

Marian PASKO*
Marek SZYMCZAK*

BADANIE AKTYWNYCH FILTRÓW DO TŁUMIENIA ZABURZEŃ PRZEWODZONYCH

W artykule zostały przedstawione wyniki badań eksperymentalnych aktywnych filtrów do tłumienia zaburzeń przewodzonych EMI (*Electromagnetic Interference*). 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 badanych struktur wraz z charakterystykami częstotliwościowymi uzyskanych tłumienności. Na koniec wskazano wady i zalety badanych filtrów.

SŁOWA KLUCZOWE: filtry aktywne, zaburzenia przewodzone, kompatybilność elektromagnetyczna, filtry EMI

1. WSTĘP

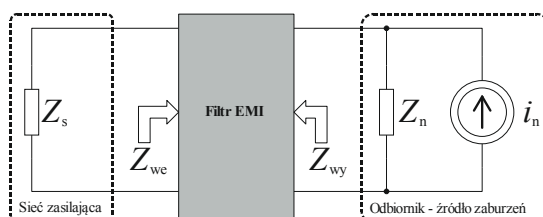
Rozwój nowoczesnych przekształtników, działających na wysokich częstotliwościach, paradoksalnie doprowadził do tego, że waga i rozmiar filtrów EMI w nich użytych, mogą być większe niż sam przekształtnik [4, 7]. W związku z tym od kilkunastu lat prowadzi się badania nad możliwością zastosowania rozwiązań aktywnych do tłumienia zaburzeń przewodzonych, zastępując filtry pasywne lub znacznie poprawiając ich właściwości [1, 2, 3, 5]. Dzięki układom aktywnym możliwe jest zredukowanie rozmiaru, wagi i ceny filtrów. W [8] zostały przeanalizowane podstawowe struktury filtrów aktywnych ze wskazaniem ich wad i zalet oraz warunków poprawnej pracy. W tym artykule skupiono się na badaniach eksperymentalnych dwóch z sześciu możliwych konfiguracji filtrów oraz weryfikacji wcześniej przeprowadzonych badań symulacyjnych.

2. FILTRY EMI

Zadaniem filtru jest detekcja i redukcja zaburzeń generowanych przez źródło (odbiornik), tak aby nie przedostawały się one do sieci zasilającej (rysunek 1).

* Politechnika Śląska.

Filtry aktywne można podzielić ze względu na typ sprzężenia oraz sposób detekcji i kompensacji zaburzeń. Ze względu na zastosowane sprzężenie można wyróżnić dwie grupy filtrów: ze sprzężeniem zwrotnym (*feedback-type*) oraz bez sprzężenia (*feedforward-type*).



Rys. 1. Schemat zastępczy z filtrem przeciwzaburzeniowym

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

$$|IL| = \frac{|U_s^0|}{|U_s|} \quad (1)$$

lub w skali decybelowej (2):

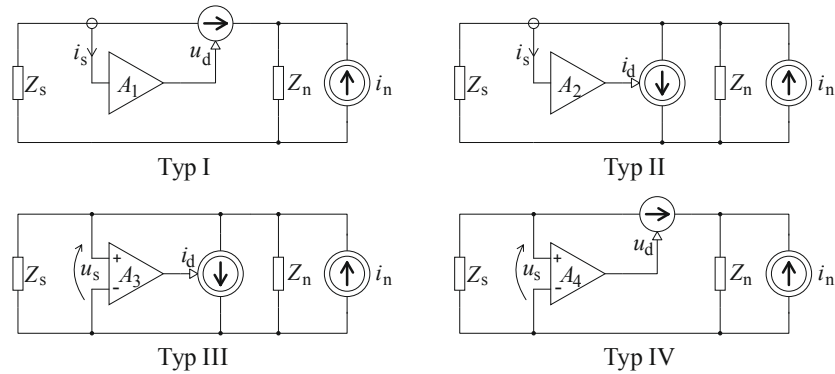
$$|IL_{dB}| = 20 \log \frac{|U_s^0|}{|U_s|} \quad (2)$$

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

2.1. Struktury filtrów aktywnych ze sprzężeniem zwrotnym

W artykule skupiono się na filtrach ze sprzężeniem zwrotnym (*feedback-type*), których działanie polega na wytworzeniu sygnału kompresującego, tak aby tłumić zaburzenia generowane przez źródło (zamknięta pętla). Na rysunku 2 zostały przedstawione cztery podstawowe struktury filtrów aktywnych ze sprzężeniem zwrotnym [6], wraz z zaproponowanymi dla nich w [10] numerami typów. Typy te różnią się od siebie sposobem detekcji oraz redukcji zaburzeń.

