

doi:10.15199/48.2021.12.38

Wpływ modeli komponentów RLC na charakterystyki filtrów sieciowych

Streszczenie. W pracy przeanalizowano właściwości wybranych filtrów sieciowych przy wykorzystaniu symulacji komputerowych. W szczególności zwrócono uwagę na wpływ parametrów pasożytniczych komponentów RLC na charakterystyki częstotliwościowe takich filtrów. Wykazano, że w zakresie wysokich i bardzo wysokich częstotliwości kluczowe znaczenie dla skutecznego filtrowania zakłóceń mają niedoskonałości zastosowanych komponentów.

Abstract. In this paper the properties of selected network filters are analysed with the use of computer simulations. In particular, attention is paid to the influence of parasitic parameters of RLC components on the frequency characteristics of such filters. It has been shown that in the high and very high frequency range, non-idealities of the components used are of key importance for effective interference filtering. (**Influence of RLC components models on characteristics of the line filters**).

Słowa kluczowe: filtry sieciowe, modelowanie, charakterystyki częstotliwościowe, SPICE.

Keywords: line filters, modelling, frequency characteristics, SPICE.

Wstęp

Obecnie zwraca się dużo uwagi na kompatybilność elektromagnetyczną i wzajemne oddziaływania między urządzeniami elektronicznymi. Pole magnetyczne wzbudzone przez przepływ prądu w jednym urządzeniu może indukować napięcie w innym urządzeniu i zakłócać jego pracę [1]. Zakłócenia mogą być przekazywane w postaci fal elektromagnetycznych lub zaburzeń przewodzonych, np. przez sieć elektroenergetyczną. W celu ograniczenia niekorzystnego wpływu sygnałów zakłócających na prace urządzeń elektronicznych stosuje się m.in. filtry sieciowe.

Filtry takie mają najczęściej postać filtrów biernych złożonych z elementów RLC, a ich zadaniem jest tłumienie zakłóceń o częstotliwości znacznie większej niż częstotliwość napięcia zasilającego, która w Europie jest równa 50 Hz. Rozważane filtry zabezpieczają zarówno urządzenia podłączone do sieci elektroenergetycznej przed zakłóceniami transmitowanymi przez tę sieć, jak i zabezpieczają tę sieć przed zakłóceniami generowanymi w zasilanym urządzeniu. Zgodnie z podstawową wiedzą z zakresu teorii obwodów, zwiększanie rzędu filtru RLC powoduje wzrost jego tłumienia w paśmie zaporowym [2]. Klasyczne rozważania literaturowe prowadzone są przy założeniu, że do konstrukcji filtru użyto komponentów idealnych, tzn. pominięto ich parametry pasożytnicze.

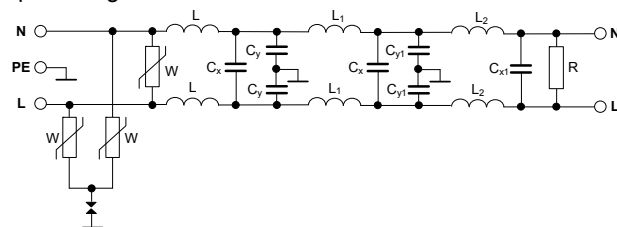
Jednym z narzędzi komputerowych do analizy układów elektronicznych jest program SPICE [3]. Program ten umożliwia m.in. wyznaczenie częstotliwościowych charakterystyk amplitudowych i fazowych rozważanej klasy układów, przy czym analiza taka jest wykonywana po linearyzacji układu wokół wybranego punktu pracy.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych ilustrujących wpływ uwzględnienia parametrów pasożytniczych w modelach komponentów RLC stosowanych w wybranych filtrach sieciowych na charakterystyki częstotliwościowe tych filtrów. Obliczenia wykonano w szerokim zakresie częstotliwości, przy wybranych wartościach rezystancji obciążenia. Przedyskutowano uzyskane wyniki badań wskazując ograniczenia zakresu zastosowań rozważanych filtrów. W badaniach posługiwano się liniowymi modelami komponentów RLC rozważanych filtrów.

