

# Zastosowanie metody SHE do kształtowania składowych harmoniczných prądu zasilania i momentu w układzie napędowym z trójpoziomym falownikiem NPC

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych oraz laboratoryjnych zastosowania metody SHE w celu kształtowania widma prądu obwodu pośredniczącego i momentu w układzie napędowym z trójpoziomym falownikiem NPC. W rozdziale teoretycznym przedstawiono zarys zjawiska powstawania harmoniczných prądu obwodu pośredniczącego i momentu w układach napędowych zasilanych z falowników. Rozdziały opisujące badania symulacyjne i laboratoryjne prezentują wyniki świadczące o użyteczności metody SHE.

**Abstract.** The article presents the simulation and laboratory test results for applying the SHE method to shape the current spectrum of the DC-link circuit and torque in a drive system with a three-level NPC inverter. The theoretical chapter outlines the phenomenon of the formation of DC-link circuit current and torque harmonics in drive systems powered by inverters. The chapters describing the simulation and laboratory tests present the results proving the usefulness of the SHE method in the discussed problem. (**Application of the SHE method to shaping the harmonic components of the supply current and torque in a drive system with a three-level NPC inverter**)

**Słowa kluczowe:** SCPWM, SHE, falownik trójpoziomowy NPC, redukcja składowych momentu.

**Keywords:** SCPWM, SHE, 3level NPC inverter, reduction in selected torque harmonics.

## Wstęp

Zmiana sposobu zasilania napędów elektrycznych, która wystąpiła na skutek wprowadzenia urządzeń energoelektronicznych, w sposób zdecydowany poprawiła sprawność energetyczną napędów oraz pozwoliła na uzyskanie zdecydowanie lepszych właściwości dynamicznych. Głównym elementem tej rewolucji stały się układy falowników, w których sterowanie polega na permanentnym załączaniu i wyłączaniu tranzystorów. Konsekwencją takiego działania jest prawie prostokątny kształt napięć zasilających silnik. Tam gdzie mamy do czynienia z układami o małych mocach i niewielkich napięciach możliwe jest zastosowanie relatywnie dużych częstotliwości przełączeń co w połączeniu z indukcyjnym charakterem maszyn elektrycznych pozwala na prawie doskonale kształtowanie prądu, a co za tym idzie i momentu wytwarzanego przez silnik.

Im większe napięcia zasilania i moce urządzeń, tym trudniej uzyskać wystarczająco dużą częstotliwość przełączeń. Wynika to głównie ze strat w tranzystorach oraz z konieczności dostosowania częstotliwości pracy do parametrów używanych łączników energoelektronicznych. Innym problemem w przypadku urządzeń przeznaczonych do pracy przy napięciach przekraczających wartości kilku kV staje się brak stosownych tranzystorów. Jednym z rozwiązań umożliwiających ominięcie tego problemu jest użycie falowników o strukturach wielopoziomowych. W tym wypadku występują jednocześnie dwie korzyści: uzyskujemy możliwość zastosowania tranzystorów o napięciach blokowania niższych niż napięcie zasilania oraz możemy obniżyć ilość przełączeń przypadających na jeden tranzystor, czyli zmniejszyć jego straty.

W przypadku napędów o mocach przekraczających 1 MW, które wymagają do zasilania napięć od 4 do 15 kV, nawet zastosowanie struktur wielopoziomowych wymusza ograniczenie częstotliwości kluczowania do bardzo niskich wartości, dochodzących w skrajnym przypadku do minimalnych ilości przełączeń kształtujących pierwszą harmoniczną napięcia zasilającego silnik (Sixstep) [1]. Wiąże się to z bardzo niekorzystnym kształtem prądu i pulsacjami momentu wytwarzanego w silniku.

Jednym z poważnych efektów ograniczenia częstotliwości przełączania jest pojawienie się niepożądanych harmoniczných w prądzie zasilania. W

przypadku pojazdów kolejowych nabiera to szczególnie dużego znaczenia ponieważ w obwodach torowych zainstalowane są systemy bezpieczeństwa i automatyki ruchu kolejowego [2]. Bardzo restrykcyjne normy wymuszają potrzebę redukcji bądź eliminacji składowych prądu zasilania w zakresie pewnych częstotliwości nawet do wartości kilkudziesięciu mA.

