

## Napęd sześciofazowy z silnikiem PMSM dla pojazdów elektrycznych i hybrydowych

**Streszczenie.** Elektryczne układy napędowe z silnikami PMSM są stosowane zarówno w pojazdach BEV jak i P(HEV). Parametry techniczne opracowanego układu napędowego adresowane są w szczególności dla elektrycznych autobusów i pojazdów ciężarowych. Przedstawiono strukturę układu napędowego oraz budowę nowego sześciofazowego falownika napędowego. W artykule przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych z wykorzystaniem środowiska PSIM, HIL (Hardware In the Loop), wprowadzające symulację z wykorzystaniem docelowych podzespołów, w tzw. czasie rzeczywistym oraz wyniki eksperymentalne zarejestrowane na stanowisku laboratoryjnym.

**Abstract.** Electric drive systems with PMSM engines are used on both BEV and P (HEV) vehicles. The technical parameters of the developed drive system are addressed in particular to electric buses and trucks. The structure of the drive system and the construction of a new six-phase drive inverter are presented. The article presents the results of simulation tests using the PSIM, HIL (Hardware in the Loop) environment, introducing simulation with the use of target components, in the so-called real-time and experimental results recorded on a laboratory stand. (**Six-phase drive with PMSM motor for electric and hybrid vehicles**)

**Słowa kluczowe:** napędy elektryczne, silniki wielofazowe, sterowanie FOC.

**Keywords:** electric drives, multiphase motors, FOC control.

### Wstęp

Silniki PMSM to najczęściej stosowane maszyny do napędu pojazdów elektrycznych. Budowa silnika jest podobna zarówno do silników DC bezszczotkowych (wirmik wyposażony w magnesy trwałe) jak również do silników indukcyjnych których uzwojenie stojana zapewnia sinusoidalny rozkład strumienia w szczelinie (suma strumieni od magnesów trwałych i strumienia uzwojenia stojana) w szczelinie. Dzięki takiemu połączeniu silniki te charakteryzują się bardzo dobrymi parametrami użytkowymi co pozwala na zastosowanie tego typu silników do specjalnych układów napędowych o wysokiej sprawności i wydajności (silniki PMSM osiągają nawet kilka kW/kg masy w porównaniu do silników indukcyjnych, gdzie współczynnik ten nie przekracza 0,2 kW/kg masy).

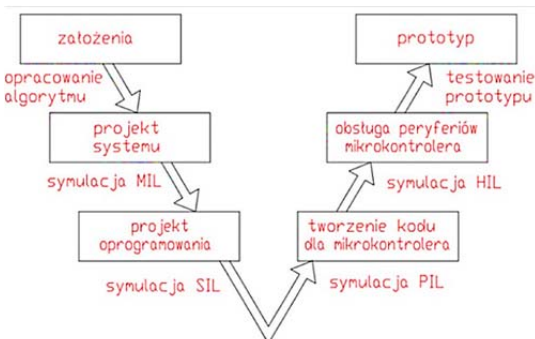
Hybrydowa budowa tych silników pozwala na wytwarzanie maksymalnego momentu obrotowego nawet przy zatrzymanym wirniku, ponadto charakteryzują się płynnym ruchem obrotowym w całym zakresie prędkości obrotowej, pełną kontrolą momentu obrotowego, dynamicznym przyspieszaniem i zwalnianiem. Precyzyjne wykonywanie tych czynności nadzoruje falownik napędowy z wbudowaną funkcją sterowania najczęściej jest to sterowanie wektorowe FOC (Field Oriented Control).

### Model-Base-Design

Dynamiczny rozwój współczesnej techniki oraz rosnący poziom skomplikowania urządzeń mikroprocesorowych sprawiają, że rośnie złożoność oprogramowania koniecznego do ich obsługi. Powoduje to, że zarówno nakłady finansowe, jak i ludzkie konieczne do jego wytwarzania rosną. Większe skomplikowanie sprawia również, że oprogramowanie systemów wbudowanych wymaga bardziej kosztownego testowania i weryfikacji, w celu uniknięcia występowania błędów. Jest to konieczne, ponieważ ewentualna awaria mikroprocesorowych układów sterujących w zależności od aplikacji może spowodować znaczne straty materialne i inne.

W klasycznych metodach projektowania mikroprocesorowych układów sterowania proces weryfikacji następuje dopiero po zakończeniu opracowywania algorytmu oraz jego implementacji na docelowej platformie w manualnie wy-

tworzonym kodzie. W tych sytuacjach i nieodpowiedniego działania oprogramowania, konieczna jest nie tylko weryfikacja poprawności działania kodu oraz metody jego implementacji na mikrokontrolerze, ale również samego algorytmu sterowania lub nawet założeń projektowych. W sytuacji, w której problem pojawił się na bardzo wczesnym etapie prac nad rozwojem oprogramowania konieczne może okazać się jego całkowite przeprojektowanie. Wiąże się to z dużym kosztem oraz opóźnieniami w pracach projektowych.



Rys. 1. Schemat metodologii V-Cycle bazującej na MBD.

W celu rozwiązania tych problemów opracowano nowe podejście do procesu tworzenia oraz testowania oprogramowania dla systemów wbudowanych zwane Model Based Design. Zakłada ono badanie oraz projektowanie algorytmu i kodu sterującego w oparciu o modele symulacyjne układu sterowania oraz obiektu sterowanego od najwyższego poziomu abstrakcji aż do działającego kodu na docelowym mikrokontrolerze. W przeciwieństwie do metod klasycznych, testowanie i weryfikacja projektu następuje na wielu etapach prac nad oprogramowaniem. Umożliwia to upewnienie się, że każdy kolejny etap projektu jest wykonany prawidłowo. Dzięki uniezależnieniu procesu badania algorytmu sterującego od jego implementacji w kodzie, istnieje możliwość wielokrotnego użycia tego samego modelu w wielu podobnych zastosowaniach. Dodatkowo, ewentualne zmiany w działaniu układu sterowania mogą być modelowane bez konieczności zmiany istniejącego kodu. Proces tworzenia kolejnych, coraz bardziej niskopoziomowych symulacji na-

zywany jest w literaturze cyklem V (ang. V-cycle). Etapy cyklu V różnią się sposobem realizacji algorytmu sterującego oraz platformą, na której się je testuje.

Rys.1 przedstawiono blokowo proces projektowania systemu oprogramowania zgodnie z metodologią bazującą na metodzie Model Based Design (MBD).

