

## Napęd pojazdu elektrycznego z wielofazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi

**Streszczenie.** W pojazdach z napędem elektrycznym popularnym rozwiązaniem jest stosowanie silników synchronicznych z magnesami trwałymi. Dzięki wysokiej gęstości mocy i wydajności, zwłaszcza silniki wielofazowe, doskonale sprawdzają się w aplikacjach, które wymagają dużej niezawodności pracy. W pracy zaprezentowano badania symulacyjne układu napędowego z 3-fazowym i 5-fazowym silnikiem PMSM. Opracowano komputerowe modele napędów oraz przeprowadzono badania dla zadanych warunków pracy i założeniu uszkodzenia obwodu zasilania silników. Obserwowano charakterystyki czasowe wybranych wielkości elektromechanicznych oraz porównano uzyskane wyniki.

**Abstract.** Presently permanent magnet synchronous motors (PMSM) are the main types of motors used for electric vehicles. Owing to its high power density and high efficiency, a multiphase fault-tolerant permanent-magnet synchronous machine is often considered an excellent solution for reliable applications. This paper described computer models of 3-phase and 5-phase permanent magnet motor drives. The simulation results are presented. (Multiphase permanent magnet synchronous motor drive for electric vehicle).

**Słowa kluczowe:** silnik synchroniczny z magnesami trwałymi, silnik wielofazowy, pojazd elektryczny

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor, multiphase motor, electric vehicle

### Wstęp

W ostatnich latach szeroko popularyzowane są koncepcje obniżania negatywnego oddziaływania przemysłu i pojazdów na środowisko w postaci emisji szkodliwych substancji oraz hałasu. Podejmowanych jest w tym kierunku wiele inicjatyw i działań, włącznie z uchwalaniem oficjalnych wytycznych, np. Dyrektyw Parlamentu Europejskiego i Rady, a także nawiązujących do nich krajowych programów [1,2,3]. Jedną z głównych idei zawartych w tych dokumentach jest promowanie energooszczędnego oraz ekologicznego transportu. Dzięki ciągłemu doskonaleniu technologii gromadzenia energii elektrycznej, znacznemu rozwojowi elementów energoelektronicznych, postępowi w konstrukcji silników elektrycznych, jak również poszukiwaniu skuteczniejszych metod regulacji, stawiane wymagania doskonale mogą spełniać pojazdy z napędem elektrycznym [4,5,6]. Napęd elektryczny jest cichy oraz całkowicie czysty ekologicznie w miejscu eksploatacji, ponieważ nie wydzielają żadnych szkodliwych substancji. Ze względu na swoje właściwości mechaniczne i elektryczne, jako silniki w pojazdach elektrycznych, chętnie stosowane są bezszczotkowe silniki z magnesami trwałymi (PMSM, BLDC). W zastosowaniach przemysłowych obecnie najbardziej popularne są silniki trójfazowe. Jednakże z coraz większym zainteresowaniem spotykają się silniki wielofazowe, np. 5, 6 czy 9, 11 fazowe. Napędy z tymi silnikami są wprawdzie droższe, ze względu na większą liczbę faz, a więc wynikającą z tego konieczność użycia większej liczby elementów elektrycznych i układów energoelektronicznych. Wymagają one również bardziej złożonego sterowania, ale charakteryzuje je większa niezawodność i odporność na zakłócenia. Jest to szczególnie ważne w tych zastosowaniach, w których poprawna praca napędu w każdych warunkach ma zasadnicze znaczenie, np. w pojazdach z napędem elektrycznym (samochodach, motocyklach, motolotniach, łodziach) [4,7,8,9,10].

