

Elektromechaniczny przetwornik energii budowy modułowej

Streszczenie. Praca prezentuje wybrane wyniki prac projektowych i symulacji elektromechanicznego przetwornika energii budowy modułowej nowego typu. Na podstawie wyników badań polowych 2D wykazano, że prezentowana koncepcja przetwornika, sposób uzwojenia stojana oraz zaproponowana budowa wirnika, umożliwia konstrukcję nowego rodzaju maszyny. Na podstawie obliczeń polowych zbadano wpływ geometrii wirnika i położenia magnesów trwałych w jarzmie wirnika na kształt napięcia indukowanego oraz moment elektromagnetyczny. Przedstawiono prototyp przetwornika i pierwsze wyniki badań eksperymentalnych. Prezentowany elektromechaniczny przetwornik energii może znaleźć zastosowanie jako silnik, generator, lub sensor położenia wału.

Abstract. The paper presents selected results of work design and simulation of a new type of electromechanical energy converter of a new type. Based on the results of 2D field tests, it was shown that the presented concept of the converter, the method of winding the stator and the proposed construction of the rotor, makes it possible to construction of a new type of machine. On the basis of field calculations, the following were examined the influence of the rotor geometry and the position of the permanent magnets in the rotor yoke on the the shape of the induced voltage and the electromagnetic torque. A prototype of the converter and first experimental results. Presented electromechanical energy converter can be used as a motor, generator, or a shaft position sensor. (**Modular electromechanical energy converter**).

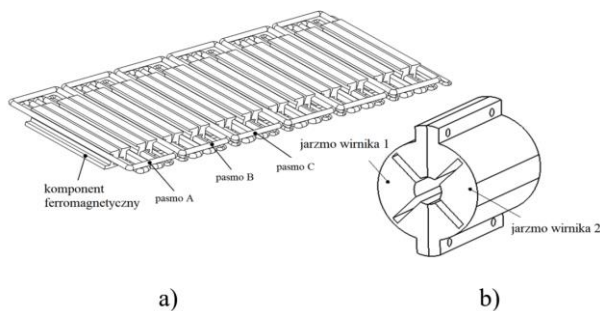
Słowa kluczowe: elektromechaniczny przetwornik energii, modułowa budowa, wirnik z magnesami trwałymi.
Keywords: electromechanical energy converter, modular design, permanent magnet rotor.

Wstęp

Znane elektromechaniczne przetworniki energii są urządzeniami napędowymi o zwartej budowie, które w układzie napędowym łączone są z wałem maszyny roboczej w sposób bezpośredni przy użyciu sprzęgieł, lub w sposób pośredni przy użyciu przekładni mechanicznych. Nie należą do urządzeń o konstrukcji modułowej, czyli budowanej z modułów, które składane ze sobą tworzą całość urządzenia.

W artykule przedstawiono wstępne wyniki prac koncepcyjnych budowy elektromechanicznego przetwornika energii o konstrukcji i sposobie montażu, który może być instalowany w układzie napędowym z wałem roboczym bez konieczności przebudowy układu napędowego.

Koncepcja przetwornika została pokazana na rysunku 1.



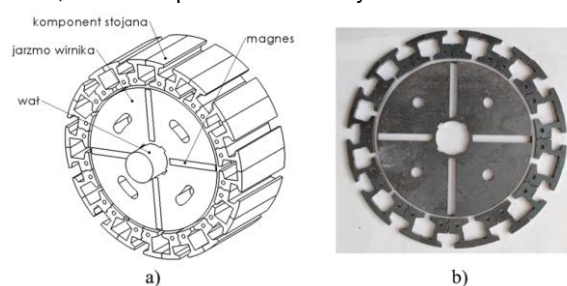
Rys.1. Koncepcja budowy przetwornika energii o konstrukcji modułowej: stojan –a); wirnik–b)