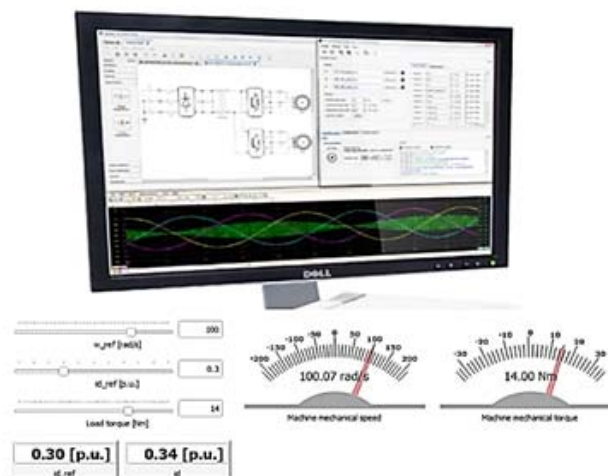
Pierwszy etap cyklu V, o najwyższym poziomie abstrakcji nazywany jest symulacją Model-in-the-Loop. W tej części prac nad projektem oprogramowania systemów wbudowanych buduje się model układu sterowania oraz urządzenia sterowanego w postaci czysto matematycznej. Celem tej symulacji jest realizacja algorytmu sterującego, w taki sposób, aby spełniał on postawione wymagania projektowe. W tej części cyklu V wybierana jest topologia układu sterującego, nastawę zastosowanych w nim regulatorów oraz badania stabilności oraz skuteczności zastosowanego algorytmu. Opracowanie algorytmu sterującego wyłącznie na podstawowych elementach dynamicznych oraz matematycznych w formie bloczkowej pozwala na szybką modyfikację jego działania oraz zwiększa jego przejrzystość. Po zakończeniu procesu modelowania układu sterowania następuje jego symulacyjna weryfikacja, która pozwala upewnić się projektantowi, że na etapie tworzenia algorytmu sterowania nie występują błędy. Problemy pojawiające się w dalszej części prac nie będą wynikały więc z błędnej koncepcji projektu układu sterowania. Bardzo ważną zaletą pracy na tak wysokim poziomie abstrakcji jest to, że sam algorytm może zostać później zrealizowany w dowolnym języku programistycznym oraz na dowolnej platformie sprzętowej. Zamknięcie etapu symulacji Model-in-the-Loop oznacza, że system sterowania został już w całości zaprojektowany i zweryfikowany. Następne etapy cyklu V będą już tylko na realizacji stworzonego systemu w odpowiednim języku programistycznym oraz na odpowiedniej platformie. Całość badań symulacyjnych w tym etapie wykonywana jest w środowisku symulacyjnym, takim jak np. PSIM.

Drugi etap cyklu V nazywany jest symulacją Software-in-the-Loop (SIL). Polega on na realizacji wcześniej zaprojektowanego w symulacji Model-in-the-Loop (MIL) systemu sterowania w postaci kodu w docelowym języku programistycznym. Na tym etapie prac konieczna jest dyskretyzacja ciągłego modelu dynamicznego układu sterowania, tak aby mógł on pracować na docelowej platformie mikroprocesorowej. Zdyskretyzowany układ następnie jest realizowany w postaci skryptu w języku, który zostanie później użyty do programowania rzeczywistego mikrokontrolera, takim jak na przykład C. Wskaźnikiem poprawności prac na tym etapie cyklu V jest zgodność wykonanych modeli w postaci MIL oraz SIL. Jeżeli zachowanie obydwu modeli jest tożsame oznacza to, że zaprojektowany wcześniej system sterowania został poprawnie zrealizowany w postaci kodu. Ta część cyklu V pozwala na weryfikację poprawności działania kodu realizującego sterowanie w docelowym języku. Kod ten ma charakter ogólny i realizowany jest w środowisku symulacyjnym, więc nie uwzględnia on specyfiki docelowego układu mikroprocesorowego, na którym ma pracować. Zamknięcie etapu symulacji SIL oznacza, że wykonano oraz zweryfikowano działanie kodu w docelowym języku, który ma realizować zaprojektowany wcześniej układ sterowania. Etap ten pozwala upewnić się projektantowi, że na etapie projektowania oprogramowania nie następują błędy.

Trzeci etap cyklu V nazywany jest symulacją Processor-in-the-Loop (PIL). Polega on na implementacji wcześniej napisanego kodu w docelowym języku programistycznym na stosowanej platformie mikroprocesorowej. W odróżnieniu od wcześniejszych etapów Model Based Design układ sterowania nie jest na tym etapie realizowany w środowisku symulacyjnym. Badania poprawności implementacji kodu

stworzonego na etapie SIL realizowane jest na dwóch oddzielnych platformach współpracujących ze sobą i wymieniających między sobą dane. Model urządzenia sterowanego symulowany jest w dalszym ciągu w środowisku symulacyjnym, ale układ sterowania działa już na docelowym mikrokontrolerze. Środowisko symulacyjne umożliwiające wykonywanie symulacji typu PIL, takie jak PLECS lub PSIM, odpowiada za komunikację między zaprogramowanym mikrokontrolerem, a modelem dynamicznym urządzenia sterowanego, tak że zewnętrzny mikrokontroler steruje symulowanym urządzeniem. Stosowanie tego typu symulacji pozwala na weryfikację poprawności implementacji oprogramowania sterującego na rzeczywistym mikrokontrolerze.

Ostatni etap cyklu V nazywany jest symulacją Hardware-in-the-Loop (HIL). Polega on na modyfikacji oprogramowania wcześniej stworzonego dla symulacji PIL, tak aby zawierał on obsługę wszystkich peryferii koniecznych do odpowiedniej pracy w rzeczywistym układzie sterowania. Z punktu widzenia mikrokontrolera działa on w rzeczywistym układzie sterowania i pracuje w czasie rzeczywistym. Skuteczna weryfikacja układu sterowania na tym etapie oznacza, że zaprogramowany mikrokontroler może zostać wykorzystany w rzeczywistym urządzeniu sterowanym. Podstawowa różnica pomiędzy symulacją i weryfikacją typu PIL oraz HIL polega na tym, że symulacja HIL działa w czasie rzeczywistym, a mikrokontroler nie musi być podłączony do środowiska symulacyjnego.



