

WOJCIECH CZUCHRA, WOJCIECH MYSIŃSKI, WALDEMAR ZAJĄC*

MODELOWANIE FILTRÓW PRZECIWZAKŁÓCENIOWYCH RFI DLA POJAZDÓW KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ

MODELING OF EMI FILTERS FOR CITY COMMUNICATION VEHICLES

Streszczenie

Zakłócenia elektromagnetyczne mogą być zredukowane za pomocą odpowiednich filtrów pasywnych. Typowe metody projektowania filtrów pasywnych nie mogą być zastosowane do projektowania filtrów dla układów energoelektronicznych. Artykuł przedstawia wyniki badań symulacyjnych filtru przeciwzakłócenieniowego dla trolejbusu. Model zastępczy filtru zawiera elementy pasożytnicze, które mają istotny wpływ na parametry filtru. Badania filtru przeprowadzono pod względem tłumienia zakłóceń wspólnych i różnicowych.

Słowa kluczowe: pojazdy drogowe, kompatybilność elektromagnetyczna ECM/EMI, filtry pasywne, modele filtrów RFI

Abstract

Electromagnetic interference (EMI) can be reduced to acceptable level using EMI filter circuits. Unfortunately, many known methods of filter design and optimization cannot be applied directly to power electronics, which has its own peculiarities. In this paper, the parasitic components of EMI filters are discussed. The EMI filter for trolley-bus and simulation results from Spice software are presented. The insertion losses of EMI filter in both differential-mode (DM) and common-mode (CM) are discussed.

Keywords: road vehicle, electromagnetic compatibility EMC/EMI, passive filter, model of the RFI filter

* Dr inż. Wojciech Czuchra, dr inż. Wojciech Mysiński, dr inż. Waldemar Zajęc – Katedra Trakcji i Sterowania Ruchem, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Nowo produkowane i modernizowane pojazdy komunikacji miejskiej, takie jak tramwaje i trolejbusy, muszą spełniać wymogi odpowiednich norm z dziedziny kompatybilności elektromagnetycznej. Istotnym zagadnieniem pośród wielu wymogów normatywnych jest spełnienie warunku nieprzekraczania odpowiedniego poziomu emisji zakłóceń promieniowanych. W wielu przypadkach jest to zadanie trudne do osiągnięcia ze względu na zastosowanie w pojazdach nowoczesnych układów napędowych (PDS – *Power Drive Systems*). Podstawowym źródłem zaburzeń w układach napędowych są przekształtniki energoelektroniczne. Emisja zakłóceń elektromagnetycznych jest związana z widmem amplitudowym impulsów prostokątnych występujących w przekształtnikach. O widmie tym decyduje: częstotliwość przełączania tranzystorów IGBT w przekształtniku, amplituda impulsów, czas narastania i opadania prądu i napięcia oraz oscylacje napięcia i prądu powstające w momencie przełączania. Negatywne skutki zastosowania falowników PWM w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi to przede wszystkim zwiększenie zakłóceń elektromagnetycznych przewodzonych i promieniowanych. Dodatkowo istnieje możliwość powstania napięcia na kadłubie uziemionego silnika, przepływu prądów przez łożyska silnika (prądy łożyskowe) i występowania przepięć na zaciskach silnika (w układach z długim kablem silnikowym).

Ograniczenie w pojazdach trakcyjnych emisji elektromagnetycznej przewodzonej, a także promieniowanej możliwe jest przez zastosowanie odpowiednio zaprojektowanych, wykonanych i zamontowanych filtrów RFI. W artykule przedstawiono problemy związane z projektowaniem tego typu filtrów przeznaczonych do zastosowania w trolejbusach. Zwrócono uwagę na ograniczenia projektowe wynikające z charakterystycznej budowy i zasady działania tego typu pojazdu komunikacji miejskiej.