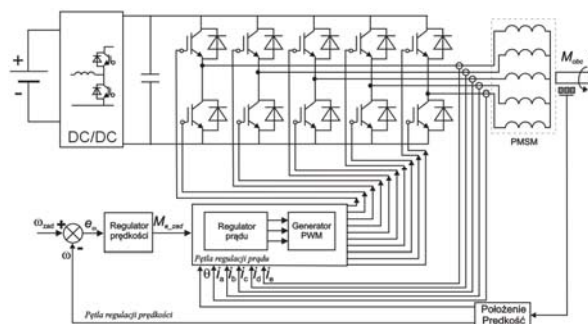
W pracy, na przykładzie pojazdu elektrycznego, zaprezentowano badania symulacyjne układu napędowego z wielofazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi. W tym celu opracowano komputerowy model napędu z pięciofazowym silnikiem PMSM. Przeprowadzono badania dla zadanych warunków pracy i obserwowano charakterystyki czasowe wielkości elektromechanicznych silnika. Uzyskane wyniki porównano z rezultatami uzyskanymi dla układu napędowego, w którym zastosowano trójfazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi.

### Budowa elektrycznego układu napędowego EV

Na rysunku 1 przedstawiono uproszczony schemat układu z trójfazowym silnikiem PMSM. Może on stanowić samodzielny napęd pojazdu elektrycznego lub też być częścią napędu hybrydowego. Poza silnikiem, w jego skład wchodzi falownik napięcia wraz z układem sterowania, zasilany, poprzez przetwornicę DC/DC, ze źródła napięcia stałego. Przetwornica ma za zadanie utrzymanie odpowiedniego napięcia magistrali zasilającej, może ona również wspomagać odzysk energii [4]. W najprostszym przypadku zasobnikiem energii jest bateria akumulatorów, ale w bardziej zaawansowanych rozwiązaniach dodatkowo stosuje się również superkondensatory (poprawa dynamiki napędu) lub też zasilanie z ogniwa wodorowego. Podobną strukturę ma napęd z silnikiem wielofazowym, jednakże ze względu na większą liczbę faz, w tym przypadku, rozbudowaniu ulega komutator elektroniczny oraz układ sterowania. Schemat napędu z pięciofazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi zaprezentowano na rysunku 2.



Rys.1. Schemat blokowy napędu elektrycznego z trójfazowym silnikiem PMSM



Rys.2. Schemat elektrycznego układu napędowego z pięciofazowym silnikiem PMSM

### Model komputerowy

Modele matematyczne silników PMSM oparto na opisie w układzie współrzędnych naturalnych (1), (2), który do celów sterowania układem najwygodniej jest przekształcić za pomocą transformacji Parka do składowych w układzie ortogonalnym  $dq$ . Dla silnika trójfazowego przyjmuje on wówczas postać (3)-(6). W przypadku silnika pięciofazowego jego model składa się z zależności przedstawianych w dwóch układach ortogonalnych  $d_1q_1$  i  $d_2q_2$  [5,9,11].

$$(1) \quad \mathbf{u}_{sk} = \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{i}_{sk} + \frac{d\boldsymbol{\psi}_{sk}}{dt}$$

$$(2) \quad \boldsymbol{\psi}_{sk} = \mathbf{L}_s \cdot \mathbf{i}_{sk} + \boldsymbol{\psi}_f$$

$$(3) \quad u_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \psi_q \cdot \omega$$

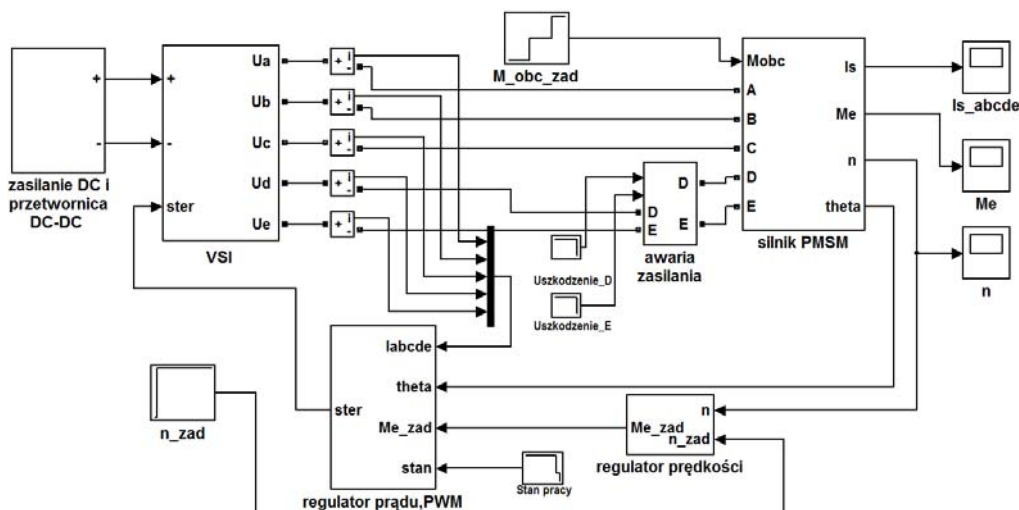
$$(4) \quad u_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \psi_d \cdot \omega$$

