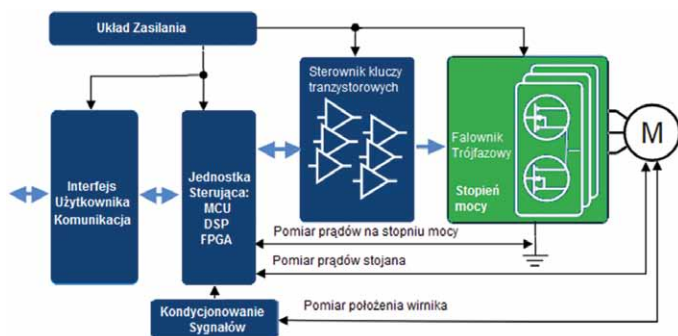


Przegląd aktualnych rozwiązań w projektowaniu stopni mocy sterowników napędów bezpośrednich

Piotr Mars, Grzegorz Góra, Maciej Petko, Grzegorz Karpel

1. Wstęp

Rosnąca popularność elektrycznych napędów bezpośrednich silnie napędza rozwój sterowników napędów bezpośrednich, w których główną rolę pełni stopień mocy w postaci przekształtnika energoelektronicznego zbudowanego z elementów półprzewodnikowych. Układ ten jest odpowiedzialny za wygenerowanie finalnej postaci przebiegów prądowych bądź napięciowych podawanych bezpośrednio na uzwojenia silnika. Stopień mocy stanowi najdroższą część sterownika napędu bezpośredniego oraz ma istotny wpływ na sprawność całego układu napędowego. Przykładowy sterownik silnika bezpośredniego małej mocy składa się z układu zasilania najczęściej opartego na baterii akumulatorów, przetwornicy DC/DC lub AC/DC [1]. W przypadku odzyskiwania energii elektrycznej podczas hamowania silnika istotne jest, aby przetwornica umożliwiała dwukierunkowy przepływ energii [2]. Ważnym elementem układu zasilania jest stopień pośredni zbudowany na bazie kondensatorów o dużej pojemności, stanowiący tzw. bufor ładunku (ang. DC – link) pomiędzy prostownikiem a stopniem mocy. Kolejnym elementem składowym sterownika jest jednostka sterująca, bazująca na mikrokontrolerze, procesorze DSP (ang. *Digital Signal Processor*) lub układzie FPGA (ang. *Field Programmable Gate Array*), w którym zaimplementowany jest algorytm sterowania. Jednym z elementów składowych przekształtnika jest również sterownik kluczy tranzystorowych (ang. *gate driver*), zwany również sterownikiem wstępnym. Głównym elementem sterownika jest stopień mocy w postaci falownika trójfazowego. Dodatkowymi elementami sterownika są układy kondycjonowania sygnałów sprzężenia zwrotnego z czujników położenia wirnika oraz bloki interfejsów komunikacyjnych – rys. 1 [1].



Rys. 1. Schemat blokowy typowego sterownika napędu bezpośredniego małej mocy [1]

Streszczenie: Napędy bezpośrednie są obecnie stosowane w wielu dziedzinach przemysłu, zwłaszcza w aplikacjach wymagających zapewnienia dużego momentu napędowego przy jednocześnie wysokiej dokładności odwzorowania trajektorii sterowania. Ostatnie lata przedstawiają bardzo silny rozwój coraz nowszych konstrukcji napędów bezpośrednich oraz ciągłą optymalizację istniejących rozwiązań. Równocześnie przebiega nieustanny proces udoskonalania układów sprzętowych sterowników napędów bezpośrednich oraz rozwój zaawansowanych algorytmów sterowania.