2. Założenia projektowe

Projektowanie filtra dla konkretnego pojazdu wymaga znajomości wielu czynników decydujących o skuteczności jego pracy. Pomocnym narzędziem przy projektowaniu filtra jest norma PN-CISPR 17 dotycząca badań tego typu urządzeń. Podstawowe parametry, które należy wziąć pod uwagę to: prąd i napięcie znamionowe, rodzaj sieci zasilania, charakterystyka tłumienności wtrąceniowej oraz prąd upływu. Istotną informacją jest znajomość impedancji sieci zasilającej i odbiornika energii, a przede wszystkim rodzaj i charakter występujących zakłóceń. W zależności od rodzaju dominującej grupy zakłóceń, czy są to zakłócenia symetryczne (różnicowe), czy asymetryczne (wspólne), powinna zostać odpowiednio dobrana struktura filtra. W wielu przypadkach znajomość wszystkich parametrów decydujących o strukturze filtra RFI jest jednak niemożliwa. Ocena pasma częstotliwości, gdzie powinno się ograniczyć emisję, jest często wynikiem pomiarów emisji zakłóceń promieniowanych. Dane literaturowe, jak i praktyczne doświadczenia autorów, dowodzą, że w większości przypadków, w zakresie częstotliwości od kilkuset kiloherców wzwyż, problem do ograniczenia stanowi emisja zakłóceń asymetrycznych (wspólnych). Dzieje się tak dlatego, gdyż wraz ze wzrostem częstotliwości dla tego typu zakłóceń istotną rolę odgrywają sprzężenia związane z rosnącym wpływem pasożytniczych pojemności i indukcyjności systemu. Tak więc projektując filtr dla miejskich pojazdów trakcyjnych

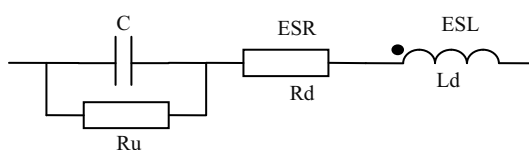
struktura filtru powinna zapewniać bardzo dobre własności tłumienia zakłóceń asymetrycznych. Jest to związane z zastosowaniem elementów filtru w postaci dławików skompensowanych prądowo oraz kondensatorów typu Cy. Filtr RFI powinien również posiadać własności tłumienia zakłóceń symetrycznych (różnicowych) i w związku z tym powinien zawierać pojedyncze dławiki oraz kondensatory typu Cx. Istotny problem, który autorzy zaobserwowali w trakcie dotychczasowych badań emisji promieniowanej pojazdów trakcyjnych, dotyczy występowania dużych poziomów zakłóceń w paśmie częstotliwości od 150 kHz do kilku MHz. W związku z tym, zwłaszcza w tym paśmie częstotliwości, skuteczny filtr powinien charakteryzować się dużą wartością tłumienności wtrąceniowej.

3. Modelowanie poszczególnych elementów filtru

Do przeprowadzenia poprawnych badań symulacyjnych filtrów zasilających wymagana jest dokładna znajomość parametrów każdego elementu filtru, a zwłaszcza model zastępczy wraz z wartościami elementów pasożytniczych. Ma to znaczenie przede wszystkim dla charakterystyk częstotliwościowych powyżej 100 kHz. Wstępne badania symulacyjne pokazują, że od tej częstotliwości na tłumienność filtru coraz większe znaczenie mają elementy pasożytnicze poszczególnych elementów i wszelkiego typu sprzężenia pojemnościowe i magnetyczne pomiędzy elementami filtru oraz elementami a obudową filtru. O ile wybranie prostego schematu zastępczego dla poszczególnych elementów nie jest trudne, to znajomość wartości elementów schematu zastępczego może okazać się znacznie cięższym zadaniem. Jeszcze bardziej skomplikowana jest procedura wyznaczenia konkretnych wartości sprzężeń pojemnościowych i magnetycznych pomiędzy elementami.

3.1. Schemat zastępczy kondensatora

Na rysunku 1 przedstawiono typowy szeregowy schemat zastępczy kondensatora.



Rys. 1. Szeregowy schemat zastępczy kondensatora

Fig. 1. Capacitor equivalent model

- C – właściwa pojemność,
- Ru – rezystancja upływności i strat w dielektryku,
- Rd – rezystancja szeregową, parametr ESR,
- Ld – indukcyjność szeregową, parametr ESL.

Orientacyjne wartości indukcyjności Ld w zależności od pojemności kondensatora:

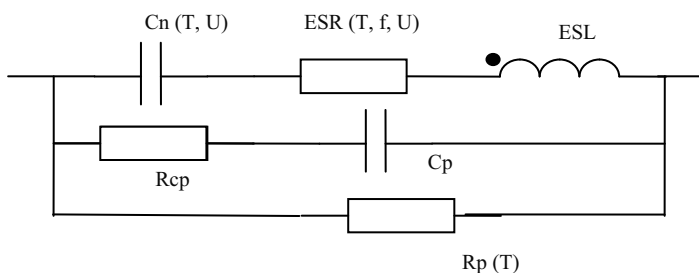
dla $C < 10 \text{ nF}$ – $L_d = 10\text{--}20 \text{ nH}$

dla $C 10 \text{ nF} - 1 \mu\text{F}$ – $L_d = 40 \text{ nH}$

dla $C > 1 \mu\text{F}$ $L_d = 30\text{--}100 \text{ nH}$

Jak widać, schemat zastępczy kondensatora składa się z szeregowego połączenia rezystora (ESR), cewki (ESL) i idealnego kondensatora. Ten szeregowy model nie uwzględnia zależności wartości elementów modelu od częstotliwości (przede wszystkim pasożytniczej rezystancji) ani wpływu napięcia lub temperatury.

Dokładniejszy, słuszny w szerokim zakresie częstotliwości, model pokazano na rysunku 2. Uwzględnia on wpływ temperatury, częstotliwości i napięcia na elementy RLC oraz wpływ temperatury i napięcia na pojemność kondensatora. Oprócz szeregowego połączenia elementów RLC, znajduje się równoległa rezystancja R_p , modelująca prąd upływu, która również jest zależna od temperatury. Dodatkowa równoległa gałąź RC, odgrywająca rolę w zakresie w.cz., jest pasożytniczą pojemnością między wyprowadzeniami.



Rys. 2. Bardziej rozbudowany model zastępczy kondensatora

Fig. 2. More precise equivalent model of a capacitor

Stratność kondensatora, tj. jednostkowe straty energii wynikające z pracy kondensatora przy napięciu przemiennym, charakteryzuje **tangens kąta strat d** (czyli $\text{tg}d$). Straty kondensatora są zazwyczaj większe niż samego dielektryka ze względu na występowanie strat w elektrodach i doprowadzeniach. Wartość strat zależy od częstotliwości i temperatury, przy czym przebieg tej zależności jest złożoną funkcją polaryzacji i konduktancji (przewodności) dielektryka kondensatora. W katalogach wartość $\text{tg}d$ podaje się dla ściśle określonej częstotliwości pomiarowej, zwykle 1 kHz lub 1 MHz (dla kondensatorów elektrolitycznych – 100 Hz).

Właściwości kondensatorów zależą również od temperatury, dlatego istotne znaczenie ma określenie przedziału dopuszczalnych zmian temperatury, czyli tzw. **znamionowego zakresu temperatury pracy**, w którym kondensator może pracować w sposób ciągły.

3.2. Schemat zastępczy indukcyjności

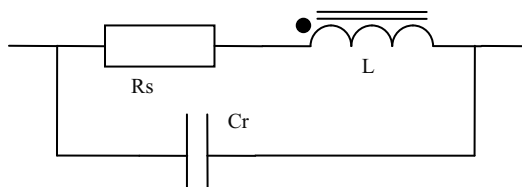
Kolejnym bardzo ważnym elementem jest indukcyjność. Najprostszy model zastępczy przedstawiony na rys. 3 opisuje cewkę z liniową charakterystyką magnesowania.

Orientacyjne wartości pojemności C_r i rezystancji R_s w zależności od indukcyjności:

dla $L < 10 \text{ uH}$ – $R_s = 1,5 \text{ m}\Omega$, $C_r = 2 \text{ pF}$

dla $L \text{ 50 uH} - 200 \text{ uH}$ – $R_s = 5 \text{ m}\Omega$, $C_r = 5 \text{ pF}$

dla $L > 200 \text{ uH}$ – 200 uH – $R_s = 50 \text{ m}\Omega$, $C_r = 10\text{--}30 \text{ pF}$



Rys. 3. Prosty schemat zastępczy indukcyjności

Fig. 3. A simple inductor equivalent model

Parametry cewek indukcyjnych zależą od częstotliwości w większej mierze niż parametry kondensatorów. Można zaobserwować, że cewka powietrzna w szerokim zakresie częstotliwości zmienia charakter z rezystancyjnego, dla częstotliwości rzędu kilkuset Hz, poprzez indukcyjny do pojemnościowego, dla częstotliwości powyżej pierwszego rezonansu własnego cewki. Dwielementowy schemat zastępczy może być niewystarczający do reprezentacji impedancji rzeczywistej cewki indukcyjnej w szerszym paśmie częstotliwości. Stosowany często trzelementowy schemat zastępczy cewki indukcyjnej można przybliżyć dwielementowym, w którym wartości elementów $L(\omega)$ i $R(\omega)$ zależą od częstotliwości.

