

Zastosowanie aktywnych filtrów EMI do redukcji zaburzeń przewodzonych generowanych przez falownik

Streszczenie. W artykule zostały przedstawione wyniki badań eksperymentalnych aktywnych filtrów do tłumienia zaburzeń przewodzonych EMI (Electromagnetic Interference), gdzie źródłem tych zaburzeń jest falownik. Na wstępie omówiono ideę działania filtrów oraz parametr określający skuteczność ich działania czyli tłumienność wtrąceniową IL (insertion losses). Następnie przedstawiono struktury filtrów ze sprzężeniem zwrotnym (feedback-type), z których zostały wybrane dwie do eksperymentu. W dalszej części zostały pokazane układy pomiarowe oraz schematy ideowe wraz z widmami częstotliwościowymi uzyskanych tłumienności. Na koniec wskazano wady i zalety badanych filtrów.

Abstract. The article presents the results of experimental studies of active EMI filters where the noise source is a frequency inverter. Firstly, the idea of active EMI filters is presented. Then, feedback-type filter structures are introduced, with two of them selected for further experiments. Measurement system and schematic diagram of inspected structures are presented, along with the characteristics of noise spectrum in the function of frequency. The article concludes with the summary of positive and negative properties of the subject filters. (**Application of an active EMI filters to reduction conducted noise generated by a frequency inverter.**)

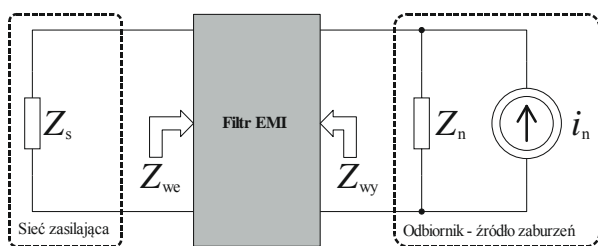
Słowa kluczowe: filtry aktywne, zaburzenia przewodzone, kompatybilność elektromagnetyczna, filtry EMI, falownik.

Keywords: active filters, electromagnetic interference, electromagnetic compatibility, EMI filters, frequency inverter.

Wstęp

Rozwój nowoczesnych przekształtników, działających na wysokich częstotliwościach, paradoksalnie doprowadził do tego, że waga i rozmiar filtrów EMI w nich użytych, mogą być większe niż sam przekształtnik [1, 2]. W związku z tym od kilkunastu lat prowadzi się badania nad możliwością zastosowania rozwiązań aktywnych do tłumienia zaburzeń przewodzonych, zastępując filtry pasywne lub znacznie poprawiając ich właściwości [3, 4, 5, 6]. Dzięki układom aktywnym możliwe jest zredukowanie rozmiaru, wagi i ceny filtrów. We wcześniejszym artykule [7] zostały przeanalizowane podstawowe struktury filtrów aktywnych ze wskazaniem ich wad i zalet oraz warunków poprawnej pracy. Kolejna publikacja [8] przedstawiała wyniki badań eksperymentalnych dwóch z sześciu możliwych konfiguracji filtrów, prezentując ich charakterystyki tłumienności wtrąceniowej oraz potwierdzając kryteria doboru odpowiedniej struktury do danych warunków pracy. Niniejszy artykuł natomiast omawia wyniki badań z zastosowania dwóch typów filtrów (typ III - detekcja napięcia i usuwanie prądu zaburzeń i typ IV - detekcja i usuwanie napięcia zaburzeń) oraz ich kaskadowego połączenia, do tłumienia zaburzeń wspólnych CM (common mode), generowanych przez falownik DC/AC.

Filtry aktywne EMI



Rys.1. Schemat zastępczy z filtrem przeciwzaburzeniowym

Zadaniem filtru jest detekcja i redukcja zaburzeń generowanych przez źródło (odbiornik), tak aby nie przedostawały się one do sieci zasilającej (rys. 1). Filtry aktywne można podzielić ze względu na typ sprzężenia oraz sposób detekcji i kompensacji zaburzeń. Zgodnie z tym, ze względu na zastosowane sprzężenie można

wyróżnić dwie grupy filtrów: ze sprzężeniem zwrotnym (feedback-type) oraz bez sprzężenia (feedforward-type).