Cechą charakterystyczną przedstawionego rozwiązania jest modułowa konstrukcja stojana, którego widok w rozwinięciu liniowym pokazany jest na rysunku 1a, oraz składany z części wirnika, którego dwa jarzma pokazano na rysunku 1b. Dzięki takiej konstrukcji przetwornika możliwa jest budowa urządzenia bazującego na dwudziestu czterech jednakowych komponentach rdzenia oraz dwóch jednakowych komponentach jarzma wirnika, które w stosunkowo łatwy sposób mogą być dopasowane i wykonane do dowolnej wielkości elektromechanicznego przetwornika energii, oraz do wału maszyny roboczej o dowolnej średnicy. Zasilenie uzwojeń trójfazowych (pasma A,B,C) prądem AC ze źródła o regulowanej

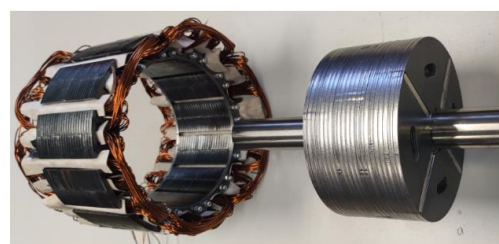
wartości i częstotliwości, zapewni regulację momentu i prędkości obrotowej maszyny. Takie rozwiązanie konstrukcyjne może zapewnić unikatową budowę przetwornika o dowolnych wymiarach i elastycznej konstrukcji stojana, który docelowo otoczy wał maszyny roboczej, a wirnik przetwornika zostanie połączony z wałem roboczym.

Pierwszy projekt i analiza polowa przetwornika o budowie modułowej

Na rys. 2a przedstawiono widok projektu przetwornika zbudowanego z dwudziestu czterech jednakowych ferromagnetycznych komponentów stojana widocznych na rysunku 2b. Wirnik (rys. 3) zbudowano z jarzma ferromagnetycznego z otworami pod cztery magnesy trwałe typu NdFeB o wymiarach 42x5x20mm. Średnica wirnika wynosi 116.0 mm, zewnętrzna średnica stojana wynosi 162mm, szczelina powietrzna ma wymiar 2mm.

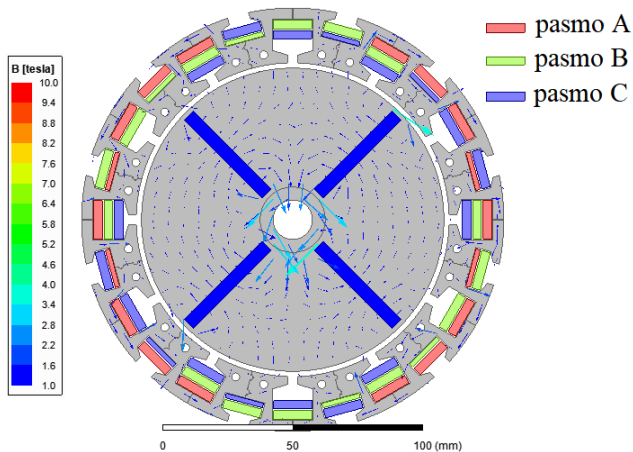


Rys.2. Koncepcja budowy przetwornika energii o konstrukcji modułowej: stojan –a); wirnik–b)



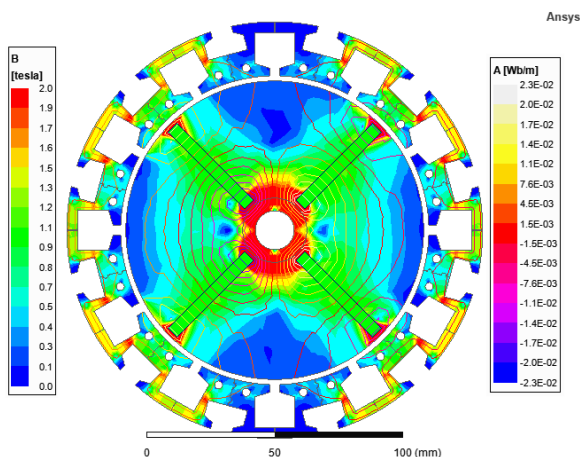
Rys.3. Widok stojana i wirnika z magnesami przed złożeniem prototypu

