

# Wpływ optymalizacji sterowania pracą silnika indukcyjnego na jakość energii elektrycznej

**Streszczenie.** Celem wykonanych badań było opracowanie algorytmu sterowania procesem rozruchu silnika indukcyjnego pozwalającego na ograniczenie wartości prądu w początkowej fazie jego pracy. Opracowano model silnika elektrycznego w programie Matlab-Simulink wraz z autorskim układem wykorzystującym logikę rozmytą do sterowania wartością napięcia zasilającego uzwojenia stojana i dynamiką jego zmiany w funkcji obciążenia na wale silnika. W czasie badania analizowano również wpływ procesu rozruchu silnika na parametry opisujące jakość napięcia.

**Abstract.** The aim of the research was to develop a control algorithm for the start-up process of an induction motor, allowing current limitation in the initial phase of its operation. A model of an electric motor was developed in the Matlab-Simulink programme, together with an original system using fuzzy logic to control the value of the voltage supplying the stator winding and the dynamics of its change as a function of the load on the motor shaft. The study also analysed the effect of the motor start-up process on the parameters describing the voltage quality. (**Effect of optimization of induction motor control on power quality**).

**Słowa kluczowe:** jakość energii elektrycznej, logika rozmyta, rozruch silnika indukcyjny, sterowanie.

**Keywords:** power quality, fuzzy logic, induction motor starting, control.

## Wstęp

Silniki indukcyjne z wirnikiem o budowie klatkowej są powszechnie stosowane w wielu procesach produkcyjnych. Popularność takiego rozwiązania w dużej mierze wynika z jego zalet, wśród których najczęściej są wymieniane stosunkowo prosta budowa, niska cena oraz duża niezawodność. Praca silnika elektrycznego charakteryzuje się dużą zmiennością w zakresie parametrów elektrycznych jak i mechanicznych. W czasie rozruchu silnik indukcyjny pobiera z sieci prąd wielokrotnie wyższy od wartości znamionowej. Jest to tzw. prąd rozruchowy a jego wartość może być do 10 razy większa od prądu płynącego przy obciążeniu znamionowym. Problemy związane z rozruchem silnika zwiększają się wraz ze wzrostem jego mocy [1] - [3]. Przepływ prądów rozruchowych o dużym natężeniu wpływa niekorzystnie zarówno na silnik, jak i na inne urządzenia zasilane ze wspólnej sieci. Udarowi prądu silnika w stanach dynamicznych związanych z jego rozruchem, powrotem do normalnej pracy po zaniku napięcia czy rewersji prędkości obrotowej towarzyszy bowiem również udar momentu. Wywołuje on niekorzystne stany mechaniczne, narażające napędzane urządzenia na uszkodzenie a w sieci powoduje m.in. szybkie zmiany wartości napięcia zasilającego [4]. Szkodliwy dla silnika jest również przepływ prądu w jego łożyskach. Przyspiesza on ich zużywanie się w wyniku zjawiska elektroerozji. Źródłem prądów łożyskowych jest indukowana wzdłuż wału maszyny SEM zwana napięciem wałowym [5], [6]. W celu ograniczenia udarów w czasie rozruchu silnika stosuje się m.in. rozruch za pomocą przełącznika gwiazda trójkąt, rozruch przy pomocy soft-startu, falownika jak również inne metody [7]. W literaturze jest dostępnych wiele badań, w których analizowany jest wpływ sposobu rozruchu silnika na ograniczenie jego szkodliwego działania [2], [3], [7]. Niestety, ale w badaniach bardzo mało uwagi poświęca się na analizę wpływu sterowania procesem rozruchu silnika na jakość energii elektrycznej.

