

doi:10.15199/48.2021.12.34

## Hybrydowy silnik indukcyjny z uzwojeniami przekształtnika częstotliwości w układzie Scotta

**Streszczenie.** Przedstawiono podstawy działania silnika indukcyjnego w skojarzeniu z magnetycznym przetwornikiem częstotliwości. Uzwojenia przetwornika połączone w układ Scotta i zasilone trójfazowo w celu uzyskania dwufazowego napięcia wyjściowego o potrójonej częstotliwości, podawanego na uzwojenia silnika. Umożliwia to uzyskanie pola wirujące w szczelinie z prędkością trzykrotnie większą niż wynika to bezpośrednio z częstotliwości napięcia zasilającego. Zamieszczono wyniki symulacji komputerowej uzyskane w aplikacji Flux 2D w postaci przebiegów czasowych napięć i charakterystyk prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego.

**Abstract.** The basics of the operation of an induction motor in combination with a magnetic frequency converter are presented. The windings of the converter are connected in a Scott system and supplied with a three-phase power supply in order to obtain a two-phase output voltage of tripled frequency, applied to the motor windings. This makes it possible to obtain a field rotating in the gap at a speed three times higher than that resulting directly from the frequency of the supply voltage. The results of computer simulation, obtained in Flux 2D, are presented in the form of voltage waveforms and characteristics of rotational speed and electromagnetic torque. (A hybrid induction motor with frequency converter windings connected in the Scott system).

**Słowa kluczowe:** silnik indukcyjny, magnetyczny przemiennik częstotliwości, obwody magnetyczne .

**Keywords:** induction motor, magnetic frequency changer, magnetic circuits.

### Wstęp

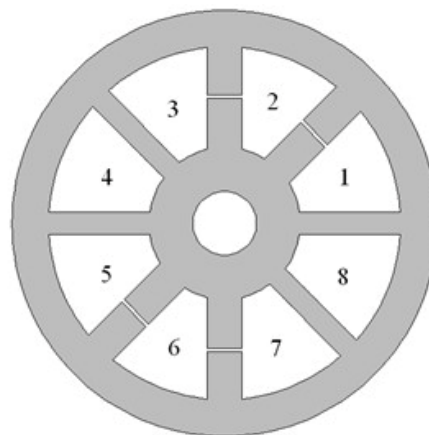
Ciągle są opracowywane nowe układy topologiczne silników o zwiększonym momencie obrotowym, silników o wysokiej prędkości, zintegrowanych napędów silnikowych oraz silników specjalnych [1, 2]. Rozwój maszyn elektrycznych w ciągu najbliższych lat będzie głównie związany z ewolucją sprzętu komputerowego, urządzeń powszechnego użytku oraz aplikacji i systemów transportu publicznego (lądowych, morskich i powietrznych), systemów mikroelektromechanicznych, zastosowań specjalnych takich jak technologie nuklearne, systemy uzbrojenia i inne [1, 2, 3, 4]. Przewiduje się również rozwój maszyn specjalnych o niekonwencjonalnych topologiach, takich jak: silniki z wzbudzanymi biegunami (written pole motors), z poprzecznym strumieniem (TFMs), hybrydowe, piezoelektryczne, rezonansowe, oscylacyjne, nadprzewodnikowe, obrotowo-liniowe, itp. [1]. Obserwuje się ciągły postęp w technologii elektrycznych maszyn elektrycznych, który jest stymulowany dostępnością nowych materiałów konstrukcyjnych, wystąpieniem nowych obszarów zastosowań, wpływem energoelektroniki, potrzebą oszczędzania energii i nowych wyzwań technologicznych [1, 2, 3, 4].

Poszukiwanie nowych rozwiązań silników indukcyjnych wykorzystujących nieliniowość obwodu magnetycznego jest nadal przedmiotem zainteresowania ośrodków badawczych. Dotychczas skonstruowano kilka modeli szybkoobrotowych silników hybrydowych, które łączą w sobie cechy magnetycznych przemienników częstotliwości i silnika konwencjonalnego. Modele te obejmują silniki indukcyjne jednofazowe z biegunami wydłużonymi i zwartym uzwojeniem pomocniczym [5], z rozruchową fazą kondensatorową [6], silniki zasilane trójfazowo [7, 8, 9, 10] oraz także silniki parametryczne [11]. Obwody magnetyczne silników hybrydowych i parametrycznych są bardziej skomplikowane od konwencjonalnych ze względu na przemianę częstotliwości i niekiedy liczby faz. Wymaga to innego opisu zjawisk fizycznych niż konwencjonalny i uwzględnienia nieliniowości charakterystyk magnesowania. Przedstawiono budowę modelu indukcyjnego silnika hybrydowego, który charakteryzuje się nową strukturą geometryczną magnetowodu oraz sposobem połączeń uzwojeń

