

Układ laboratoryjny napędu z silnikiem PMSM sterowanym z kształtującego napięcie ciągle 3-poziomowego falownika napięcia typu NPC

Streszczenie. W artykule omówiono zagadnienia dotyczące budowy i sterowania napędem z silnikiem PMSM i 3-poziomym falownikiem napięcia z diodami poziomującymi. Opracowany falownik, dzięki zastosowaniu wyjściowego filtra LC, charakteryzuje się sinusoidalnym napięciem wyjściowym. Przedstawiono również bazujący na sprzężeniu od zmiennych stanu dyskretny algorytm sterowania zapewniający uzyskanie sinusoidalnego napięcia wyjściowego o niskiej zawartości harmonicznych w szerokim zakresie pracy napędu. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych potwierdzające poprawne działanie opracowanego układu napędowego.

Abstract. In this paper designing and control process of the drive with PMSM and 3-level neutral point clamped voltage inverter was discussed. Designed inverter, with the help of an output LC filter, provides true sine wave output voltage. Discrete state feedback control algorithm was used in order to obtain sine wave output voltage of the designed inverter with low harmonics content in a wide range of the drive operation. Proper operation of the designed drive was confirmed in simulation as well as experimental test results. (**Laboratory setup of the drive with PMSM controlled by continuous voltage shaping NPC type 3-level voltage inverter.**)

Słowa kluczowe: 3-poziomowy falownik napięcia z diodami poziomującymi, filtr LC, regulator od stanu.

Keywords: 3-level Neutral Point Clamped Inverter, LC Filter, State Feedback Controller.

doi:10.12915/pe.2014.06.31

Wstęp

Powszechnie stosowane w napędach prądu przemiennego 2-poziomowe falowniki napięcia wytwarzają napięcia wyjściowe o dużej stromości narastania. Modułacja szerokości impulsów stosowana do generowania napięcia powoduje, że napięcia wyjściowe przekształtnika mają charakter impulsów prostokątnych. Omawiane rozwiązanie charakteryzuje się dużą zawartością wyższych harmonicznych w przebiegach napięć. Zjawisko to wpływa niekorzystnie na pulsacje momentu elektromagnetycznego zasilanego silnika oraz powoduje wzrost hałasu akustycznego [1].

Zawartość wyższych harmonicznych w napięciu wyjściowym przekształtnika może zostać ograniczona poprzez zastosowanie filtra LC, jednak skuteczna filtracja wymaga stosowania filtrów pasywnych o dużych gabarytach [2].

Zastosowanie falownika 3-poziomowego z wyjściowym filtrem LC umożliwi generowanie sinusoidalnych napięć wyjściowych o niskiej zawartości wyższych harmonicznych w porównaniu do falownika 2-poziomowego [3]. Dzięki temu możliwe jest stosowanie filtrów LC o mniejszych gabarytach [1, 2].

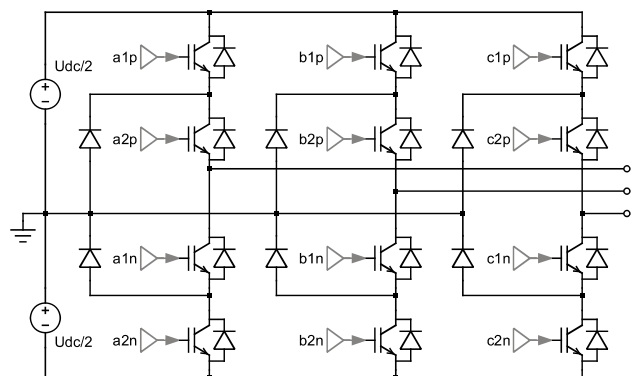
Kształtowanie sinusoidalnego napięcia wyjściowego w szerokim zakresie częstotliwości z zadowalającą dynamiką wymaga stosowania układu regulacji napięcia. Możliwe jest stosowanie kaskadowej struktury regulacji z regulatorami prądu i napięcia typu PI [5]. Odporność na zmiany obciążenia oraz wysoką dynamikę regulacji napięcia można uzyskać stosując sterowanie bazujące na sprzężeniu od zmiennych stanu [6, 7].

W prezentowanym artykule przedstawiono układ laboratoryjny napędu z silnikiem PMSM sterowanym z falownika 3-poziomowego wyposażonego w filtr wyjściowy LC. Zastosowano bazujący na sprzężeniu od zmiennych stanu dyskretny układ regulacji odpowiedzialny za kształtowanie sinusoidalnego napięcia wyjściowego. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych opracowanego układu laboratoryjnego.

