

Marian PASKO*
Marek SZYMCZAK*

ANALIZA TEORETYCZNA ORAZ BADANIA SYMULACYJNE AKTYWNYCH FILTRÓW DO TŁUMIENIA ZABURZEŃ PRZEWODZONYCH. CZĘŚĆ 1 - ANALIZA TEORETYCZNA

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, takie jak: tłumienność wtrąceniowa IL oraz współczynnik zmiany impedancji ΔZ_n . W drugiej części artykułu przedstawione zostaną wyniki analizy teoretycznej oraz badania symulacyjne opisanych struktur, mające na celu porównanie ich właściwości oraz wskazanie warunków poprawnej pracy.

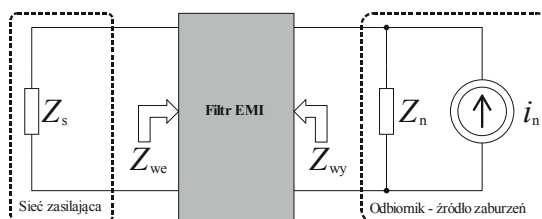
SŁOWA KLUCZOWE: filtry aktywne, zaburzenia przewodzone, kompatybilność elektromagnetyczna, filtry EMI

1. WSTĘP

Pierwsze publikacje dotyczące badania filtrów aktywnych do tłumienia zaburzeń przewodzonych ukazały się pod koniec lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku [10, 11], ale dopiero rozwój nowoczesnych przekształtników pracujących na dużych częstotliwościach [3, 8, 10], w związku z dużym poziomem generowanych przez nie zaburzeń EMI [1], wzbudził na nowo zainteresowanie tą tematyką [4, 13]. Do tłumienia zaburzeń przewodzonych najczęściej stosuje się filtry pasywne, złożone głównie z elementów RLMC, jednak ich wadą jest rozmiar i koszt wykonania [15]. 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 [2, 5, 6, 9]. Znaczący postęp w technice, umożliwiający budowę lekkich przekształtników, pracujących na bardzo wysokich częstotliwościach paradoksalnie doprowadził do tego, że waga filtrów EMI może być większa od wagi samego przekształtnika [7, 12].

* Politechnika Śląska.

Zadaniem filtru aktywnego jest detekcja i redukcja zaburzeń generowanych przez źródło (odbiornik), tak aby nie przedostawały się one do sieci zasilającej (rys. 1). Istnieje kilka różnych konfiguracji filtrów różniących się między sobą typem sprzężenia oraz sposobem detekcji i kompensacji zaburzeń. Ze względu na typ sprzężenia można wyodrębnić dwie grupy filtrów aktywnych: ze sprzężeniem zwrotnym (*feedback-type*) oraz bez sprzężenia (*feedforward-type*).



Rys. 1. Schemat zastępczy z filtrem przeciwzaburzeniowym

Współczynnikiem określającym stopień redukcji zaburzeń EMI jest tłumienność wtrąceniowa filtru IL (*insertion losses*, 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 - napięcie na zaciskach zasilających urządzenie bez filtru, U_s - napięcie na zaciskach zasilających po włączeniu filtru.

Drugim parametrem określającym właściwości filtru jest tzw. współczynnik zmiany impedancji ΔZ_n [14]. Jest to różnica między impedancją odbiornika z zamontowanym filtrem Z_{we} , a impedancją samego odbiornika Z_n (3):

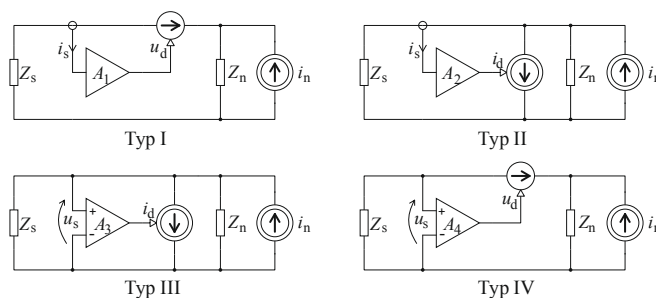
$$\Delta Z_n = Z_{we} - Z_n, \quad (3)$$