Artykuł opisuje istniejące rozwiązania elektronicznych układów stopni mocy stosowanych w sterownikach napędów bezpośrednich małej, średniej oraz dużej mocy. Omówiono budowę podstawowych układów kluczujących z wykorzystaniem tranzystorów MOSFET oraz IGBT. W treści referatu wymieniono wady i zalety poszczególnych topologii przekształtników energoelektronicznych jedno- i wielopoziomowych. Opisano również budowę zintegrowanych modułów mocy oraz inteligentnych modułów mocy, tzw. IPM (ang. *Intelligent Power Module*). W finalnej części artykułu uwydatniono najbardziej obiecujące trendy w projektowaniu stopni mocy sterowników napędów bezpośrednich.

REVIEW OF THE CURRENT SOLUTIONS IN THE DESIGNING OF POWER STAGES OF DIRECT DRIVES' CONTROLLERS

Abstract: Direct drives are currently used in many fields of industry, especially in applications requiring high torque with high accuracy of control trajectory mapping. Recent years show a very strong development of more and more new designs of direct drives and continuous optimization of existing solutions. At the same time, there is a continuous process of improving the hardware systems of direct drive controllers and the development of advanced control algorithms.

The article describes existing solutions of electronic power stage systems used in low, medium and high power direct drives' controllers. The construction of basic switching circuits using MOSFET and IGBT transistors is discussed. The content of the paper lists the advantages and disadvantages of individual topologies of single and multi-level power converters. The construction of integrated power modules and intelligent power modules so called IPM is also described. The final part of the article highlights the most promising trends in the power stages designing of direct drives' controllers.

2. Podstawowe elementy przełączające

Falownik trójfazowy najczęściej składa się z sześciu kluczy tranzystorowych, może być on również zbudowany z wykorzystaniem modułów półmostków i mostków H. Istnieje wiele odmian tranzystorów, jednakże ze względu na swoje właściwości najczęściej stosowane w układach mocy są tranzystory polowe typu MOSFET (ang. *Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) oraz tranzystory bipolarne z izolowaną bramką IGBT (ang. *Insulated Gate Bipolar Transistor*).

2.1. Tranzystory MOSFET

Mogą być łączone równolegle w celu zwiększenia obciążalności prądowej, gdyż mają dodatni współczynnik temperaturowy. Niewielka rezystancja kanału w stanie włączenia pozwala na znaczne zmniejszenie strat mocy podczas przewodzenia. Tranzystory typu MOSFET charakteryzują się szerokim pasmem częstotliwościowym, mają szczególnie krótki czas wyłączenia, co znacznie zmniejsza przełączeniowe straty mocy [3].

2.2. Tranzystory IGBT

Tranzystory mocy z izolowaną bramką IGBT łączą w sobie zalety tranzystorów MOSFET i bipolarnych. Są one wykonywane w monokrystalicznych strukturach przystosowanych do większych gęstości prądu w porównaniu z klasycznymi tranzystorami polowymi mocy i bipolarnymi. Od strony obwodu mocy tranzystory IGBT wyglądają jak tranzystor bipolarny, natomiast od strony wejścia sterującego zachowują się jak klasyczne MOSFET-y, dzięki czemu umożliwiają one przełączanie obciążeń o dużej mocy z wysoką częstotliwością. Dodatkową zaletą tranzystorów IGBT jest możliwość pracy z bardzo wysokimi napięciami [4].

2.3. Tyrystory GTO i IGCT

Warto wspomnieć, iż jeszcze większe obciążalności prądowe i napięciowe oferują elementy półprzewodnikowe, takie jak tyrystory wyłączalne prądem bramki GTO (ang. *Gate-Turn-Off*) oraz coraz popularniejsze tyrystory IGCT (ang. *Integrated Gate Commutated Thyristor*). Przewagą tyrystorów IGCT nad GTO jest to, iż dzięki swojej konstrukcji mogą pracować bez dodatkowych układów tłumiących przepięcia [5]. Oba wspomniane rodzaje tyrystorów są najczęściej multiplikowane i integrowane w postaci sprasowanych pakietów (ang. *press-pack*) [6] umożliwiających przełączanie prądów rzędu [kA] przy napięciach rzędu [kV]. Tyrystory GTO i IGCT są elementarnymi składnikami przekształtników średnich i dużych mocy.