W [8] została dokonana szczegółowa analiza oraz badania symulacyjne wyżej wymienionych struktur, z których zostały wybrane dwie do badań eksperymentalnych: typ III - detekcja napięcia i usuwanie prądu zaburzeń; oraz typ IV – detekcja napięcia i usuwanie napięcia zaburzeń.

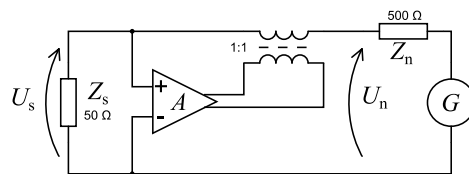


Rys. 2. Struktury filtrów ze sprzężeniem zwrotnym [6]

Kluczową rolę w każdym z wymienionych filtrów odgrywa wzmacniacz ponieważ to od niego zależy tłumienność, jaką do układu wprowadza filtr. Podłączenie do urządzenia generującego zaburzenia filtrów usuwających prąd zaburzeń, odbywa się poprzez równoległe dołączoną do odbiornika pojemność (rysunek 7), natomiast w filtrach usuwających napięcie zaburzeń jest to włączony szeregowo z odbiornikiem transformator (rysunek 3). Napięcie zaburzeń poddawane jest detekcji wprost z linii zasilających odbiornik, natomiast prąd zaburzeń poddaje się detekcji poprzez odpowiednio włączony przekładnik prądowy.

2.2. Detekcja napięcia i usuwanie napięcia zaburzeń

Na rysunku 3 został zaproponowany schemat zastępczy z filtrem poddającym detekcji i usuwaniu napięcie zaburzeń. Jest to ogólny schemat filtru, z tym wyjątkiem, że zamiast źródła napięcia, elementem przekazującym sygnał kompensujący jest transformator.



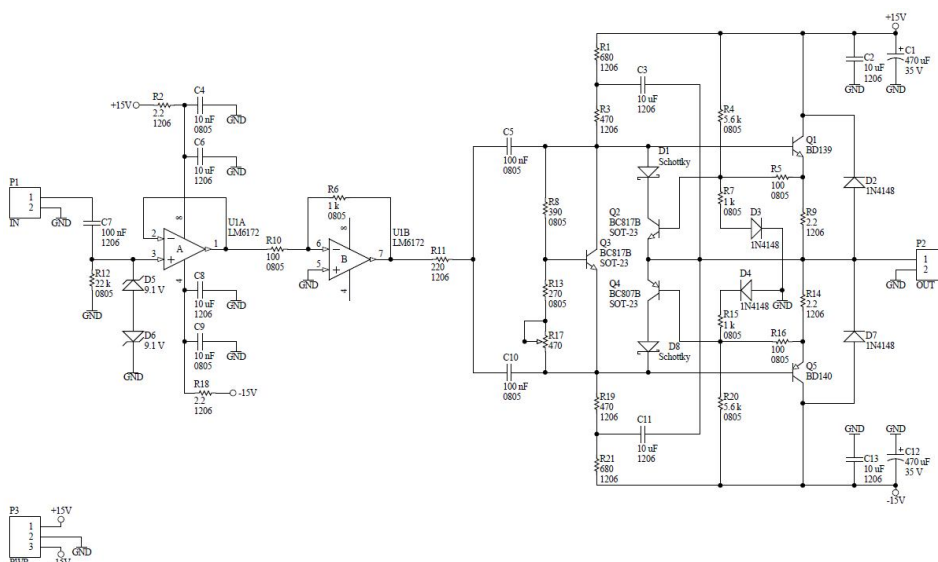
Rys. 3. Schemat zastępczy z filtrem poddającym detekcji i usuwającym napięcie zaburzeń