## Cel i zakres pracy

Celem pracy była analiza jakości energii elektrycznej w czasie rozruchu silnika indukcyjnego i opracowanie algorytmu sterowania tym procesem. Do badania jakości energii wykorzystano analizator parametrów sieci As3Plus. W pracy analizowano możliwość ograniczenia prądu rozruchowego silnika poprzez sterowanie wzrostem napięcia zasilającego uzwojenia stojana w zależności od

obciążenia na wale. W tym celu skorzystano z dostępnego w literaturze modelu silnika indukcyjnego trójfazowego [8], który rozbudowano o autorski program do zmiany wartości napięcia zasilającego uzwojenia stojana. Zbudowany model pozwolił na przeprowadzenie symulacji zmian prądu rozruchowego w funkcji zmiany napięcia zasilającego, dynamiki jego zmiany i obciążenia na wale silnika. Uzyskane wyniki wykorzystano do opracowania tablicy decyzyjnej zawierającej zbiór reguł rozmytych opisujących relacje zachodzące pomiędzy w/w zmiennymi. W ostatniej części pracy dokonano strojenia sterownika rozmytego. Ostatecznym efektem pracy było uzyskanie algorytmu do wyznaczenia początkowej wartości napięcia zasilającego i dynamiki jego zmian pozwalających na minimalizację prądu rozruchowego w zależności od obciążenia silnika.

## Wyniki badań

### Jakość energii w czasie rozruchu silnika

W czasie badania procesu rozruchu silnika w warunkach rzeczywistych jego pracy główne problemy w zakresie jakości energii elektrycznej dotyczyły szybkich zmian napięcia oraz wzrostu zawartości wyższych harmonicznych w pobieranym prądzie (tab.1). W zależności od sposobu rozruchu udział wyższych harmonicznych powodował wzrost wartości skutecznej prądu ( $I_{RMS}$ ) w odniesieniu do składowej podstawowej ( $h_i$ ) do 1,38 przy wykorzystaniu układu soft-start i do 1,55 dla przemiennika częstotliwości.

Tabela 1. Udział wyższych harmonicznych prądu w czasie rozruchu silnika

Rozruch	Numer harmonicznej									$I_{RMS}$ [A]
	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_7$	$h_9$	$h_{13}$	$h_{15}$	
	[%]									
I	5,6	83	6	34	15	6	1	2	1	7,7
II	1,1	0	84	0	66	45	22	11	21	1,7

gdzie: I – rozruch z wykorzystaniem soft-start, II – rozruch z przemiennikiem częstotliwości.

Wśród wyższych harmonicznych największy udział miały harmoniczne niższych rzędów i wynosiły one do 84% składowej podstawowej dla harmonicznej 2 i 3 oraz 45-66% dla harmonicznej rzędu 7 i 5. Sumaryczny wskaźnik odkształcenia prądu  $THD$ , oscylował w przedziale od 2% do ponad 40% przy średniej wartości na poziomie 17%.

## Proces rozruchu wirtualnego silnika

Najprostszą, a zarazem dającą duże możliwości analizy, jest postać liniowa modelu silnika indukcyjnego [9]. Przy założeniu, że uzwojenie stojana jest trójfazowe, obwody elektryczne oraz struktura magnetyczna silnika są symetryczne, wszystkie obwody magnetyczne są liniowe, rozkład pola magnetycznego w szczelinie powietrznej między stojanem i wirnikiem jest sinusoidalny, strumień magnetyczny ma składową główną oraz rozproszenia a zmienne wirnika są sprowadzone do układu współrzędnych stojana to w przypadku pracy maszyny w stanie ustalonym ma powszechnie znaną reprezentację graficzną w postaci schematu zastępczego [9].

Dla takiego przypadku wartość prądu rozruchowego ( $I_R$ ) można w przybliżeniu wyznaczyć z zależności

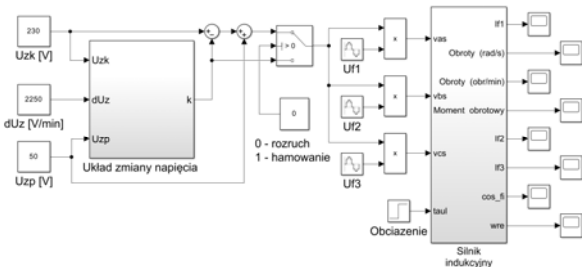
$$I_R \cong \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R_r}{S}\right)^2 + X_z^2}}$$

Gdzie:  $U_s$  – napięcie statora,  $R_s$ ,  $R_r$  – rezystancja odpowiednio statora i rotora,  $S$  – poślizg,  $X_z$  – reaktancja zwarcia silnika indukcyjnego.