2. STRUKTURY FILTRÓW AKTYWNYCH

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

Działanie filtrów ze sprzężeniem zwrotnym polega na wytworzeniu odpowiedniego sygnału kompensującego, tak aby tłumić zaburzenia generowane przez źródło (zamknięta pętla). Na rysunku 2 zostały

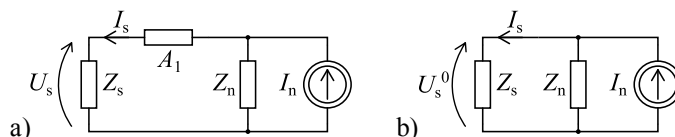
przedstawione cztery podstawowe struktury filtrów aktywnych ze sprzężeniem zwrotnym [11] wraz z zaproponowanymi dla nich w [14] numerami typów. Typy te różnią się od siebie sposobem detekcji oraz redukcji zaburzeń.



Rys. 2. Struktury filtrów ze sprzężeniem zwrotnym [11]

Typ I: Detekcja prądu i kompensacja napięcia

Tłumienność wtrąceniową filtra typu I można wyznaczyć, zakładając, że źródło napięciowe sterowane prądem (prądem, który przez nie przepływa) stanowi impedancję, proporcjonalną do wzmacnienia filtra A_1 . Na rysunku 3 został przedstawiony schemat do wyznaczania współczynnika IL_1 (7) (rysunek 3a pomiar napięcia na odbiorniku z zamontowanym filtrem oraz 3b bez filtra).



Rys. 3. Wyznaczanie współczynnika IL_1 : a) układ z zamontowanym filtrem, b) układ bez filtra

$$U_s^0 = I_n \cdot \frac{Z_n \cdot Z_s}{Z_n + Z_s} \tag{4}$$

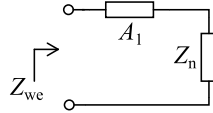
$$I_s = I_n \cdot \frac{Z_n}{Z_n + Z_s + A_1} \tag{5}$$

$$U_s = I_s \cdot Z_s = I_n \cdot \frac{Z_n \cdot Z_s}{Z_n + Z_s + A_1} \tag{6}$$

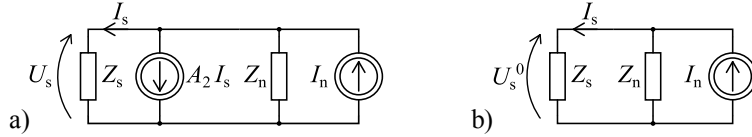
$$IL_1 = \frac{U_s}{U_s^0} = \frac{I_n \cdot \frac{Z_n \cdot Z_s}{Z_n + Z_s + A_1}}{I_n \cdot \frac{Z_n \cdot Z_s}{Z_n + Z_s}} = \frac{Z_n + Z_s + A_1}{Z_n + Z_s} = 1 + \frac{A_1}{Z_n + Z_s} \tag{7}$$

Aby wyznaczyć współczynnik zmiany impedancji ΔZ_{nl} (8) można posłużyć się, jak w przypadku tłumienności wtrąceniowej, zamianą źródła sterowanego na impedancję A_1 (rysunek 4).

$$\Delta Z_{n1} = Z_{we} - Z_n = A_1 + Z_n - Z_n = A_1 \quad (8)$$

Rys. 4. Schemat do wyznaczania współczynnika zmiany impedancji ΔZ_{n1} **Typ II: Detekcja prądu i kompensacja prądu**

Przy wyznaczaniu tłumienności wtrąceniowej IL_2 (11) filtra typu II można posłużyć się schematem, jak na rysunku 5 (U_s^0 - takie samo jak przy typie I).

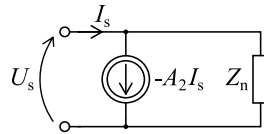
Rys. 5. Wyznaczanie współczynnika IL_2 : a) układ z zamontowanym filtrem, b) układ bez filtru

$$I_s = \frac{Z_n}{Z_n + Z_s} (I_n - A_2 \cdot I_s) = \frac{I_n \cdot Z_n}{Z_n + Z_s + A_2 \cdot Z_n} \quad (9)$$

$$U_s = I_s \cdot Z_s = \frac{I_n \cdot Z_n \cdot Z_s}{Z_n + Z_s + A_2 \cdot Z_n} \quad (10)$$

$$IL_2 = \frac{U_s^0}{U_s} = \frac{I_n \cdot \frac{Z_n \cdot Z_s}{Z_n + Z_s}}{I_n \cdot \frac{Z_n \cdot Z_s}{Z_n + Z_s + A_2 \cdot Z_n}} = \frac{Z_n + Z_s + A_2 \cdot Z_n}{Z_n + Z_s} = 1 + \frac{A_2 \cdot Z_n}{Z_n + Z_s} \quad (11)$$

