

Analiza porównawcza pasywnych, aktywnych i hybrydowych filtrów EMI do tłumienia zaburzeń przewodzonych

Streszczenie. W niniejszym artykule została przedstawiona analiza możliwości zastosowania pasywnych, aktywnych i hybrydowych filtrów EMI do tłumienia zaburzeń przewodzonych wspólnych generowanych przez falownik. Główny nacisk w prowadzonych badaniach kładzie się na aspekty techniczne i ekonomiczne, takie jak: cena filtru, masa, gabaryty oraz skuteczność tłumienia. W artykule porównano różne techniki tłumienia zaburzeń przewodzonych (za pomocą filtrów pasywnych, aktywnych i hybrydowych) wskazując ich zalety i wady.

Abstract. This article presents an analysis of the possibilities of using passive, active and hybrid EMI filters to reduce common mode noise generated by the frequency inverter. The main goal in the research is put on technical and economic aspects, such as: filter price, weight, dimensions and insertion losses. The article compares various techniques of reduction conducted noise (using passive, active and hybrid filters) indicating their advantages and disadvantages. (*Comparative analysis of passive, active and hybrid EMI filters to reduce conducted noise.*)

Słowa kluczowe: aktywne filtry EMI, zaburzenia przewodzone, kompatybilność elektromagnetyczna, falownik.

Keywords: active EMI filters, electromagnetic interference, electromagnetic compatibility, frequency inverter.

Wstęp

Przekształcanie energii z wysoką częstotliwością pozwala na zmniejszenie wymiarów elementów magnetycznych, umożliwiając konstruowanie bardziej zwartych i lżejszych przekształtników o dużej gęstości mocy i wysokiej sprawności [1, 2, 3]. Niestety ich główną wadą jest generowanie wysokiego poziomu zaburzeń elektromagnetycznych EMI (*ElectroMagnetic Interference*) [4, 5]. Budowa lekkich przekształtników, pracujących z bardzo wysokimi częstotliwościami paradoksalnie doprowadziła do tego, że masa i wymiar filtrów przeciwzaburzeniowych mogą być większe od masy i wymiaru samego przekształtnika [6, 7]. W związku z tym, od kilkunastu lat prowadzi się badania nad możliwością zastosowania filtrów aktywnych do tłumienia zaburzeń przewodzonych, zastępując filtry pasywne lub znacznie poprawiając ich właściwości tworząc grupę tzw. filtrów hybrydowych [8, 9].

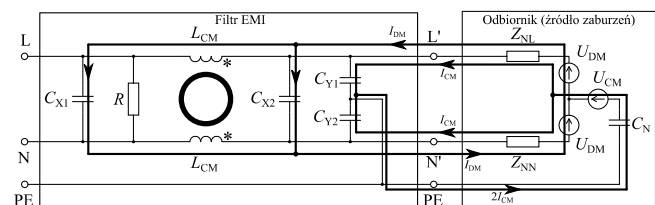
Przyczyną przeprowadzenia analizy porównawczej filtrów pasywnych, aktywnych i hybrydowych jest zapotrzebowanie rynku na tego typu badania. Analiza ta pozwala na uzyskanie odpowiedzi na pytanie, która struktura filtru aktywnego pozwoli na zmniejszenie wymiarów, masy, ceny oraz zwiększenie skuteczności redukcji zaburzeń przez filtry EMI. W dotychczas prowadzonych badaniach jest brak jednoznacznego porównania skuteczności filtrów pasywnych, aktywnych i hybrydowych pod względem odbiorcy końcowego (producentów przekształtników), a w przemyśle cena filtru jest podstawowym założeniem konstrukcyjnym [10, 3].

Zapotrzebowanie rynku na takie wyniki badań jakie prowadzi się w ramach niniejszego artykułu jest szczególnie istotne w przemyśle motoryzacyjnym, gdzie bardzo dużą uwagę poświęca się samochodom elektrycznym z dużą liczbą przekształtników energoelektronicznych [11].

Pasywne filtry EMI

Najczęściej stosowane filtry EMI zbudowane są z elementów pasywnych (rezystorów, kondensatorów oraz

cewek sprzężonych). Filtry EMI dobiera się w zależności od urządzenia, w którym mają pracować (o czym decydują między innymi takie parametry, jak: prąd, napięcie, sieć jedno - lub trójfazowa) oraz wymagania odnośnie norm, jakie dane urządzenie powinno spełniać (dopuszczalny poziom zaburzeń, maksymalny prąd upływu). Projektowanie filtrów EMI wymaga badań eksperymentalnych w układzie z przekształtnikiem, mających na celu znalezienie optymalnej konfiguracji filtru [12].



Rys.1. Droga rozchodzenia się zaburzeń: wspólnych CM i różnicowych DM

Zaburzenia przewodzone wspólne CM (*Common Mode*) oraz różnicowe DM (*Differential Mode*) rozchodzą się w filtrze w różny sposób, to też skuteczność ich tłumienia zależy od innych komponentów składowych filtru. Sposób rozchodzenia się zaburzeń został przedstawiony na rysunku 1. Prądy zaburzeń wspólnych rozprzyskują się w obu przewodach zasilających L' i N' w tym samym kierunku i zamykają się poprzez przewód ochronny PE, natomiast prądy zaburzeń różnicowych płyną przewodem L' w jednym kierunku, a powracają przewodem N' w przeciwnym.