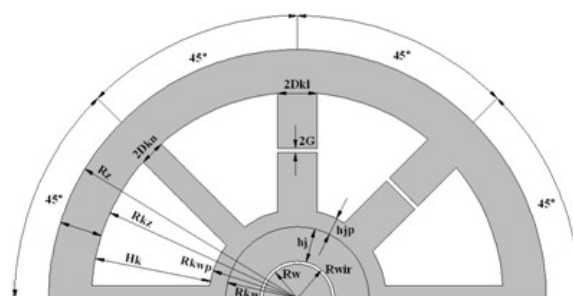
przekształtnika częstotliwości w układ Scotta oraz jego podstawowe charakterystyki.

### Struktura silnika hybrydowego

Przekrój magnetowodu silnika jest przedstawiony na rysunku 1. W stojanie można wyróżnić 8 kolumn rozchodzących się promieniście. Cztery z nich stanowią rdzenie liniowe (ze szczeliną powietrzną), pracują w liniowej części charakterystyki magnesowania; kolejne cztery są nieliniowe (pracują w stanie nasycenia). Ich przekroje



Rys.1. Przekrój magnetowodu silnika hybrydowego



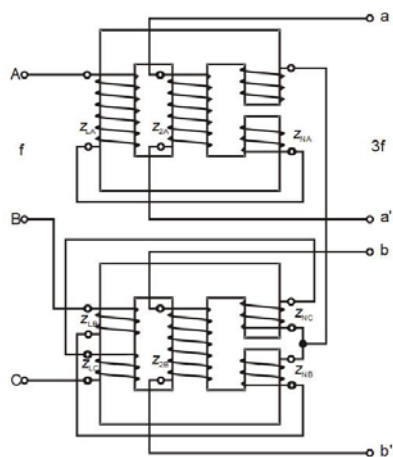
Rys.2. Oznaczenie wymiarów magnetowodu silnika hybrydowego

poprzeczne różnią się od siebie. Obie grupy kolumn są umieszczane na przemian, aby zapewnić symetrię. Okna przekroju różnią się polem powierzchni, są tam umieszczone uzwojenia przetwornika. Parametry określające wymiary modelu przedstawia rysunek 2, ich wartości i objaśnienia zawiera tabela 1.

Tabela 1. Parametry określające wymiary modelu silnika

Nazwa	Opis	Wartość [mm]
$2D_{kn}$	Szerokość kolumny nieliniowej	9
$2D_{kl}$	Szerokość kolumny liniowej	14
$2G$	Szerokość szczeliny w kolumnach liniowych	1
$R_z$	Promień zewnętrzny pakietu stojana	92
$R_w$	Promień wewnętrzny pakietu stojana	12,25
$R_{wir}$	Promień wirnika	12
$R_{kw}$	Promień wewnętrzny kolumny	27
$R_{kwp}$	Promień wewnętrzny kolumny powiększony o wysokość jarzma przetwornika częstotliwości w celu zapewnienia odpowiedniej drogi strumienia	37
$R_{kz}$	Promień zewnętrzny kolumny	78
$H_k$	Wysokość kolumn $R_{kz} - R_{kwp}$	41
$h_j$	Wysokość jarzma w celu zapewnienia odpowiedniej drogi strumienia wytwarzanego przez uzwojenia silnika	14,75
$h_{jp}$	Wysokość jarzma w celu zapewnienia odpowiedniej drogi strumienia wytwarzanego przez przetwornik	10
$H_j + h_{jp}$	Łączna wysokość jarzma modelu $R_{kwp} - R_w$	24,75
$l_i$	Długość pakietu stojana (długość obliczeniowa wirnika)	55