Użycie komponentów ferromagnetycznych do budowy magnetowodu przetwornika, które zostały ułożone w sposób przedstawiony na rys. 2b, umożliwia budowę stojana, który ma 24 żłobki półtowe. W taki sposób powstaje dwustronnie użłobkowany pierścieniowy modułowy rdzeń, a w żłobkach rozłożone jest trójpasmowe uzwojenie, w sposób przedstawiony na rysunku 4, gdzie pasmo A, B oraz C zawiera dziesięć szeregowych cewek.



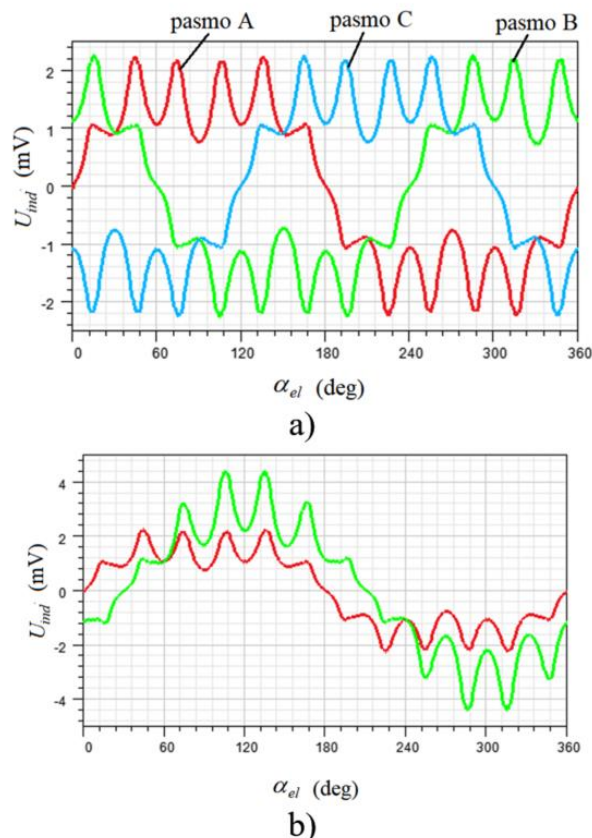
Rys.4. Model polowy przetwornika z widokiem sposobu rozłożenia cewek pasma A, B oraz C

Na rysunku 5 przedstawiono rozkład pola magnetycznego w modelu 2D przetwornika w stanie bez obciążenia prądowego. Rozkład otrzymano w wyniku symulacji MES, przy użyciu oprogramowania Ansys.



Rys.5. Rozkład pola magnetycznego w modelu przetwornika

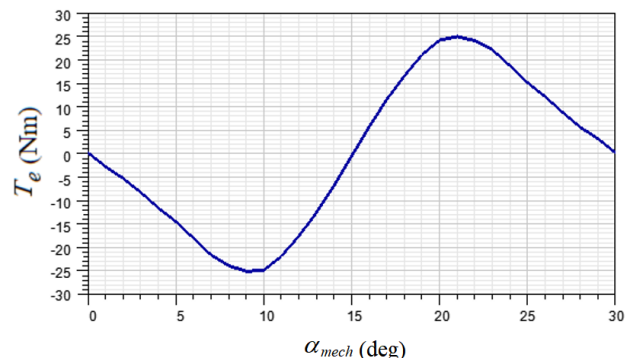
W celu potwierdzenia poprawności przyjętego sposobu uzwojenia maszyny wykonano symulacje przebiegów napięć indukowanych w pasmach A,B,C, które zostały wyznaczone w stanie bez obciążenia prądowego i prędkości kątowej wirnika $1/12 \text{ (s}^{-1}\text{)}$. Na rysunku 6a przedstawiono wyniki symulacji kształtu napięć indukowanych w pasmach A, B oraz C w stanie bez obciążenia prądowego. Z uzyskanych przebiegów wynika, że napięcia indukowane we wszystkich pasmach mają jednakową wartość, oraz że napięcie w paśmie B jest przesunięte w fazie w stosunku do pasma A o kąt $2/3\pi$, natomiast napięcie w paśmie C jest przesunięte w fazie w stosunku do pasma A o kąt $4/3\pi$, co świadczy o prawidłowym rozmieszczeniu cewek na obwodzie stojana.