Badane układy

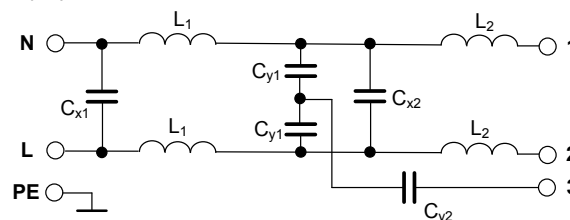
Do badań wybrano dwa filtry wejściowe impulsowych układów zasilających, których schematy pokazano na rys. 1 i 2. Rys. 1 prezentuje filtr FN700Z firmy Schaffner model

20A, natomiast rys. 2 – filtr komputerowego zasilacza impulsowego.



Rys. 1. Schemat filtra FN700Z firmy Schaffner model 20A

Na wejściu filtru pokazanego na rys. 1 umieszczone są trzy warystory włączone między poszczególne pary zacisków wejściowych filtru. Filtr składa się z kaskadowo połączonych trzech obwodów LC. Wartości elementów w tych obwodach decydują o częstotliwościach charakterystycznych rozważanego filtru. Zaciski N, L oraz PE są dołączone do odpowiednich zacisków sieci elektroenergetycznej, natomiast obciążenie należy podłączyć do zacisków L' oraz N'.



Rys. 2. Schemat filtra komputerowego zasilacza impulsowego

Z kolei, filtr przedstawiony na rys. 2 podłączany jest do sieci elektroenergetycznej przez zaciski L, N oraz PE. Obciążenie dołącza się do zacisków oznaczonych cyframi 1, 2 oraz 3. Filtr zawiera kaskadowo połączone dwa obwody LC, a wartości elementów zawartych w tych obwodach decydują o wartościach częstotliwości charakterystycznych dla tych obwodów.

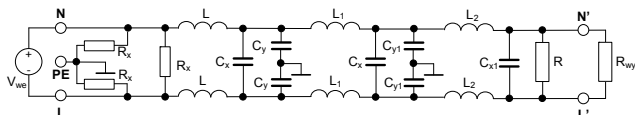
W obu rozważanych układach tłumione są sygnały o częstotliwościach zakłócających – zarówno pochodzące z sieci elektroenergetycznej, jak i sygnały wysokiej częstotliwości związane z impulsową pracą zasilanego układu. Z przeznaczenia tych filtrów wynika, że należą one do grupy filtrów dolnoprzepustowych. A zatem, układy te tłumią sygnały wysokiej częstotliwości pochodzące zarówno z sieci, jak i z obciążenia.

Modele filtrów z elementami idealnymi

W celu wyznaczenia charakterystyk częstotliwościowych rozważanych układów niezbędne było sformułowanie modeli symulacyjnych tych układów dedykowanych dla programu SPICE. Modele takie mają formę odpowiedniego układu elektronicznego, w którym musi występować węzeł odniesienia o potencjale równym zero [3]. Ze względu na fakt, że w wymienionym programie charakterystyki częstotliwościowe są wyznaczane metodą liniowej analizy małosygnałowej, sformułowano liniowe modele rozważanych układów. Dodatkowo, program SPICE wymaga, aby występowała rezystancja o skończonej wartości między każdym z węzłów analizowanego układu a potencjałem odniesienia [3].

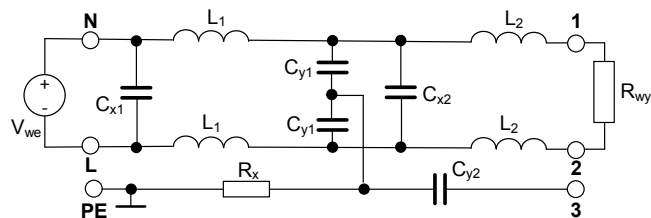
Uwzględniając powyższe zalecenia sformułowano liniowe modele filtrów opisanych w poprzednim rozdziale. Na wejściu każdego z tych układów znajduje się źródło napięciowe V_{we} pobudzające ten układ sygnałem harmonicznym o przestrajanej częstotliwości. Obciążenie układu stanowią rezystory R_{wy} włączone między odpowiednie zaciski wyjściowe. Zamiast nieliniowych warystorów zastosowano liniowe rezystory o dużej wartości rezystancji $R_x = 1 \text{ M}\Omega$. Rezystory takie włączono także między potencjał odniesienia i węzły, w których łączą się ze sobą tylko kondensatory.