$$(5) \quad \psi_d = L_d \cdot i_d + \psi_f$$

$$(6) \quad \psi_q = L_q \cdot i_q$$

gdzie:  $\mathbf{u}_{sk}$ ,  $\mathbf{i}_{sk}$  – wektory napięć i prądów fazowych,  $\mathbf{R}_s$  – macierz rezystancji uzwojeń stojana,  $\boldsymbol{\psi}_{sk}$  – wektor strumieni skojarzonych stojana,  $\mathbf{L}_s$  – macierz indukcyjności uzwojeń stojana,  $\boldsymbol{\psi}_f$  – wektor strumieni wzbudzenia od magnesów trwałych skojarzony z uzwojeniem stojana,  $k$  – numer fazy,

$u_d$ ,  $u_q$  – składowe i poprzeczne,



Rys.3. Model symulacyjny układu napędowego z 5-fazowym silnikiem PMSM

### Wyniki badań symulacyjnych

Testy symulacyjne wykonano dla normalnej pracy silników PMSM oraz sytuacji awaryjnych układów napędowych polegających na:

- uszkodzeniu jednej fazy zasilania silnika trójfazowego,
- uszkodzeniu jednej lub dwóch faz zasilających silnik pięciofazowy.

Badania przeprowadzono dla stałego i zmieniającego się momentu obciążenia. Dla tych warunków pracy obserwowano podstawowe wielkości elektromechaniczne silników.

Na rysunkach 4, 5 i 6 przedstawiono przebiegi czasowe prędkości obrotowych, momentów elektromagnetycznych oraz jednego z prądów fazowych dla poprawnego zasilania układów przy zadanej prędkości obrotowej 1500obr/min i momencie obciążenia 45Nm, 100Nm ( $t=1.2s$ ) i 200 Nm ( $t=3.9s$ ). Na kolejnych wykresach (rys. 7-11) zaprezentowano charakterystyki uzyskane dla przypadku uszkodzenia fazy C ( $t=4s$ ) silnika trójfazowego oraz awarii

podłużnej i poprzecznej,  $L_d$ ,  $L_q$  – indukcyjności stojana w osi podłużnej i poprzecznej,  $\psi_d$ ,  $\psi_q$  – strumienie skojarzone z uzwojeniem stojana w osi podłużnej i poprzecznej,  $\omega$  – prędkość kątowna wirnika.

Moment elektromagnetyczny  $M_e$  można ogólnie przedstawić jako wyrażenia [12]:

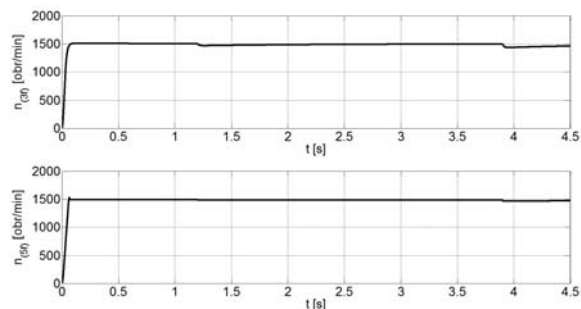
$$(7) \quad M_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + M_{obc}$$

$$(8) \quad M_e = C \cdot p \cdot [\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d]$$

