

Jarosław Załęski¹, Szymon Piasecki², Krzysztof Stępień¹

¹Zakład Energoelektroniki TWERD Sp. z o.o, Toruń

²Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

DWUSTOPNIOWY PRZEKSZTAŁTNIK AC/DC Z WYSOKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWYM TRANSFORMATOREM SEPARUJĄCYM DEDYKOWANY DO SZYBKIEGO ŁADOWANIA POJAZDÓW ELEKTRYCZNYCH

TWO-STAGE AC / DC CONVERTER WITH A HIGH-FREQUENCY ISOLATING TRANSFORMER, DEDICATED TO FAST CHARGING OF ELECTRIC VEHICLES

Streszczenie: Artykuł przedstawia moduł przekształtnika energoelektronicznego składającego się ze stopni AC/DC i DC/DC. Opracowany i wdrożony przez firmę Zakład Energoelektroniki Twerd Sp. z o.o. układ o mocy 50 kW zapewnia separację galwaniczną między obwodami AC i DC poprzez wysokoczęstotliwościowy transformator i dedykowany jest układom szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych. W artykule przedstawiono koncepcję szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych, założenia projektowe dla opracowanego urządzenia oraz jego podstawowe właściwości i funkcjonalności. Wykonane prace projektowe zostały zilustrowane odpowiednimi wynikami badań eksperymentalnych. Przedstawiono także aplikację przemysłową urządzenia w postaci wykonanej i uruchomionej stacji ładowania pojazdów elektrycznych.

Abstract: The article presents a power electronic module consisting of AC/DC and DC/DC converters. Developed and implemented by Zakład Energoelektroniki Twerd Sp. z o.o. the 50 kW module provides galvanic separation between AC and DC circuits through a high-frequency transformer and is dedicated to electric vehicle fast charging systems. The article presents the concept of fast charging of electric vehicles, design assumptions for the developed device and its basic properties and functionality. The performed design works were illustrated with the relevant results of experimental studies. The industrial application of the device in the form of a constructed and launched electric vehicle charging station was also presented.

Słowa kluczowe: ładowarka EV, przetwornica DC/DC, szybka ładowarka DC, dwustopniowy przekształtnik AC-DC

Keywords: EV charger, DC/DC converter, DC fast charger, two-stages AC/DC converter

1. Wstęp

Na rynkach całego świata obserwowany jest obecnie bardzo intensywny rozwój środków transportu opartych o napęd elektryczny oraz rozbudowa towarzyszącej im infrastruktury. Z jednej strony rynek stymulowany jest przez nacisk kładziony na ekologię i ekologiczny transport, z drugiej przez coraz bardziej atrakcyjne walory użytkowe dostępnych pojazdów elektrycznych. Nie bez znaczenia dla rozwoju elektromobilności jest także zmniejszająca się cena baterii. W chwili obecnej jest to około 140\$/kWh, a prognozy zakładają spadek ceny baterii poniżej 100\$/kWh w ciągu najbliższych 3 lat [1-2]. Wg analityków rok 2023 lub 2024 będzie rokiem, kiedy całkowity koszt użytkowania (ang. *Total Cost of Ownership, TCO*) pojazdu elektrycznego (ang. *Electric Vehicle, EV*) będzie niższy niż odpowiadającego mu

samochodu konwencjonalnego [2]. Komfortowe użytkowanie pojazdów wyposażonych w silnik spalinowy może zostać dodatkowo ograniczone przez nowe regulacje i rozwiązania prawne promujące ograniczenie emisji CO₂ i transport ekologiczny [3-4].

2. Ładowanie pojazdów elektrycznych

Rozwój rynku pojazdów elektrycznych stymuluje również rozwój całej infrastruktury wymaganej do wygodnej eksploatacji tych samochodów. Kluczowym elementem dla funkcjonowania tego systemu są układy ładowania baterii pojazdów [5].

Zasadniczo dla użytkownika EV układy ładowania dzielą się na punkty ładowania prądem przemiennym (AC) i prądem stałym (DC) [6].

2.1 Ładowanie AC

Najpopularniejszą formą ładowania samochodu elektrycznego jest zastosowanie ładowarki AC, która jest sterowanym sprzęgiem między siecią elektroenergetyczną jedno- lub trójfazową, a wewnętrzną ładowarką pojazdu. Ładowanie AC wymaga wykorzystania ładowarki pokładowej, czyli przekształtnika AC/DC/DC znajdującego się na pojeździe. Jest to rozwiązanie proste i wszechstronne, a dzięki nieskomplikowanej budowie rozmiary punktu ładowania AC są niewielkie i może on być instalowany praktycznie w dowolnych lokalizacjach, w formie układu naściennego (*ang. wallbox*) lub wolnostojącego słupka.