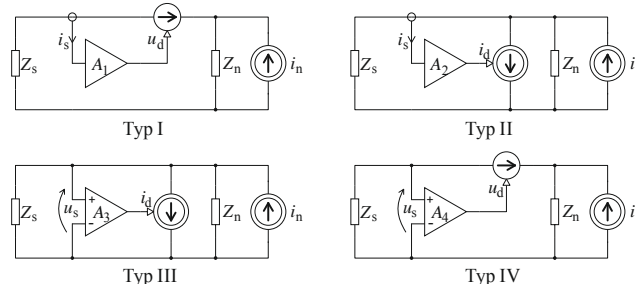
Współczynnikiem określającym stopień redukcji zaburzeń EMI przez filtr jest tłumienność wtrąceniowa IL (oznaczana też α) i definiowana (w skali decybelowej) jako (1) stosunek wartości skutecznej napięcia na zaciskach odbiornika bez filtru, do wartości skutecznej napięcia panującego na tych zaciskach po jego zastosowaniu:

$$(1) \quad |IL_{dB}| = 20 \log \frac{|U_s^0|}{|U_s|}$$

gdzie: $|U_s^0|$ - wartość skuteczna napięcia na zaciskach zasilających urządzenie bez filtru, $|U_s|$ - wartość skuteczna napięcia na zaciskach zasilających po włączeniu filtru.

Filtry aktywne ze sprzężeniem zwrotnym

W artykule skupiono się na grupie filtrów ze sprzężeniem zwrotnym, których działanie polega na wytworzeniu sygnału kompensującego, tak aby tłumić zaburzenia generowane przez źródło (zamknięta pętla). Na rysunku 2 zostały przedstawione cztery podstawowe struktury filtrów aktywnych ze sprzężeniem zwrotnym [9], wraz z zaproponowanymi dla nich numerami typów [10]. Typy te różnią się od siebie sposobem detekcji oraz redukcji zaburzeń.



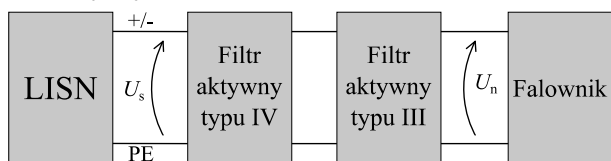
Rys.2. Struktury filtrów ze sprzężeniem zwrotnym [9]

We wcześniejszym artykule [7] została dokonana szczegółowa analiza oraz badania symulacyjne wyżej wymienionych struktur, z których w kolejnej pracy [8] zostały wybrane dwie do badań eksperymentalnych: typ III

oraz IV, gdzie zbadano ich właściwości i zweryfikowano warunki poprawnej pracy.

Stanowisko pomiarowe

Na rysunku 3 został przedstawiony schemat blokowy zaproponowanego przez autorów stanowiska do badania filtrów aktywnych.