Rys. 2. Hardware-in-the-Loop wykorzystanie urządzenia symulatora czasu rzeczywistego (ang. Real Time Simulator)

Przy wykorzystaniu tego systemu, cyfrowy model urządzenia sterowanego wprowadzony jest do RTS-a, który wykonuje analizę numeryczną w czasie rzeczywistym. Symulatory HIL wyposażone są w peryferia do komunikacji zewnętrznej, wejścia/wyjścia sygnału PWM generowanego np. przez mikrokontroler. Warto wspomnieć, że w symulacji PIL wykorzystuje się wyłącznie przesyłanie danych liczbowych pomiędzy mikrokontrolerem, a symulatorem. Komputer PC nie jest w stanie odpowiednio zinterpretować sygnału PWM. Po pobraniu sygnału PWM symulator HIL oblicza wartości stanu testowanego modelu, a następnie zwraca do mikrokontrolera wartości wielkości mierzonych. Badania symulacyjne typu HIL są najbardziej zbliżone do pracy rzeczywistego układu z punktu widzenia układu sterowania, a jednocześnie pozwalają badać ten układ w sposób bezpieczny, nienarażający sprzętu na uszkodzenia fizyczne.

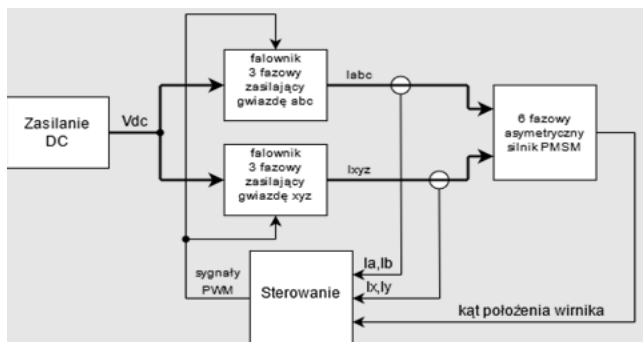
#### Układ sterowania FOC

Wielofazowe silniki PMSM posiadają wiele zalet, ale także mają jedną wadę a mianowicie bardziej złożoną konstrukcję zarówno maszyny jak i układu przekształtnika zasil-

lającego. Zaletami są przede wszystkim mniejsze wartości prądów fazowych w porównaniu do ich 3-fazowych odpowiedników, co umożliwia wykorzystanie podzespołów energoelektronicznych o mniejszych dopuszczalnych natężeniach prądu. Zwiększenie ilości faz wpływa także na zwiększenie niezawodności i zmniejsza amplitudy wahań momentu elektromagnetycznego.

Funkcja kontroli poprawnej pracy 6-fazowego przekształtnika na tranzystorach IGBT, z przeciwnoległymi diodami zwrotnymi jest realizowana z wykorzystaniem metody sterowania wektorowego FOC, która dla silników PMSM jest bardziej wydajna i precyzyjna.

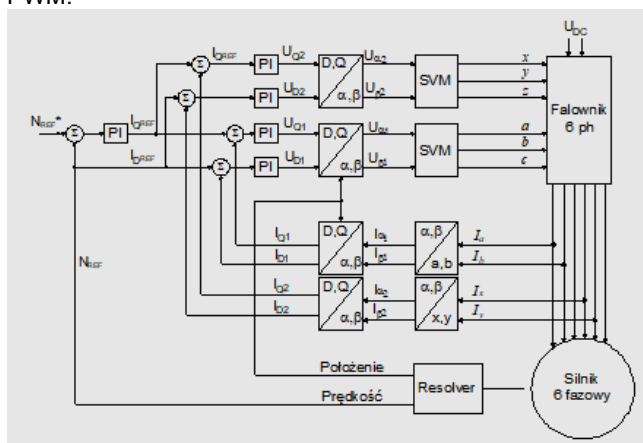
Schemat blokowy połączeń obwodu głównego napędu pokazano na rysunku 3. System składa się z 6 fazowego falownika napędowego, przedstawionego jako dwa falowniki 3-fazowe, zasilające 6-fazowy silnik PMSM, z bloku zasilania DC oraz bloku sterowania FOC. Taka budowa układu napędowego pozwala na wariantowy wybór połączeń silnika - możliwość zasilania połowy faz.



Rys. 3. Schemat blokowy połączeń badanego napędu 6-fazowego z silnikiem PMSM

W celu dostosowania metody sterowania FOC do warunków układu napędowego zmodyfikowano klasyczną strukturę metody FOC o podwójne regulatory prądów i transformacje sygnałów sterujących.

Algorytm FOC zwykle generuje napięcia odniesienia, które modulator PWM przekształca na sygnały sterujące dla falownika napędowego. W niniejszej realizacji pomiar położenia wirnika pochodzi z resolvera. Poniższy rysunek przedstawia kompletny schemat symulacyjny z modulatorem PWM.



Rys. 4. Schemat blokowy układu sterowania FOC 6-fazowego napędu PMSM z podwójną transformacją Parka

Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy zmodyfikowanego systemu sterowania FOC [3]. Układ sterowania rozbudowano o podwójne bloki transformacji Clarke'a i Parka oraz regulatory prądów w osi  $d$  i  $q$ .

Sygnal położenia wału wykorzystywany jest także do wyznaczania prędkości obrotowej silnika, dostarczanej do regulatora prędkości obrotowej typu PI.

Na wyjściu regulatora prędkości obrotowej powstaje sygnał zadany  $i_q$ , -jednakowe składowe  $i_{q1}$  oraz  $i_{q2}$  porównywane są z odpowiednimi prądami mierzonymi w obwodzie zasilania silnika. Regulatory prądów  $i_d$  oraz  $i_q$  zadają napięcia stojana  $u_d$ ,  $u_q$ , które po odwrotnej transformacji Parka  $u_{alfa}$ ,  $u_{beta}$  sterują modulatorami SVM (Space Vector Modulation) falownika 6-fazowego.

### Analiza numeryczna -model matematyczny

Model symulacyjny 6-fazowego silnika PMSM w programie symulacyjnym PSIM opisują równania strumieniowe:

$$(1) \begin{bmatrix} \Phi_{d1} \\ \Phi_{q1} \\ \Phi_{d2} \\ \Phi_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{d1} & 0 & M_{d21} & 0 \\ 0 & L_{q1} & 0 & M_{q21} \\ M_{d12} & 0 & L_{d2} & 0 \\ 0 & M_{q12} & 0 & L_{q2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_{PM} \\ 0 \\ \Phi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Równania napięciowe opisujące model silnika można przedstawić jak poniżej:

$$(2) \quad v_{d1} = R_s i_{d1} + \frac{d\Phi_{d1}}{dt} - w_r \Phi_{q1}$$

$$(3) \quad v_{q1} = R_s i_{q1} + \frac{d\Phi_{q1}}{dt} + w_r \Phi_{d1}$$

$$(4) \quad v_{d2} = R_s i_{d2} + \frac{d\Phi_{d2}}{dt} - w_r \Phi_{q2}$$

$$(5) \quad v_{q2} = R_s i_{q2} + \frac{d\Phi_{q2}}{dt} + w_r \Phi_{d2}$$

Zakładając, że pary uzwojeń są identyczne ( $L_{d1} = L_{d2} = L_d$ ,  $L_{q1} = L_{q2} = L_q$ ,  $M_{d12} = M_{d21} = M_d$  i  $M_{q12} = M_{q21} = M_q$ ) upraszczamy macierz indukcyjności i otrzymujemy następujące równania strumienia stojana:

$$(6) \quad \Phi_{d1} = L_d i_{d1} + M_d i_{d2} + \Phi_{PM}$$

$$(7) \quad \Phi_{q1} = L_q i_{q1} + M_q i_{q2}$$

$$(8) \quad \Phi_{d2} = L_d i_{d2} + M_d i_{d1} + \Phi_{PM}$$

$$(9) \quad \Phi_{q2} = L_q i_{q2} + M_q i_{q1}$$

$\Phi$  -to strumienie skojarzone,  $L$  - indukcyjność własna,  $M$  - indukcyjność wzajemna,  $i$  - prąd, indeks dolny  $d$  lub  $a$  odnosi się do składowej w osi  $d$  lub  $q$ , indeks 1 i 2 odpowiednio odnoszą się do uzwojenia ( $a, b, c$ ) i ( $x, y, z$ ).

Równanie mechaniczne:

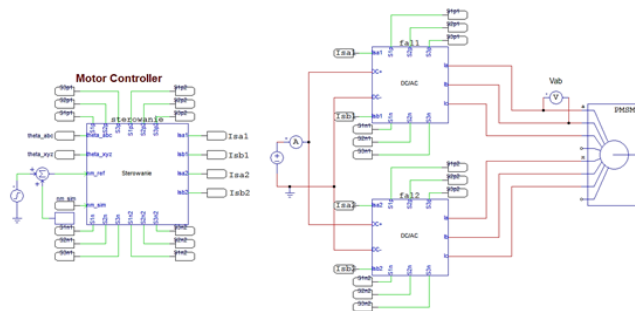
$$J \frac{dw_m}{dt} = T_e - Bw_m - T_{load}$$

Moment elektromagnetyczny

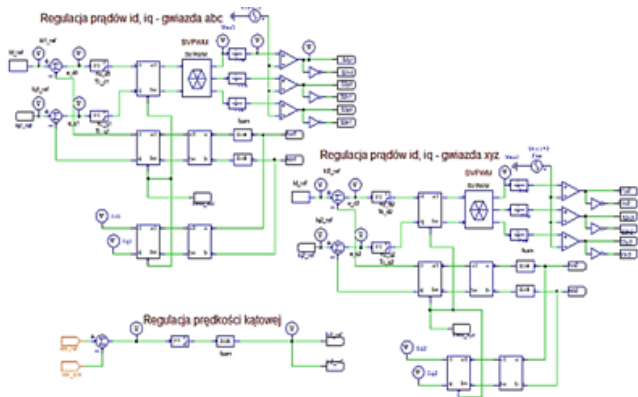
$$T_e = \frac{3}{2} pb (\Phi_{d1} i_{q1} - \Phi_{q1} i_{d1} - \Phi_{d2} i_{q2} + \Phi_{q2} i_{d2})$$

$$T_e = \frac{3}{2} pb [\Phi_{PM} (i_{q1} + i_{q2}) + (L_d - L_q) (i_{d1} i_{q1} + i_{d2} i_{q2}) + (M_d - M_q) (i_{d1} i_{q2} + i_{d2} i_{q1})]$$

### Model symulacyjny opracowany w środowisku PSIM



Rys. 5. Schemat modelu symulacyjnego obwodu mocy napędu 6-fazowego PMSM w programie symulacyjnym PSIM



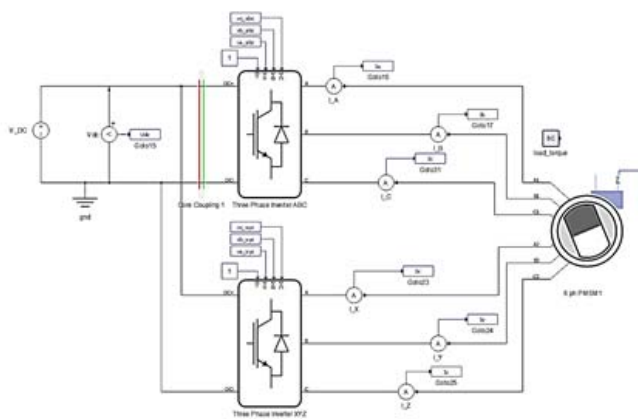
Rys. 6. Schemat modelu symulacyjnego sterowania napędu 6-fazowego PMSM w programie symulacyjnym PSIM.

### Model symulacyjny systemu na stanowisku RTS

Dla wykonania badań wstępnych całego systemu sterowania napędem: silnik + przekształtnik + układ sterowania wektorowego FOC z wykorzystaniem urządzenia RTS (rys. 7-9) opracowano model symulacyjny w środowisku, którego obwód mocy i układ sterowania przedstawiono na rysunkach 3-4.



Rys. 7. Stanowisko badawcze HIL sterowania wektorowego FOC napędu 6-fazowego PMSM

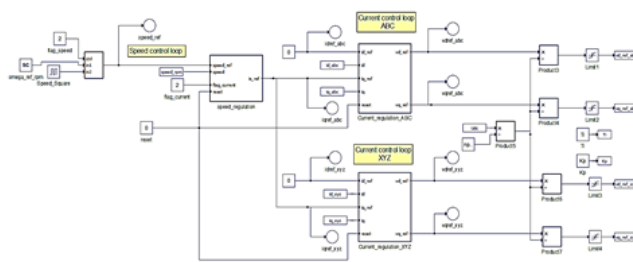


Rys. 8. Schemat obwodu mocy w symulatorze HIL.

### Badania i wyniki symulacyjne w układzie MIL/SIL (Model In the Loop / SIL Software In the Loop)

Dostrajanie regulatorów na przykładzie pętli regulacji prądu. Obiektem regulacji jest człon mechaniczny -silnik 6 fazowy zasilany z układu przekształtnikowego 6 fazowego zawierający układ sterowania z funkcją FOC. Przyjęty mo-

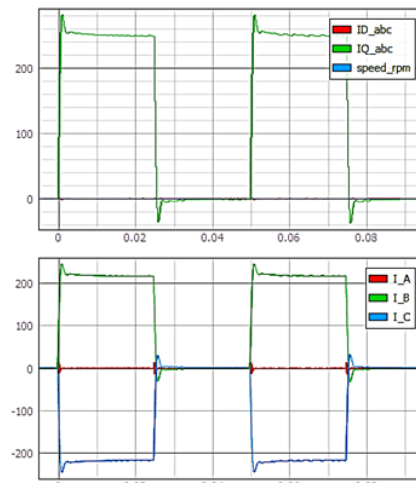
del sterowania definiuje zależność kąta obrotu silnika od wartości wygenerowanego prądu dla każdej z faz przekształtnika.