Napięcie zaburzeń podawane jest wprost na wejście wzmacniacza A , natomiast sygnał kompensujący podawany jest, poprzez transformator z przekładnią 1:1, w przeciwfazie na jedną z linii zasilających. Źródłem zaburzeń jest generator przemiatający o impedancji wyjściowej 500Ω , natomiast sieć zasilająca została zamodelowana jako impedancja 50Ω . Impedancja generatora została do-

brana jako dziesięciokrotność impedancji sieci, tak aby zasymulować impedancję odbiornika dla zaburzeń wspólnych (warunek $|Z_n| \gg |Z_s|$). Na rysunku 4 została zaproponowana struktura wzmacniacza A użytego w filtrze, natomiast jego parametry oraz charakterystyka modułu wzmocnienia podane zostały odpowiednio w tabeli 1 i na rysunku 5.

Tabela 1. Parametry wzmacniacza niskonapięciowego

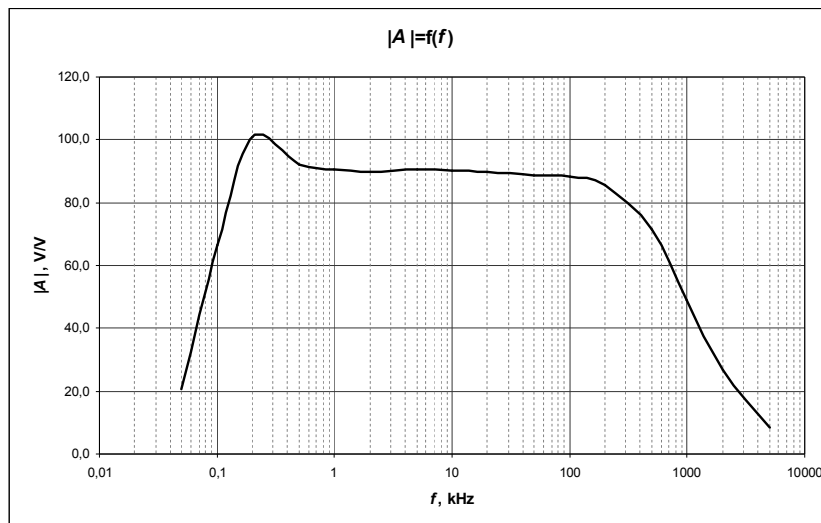
Maksymalne napięcie zasilania	+/- 15 V
Wzmocnienie	100 V/V
Rezystancja wejściowa	22 k Ω
Prąd wyjściowy	Do 100 mA
Pasma	Od 1 kHz do 500 kHz



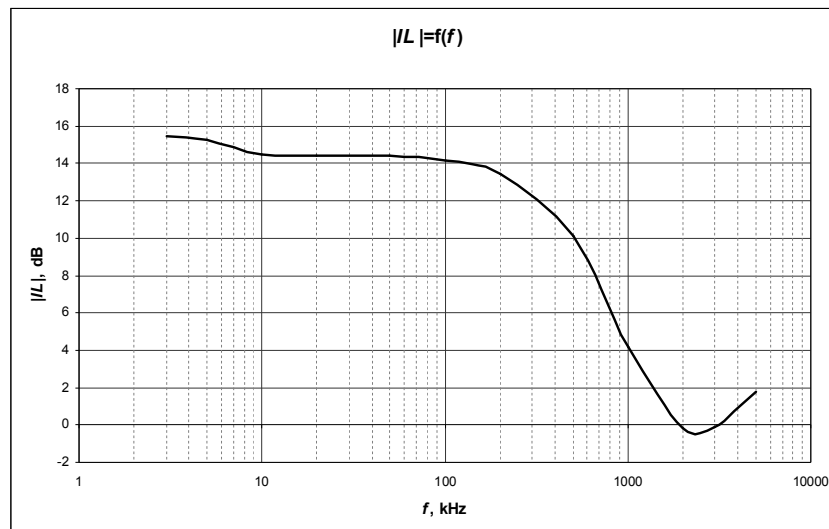
Rys. 4. Schemat wzmacniacza niskonapięciowego