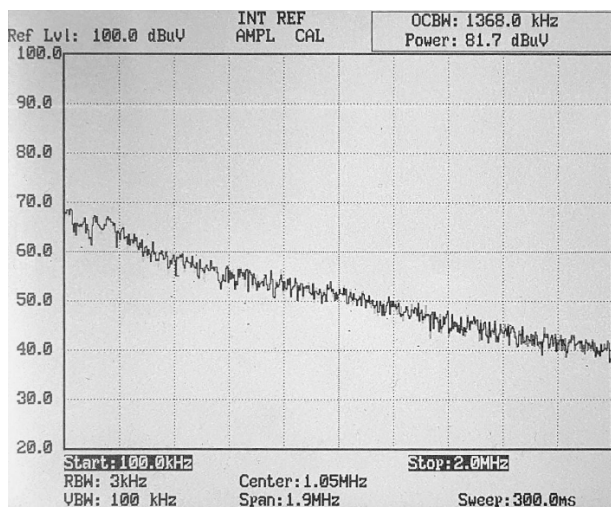


Rys.3. Proponowany schemat blokowy stanowiska do badania filtrów aktywnych

Jest to schemat zastępczy do analizy zaburzeń wspólnych CM (*common mode*), które propagują się w obu liniach zasilających + i - w tym samym kierunku i zamykają poprzez przewód uziemiający PE.

Stanowisko pomiarowe składa się ze sztucznej sieci zasilającej LISN firmy R&S, typ: ESH3-Z6, której zadaniem jest stabilizacja warunków pomiarowych. Następnie, w zależności od wariantu, dołączony jest filtr aktywny typu III, typu IV lub oba typy połączone kaskadowo. Na końcu znajduje się odbiornik czyli źródło zaburzeń, którym jest falownik z dołączonym na wyjściu silnikiem indukcyjnym o mocy 120 W.

Widmo zaburzeń wspólnych CM, generowanych przez odbiornik, było badane w zakresie od 100 kHz do 2 MHz, analizatorem firmy GW Instek, typ: GSP-827. Na rysunku 4 przedstawione zostało widmo zaburzeń jakie generuje falownik bez żadnych filtrów.



Rys.4. Widmo zaburzeń CM generowanych przez falownik bez filtrów

W tabeli 1 zostały przedstawione wyniki pomiarów modułu impedancji sieci zasilającej $|Z_s|$ oraz odbiornika $|Z_n|$ dla zaburzeń wspólnych.

Tabela 1. Moduł impedancji sieci zasilającej i odbiornika dla zaburzeń wspólnych przy różnych częstotliwościach

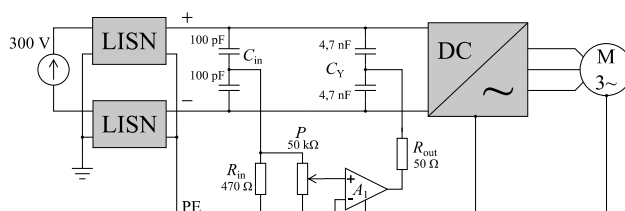
f , kHz	0,1	1	10	100	200
$ Z_s $, Ω	7000	520	10	2,8	5,7
$ Z_n $, k Ω	>100	70	2,8	0,29	0,14

Z pomiarów wynika, że w całym zakresie częstotliwości moduł impedancji sieci jest dużo mniejszy od modułu impedancji odbiornika $|Z_s| \ll |Z_n|$. Z analizy

przeprowadzonej we wcześniejszej publikacji [7], można przypuszczać, że w takim przypadku filtr typu III będzie skuteczniej tłumił zaburzenia generowane przez falownik, niż filtr typu IV.

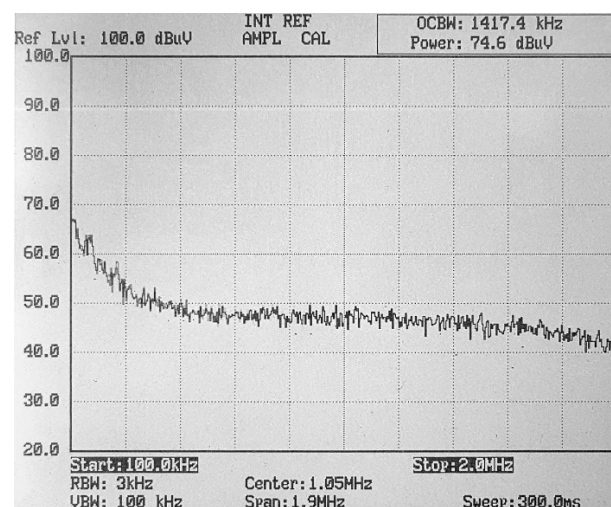
Filtr typu III

Na rysunku 5 został przedstawiony, proponowany przez autorów schemat stanowiska pomiarowego z filtrem aktywnym typu III (detekcja napięcia i usuwanie prądu zaburzeń).