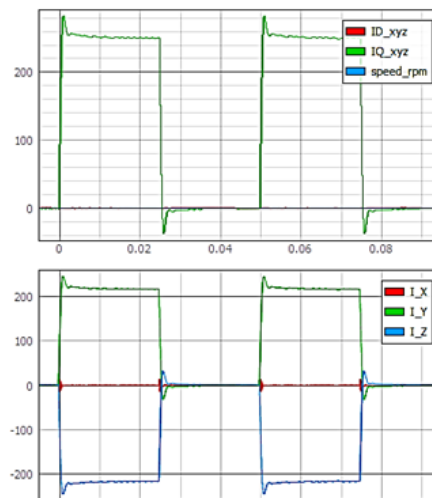
Rys. 9. Schemat obwodu sterowania w symulatorze HIL.

W celu wyznaczenia nastaw regulatorów typu PI przeprowadzono proces strojenia polegający na zablokowaniu (wyłączeniu) toru regulacji prędkości kątownej przy pełnym wystereowaniu układu zasilania. Podczas tej próby doбирали wartości nastaw  $K_P$  i  $K_I$  regulatorów w gałęziach  $d$  i  $q$ .

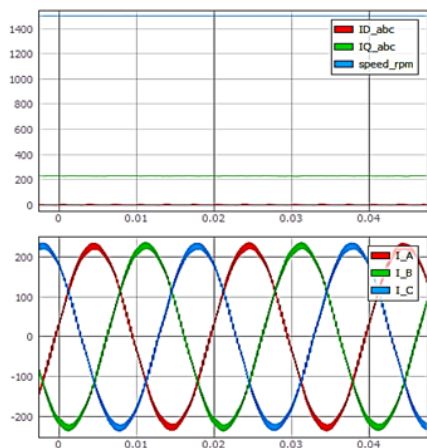
Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wykresy dla prądów 6 faz. Na pierwszym przedstawiono sygnały prądowe  $I_D$ ,  $I_Q$  dla pierwszej gwiazdy prądów A,B,C zaś na drugim dla gwiazdy X,Y,Z. Prezentowane charakterystyki pochodzą bezpośrednio z symulatora czasu rzeczywistego.



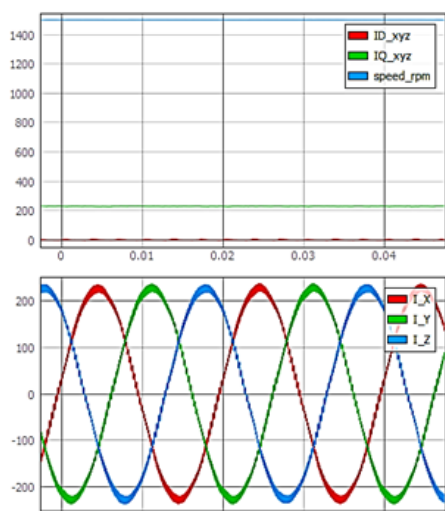
Rys. 10. Strojenie regulatorów prądu faz A,B,C przy zablokowanym wale silnika. Skok prądu z 0 na 250A.



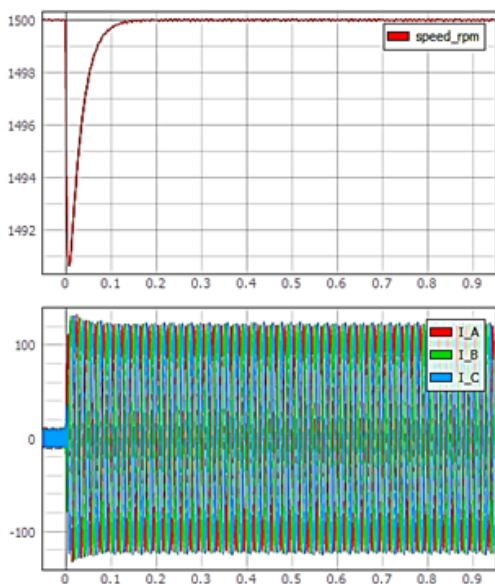
Rys. 11. Strojenie regulatorów prądu faz X,Y,Z przy zablokowanym wale silnika. Skok prądu z 0 na 250A. Oznaczenie osi wykresu: oś x, czas w [s], oś y wartość prądu w [A]



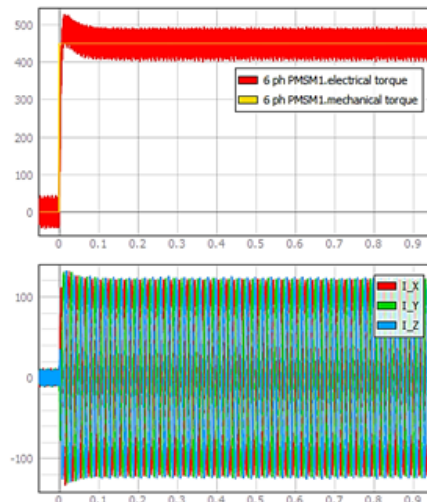
Rys. 12. Regulacja prędkości obrotowej silnika: zadane 1500 obr/min przy obciążeniu 900 Nm przebiegi prądów faz A,B,C. Oznaczenie osi wykresu: oś x, czas w [s], oś y wartość prądu w [A]



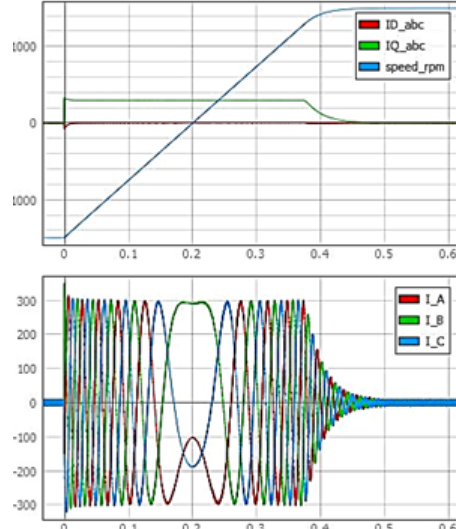
Rys. 13. Regulacja prędkości obrotowej silnika: zadane 1500 obr/min przy obciążeniu 900 Nm przebiegi prądów faz X,Y,Z. Oznaczenie osi wykresu: oś x, czas w [s], oś y wartość prądu w [A]



