przekroju trapezowym na pręt o przekroju prostokątnym może obniżyć koszty materiałowe i koszty montażu. Jednak trzeba upewnić się, że te zmiany nie pogorszą w istotny sposób właściwości eksploatacyjnych silnika. Model polowo-obwodowy przy pomocy którego można przeprowadzić takie badania został opracowany i zweryfikowany dla maszyn małej mocy [1, 2, 4]. Na jego bazie powstał model maszyny dużej mocy [3] i został wykorzystany do wyznaczenia statycznych i dynamicznych charakterystyk silnika klatkowego. Model ten w niniejszej pracy został użyty do zbadania konsekwencji zmiany kształtu pręta klatki wirnika.

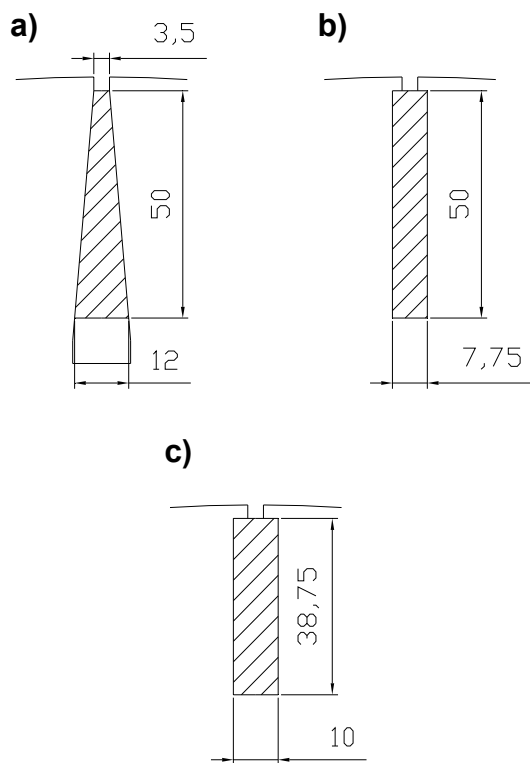
2. Model obliczeniowy

Badania przeprowadzono przy użyciu modelu polowo-obwodowego silnika klatkowego dużej mocy (3,15 MW). Część polowa modelu uwzględnia nieliniowość elementów obwodu magnetycznego oraz ruch wirnika odwzorowywany przez wirującą szczelinę powietrzną. Część obwodowa modelu uwzględnia wymuszenia napięciowe i parametry elektryczne układu zasilania. Uwzględnia również uzwojenia fazowe stojana o zmiennej indukcyjności i stałej rezystancji oraz połączenia czołowe tych uzwojeń o stałej rezystancji i indukcyjności. Klatka wirnika reprezentowana jest przez rezystancje i reaktancje wycinków pierścienia zwierającego o stałej wartości i lite pręty, których parametry wynikają z rozwiązania polowego. Wirująca szczelina powietrzna umożliwia obliczanie pola zarówno w stanach statycznych jak i dynamicznych, a więc dla ustalonej prędkości silnika jak i dla jego rozruchu.

3. Wyniki badań

Przeprowadzono badania silników z trzema różnymi kształtami prętów klatki wirnika. Rozważono konstrukcję z prętem o przekroju trapezowym i wymiarach $3,5 \times 50 \times 12$ mm (rys. 1a), oraz konstrukcje z prętami prostokątnymi o wymiarach $7,75 \times 50$ mm (rys. 1b) i $10 \times 38,75$ mm (rys. 1c). Wymiary przekrojów prętów prostokątnych dobrano tak, by porównać

charakterystyki maszyn z takimi prętami, z charakterystykami maszyny z prętem trapezowym. We wszystkich przypadkach pole przekroju pręta było takie samo. Pręt o wymiarach $7,75 \times 50$ mm wybrano w celu sprawdzenia reakcji silnika na zmianę kształtu pręta z trapezowego na prostokątny przy zachowaniu tej samej głębokości żłobka. Natomiast pręt o wymiarach $10 \times 38,75$ mm, jako bardziej standardowy, wybrano w celu sprawdzenia czy zachowanie początkowej głębokości ma sens ekonomiczny. Przy pomocy przedstawionego modelu połowo-obwodowego wyznaczono charakterystyki mechaniczne momentu i prądu oraz przebiegi czasowe momentu, prądu i prędkości obrotowej podczas rozruchu silników. Rozruch realizowano przy obciążeniu silników momentem liniowo zależnym od prędkości. Po zakończeniu rozruchu moment obciążenia osiągał wartość znamionową.