Rys.6. Przebiegi: napięć indukowanych w pasmach A, B, C -a); napięcia fazowe (kolor czerwony) oraz napięcia przewodowe (kolor zielony) -b)

Wyniki pokazały również, że udział wyższych harmonicznych w przebiegach napięć jest duży, zarówno dla napięć fazowych (rys. 6b – przebieg w kolorze czerwonym), jak i przewodowych, przy skojarzeniu uzwojeń w gwiazdę (rys. 6b – przebieg w kolorze zielonym), zatem konieczne były dalsze badania i bardziej szczegółowa analiza momentu elektromagnetycznego maszyny.

Na rysunku 7 przedstawiono zmienność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika względem stojana α_{mech} , wyznaczonego w stanie bez obciążenia bezprądowego.



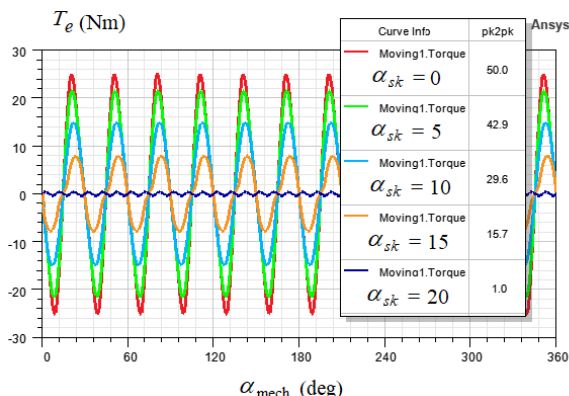
Rys.7. Zmienność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika względem stojana α_{mech}

Z przebiegu wynika, że amplituda momentu elektromagnetycznego, która w stanie bez obciążenia prądowego jest równa amplitudzie momentu zaczepowego, i ma stosunkowo bardzo dużą wartości $T_{zacz}=50.0 \text{ N}\cdot\text{m}$.

W celu minimalizacji amplitudy momentu zaczepowego zastosowano metodę skosowania wirnika [1-2]. W tym

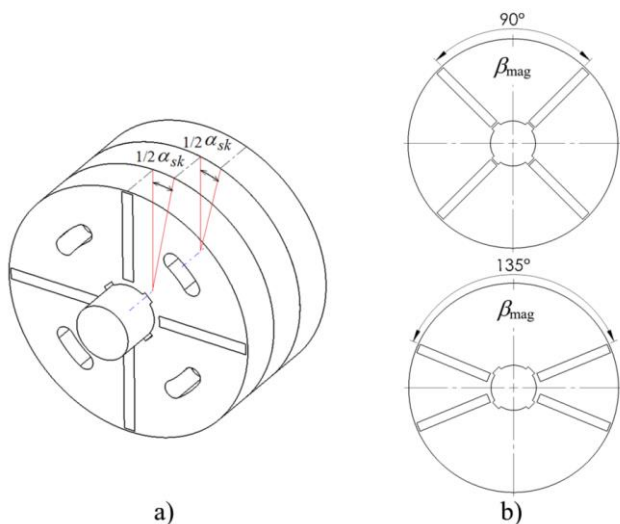
przypadku zaproponowano podział wirnika na trzy równe części, stosując tzw. pseudoskos. Następnie poddano analizie wpływ wartości kąta skosowania wirnika α_{sk} na zmienną amplitudy momentu zaczepowego T_{zacz} . Podczas badań uwzględniano zmianę α_{sk} w zakresie 0-20 stopni mechanicznych (ry.9a).

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie przebiegów zmienności momentu zaczepowego w funkcji kąta położenia wirnika dla kąta skosowania $\alpha_{sk} = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$.