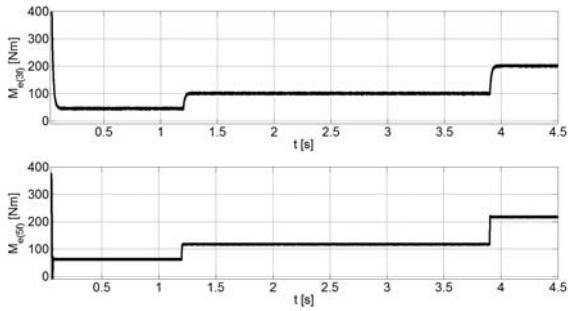
gdzie:  $J$  – moment bezwładności układu napędowego,  $B$  – współczynnik tarcia lepkiego,  $M_{obc}$  – moment obciążenia,  $C$  – stała zależna od rodzaju silnika (1,5 - dla silnika trójfazowego, 2,5 - dla silnika pięciofazowego),  $p$  – liczba par biegunów.

Komputerowe modele układów napędowych wykonano w programie Matlab/Simulink z wykorzystaniem biblioteki SimPowerSystems. Przygotowano schematy z 3-fazowym oraz 5-fazowym silnikiem PMSM. W pętli sterowania prędkością zastosowano regulator typu PI, natomiast w pętli wewnętrznej histerezy regulator prądów fazowych. Następnie przeprowadzono symulacje dla różnych stanów i warunków pracy układów. Na rysunku 3 przykładowo zaprezentowano schemat układu napędowego z pięciofazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi (65kW, 350A, 2500obr/min).

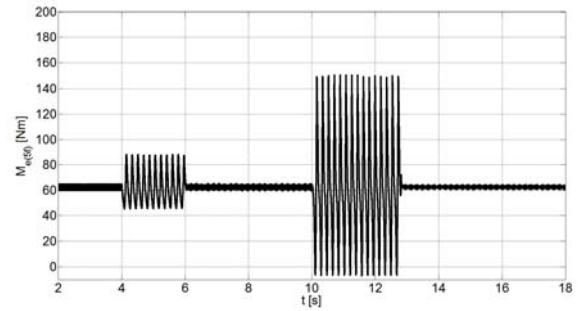
fazy E ( $t=4s$ ) i fazy D ( $t=10s$ ) silnika pięciofazowego przy zadanej prędkości obrotowej 1500 obr/min i stałym momencie obciążenia 45Nm.



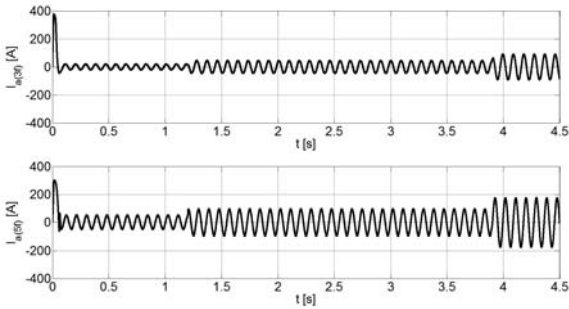
Rys.4. Charakterystyki czasowe prędkości obrotowej dla napędu z 3-fazowym i 5-fazowym PMSM – praca normalna



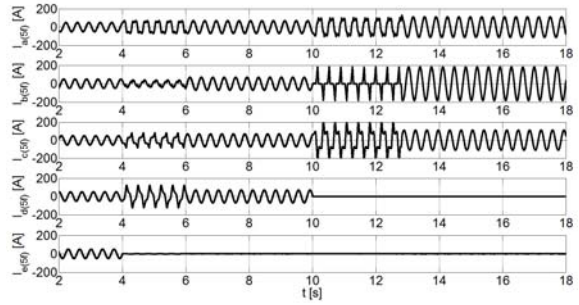
Rys.5. Charakterystyki czasowe momentu elektromagnetycznego dla napędu z 3-fazowym i 5-fazowym PMSM – praca normalna