Taki sposób analizy pracy silnika jest możliwy tylko w przypadku pracy maszyny w stanie ustalonym, tj. pracującej ze stałą prędkością kątową.

W celu ograniczenia szkodliwego oddziaływania silnika i układów wykorzystywanych w czasie jego rozruchu na sieć elektroenergetyczną konieczne było poznanie nie tylko wartości prądu rozruchowego, ale jego przebiegu w czasie [10], [11]. W tym celu w pracy skorzystano z dostępnego w literaturze nieliniowego modelu matematycznego maszyny indukcyjnej [8], który rozbudowano o autorski program do automatycznej zmiany wartości napięcia zasilającego. Model ten został zaimplementowany do środowiska Matlab Simulink (rys.1 i 2). Opracowany układ wykorzystano do pozyskania informacji charakteryzujących pracę silnika elektrycznego przy zmianie obciążenia oraz parametrów napięcia zasilającego. Dane te następnie były wykorzystane w dalszej części pracy do opracowania bazy reguł dla sterownika rozmytego.

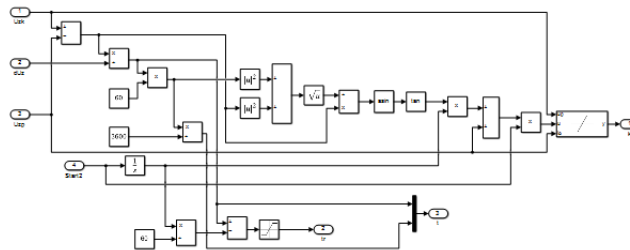
Dla potrzeb realizacji celu pracy zmodyfikowano parametry modelu silnika do wartości odpowiadających obiektowi rzeczywistemu. Badania symulacyjne przeprowadzono dla silnika indukcyjnego o parametrach:  $R_s = 6,03 \Omega$ ,  $R_r = 6,058 \Omega$ ,  $L_s = L_r = 489,3 \text{ mH}$ ,  $M = 450 \text{ mH}$ ,  $P = 4$ ,  $J = 4,88 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 10^{-3}$ ,  $U_n = 230 \text{ V}$ , gdzie:  $L_s$ ,  $L_r$  – indukcyjność odpowiednio statora i rotora,  $M$  – Indukcyjność uzwojenia,  $P$  – liczba par biegunów,  $J$  – Masowy moment bezwładności,  $U_n$  – napięcie znamionowe.



Rys.1. Schemat modelu silnika indukcyjnego z układem zmiany napięcia zasilającego

W czasie badania wirtualnego silnika w środowisku Matlab przeprowadzono symulacje dla wartości napięć zasilających uzwojenie stojana wynoszących 0,25; 0,35;

0,50; 0,65; 0,75  $U_n$ . Oprócz wartości napięcia zasilającego zmieniano również parametry obciążenia zgodnie z wariantami przedstawionymi w poniższej tabeli 2. Zmiana pomiędzy obciążeniem początkowym ( $O_{bc,p}$ ) a końcowym ( $O_{bc,k}$ ) następowała w sposób skokowy po czasie  $t_z$  od startu.

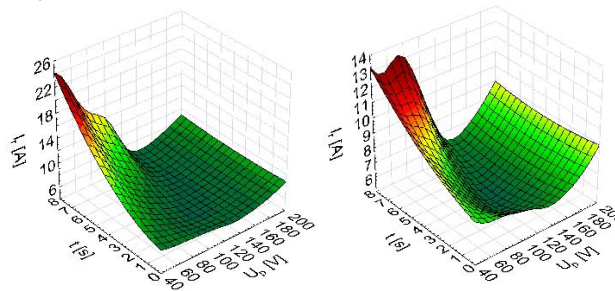


Rys.2. Schemat układu zmiany napięcia zasilającego

Tabela 2. Warianty wielkości obciążenia na wale silnika

Wariant	$O_{bc,p}$	$O_{bc,k}$	$t_z$ [s]
W1	0	0	0
W2	1	1	0
W3	2	2	0
W4	0	1	1
W5	0	2	1
W6	0,5	1	1
W7	1	2	1