3. Przekształtniki napięciowe

Wśród przekształtników napięciowych VSI (ang. *Voltage Source Inverters*) najczęściej stosowanych w sterownikach napędów bezpośrednich wyróżniamy następujące rodzaje:

3.1. Przekształtniki dwupoziomowe

Falowniki generujące napięcie wyjściowe poprzez przełączanie pomiędzy dwoma biegunami zasilającymi nazywane są falownikami dwupoziomowymi (ang. *Two Level Inverter*). Są one powszechnie stosowane z powodu prostej budowy, niewielkiej liczby elementów składowych oraz algorytmu sterowania

o małej złożoności. Posiadają jednak pewne ograniczenia ujawniające się głównie w aplikacjach dużej mocy oraz przekształtnikach wysokich napięć. Z tego powodu coraz powszechniej stosuje się falowniki wielopoziomowe (ang. *Multilevel Inverters*).

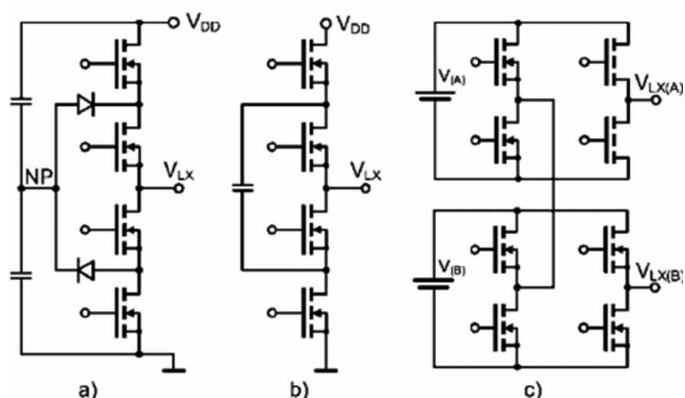
3.2. Przekształtniki wielopoziomowe

Rodzaj przekształtników, w których napięcie wyjściowe jest generowane przy wykorzystaniu kilku poziomów napięcia zasilającego. Najczęściej stosowane są trzy poziomy napięcia jako kompromis pomiędzy uproszczoną budową stopnia mocy i małą ilością elementów składowych oraz zaletami wielopoziomowej topologii [7], do których należą: niski współczynnik zawartości harmonicznych THD (ang. *Total Harmonic Distortion*), mniejsze tętnienia prądu [8, 9], kilkukrotnie większa efektywna częstotliwość przełączania w stosunku do rzeczywistej częstotliwości przełączania tranzystorów [10] oraz mniejsze straty termiczne związane z przełączaniem elementów półprzewodnikowych w stosunku do przekształtników dwupoziomowych, przy zachowaniu strat przewodzenia na podobnym poziomie [11]. Decydujący wpływ na redukcję strat mocy w topologiach wielopoziomowych ma zmniejszenie tzw. napięcia blokowania, czyli napięcia pojawiającego się na danym łączniku przy zamkniętym kanale. Ma to również korzystny wpływ na minimalizację niezbędnych odległości separacyjnych, uwzględnianych w projektowanym urządzeniu energoelektronicznym, co umożliwi lepszą integrację obwodu mocy. Zmniejszone wymagania napięciowe stawiane łącznikom półprzewodnikowym, diodom i kondensatorom korzystnie wpływają także na cenę wytwarzanego przekształtnika. Łączniki półprzewodnikowe o mniejszym napięciu blokowania charakteryzują się również lepszymi parametrami statycznymi (np. mniejszym spadkiem napięcia w stanie przewodzenia w przypadku tranzystora IGBT lub zredukowaną rezystancją szeregową otwartego kanału w tranzystorach typu MOSFET) oraz dynamicznymi (krótsze czasy opóźnień oraz przełączeń) w stosunku do ich odpowiedników wysokonapięciowych [12].