Wadą takiego rozwiązania jest niewielka moc ładowarki – standardowo ograniczona do 22 kW (w niektórych modelach pojazdów są to 44 kW) wynikająca z ograniczeń masy i objętości przekształtnika znajdującego się na pojeździe oraz ograniczeń mocy przyłączenia punktów, gdzie takie układy są instalowane (np. istniejące już instalacje w budynkach i na parkingach podziemnych). Mała moc powoduje dłuższy czas ładowania baterii, wynoszący przy obecnie stosowanych bateriach nawet kilkanaście godzin. Zastosowanie ładowania AC największy sens ma przy długotrwałym postoju pojazdu, czyli nocą lub w godzinach pracy.

2.2 Ładowanie DC

W punktach ładowania DC ładowarka jest zewnętrznym urządzeniem, znajdującym się poza pojazdem. Wobec mniejszych ograniczeń związanych z masą i objętością są to z reguły układy o mocy powyżej 22 kW, których wyjście podłączone jest przez odpowiednie złącze bezpośrednio do baterii pojazdu. Ładowarki DC nazywane są szybkimi ponieważ, dzięki większej mocy, pozwalają na szybsze naładowanie baterii pojazdu w stosunku do ładowarek AC. Sposób podłączenia się do baterii samochodu i komunikacji z pojazdem określa standard ładowania, w chwili obecnej na rynku dominującymi standardami są CCS (*ang. Combined Charging System*) stosowany w samochodach europejskich oraz CHAdeMO (stosowany w pojazdach japońskich) [5-6]. Między sobą standardy różnią się nie tylko typem wtyczki, ale również sposobem komunikacji z pojazdem i realizacją procesu ładowania.

Zastosowanie ładowania DC skraca czas potrzebny na uzupełnienie energii w baterii do kilkudziesięciu minut. Jest to szczególnie

istotne w sytuacji, kiedy użytkownik chce jak najszybciej kontynuować jazdę. W opinii autorów możliwość stosunkowo szybkiego naładowania baterii i kontynuowania podróży jest kluczowa dla upowszechnienia się pojazdów elektrycznych i komfortowego ich użytkowania na zasadach zbliżonych do znanych nam obecnie w pojazdach konwencjonalnych.

Ograniczeniem stacji ładowania DC jest wymagana moc przyłącza oraz cena samej stacji, wynikająca z o wiele bardziej skomplikowanej budowy w porównaniu do stacji AC.

3. Przekształtnik AC-DC jako szybka ładowarka

3.1 Wymagania projektowe

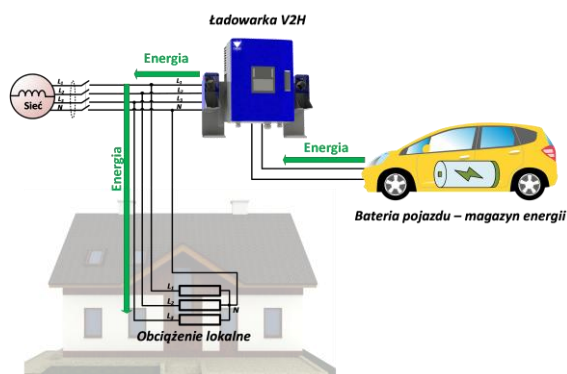
Głównym urządzeniem realizującym przekształcanie napięcia przemiennego na stałe w szybkiej stacji ładowania jest przekształtnik AC/DC. Podstawowe funkcjonalności, jakie musi zapewnić ten układ energoelektroniczny, to regulacja napięcia i prądu ładowania baterii oraz separacja galwaniczna między siecią zasilającą a baterią pojazdu. Ponadto układ z sieci powinien pobierać sinusoidalny prąd ($THDi < 5\%$), charakteryzować się możliwie niewielkimi wymiarami i masą oraz jak najmniejszym poziomem generowanego hałasu.