Z wykonanych badań symulacyjnych (rys.3) wynika, że w zależności od obciążenia na wale silnika należy poszukiwać odpowiedniego obniżenia wartości napięcia zasilającego uzwojenia stojana i szybkości jego zwiększania do wartości znamionowej.



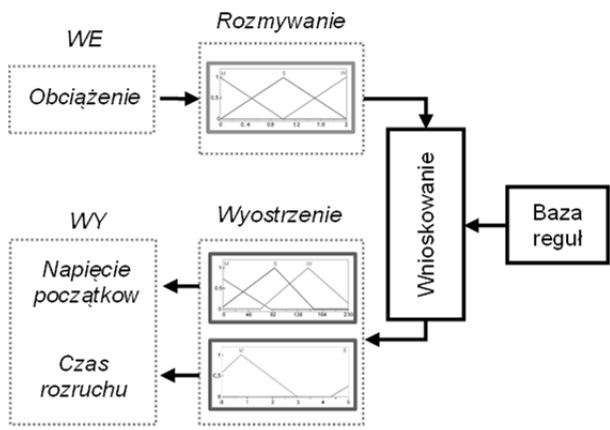
Rys.3. Wpływ obniżenia poziomu napięcia początkowego ( $U_p$ ) i czasu jego wzrostu ( $t$ ) do wartości znamionowej na wartość prądu rozruchowego ( $I_r$ ) dla wariantu W3 i W6

## Strojenie sterownika rozmytego

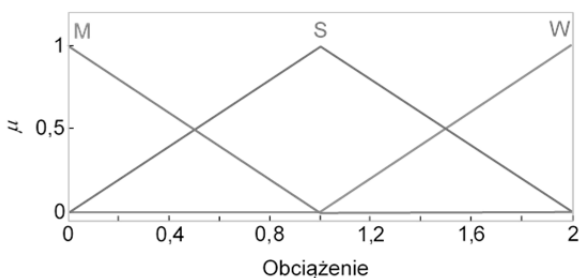
Do symulacji sterowania rozruchem silnika zastosowano sterownik bazujący na modelu rozmytym Mamdaniego. Jego działanie opiera się na wnioskowaniu rozmytym, czyli wyciąganiu wniosków o wartościach zmiennej wyjściowej na podstawie wartości zmiennej wejściowej  $wy=f(we)$ . Działanie to przebiega w oparciu o bazę opracowanych relacji między tymi zmiennymi. Model składa się z trzech podstawowych modułów: rozmywania, wnioskowania i wyostrzania. Strukturę sterownika zilustrowano na rys. 4.

W celu wyznaczenia wartości początkowej napięcia do procesu rozruchu i dynamiki jego zmian w zależności od obciążenia na wale silnika zgromadzone informacje wykorzystano do pozyskania wiedzy eksperckiej koniecznej do opracowania bazy reguł. Jako zmienne wejściowe wykorzystano informację o obciążeniu na wale silnika, wartości początkowej napięcia zasilającego i czasie jego wzrostu do wartości nominalnej. Bazując na posiadanej wiedzy dotyczącej procesu, zbiór wartości wejścia podzielono na 3 podzbiory wartości: małych M, średnich S i wysokich W. Elementom podzbiorów przyporządkowano

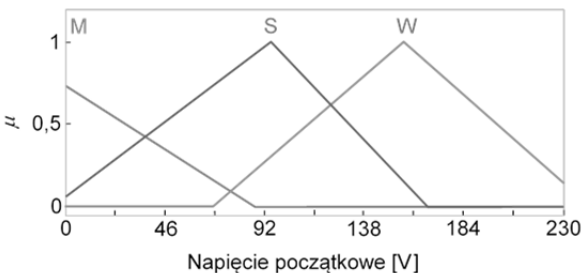
wartości funkcji przynależności  $\mu$  typu trimf. Przebieg funkcji przynależności elementów zbioru obciążenie do podzbiorów M, S i W przedstawia rysunek 5.