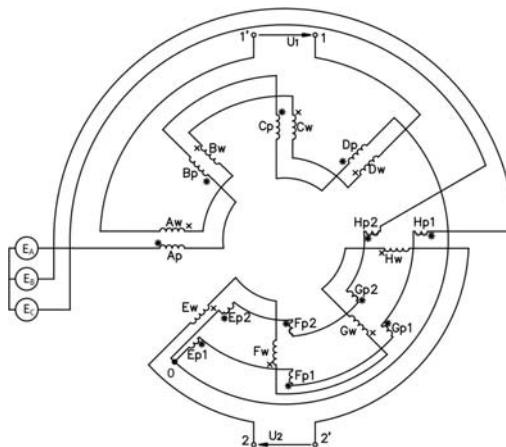
Układ połączeń uzwojeń przetwornika częstotliwości z wyjściem dwufazowym, zbudowanego na rdzeniach trójkolumnowych, przedstawiono na rysunku 3. Uwzględniając zasadę połączeń uzwojeń przetwornika, specyfikę układu Scotta oraz warunki symetrii magnetycznej i geometrycznej, opracowano schemat obwodu elektrycznego przetwornika dla modelu silnika hybrydowego (rys. 4).



Rys.3. Układ przetwornika do potrojonej częstotliwości zasilany trójfazowo z wyjściem dwufazowym

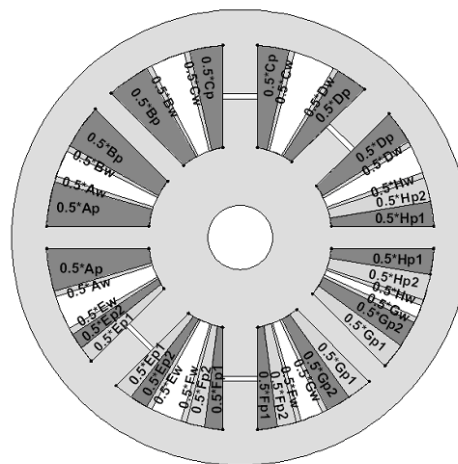
Obwód elektryczny przetwornika jest zasilany trójfazowo, uzwojenia pierwotne są połączone w układzie Scotta. Poszczególne cewki strony wtórnej przetwornika częstotliwości są połączone szeregowo przeciwnie, aby uzyskać efekt odejmowania się pierwszych harmonicznych indukowanych napięć. W następstwie można uzyskać

napięcia wyjściowe o potrojonej częstotliwości przesunięte w fazie o  $90^\circ$ . Zasilają one uzwojenia klatkowego silnika indukcyjnego. Przez odpowiedni dobór liczby zwojów poszczególnych cewek otrzymuje się napięcia o praktycznie jednakowej amplitudzie. Rozmieszczenie poszczególnych uzwojeń przetwornika ilustruje rysunek 5.



Rys.4. Schemat obwodu elektrycznego przetwornika częstotliwości silnika hybrydowego

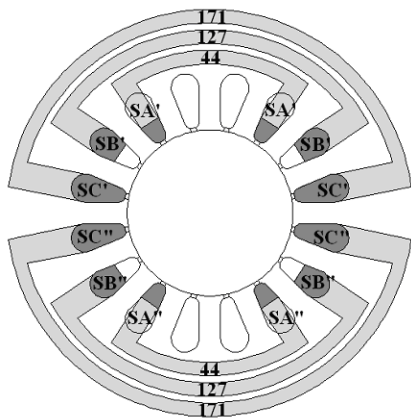
Uzwojenia obu faz silnika są symetryczne oraz identyczne pod względem elektrycznym. Rozmieszczenie zwojów w żłobkach oraz liczbę zwojów poszczególnych zewojów dobrano tak, aby uzyskać krzywą rozkładu pola zbliżoną do sinusoidy. Schemat poglądowy przedstawiający połączenia cewek i liczbę ich zwojów dla jednego z uzwojeń ilustruje rysunek 6. Schemat elektryczny uzwojeń silnika jest przedstawiony na rysunku 7. W tabeli 2 zestawiono wartości liczby zwojów i rezystancji dla cewek tworzących uzwojenia obu faz silnika (parametry obu uzwojeń są jednakowe).