Rys.8. Zmienność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika względem stojana α_{mech} dla kąta skosowania wirnika $\alpha_{sk}=0,5,10,15,20$ deg

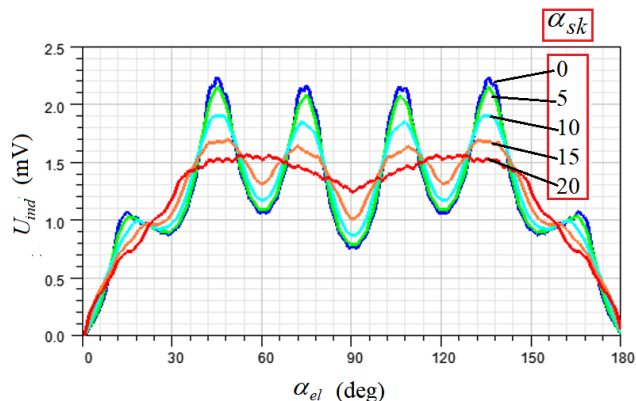
Wyniki badań wykazują, że poprzez obrót zewnętrznych części wirnika względem części środkowej o kąt $1/2\alpha_{sk} \pm 10^\circ mech$, tak, że pomiędzy częściami skrajnymi przesunięcie kątowe wyniesie $\alpha_{sk}=20^\circ mech$, wartość amplitudy momentu zaczepowego zmaleje pięćdziesięciokrotnie do wartości 1.0 N·m.



Rys.9. Kąt skosowania wirnika –a); zasada kształtowania geometrii otworów i położenia magnesów kątem β_{mag} –b)

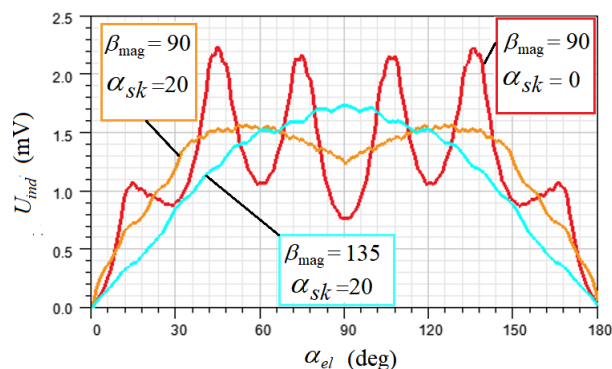
Wpływ wartości kąta skosowania wirnika α_{sk} na zmienną kształtu napięcia indukowanego również poddano analizie. Dodatkowo porównano wpływ zmiany kąta między magnesami β_{mag} (rys. 9b) na rozkład pola magnetycznego, napięcie indukowane i moment elektromagnetyczny.

Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi fazowego napięcia indukowanego w uzwojeniach pasma A w funkcji kąta położenia wirnika dla kąta $\alpha_{sk}=0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$.



Rys.10 Kształt pasmowych napięć indukowanych przy kącie skosowania wirnika $\alpha_{sk}=0,5,10,15,20$ deg.

Na przedstawionych przebiegach można zauważyć, dla kąta $\alpha_{sk}=20^\circ mech$ wyraźnie następuje wygładzenie kształtu napięcia. Podczas badań analizowano również zmianę kąta między magnesami β_{mag} . Zauważono, że przy zmianie kąta $\beta_{mag}=90^\circ$ na kąt $\beta_{mag}=135^\circ$ następuje jeszcze lepsze efekt, gdzie kształt napięcia, po rozwinięciu do pełnego okresu, staje się sinusoidalny. Na rysunku 11 pokazano porównanie kształtów napięcia indukowanego uzyskanych dla trzech różnych geometrii wirnika.