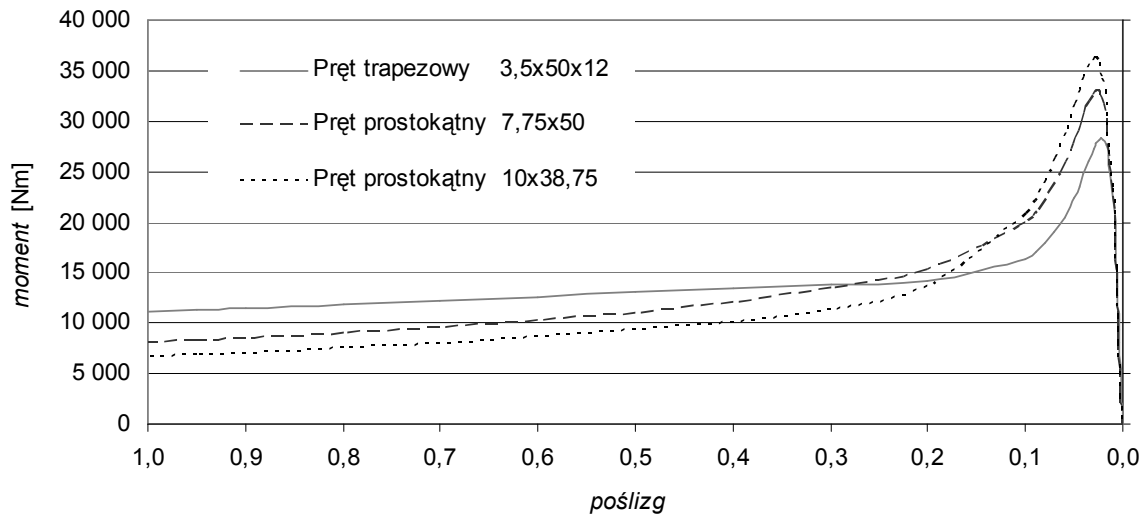


Rys. 1. Przekroje badanych prętów klatki wirnika: a) pręt trapezowy $3,5 \times 50 \times 12$; b) pręt prostokątny $7,75 \times 50$; c) pręt prostokątny $10 \times 38,75$

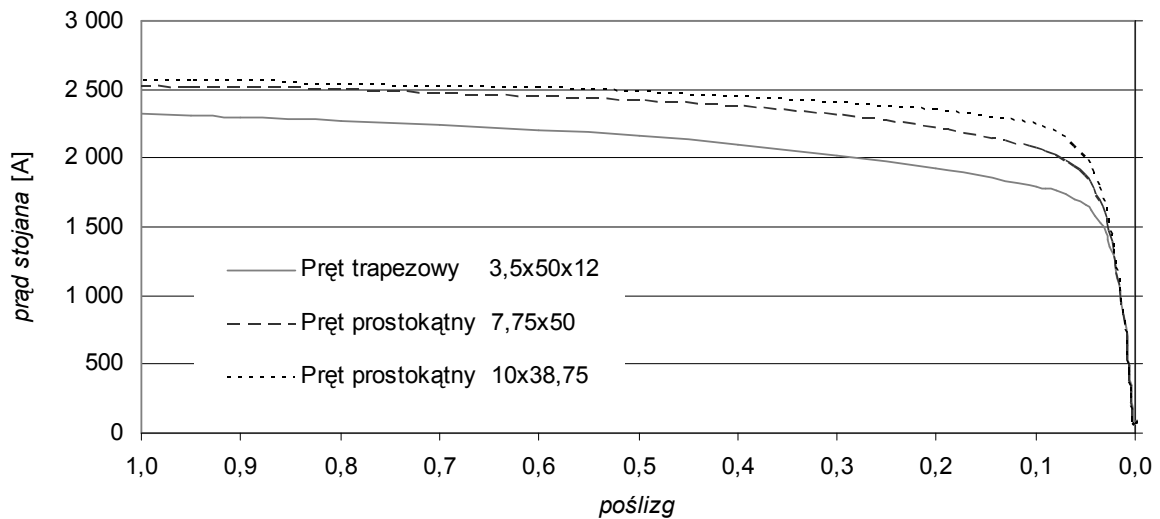
Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono statyczne charakterystyki mechaniczne momentu i prądu badanych silników. Zastąpienie pręta trapezowego prętem prostokątnym powoduje zmniejszenie momentu rozruchowego oraz zwiększenie momentu maksymalnego i prądu rozruchowego. Moment rozruchowy w silniku z prętem trapezowym ma wartość $1,11$ momentu znamionowego, a w silniku z prętem $7,75 \times 50$ mm $0,82 \cdot M_n$. Moment maksymalny i prąd rozruchowy osiągnęły odpowiednio wartości $2,81 \cdot M_n$ i $6,68 \cdot I_n$ dla silnika z prętem trapezowym i $3,3 \cdot M_n$ oraz $7,3 \cdot I_n$ dla silnika z prętem prostokątnym $7,75 \times 50$ mm.