Najczęściej spotykane w literaturze przekształtniki wielopoziomowe są wymienione w poniższych podrozdziałach.

3.2.1. Wielopoziomowy falownik z diodowym poziomowaniem napięć (ang. *Diode Clamped Multilevel Inverter*)

Ten typ falownika jest jedną z najczęściej stosowanych topologii wielopoziomowych przekształtników energii elektrycznej. Wykorzystuje szeregowo połączone kondensatory w charakterze dzielnika napięcia źródła zasilania oraz szereg tzw. diod poziomujących. Dzięki nim maksymalne napięcie na poszczególnych łącznikach nie przekracza wartości przewidzianej dla danej sekcji dzielnika kondensatorowego [12]. Zwiększenie ilości poziomów napięciowych polega na dodaniu szeregowo połączonych sekcji, składających się z pary tranzystorów oraz diody poziomującej i kondensatora buforującego ładunek. Doświadczenia projektantów opisane w literaturze wskazują jednak, że duża liczba poziomów powoduje problemy z równomiernym rozkładem napięcia na pojemnościach buforujących [10, 11], dlatego też najczęściej wykorzystuje się topologię trójpoziomową przedstawioną na rys. 2 a.



Rys. 2. Topologie przekształtników wielopoziomowych

3.2.2. Wielopoziomowy falownik z kondensatorowym poziomowaniem napięć (ang. Flying Capacitors Multilevel Inverter, Capacitor Clamped Multilevel Inverter)

W porównaniu do falowników z diodowym poziomowaniem napięć ten typ przekształtnika wykorzystuje odpowiednio połączone kondensatory w celu uzyskania proporcjonalnych poziomów napięć na półprzewodnikowych przełącznikach. Aby to osiągnąć, należy użyć pojemności o różnych parametrach. Zwiększenie liczby poziomów napięciowych polega na dodaniu kolejnych par tranzystorów oraz kondensatorów buforujących. Ta topologia jest również podatna na nierówny rozkład napięcia na pojemnościach buforujących i rzadko wykorzystuje się liczbę poziomów napięciowych większą od pięciu [10, 11]. Trójpoziomowy falownik z kondensatorowym poziomowaniem napięć przedstawiony jest na rys. 2 b).

3.2.2. Wielopoziomowy kaskadowy falownik napięcia (ang. Cascaded Inverter with Separate DC Sources)

Składa się z kilku klasycznych, jednofazowych mostków H zasilanych z niezależnych źródeł i połączonych szeregowo po stronie napięcia przemiennego. Pojedyncza sekcja mostka umożliwia wytworzenie trzech poziomów napięcia: $+U_{DC}$, 0 , $-U_{DC}$. Połączenie szeregowe daje możliwość wygenerowania przebiegu będącego algebraiczną sumą napięć wszystkich sekcji. Podstawową zaletą kaskadowego falownika napięcia jest możliwość uzyskania wielu poziomów napięcia wyjściowego przy wykorzystaniu niewielkiej liczby mostków H. Ze wzoru na obliczanie ilości poziomów napięcia wyjściowego: $m = 2s + 1$ (gdzie s oznacza liczbę potrzebnych źródeł prądu stałego) wynika, że liczba uzyskanych poziomów napięć jest ponaddwukrotnie większa od ilości wykorzystanych źródeł prądu stałego. Oznacza to, że ten rodzaj topologii wymaga najmniejszej liczby komponentów koniecznych do uzyskania planowanej liczby poziomów napięć. Nie wymaga również stosowania żadnych dodatkowych diod ani kondensatorów poziomujących napięcie. Dodatkowo wykorzystanie sekcji w postaci klasycznych mostków jednofazowych pozwala na zminimalizowanie kosztów budowy falownika. Wadą tego typu struktury jest konieczność stosowania wielu galwanicznie izolowanych źródeł prądu

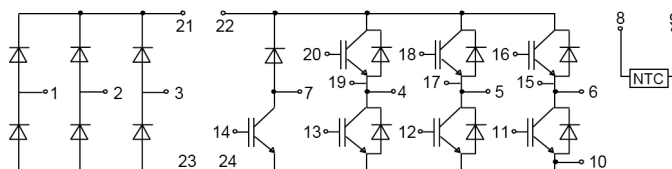
stałego [10, 11]. Trójpoziomowy kaskadowy falownik napięcia przedstawiony jest na rysunku 2 c).