Rys.11 Kształt pasmowych napięć indukowanych dla trzech różnych geometrii wirnika

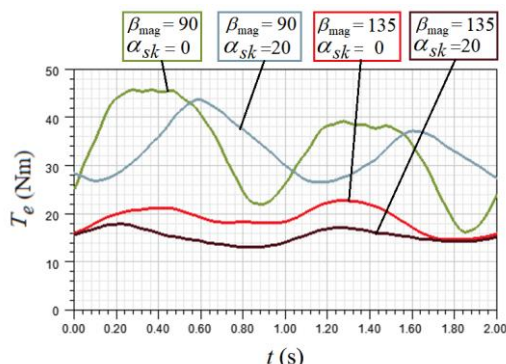
Analizę momentu elektromagnetycznego przeprowadzono również przy obciążeniu uzwojeń pasmowych prądem AC o przebiegu sinusoidalnym, uwzględniając trójfazowy układ zasilania. Symulacje przeprowadzono przy założeniu, że gęstość prądu w uzwojeniach wynosi $5A/mm^2$ i źródło zasilania jest idealne.

Na rysunku 12 przedstawiono wyniki symulacji czasowego przebiegu momentu elektromagnetycznego wyznaczonego dla czasu analizy 2s odpowiadającemu obrotowi wirnika o kąt $60^\circ mech$, co w tym przypadku wystarczyło do wyznaczenia charakterystycznych wartości momentu elektromagnetycznego. Badano wartość średnią momentu elektromagnetycznego T_{sr} , wartość minimalną T_{min} , wartość maksymalną T_{max} , oraz pulsację momentu ϵ .

Na podstawie otrzymanych wyników badań symulacyjnych w tabeli 1 zamieszczono wartości: napięcia indukowanego, momentu zaczepowego, momentu obrotowego i pulsację momentu, z geometrią wirnika dla kąta $\beta_{mag}=90^\circ$. W tabeli 2 zamieszczono wartości z geometrią wirnika dla kąt $\beta_{mag}=90^\circ$.

Na podstawie analizy wartości podanych w tabelach widać wyraźnie, że kąt α_{sk} nie wpływa w istotny sposób na zmianę wartości napięcia indukowanego, natomiast w

bardzo dużym stopniu wpływa na wartość momentu elektromagnetycznego i pulsację momentu.



Rys.12 Przebieg T_e przy obciążeniu prądowym uzwojeń pasmowych dla czterech wybranych geometrii wirnika

Tabela 1. Wyniki badań – geometria wirnika dla $\beta_{mag}=90^\circ$

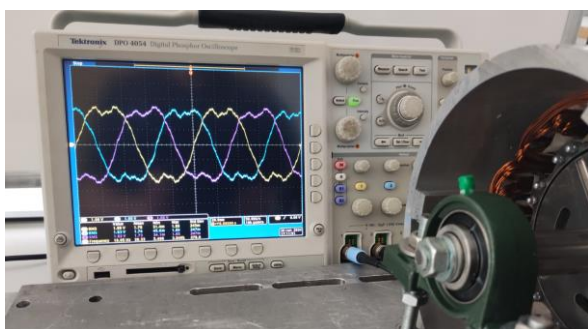
α_{sk} [deg]	U_{ind} [mVrms]	T_{zacz} [N·m]	T_{max} [N·m]	T_{min} [N·m]	T_{sr} [N·m]	ε
0	1.34	49.96	45.68	16.18	33.42	26.43
5	1.33	42.92	45.94	18.54	33.41	24.11
10	1.30	15.14	46.04	23.30	33.35	19.14
15	1.28	15.66	44.36	26.92	33.23	15.17
20	1.27	0.99	43.63	26.54	33.02	15.25

Tabela 2. Wyniki badań – geometria wirnika dla $\beta_{mag}=135^\circ$

α_{sk} [deg]	U_{ind} [mVrms]	T_{zacz} [N·m]	T_{max} [N·m]	T_{min} [N·m]	T_{sr} [N·m]	ε
0	1.22	10.19	23.54	12.35	18.33	19.09
10	1.21	1.09	23.26	12.60	18.47	15.86
20	1.2	0.21	22.79	14.70	18.90	12.67

Pierwsze próby doświadczalne

Na rysunku 13 przedstawiono stanowisko eksperymentalne, na którym wykonano pierwsze badania doświadczalne pierwszego prototypu przetwornika. Geometria wirnika w prototypie powstała z przy wartości kąta $\beta_{mag}=90^\circ$, a kąt skosowania wirnika wynosił $\alpha_{sk}=20^\circ$.