Podobne zmiany, zgodne z oczekiwaniami wynikającymi z teorii klatki głęboko-żłobkowej, zachodzą przy przejściu z pręta prostokątnego o wymiarach $7,75 \times 50$ mm na pręt o wymiarach $10 \times 38,75$ mm. Silnik z taką konstrukcją klatki wirnika osiągnął następujące wartości wielkości rozruchowych i maksymalnych: $M_r/M_n = 0,68$, $M_{max}/M_n = 3,61$, $I_r/I_n = 7,44$.

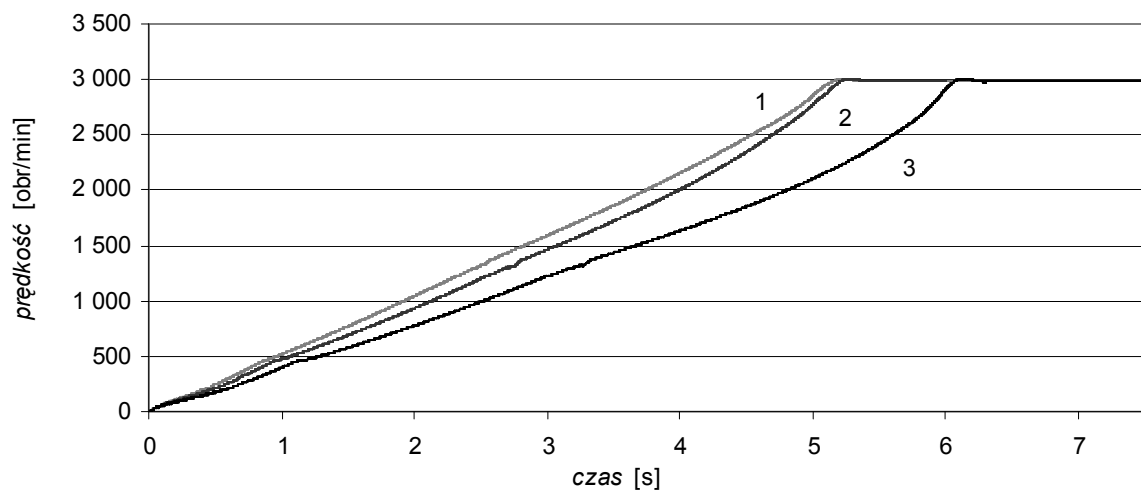
Na rysunkach 4, 5 i 6 przedstawiono charakterystyki rozruchowe prędkości obrotowej, momentu elektromagnetycznego i prądu jednej fazy. Zmiana kształtu prętów nie zwiększa w znaczący sposób maksymalnych wartości szczytowych momentu i prądów osiąganych przez silniki w trakcie rozruchu. Niewielkie różnice mają charakter zgodny z prezentowanym na charakterystykach mechanicznych. Największe wartości pojawiają się w silniku z prętami prostokątnymi o wymiarze $10 \times 38,75$ mm, mniejsze w silniku z prętami $7,75 \times 50$ mm, a najmniejsze w silniku z prętami trapezowymi. Znaczące różnice pojawiają się jednak w czasie trwania rozruchu. Silniki ze zbliżoną głębokością żłobka wirnika (trapezowy i prostokątny $7,75 \times 50$ mm) osiągają zbliżony czas rozruchu, natomiast czas rozruchu silnika z prętem $10 \times 38,75$ mm jest dłuższy o około 1 s.