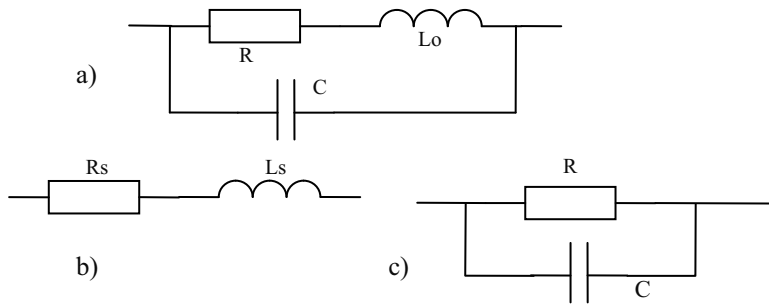
Szeregowa rezystancja R_s w dwielementowym schemacie zastępczym cewki reprezentuje straty omowe w przewodzie cewki, straty na prądy wirowe i histerezę (jeżeli jest to cewka z rdzeniem ferromagnetycznym) oraz straty dielektryczne. Wszystkie straty w cewce składają się na współczynnik strat, definiowany analogicznie jak dla kondensatora.

3.3. Indukcyjność sprzężona

Podstawowymi elementami filtrów do tłumienia zakłóceń elektromagnetycznych są dwie cewki sprzężone umieszczone na wspólnym rdzeniu. Najprostszy model zastępczy takiego połączenia będzie się składał z dwóch modeli zastępczych cewek i sprzężenia wspólnego. Model zastępczy powinien też uwzględnić pojemność pomiędzy uzwojeniami, która może wynosić w granicach kilkunastu pF.

3.4. Schemat zastępczy rezystora

Rezystor nie jest typowym elementem filtru mocy, ale jest często stosowany do rozładowania kondensatorów w filtrze. Schemat zastępczy rezystora (rys. 4) zawiera, oprócz podstawowego parametru rezystancji R , indukcyjność L uzwojeń i doprowadzeń rezystora oraz pojemności C między zaciskami wejściowymi.



Rys. 4. Schematy zastępcze rezystorów: a) ogólny; b) uproszczony o charakterze indukcyjnym; c) uproszczony o charakterze pojemnościowym

Fig. 4. Equivalent models for a resistor, a) typical, b) simplified with series inductance, c) simple with parallel capacitance

Większość rzeczywistych rezystorów ma charakter pojemnościowy o ujemnej stałej czasowej, dlatego ogólnym schematem zastępczym rezystora jest układ dwuelementowy, w którym pojemność $C_Z = C - L/R^2$ jest wypadkową pojemnością układu z rysunku 4.

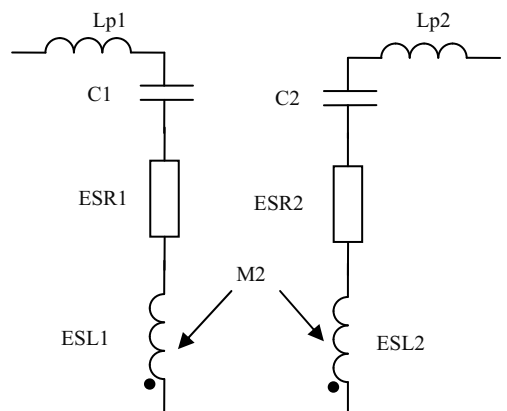
3.5. Dodatkowe sprzężenia pojemnościowe i magnetyczne w filtrze

Oprócz parametrów zastępczych elementów składowych każdego filtra typu RFI, należy wziąć pod uwagę wszelkiego typu sprzężenia pojemnościowe i indukcyjne pomiędzy elementami filtru oraz sprzężenia pomiędzy elementami a obudową filtru. Do tego dochodzą jeszcze sprzężenia pomiędzy przewodami łączącymi poszczególne elementy filtru. Sama znajomość dokładnych parametrów zastępczych elementów nie wystarczy do wiarygodnej analizy tłumienności filtru, zwłaszcza dla częstotliwości powyżej kilkuset kHz. Można wyróżnić kilka typów sprzężeń:

- sprzężenie magnetyczne pomiędzy cewką a kondensatorem,
- sprzężenie magnetyczne pomiędzy dwoma kondensatorami,
- sprzężenie magnetyczne pomiędzy cewką a przewodami połączeniowymi,
- sprzężenie magnetyczne i pojemnościowe pomiędzy cewką a obudową,
- sprzężenie magnetyczne pomiędzy przewodami łączącymi.

