

Marian PASKO*
Marek SZYMCZAK*

ANALIZA TEORETYCZNA ORAZ BADANIA SYMULACYJNE AKTYWNYCH FILTRÓW DO TŁUMIENIA ZABURZEŃ PRZEWODZONYCH. CZEŚĆ 2 - BADANIA SYMULACYJNE

W artykule przeprowadzono analizę teoretyczną oraz badania symulacyjne różnych struktur filtrów aktywnych, służących do tłumienia zaburzeń przewodzonych. W pierwszej części artykułu przedstawiono podstawowe struktury filtrów aktywnych, dzieląc je ze względu na sposób detekcji i kompensacji zaburzeń oraz rodzaj zastosowanego w nich sprzężenia. Dla każdej ze struktur zostały wyprowadzone podstawowe właściwości mianowicie tłumienność wtrąceniowa IL oraz współczynnik zmiany impedancji ΔZ_n . W drugiej części artykułu zostały pokazane wyniki badań symulacyjnych dla opisanych struktur w części pierwszej artykułu. Badania symulacyjne mają na celu porównanie ich właściwości oraz wskazanie warunków poprawnej pracy.

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

1. BADANIA SYMULACYJNE

W pierwszej części artykułu [3] zostały wyprowadzone podstawowe współczynniki charakterystyczne dla sześciu typowych struktur filtrów aktywnych [1, 2]. W tej części natomiast zostanie przeprowadzona analiza właściwości otrzymanych równań na podstawie badań symulacyjnych, w celu zbadania ich zachowania, w zależności od zmian poszczególnych parametrów, a mianowicie modułu impedancji wewnętrznej źródła zaburzeń $|Z_n|$ oraz modułu wzmocnienia filtra $|A|$.

1.1. Filtry ze sprzężeniem zwrotnym (*feedback-type*)

Wyróżniamy cztery podstawowe typy filtrów ze sprzężeniem zwrotnym, dzieląc je ze względu na sposób detekcji i kompensacji zaburzeń:

- Typ I: Detekcja prądu i kompensacja napięcia,

* Politechnika Śląska.

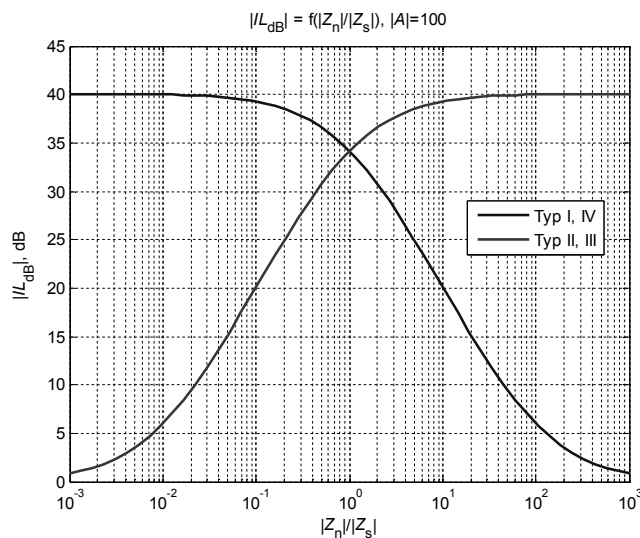
- Typ II: Detekcja prądu i kompensacja prądu,
- Typ III: Detekcja napięcia i kompensacja prądu,
- Typ IV: Detekcja napięcia i kompensacja napięcia.

W pierwszej części artykułu zostały wyprowadzone podstawowe parametry tych filtrów, a ich zestawienie zamieszczono w tabeli 1 [3].