Do wyznaczenia współczynnika zmiany impedancji ΔZ_{n2} (14), można skorzystać ze schematu jak na rysunku 6. Wzmocnienie A_2 na tym rysunku jest ujemne ponieważ prąd I_s został zastrzałkowany odwrotnie niż na rysunku 5a.

Rys. 6. Schemat do wyznaczania współczynnika zmiany impedancji ΔZ_{n2}

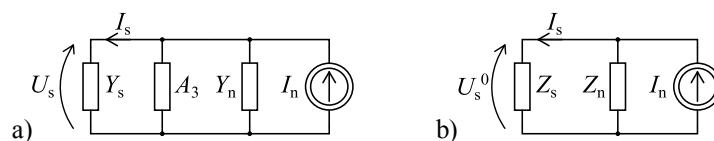
$$U_s = (I_s + A_2 \cdot I_s) \cdot Z_n = I_s \cdot (Z_n + A_2 \cdot Z_n) \quad (12)$$

$$Z_{we} = \frac{U_s}{I_s} = Z_n + A_2 \cdot Z_n \quad (13)$$

$$\Delta Z_{n2} = Z_{we} - Z_n = Z_n + A_2 \cdot Z_n - Z_n = A_2 \cdot Z_n \quad (14)$$

Typ III: Detekcja napięcia i kompensacja prądu

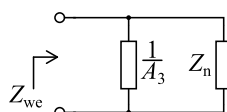
Tłumienność wtrąceniową filtra typu III można wyznaczyć, posługując się analogią do filtra typu I i zastępując sterowane źródło prądu, admitancją o wartości A_3 . Na rysunku 7 został przedstawiony schemat do wyznaczania współczynnika IL_3 (15).



Rys. 7. Wyznaczanie współczynnika IL_3 : a) układ z zamontowanym filtrem, b) układ bez filtra

$$IL_3 = \frac{U_s^0}{U_s} = \frac{\frac{I_n}{Y_n + Y_s}}{\frac{I_n}{Y_n + Y_s + A_3}} = \frac{Y_n + Y_s + A_3}{Y_n + Y_s} = 1 + \frac{A_3}{Y_n + Y_s} \quad (15)$$

Na rysunku 8 przedstawiono układ do wyznaczenia współczynnika zmiany impedancji ΔZ_{n3} (16).

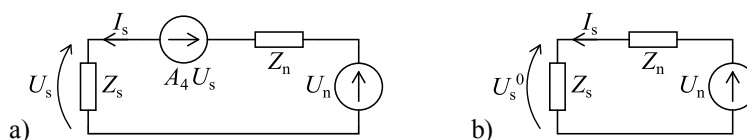


Rys. 8. Schemat do wyznaczania współczynnika zmiany impedancji ΔZ_{n3}

$$\Delta Z_{n3} = Z_{we} - Z_n = \frac{Z_n}{1 + Z_n \cdot A_3} - Z_n = \frac{Z_n}{1 + Z_n \cdot A_3} - \frac{Z_n + Z_n^2 \cdot A_3}{1 + Z_n \cdot A_3} = -\frac{Z_n^2 \cdot A_3}{1 + Z_n \cdot A_3} \quad (16)$$

Typ IV: Detekcja napięcia i kompensacja napięcia

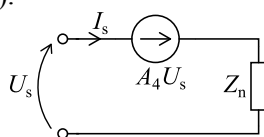
W celu uproszczenia obliczeń, przy wyznaczeniu współczynnika tłumienności wtrąceniowej IL_4 (17), dla filtra typu IV zamieniono model źródła zaburzeń z prądowego na napięciowy. Schemat tego układu przedstawiono na rysunku 9. Układ ten jest analogią dla filtra typu II.