Innym z ważnych zjawisk występujących w układach napędowych z ograniczoną częstotliwością przełączeń jest możliwość powstawania rezonansu mechanicznego wywołanego niskimi harmonicznymi prądu zasilającego silnik [3–7]. Jest wiele prac poświęconych tematyce redukcji bądź eliminacji konkretnych rzędów harmoniczných [8–12].

W przypadku układów napędowych o zmiennych prędkościach, w których harmoniczne prądu i momentu zmieniają się wraz ze zmianą prędkości, konkretne harmoniczne również mają zmienną częstotliwość. W tej sytuacji eliminacja wybranego rzędu harmoniczných nie pozwala na uniknięcie rezonansu, ani na spełnienie restrykcyjnych norm kolejowych dotyczących prądu zasilającego pojazd trakcyjny.

W pracy [13] przedstawiono mechanizm powstawania harmoniczných momentu w napędach zasilanych z falowników tranzystorowych. Zauważono tutaj, że  $n$ -ta harmoniczna momentu powstaje z  $n-1$  oraz  $n+1$  harmoniczných napięcia zasilania silnika.

Prace [14–18] zostały poświęcone optymalizacji harmoniczných prądu obwodu pośredniczącego, harmoniczných prądu fazowego dla dwu i trójpoziomych falowników napięciowych zasilających napędy trakcyjne. W pracach tych zaproponowano metodę Selective Harmonic Elimination and Mitigation (SHEAM), która polega na połączeniu metody SHE umożliwiającej eliminację wybranych harmoniczných z metodą SHM pozwalającą złagodzić pewne harmoniczne kosztem innych, w zakresie których nie są stawiane krytyczne wymagania.

Również praca [19] została poświęcona metodzie SHE w kontekście trójpoziomowego falownika napięciowego.

W pracach [21–23] zaprezentowane różne strategie sterowania carrier-based PWM, skupiające się na minimalizacji wybranych harmoniczných momentu silnika indukcyjnego zasilanego z falowników dwu- i trójpoziomowych

Większość z przedstawionych prac zajmuje się analizą, redukcją lub eliminacją wybranych harmonicznych w celu ograniczenia strat, poprawy jakości działania urządzeń bądź spełnienia norm. W niniejszym artykule została przedstawiona koncepcja wykorzystania metody selektywnej eliminacji składowych prądu zasilania lub momentu w silniku asynchronicznym zasilanym z trójfazowego falownika NPC.

### Wykorzystanie metody SHE w celu redukcji wybranych składowych prądu zasilania i momentu

Efektom działania metod modulacji współczynnika wypełnienia impulsów jest pojawienie się określonego ciągu sygnałów, które odpowiadają za załączanie i wyłączenie tranzystorów. Za wartości logiczne tych sygnałów odpowiada czasowo-licznikowy automat stanów. Podobnie uzyskuje się zmodulowany sygnał w układach, wykorzystujących modulację wektorową. W tym wypadku mechanizm jest nieco bardziej skomplikowany, bo wymaga, poza samymi układami czasowo – licznikowymi, zastosowania formuł matematycznych. W obu tych rozwiązaniach wielkością wejściową jest pożądana wartość napięcia (moduł i częstotliwość lub składowe wektora). Charakterystyczną cechą obu metod jest prosta realizacja sprzętowa i jednoznaczne odwzorowanie zadanego napięcia na ciąg impulsów sterujących tranzystorami. W rozwiązaniu zaproponowanym przez autorów mechanizm wyznaczania chwil, odpowiedzialnych za załączanie i wyłączenie tranzystorów jest zupełnie inny. Głównym założeniem przedstawionej metody jest wyznaczenie, dla każdej pary wielkości zadanych modułu napięcia i jego częstotliwości, takiego ciągu impulsów, który z jednej strony zapewni realizację pierwszej harmonicznej napięcia, a z drugiej strony pozwoli na spełnienie innych kryteriów, jakimi mogą być na przykład eliminacja wybranych harmonicznych prądu zasilania lub momentu w silniku. Proponowana metoda jest o wiele bardziej skomplikowana od tradycyjnych metod modulacji. Wymaga bowiem wyznaczenia odpowiednich chwil załączania i wyłączenia tranzystorów (zwanymi kątami przełączeń), spośród wszystkich możliwości dla danego punktu pracy. W dalszej części rozdziału przedstawiono dwa przykłady realizacji procesu znajdowania optymalnego zestawu chwil przełączeń. W obu tych przypadkach proces jest złożony i wymaga użycia różnych metod optymalizacji. Na szczęście skomplikowany algorytm wyboru „kątów przełączeń” jest wykonywany tylko raz na etapie projektowania układu. Realizacja techniczna zaproponowanego rozwiązania wymaga, w porównaniu do tradycyjnych metod, jedynie zarezerwowania dużych obszarów pamięci na przechowywanie stabilizowanych wartości kątów przełączeń.