Schematy symulacyjne badanych układów przedstawiono na rys. 3 oraz 4.



Rys. 3. Model symulacyjny filtra FN700Z firmy Schaffner z elementami idealnymi

Wartości elementów występujących w układzie pokazanym na rys. 3 wynoszą: $L = 60 \mu\text{H}$, $L_1 = 5,5 \text{ mH}$, $L_2 = 3,6 \text{ mH}$, $C_x = 1 \mu\text{F}$, $C_{x1} = 2,2 \mu\text{F}$, $C_y = 5 \text{ nF}$, $C_{y1} = 10 \text{ nF}$, $R = 330 \text{ k}\Omega$, $R_x = 1 \text{ M}\Omega$.



Rys. 4. Model symulacyjny filtra komputerowego zasilacza impulsowego z elementami idealnymi

Z kolei, w układzie z rys. 4 wartości elementów wynoszą: $L_1 = 0,4 \text{ mH}$, $L_2 = 3,8 \text{ mH}$, $C_{x1} = 330 \text{ nF}$, $C_{x2} = 2,2 \mu\text{F}$, $C_{y1} = 2,2 \text{ nF}$, $C_{y2} = 10 \text{ nF}$, $R_x = 1 \text{ M}\Omega$.

Modele filtrów z uwzględnieniem nieidealności ich komponentów

W poprzednim rozdziale przedstawiono liniowe modele rozważanych filtrów zawierające idealizowane modele elementów RLC zawartych w tych filtrach oraz przy pominięciu warystorów, które były potraktowane jak rozwarście. Jednak, jak wiadomo m.in. z pracy [4, 5], kondensatory, induktry oraz rezystory wykazują charakterystyki częstotliwościowe charakterystyczne dla obwodów RLC i mogą być idealizowane tylko w zakresie niewysokich częstotliwości. Z kolei, charakterystyki warystora są silnie nieliniowe, a jego rezystancja jest uzależniona potęgowo od napięcia.

W modelu rzeczywistego rezystora występuje indukcyjność wyprowadzeń L oraz pojemność pasozytnicza C . Z kolei, w modelu rzeczywistego indukcyjności występuje rezystancja R opisująca straty w uzwojeniu oraz w rdzeniu ferromagnetycznym i pojemność międzyzwojową C .

W modelu rzeczywistego kondensatora występuje indukcyjność wyprowadzeń L_s , upływność dielektryka R_p , ekwiwalentna rezystancja szeregowa R_s związana z właściwościami wyprowadzeń i okładek kondensatora.

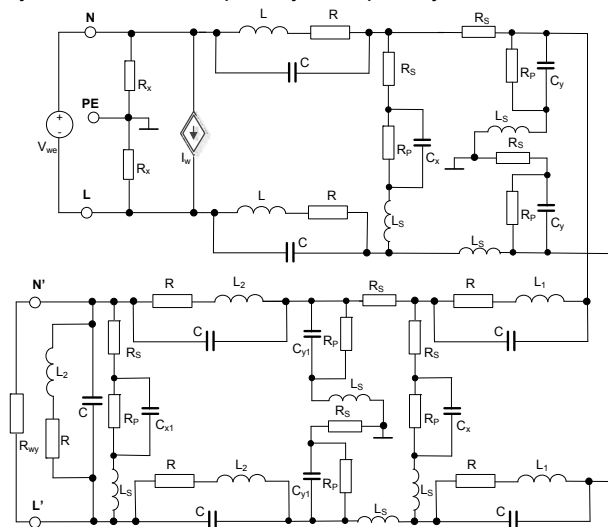
Warystor jest reprezentowany przez sterowane źródło prądowe I_w , którego prąd wyjściowy opisany jest wzorem o postaci:

$$(1) \quad I_w = K \cdot U_w^\beta$$

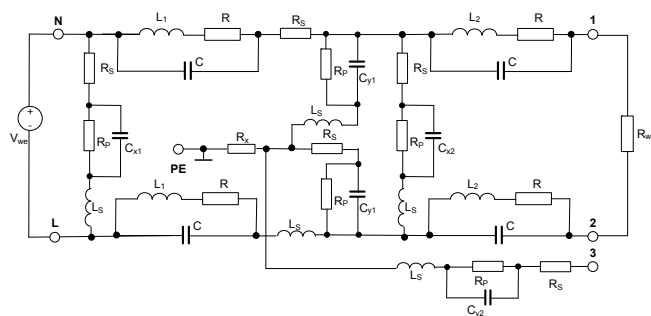
gdzie K oraz β są parametrami opisującymi charakterystykę warystora.

Uwzględniając schematy zastępcze rezystorów, kondensatorów i indukcyjności oraz warystorów sformułowano modele symulacyjne filtrów o schematach pokazanych na rys. 1 i 2. Na wejściu każdego z tych układów znajduje się źródło napięciowe V_{we} pobudzające ten układ, a obciążenie układu stanowią rezystory R_{wy} włączone między odpowiednie zaciski wyjściowe. Rezystancja między izolowanymi punktami została ustalona arbitralnie na $R_x = 1 \text{ M}\Omega$.

Schematy symulacyjne badanych układów przedstawiono na rys. 5 oraz 6. Wartości elementów występujących w układzie pokazanym na rys. 5 są równe wartościom podanym w opisie rys. 3, a wartości elementów z rys. 6 – wartościom podanym w opisie rys. 4.



Rys. 5. Model symulacyjny filtra FN700Z firmy Schaffner



Rys. 6. Model symulacyjny filtra komputerowego zasilacza impulsowego

Przyjęto następujące wartości parametrów pasywnych elementów RLC oraz przyjęto, że zastosowane warystory cechują się napięciem równym 400 V przy prądzie równym 1 mA. Stąd wartości parametrów pasywnych wynoszą:

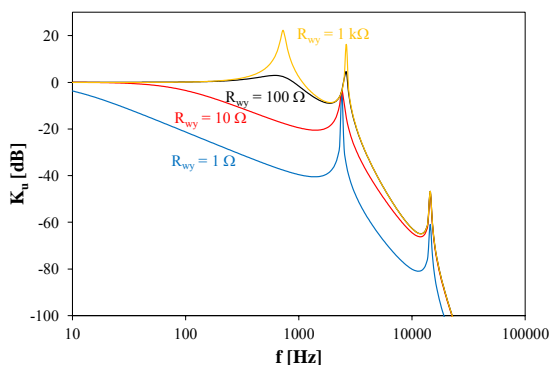
- a) dla wszystkich rezystorów $L = 10 \text{ nH}$, $C = 2 \text{ pF}$,
- b) dla wszystkich induktorów $R = 10 \text{ m}\Omega$, $C = 20 \text{ pF}$,
- c) dla wszystkich kondensatorów $R_p = 10 \text{ M}\Omega$, $R_s = 10 \text{ m}\Omega$, $L = 10 \text{ nH}$,
- d) dla wszystkich warystorów $K = 1,4 \times 10^{-63} \text{ A/V}^\beta$, $\beta = 23$.

Wyniki obliczeń

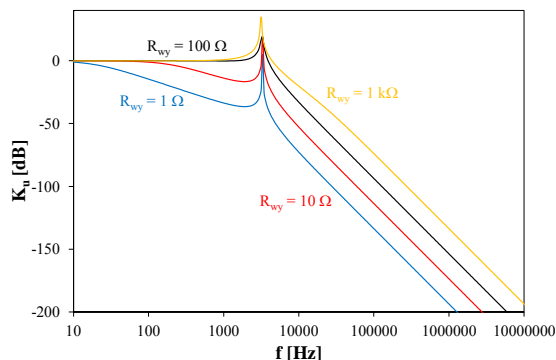
Wykorzystując modele symulacyjne przedstawione w poprzednim rozdziale wyznaczono charakterystyki częstotliwościowe obu rozważanych układów pracujących przy różnych wartościach rezystancji obciążenia R_{wy} . Obliczenia przeprowadzono w szerokim zakresie zmian częstotliwości. Na przedstawionych poniżej charakterystykach zilustrowano wpływ częstotliwości na wzmocnienie napięciowe K_u badanych filtrów definiowane jako iloraz amplitud napięcia na wyjściu i wejściu filtru [6]. Wartości wzmocnienia napięciowego podane są w dB.