3-poziomowy falownik napięcia

Przekształtniki wielopoziomowe, w porównaniu do powszechnie stosowanych przekształtników dwupoziomowych, cechują się następującymi zaletami [8]: napięcia wyjściowe charakteryzują się niższym poziomem zniekształceń oraz niższą stromością narastania napięcia, możliwa jest praca przy niższych częstotliwościach przełączania.

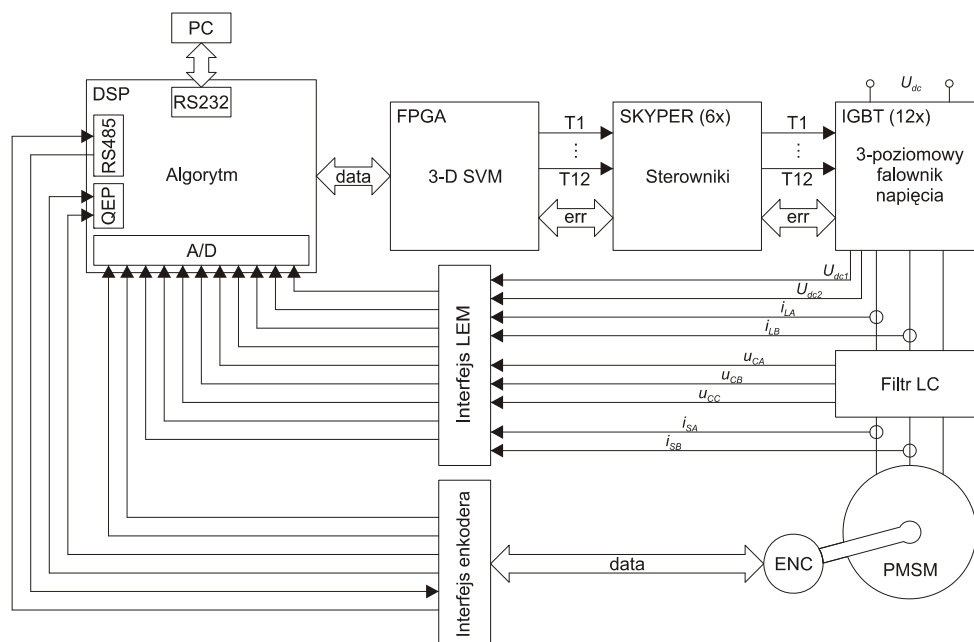
Wśród powszechnie stosowanych topologii przekształtników wielopoziomowych popularna jest opracowana w 1980 roku struktura przekształtnika 3-poziomowego z diodami poziomującymi (ang. NPC PWM inverter) [3]. Topologię 3-poziomowego falownika napięcia z diodami poziomującymi przedstawiono na rysunku 1. Omawiany falownik na potrzeby badań symulacyjnych został zaimplementowany w środowisku symulacyjnym PLECS.



Rys. 1. Topologia falownika 3-poziomowego

Falownik 3-poziomowy zbudowano przy użyciu modułów IGBT firmy Semikron (SK50MLI066) przeznaczonych do przekształtników 3-poziomowych z diodami poziomującymi. W jednej strukturze znajduje się kompletna gałąź zawierająca 4 łączniki energoelektroniczne oraz 2 diody poziomujące.

Sterowanie łączników energoelektronicznych falownika zrealizowano przy użyciu sterowników firmy



Rys.2. Schemat układu napędowego z 3-poziomym falownikiem napięcia

Semikron (Skyper 32Pro R). Ze względu na możliwośćysterowania tylko 2 tranzystorów za pomocą jednego sterownika, w każdej gałęzi zastosowano po 2 sterowniki. Zastosowane sterowniki są wyposażone w układy zabezpieczeń obejmujące m.in.: ochronę nadnapięciową, dynamiczne zapobieganie zwarciom.