4. Zintegrowane elementy mocy

Producenci układów półprzewodnikowych dynamicznie rozwijają rynek zintegrowanych elementów mocy, które w ostatnich latach stanowią podstawę do budowy przekształtników energoelektronicznych oraz stopni mocy napędów. Duża różnorodność oraz wysoki poziom zintegrowania tych elementów pozwala na projektowanie stopni mocy do napędów bezpośrednich nawet przez inżynierów o niewielkim doświadczeniu w tym zakresie. Dostępne na rynku moduły możemy podzielić na trzy zasadnicze grupy o różnym stopniu złożoności i elastyczności w ich wykorzystaniu.

4.1. Zintegrowane moduły mocy

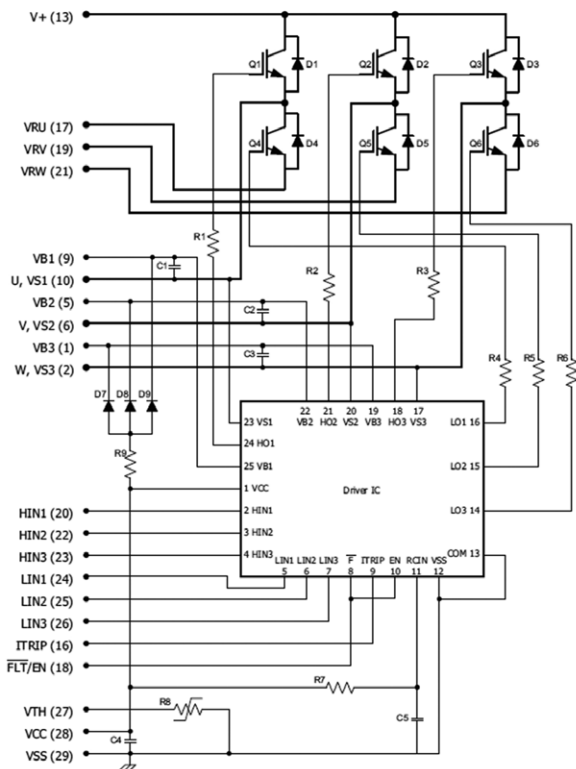
W podstawowej wersji występują jako mostki trójfazowe z diodami regeneracyjnymi. Bardziej rozbudowane wersje wyposażone są w dodatkowe elementy, takie jak: wbudowany termistor pozwalający na pomiar temperatury wewnątrz układu, tranzystor przeznaczony do sterowania zewnętrznym rezystorem rozpraszającym energię podczas hamowania, a także mostek prostowniczy przystosowany do współpracy z jednofazową lub trójfazową siecią elektryczną (rys. 3). Aby zaprojektować stopień mocy, wykorzystując zintegrowany moduł mocy, należy dobrać: sterowniki tranzystorów, elementy pasywne, pojemności buforujące ładunek, filtry oraz zabezpieczenia. Zastosowanie zintegrowanego modułu mocy przede wszystkim ułatwia projektantowi odprowadzanie i rozproszenie energii termicznej z elementów półprzewodnikowych poprzez wykorzystanie gotowego modułu o zoptymalizowanej pod tym kątem konstrukcji mechanicznej.