Rys.5. Zaproponowany układ pomiarowy z filtrem aktywnym typu III

Detekcja napięcia zaburzeń wspólnych dokonywana jest wprost z linii zasilających falownik, poprzez dwa połączone ze sobą szeregowo kondensatory C_{in} , o wartości 100 pF. Punkt wspólny obu kondensatorów rozpatrywany względem przewodu uziemiającego PE daje informacje o napięciu zaburzeń wspólnych. Sygnał ten podawany jest następnie przez potencjometr P na wejście wzmacniacza A_1 . Kondensatory C_{in} wraz z rezystorem R_{in} tworzą filtr górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej ok. 1,7 MHz. Kompensacja zaburzeń dokonywana jest poprzez kondensatory C_Y o wartości 4,7 nF. Dodatkowy rezystor R_{out} służy poprawie stabilności wzmacniacza A_1 wprowadzając pewną stratność do obwodu.



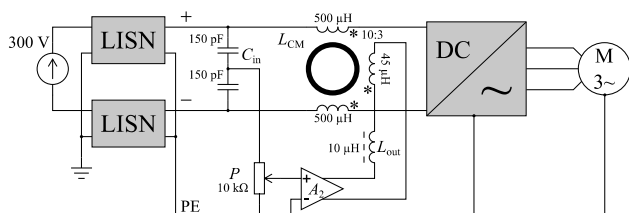
Rys.6. Widmo zaburzeń generowanych przez falownik z dołączonym filtrem aktywnym typu III

Na rysunku 6 zostało przedstawione widmo zaburzeń generowanych przez falownik po stłumieniu ich filtrem aktywnym typu III. W porównaniu do widma w układzie bez filtru, można zauważyć spadek amplitudy zaburzeń od częstotliwości ok. 150 kHz, gdzie tłumienie to wynosi ok. 10 dB, aż do ok. 1,5 MHz, gdzie filtr przestaje tłumić. W paśmie od 1,5 MHz do 2 MHz następuje nieznaczne wzmocnienie zaburzeń, co jest niepożądane. Niski poziom tłumienia wtrąceniowej $|L|$, który uzyskano może wynikać z problemów, które napotkano podczas badania tej struktury. Problemem była stabilność, stąd tak wysoka częstotliwość graniczna filtru wejściowego oraz

zastosowanie szeregowego rezystora R_{out} na wyjściu wzmacniacza, aby ten się nie wzbudzał.

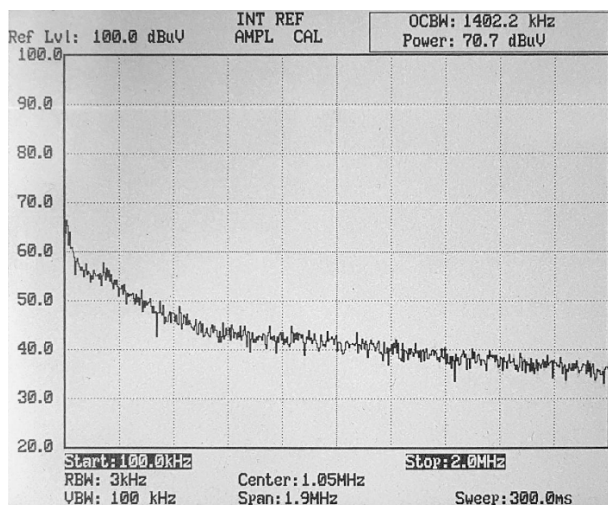
Filtr typu IV

Na rysunku 7 został przedstawiony zaproponowany przez autorów schemat stanowiska pomiarowego z filtrem aktywnym typu IV (detekcja i usuwanie napięcia zaburzeń).