Na rysunku 6 została przedstawiona, zmierzona charakterystyka modułu tłumienności wtrąceniowej $|L|$ filtra z rysunku 3. Z charakterystyki tej wynika, że skuteczność tłumienia filtra jest dość mała. Powodem tego jest fakt, że filtr zwiększa impedancję sieci zasilającej z punktu widzenia samego odbiornika (źródła zaburzeń). Model źródła zaburzeń, który został użyty, ma impedancję wewnętrzną o rząd wielkości większą od impedancji sieci i dlatego, filtr zwiększając impedancję sieci widzianą przez to źródło zaburzeń, powoduje, że napięcie na jego zaciskach rośnie, przez co napięcie zaburzeń, które odkłada się na impedancji sieci nie maleje proporcjonalnie ze wzrostem wzmocnienia wzmac-

niacza A . Innymi słowy, zwiększając impedancję sieci rośnie napięcie zaburzeń na źródle, utrudniając skuteczne tłumienie tych zaburzeń. Potwierdza to analizę przeprowadzoną w [9], że filtry usuwające napięcie zaburzeń, dobrze sprawdzają się w sytuacji gdzie impedancja wewnętrzna źródła zaburzeń (odbiornika) jest niższa od impedancji sieci zasilającej $|Z_n| \ll |Z_s|$.



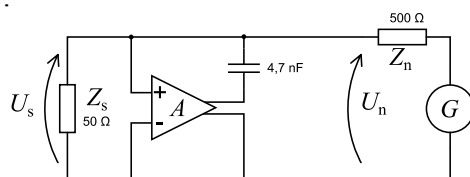
Rys. 5. Charakterystyka modułu wzmocnienia wzmacniacza niskonapięciowego



Rys. 6. Wykres modułu tłumienia wtrąceniowej w funkcji częstotliwości

2.3. Detekcja napięcia i usuwanie prądu zaburzeń

Drugim testowanym filtrem aktywnym był filtr dokonujący detekcji napięcia i usuwający prąd zaburzeń. Zaproponowany schemat zastępczy został przedstawiony na rysunku 7.



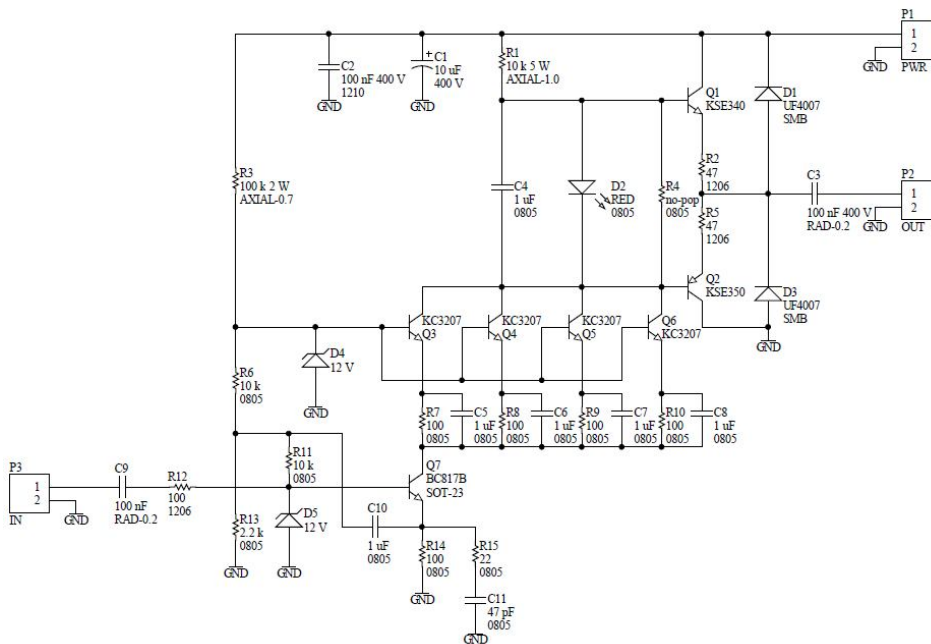
Rys. 7. Schemat zastępczy z filtrem podającym detekcji napięcia i usuwający prąd zaburzeń