Tabela 1. Zestawienie podstawowych parametrów filtrów ze sprzężeniem zwrotnym

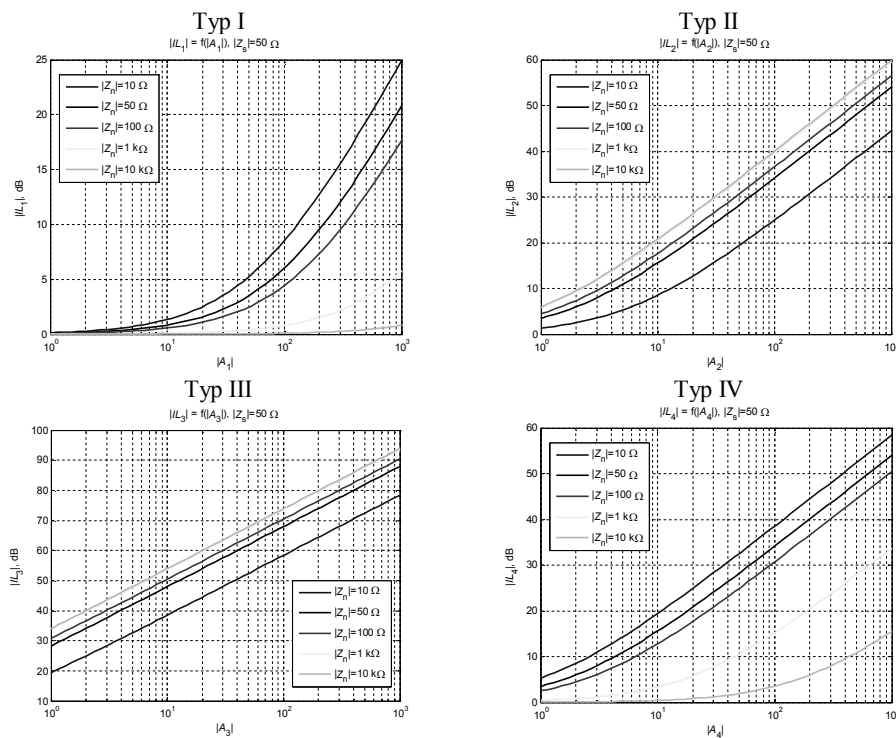
Typ	Wzmocnienie filtru	Tłumienność wtrąceniowa	Zmiana impedancji
I	$A_1 = \frac{U_d}{I_s}$	$IL_1 = 1 + \frac{A_1}{Z_n + Z_s}$	$\Delta Z_{n1} = A_1$
II	$A_2 = \frac{I_d}{I_s}$	$IL_2 = 1 + \frac{A_2 \cdot Z_n}{Z_n + Z_s}$	$\Delta Z_{n2} = A_2 \cdot Z_n$
III	$A_3 = \frac{I_d}{U_s}$	$IL_3 = 1 + \frac{A_3}{Y_n + Y_s}$	$\Delta Z_{n3} = -\frac{Z_n^2 \cdot A_3}{1 + Z_n \cdot A_3}$
IV	$A_4 = \frac{U_d}{U_s}$	$IL_4 = 1 + \frac{A_4 \cdot Z_s}{Z_n + Z_s}$	$\Delta Z_{n4} = -\frac{A_4 \cdot Z_n}{1 + A_4}$

Na rysunku 1 zostały przedstawione wykresy zmian modułu współczynnika tłumienności wtrąceniowej $|IL|$, w zależności od stosunku modułów impedancji źródła ($|Z_n|$) i sieci ($|Z_s|$) dla stałej wartości modułu wzmocnienia $|A|$, dla poszczególnych typów filtrów.



Rys. 1. Charakterystyki modułu tłumienności wtrąceniowej przy zmianie stosunku modułów impedancji źródła zaburzeń i sieci zasilającej dla poszczególnych typów filtrów

Analizując wykresy na rysunku 1, można wywnioskować, że do poprawnej pracy filtrów typu I i IV, które dokonują kompensacji napięcia zaburzeń, wymaga się, aby moduł impedancji źródła $|Z_n|$ był mniejszy od modułu impedancji sieci $|Z_s|$. Natomiast dla typów II i III, w których następuje kompensacja prądu, wymaga się modułu impedancji źródła zaburzeń, dużo większego od modułu impedancji sieci. Moduł wzmocnienia filtrów jest taki sam dla wszystkich typów i wynosi $|A|=100$.