Rys.7. Zaproponowany układ pomiarowy z filtrem aktywnym typu IV

Detekcja napięcia zaburzeń wspólnych, podobnie jak we filtrze typu III, dokonywana jest wprost z linii zasilających falownik, poprzez dwa połączone ze sobą szeregowo kondensatory C_{in} , o wartości 150 pF. Sygnał ten podawany jest następnie przez potencjometr P na wejście wzmacniacza A_2 . Kondensator i potencjometr, wraz z rezystancją wejściową wzmacniacza, tworzą filtr górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej ok. 100 kHz. Kompensacja zaburzeń dokonywana jest poprzez dławik zaburzeń wspólnych L_{CM} z dodatkowym uzwojeniem kompensującym, do którego podłączony jest wzmacniacz A_2 . Stosunek liczby zwojów uzwojenia roboczego do uzwojenia kompensującego wynosi: 10:3. Dodatkowy dławik L_{out} służy obciążeniu pasma filtru dla częstotliwości powyżej 3 MHz.



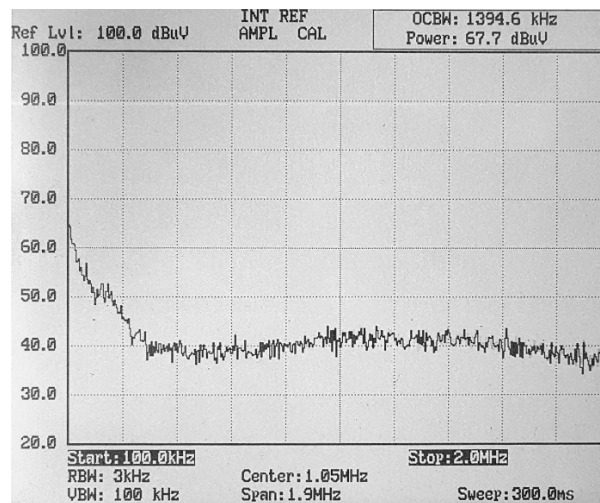
Rys.8. Widmo zaburzeń generowanych przez falownik z dołączonym filtrem aktywnym typu IV

Na rysunku 8 pokazano widmo zaburzeń generowanych przez falownik po stłumieniu ich filtrem aktywnym typu IV. W porównaniu do układu bez filtru, widać wyraźny spadek amplitudy zaburzeń w całym badanym paśmie częstotliwości. Spadek ten wynosi ok. 12 dB dla częstotliwości ok. 120 kHz i maleje do ok. 5 dB przy 2 MHz. Spowodowane jest to spadkiem wzmocnienia wzmacniacza A_2 i wzrostem reakcji dławika L_{out} . Stosunkowo niski poziom modułu tłumienności wtrąceniowej $|L|$, który uzyskano, wynika z faktu użycia struktury kompensującej napięcie zaburzeń, w przypadku gdzie zredukowane są zaburzenia wspólne CM [7]. Jednak paradoksalnie, w porównaniu do filtru typu III, filtr ten

wykazuje lepsze właściwości w tłumieniu badanych zaburzeń.

Połączenie kaskadowe filtrów typu III i IV

Połączenie kaskadowe obu badanych struktur zostało zrealizowane tak, jak na schemacie blokowym na rysunku 3. Analizując układ od strony źródła zaburzeń (falownika) najpierw został umieszczony filtr typu III, a następnie filtr typu IV. Kolejność ta związana jest z tym, że struktury usuwające prąd zaburzeń dobrze sprawdzają się w warunkach, gdzie moduł impedancji sieci jest dużo mniejszy od modułu impedancji odbiornika $|Z_s| \ll |Z_n|$, co odpowiada strukturze typu III i ta została użyta jako pierwsza [7]. Dodatkowo struktury podające detekcji napięcie zaburzeń, zmniejszają moduł impedancji odbiornika $|Z_n|$, widzianej od strony zacisków sieci zasilającej [7]. Dlatego za filtrem typu III zastosowano filtr typu IV, którego warunkiem skutecznego tłumienia jest właśnie mały moduł tej impedancji.