Na rys. 7 przedstawiono charakterystyki amplitudowe, filtru, którego schemat pokazano na rys.1.

Analizując przebiegi charakterystyk pokazanych na rys. 7 można łatwo dostrzec, że występują na nich rezonanse przejawiające się maksimami zależności $K_u(f)$. Te maksima występują przy częstotliwościach równych około 720 Hz, 2,63 kHz oraz 14,5 kHz. Przy tych wartościach częstotliwości istotnie rośnie wzmocnienie napięciowe, czyli pogarsza się tłumienie (odwrotność wzmocnienia) filtru. Pierwsze z tych maksimów nie jest widoczne przy małych wartościach rezystancji obciążenia. W zakresie częstotliwości przekraczających 200 kHz kilka megaherców, tłumienie filtru przekracza nawet 100 dB. Oczywiście, ze względu na niedoskonałości stosowanych rzeczywiście elementów LC oraz upływności obwodu drukowanego tak duże tłumienie jest niemożliwe w praktyce do osiągnięcia.



Rys. 7. Charakterystyki amplitudowe filtru FN700Z firmy Schaffner



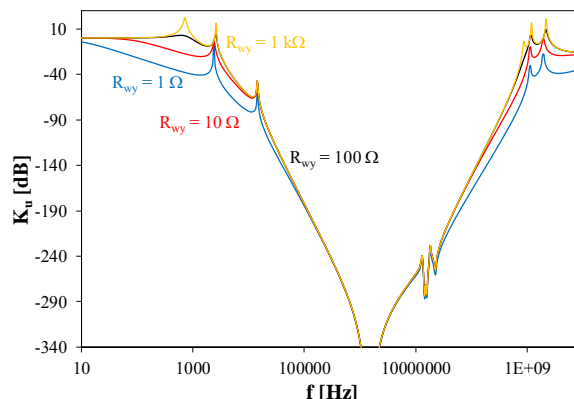
Rys. 8. Charakterystyki amplitudowe filtru komputerowego zasilacza impulsowego

Analogiczne obliczenia wykonano dla drugiego z rozważanych filtrów, którego schemat pokazano na rys. 2. Rys. 8 prezentuje charakterystyki amplitudowe rozważanego filtru dla wybranych wartości rezystancji obciążenia R_{wy} .

Jak można zaobserwować, na przedstawionych charakterystykach występuje jedno maksimum przy częstotliwości równej 3,3 kHz. Tłumienie filtru jest tym większe, im mniejsza jest rezystancja obciążenia. Po przekroczeniu częstotliwości rezonansowej nachylenie charakterystyk $K_u(f)$ wynosi 60 dB na dekadę, a przy $f = 1 \text{ MHz}$ oraz $R_{wy} = 1 \Omega$ tłumienie filtru osiąga nawet 200 dB.

Bardzo dobre właściwości rozważanego filtru zilustrowane na rys. 8 są w rzeczywistości trudne do osiągnięcia ze względu na niedoskonałość zastosowanych elementów RLC oraz zastosowanego podłoża obwodu drukowanego [7], na którym zmontowano ten filtr.