Niektóre wartości sprzężeń mogą mieć bardzo małe wartości, np. poniżej nH lub kilku pF, ale dla wysokich częstotliwości ma to wpływ na ogólną charakterystykę filtru. Należy mieć na uwadze, że prądy pracy w filtrze przeciwzakłóceńowym w pojedzie trakcyjnym wynoszą setki amperów, a wyższe harmoniczne są odpowiednio duże w porównaniu do filtrów przeciwzakłóceńowych, np. w sprzęcie komputerowym.

Przykładowo, przy badaniu symulacyjnym filtra powinno się uwzględnić sprzężenie magnetyczne pomiędzy kondensatorami. Schemat zastępczy takiego sprzężenia przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat zastępczy układu sprzężenia magnetycznego dla dwóch kondensatorów

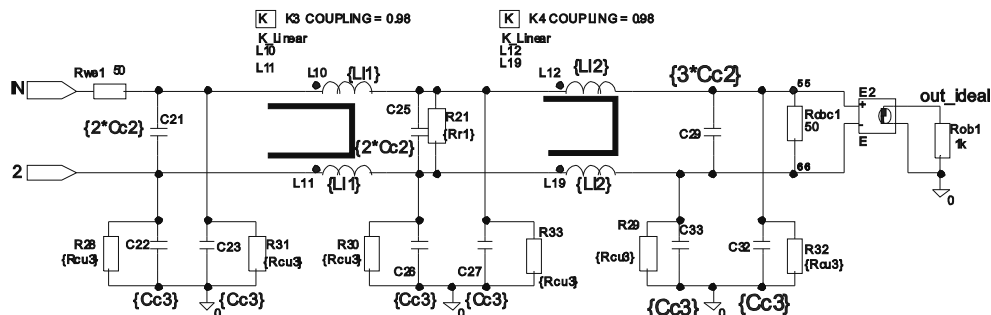
Fig. 5. Equivalent circuit for parasitic inductive coupling between two capacitors

4. Badania symulacyjne filtra dla pojazdu komunikacji miejskiej

Badania symulacyjne filtra przeprowadzono w programie Pspice, korzystając z analizy małosygnałowej (częstotliwościowej). Założono, że wszystkie elementy filtra są liniowe, a obwód pomiarowy jest zgodny z wymogami normy dotyczącej pomiaru tłumienności filtra. Wyniki badań symulacyjnych obejmują wyznaczone charakterystyki tłumienności filtra dla zaburzeń różnicowych i zaburzeń wspólnych. Modele przyjęte do symulacji dotyczą wersji dla filtra idealnego, bez uwzględnienia parametrów pasożytniczych elementów oraz wersji filtra tzw. nieidealnego, który uwzględnia dodatkowo parametry pasożytnicze opisujące elementy rzeczywiste R, L, C.

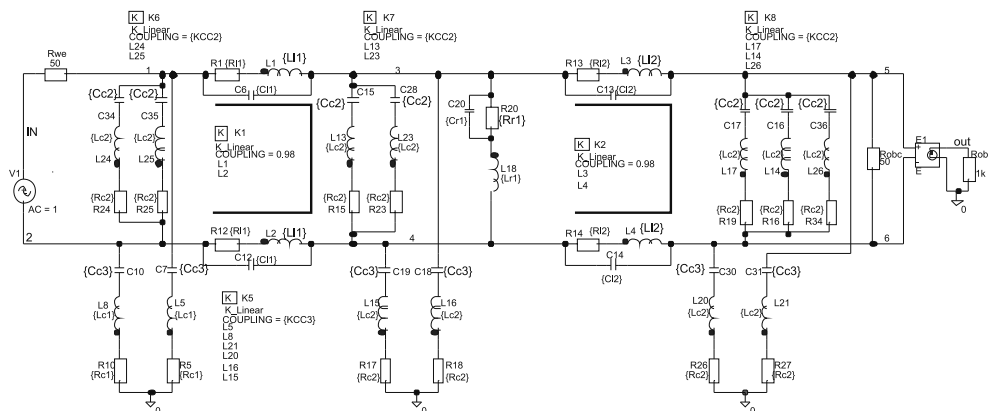
4.1. Przykłady charakterystyk tłumienia filtra dla zaburzeń różnicowych

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono schematy obu filtrów, które zostały poddane symulacji do wyznaczenia tłumienności różnicowych. Przy wyznaczaniu charakterystyk badanego filtra uwzględniono normę PN-CISPR 17 opisującą metody ich otrzymania w sposób pomiarowy. W schemacie filtra idealnego i filtra nieidealnego dołożono dodatkowe rezystory, które są wymagane, aby program Pspice mógł przeprowadzić obliczenia.