Rys. 2. Charakterystyki modułu tłumienności wręceniowej przy zmianie modułu wzmocnienia dla różnych modułów impedancji źródła i różnych typów filtrów

Na rysunku 2 przedstawione zostały wykresy zmian modułu tłumienności wręceniowej $|L_d|_{dB}$, przy zmianie modułu wzmocnienia filtru $|A|$, dla różnych wartości modułu impedancji źródła zaburzeń $|Z_n|$. Na podstawie tych wykresów można ocenić zachowanie filtrów przy różnych wartościach modułu impedancji źródła, jednak ich wspólną wykładnią, dla uzyskania dużej skuteczności tłumienia zaburzeń, jest jak największa wartość modułu wzmocnienia filtru.

Analizując moduł $|\Delta Z_n|$, podanego w tabeli 1, współczynnika zmiany impedancji, można zauważyć, że dla filtrów, poddających detekcji prąd

zaburzeń (typ I oraz II), przyjmuje on wartości dodatnie, natomiast dla filtrów, które dokonują detekcji napięcia (typ III oraz IV), wartości ujemne.

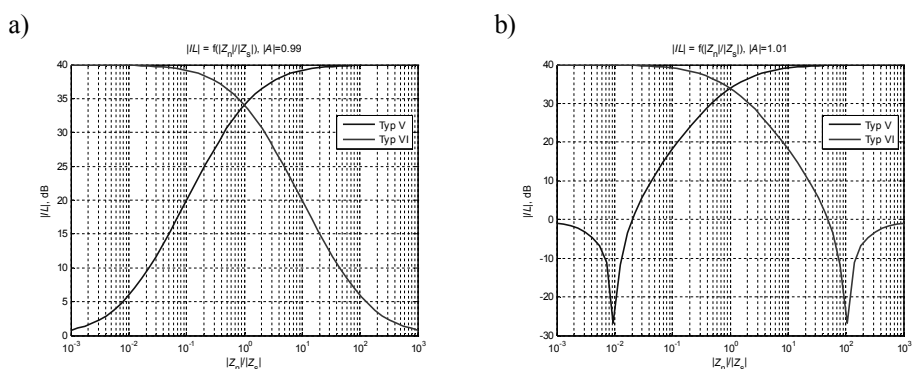
1.2. Filtry bez sprzężenia zwrotnego (*feedforward-type*)

W tabeli 2 [3] zostały zestawione podstawowe parametry filtrów bez sprzężenia zwrotnego. W odróżnieniu od filtrów ze sprzężeniem zwrotnym, możliwe są tu jedynie dwie konfiguracje:

- Typ V: Detekcja prądu i kompensacja prądu,
- Typ VI: Detekcja napięcia i kompensacja napięcia.

Tabela 2. Zestawienie podstawowych parametrów filtrów bez sprzężenia zwrotnego

Typ	Wzmocnienie filtru	Tłumienność wtrąeniowa	Zmiana impedancji
V	$A_5 = \frac{I_s}{I_d}$	$IL_5 = \frac{1}{1 - A_5} \cdot \left(1 - \frac{Z_s \cdot A_5}{Z_n + Z_s}\right)$	$\Delta Z_{n5} = \frac{Z_n \cdot A_5}{1 - A_5}$
VI	$A_6 = \frac{U_s}{U_d}$	$IL_6 = \frac{1}{1 - A_6} \cdot \left(1 - \frac{Z_n \cdot A_6}{Z_n + Z_s}\right)$	$\Delta Z_{n6} = -A_6 \cdot Z_n$



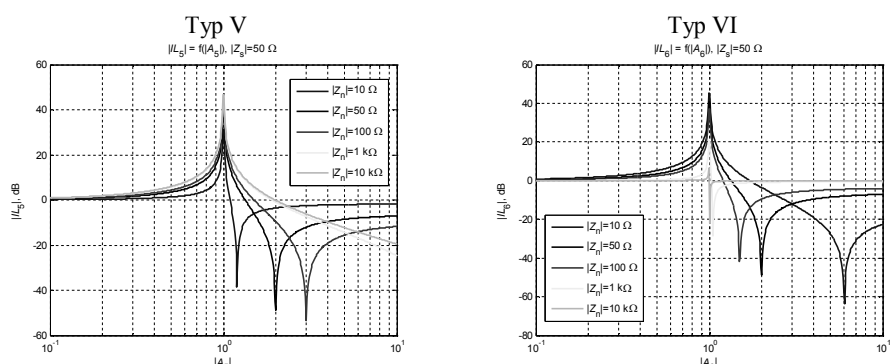
Rys. 3. Charakterystyka modułu tłumienności wtrąeniowej przy zmianie stosunku modułów impedancji źródła zaburzeń i sieci zasilającej dla wzmocnienia: a) $|A|=0,99$; b) $|A|=1,01$