Rys. 9. Wyznaczanie współczynnika IL_4 : a) układ z zamontowanym filtrem, b) układ bez filtra

$$IL_4 = \frac{U_s^0}{U_s} = \frac{U_n \cdot \frac{Z_s}{Z_n + Z_s}}{U_n \cdot \frac{Z_s}{Z_n + Z_s + A_4}} = \frac{Z_n + Z_s + A_4 \cdot Z_s}{Z_n + Z_s} = 1 + \frac{A_4 \cdot Z_s}{Z_n + Z_s} \quad (17)$$

Na rysunku 10 został przedstawiony układ do wyznaczania współczynnika zmiany impedancji ΔZ_{n4} (18).

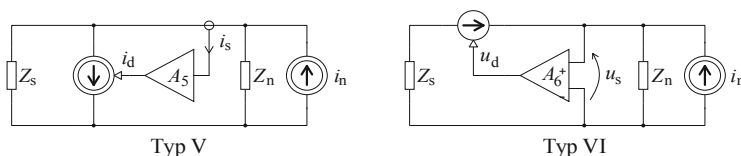


Rys. 10. Schemat do wyznaczania współczynnika zmiany impedancji ΔZ_{n4}

$$\Delta Z_{n4} = Z_{we} - Z_n = \frac{Z_n}{1 + A_4} - Z_n = \frac{Z_n}{1 + A_4} - \frac{Z_n + A_4 \cdot Z_n}{1 + A_4} = -\frac{A_4 \cdot Z_n}{1 + A_4} \quad (18)$$

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

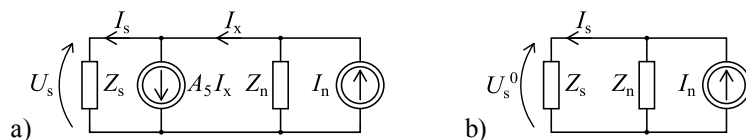
Filtry te wytwarzają sygnał przeciwny do zaburzeń generowanych przez odbiornik, tak aby oba sygnały się znosiły, a skuteczność tłumienia jest tym większa im wzmacnienie filtru jest bliższe jedności. W przeciwieństwie do układów ze sprzężeniem zwrotnym w tego typu filtrach możliwe są tylko dwie konfiguracje, które zostały przedstawione na rysunku 11, wraz z numerami typów zaproponowanymi im w [14].



Rys. 11. Struktury filtrów bez sprzężenia zwrotnego

Typ V: *Detekcja prądu i kompensacja prądu*

Do analizy współczynnika tłumienności wtrąceniowej IL_5 (22), dla filtru typu V został zaproponowany układ, jak na rysunku 12. Przy analizie zaznaczono dodatkowy prąd I_x , który przedstawia wartość prądu zaburzeń między filtrem, a odbiornikiem (źródłem zaburzeń).



Rys. 12. Wyznaczanie współczynnika IL_5 : a) układ z zamontowanym filtrem, b) układ bez filtru

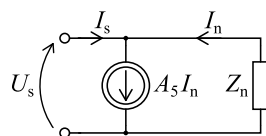
$$I_x = I_s + A_5 \cdot I_x = \frac{I_s}{1 - A_5} \quad (19)$$

$$I_s = \frac{Z_n}{Z_n + Z_s} \cdot (I_n - A_5 \cdot I_x) = I_n \cdot \frac{Z_n}{Z_n + Z_s + \frac{A_5 \cdot Z_n}{1 - A_5}} \quad (20)$$

$$U_s = I_s \cdot Z_s = I_n \cdot \frac{Z_n \cdot Z_s}{Z_n + Z_s + \frac{A_5 \cdot Z_n}{1 - A_5}} \quad (21)$$

$$IL_5 = \frac{U_s^0}{U_s} = \frac{I_n \cdot \frac{Z_n \cdot Z_s}{Z_n + Z_s}}{I_n \cdot \frac{Z_n \cdot Z_s}{Z_n + Z_s + \frac{A_5 \cdot Z_n}{1 - A_5}}} = \frac{Z_n + Z_s + \frac{A_5 \cdot Z_n}{1 - A_5}}{Z_n + Z_s} = \frac{1}{1 - A_5} \cdot \left(1 - \frac{Z_s \cdot A_5}{Z_n + Z_s} \right) \quad (22)$$

Na rysunku 13 został narysowany układ, za którego pomocą został wyznaczony współczynnik zmiany impedancji ΔZ_{n5} (23) dla tego filtru.