Optymalizacja harmonicznych prądu zasilania wymaga przeprowadzenia analizy jego powstawania w trakcie pracy falownika. Prąd w każdej z faz silnika zachowuje ciągłość i zwykle ma kształt sinusoidy z nałożonym przebiegiem trójkątnym. Ze względu na proces komutacji i indukcyjny charakter obciążenia, prąd każdej gałęzi falownika składa się z fragmentów o kształcie zbliżonym do trapezoidalnego. Prąd obwodu pośredniczącego falownika jest sumą prądów gałęzi poszczególnych faz a to oznacza, że ma złożony charakter. Analiza widma częstotliwościowego prądu obwodu pośredniczącego jest zagadnieniem bardzo trudnym i wymaga wykonania operacji splotu w dziedzinie częstotliwości, pomiędzy funkcją przełączającą a prądem poszczególnych faz układu napędowego. Efektom wykonania skomplikowanych obliczeń jest uzyskanie formuły opisującej zawartość harmonicznych prądu obwodu pośredniczącego, odpowiadających konkretnemu sposobowi sterowania. O wiele bardziej złożonym

procesem jest znalezienie optymalnego sterowania przy znanym założeniu, dotyczącym zawartości harmonicznych. Aby rozwiązać ten problem autorzy proponują zastosowanie optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu roju [16], dla którego argumentami wejściowymi są: wybrana częstotliwość fundamentalna, ograniczenie na spektrum częstotliwościowe prądu obwodu pośredniczącego oraz zapewnienie kryterium symetrii. Wynikiem działania algorytmu jest uzyskanie kątów przełączeń zapewniających spełnienie powyższych wymogów.

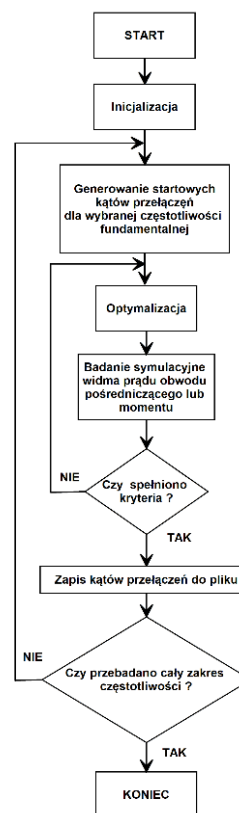
W zbliżony sposób autorzy proponują rozwiązać problem poszukiwania kształtu fali napięciowej, pozwalającego na redukcję wybranych harmonicznych momentu silnika.

Moment elektromagnetyczny w silniku powstaje na skutek oddziaływania strumieni wirnika i stojana. Podstawowe wyrażenie określające jego wartość dane jest wzorem:

$$(1) \quad T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} |\bar{\psi}_s| \times |\bar{\psi}_r|$$

gdzie : p – liczba par biegunów,  $L_m$ - indukcyjność wzajemna,  $L_s$ - indukcyjność uzwojeń stojana,  $L_r$ - indukcyjność uzwojeń stojana,  $\psi_s$ - strumień związany ze stojanem,  $\psi_r$ - strumień związany z wirnikiem a wszystkie wartości są chwilowe. Przedstawiona zależność mimo pozornie prostej postaci jest w rzeczywistości trudna do bezpośredniego wykorzystania w celu określenia sposobu wytwarzania napięcia w falowniku i wpływu tego napięcia na powstawanie harmonicznych prądu w obwodzie zasilania i momentu w silniku. Z tego powodu autorzy proponują rozwiązanie które bazuje na procesie optymalizacji wyboru kątów przełączeń które w sposób jednoznaczny wpływają na spektrum harmonicznych prądu zasilania i momentu.