Z wykresów na rysunku 3 można zauważyć, że, podobnie jak w filtrach ze sprzężeniem zwrotnym, dla filtru kompensującego napięcie zaburzeń (typ V) wymaga się, aby moduł impedancji źródła, był dużo większy od modułu impedancji sieci. Analogicznie dla filtru typu VI, do skutecznego tłumienia zaburzeń wymaga się dużej wartości modułu impedancji źródła. Natomiast, w przeciwieństwie do filtrów ze sprzężeniem zwrotnym, aby uzyskać duży współczynnik tłumienia, wzmocnienie w tych filtrach musi być bliskie jedności. W symulacji przyjęto wartość $A \neq 1$, ponieważ przy wzmocnieniu jednostkowym, równania tych filtrów nie mają sensu (dzielenie przez 0).

Zakładając $|Z_n| \gg |Z_s|$ dla filtru typu V można zapisać, że jego wzmacnienie w przybliżeniu wynosi (1), natomiast dla filtru typu VI, zakładając $|Z_n| \ll |Z_s|$, jego wzmacnienie można w przybliżeniu zapisać jako (2).

$$|IL_5| \cong \frac{1}{1 - |A_5|}, \text{ dla } |Z_n| \gg |Z_s| \quad (1)$$

$$|IL_6| \cong \frac{1}{1 - |A_6|}, \text{ dla } |Z_n| \ll |Z_s| \quad (2)$$



Rys. 4. Charakterystyki modułu tłumienności wręceniowej przy zmianie modułu wzmacnienia dla różnych modułów impedancji źródła i różnych typów filtrów

Na rysunku 4 zostały przedstawione wykresy zmian modułu tłumienności wręceniowej $|IL_{dB}|$ w zależności od wzmacnienia filtru dla różnych wartości modułu impedancji źródła $|Z_n|$. Wzmacnienie to zmieniane jest w wąskim zakresie (od 0,1 do 10) ponieważ dla większych wartości jego zmiany nie mają sensu. Jak zostało wspomniane, w filtrach bez sprzężenia zwrotnego, wymaga się wzmacnienia bliskiego jedności, natomiast wykresy z rysunku 4 przedstawiają wrażliwość filtrów na jego zmiany dla różnych wartości modułu impedancji $|Z_n|$.

Oceniając moduły współczynników zmiany impedancji podane w tabeli 2, można zauważyć, że tak jak w filtrach ze sprzężeniem zwrotnym, dla filtru poddającego detekcji prąd zaburzeń jest on dodatni, a dla filtru mierzącego napięcie, ujemny.

2. DOBÓR STRUKTURY FILTRU

Analizując powyższe wyniki symulacji, można zauważyć, że każda ze struktur nadaje się do redukcji innego typu zaburzeń oraz to, że filtry aktywne wpływają na charakter impedancji odbiornika, z punktu widzenia sieci zasilającej.

Filtry typu I, IV i VI, w których następuje kompensacja napięcia zaburzeń, dobrze nadają się do układów, w których źródło zaburzeń można zamodelować źródłem napięciowym $|Z_n| \rightarrow 0$. Natomiast filtry kompensujące prąd zaburzeń sprawdzą się dobrze w układach, w których źródło zaburzeń można zamodelować źródłem prądowym $|Z_n| \rightarrow \infty$. Jeśli spojrzeć na sposób redukcji zaburzeń, to w filtrach typu II, III i V następuje przekierowanie przepływu prądu zaburzeń z powrotem do odbiornika. Dzięki temu prąd nie trafia do sieci zasilającej, tylko wraca z powrotem do źródła. Analogicznie w strukturach typu I, IV i VI, gdzie usuwane jest napięcie, układ blokuje przepływ zaburzeń do sieci, starając się wygenerować napięcie przeciwne do wartości napięcia zaburzeń. Sytuacja taka odpowiada przerwie w obwodzie [4].