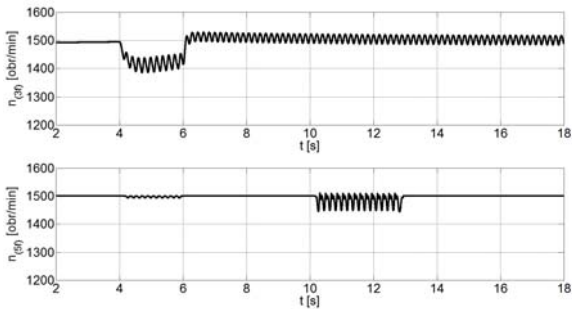
Rys.10. Charakterystyka czasowa momentu elektromagnetycznego dla napędu z 5-fazowym PMSM – uszkodzenie fazy E i D



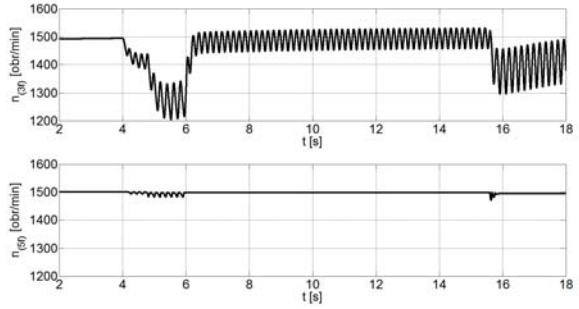
Rys.6. Charakterystyki czasowe prądu fazowego (faza A) dla napędu z 3-fazowym PMSM i 5-fazowym PMSM – praca normalna



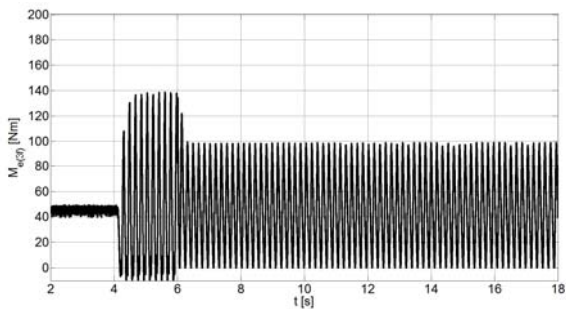
Rys.11. Charakterystyki czasowe prądów fazowych dla napędu z 5-fazowym PMSM – uszkodzenie fazy E i D



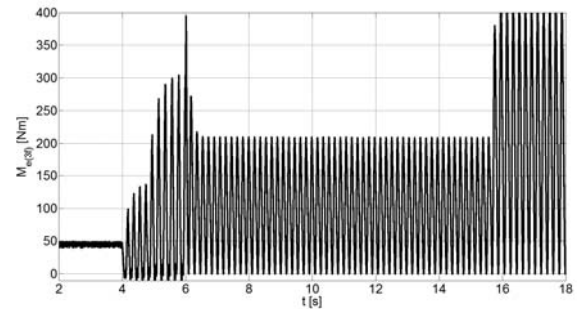
Rys.7. Charakterystyki czasowe prędkości obrotowej dla napędu z 3-fazowym PMSM (uszkodzenie fazy C) i 5-fazowym PMSM (uszkodzenie fazy E i D)



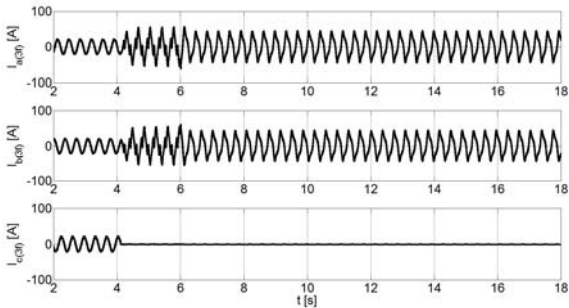
Rys.12. Charakterystyki czasowe prędkości obrotowej dla napędu z 3-fazowym i 5-fazowym PMSM (awaria fazy C i E), wzrost  $M_{obc}$