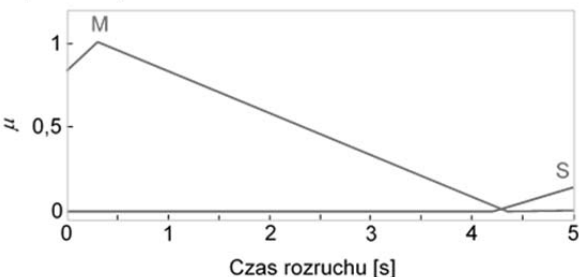
Rys.4. Schemat ideowy sterownika rozmytego



Rys.5. Przebieg funkcji przynależności elementów zbioru obciążenie do podzbiorów



Rys.6. Przebieg funkcji przynależności elementów zbioru napięcie początkowe do podzbiorów



Rys.7. Przebieg funkcji przynależności elementów zbioru czas rozruchu do podzbiorów

Tabela 3. Baza reguł sterownika rozmytego

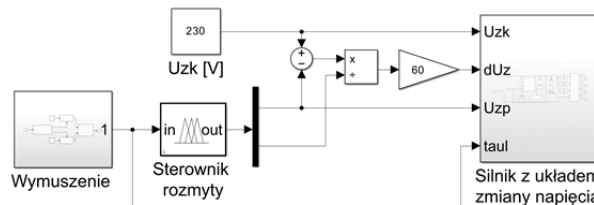
		WY			Czas rozruchu	
		Napięcie początkowe			M	S
Obciążenie	WE	M	S	W	M	S
	M	x				x
	S		x			x
W				x	x	

Analogicznie podzielono na podzbiory wartości wyjścia (napięcie początkowe i czas rozruchu) a ich elementom przyporządkowano wartości funkcji przynależności  $\mu$  typu *trimf* (rys.6 i 7).

Tablicę decyzyjną zawierającą zbiór reguł rozmytych opisujących relacje zachodzące pomiędzy zmienną wejściową i wyjściowymi przedstawiono w tabeli 3.

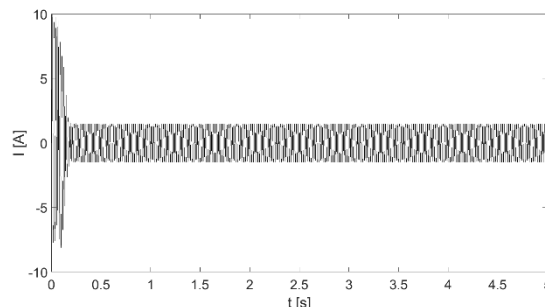
### Model symulacyjny z układem sterowania rozmytego

Przedstawiony na rysunku 2 schemat silnika z układem zmiany napięcia rozbudowano o sterownik rozmyty (rys.8).

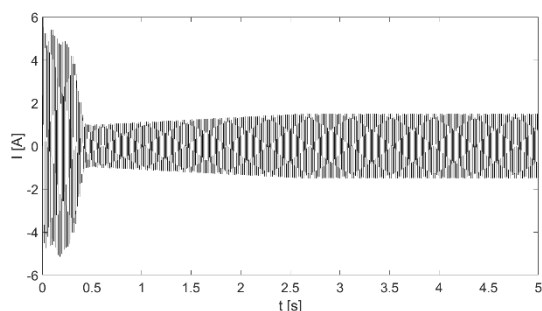


Rys.8. Schemat blokowy silnika indukcyjnego z rozmytym układem sterowania napięciem zasilającym