Rys.13 Stanowisko eksperymentalne, na którym uzyskano pierwsze wyniki badań doświadczalnych elektromechanicznego przetwornika energii budowy modułowej

Przeprowadzono próbę biegu jałowego, podczas której, przy użyciu oscyloskopu cyfrowego, obserwowano kształty napięć indukcyjnych w uzwojeniu pasma A,B,C. Widoczne na oscyloskopie kształty napięć, uzyskane przy prędkości

wirnika 600 obr./min, porównano z kształtami i wartościami napięć otrzymanymi w wyniku symulacji. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że uzyskane wyniki są zgodne, i że prototyp działa poprawnie.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcję budowy nowego rodzaju elektromechanicznego przetwornika energii. Na podstawie wyników badań polowych i doświadczalnych wykazano, że prezentowana koncepcja przetwornika, sposób uzwojenia stojana oraz zaproponowana budowa wirnika, umożliwi konstrukcję nowego rodzaju maszyny o budowie modułowej, która rozwija moment obrotowy przy zasilaniu uzwojeń w układzie trójfazowym. Dodatkowo wykazano, że geometria i skosowanie wirnika oraz położenie magnesów trwałych w wirniku ma istotny wpływ na kształt napięcia indukowanego oraz moment elektromagnetyczny.

Prezentowana konstrukcja może zapewnić budowę elektromechanicznego przetwornika z wirnikiem w wielu jego odmianach konstrukcyjnych. Wirnik może zawierać źródło wzbudzenia, gdzie można użyć magnesów trwałych, lub/i uzwojenie wzbudzenia, lub może być bez źródła wzbudzenia, np. tak jak w maszynie reluktancyjnej.

Kolejne badania prowadzone będą w kierunku optymalizacji geometrii przetwornika, np. w celu zwiększenia gęstości mocy, oraz opracowania sposobu chłodzenia przetwornika, dla różnych wirników i ich geometrii.

Prezentowany elektromechaniczny przetwornik energii może znaleźć zastosowanie jako silnik, generator, lub sensor kąta położenia wału.

Należy dodać, że prezentowana koncepcja budowy obwodu elektromagnetycznego (na podstawie której opracowano przetwornik) składającego się z 24 jednakowych komponentów ferromagnetycznych oraz przedstawiony sposób uzwojenia urządzenia jest już przedmiotem zgłoszenia do Urzędu Patentowego RP o udzielenie patentu na wynalazek (zgłoszenie P.448503) [3] w zastosowaniu do komory procesowej [4].

Autorzy: dr hab. inż. Piotr Paplicki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Maszyn i Napędów Elektrycznych, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: piotr.paplicki@zut.edu.pl; mgr inż. Maciej Cieśla, E-mail: ciesla.maciej.94@gmail.com², mgr inż. Piotr Strobejko, E-mail: piotr.strobejko@zut.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Łukaniszyn M., Optymalizacja kształtu magnesów trwałych w bezszczotkowym silniku prądu stałego, *Pomiary Automatyka Kontrola* 52 (10), 49-51, 2006
- [2] Korkosz M., Młot A., Analiza pulsacji momentu elektromagnetycznego w bezszczotkowym silniku prądu stałego z zastosowaniem skośnych magnesów, *Maszyny Elektryczne: zestyty problemowe*, 47-51, 2010
- [3] Zgłoszenie patentowe P.448503 pt. Elektromagnetyczny układ wzbudzania pola magnetycznego do komór procesowych
- [4] Strobejko P., Paplicki P., Cieśla M., Wyniki badań symulacyjnych elektromagnetycznego koncentratora pola dla komór procesowych, *Materiały konferencyjne LVI Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2024*, Gdańsk 25-27 czerwca 2024