Szeroki zakres wyjściowego napięcia stałego, dla standardowych zastosowań wynoszący od 50 do 600 V przy zasilaniu sieciowym, najczęściej 3x400V, narzuca zastosowanie układu z dwoma stopniami przetwarzania energii. Oznacza to, że szybka ładowarka DC to najczęściej 2 przekształtniki: AC/DC i DC/DC. Topologie i typy zastosowanych przekształtników zależą od konkretnych aplikacji oraz funkcjonalności wymaganych od ładowarek. Każdy z producentów ładowarek stosuje swoje, sprawdzone rozwiązania [7-8].

3.2 Przetwornica AC/DC

Stopniem wejściowym ładowarki, pojazdów elektrycznych, podłączonym bezpośrednio do sieci zasilającej jest przetwornica AC/DC. Uzyskanie niskiej zawartości harmonicznych prądu po stronie sieci (pobór sinusoidalnego prądu) zapewnia zastosowanie odpowiednich filtrów indukcyjnych, szczególnie istotnych w przypadku diodowego prostownika AC/DC na wejściu ładowarki lub zastosowanie aktywnej przetwornicy AC/DC z odpowiednio wysoką częstotliwością łączeń. Aktywny przekształtnik po stronie sieci umożliwia dodatkowo zarzą-

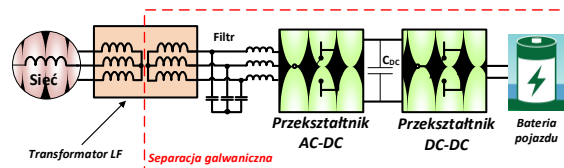
dzanie mocą bierną pobieraną przez ładowarkę (a w skrajnych przypadkach jej kompensację w punkcie przyłączenia, PPE) oraz realizację funkcji pracy dwukierunkowej ładowarki – umożliwiając przesyłanie energii do sieci, pracując zgodnie z założeniami V2G (ang. *Vehicle-to-Grid*). Standard V2G, koncepcyjnie przedstawiony na rys. 1, poza ładowaniem, umożliwia kontrolowane rozładowanie baterii pojazdu elektrycznego i wykorzystanie dostępnej energii na potrzeby odbiorów lokalnych (np. zasilania domu jednorodzinnego) lub na potrzeby operatora sieci elektroenergetycznej. Jest to możliwe w sytuacji, kiedy pojazd nie jest wykorzystywany i zgadza się na to użytkownik. Powszechne zastosowanie V2G wraz z rosnącą liczbą samochodów elektrycznych pozwoli na rozszerzenie funkcjonalności tych aut, które staną się jednocześnie mobilnymi magazynami energii.



Rys. 1. Koncepcja systemu V2G

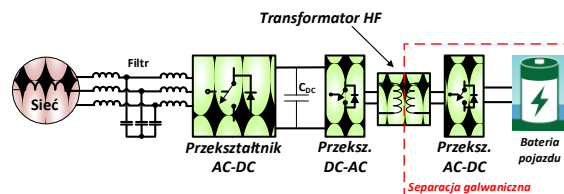
3.3 Przetwornica DC-DC

Układem odpowiedzialnym za dopasowanie napięcia baterii do napięcia stopnia wejściowego ładowarki (przekształtnika AC/DC) oraz regulację prądu i napięcia ładowania jest przekształtnik napięcia stałego DC/DC. Bardzo powszechnym wymaganie dla szybkich ładowarek EV jest zapewnienie separacji galwanicznej między baterią pojazdu a siecią zasilającą. Wymaganą separację galwaniczną najczęściej zapewnia transformator sieciowy, nazywany również niskoczęstotliwościowym (ang. *low frequency, LF*). Schemat ideowy takiego układu przedstawiono na rys. 2. Jest to sprawdzone i skuteczne rozwiązanie, jednak wymaga zastosowania transformatora sieciowego (50 lub 60 Hz). Ponieważ ładowarki DC są to układy o mocy 50 kW i więcej, taki transformator jest kosztowny, ciężki i charakteryzuje się znaczną objętością.