Ogólny schemat blokowy programu optymalizującego kąty przełączeń w zależności od narzuconych warunków brzegowych przedstawia rysunek 1.

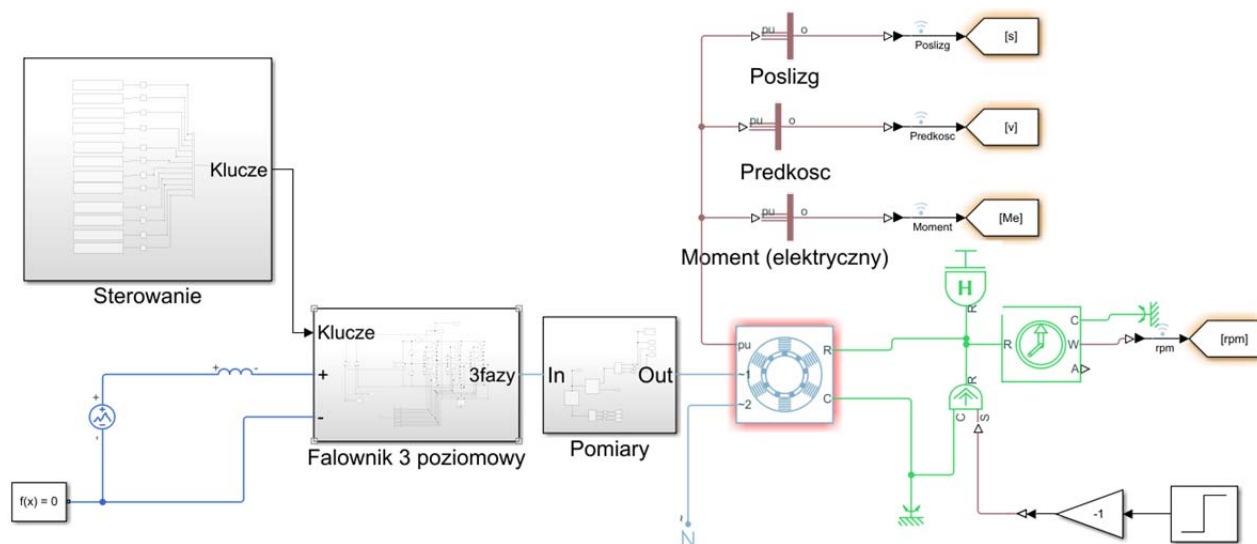


Rys.1. Schemat blokowy programu poszukującego pożądanego kąty przełączeń.

## Badania symulacyjne układu napędowego z trójpoziomym falownikiem NPC

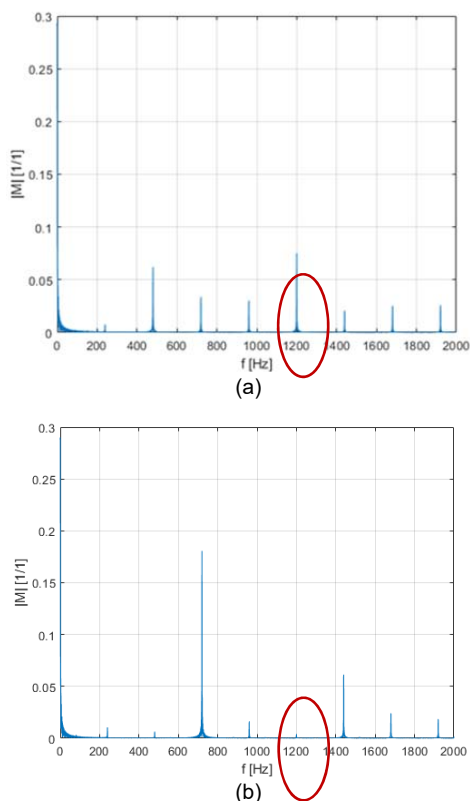
Badania symulacyjne przeprowadzono przy użyciu modelu matematycznego trójpoziomego falownika w konfiguracji NPC i silnika indukcyjnego stworzonego w środowisku Matlab/Simulink. Rysunek 2 przedstawia wygląd całego modelu symulacyjnego.