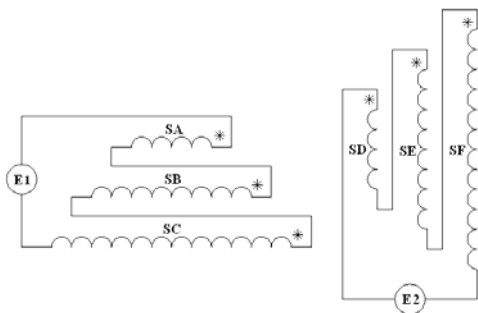
Rys.5. Schemat rozmieszczenia uzwojeń w przetworniku częstotliwości silnika hybrydowego

Tabela 2. Zestawienie parametrów poszczególnych cewek uzwojenia stojana (dla jednej fazy)

Cewka	Liczba zwojów	Rezystancja [ $\Omega$ ]
SA	$44 * 2 = 88$	3,31
SB	$127 * 2 = 254$	11,55
SC	$171 * 2 = 342$	18,49
Łącznie	684	33,35



Rys.6. Rozmieszczenia zezwojów uzwojenia fazy pierwszej



Rys.7. Połączenie cewek uzwojeń silnika oraz ich oznaczenia

Tabela 2. Zestawienie parametrów poszczególnych cewek uzwojenia stojana (dla jednej fazy)

Cewka	Liczba zwojów	Rezystancja [Ω]
SA	44 * 2 = 88	3,31
SB	127 * 2 = 254	11,55
SC	171 * 2 = 342	18,49
Łącznie	684	33,35

Prawidłowe działanie silnika zależy od doboru wielu parametrów. Istotnym, między innymi, jest dobór liczby zwojów uzwojeń kolumn liniowych i nieliniowych przetwornika częstotliwości tak, aby zapewnić kompensowanie się podstawowych harmonicznych i sumowanie trzecich. Zestawienie parametrów przetwornika częstotliwości w modelu silniku podano w tabeli 3

Tabela 3. Zestawienie parametrów modelu przetwornika częstotliwości

	Strona pierwotna			
	$z_N$	$z_L$	$z_N'$	$z_L'$
Liczba zwojów	684	787	592	682
Rezystancja [Ω]	3,420	4,46	2,894	3,732
	Strona wtórna			
	$z_N$	$z_L$	$z_N'$	$z_L'$
Liczba zwojów	805	927	805	927
Rezystancja [Ω]	34,362	44,503	33,082	42,822

Parametry klatki wirnika wyznaczono ze wzorów analitycznych i przedstawiono w tabeli 4. Przyjęto, że

obwód magnetyczny silnika jest wykonany z blach prądnicowych PE-23 o grubości 0,5 mm.

Tabela 4. Zestawienie parametrów wirnika

Klatka wirnika	Pierścienie wirnika	Wirnik
Konduktywność $\gamma_{Al} = 32 \times 10^6$ S/m	Indukcyjności rozproszenia sektora pierścienia $L_r = 2,26 \times 10^{-9}$ H	Długość $l = 55 \times 10^{-3}$ m Średnica $24 \times 10^{-3}$ m
Liczba prętów 28	Rezystancja sektora pierścienia $R_r = 9,08 \times 10^{-6}$ Ω	Moment bezwładności $J = 9,18 \times 10^{-6}$ kg·m <sup>2</sup>

### Symulacja procesów przejściowych w modelu silnika

Obliczenia pola elektromagnetycznego w przekroju silnika oraz napięć i prądów w jego obwodach zostały przeprowadzone przy zastosowaniu aplikacji Flux 2D. Równanie opisujące pole elektromagnetyczne w określonych podobszarach silnika można wyrazić w postaci

$$(1) \quad \nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla A \right) = J_o - \gamma \frac{dA}{dt}$$

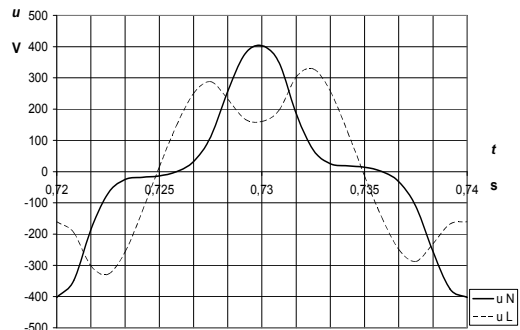
gdzie:  $A = A_z \mathbf{1}_z$  – magnetyczny potencjał wektorowy,  $J_o = J_o \mathbf{1}_z$  – gęstość prądu źródłowego,  $\gamma$  – przewodność elektryczna,  $\mu$  – przenikalność magnetyczna.