Rys. 6. Schemat filtra przyjęty do symulacji przy założeniu idealnych elementów składowych

Fig. 6. Schematic of an „ideal” filter used for simulation

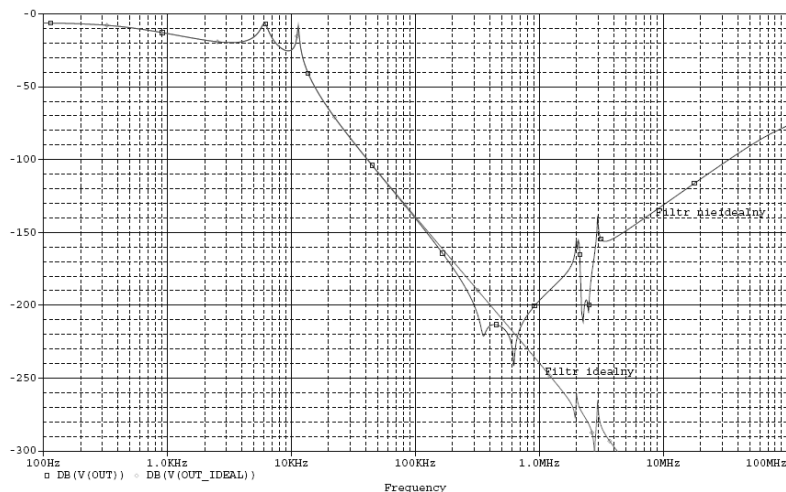


Rys. 7. Schemat zastępczy filtra przyjęty do symulacji, uwzględniający parametry pasozytnicze elementów składowych

Fig. 7. Schematic of a „non-ideal” filter used for simulation with parasitic parameters taken into account

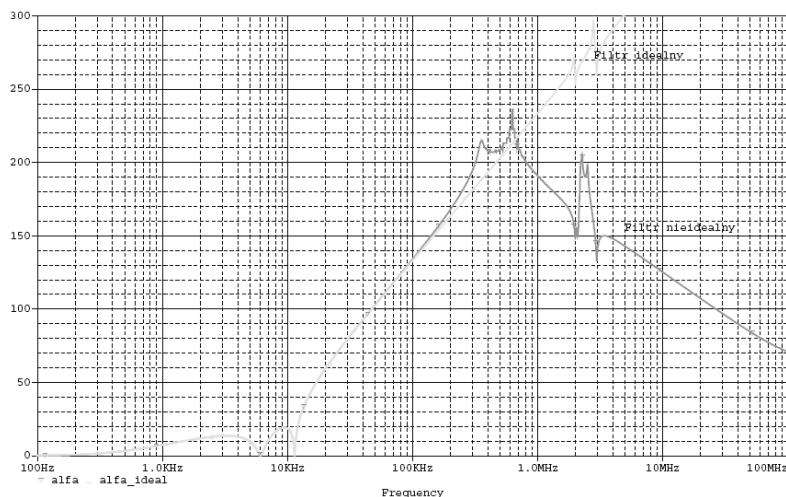
Jak można zauważyć, na wykresie tłumienności na rys. 8, do częstotliwości ok. 100 kHz charakterystyki obu filtrów są takie same, ale dla częstotliwości wyższych filtr nieidealny traci tłumienność. Jest to spowodowane parametrami pasozytniczymi elementów filtru.

Rysunek 9 przedstawia tę samą charakterystykę tłumienności, tylko wyznaczoną jako wykres współczynnika α dla zaburzeń różnicowych.