Tak jak w poprzednim przykładzie, napięcie zaburzeń podawane jest wprost na wzmacniacz A , natomiast sygnał usuwający zaburzenia podawany jest w przeciwfazie przez kondensator $4,7 \text{ nF}$ pomiędzy linie zasilające odbiornik. Kondensator ten stanowi pewną reaktancję, przez którą "wstrzykiwany" jest prąd kompensujący, prąd proporcjonalny do napięcia na wyjściu wzmacniacza. W celu zwiększenia zakresu częstotliwości od dołu, w których filtr miałby skutecznie tłumić zaburzenia, napięcie na wyjściu wzmacniacza musi mieć dużą amplitudę. W tym celu został zbudowany wzmacniacz wysokonapięciowy, którego schemat został zaproponowany na rysunku 8, natomiast jego parametry oraz charakterystyka modułu wzmocnienia zostały podane odpowiednio w tabeli 2 i na rysunku 9.

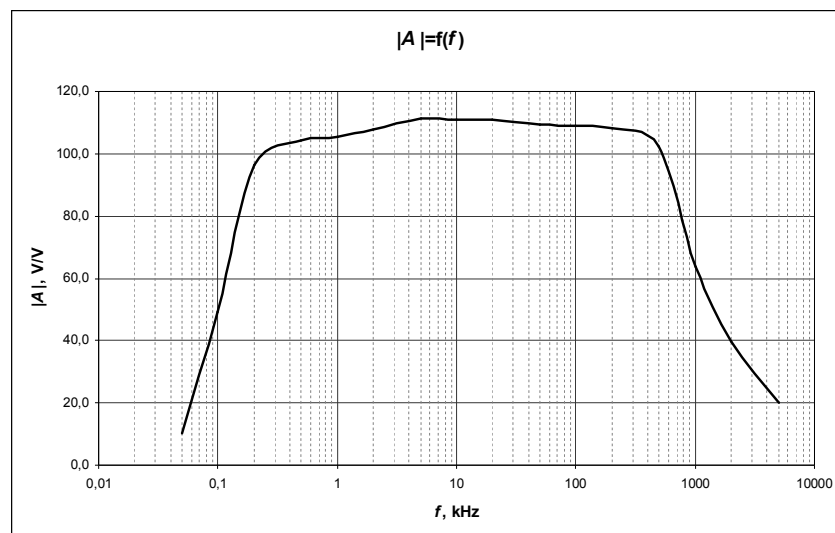
Tabela 2. Parametry wzmacniacza wysokonapięciowego

Maksymalne napięcie zasilania	300 V
Wzmocnienie	100
Rezystancja wejściowa	10 k Ω
Prąd wyjściowy	ok. 5 mA
Pasmo	Od 2 kHz do 600 kHz