Zaproponowany w ramach artykułu modulator SHE jest zrealizowany przy użyciu tablic kątów przełączeń, które



Rys.2. Model symulacyjny w środowisku Matlab/Simulink

Na rysunku 3 zaprezentowano zestawienie widm momentu dla metody klasycznej modulacji SCPWM (Sawtooth Carrier-Based PWM) oraz SHE dla przykładowej częstotliwości 40 Hz, w której występowała niepożądana składowa dla częstotliwości 1200 Hz.



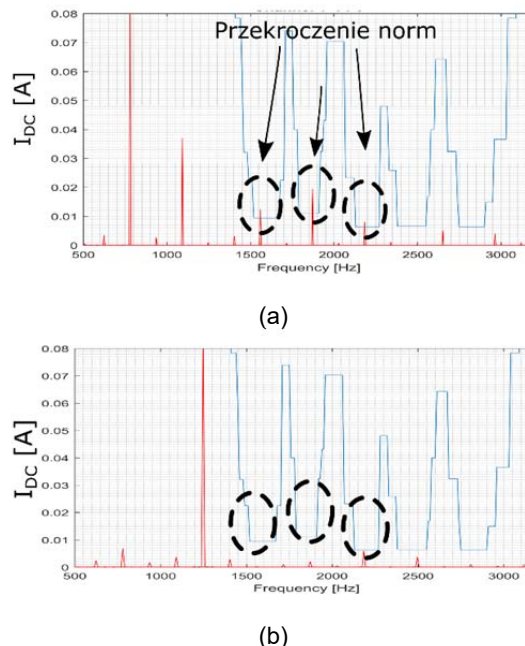
Rys.3. Wykresy widm częstotliwościowych momentu elektromagnetycznego. Rysunek (a) 40 Hz dla metody SCPWM, rysunek (b) 40 Hz dla metody SHE

zostały wyznaczone na etapie badań wstępnych w wyniku działania algorytmu optymalizacyjnego.

Efektom zastosowania wyżej opisanej metody modulacji napięcia jest uzyskanie pożądanego spektrum harmonicznych momentu i prądu obwodu pośredniczącego, poprzez możliwość eliminacji wybranej częstotliwości, występującej w sygnale momentu prądu obwodu pośredniczącego.

Z analizy powyższych rysunków wynika że metoda SHE pozwala na skuteczną eliminację wybranej częstotliwości występującej w widmie momentu. (w omawianym przypadku jest to 1200 Hz).

Na rysunku 4 zaprezentowano zestawienie widm prądu obwodu pośredniczącego dla metody SCPWM oraz SHE dla częstotliwości fundamentalnej wynoszącej 52 Hz.



Rys.4. Wykresy widm częstotliwościowych prądu obwodu pośredniczącego. Rysunek (a) 52 Hz dla metody SCPWM, rysunek (b) 52 Hz dla metody SHE.

Kolorem niebieskim naniesiono ograniczenia wynikające z normy [2], a kolorem czerwonym przedstawiono widmo harmonicznych prądu obwodu pośredniczącego. Analiza rysunku pozwala stwierdzić że algorytm SHE pozwolił na skuteczne ukształtowanie widma prądu zasilania falownika w taki sposób, aby nie pojawiały się składowe harmoniczne o częstotliwościach z obszarów zabronionych normami.