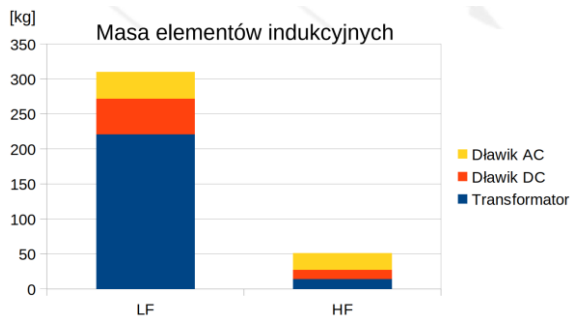
Rys. 2. Obwód mocy ładowarki DC z transformatorem LF

Innym sposobem na zapewnienie separacji galwanicznej między siecią a baterią pojazdu jest zastosowanie aktywnego przekształtnika DC-DC z transformatorem wysokoczęstotliwościowym (ang. *high frequency, HF*). Koncepcję takiego rozwiązania przedstawiono na rys. 3. Jest to układ z dwoma stopniami przetwarzania energii, w którym dopasowanie napięcia stałego baterii i przekształtnika AC-DC realizowane jest przez 2 aktywne przekształtniki: DC/AC i AC/DC z transformatorem separującym. Takie rozwiązanie, mimo większego stopnia skomplikowania układu, pozwala na uzyskanie wysokiej częstotliwości pracy przekształtników, co przekłada się na zmniejszenie objętości i masy elementów indukcyjnych, w tym transformatora separującego.

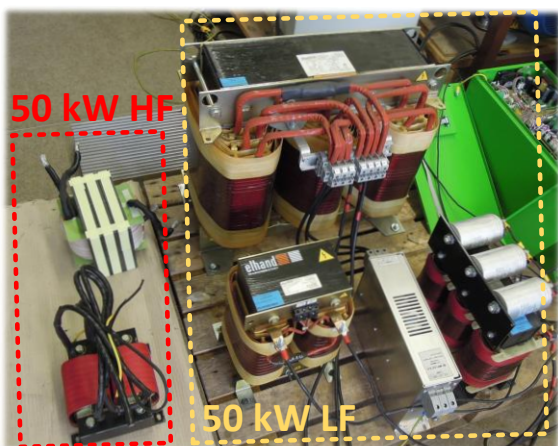


Rys. 3. Obwód mocy ładowarki DC z transformatorem HF

Porównanie masy i objętości elementów biernych dla obu przedstawionych topologii, na przykładzie ładowarki 50 kW realizowanej przez firmę Zakład Energoelektroniki TWERD, przedstawiono odpowiednio na rys. 4 i rys. 5. Poza minimalizacją masy i objętości zastosowanie przekształtnika DC/DC z transformatorem HF pozwala na zmniejszenie hałasu generowanego przez ładowarkę (wyższa częstotliwość łączeń) oraz umożliwia uzyskanie modułowej konstrukcji obwodu mocy ładowarki. Dzięki temu poszczególne układy mogą być łączone szeregowo lub równolegle w sekcje o większej mocy zapewniając separację galwaniczną i skalowalność.



Rys. 4. Porównanie masy elementów indukcyjnych ładowarki LF i HF o mocy 50 kW



Rys. 5. Wizualizacja porównania objętości elementów biernych ładowarki LF i HF o mocy 50 kW



Rys. 6. Moduł ładowarki EVC1000 o mocy 50 kW ze zintegrowanymi przekształtnikami AC/DC i DC/DC

3.4 Moduł ładowarki EVC1000

Właściwości i funkcjonalności omawianych układów zostały zintegrowane w komercyjnym urządzeniu – module ładowarki EVC1000 o mocy znamionowej 50 kW. Widok modułu przedstawiono na rys. 6, natomiast podstawowe

parametry techniczne ładowarki przedstawiają odpowiednio tab. 1 dla przetwornicy AC/DC i tab. 2 dla przetwornicy DC/DC.

Tab. 1. Parametry techniczne przekształtnika AC/DC zastosowanego w ładowarce EVC1000

Technologia tranzystorów mocy	Krzemowa (Si)
Topologia	Dwupoziomowy przekształtnik AC/DC
Moduły tranzystorowe	Fuji 2MBI300VN-120
Prąd znamionowy AC	78 A
Napięcie znamionowe AC	3x 400V
Filtr sieciowy	LC
Częstotliwość łączeń	8 kHz
Prąd znamionowy DC	80 A
Napięcie znamionowe DC	670 V