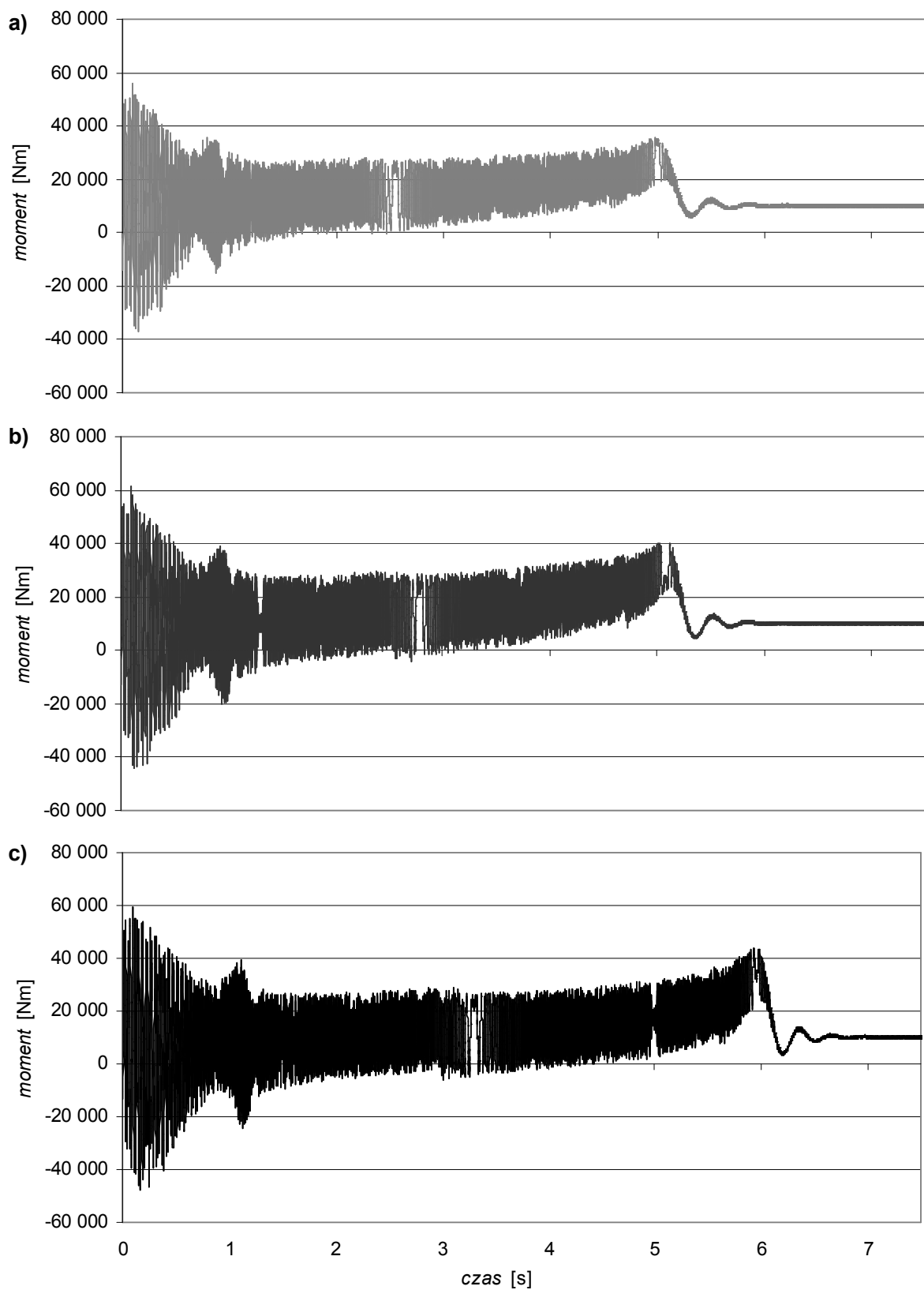
Rys. 2. Charakterystyki mechaniczne momentu silników z różnymi kształtami prętów klatki wirnika