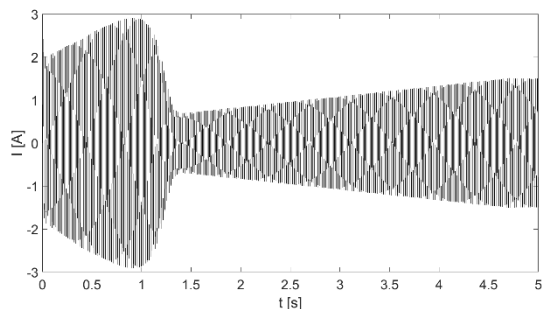
Wykorzystanie opracowanego układu ze sterownikiem rozmytym do regulacji poziomu i dynamiki zmian zapiecia zasilającego uzwojenia stojana silnika w zależności od obciążenia na wale pozwoliło na ograniczenie wartości prądu rozruchowego. Zarejestrowane przebiegi prądu dla jednej z faz przedstawiono na rysunkach 9 - 13. W czasie rozruchu bezpośredniego wartość prądu rozruchowego osiągała poziom 10A i po bardzo krótkim czasie stabilizowała się na poziomie 1,5A odpowiadającej prądowi biegu jałowego (rys.9). Obniżenie napięcia do poziomu 160 V spowodowało obniżenie prądu rozruchowego do ok. 5A i zwiększenie czasu potrzebnego do osiągnięcia stabilnych warunków pracy (rys.10). Obniżenie napięcia zgodnie z oczekiwaniami zredukowało wartość prądu rozruchowego, lecz jego poziom jest uzależniony od poprawności doboru parametrów napięcia w zależności od obciążenia. Jeśli bowiem silnik uruchamiany przy obciążeniu ma zbyt duże obniżenie napięcia lub wydłużenie czasu jego narastania występuje wzrost wartości prądu. Skuteczność obniżania napięcia jest więc uzależniona od doboru parametrów rozruchu. Dzięki wykorzystaniu logiki rozmytej do sterowania rozruchem dla każdego obciążenia dobierane są indywidualne parametry. Dzięki temu wartość prądu rozruchu została obniżona do ok. 3A (rys.11). Dużą zaletą opracowanego algorytmu sterowania jest dynamiczna zmiana parametrów w zależności od obciążenia w czasie rozruchu. Jeśli bowiem w czasie rozruchu wystąpi wzrost obciążenia a układ miał nastawione stałe parametry może wystąpić wzrost wartości prądu (rys.12) a w jego konsekwencji pogorszenie jakości energii elektrycznej. Opracowany algorytm dobiera w sposób ciągły zarówno wartość napięcia jak i dynamikę jego zmiany w zależności od aktualnego obciążenia (rys.13).



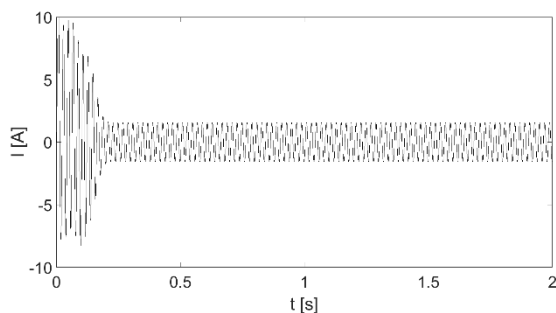
Rys.10. Przebieg prądu przy rozruchu bezpośrednim



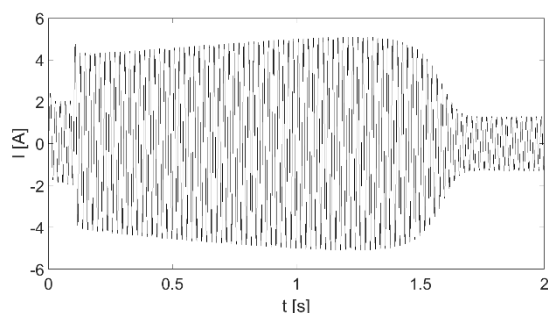
Rys.11. Przebieg prądu przy obniżonym napięciu do 160 V



Rys.12. Przebieg prądu przy sterowaniu napięciem zasilającym



Rys.13. Przebieg prądu przy zmianie obciążenia



Rys.14. Przebieg prądu przy zmianie obciążenia i sterowaniu napięciem

### Podsumowanie

W czasie rozruchu silnika z wykorzystaniem układu soft-start i przemiennika częstotliwości głównym problemem w zakresie jakości energii elektrycznej było występowanie wyższych harmonicznych prądu. Powodowały one wzrost wartości skutecznej prądu nawet o 70% w odniesieniu do składowej podstawowej.