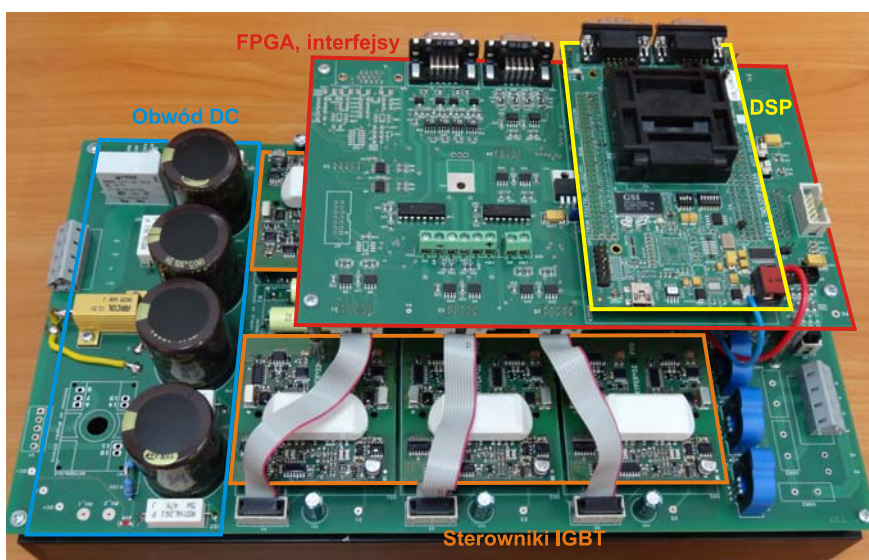
Większa liczba łączników energoelektronicznych zastosowana w omawianym przekształtniku wymaga zastosowania bardziej rozbudowanych metod modulacji, w porównaniu do przekształtnika 2-poziomowego. W prezentowanym rozwiązaniu zastosowano omówioną w [9] modulację 3-D wektora przestrzennego napięcia ze względu na niskie tętnienia prądu, relatywnie łatwą implementację oraz dobre wykorzystanie napięcia obwodu DC. Modulator został zaimplementowany w układzie programowalnym (Spartan XC6SLX9).

Opracowany falownik napięcia został wyposażony w układy pomiarowe prądów fazowych (Lem LTS 15-NP) oraz napięć obwodu pośredniczącego (Lem LV 25-P). Podczas projektowania obwodów pomiarowych uwzględniono możliwość pomiaru napięć i prądów wyjściowych filtra LC odpowiedzialnego za kształtowanie sinusoidalnych napięć zasilających silnik PMSM.

Zastosowanie opracowanego falownika 3-poziomowego do sterowania PMSM wymagało opracowania interfejsu dla czujnika położenia kąowego wału silnika. Omawiany interfejs jest przeznaczony do współpracy z enkoderami pracującymi w standardzie HIPERFACE.

Sterownik falownika został zbudowany przy użyciu przeznaczonego do układów napędowych procesora zmiennoprzecinkowego TMS320F28335 firmy Texas Instruments. Zaimplementowany w procesorze algorytm, na podstawie aktualnych wartości wielkości elektrycznych i mechanicznych, wyznacza wartości sygnałów sterujących. Czas wykonywania algorytmu regulacji wynosi $T_s = 100 \mu s$. Obliczone wartości sygnałów sterujących są przesyłane do układu programowalnego przy użyciu 16-bitowej magistrali równoległej. Układ FPGA jest obsługiwany przez procesor jako pamięć zewnętrzna. Czas opóźnienia między wykonaniem pomiarów przez przetwornik analogowo-cyfrowy a aktualizacją sygnałów sterujących tranzystorami wynosi $T_d = 50 \mu s$. Pomiary są wykonywane co $100 \mu s$.

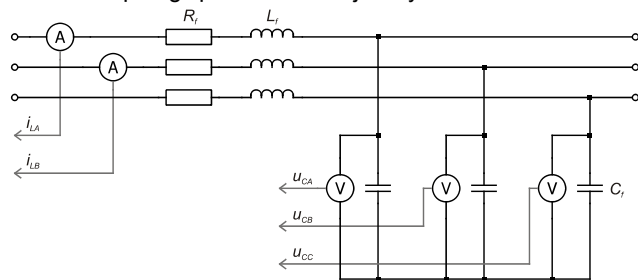
Schemat ideowy oraz fotografię opracowanego falownika 3-poziomowego przedstawiono na rysunku 2 oraz na rysunku 3.



Rys.3. Falownik 3-poziomowy

Filtr LC

Opracowany przekształtnik wyposażono w wyjściowy filtr LC o topologii przedstawionej na rysunku 4.



Rys.4. Topologia filtra LC

Podczas projektowania filtra LC wzięto po uwagę skuteczność tłumienia tętnień prądów fazowych, częstotliwość rezonansową filtra oraz straty mocy wydzielanej na dławikach. Zastosowanie rdzeni typu C ze stopu amorficznego METGLAS POWERLITE [10] pozwoliło na zmniejszenie strat mocy wydzielanej na dławikach oraz na zredukowanie masy i gabarytów filtra LC. Wyznaczone na podstawie [10] całkowite straty mocy wydzielanej na dławikach filtra dla częstotliwości kluczkowania $f_s = 10$ kHz oraz znamionowej wartości prądu silnika $I_{sn} = 5,8$ A wynoszą:

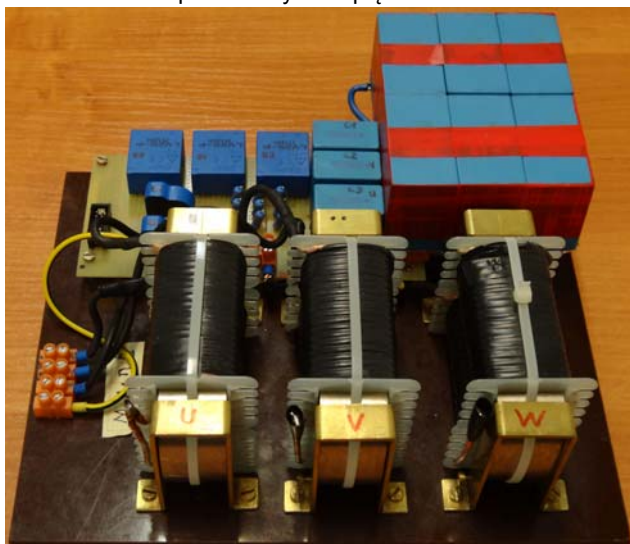
$$(1) P_{L_f} = 3 \times (P_m + P_r) = 3 \times (1,7 + 8) = 3 \times 9,7 = 29,1 \text{ W}$$

gdzie: P_m – straty mocy na uzwojeniu, P_r – straty mocy w rdzeniu. Parametry filtra LC zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry filtra LC

Parametr	Wartość	Jednostka
L_f	2,1	mH
C_f	58	uF
R_f	0,1	Ω

Rysunek 5 przedstawia fotografię omawianego filtra LC wraz z układami pomiarowymi napięć na kondensatorach.



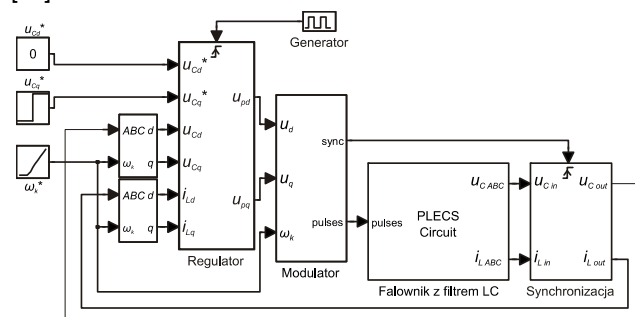
Rys.5. Filtr LC

Kształtowanie napięć wyjściowych filtra LC

Zastosowanie sterowalnego falownika 3-poziomowego z wyjściowym filtrem LC umożliwia ograniczenie tętnień momentu elektromagnetycznego zasilanej maszyny prądu przemiennego [11]. Kształtowanie sinusoidalnego napięcia wyjściowego w szerokim zakresie pracy falownika jest realizowane przy użyciu bazującego na sprzężeniu od zmiennych stanu regulatora dyskretnego, wykorzystującego informacje pochodzące z dodatkowych czujników

pomiarowych (napięcia kondensatorów i prądy w indukcyjnościach filtra). Schemat omawianego układu regulacji napięcia – URN przedstawiono na rysunku 6.

Dyskretny URN został zrealizowany w środowisku Matlab/Simulink z wykorzystaniem pakietu PLECS. W widocznym na rysunku 6 bloku modulatora zaimplementowano modulację sinusoidalną z dwoma przesuniętymi w poziomie trójkątnymi sygnałami nośnymi [12].



Rys.6. Schemat blokowy układu regulacji napięcia

Zastosowanie dodatkowego sygnału trzeciej harmonicznej o amplitudzie 1/4 w procesie modulacji [13] zmniejszyło zawartość wyższych harmonicznych w prądzie wyjściowym oraz zrównało liniowy obszar pracy modulatora PWM z zakresem zaimplementowanego w układzie rzeczywistym modulatora 3D-SVM [9].

Uniknięcie wykonywania pomiarów w chwilach przełączania tranzystorów wymagało zastosowania bloku synchronizacji zapewniającego realizację pomiarów w połowie okresu generacji napięć falownika.

Model matematyczny filtra LC charakteryzuje się występowaniem sprzężeń skrośnych oraz niestacjonarnością – w opisie występują składniki zależne od aktualnej wartości prędkości wirowania układu współrzędnych [6, 14]. Właściwości odprzegające zaproponowanej struktury regulacji bazującej na sprzężeniu od zmiennych stanu powodują, że stosowanie dodatkowego układu odprzegającego nie jest konieczne. Szczegółowe informacje dotyczące syntezy bazującego na sprzężeniu od zmiennych stanu układu regulacji napięcia wyjściowego przekształtnika zamieszczono w [14].