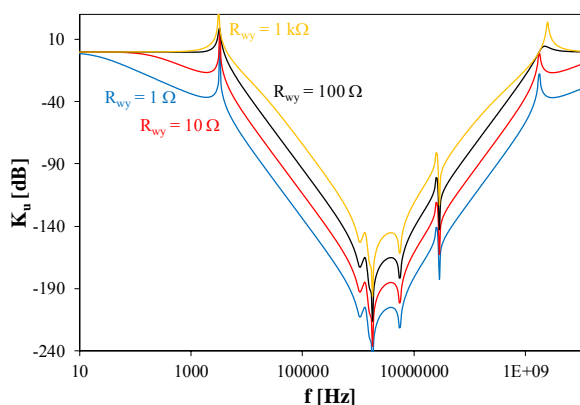
Jak zaznaczono powyżej oraz opisano w literaturze [4, 5, 9], rzeczywiste elementy RLC są charakteryzowane przez swoje parametry nominalne oraz parametry pasywności. W szczególności induktory wykazują impedancję o charakterze indukcyjnym tylko do pewnej maksymalnej wartości częstotliwości, a przy dalszym wzroście częstotliwości charakter impedancji tego elementu zmienia się na pojemnościowy [8, 9, 10]. Z kolei, w impedancji kondensatorów i rezystorów, przy pewnej częstotliwości, widoczny jest wpływ indukcyjności doprowadzeń lub upływności dielektryka. Modele wymienionych elementów uwzględniające rozważane nieidealności opisano w poprzednim rozdziale. Wykorzystując te modele wyliczono charakterystyki amplitudowe filtru o schemacie pokazanym na rys. 1, a uzyskane wyniki obliczeń pokazano na rys. 9.



Rys. 9. Charakterystyki amplitudowe filtru FN700Z firmy Schaffner wyznaczone przy uwzględnieniu nieidealności elementów RLC

Porównując charakterystyki pokazane na rys. 7 i 9 widać, że uwzględnienie parametrów pasywnych induktorów, rezystorów i kondensatorów nie spowodowało zauważalnych zmian w przebiegu zależności $K_u(f)$ w zakresie niskich częstotliwości. Nadal widoczne są w tym zakresie trzy maksima. Zmianie uległy przebiegi rozważanych charakterystyk w zakresie wyższych częstotliwości. Widać, że wzmocnienie osiąga najmniejszą wartość (poniżej -340 dB) przy częstotliwości równej około 1 MHz. W zakresie częstotliwości przekraczających kilkaset MHz wzmocnienie jest tylko nieznacznie niższe niż w zakresie niskich częstotliwości. Jego wartości osiągają około -16 dB. Widoczne są także dwa maksima wysokoczęstotliwościowe występujące przy częstotliwościach równych około 1,2 GHz oraz 2,2 GHz. Oznacza to, że na skutek uwzględnienia pasywnych parametrów induktorów i kondensatorów tłumienie filtru w tym zakresie częstotliwości pogorszyło się o ponad 340 dB.

Na rys. 10 przedstawiono charakterystyki częstotliwościowe rozważanego filtra otrzymane przy uwzględnieniu pasożytniczych parametrów elementów RLC.



Rys. 14. Charakterystyki amplitudowe filtra komputerowego zasilacza impulsowego wyznaczone przy uwzględnieniu parametrów pasożytniczych elementów RLC

Jak można zaobserwować, na skutek uwzględnienia pasożytniczych parametrów induktorów, rezystorów i kondensatorów istotnie zmieniły się przebiegi charakterystyk częstotliwościowych rozważanego filtra. Na charakterystykach amplitudowych występują dwa minima przy częstotliwościach równych 525 kHz i 1,58 MHz, a tłumienie filtra w zakresie bardzo dużych częstotliwości zmalało do 240 dB (z 475 dB). Widoczna jest zmiana przebiegu rozważanej charakterystyki w zakresie bardzo dużych częstotliwości. W tym zakresie występują maksima charakterystyki $K_u(f)$ przy częstotliwości z zakresu od 1,5 GHz do 2,5 GHz. Dla częstotliwości $f > 1$ GHz rozważany filtr praktycznie nie tłumি sygnału wejściowego.