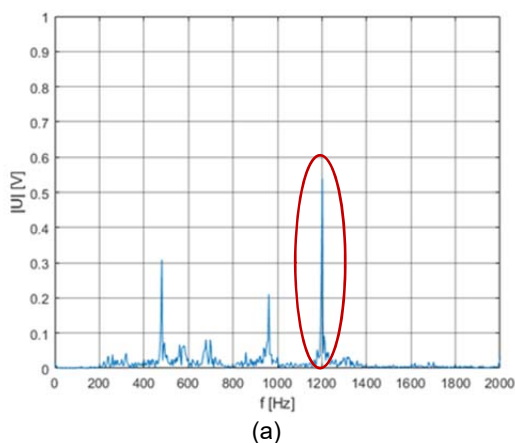
### Badania laboratoryjne

Badania symulacyjne, dla przypadku kształtowania widma momentu elektromagnetycznego, zwalidowano poprzez wykonanie badań rzeczywistych na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w trójpoziomowy falownik typu NPC z układem CPLD, zasilacz laboratoryjny, kartę dSpace 1104, komputer typu PC, silnik indukcyjny wraz z obciążeniem i falownikiem przemysłowym oraz akcelerometr ICP603C01. Stanowisko zaprezentowano na fotografii 1. Zestaw laboratoryjny został wyposażony w możliwość pomiaru prądu zasilania zarówno na przewodach doprowadzających energię z zasilacza jak i na „szynoprzewodach”, między kondensatorem filtra wejściowego i modułami tranzystorowymi, dzięki czemu możliwa była dokładna analiza zawartości harmonicznych prądu zasilania.

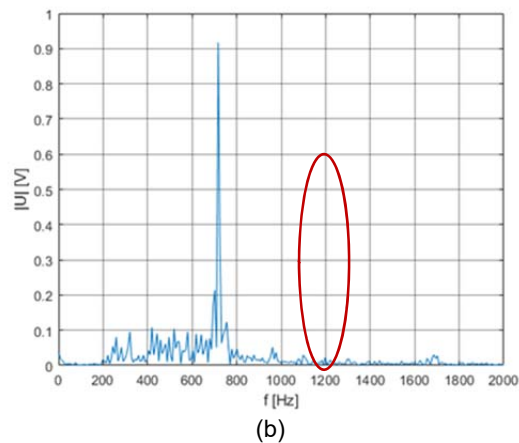


Fot.1. Stanowisko laboratoryjne

Istotą badań, w przypadku eliminacji wybranej składowej momentu, była obserwacja harmonicznych momentu generowanego przez silnik. Ze względu na brak rzetelnych możliwości pomiaru momentu w szerokim zakresie częstotliwości w sposób bezpośredni przyjęto, że obecność zaburzeń momentu o danej częstotliwości będzie widziana w spektrum wibracji obserwowanych na konstrukcji układu napędowego. W tym celu w podstawie stanowiska zamontowano czujnik wibracji. O słuszności założenia świadczy zgodność widm harmonicznych momentu uzyskanych w ramach badań symulacyjnych z widmami harmonicznych wibracji obserwowanymi w badaniach laboratoryjnych. Niedoskonałością zaproponowanej metody jest wyrażenie wyników badań laboratoryjnych przedstawiających harmoniczne momentu w postaci jednostki napięcia występującego na wyjściu czujnika.



(a)



Rys.5. Pomiary wibracji. Rysunek (a) metoda SCPWM dla 40 Hz, rysunek (b) metoda SHE odpowiednio dla 40 Hz.

Pokazane przebiegi ilustrują widma częstotliwościowe wibracji zespołu napędowego dla metody SCPWM oraz SHE. Częstotliwość 40 Hz została wybrana ponieważ jej widma dla modulacji SCPWM zawierały najwyższe wartości składowej harmonicznej 1200 Hz. Uzyskane wyniki pokazują dużą skuteczność w eliminacji wybranej częstotliwości drgań 1200 Hz.