Wartości macierzy wagowych niezbędnych do zaprojektowania dyskretnego regulatora liniowo-kwadratowego dobrano metodą prób i błędów uwzględniając możliwie dużą dynamikę URN oraz eliminowanie uchybu ustalonego wektora przestrzennego napięć wyjściowych filtra dla skokowej zmiany wartości zadanej. Zastosowane w procesie projektowania dyskretnego regulatora liniowo-kwadratowego macierze wagowe mają postać:

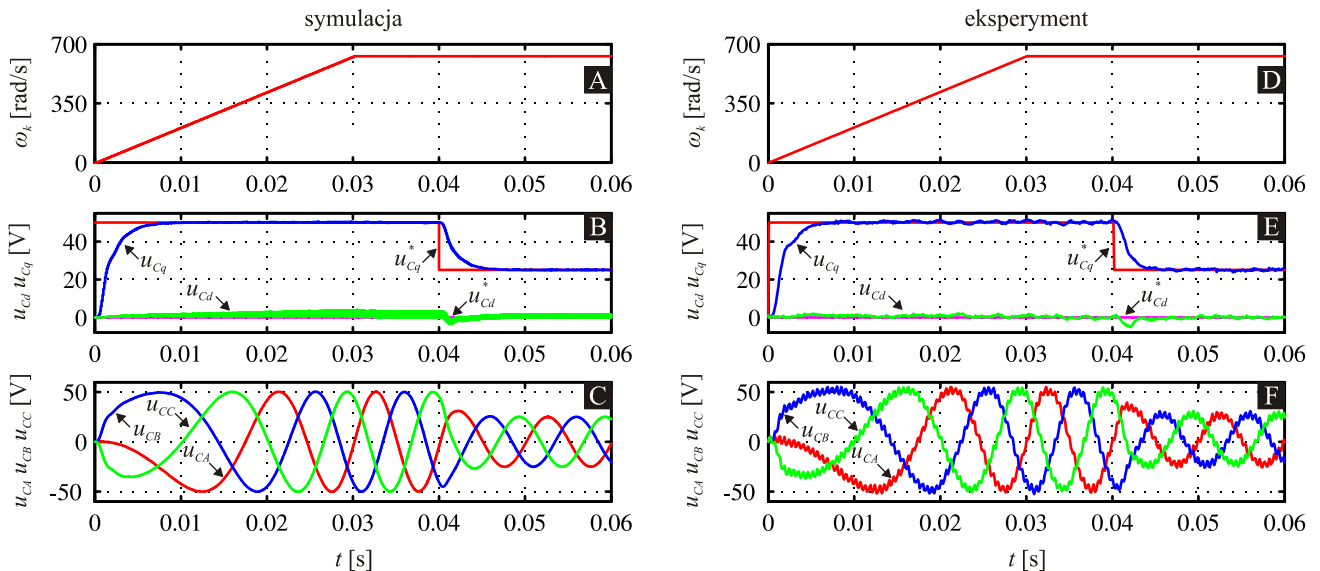
$$(2) \quad Q = \text{diag}([q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6]),$$

$$R = \text{diag}([r_1 \ r_2]),$$

gdzie: $q_1 = q_2 = 1 \times 10^{-2}$, $q_3 = q_5 = 1 \times 10^{-1}$, $q_4 = q_6 = 1 \times 10^5$, $r_1 = r_2 = 6 \times 10^5$.

Ze względu na niestacjonarność modelu matematycznego filtra LC wartości wzmacnień dyskretnego regulatora stanu wyznaczano w punktach pracy określonych przez aktualną wartość ω_k korzystając z optymalizacji liniowo-kwadratowej [15].

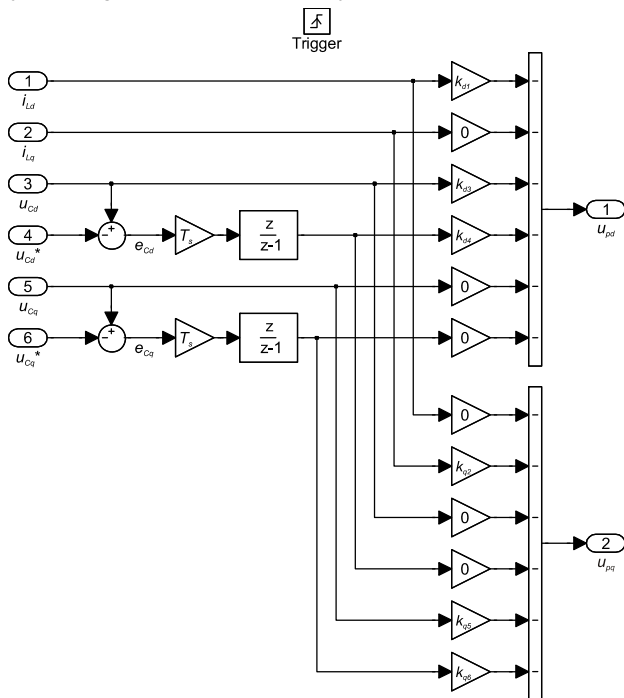
Analiza otrzymanych wartości wzmacnień regulatora oraz wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych wykazały, że wzmacnienia regulatora zależne od ω_k mają pomijalny wpływ na proces kształtowania napięć