Rys. 3. Schemat elektryczny zintegrowanego elementu mocy [13]

4.2. Inteligentne moduły mocy, tzw. IPM (ang. Intelligent Power Module)

Moduły integrujące w sobie elementy mocy wraz z częścią logicznych układów sterujących i pomiarowych. Najczęściej występującą odmianą inteligentnych modułów mocy są mostki trójfazowe oparte na tranzystorach typu MOSFET lub IGBT wraz z wbudowanymi sterownikami tych tranzystorów. Dodatkowymi elementami są wbudowane układy umożliwiające pomiar temperatury oraz prądów fazowych. Klasyczny moduł IPM wykorzystuje dwa napięcia zasilające: główne – do zasilania obwodów mocy, oraz pomocnicze o wartości około 12 [VDC] do zasilania wewnętrznych odwodów logicznych. Każdy półmostek posiada najczęściej oddzielne wyprowadzenia do sterowania dla górnego i dolnego tranzystora, dlatego należy programowo zadbać o tzw. czasy martwe, czyli czasy



Rys. 4. Schemat elektryczny modułu IPM [14]

opóźnień pomiędzy wyłączeniem jednego a włączeniem drugiego tranzystora w półmostku. Aby zaprojektować stopień mocy, wykorzystując inteligentne moduły mocy, należy dobrać elementy pojemnościowe, część elementów pasywnych oraz zaimplementować sterowanie każdym tranzystorem z uwzględnieniem czasów martwych. Przykład modułu IPM przedstawiony jest na rys. 4.

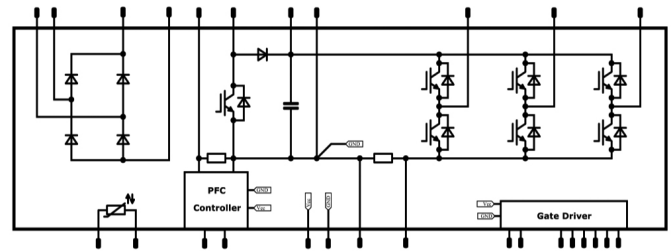
4.3. Zintegrowane stopnie mocy

Najbardziej zaawansowane moduły, łączące w sobie elementy mocy wraz ze wszystkimi układami kontrolno-pomiarowymi koniecznymi do zaimplementowania sterowania stopniem mocy. Najbardziej zaawansowane odmiany posiadają automatyczne zabezpieczenia termiczne i nadprądowe chroniące moduł przed uszkodzeniem. Wymagają jednego lub dwóch napięć zasilających (głównego do zasilania obwodów mocy oraz pomocniczego do zasilania odwodów cyfrowych).

Standard napięciowy wejść/wyjść cyfrowych jest przystosowany do bezpośredniego podłączenia z portami mikrokontrolera lub układu FPGA. Najczęściej stan każdego półmostka jest ustawiany za pomocą jednego sygnału sterującego, a opóźnienia związane z czasami martwymi realizowane bezpośrednio przez moduł. Aby zaprojektować przekształtnik, wykorzystując zintegrowany stopień mocy, należy dobrać elementy pojemnościowe i podstawowe elementy pasywne oraz zaimplementować sterowanie fazami półmostka. Moduły te pozwalają na szybkie i łatwe zaprojektowanie sterownika, lecz ich wadą jest brak elastyczności i możliwości wpływu na końcowe parametry otrzymanego stopnia mocy.



Rys. 5. Widok zintegrowanego stopnia mocy [15]



Rys. 6. Schemat elektryczny zintegrowanego stopnia mocy [16]


6. Podsumowanie

Ostatnie regulacje w standardzie IEC definiują coraz ostrzejsze wymagania sprawności zwłaszcza dla napędów średniej i dużej mocy, dlatego efektywność energetyczna staje się jednym z głównych kryteriów doboru układu sterowania. Ze względu na duże wymagania sprawności układów napędowych spodziewany jest trend wykorzystywania zaawansowanych sterowników nawet w procesach, które do tej pory ich nie wymagały [17]. Technologie wytwarzania układów półprzewodnikowych są systematycznie usprawniane. Powstaje wiele odmian tranzystorów IGBT i MOSFET, jak np. tranzystory BiMOSFET, znane również jako *Reverse Conducting IGBTs*, które umożliwiają jeszcze szybsze przełączanie wysokich wartości prądów i napięć [18].