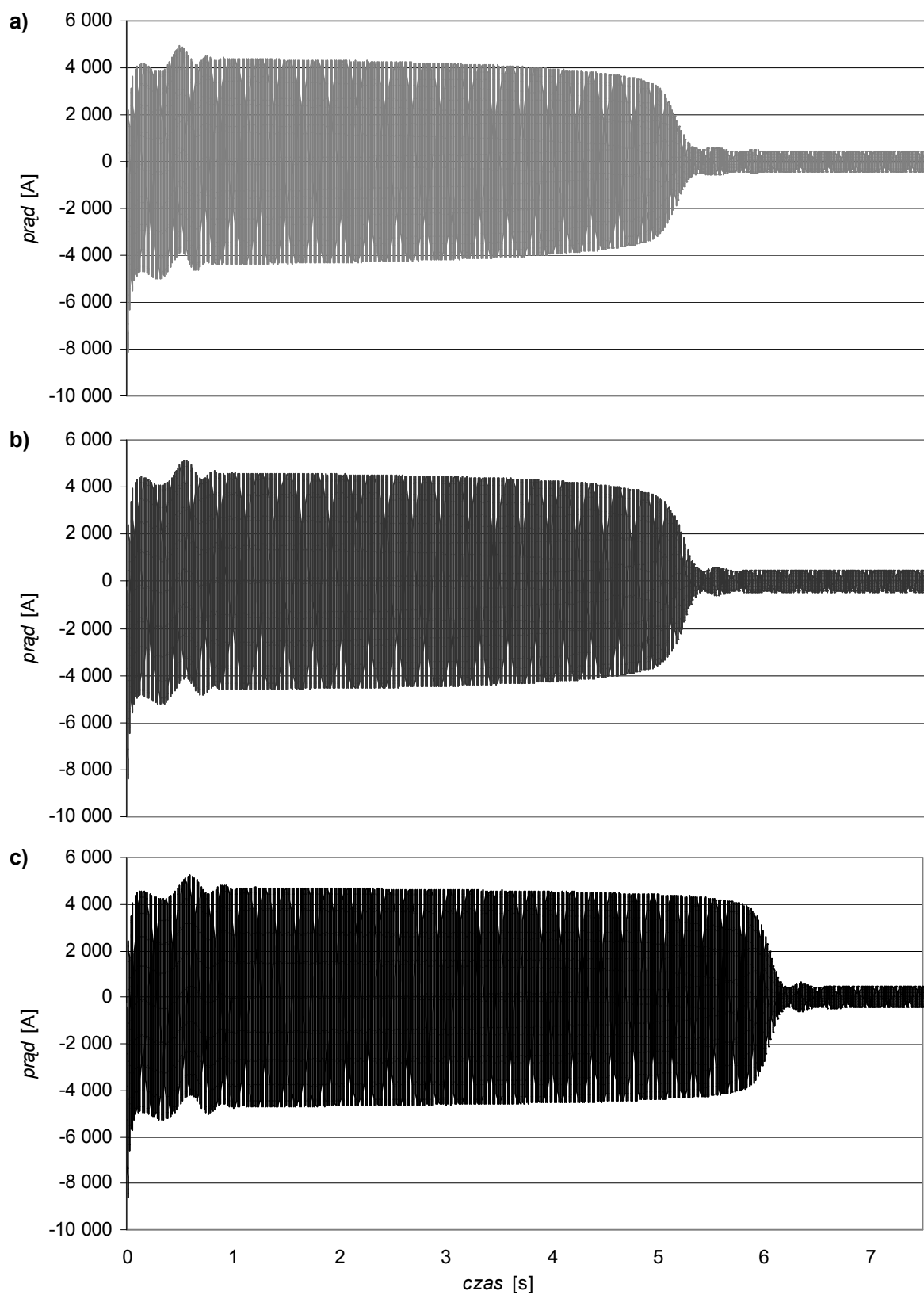
Rys. 3. Charakterystyki mechaniczne prądu silników z różnymi kształtami prętów klatki wirnika