Rys.9. Widmo zaburzeń generowanych przez falownik z kaskadowym połączeniem filtrów typu III i IV

Na rysunku 9 zostało przedstawione widmo zaburzeń generowanych przez falownik po przejściu przez kaskadowe połączenie filtrów typu III i IV. W porównaniu do widma bez filtru, można zauważyć wyraźne tłumienie zaburzeń od samego początku badanego pasma, gdzie przy ok. 200 kHz wynosi ono ponad 20 dB. Idąc dalej z częstotliwością, tłumienie filtrów nieznacznie maleje i pod koniec badanego zakresu wynosi ok. 4 dB.

Podsumowanie

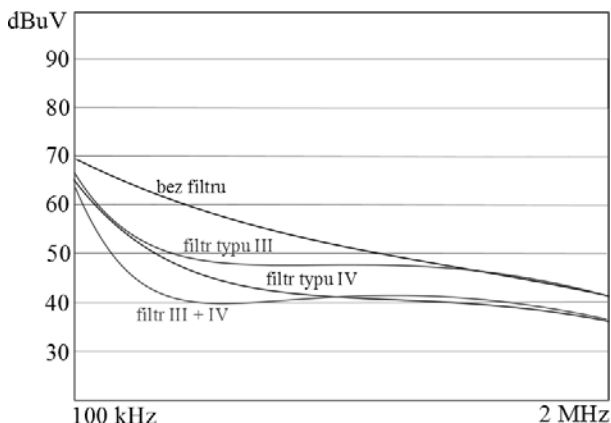
W artykule przeprowadzono badanie eksperymentalnie dwóch struktur filtrów aktywnych: typu III i IV, oraz ich kaskadowego połączenia. Filtry zostały użyte do tłumienia zaburzeń przewodzonych wspólnych CM, generowanych przez falownik. Zaburzenia badane były w zakresie częstotliwości od 100 kHz do 2 MHz, a zakres ten został wybrany ze względu na pasmo przenoszenia użytych w strukturach filtrów wzmacniaczy A_1 oraz A_2 [8].

Filtr aktywny typu III, dla częstotliwości ok. 150 kHz wykazywał moduł tłumienności wtrąceniowej na poziomie ok. 10 dB, lecz wartość ta szybko malała ze wzrostem częstotliwości osiągając 0 dB już przy częstotliwości ok. 1,5 MHz. Powyżej tej częstotliwości filtr wykazywał nawet nieznaczne wzmocnienie zaburzeń, co oczywiście jest niepożądane. Badanie filtru typu III wskazało na pewne problemy ze stabilnością tej struktury, gdzie dużą rolę odegrał odpowiedni dobór parametrów filtru górnoprzepustowego ograniczającego pasmo filtru

aktywnego od dołu oraz dobór odpowiedniej impedancji na jego wyjściu. Niewłaściwe dobranie warunków pracy skutkowało ograniczeniem maksymalnego wzmocnienia wzmacniacza A_1 , a co za tym idzie skuteczności tłumienia filtru, a w najgorszym wypadku utratą stabilności układu i wzmocnieniem zaburzeń.

Z pomiarów filtru typu IV wynika, że filtr ten skutecznie tłumia widmo generowanych zaburzeń od częstotliwości ok. 120 kHz do 2 MHz. Na podstawie otrzymanych widm, można określić moduł tłumienności wtrąceniowej $|L|$ filtru na poziomie ok. 12 dB dla częstotliwości od 120 kHz do 1 MHz. Powyżej tych częstotliwości moduł tłumienności nieznacznie maleje osiągając ok. 5dB przy 2 MHz

Połączenie kaskadowe obu filtrów w przybliżeniu dało taki sam rezultat jak złożenie charakterystyk tłumienia każdego z filtrów z osobna (rys. 10). Moduł tłumienności wtrąceniowej na początku był duży i dla częstotliwości ok. 200 kHz wynosił 20 dB przy czym ze wzrostem częstotliwości malał i osiągał ok. 4 dB przy 2 MHz.