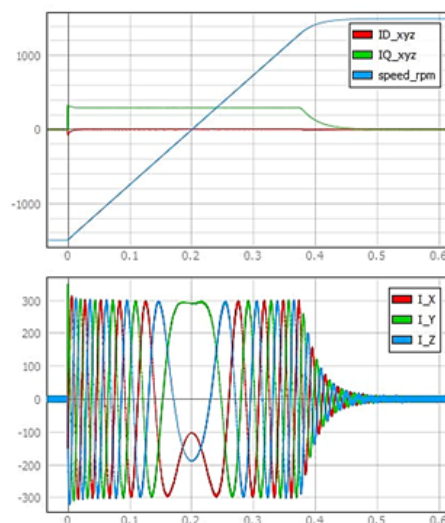
Rys. 14. Przebiegi prędkości obrotowej po załączeniu obciążenia układu 900 Nm, widoczny spadek prędkości i następnie doregulowanie do 1500 obr/min. Poniżej przebiegi prądów faz A,B,C. Oznaczenie osi wykresu: oś x, czas w [s], oś y prędkość obrotowa [obr/min] wykres powyżej, poniżej oś y wartość prądu w [A]



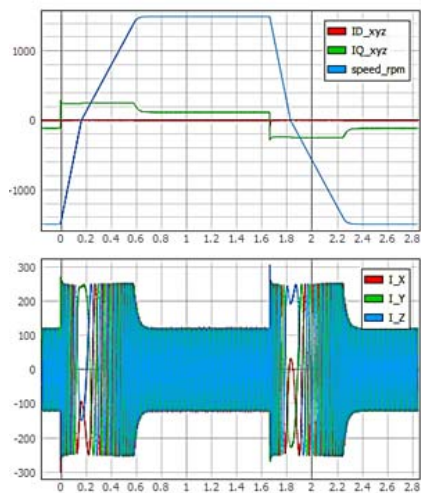
Rys. 15. Przebiegi momentów po obciążeniu układu (900 Nm) - wykres czerwony moment elektryczny, wykres pomarańczowy moment mechaniczny. Poniżej przebiegi prądów faz X,Y,Z. Oznaczenie osi wykresu: oś x, czas w [s], oś y wartość prądu w [A]



Rys. 16. Nawrót silnika z -1500 obr/min do 1500 obr/min przy braku obciążenia  $T=0$  Nm, przebiegi prądów faz A,B,C. Oznaczenie osi wykresu: oś x, czas w [s], oś y prędkość obrotowa [obr/min] wykres powyżej, poniżej oś y wartość prądu w [A]

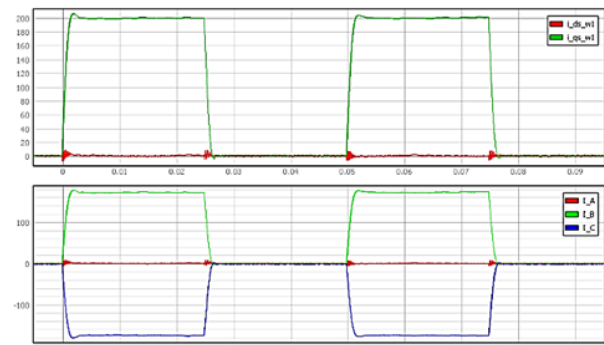


Rys. 17. Nawrót silnika z -1500 obr/min do 1500 obr/min przy braku obciążenia  $T=0$  Nm, przebiegi prądów faz X,Y,Z. Oznaczenie osi wykresu: oś x, czas w [s], oś y prędkość obrotowa [obr/min] wykres powyżej, poniżej oś y wartość prądu w [A]

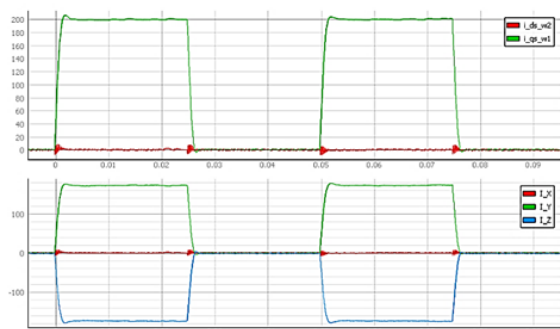


Rys. 18. Charakterystyki nawrotu silnika. Prędkość obrotowa  $\pm 1500$  obr/min przy obciążeniu 450 Nm (połowa momentu znamionowego). przebiegi prądów faz A,B,C i X,Y,Z. Oznaczenie osi wykresu: oś x, czas w [s], oś y prędkość obrotowa [obr/min] wykres powyżej, poniżej oś y wartość prądu w [A]

Procedura strojenia przebiegała przy zatrzymanym wale silnika i skokowej zmianie wartości prądu z 0 na 250 A. W wyniku otrzymano przebiegi sygnałów sterujących pokazanych na rysunkach 10 i 11. Dobrane w ten sposób nastawy regulatorów PI pozwalają uzyskać szybkie odwzorowanie skoków wartości prądu z niewielkimi przeregulowaniami gwałtownymi w połowie okresu. Po doborze nastaw regulatorów prądu załączono (odblokowano) regulator prędkości kątownej silnika i przystąpiono do strojenia regulatora typu PI. Po dobraniu nastaw regulatora wykonano symulację regulacji prędkości kątownej wału silnika.



Rys. 19. Charakterystyki strojenia regulatorów w fazach A,B,C

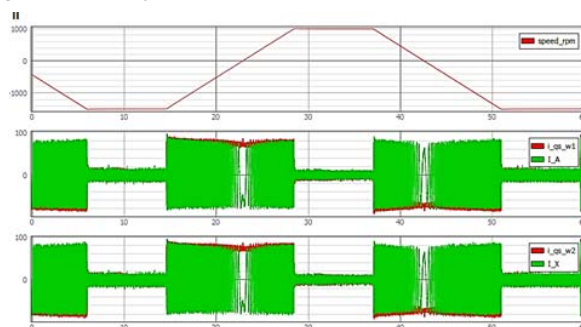


Rys. 20. Charakterystyki strojenia regulatorów w fazach X,Y,Z. Na rysunkach Rys 20-21 przedstawiono przebiegi podczas pracy silnika w trybie nawrotów.