Dla przyjętego dwuwymiarowego pola, wektor potencjału magnetycznego i gęstości prądu mają składowe w kierunku osi z, zgodnie z osią wału silnika. Pochodna substancjalna potencjału wektorowego uwzględnia jego zmianę w czasie i przestrzeni, zatem w równaniu (1) nie występuje składnik zawierający wektor prędkości. W modelowanych podobszarach, poza uzwojeniami i prętami wirnika, prawa strona równania (1) jest równa zero. Rozkład potencjału wektorowego wyznacza się na podstawie całkowitej gęstości prądu, którą w przewodniku można zapisać następująco:

$$(2) \quad \mathbf{J} = -\gamma \frac{dA}{dt} + \gamma \frac{u}{l_p} \mathbf{I}_a$$

gdzie:  $u$  - napięcie między końcami przewodu,  $l_p$  - długość przewodu.

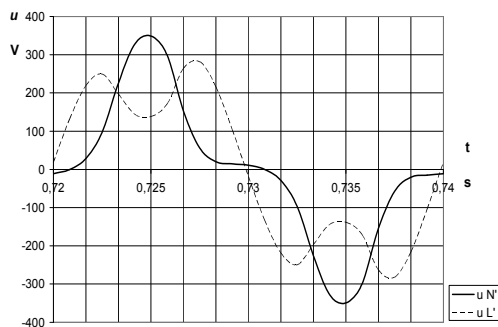
Ponieważ pole magnetyczne zanika na zewnątrz stojana silnika, przyjęto zerowy warunek brzegowy Dirichleta  $A_z = 0$  na okręgu usytuowanym w pewnej odległości od jego powierzchni. Analogiczny warunek występuje na osi z układu współrzędnych, która jest osią obrotu wirnika.



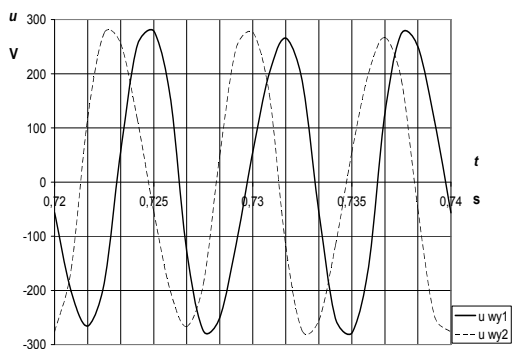
Rys.8. Przebiegi napięć na kolumnie nieliniowej  $u_{N1}$  i liniowej  $u_{L1}$  strony pierwotnej, magnesowanych prądem  $i_a$

Równania obwodu stojana i wirnika uwzględniające napięcie trójfazowej sieci zasilającej, są sprzężone z równaniami pola elektromagnetycznego. Silnik zasilano

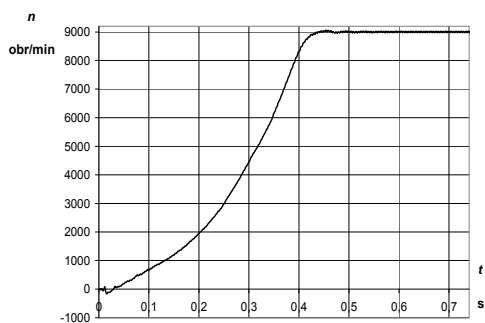
ze źródła napięcia trójfazowego o przebiegu sinusoidalnym i wartości skutecznej napięcia fazowego 220 V. Obliczenia przeprowadzono dla silnika nieobciążonego. Wyniki obliczeń napięć na kolumnach przetwornika częstotliwości, napięć wyjściowych przetwornika, charakterystykę prędkości obrotowej w funkcji czasu oraz charakterystykę mechaniczną silnika ilustrują rysunki 8, 9, 10 i 11.