Rys. 8. Wykres tłumienności filtru dla zaburzeń różnicowych (symetrycznych) – DM, filtr idealny i filtr nieidealny

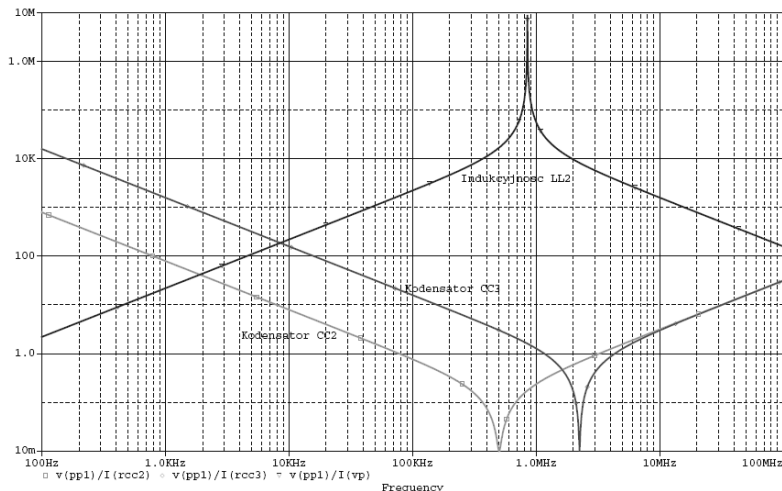
Fig. 8. Gain of filter for differential mode disturbances – DM, ideal filter (alfa ideal), and non-ideal filter (alfa)



Rys. 9. Wykres współczynnika tłumienności wtęceniowej α dla zaburzeń różnicowych (symetrycznych) – DM, filtr idealny i filtr nieidealny

Fig. 9. Plot of insertion loss α for differential mode disturbances – DM, ideal (alfa ideal) filter, and non-ideal filter (alfa)

Na rys. 10 przedstawiono wykres impedancji wybranych elementów filtra, kondensatora Cc2 i Cc3 oraz indukcyjności L12 przy uwzględnieniu elementów pasozytnych.

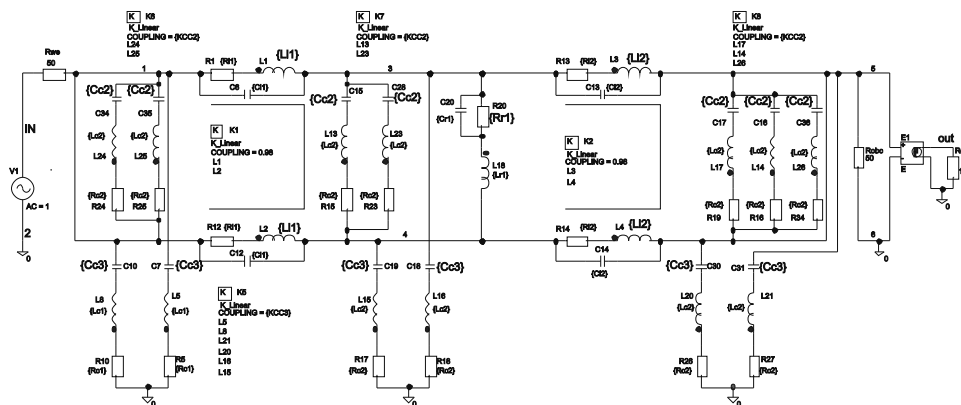


Rys. 10. Wykresy impedancji kondensatora CC2 i CC3 oraz indukcyjności LL2

Fig. 10. Impedance of capacitors CC2 and CC3 and impedance of inductor LL2

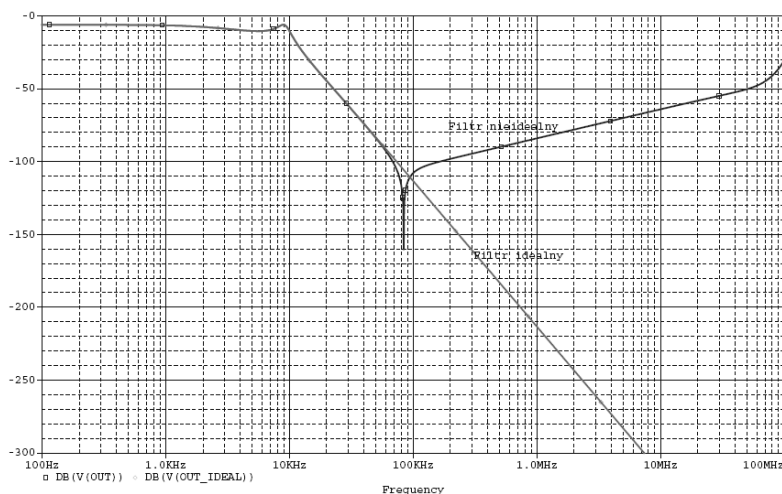
4.2. Przykłady charakterystyk tłumienia filtra dla zaburzeń wspólnych

Do przeprowadzenia badań symulacyjnych dla zaburzeń wspólnych schemat pomiarowy został zmieniony (zwarcie wejść i zwarć wyjść filtra) i przedstawiony na rys. 11.