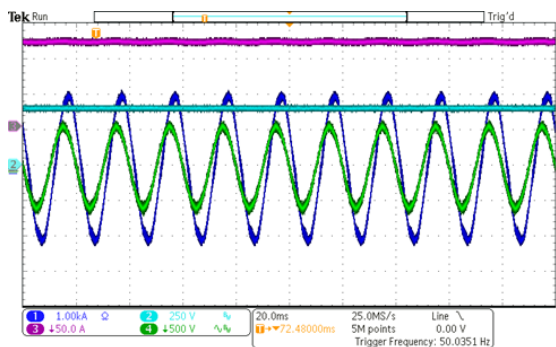
Tab. 2. Parametry techniczne przekształtnika DC/DC zastosowanego w ładowarce EVC1000

Technologia tranzystorów mocy	Krzemowa (Si)
Topologia	Pojedynczy mostek aktywny (SAB)
Moduły tranzystorowe	Fuji 2MBI450VN-120
Prąd znamionowy - wejściowy	0 .. 80 A
Napięcie znamionowe - wejściowe	670 V
Częstotliwość łączeń	12 kHz
Prąd znamionowy wyjściowy	0 .. 125 A
Napięcie znamionowe - wyjściowe	50 .. 500 V

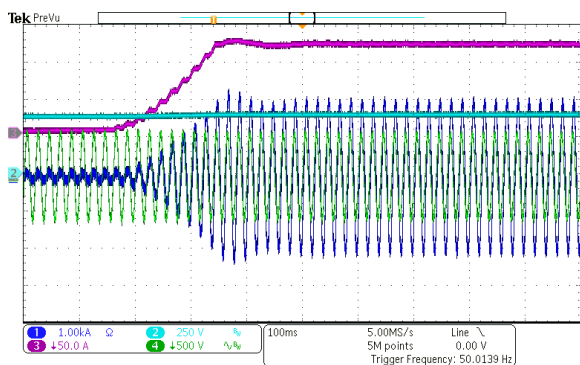
4. Badania eksperymentalne ładowarki

Praca modułu ładowania została zweryfikowana szeregiem testów funkcjonalnych i badań eksperymentalnych. W niniejszej pracy zaprezentowano badania obwodu mocy przekształtników. Oddzielnym zagadnieniem, nie obejmującym niniejszego opracowania, jest komunikacja ładowarki z pojazdem poprzez protokoły komunikacyjne CCS i CHAdeMO. Przebiegi prądów i napięć w stanie ustalonym przedstawiono na rys. 7, układ pracuje z napięciem baterii 400V, napięciem sieci 3x400V osiągając mocą znamionową 50 kW.

Na rys. 8 przedstawiono stan dynamiczny, ze skokową zmianą prądu ładowania z 5% na 80% prądu znamionowego. Wynik zarejestrowano podczas pracy z rzeczywistą baterią, a dynamikę zmian prądu DC ogranicza układ zarządzający pracą baterii.

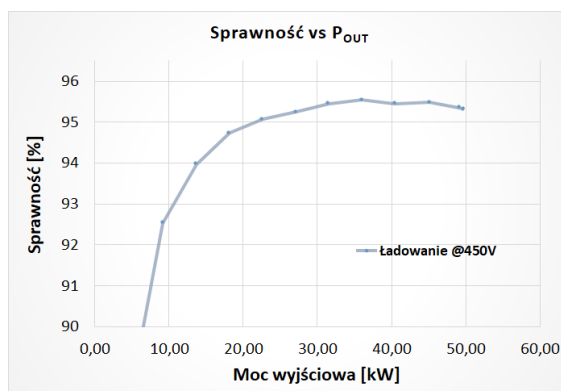


Rys. 7. Praca ładowarki EVC1000 w stanie ustalonym przy obciążeniu znamionowym, od góry: prąd baterii (fioletowy), napięcie baterii (jasnoniebieski), prąd fazowy po stronie sieci (ciemnoniebieski), napięcie międzyfazowe po stronie sieci (zielony)



Rys. 8. Praca ładowarki EVC1000 podczas skokowej zmiany prądu ładowania (z 5% do 80% wartości znamionowej), od góry: prąd baterii (fioletowy), napięcie baterii (jasnoniebieski), prąd fazowy po stronie sieci (ciemnoniebieski), napięcie międzyfazowe po stronie sieci (zielony)

W ramach weryfikacji pracy analizowanego modułu ładowania przeprowadzono także pomiar sprawności ładowarki z wykorzystaniem analizatora mocy LEM Norma D6000. Pomiaru sprawności, zdefiniowanej jako stosunek mocy wyjściowej do wejściowej ($\eta = (P_{out}/P_{in}) * 100\%$) dokonano dla różnych mocy wyjściowych przy napięciu DC wynoszącym 450V. Uzyskaną charakterystykę sprawności urządzenia (składającego się z 2 przekształtników: AC/DC i DC/DC) przedstawiono na rysunku 9