Literatura

- [1] *Motor Controls and Drives* – subpages. <https://www.infineon.com>, (dostęp 2018.02.20).
- [2] NOWAK R.: *Wybrane zagadnienia sterowania silnikami z magnesami trwałymi*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1/2017.
- [3] *Tranzystory MOSFET kontra IGBT – świadomy wybór*. <https://elektronikab2b.pl>, (dostęp 2018.02.20).
- [4] GAWRYLUK A.: *IGBT: tranzystory do zadań specjalnych*. „Elektronika Praktyczna” 3/2008.
- [5] ZHOU X., XU Z., HUANG A.Q., BOROVYEVICH D.: *Comparison of High Power IGBT, IGCT and ETO for Pulse Applications*. Annual power electronics seminar, 2002, p. 506–510.
- [6] *Press-pack IGBTs for HVDC and FACTS*. <https://www.dynexsemi.com>, (dostęp 2018.02.20).
- [7] CHEE S.-J., KO S., KIM H.-S.: *Common-Mode Voltage Reduction of Three-Level Four-Leg PWM Converter*. IEEE Transactions on Industry Applications, nr 5, 2015, p. 4006–4016.

- [8] MEHRABIAN-NEJAD H., MOHAMMADI S., FARHANGI B.: *Novel Control Method for Reducing EMI in Shunt Active Filters with Level Shifted Random Modulation*. International Power Electronics Drive Systems and Technologies Conference, 2015, p. 585–590.
- [9] SABARAD J., KULKARNI G.: *Comparative analysis of SVPWM and SPWM techniques for multilevel inverter*. Power and Advanced Control Engineering (ICPACE), 2015 International Conference.
- [10] HONADE T., UDAPURE S., TIMANDE S., RODGE S., BURDE V., GUDADHE S.: *Comparative Study between Two and Three Level Converter for Electric Applications*. „International Journal of Advances in Engineering & Technology”, 2016, p. 210–217.
- [11] ORFANOUDAKIS G.I., SHARKH S.M., YURATICH M.A., ABUSARA M.A.: *Loss Comparison of Two and Three-Level Inverter Topologies*. International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2010, p. 1–6.
- [12] SZAREK M.: *Wielopoziomowy falownik napięcia z poziomowaniem diodowym (NPC) zasilany z wyodrębnionych alternatywnych źródeł energii, pracujących przy różnych wartościach mocy maksymalnej (MPP)*. Rozprawa doktorska. Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej; Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii AGH, Kraków 2016.
- [13] Euperc, *BSM20GP60 – IGBT-Module*. <http://www.bjrtd.com>. (dostęp 2018.02.20).
- [14] International Rectifier, *IRAM136-0760A – Integrated Power Hybrid IC for Appliance Motor Drive Applications*. <http://www.irf.com>, (dostęp 2018.02.20).
- [15] ON Semiconductor, *FSBB20CH60 Motion SPM® 3 Series*. <http://www.onsemi.com>, (dostęp 2018.02.20).
- [16] *IPMs – a solution for compact motor drive applications?* <https://www.vincotech.com>, (dostęp 2018.02.20).
- [17] ORŁOWSKA T., DYBKOWSKI M.: *Industrial Drive Systems. Current State and Development Trends*. „Power Electronics and Drives” 1/2016.
- [18] *IXYS Reverse Conducting IGBTs (BiMOSFETs™)*. <https://www.ixys.com>, (dostęp 2018.02.20).

 mgr inż. Piotr Mars; Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: mars@agh.edu.pl;
mgr inż. Grzegorz Góra; Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: ggora@agh.edu.pl;
dr hab. inż. Maciej Petko; Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: petko@agh.edu.pl;
dr inż. Grzegorz Karpiel; Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: gkarpiel@agh.edu.pl