### Podsumowanie

Celem pracy było wykonanie badań symulacyjnych i laboratoryjnych układu napędowego z trójfazowym trójpoziomowym falownikiem NPC z ograniczoną częstotliwością przełączeń, pokazujących możliwość znaczącej redukcji wybranej częstotliwości prądu obwodu pośredniczącego lub drgań mechanicznych, za pomocą kształtowania zasilającej silnik fali napięciowej metodą SHE. W ramach badań przeprowadzono analizę zjawisk mających wpływ na harmoniczne momentu generowanego przez silnik. Następnie zaproponowano sposób wyznaczenia sterującej fali napięciowej przy pomocy metody SHE poprzez wykonanie optymalizacji offline dla wszystkich możliwych stanów pracy falownika. Kolejnym krokiem było opracowanie modelu symulacyjnego układu napędowego ze sterowaniem metodą SCPWM oraz SHE i przeprowadzenie badań porównawczych. Kończącym etapem prac było zaimplementowanie porównywanych struktur sterowania w środowisku Matlab/Simulink i uruchomienie ich na karcie dSpace sterującej falownikiem trójpoziomowym. Zarejestrowane w ten sposób wyniki badań laboratoryjnych potwierdziły skuteczność zaproponowanej metody SHE do eliminacji wybranych składowych momentu i prądu obwodu pośredniczącego. Prostota implementacji metody SHE (struktura tablicowa – lookup table) pozwala na jej stosowanie jako jedyny algorytm modulacji fali napięciowej lub umożliwiła jej stosowanie tylko w wybranych stanach pracy napędu, w których przy innych metodach modulacji może wystąpić rezonans mechaniczny dla częstotliwości wynikającej z właściwości fizycznych obiektu bądź przekroczenie norm w widmie harmonicznych prądu zasilania.

**Autorzy:** dr inż. Piotr Chudzik, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, 90-924 Łódź, ul. B. Stefanowskiego 18/22, E-mail: piotr.chudzik@p.lodz.pl; dr inż. Marcin Steczek, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75, E-mail: marcin.steczek@pw.edu.pl; dr inż. Karol Tatar, Politechnika Łódzka, Instytut Automatyki, 90-924 Łódź, ul. B. Stefanowskiego 18/22, E-mail: karol.tatar@dokt.p.lodz.pl;