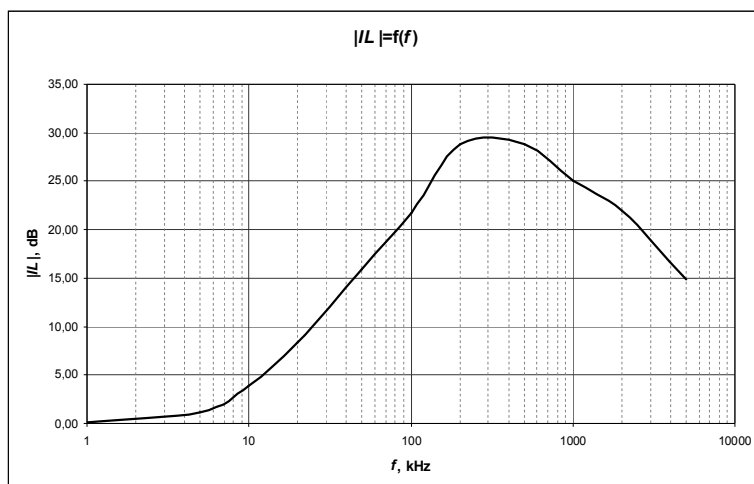
Na rysunku 10 została wyrysowana charakterystyka modułu tłumienności wtrąceniowej $|IL|$ filtru z rysunku 7. Można na niej zauważyć, że dla częstotliwości poniżej 200 kHz zaczyna gwałtownie maleć skuteczność tłumienia filtru, co wynika z wartości pojemności ($4,7 \text{ nF}$), przez którą podawany jest sygnał kompensujący zaburzenia. Mimo to, skuteczność tłumienia (przy podobnych parametrach wzmacniacza: wzmocnienie, pasmo) jest dużo większa niż przy wzmacniaczu usuwającym napięcie zaburzeń. Potwierdza to analizę przeprowadzoną w [9], dla filtrów usuwających prąd zaburzeń w przypadku, gdzie moduł impedancji sieci jest mniejszy od modułu impedancji odbiornika ($|Z_s| \ll |Z_n|$).



Rys. 8. Schemat wzmacniacza wysokonapięciowego



Rys. 9. Charakterystyka modułu wzmocnienia wzmacniacza wysokonapięciowego



Rys. 10. Wykres modułu tłumienności wtrąceniowej w funkcji częstotliwości

3. PODSUMOWANIE

W strukturach usuwających napięcie zaburzeń, problem stanowi impedancja wewnętrzna źródła zaburzeń, która, do skutecznego działania filtru, musi być dużo mniejsza od impedancji sieci zasilającej. Przy zaburzeniach wspólnych impedancja ta z reguły jest dużo wyższa od impedancji sieci, co przekłada się na niską skuteczność tych filtrów. Napięcie dostarczane przez wzmacniacz nie musi być wysokie ponieważ napięcie zaburzeń z reguły nie przekracza kilku woltów, dlatego do budowy tego filtru użyto wzmacniacza niskonapięciowego. Dodatkową zaletą jest separacja galwaniczna od strony wyjścia wzmacniacza (przez transformator 1:1).

Przy filtrach usuwających prąd zaburzeń, wymaga się dużej amplitudy napięcia wyjściowego dostarczanego przez wzmacniacz, co wynika z faktu, iż filtr taki podłączony jest do zacisków odbiornika przez stosunkowo małą pojemność (do 10 nF, co jest maksymalną wartością dopuszczalną przez normę IEC 60990). Powoduje to, że wraz ze spadkiem częstotliwości, pojemność ta stanowi coraz większą reaktancję, i aby uzyskać odpowiedni prąd, należy zwiększyć amplitudę dostarczaną przez wzmacniacz. Tego typu filtry dobrze nadają się do tłumienia zaburzeń, które można zamodelować źródłem prądowym (duża impedancja Z_n źródła).

Kolejnym krokiem będzie przeanalizowanie filtrów w rzeczywistym układzie oraz próba ich kaskadowego łączenia.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Cantillon-Murphy P., Neugebauer T. C., Brasca C., Perreault D. J.: An Active Ripple Filtering for Improving Common-Mode Inductor Performance. *IEEE Power Electron. Letters*, vol. 2, no. 2, s.45-50, June 2004.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Szymczak M., Pasko 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.
- [9] Szymczak M., Pasko M.: Porównanie i ocena metod aktywnego tłumienia zaburzeń przewodzonych. *IAPGOŚ*, Tom 4, Numer 4, 2014.
- [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.

EVALUATION OF ACTIVE EMI FILTERS

The article presents the results of experimental studies of active EMI filters. Firstly, the idea of active EMI filters is presented, with the insertion loss (IL) parameter describing their efficiency. Then, feedback-type filter structures are introduced, with two of them selected for further experiments. Measurement systems and schematic diagrams of inspected structures are presented, along with the characteristics of insertion loss in the function of frequency. The article concludes with the summary of positive and negative properties of the subject filters.

(Received: 14. 02. 2016, revised: 2. 03. 2016)