Rys.8. Odpowiedzi: symulacyjne (A, B, C) i eksperymentalne (D, E, F) układu regulacji napięcia na skokową zmianę napięcia zadanego u_{cd}^* oraz narastającą liniowo prędkość wirowania układu współrzędnych ω_k przy zerowej wartości zadanego napięcia u_{cd}^* wyjściowych filtra LC. Obliczone przy pomocy funkcji *lqr* środowiska Matlab wartości wzmacnień dyskretnego regulatora dla macierzy wagowych (2) oraz modelu przekształtnika z filtrem LC o parametrach zamieszczonych w tabeli 1 mają postać:

$$(3) \quad K = \begin{bmatrix} k_{d1} & 0 & k_{d3} & k_{d4} & 0 & 0 \\ 0 & k_{q2} & 0 & 0 & k_{q5} & k_{q6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,088 & 0 & 0,0052 & 11,14 & 0 & 0 \\ 0 & 0,088 & 0 & 0 & 0,0052 & 11,14 \end{bmatrix}$$

Schemat blokowy opracowanego regulatora dyskretnego przedstawiono na rysunku 7.



Rys.7. Schemat blokowy regulatora dyskretnego

Badania napędu z PMSM i falownikiem 3-poziomym

Badania opracowanego napędu z silnikiem PMSM sterowanym z kształtującego napięcie ciągle falownika 3-

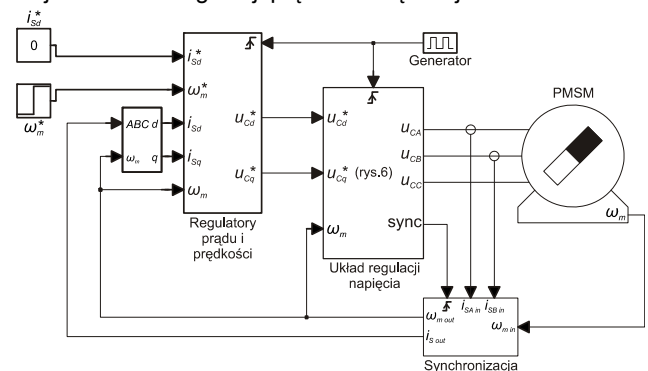
Praca falownika 3-poziomego z filtrem LC bez obciążenia

Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi symulacyjne oraz eksperymentalne uzyskane dla opracowanego układu regulacji napięcia. Zmieniająca się liniowo prędkość wirowania układu współrzędnych ω_k powoduje zmianę częstotliwości sinusoidalnych napięć fazowych u_{CA} , u_{CB} , u_{CC} . Opracowany układ regulacji napięcia zapewnia stabilną pracę falownika 3-poziomego z filtrem LC w szerokim zakresie zmian prędkości kątowej.

Dyskretny regulator od stanu właściwie utrzymuje zerową wartość składowej d wektora przestrzennego napięcia wyjściowego filtra LC oraz zapewnia regulację bez uchybu ustalonego i przeregulowania składowej q wektora przestrzennego napięcia wyjściowego filtra LC dla skokowej zmiany wartości zadanej.

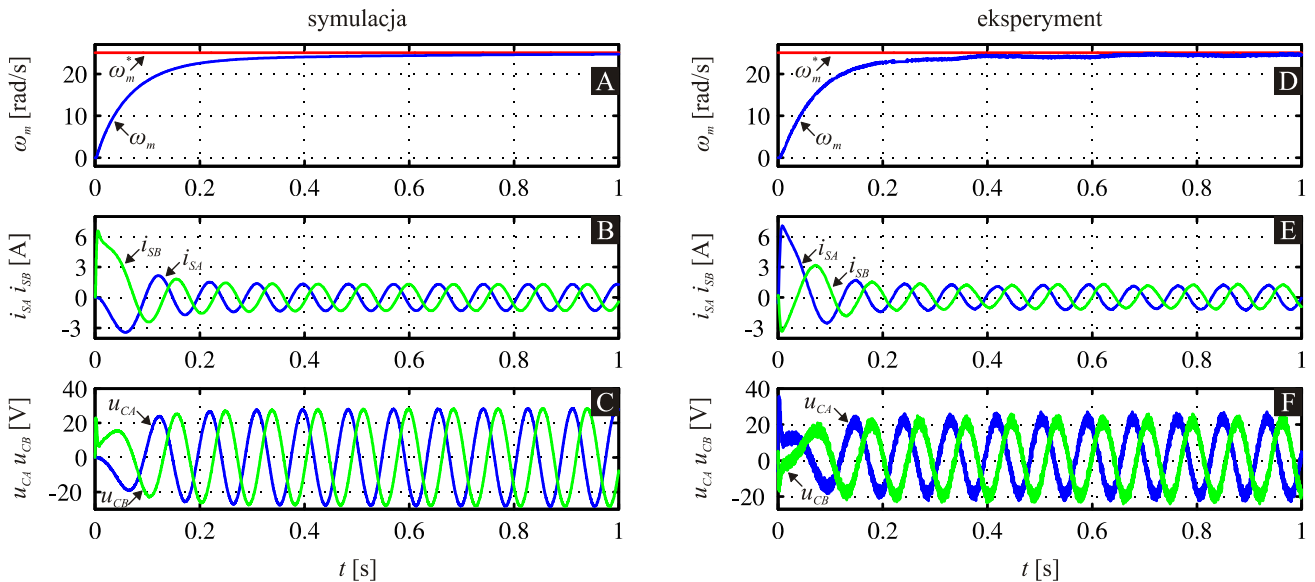
Praca silnika PMSM sterowanego z falownika 3-poziomego z filtrem LC