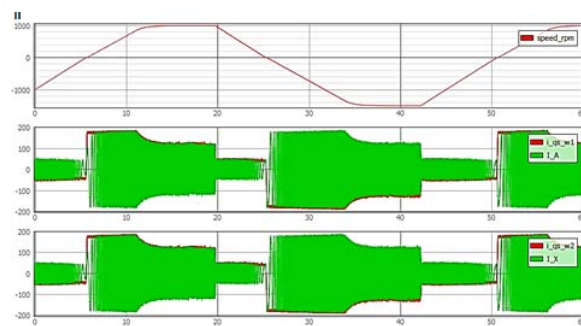
## Wyniki HIL

Po weryfikacji algorytmu sterowania w symulacji SIL/MIL przystąpiono do testów HIL (algorytm sterowania został zaimplementowany na zewnętrznej płycie sterującej a obwód energo elektroniczny w RTS-ie).

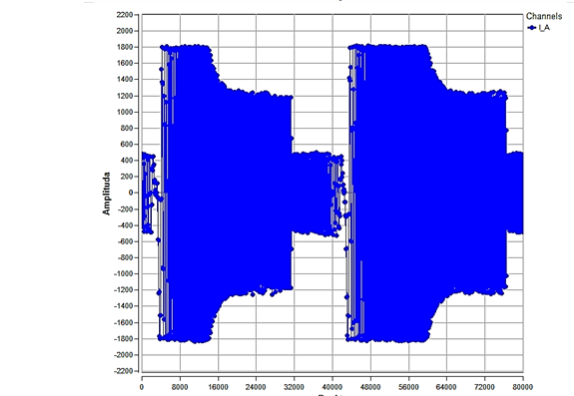
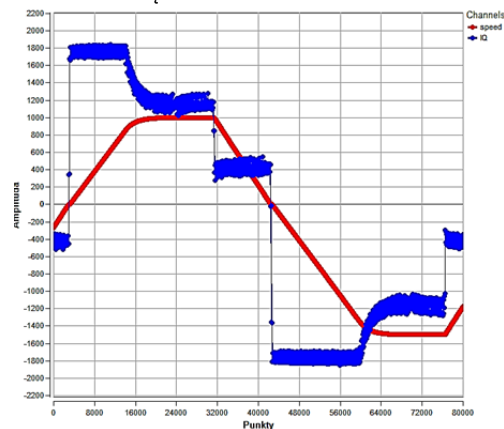
Na rysunkach Rys. 19-20 przedstawiono wyniki strojenia regulatorów prądu.



Rys. 21. Charakterystyki regulacji prędkości obrotowej na poziomie +1500 obr/min bez obciążenia.



Rys. 22. Charakterystyki regulacji prędkości obrotowej na poziomie +1500 obr/min z obciążeniem.



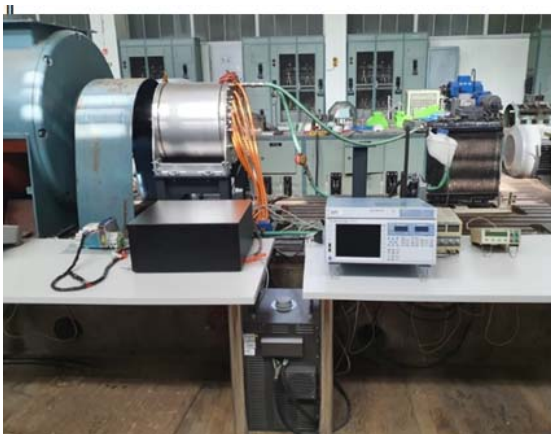
Rys. 23. Charakterystyki regulacji prędkości obrotowej na poziomie +1500 obr/min z obciążeniem. (obserwowane sygnały w procesorze DSP)

## Badania laboratoryjne

Przeprowadzone badania laboratoryjne omawiane w artykule dotyczą falownika napędowego opracowanego w Łukasiewicz – IEL (Rys.24). Badania zostały przeprowadzone na stanowisku badawczym w laboratorium układów napędowych instytutu.



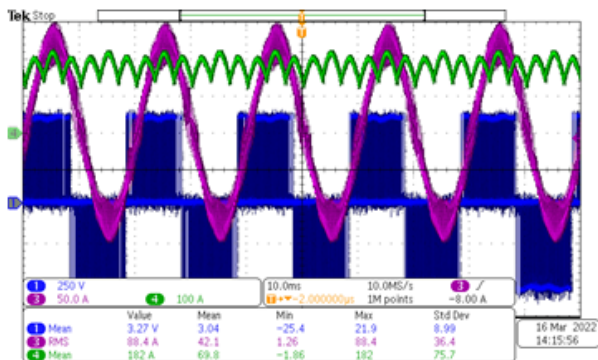
Rys. 24. Widok prototypu falownika 6 fazowego do napędów autobusowych, samochodów osobowych i ciężarowych oraz innych pojazdów użytkowych oraz przemysłowych



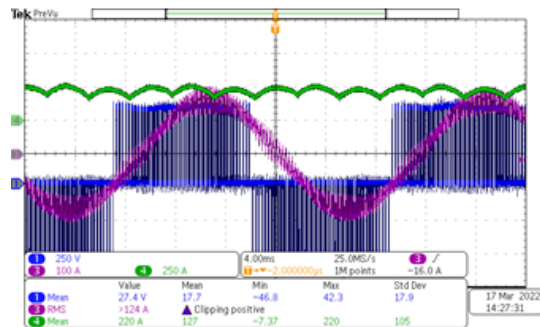
Rys. 25. Widok stanowiska badawczego napędu z silnikiem 6-fazowym PMSM oraz falownikiem (w czarnej obudowie)

## Uruchamianie układu – testy próbne na obciążeniu RL

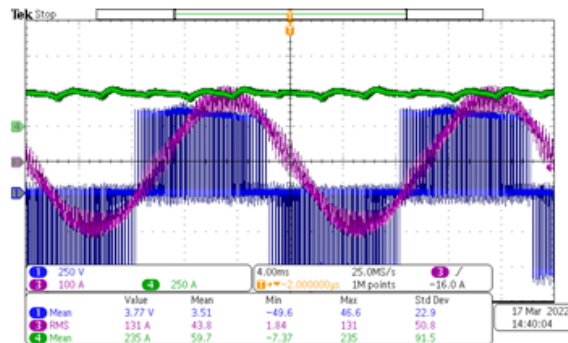
Przed pierwszymi testami laboratoryjnymi falownika z silnikiem PMSM, przeprowadzone zostały długookresowe badania obciążeniowe. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach Rys. 26-28.