Rys.10. Zestawienie badanych widm zaburzeń generowanych przez falownik

Tabela 2. Zalety i wady badanych filtrów aktywnych

Filtr aktywny	Zalety	Wady
Typ III	1. Brak transformatora - sprzężenie z siecią przez pojemność	1. Szybki spadek skuteczności działania ze wzrostem częstotliwości 2. Problemy ze stabilnością
Typ IV	1. Równomierna charakterystyka tłumienności w badanym paśmie częstotliwości 2. Łatwa do uzyskania stabilna praca 3. Niskie napięcie zasilania (30 V)	1. Konieczność stosowania transformatora do sprzężenia z siecią

Na rysunku 10 zostało przedstawione zestawienie otrzymanych widm zaburzeń generowanych przez falownik odpowiednio: bez filtru, z filtrem typu III, z filtrem typu IV oraz kaskadowym połączeniem obu filtrów, natomiast w tabeli 2 zestawiono zalety i wady badanych struktur.

Przeprowadzone badania potwierdzają skuteczność działania filtrów aktywnych oraz zasadność ich kaskadowego łączenia, jednak wskazują na konieczność dopracowania układu z filtrem typu III.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Marian Pasko, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10B pok. 203, 44-100 Gliwice, E-mail: Mrian.Pasko@polsl.pl; mgr inż. Marek Szymczak, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10B pok. 203, 44-100 Gliwice E-mail: Marek.Szymczak@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Dong D., Luo F., Zhang D. Boroyevich D., Mattavelli P., Grid-interface bidirectional converter for residential dc distributions systems - Part 2: AC and dc interface design with passive components minimization, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, s. 1667-1679, Apr. 2013.
- [2] Luo F., Zhang D. Boroyevich D., Mattavelli P., Xue J., Wang F., Gazel N., On discussion of ac and dc side EMI filters design for conducted noise suppression in dc-feed three-phase motor drive system. Proc. *IEEE APEC*, Mar. 2011.
- [3] Sha Y., Chen W.; Qi H.; Han Y.; Pei C.; Zhu Y., A study of an active EMI filter for high current ACDC converter, *IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia*, 3-7 June 2017.
- [4] Biela J., Wirthmueller A., Waespe R., Heldwein M. L., Raggl K., Kolar J. W., Passive and Active Hybrid Integrated EMI Filters, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, May 2009.
- [5] Chen W., Yang X., Wang Z., An Active EMI Filtering Technique for Improving Passive Filter Low-Frequency Performance, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, no. 1, Feb. 2006.
- [6] Heldwein M. L., Ertl H., Biela J., Kolar J. W., Implementation of a Transformless Common-Mode Active Filter for Offline Converter Systems, *IEEE Trans. On Industrial Electron.*, vol. 57, no. 5, May 2010.
- [7] Pasko M., Szymczak M., Analysis and simulation of the basic structures of active EMI filters, "Computer Applications in Electrical Engineering", ed. by R. Nawrowski, Poznan University of Technology, No 13, Poznań 2015.
- [8] Pasko M., Szymczak M., Badanie aktywnych filtrów do tłumienia zaburzeń przewodzonych, *Poznan University Of Technology Academic Journals Electrical Engineering*, no 87, Poznań 2016.
- [9] LaWhite L., Schlecht M. F., Design of Active Ripple Filters for Power Circuits Operating in the 1–10 MHz Range, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 3, no. 3, s. 310–317, July 1988.
- [10] Son Y.-C., Sul S.-K., Generalization of Active Filters for EMI Reduction and Harmonics Compensation, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 2, s. 545–551, March/April 2006.