Rys. 9. Uzyskana na podstawie badań eksperymentalnych charakterystyka sprawności ładowarki EVC1000 dla różnych wartości mocy wyjściowej

5. Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono moduł szybkiej ładowarki DC dedykowanej dla pojazdów elektrycznych składający się z przekształtników AC/DC i DC/DC. Dzięki zastosowanej topologii przekształtnika DC/DC uzyskano separację galwaniczną między obwodami AC i DC oraz kompaktową konstrukcję urządzenia. W trakcie badań eksperymentalnych zweryfikowano poprawne działanie układu zarówno w stanach statycznych jak i dynamicznych. Ładowarka osiąga sprawność powyżej 95%, co jest zadowalającym wynikiem, przy uwzględnieniu zastosowania dwóch stopni przetwarzania energii. Urządzenie zostało pomyślnie wdrożone do komercyjnej sprzedaży. Widok stacji ładowania pojazdów elektrycznych wyposażonej w moduł ładowania EVC1000 przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Stacja ładowania wyposażona w moduł ładowarki EVC1000

7. Literatura

- [1]. Ministerstwo Energii "Plan Rozwoju Elektromobilności w Polsce - Energia do przyszłości", 2018.
- [2]. V. Henze "BloombergNEF's annual battery price survey finds" *raport Bloomberg*, dostępny pod adresem: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/>
- [3]. T. Möller, A. Padhi, D. Pinner, A. Tschiesner "The future of mobility is at our doorstep", *raport McKinsey*, dostępny pod adresem: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-future-of-mobility-is-at-our-doorstep>
- [4]. B. Torbus, T. Meinicke, R. Tyrtania, "Przegląd osiągnięć ogniw litowo-jonowych w odniesieniu do wymagań wynikających z zastosowania w samochodowych pojazdach elektrycznych", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3/2018 (119), str. 59 -64, 2018.
- [5]. H. Tu, H. Feng, S. Srdic and S. Lukic, "Extreme Fast Charging of Electric Vehicles: A Technology Overview," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 4, pp. 861-878, Dec. 2019, doi: 10.1109/TTE.2019.2958709.
- [6]. D. Dobrzański "Przegląd i charakterystyka standardów złączy szybkiego ładowania pojazdów EV", *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 3/2017, str. 91 -96, 2017.
- [7]. C. Leone, M. Longo, "Modular Approach to Ultra-fast Charging Stations", *J. Electr. Eng. Technol.* (2021). <https://doi.org/10.1007/s42835-021-00757-x>
- [8]. K. Fotyga, B. Mroczek, „Charakterystyki pracy dwukierunkowej przetwornicy DC/DC do pojazdów elektrycznych i architektura jej komunikacji w systemie operatora sieci elektroenergetycznej” , *Ma-*

szyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 3/2017 (115), str. 83 -89, 2017.

Autorzy

Jarosław Załęski - Od 1995 roku kierownik działu badawczo-rozwojowego w Zakładzie Energoelektroniki TWERD, w którym od 2012 roku zajmuje stanowisko Dyrektora Technicznego. Od 2009 jest odpowiedzialny za koordynowanie i wdrożenie przemienników częstotliwości z funkcją zwrotu energii do sieci dla układów napędowych i OZE. Jest autorem 5 rozwiązań podlegających krajowym i międzynarodowym zgłoszeniom patentowym.

Szymon Piasecki – adiunkt w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej. Obszary działalności naukowej obejmują zagadnienia związane z przekształtnikami sieciowymi, głównie dla elektromobilności i OZE.

Krzysztof Stępień - Od 2011 roku związany jest z Zakładem Energoelektroniki TWERD, w którym zajmuje stanowisko Kierownika Działu Przekształtników do Pozyskiwania Energii Odnawialnej. Główny obszar obowiązków to prace przy przemiennikach częstotliwości z funkcją zwrotu energii do sieci dla układów napędowych i OZE.

Informacje dodatkowe

Praca finansowana w ramach projektu: „Typszereg stacji szybkiego ładowania pojazdów elektrycznych prądem stałym DC o mocach 50-200kW” finansowanego przez Kujawsko-Pomorską Agencję Innowacji w ramach projektu „Fundusz Badań i Wdrożeń