Rys. 11. Schemat zastępczy filtra uwzględniający parametry pasozytnicze elementów składowych, układ dla zaburzeń wspólnych

Fig. 11. Filter's equivalent schematic used for simulations for common mode disturbances, with parasitic components taken into account



Rys. 12. Wykres tłumienności filtra dla zaburzeń wspólnych (asymetrycznych) – CM, filtr idealny i filtr nieidealny

Fig. 12. Gain of filter for common mode disturbances (asymmetrical)-CM, ideal filter, non-ideal filter

Wynik badań symulacyjnych zostały przedstawione na rys. 12. Jak można zauważyć po uwzględnieniu elementów pasożytniczych w filtrze nieidealnym, do częstotliwości ok. 80 kHz charakterystyka pokrywa się z układem idealnym, ale powyżej tej częstotliwości tłumienność maleje. Jest to niepożądany efekt wpływu elementów pasożytniczych w filtrze.

5. Wnioski

Zaproponowany przez autorów referatu model filtra RFI jest wystarczający do wyznaczenia charakterystyk opisujących własności tłumienia zaburzeń symetrycznych i asymetrycznych dla częstotliwości do około kilkuset kHz. Jak można zauważyć z charakterystyk tłumienności otrzymanych z symulacji filtra idealnego i filtra „nieidealnego” dla częstotliwości powyżej kilkuset kHz, coraz większe znaczenie mają elementy pasożytnicze filtra. Porównując tłumienność przedstawionego filtra tzw. nieidealnego z tłumiennością rzeczywistą podobnego typu filtra oferowanego przez producentów, można stwierdzić że wyniki badań symulacyjnych zaprezentowanego filtra nieidealnego dla wyższych częstotliwości są zbyt optymistyczne. Jest to spowodowane między innymi nieuwzględnieniem pasożytniczych sprzężeń pojemnościowych i magnetycznych pomiędzy elementami filtra, sprzężeń pomiędzy elementami a obudową filtra oraz sprzężeń pomiędzy przewodami. Wyznaczenie tych wszystkich pasożytniczych parametrów nie jest zadaniem łatwym i wymaga odpowiedniej procedury pomiarowej oraz specjalizowanego sprzętu pomiarowego.

Przedstawiony model filtra stanowi również podstawę łatwego doboru elementów składowych R, L, C dla filtra specjalizowanego przeznaczonego do zastosowania w trolejbusie, który musi spełniać inne wymagania niż filtr w typowym pojeździe trakcyjnym. Między innymi ze względów bezpieczeństwa pojemności typu Cy (np. kondensatory Cc3 na rys. 6 lub 7) nie mogą przekroczyć określonej wartości pojemności. W celu uzyskania

odpowiedniej charakterystyki tłumienności filtru należy więc stosować dławiki o większej indukcyjności, co jest zawsze większym problemem niż zwiększenie pojemności.

Literatura

- [1] Wang Shuo, Lee F.C., Odendaal W.G., *Characterization and Parasitic Extraction of EMI Filters Using Scattering Parameters*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, No. 2, March 2005.
- [2] Wang Shuo, Lee F.C., Wyk J.D. van, *Design of Inductor Winding Capacitance Cancellation for EMI Suppression*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 6, November 2006.
- [3] Ye Sheng, Eberle W., Liu Yan-Fei, *A Novel EMI Filter Design Method for Switching Power Supplies*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 6, November 2004.
- [4] Massarini A. and Kazimierczuk M.K., *Self-Capacitance of Inductors*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12, No. 4, July 1997.
- [5] Sedlacek J., Hadinec M. and Szabo Z., *Optimization Method of EMI Power Filters*, Progress in Electromagnetics Research Symposium 2007, Prague, August 27-30.
- [6] Kowalczewski M., Mysiński W., Zając W., *Metody ograniczenia emisji zakłóceń elektromagnetycznych generowanych przez tramwaje z napędem asynchronicznym*, X Jubileuszowa Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2002, Zakopane-Kościelisko, październik 2002.
- [7] Czuchra W., Zając W., *Investigation of electromagnetic interference generated by a tram and a trolley-bus with inverter drives*, International Conference on Ship Propulsion and Railway Traction Systems, Bologna 4-6 October 2005.
- [8] PN-CISPR 17, *Metody pomiaru charakterystyk tłumienności biernych filtrów i elementów przeciwzakłóceńowych*.