## LITERATURA

- [1] Narayanan, G.; Ranganathan, V.T. Synchronised Bus-Clamping PWM Strategies Based on Space Vector Approach for Modulation up to Six-Step Mode. PEDES 1998 - 1998 Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. Ind. Growth 1998, 2, 996–1001, doi:10.1109/PEDES.1998.1330737.
- [2] Wymagania w zakresie dopuszczalnych poziomów i parametrów zakłóceń dla urządzeń kontroli nie zajętości stosowanych na liniach kolejowych zarządzanych przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Ie-115, Załącznik do uchwały Nr 1211/2015 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 22 grudnia 2015 r., Warszawa, 2015
- [3] Shyu, K.K.; Lin, J.K.; Pham, V.T.; Yang, M.J.; Wang, T.W. Global Minimum Torque Ripple Design for Direct Torque Control of Induction Motor Drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, 57, 3148–3156, doi:10.1109/TIE.2009.2038401.
- [4] Song-Manguelle, J.; Nyobe-Yome, J.M.; Ekemb, G. Pulsating Torques in PWM Multi-Megawatt Drives for Torsional Analysis of Large Shafts. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2010, 46, 130–138, doi:10.1109/TIA.2009.2036515.
- [5] Song-Manguelle, J.; Schröder, S.; Geyer, T.; Ekemb, G.; Nyobe-Yome, J.M. Prediction of Mechanical Shaft Failures Due to Pulsating Torques of Variable-Frequency Drives. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2010, 46, 1979–1988, doi:10.1109/TIA.2010.2057397.
- [6] Tripathi, A.; Narayanan, G. Evaluation and Minimization of Low-Order Harmonic Torque in Low-Switching-Frequency Inverter Fed Induction Motor Drives. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2015, 1477–1488, doi:10.1109/TIA.2015.2487447.
- [7] Singh, B.; Jain, S.; Dwivedi, S. Torque Ripple Reduction Technique with Improved Flux Response for a Direct Torque Control Induction Motor Drive. *IET Power Electron.* 2013, 6, 326–342, doi:10.1049/iet-pel.2012.0121.
- [8] Beig, A.R.; Kanukollu, S.; Al Hosani, K.; Dekka, A. Space-Vector-Based Synchronized Three-Level Discontinuous PWM for Medium-Voltage High-Power VSI. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014, 61, 3891–3901, doi:10.1109/TIE.2013.2288194.
- [9] Narayanan, G.; Ranganathan, V.T. Two Novel Synchronized Bus-Clamping PWM Strategies Based on Space Vector Approach for High Power Drives. *IEEE Trans. Power Electron.* 2002, 17, 84–93, doi:10.1109/63.988673.
- [10] Manivelan, C. A Survey on Multilevel Inverter Topologies and Control Schemes with Harmonic Elimination. Proc. - ICOECS 2020 2020 Int. Conf. Electrotech. Complexes Syst. 2020, doi:10.1109/ICOECS50468.2020.9278519.
- [11] Kouro, S.; Malinowski, M.; Gopakumar, K.; Pou, J.; Franquelo, L.G.; Wu, B.; Rodriguez, J.; Perez, M.A.; Leon, J.I. Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, 57, 2553–2580, doi:10.1109/TIE.2010.2049719.
- [12] Chen, W.; Sun, H.; Gu, X.; Xia, C. Synchronized Space-Vector PWM for Three-Level VSI with Lower Harmonic Distortion and Switching Frequency. *IEEE Trans. Power Electron.* 2016, 31, 6428–6441, doi:10.1109/TPEL.2015.2499774.
- [13] Robertson, S.D.T.; Hebbar, K.M. Torque Pulsations in Induction Motors with Inverter Drives. *IEEE Trans. Ind. Gen. Appl.* 1971, IGA-7, 318–323, doi:10.1109/TIGA.1971.4181297.
- [14] Steczek, M.; Szlag, A.; Chatterjee, D. Analysis of Disturbing Effect of 3 KV DC Supplied Traction Vehicles Equipped with Two-Level and Three-Level VSI on Railway Signalling Track Circuits. *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.* 2017, 65, 663–674, doi:10.1515/bpasts-2017-0071.
- [15] Steczek, M.; Chatterjee, A.; Chatterjee, D. Optimisation of Current Harmonics for Threelevel VSI Based Induction Motor Drive Suitable for Traction Application. *IET Power Electron.* 2018, 11, 1529–1536, doi:10.1049/iet-pel.2017.0181.
- [16] Steczek, M.; Chudzik, P.; Lewandowski, M.; Szlag, A. PSO-Based Optimization of DC-Link Current Harmonics in Traction VSI for an Electric Vehicle. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2020, 67, 8197–8208, doi:10.1109/TIE.2019.2946543.
- [17] Steczek, M.; Chudzik, P.; Szlag, A. Application of a Non-Carrier-Based Modulation for Current Harmonics Spectrum Control during Regenerative Braking of the Electric Vehicle. *Energies*, 2020, 13, 6686, doi:10.3390/en13246686.
- [18] Steczek, M.; Chudzik, P.; Szlag, A. Combination of SHE- and SHM-PWM Techniques for VSI DC-Link Current Harmonics Control in Railway Applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017, 64, 7666–7678, doi:10.1109/TIE.2017.2694357.
- [19] Imarazene, K.; Berkouk, E.M.; Chekireb, H. Selective Harmonics Elimination PWM with Sel-Balancing Capacitors in Three-Level Inverter. *IET Conf. Publ.* 2012, 2012, doi:10.1049/cp.2012.0157.
- [20] Gao, Z.; Ge, Q.; Li, Y.; Zhao, L.; Zhang, B.; Wang, K. Hybrid Improved Carrier-Based PWM Strategy for Three-Level Neutral-Point-Clamped Inverter with Wide Frequency Range. *IEEE Trans. Power Electron.* 2021, 36, 8517–8538, doi:10.1109/TPEL.2020.3047952.
- [21] Basu, K.; Prasad, J.S.S.; Narayanan, G. Minimization of Torque Ripple in PWM AC Drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2009, 56, 553–558, doi:10.1109/TIE.2008.2004391.
- [22] Taniguchi, K.; Inoue, M.; Takeda, Y.; Morimoto, S. A PWM Strategy for Reducing Torque-Ripple in Inverterfed Induction Motor. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 1993, 30, 71–77, doi:10.1109/28.273623.
- [23] Tripathi, A.; Narayanan, G. Torque Ripple Minimization in Neutral-Point-Clamped Three-Level Inverter Fed Induction Motor Drives Operated at Low-Switching-Frequency. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2018, 54, 2370–2380, doi:10.1109/TIA.2018.2804325.