Opracowany algorytm do dynamicznego sterowania wartością napięcia zasilającego i szybkością jego zmiany w

zależności od obciążenia na wale silnika pozwolił na uzyskanie najniższej wartości prądu rozruchowego.

Jego zaletą w porównaniu do innych rozwiązań redukujących napięcie jest możliwość ciągłego doboru jego parametrów do obciążenia. Pozwoliło to na ograniczenie wzrostu prądu w czasie zmiany obciążenia występującego w trakcie rozruchu.

Dalsze badania będą polegały na weryfikacji opracowanego algorytmu na obiekcie rzeczywistym, w którym realizowane będzie sterowanie procesem rozruchu silnika w zależności od stopnia jego obciążenia początkowego. Do tego celu wykorzystana będzie platforma Arduino, na której zaimplementowany będzie autorski program sterujący.

**Autorzy:** dr. inż. Krzysztof Nęcka, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: [krzysztof.necka@urk.edu.pl](mailto:krzysztof.necka@urk.edu.pl); dr. inż. Stanisław Lis, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: [stanislaw.lis@urk.edu.pl](mailto:stanislaw.lis@urk.edu.pl); mgr. inż. Piotr Łyszczarz, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: [piotr.lyszczarz@urk.edu.pl](mailto:piotr.lyszczarz@urk.edu.pl); dr. inż. Anna Karbowniczak-Miśtał, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: [anna.karbowniczak@urk.edu.pl](mailto:anna.karbowniczak@urk.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Koczara W., Szulc Z., Przybylski J., Warszawska P., Rozruch silnika indukcyjnego klatkowego napędzającego pompę dużej mocy w trudnych warunkach eksploatacyjnych, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, (2005), nr.72, 209-213
- [2] Kuzera P., Przybyłka J., Wybrane rozwiązania ograniczania prądów rozruchowych na przykładzie silników elektrycznych, *Napędy i sterowanie*, (2018), nr.12, 100-105
- [3] Pacholski E., Iskierski L., Analiza wpływu sposobu rozruchu silników napędowych na parametry sieci elektroenergetycznej, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 99 (2013), nr.2, 9-17
- [4] Kucuk S., Ajder A., Analytical voltage drop calculations during direct on line motor starting: Solutions for industrial plants, *Ain Shams Engineering Journal*, 13, (2022), n4, 101671
- [5] Polak A., Jarek T., Sposób tłumienia prądów wałowych, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 2 (2017), nr.114, 243 -246
- [6] Berhausen S., Jarek T., Analysis of Impact of Design Solutions of an Electric Machine with Permanent Magnet for Bearing Voltages with Inverter Power Supply, *Energies*, (2022), n.15(12), 4475
- [7] Silva F. B. B., et al., A novel induction motor starting method using superconduction, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, (2014), n.507, 95-102, 2014
- [8] Siva M., Simulink Model of Three Phase Induction Motor, (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/36548-simulink-model-of-three-phase-induction-motor>), (2023), MATLAB Central File Exchange. Retrieved August 25, 2023.
- [9] Jażdżyński W., Projektowanie maszyn elektrycznych oraz identyfikacja ich modeli z wykorzystaniem optymalizacji wielokryterialnej. *Wydawnictwa AGH, seria „Rozprawy i Monografie”* (1995), nr.28
- [10] Vo-Duy T., Ta M. C., Fundamental design of electric motor control systems, *Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering*, (2023), 428-453
- [11] Glinka T., Model dynamiczny silnika indukcyjnego klatkowego, *Napędy i sterowanie*, (2019), nr.5, 74-79