Na rysunku 9 przedstawiono schemat bazującego na metodzie FOC z regulatorem stanu kształtującym napięcie stojana układu regulacji prędkości kątowej silnika PMSM.



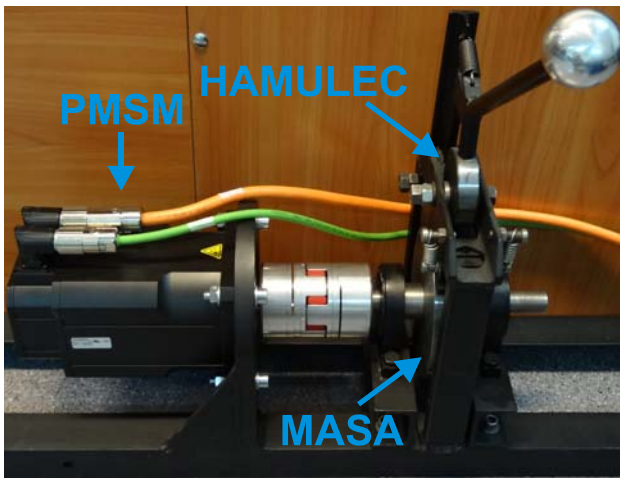
Rys.9. Schemat blokowy układu regulacji prędkości PMSM

Silnik jest zasilany z opracowanego falownika generującego napięcia sinusoidalne. Regulację prędkości



Rys.11. Odpowiedzi: symulacyjne (A, B, C) i eksperymentalne (D, E, F) układu regulacji prędkości PMSM na skokową zmianę prędkości zadanej ω_m przy zerowej wartości zadanej prądu i_{sd}^* i stałej wartości zadanej momentu obciążenia $m_{op} \approx 2$ Nm

kątowej oraz prądu silnika zrealizowano przy użyciu klasycznej, kaskadowej struktury regulacji z regulatorami typu PI. Zastosowane zostało sterowanie polowzororientowane z zerową wartością składowej d wektora przestrzennego prądu silnika. Parametry silnika PMSM oraz dodatkowej wirującej masy o momencie bezwładności J_d zamieszczono w tabeli 2. Rysunek 10 przedstawia fotografię omawianego stanowiska z silnikiem PMSM i wirującą masą.



Rys.10. Fotografia układu napędowego

Na rysunku 11 przedstawiono przebiegi symulacyjne oraz eksperymentalne uzyskane dla układu napędowego zasilanego z opracowanego przekształtnika 3-poziomowego z filtrem LC. Badania przeprowadzono przy stałym obciążeniu wału silnika momentem oporowym

Tabela 2. Parametry układu napędowego

Parametr	Wartość	Jednostka
L_s	9,5	mH
R_s	1,05	Ω
K_t	1,64	Nm/A
J_m	$6,2 \times 10^{-4}$	kgm ²
B_m	$1,4 \times 10^{-3}$	Nms/rad
p	3	
J_d	$2,45 \times 10^{-2}$	kgm ²

$m_{op} \approx 2$ Nm. Odpowiedzi układu na skokowe zmiany prędkości kątowej widoczne są na rysunku 11.A oraz 11.D.

Opracowany układ regulacji napięcia z dyskretnym regulatorem od stanu zapewnia sinusoidalne przebiegi prądów silnika (rysunek 11.B i 11.E) oraz napięć fazowych (rysunek 11.C i 11.F) w stanie ustalonym.