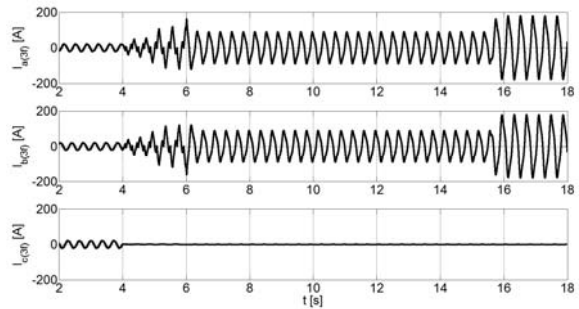
Rys.8. Charakterystyka czasowa momentu elektromagnetycznego dla napędu z 3-fazowym PMSM – uszkodzenie fazy C



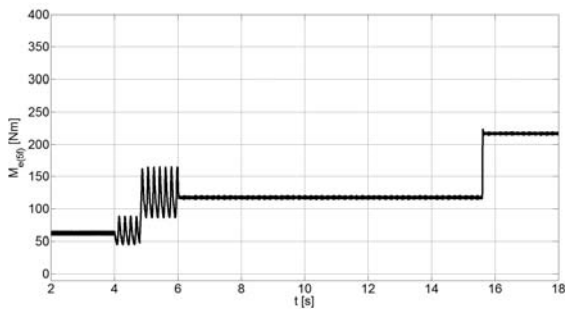
Rys.13. Charakterystyka czasowa momentu elektromagnetycznego dla napędu z 3-fazowym PMSM – awaria fazy C, wzrost  $M_{obc}$



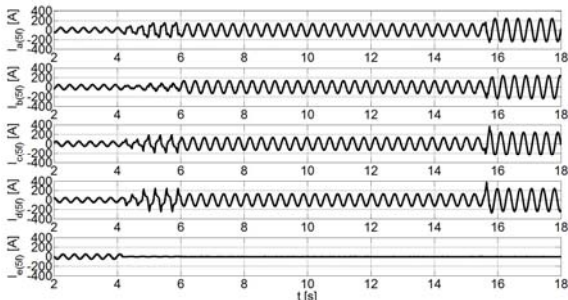
Rys.9. Charakterystyki czasowe prądów fazowych dla napędu z 3-fazowym PMSM – uszkodzenie fazy C



Rys.14. Charakterystyka czasowa prądów fazowych dla napędu z 3-fazowym PMSM – awaria fazy C, wzrost  $M_{obc}$



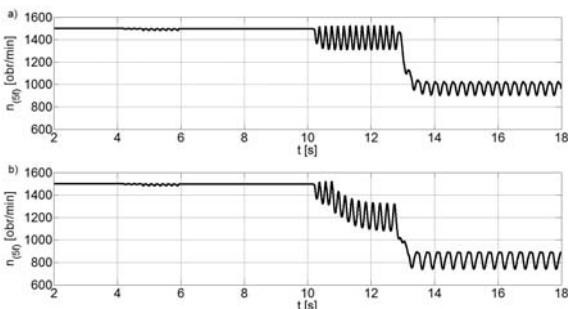
Rys. 15. Charakterystyka czasowa momentu elektromagnetycznego dla napędu z 5-fazowym PMSM – awaria fazy E, wzrost  $M_{obc}$



Rys. 16. Charakterystyka czasowa prądów fazowych dla napędu z 5-fazowym PMSM – awaria fazy E, wzrost  $M_{obc}$

Ponadto zasymulowano, jak zachowują się układy jeśli po wystąpieniu uszkodzenia zasilania wzrośnie moment obciążenia (rys. 12÷16). W obu modelach napędów przy awarii jednej fazy silniki obciążono momentem 100Nm ( $t=4,8s$ ), a następnie  $M_{obc}$  podwyższono do 200Nm ( $t=15,6s$ ).

W przypadku silnika 5-fazowego zarejestrowano również przebiegi prędkości obrotowej, gdy po awarii jednej fazy i wzroście momentu obciążenia z wartości 45Nm do 100Nm ( $t=4,8s$ ) wystąpiła awaria w drugiej fazie zasilania  $t=10s$  (rys. 17a) oraz najbardziej niekorzystny przypadek, jeśli dodatkowo nastąpił jeszcze wzrost  $M_{obc}$  do 150 Nm (rys. 17b).