Podsumowanie

Niniejsza praca przedstawia wyniki analiz komputerowych dotyczących charakterystyk częstotliwościowych dwóch arbitralnie wybranych filtrów wejściowych do zasilaczy impulsowych. Każdy z tych filtrów należy do grupy wielostopniowych filtrów LC. Rozważane układy powinny się cechować charakterystykami częstotliwościowymi odpowiadającymi filtrom dolnoprzepustowym. Przy pominięciu nieidealności elementów RLC użytych do konstrukcji tych filtrów rzeczywiste przebiegi tych charakterystyk jest zbliżony do wskazanego ideału. Jednak po uwzględnieniu zjawisk pasożytniczych występujących w wymienionych elementach istotnie zmieniają się charakterystyki rozważanych filtrów w zakresie wysokich częstotliwości.

Wykazano, że uwzględnienie parametrów pasożytniczych induktorów, kondensatorów i rezystorów skutkuje tym, że w zakresie częstotliwości typowym dla sygnałów mikrofalowych rozważane filtry praktycznie nie wykazują tłumienia. Oznacza to, że rozważane filtry są praktycznie przezroczyste dla sygnałów o częstotliwości przekraczającej parę GHz. Zakres wysokich częstotliwości,

w którym tłumienie jest tak niskie zależy od wartości parametrów pasożytniczych występujących w badanych układach.

Przedstawione przykłady obliczeń wykonanych przy uwzględnieniu parametrów pasożytniczych induktorów, kondensatorów i rezystorów wykazały, że elementy te w istotny sposób zmieniają charakterystyki rozważanych filtrów w zakresie bardzo dużych częstotliwości. Tłumienie filtrów uzyskane przy uwzględnieniu tych parametrów pasożytniczych może być nawet o ponad 300 dB mniejsze niż przy pominięciu ich wpływu w obliczeniach. Istotne znaczenie mogą mieć także właściwości płytki drukowanej, na której zamontowano analizowany układ. Właściwości te mogą być uwzględnione poprzez wprowadzenie do schematu symulacyjnego analizowanego układu dodatkowych pojemności, rezystancji i pojemności charakteryzujących właściwości płytki drukowanej.

Efektywne tłumienie sygnałów zakłócających o częstotliwościach właściwych dla sygnałów mikrofalowych wymaga specjalnego podejścia do projektowania i analizy filtrów mających spełnić to zadanie. W podejściu tym muszą być uwzględnione właściwości rozważanych filtrów w zakresie bardzo wysokich częstotliwości. Klasyczne wejściowe filtry sieciowe są przeznaczone do tłumienia sygnałów związanych z pracą impulsowych układów zasilających, dla których częstotliwość kluczowania nie przekracza kilkuset kiloherców.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, dr inż. Paweł Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydz. Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: k.gorecki@we.umg.edu.pl, p.gorecki@we.umg.edu.pl

LITERATURA

- [1] K. Górecki, J. Zarębski, W.J. Stepowicz, P. Górecki, D. Bisewski, K. Detka, P. Ptak, J. Dąbrowski, M. Godlewska, K. Bargieł, J. Szelańska: Modelowanie wpływu zewnętrznego pola elektromagnetycznego na charakterystyki wybranych elementów elektronicznych. Przegląd Elektrotechniczny, R. 95, nr 10, 2019, s. 130-133.
- [2] U. Tietze, Ch. Schenk: Układy półprzewodnikowe, WNT, Warszawa, 1996.
- [3] B.M. Wilamowski, R.C. Jaeger, Computerized Circuit Analysis Using SPICE Programs. McGraw-Hill, New York 1997
- [4] Stepowicz W.J., Górecki K.: Materiały i elementy elektroniczne. Wydanie drugie, rozszerzone. Wydawnictwo Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia, 2008.
- [5] T. Macewicz: Radioelektronika dla praktyków, WKŁ, Warszawa, 1986.
- [6] Guziński A.: Liniowe elektroniczne układy analogowe, WNT, Warszawa, 1993.
- [7] M. Feszczuk: Płytki drukowane – zasady projektowania i wykonanie w warunkach amatorskich. www.meeck.pl/info/fotolakiery.html
- [8] SIFERRIT Materials. Materiały firmowe EPCOS AG, Munchen, 2000.
- [9] Barlik R., Nowak M., Energoelektronika elementy podzespoły układy, Politechnika Warszawska, 2014
- [10] Van den Bossche A., Valchev VC., Inductor and Transformers for Power Electronic, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005.