Rys. 26. Przebiegi: prądu obwodu pośredniczącego CH1, Prądu jednej z 6 faz falownika CH3 i napięcia międzyfazowego CH1. Dane parametry pracy falownika Strumień stojana 0.9 Wb, częstotliwość  $f_{zad} = 50\text{Hz}$ , zabezpieczenie prądowe  $I_{max\_zad} = 150\text{A}$ . Parametry obwodu obciążenia:  $R=2\ \Omega$ ,  $L=70\ \mu\text{H}$  (połączenie w gwiazdę). Napięcie zasilania  $U_{DCin} = 600\text{V}$ . Moc pobierana ze źródła  $P=109.2\ \text{kW}$ .



Rys 27.. Przebiegi: prądu obwodu pośredniczącego CH1, Prądu jednej z 6 faz falownika CH3 i napięcia międzyfazowego CH1. Dane parametry pracy falownika Strumień stojana 0.9Wb, częstotliwość  $f_{zad} = 45\text{Hz}$ , zabezpieczenie prądowe  $I_{max\_zad} = 200\text{A}$ . Parametry obwodu obciążenia:  $R=4/3$ ,  $L=70\ \mu\text{H}$  (połączenie w gwiazdę). Napięcie zasilania  $U_{DCin} = 590\text{V}$ . Moc pobierana ze źródła  $P=129.8\text{kW}$ .



Rys 28.. Przebiegi: prądu obwodu pośredniczącego CH1, Prądu jednej z 6 faz falownika CH3 i napięcia międzyfazowego CH1. Dane parametry pracy falownika Strumień stojana 0.9Wb, częstotliwość  $f_{zad} = 50\text{Hz}$ , zabezpieczenie prądowe  $I_{max\_zad} = 250\text{A}$ . Parametry obwodu obciążenia:  $R=4/3$ ,  $L=70\ \mu\text{H}$  (połączenie w gwiazdę). Napięcie zasilania  $U_{DCin} = 580\text{V}$ . Moc pobierana ze źródła  $P=136.3\text{kW}$ .

## Podsumowanie i wnioski końcowe

Artykuł przedstawia napęd z silnikiem 6-fazowym PMSM oraz eksperymentalnym falownikiem wykonanym w technologii IGBT.

Przeprowadzone badania laboratoryjne omawiane w artykule dotyczą falownika napędowego opracowanego w Łukasiewicz – IEL. Badania zostały przeprowadzone zarówno w środowisku symulacyjnym (PSIM) w którym weryfikowany był algorytm sterowania. Następnie model układu napędowego poprzez badania i analizy MIL weryfikowany został w badaniach SIL i HIL przy zastosowaniu urządzenia i środowiska symulacyjnego HIL. Falownik został opracowany i zbudowany w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytut Elektrotechniki. Przeznaczony jest on dla układów napędowych 3 i 6 fazowych, w układach napędowych większych mocy takich jak napędy autobusowe, samochody osobowe (z napędem o dużej mocy) pojazdy ciężarowe oraz inne pojazdy użytkowe oraz przemysłowe. Opracowany napęd charakteryzuje się następującymi zaletami:

- Duża moc ciągła i chwilowa,
- Kompaktowe wymiary i gabaryty,
- Wysoka dynamika dzięki sterowaniu FOC z podwójną transformacją Parka
- Kontrolowany rozdział prądów pomiędzy dwiema parami trójfazowych falowników zarówno w stanach ustalonych jak też dynamicznych.

Projekt realizowany jest w ramach wewnętrznego projektu w Sieci Badawczej Łukasiewicz, pod tytułem „Polska generacja układów napędowych w zastosowaniu do napędów autobusowych, samochodów osobowych i ciężarowych oraz innych pojazdów użytkowych oraz przemysłowych”. (akronim POLNAPEL).

**Autorzy:** dr inż. Dariusz Świerczyński, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki w Warszawie, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: [dariusz.swierczynski@iel.lukasiewicz.gov.pl](mailto:dariusz.swierczynski@iel.lukasiewicz.gov.pl); mgr. inż. Andrzej Jasiński, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki w Warszawie, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: [andrzej.jasinski@iel.lukasiewicz.gov.pl](mailto:andrzej.jasinski@iel.lukasiewicz.gov.pl); dr inż. Renata Sulima, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki w Warszawie, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: [renata.sulima@iel.lukasiewicz.gov.pl](mailto:renata.sulima@iel.lukasiewicz.gov.pl); mgr. inż. Grzegorz Grochowski, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki w Warszawie, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: [grzegorz.grochowski@iel.lukasiewicz.gov.pl](mailto:grzegorz.grochowski@iel.lukasiewicz.gov.pl); dr inż. Artur Moradewicz, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Elektrotechniki w Warszawie, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: [artur.moradewicz@iel.lukasiewicz.gov.pl](mailto:artur.moradewicz@iel.lukasiewicz.gov.pl); dr inż. Adam Milczarek, Politechnika Warszawska. Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75a, 00-662 Warszawa, E-mail: [adam.milczarek@pw.edu.pl](mailto:adam.milczarek@pw.edu.pl);

## LITERATURA

- [1] Dąbała K., Kaźmierkowski M.P., Converter-Fed Electric Vehicle (Car) Drives – A Critical Review, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2019), nr 9, 1-12
- [2] Janaszek M., Dwusilnikowy napęd bezpośredni dla pojazdów turystycznych, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, (2014), nr 3, 185 -190
- [4] Bernatt J., Glinka T., Converter- Maszyny elektryczne z uzwojeniem 6-fazowym, *Wiadomości Elektrotechniczne*, (2008), nr 12, 14-19
- [5] Typhoon HIL 402, Dokumentacja, [www.typhoon-hil.com/products/hil402](http://www.typhoon-hil.com/products/hil402)
- [6] Mohapatra K.K., Kanchan R.S., Bajju M. R., Tekwani P.N., Gopakumar K., Independent Field-Oriented Control of Two Split-Phase Induction Motors From a Single Six-Phase Inverter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52 (2005), no 5, 1372-1382
- [7] Absar S., Taha W., Emadi A., Efficiency Evaluation of Six-Phase VSI and NSI for 400V and 800V Electric Vehicle Powertrains, *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, (2021), 1 -6
- [8] Feng Y., Liao Y., Ye F., Design of a current controller for symmetrical six-phase fault-tolerant PMSM under fault conditions, *IET Power Electronics*, (2022), 1 -14
- [9] Cisek M., Jarzębowski L., Synchronizacja komutacji tranzystorów z położeniem kątowym wirnika silnika w napędzie IPMSM z blokowym sterowaniem falownikiem, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 10, 136-140
- [10] Jakubiec B., Napęd pojazdu elektrycznego z wielofazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 12, 125-128
- [11] Iwaszkiewicz J., Muc A., Piechowski L., Sterowanie dwupoziomowego pięciofazowego falownika napięcia przy obciążeniu połączonym w gwiazdę, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 2, 125-128