Rys. 17. Charakterystyki czasowe prędkości obrotowej dla napędu z 5-fazowym PMSM: a) awaria fazy E (wzrost  $M_{obc}$ ) i awaria fazy D, b) awaria fazy E (wzrost  $M_{obc}$ ) i awaria fazy D (wzrost  $M_{obc}$ )

Uzyskane charakterystyki wskazują, że brak zasilania w jednej fazie silnika 3-fazowego skutkuje spadkiem prędkości obrotowej i jej oscylacjami. Ponadto widoczny jest znaczny wzrost momentu elektromagnetycznego i prądów w pozostałych fazach, zwłaszcza w przypadku zwiększenia obciążenia silnika. W tej sytuacji znacznie lepiej zachowuje się napęd z silnikiem pięciofazowym. Amplituda  $M_e$  jest mniejsza i praktycznie występują tylko niewielkie oscylacje prędkości obrotowej do chwili

skompensowania ich przez układ regulacji. Również pomimo uszkodzenia dwóch faz zasilania układ jest w stanie pracy, chociaż można już zaobserwować obniżenie prędkości obrotowej w stosunku do wartości zadanej i jej oscylacje.

### Podsumowanie

Badania symulacyjne napędów z trójfazowym i pięciofazowym silnikiem PMSM pozwoliły na ocenę pracy układów w przypadku normalnych warunków pracy oraz w sytuacji awarii faz zasilających. Korzystniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie silnika 5-fazowego, który zapewnia zmniejszenie pulsacji momentu elektromagnetycznego i jest odporniejszy na zakłócenia zasilania. Przy uszkodzeniu jednej, a nawet dwóch faz zapewniał dalszą pracę układu napędowego. Dlatego też wydaje się, że w układach od których wymaga się zwiększonej niezawodności, pomimo wyższych kosztów instalacji, wskazane jest użycie jednostki napędowej z silnikiem wielofazowym.

### LITERATURA

- [1] Biała Księga: Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu - dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i oszczędnego zasobowo systemu transportu, COM (2011) 144, Bruksela
- [2] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/33/WE z dnia 23 kwietnia 2009r. w sprawie promowania ekologicznie czystych i energooszczędnych pojazdów transportu drogowego
- [3] Ministerstwo Transportu, Budownictwa i gospodarki Morskiej: Strategia rozwoju transportu do 2020 roku (z perspektywą do 2030 roku), (2013), Warszawa
- [4] Chau K.T., Chan C.C., Liu C.: Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55 (2008), No. 6, 2246-2257
- [5] Olesiak K.: An algorithm for tuning a fuzzy controller in a drive control system of a permanent magnet synchronous motor, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 90 (2014), No. 12, 250-252
- [6] Prauzner, T., Ptak, P.: Analiza parametrów pracy wybranych czujników pola magnetycznego, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 90 (2014), nr 12, 273-276
- [7] Levi E.: Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55 (2008) No.5, 1893-1909
- [8] Meinguet F., Nguyen N.-K., Sandulescu P., Kestelyn X., Semail E.: Fault-Tolerant Operation of an Open-End Winding Five-Phase PMSM Drive with Inverter, *IECON 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, (2013)
- [9] Parsa L., Toliyat H.: Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41 (2005), 30-37
- [10] Ruba M., Surdu F., Szabo L.: Study of a Nine-Phase Fault Tolerant Permanent Magnet Starter-Alternator, *Journal of Computer Science and Control Systems*, Vol.4 (2011), No.1, 149-154
- [11] Baudart F., Dehez B., Labrique F., Matagne E.: Control strategy with minimal controller reconfiguration of fault tolerant polyphase PMSM drives under open circuit fault of one phase, *XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, (2010)
- [12] Krishnan R., Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, *CRC Press*, (2009)

**Autor:** dr inż. Beata Jakubiec, Politechnika Częstochowska, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Zakład Energoelektroniki, Robotyki i Jakości Energii, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: [beja@el.pcz.czest.pl](mailto:beja@el.pcz.czest.pl)