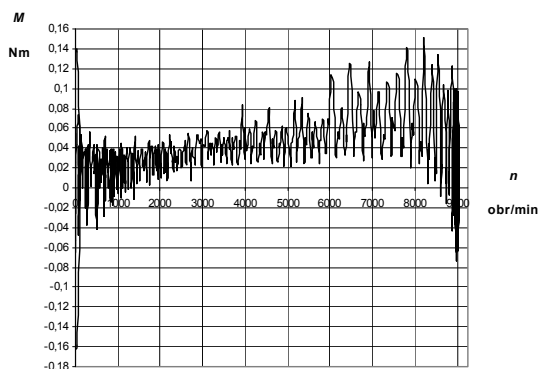
Rys.9. Przebiegi napięć na kolumnie nieliniowej  $u_{N1}'$  i liniowej  $u_{L1}'$  strony pierwotnej, magnesowanych prądami  $i_B$  oraz  $i_C$



Rys.10. Przebiegi napięć wyjściowych przetwornika  $u_{wy1}$  oraz  $u_{wy2}$



Rys.11. Charakterystyka prędkości obrotowej w funkcji czasu



Rys.13. Charakterystyka mechaniczna silnika

## Podsumowanie

Odpowiedni dobór proporcji zwojów uzwojeń przetwornika częstotliwości i uzwojeń silnika, przy założonym napięciu wejściowym, zapewnia poprawne funkcjonowanie silnika hybrydowego. Silnik osiąga, przy braku obciążenia, prędkość obrotową ustaloną bliską 9000 obr/min po czasie 0,45 sekundy.

Napięcia na kolumnach liniowych i nieliniowych są odkształcone nieparzystymi harmonicznymi, z których trzecia jest wykorzystana do uzyskania napięć wyjściowych przetwornika częstotliwości. Napięcia te stanowią różnice przebiegów na uzwojeniach wtórnych kolumny liniowej i nieliniowej; pierwsze harmoniczne odejmują się, natomiast trzecie sumują. W przebiegach tych napięć udział harmonicznej o częstotliwości sieci jest znikomy (3,1% oraz 4,5%) w stosunku do trzeciej harmonicznej. Napięcia te są przesunięte w fazie o  $90^\circ$ .

Prądy zasilające model silnika hybrydowego są odkształcone wyższymi harmonicznymi, z których dominującą jest trzecia harmoniczna. Jej wartość w prądzie fazy A wynosi 26,2 %, w pozostałych fazach jest mniejsza o około 3 %. Wartości skuteczne prądów cechują pewną asymetrią, co jest charakterystyczne w układzie Scotta, w fazach B i C przyjmują wartości nieco większe niż w fazie A, odpowiednio 103 % i 101,1 %.

**Autor:** dr hab. inż. Ryszard Goleman, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: r.goleman@pollub.pl

## LITERATURA

- [1] Buticchi G. at all, Challenges of the optimization of a high-speed induction machine for naval applications, *Energies*, (2019), 12, 2431
- [2] Gieras J. F., *Advancements in electric machines*, Springer, 2008
- [3] Ravi Prakash, Mohammad Junaid Akhtar, Behera R. K., Parida S. K., Design of a Three Phase Squirrel Cage Induction Motor for Electric Propulsion System, *Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems*, March 13-15, 2014. Kanpur, India
- [4] Soong W.L., Kliman G.B., Johnson R.N., White R.A., Miller J.E., Novel high-speed induction motor for a commercial centrifugal compressor, *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 36, No. 3, 2000, pp. 706 -713
- [5] Yamada S., Takeuchi A., Sudani T., Bessho K., High-speed ac motor including the function of a magnetic frequency tripler, *IEEE Trans. Magn.*, 22 (1986), No. 5, pp. 967-969
- [6] Goleman R., Basic properties of a single-phase hybrid motor prototype, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 159, No.3, 1996, pp.75-76
- [7] Yamada S., Takeuchi A., Sudani T., Bessho K., High-speed motor including the function of a magnetic frequency tripler, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. Mag-22, no. 5, 1986, pp. 967-969
- [8] Goleman R., Three phase induction motor integrated with a magnetic frequency changer, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254-255, 2003, pp. 229-301
- [9] Goleman R., Magnetic field and characteristics of a three phase hybrid induction motor, *Non-linear Electromagnetic Systems*, IOS Press, 2000, pp.629-632
- [10] Goleman R., Performance and characteristics of a hybrid induction motor with magnetic frequency changer, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 97 (2020), nr 12, 170-173
- [11] Sakamoto Y., Ohkubo T., Ohta M., Natsusaka M., Three-phase parametric induction motor excited by a single-phase power supply, *IEEE Trans. Magn.*, 37 (2001), No. 4, pp.2837-2839