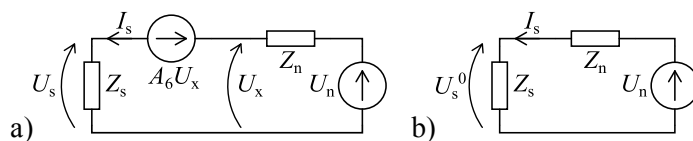


Rys. 13. Schemat do wyznaczania współczynnika zmiany impedancji ΔZ_{n5}

$$\Delta Z_{n5} = Z_{we} - Z_n = \frac{Z_n}{1 - A_5} - Z_n = \frac{Z_n}{1 - A_5} - \frac{Z_n - Z_n \cdot A_5}{1 - A_5} = \frac{Z_n \cdot A_5}{1 - A_5} \quad (23)$$

Typ VI: Detekcja napięcia i kompensacja napięcia

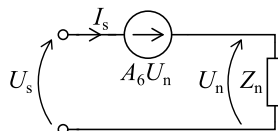
Różnica w analizie filtru typu VI w stosunku do wcześniejszej struktury polega na zamianie modelu źródła zaburzeń z prądowego na napięciowe. Na rysunku 14 został przedstawiony schemat do wyznaczania współczynnika IL_6 (24).



Rys. 14. Wyznaczanie współczynnika IL_6 : a) układ z zamontowanym filtrem, b) układ bez filtru

$$IL_6 = \frac{U_s^0}{U_s} = \frac{Z_s}{Z_n + Z_s} \cdot \frac{Z_n + Z_s + \frac{Z_s \cdot A_6}{1 - A_6}}{Z_s} = \frac{Z_n + Z_s + \frac{Z_s \cdot A_6}{1 - A_6}}{Z_n + Z_s} = \frac{1}{1 - A_6} \cdot \left(1 - \frac{Z_n \cdot A_6}{Z_n + Z_s} \right) \quad (24)$$

Na rysunku 15 został przedstawiony schemat układu do wyznaczania współczynnika ΔZ_{n6} (25).



Rys. 13. Schemat do wyznaczania współczynnika zmiany impedancji ΔZ_{n6}

$$\Delta Z_{n6} = Z_{we} - Z_n = Z_n - A_6 \cdot Z_n - Z_n = -A_6 \cdot Z_n \quad (25)$$

LITERATURA

- [1] Akagi H., Shimizu T.: Attenuation of Conducted EMI Emissions From an Inverter-Driven Motor. IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 1, Jan. 2008.
- [2] 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.
- [3] Boroyevich D., Burgos R., Arnedo L., Wang F.: Synthesis and integration of future electronic power distribution systems. Proc. IEEE PCC, Nagoya, JP, 2007.
- [4] Boroyevich D., Zhang X., Bishnoi H., Burgos R., Mattavelli P., Wang F.: Conducted EMI and Systems Integration. CIPS 2014, Feb., 25-27 2014, Nuremberg/Germany.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Gerber M., Ferreira J. A.: A system integration philosophy for demanding requirements in power electronics. Proc. IEEE IAS, s. 1389-1396, Sep. 2007.
- [9] 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.
- [10] LaWhite L., Schlecht M. F.: Active filters for high frequency power circuits under strict ripple limitations. IEEE PESC Rec., s. 255, 1986.
- [11] 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.

- [12] 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.
- [13] Pasko M., Szymczak M.: Porównanie i ocena metod aktywnego tłumienia zaburzeń przewodzonych. IAPGOŚ, Tom 4, Numer 4, 2014.
- [14] 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.
- [15] Zhang X., Boroyevich D., Mattavelli P., Wang F.: Filter Design Oriented EMI Prediction Model for DC-field Motor Drive System Using Double Fourier Integral Transform Method. Proc. IEEE IPEDMC, s. 1060-1064, 2012.

**ANALYSIS AND SIMULATION OF THE BASIC STRUCTURES
OF ACTIVE EMI FILTERS.
PART I - THEORETICAL ANALYSIS**

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.