Analizując moduł współczynnika zmiany impedancji, można zauważyć, że filtry typu I, II i V powodują zwiększenie modułu impedancji odbiornika, natomiast filtry typu III, IV i VI jego zmniejszenie. Związane jest to ze sposobem detekcji zaburzeń. Dlatego projektując filtr należy zadbać o to, aby działanie układu rozpoczynało się dla częstotliwości dużo większej od częstotliwości sieciowej, co jest szczególnie ważne dla filtrów typu III, IV i VI, w których następuje zmniejszenie modułu impedancji odbiornika. W strukturach tych, bez odpowiedniego filtra niskich częstotliwości na wejściu, może dojść do przesterowania lub przeciążenia części aktywnej na skutek dużej amplitudy napięcia zasilającego odbiornik [4].

Analizując wykresy z rysunku 4, dla poszczególnych filtrów, można zauważyć, że największym współczynnikiem tłumienności wtrąceniowej charakteryzuje się filtr typu III. W porównaniu do pozostałych filtrów, współczynnik ten jest dużo większy oraz mniej wrażliwy na zmiany zarówno wzmocnienia jak i impedancji odbiornika (źródła zaburzeń). Najgorszymi parametrami, w analizowanych warunkach, okazał się filtr typu I. Charakteryzuje się najmniejszym tłumieniem i największą wrażliwością na zmiany impedancji źródła.

W filtrach bez sprzężenia zwrotnego, istotną kwestię odgrywa wartość wzmocnienia bliska jedności. Zmniejszenie tej wartości poniżej jedności powoduje gwałtowny spadek skuteczności działania filtru. Natomiast, jej przekroczenie, nawet nieznaczne, może spowodować, w odpowiednich warunkach, wzmocnienie zaburzeń generowanych przez odbiornik, co jest oczywiście niepożądane.

3. PODSUMOWANIE

W części drugiej artykułu skupiono się na badaniach symulacyjnych dla podstawowych struktur filtrów aktywnych zarówno z, jak i bez sprzężenia zwrotnego, których analizę teoretyczną przedstawiono w części pierwszej.

Filtry aktywne mogą zostać zrealizowane w sześciu różnych konfiguracjach i w artykułach Cz.1 i Cz. 2 dokonano dokładnej analizy każdej z nich. Zostały opisane i wyprowadzone takie parametry, jak tłumienność wtrąceniowa IL oraz współczynnik zmiany impedancji ΔZ_n . Dokonano również oceny tych struktur w zależności od charakteru i typu zaburzeń, które mają tłumić.

Porównano analizowane struktury pod względem zastosowań praktycznych, na podstawie badań symulacyjnych oraz rozważono możliwe problemy i zagrożenia związane z ich użyciem. Wnioski z porównania filtrów zostały wyciągnięte na podstawie analizy literatury, rozważań teoretycznych i badań symulacyjnych.

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Pasko M., Szymczak M.: Analiza teoretyczna oraz badania symulacyjne aktywnych filtrów do tłumienia zaburzeń przewodzonych cz.1. ZKWE 2014
- [4] Pasko M., Szymczak M.: Porównanie i ocena metod aktywnego tłumienia zaburzeń przewodzonych. IAPGOŚ, Tom 4, Numer 4, 2014.

ANALYSIS AND SIMULATION OF THE BASIC STRUCTURES OF ACTIVE EMI FILTERS.

PART II - SIMULATION STUDIES AND CONCLUSION

The main goals of this paper are an analysis and a simulation of selected basic structures of active EMI filters. The first part contains a presentation of selected structures of active filters, along with categorization by their properties in the field of detection and compensation of EMI noise and by the kind of feedback. Each structure's description is accompanied by an analytical discussion of their properties such as insertion loss (IL) and the impedance increase (ΔZ_n). The second part contains results of simulations of the presented structures, with the aim being a comparison of their characteristics and determining proper operation conditions.