Wnioski

W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące budowy i sterowania napędem z silnikiem PMSM i 3-poziomowym falownikiem napięcia z diodami poziomującymi. Falownik został wyposażony w filtr LC umożliwiający uzyskanie sinusoidalnych napięć wyjściowych.

Kształtowanie sinusoidalnego napięcia wyjściowego w szerokim zakresie pracy napędu zrealizowano przy użyciu bazującego na sprzężeniu od zmiennych stanu regulatora dyskretnego. Opracowany układ regulacji wykorzystuje informacje o wartościach prądów w indukcyjnościach oraz o wartościach napięć na kondensatorach filtra LC.

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych potwierdzają utrzymywanie zerowej wartości składowej d wektora przestrzennego napięcia wyjściowego filtra LC oraz regulację bez uchybu ustalonego i przeregulowania składowej q wektora przestrzennego napięcia wyjściowego filtra LC dla skokowej zmiany wartości zadanej.

Planowane jest polepszenie właściwości dynamicznych opracowanego układu regulacji napięcia poprzez wprowadzenie dodatkowych sprzężeń w przód od sygnałów napięć zadanych oraz prądów obciążenia.

Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach grantu badawczego numer 6636/B/T02/2011/40 (2011 - 2013) oraz działalności statutowej Instytutu Fizyki UMK

LITERATURA

- [1] Steinke J.K., Use of an LC filter to achieve a motor-friendly performance of the PWM voltage source inverter, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14 (1999), n.3, 649–654
- [2] Teichmann R., Bernet S., A comparison of three-level converters versus two-level converters for low-voltage drives, traction, and utility applications, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41 (2005), n.3, 855-86

- [3] Nabae A., Takahashi I., Akagi H., A new neutral-point-clamped pwm inverter, *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-17 (1981), n.5, 518-523
- [4] Kojima M., Hirabayashi K., Kawabata Y., Ejiogu, E.C., Kawabata T., Novel vector control system using deadbeat-controlled PWM inverter with output LC filter, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40 (2004), n.1, 162-169
- [5] Koczara W., Seliga R., High quality sinusoidal voltage inverter for variable speed AC drive systems, *The Third International Power Electronics and Motion Control Conference, IPENC 2000*, 3 (2000), 1181-1184
- [6] Pawlikowski A., Grzesiak L., Vector-controlled three-phase voltage source inverter producing a sinusoidal voltage for AC motor drives, *The International Conference on "Computer as a Tool", EUROCON 2007*, (2007), 1902-1909
- [7] Tarczewski T., Grzesiak L.M., State feedback control of the PMSM servo-drive with sinusoidal voltage source inverter, *15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, (2012), DS2a.6-1-DS2a.6-6
- [8] Rodriguez, J., Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng, Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49 (2002), n.4, 724-738
- [9] Lopez O., Alvarez J., Doval-Gandoy J., Freijedo F.D., Nogueiras A., Lago A., Penalver C.M., Comparison of the FPGA Implementation of Two Multilevel Space Vector PWM Algorithms, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (2008), n.4, 1537-1547
- [10] Powerlite inductor cores, *Technical Bulletin*, www.hitachimetals.com, ref:plc05092011
- [11] Tarczewski T., Grzesiak L.M., PMSM fed by 3-level NPC sinusoidal inverter with discrete state feedback controller, *15th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'13-ECCE Europe*, (2013), P.1 – P.9
- [12] Rodriguez J., Bernet S., Steimer P.K., Lizama I.E., A survey on Neutral-Point-Clamped inverters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (2010), n.7, 2219-2230
- [13] Kazmierkowski M.P., Krishnan R., Blaabjerg F., *Control in Power Electronics, Selected Problems*, Academic Press, 2002
- [14] Tarczewski T., Grzesiak L.M., Sterowanie od stanu serwonapędem z silnikiem PMSM zasilanym z przekształtnika o sinusoidalnym napięciu wyjściowym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), no.4b, 252-258
- [15] Tewari A., *Modern control design: with MATLAB and SIMULINK*, Chichester: John Wiley and Sons, (2005)

Autorzy: Prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: lmg@isep.pw.edu.pl;
 dr inż. Tomasz Tarczewski, E-mail: ttarczewski@fizyka.umk.pl;
 mgr inż. Andrzej Wawrzak, E-mail: awawrzak@fizyka.umk.pl;
 dr inż. Kazimierz Karwowski, E-mail: kkarwowski@fizyka.umk.pl;
 mgr inż. Krystian Erwiński, E-mail: erwin@fizyka.umk.pl;
 Uniwersytet Mikołaja Kopernika, w Toruniu, Instytut Fizyki, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, ul. Grudziądzka 5, 87-100 Toruń