Rys. 4. Przebiegi prędkości obrotowej podczas rozruchu silników obciążonych momentem liniowo zależnym od prędkości: 1 - silnik z prętem trapezowym $3,5 \times 50 \times 12$, 2 - silnik z prętem prostokątnym $7,75 \times 50$, 3 - silnik z prętem prostokątnym $10 \times 38,75$



Rys. 5. Przebiegi momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu silników obciążonych momentem liniowo zależnym od prędkości: a) silnik z prądem trapezowym $3,5 \times 50 \times 12$; b) silnik z prądem prostokątnym $7,75 \times 50$; c) silnik z prądem prostokątnym $10 \times 38,75$



Rys. 6. Przebiegi prądu jednej fazy podczas rozruchu silników obciążonych momentem liniowo zależnym od prędkości: a) silnik z prętem trapezowym $3,5 \times 50 \times 12$; b) silnik z prętem prostokątnym $7,75 \times 50$; c) silnik z prętem prostokątnym $10 \times 38,75$

4. Podsumowanie

Zmiana kształtu pręta klatki wirnika z trapezowego na prostokątny niesie ze sobą zmiany charakterystyk eksploatacyjnych. Jeżeli jednak zmiany takie nie mają większego znaczenia dla warunków pracy maszyny to ze względów technologicznych są one bardzo korzystne. Sytuacja taka zachodzi na przykład w napędach o charakterystyce wentylatorowej. Wykorzystanie standardowych, a przez to tańszych, prętów o przekroju prostokątnym oraz wyeliminowanie z konstrukcji klinów mocujących pręty oznacza zmniejszenie kosztów materiałowych. Ponadto zastosowanie konstrukcji nie wymagającej klinowania prętów (pręty prostokątne są zabezpieczane w żłobkach przez rozpęczanie od góry, zwykle na części długości pakietu) skutkuje oszczędnością czasu pracy montażystów, a co za tym idzie zmniejszeniem kosztów produkcji maszyny.

5. Literatura

- [1]. Antal L., Antal M., *Weryfikacja eksperymentalna polowo-obwodowego modelu silnika indukcyjnego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 54, Studia i Materiały Nr 23, Wrocław, 2003, s. 39-48.
- [2]. Antal L., *Obliczanie sprawności silnika indukcyjnego metodą polowo-obwodową*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 54, Studia i Materiały Nr 23, Wrocław, 2003, s. 49-60.
- [3]. Antal M., Antal L., *Charakterystyki eksploatacyjne silnika indukcyjnego dużej mocy z uszkodzoną klatką wirnika*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 60, Studia i Materiały Nr 27, Wrocław, 2007, s. 11-25.
- [4]. Antal M., Antal L., Zawilak J., *Charakterystyki eksploatacyjne silnika indukcyjnego z uszkodzoną klatką wirnika*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 56, Studia i Materiały Nr 24, Wrocław 2004.
- [5]. Hameyer K., Belmans R., Dular P., *Efficient simulation of electromagnetic fields using magnetic equivalent circuits for numerical optimisation*, 3rd international workshop on electric & Magnetic fields, Liège, Belgium, May 6-9, 1996; pp. 207-212.
- [6]. Jażdżyński W., *Wpływ założeń projektowych na optymalne rozwiązania projektowe energooszczędnych silników indukcyjnych*, Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe BOBRME Komel, Katowice, 1998.
- [7]. Jażdżyński W., *Some economic aspects of designing optimal energy-efficient and high-efficiency induction motors*, 15th International conference on electrical machines (ICEM), Brugge, Belgium, August 25-28, 2002.
- [8]. Jornet A., Orille A., Pérez A., Pérez D., *Optimal design of high frequency induction motors with aid of finite elements*, 15th International conference on electrical machines (ICEM), Brugge, Belgium, August 25-28, 2002.

Autorzy

Dolnośląska Fabryka Maszyn Elektrycznych
Sp. z o. o.
Ul. Fabryczna 10
53-609 Wrocław
maciej.antal@dfme.pl
jerzy.chamerski@dfme.pl
wojciech.pilat@dfme.pl
Inst. Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektr.
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
ludwik.antal@pwr.wroc.pl