Najważniejszymi elementami każdego filtru przeciwzaburzeniowego są cewki sprzężone L_{CM} , które zbudowane są z rdzenia magnetycznego i dwóch (w filtrach jednofazowych) lub trzech (w filtrach trójfazowych), takich samych uzwojeń. Najczęściej stosowanymi materiałami do budowy rdzeni cewek sprzężonych w filtrach są materiały ferrytowe (MnZn) oraz nanokrystaliczne [13]. Przenikalność

magnetyczna użytego w filtrze przeciwzaburzeniowym rdzenia ma bezpośredni wpływ na uzyskiwany moduł tłumienności wtrąceniowej [14].

Przeprowadzone eksperymenty ukierunkowane są na badanie zaburzeń wspólnych z uwagi na fakt, że wielkość filtru EMI zależy głównie od gabarytów cewek sprzężonych. Jest to związane z określoną przez normy maksymalną wartością prądu upływu, która tym samym ogranicza wartości pojemności kondensatorów klasy Y. W celu uzyskania dużej tłumienności filtru, cewki sprzężone zaburzeń wspólnych muszą mieć dużą wartość indukcyjności, co powoduje podwyższenie kosztów, rozmiaru i masy filtrów przeciwzaburzeniowych.

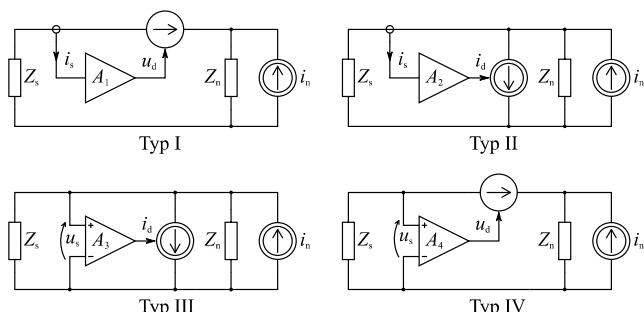
Tłumienie zaburzeń przewodzonych przez filtr, czyli zdolność filtru do redukcji zaburzeń generowanych przez odbiornik (np. falownik) określona jest przez tłumienność wtrąceniową IL . Moduł tłumienności wtrąceniowej w skali logarytmicznej definiowany jest jako (1) stosunek wartości skutecznej napięcia na zaciskach zasilających odbiornik bez filtru $|U_s^0|$ do wartości skutecznej napięcia panującego na tych zaciskach po zastosowaniu filtru $|U_s|$:

$$(1) \quad |IL_{dB}| = 20 \log \frac{|U_s^0|}{|U_s|}$$

Aktywne filtry EMI

Zadaniem filtru aktywnego jest detekcja i redukcja zaburzeń generowanych przez źródło (odbiornik), tak aby nie przedostawały się one do sieci zasilającej. Istnieje kilka różnych konfiguracji filtrów różniących się między sobą typem sprzężenia oraz sposobem detekcji i redukcji zaburzeń. Ze względu na typ sprzężenia można wyodrębnić dwie grupy filtrów aktywnych: ze sprzężeniem zwrotnym (*feedback-type*) oraz bez sprzężenia (*feedforward-type*). W każdej z grup możemy wyróżnić filtry ze względu na sposób detekcji zaburzeń: pomiar prądu lub napięcia oraz sposobu ich tłumienia: kompensacja prądu lub napięcia. Działanie filtrów ze sprzężeniem zwrotnym polega na wytworzeniu odpowiedniego sygnału kompensującego, tak aby stłumić zaburzenia generowane przez źródło (zamknięta pętla), natomiast działanie filtrów bez sprzężenia polega na wytworzeniu sygnału przeciwnego do sygnału zaburzającego generowanego przez źródło, tak by obydwa te sygnały wzajemnie się zniosły (otwarta pętla).

Na rysunku 2 zostały przedstawione cztery podstawowe struktury filtrów aktywnych ze sprzężeniem zwrotnym (*feedback-type*) [15] wraz z zaproponowanymi dla nich numerami typów [16]. Typy te różnią się od siebie sposobem detekcji oraz redukcji zaburzeń.



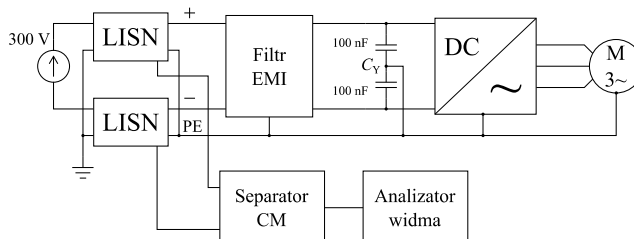
Rys.2. Struktury filtrów ze sprzężeniem zwrotnym [16]

We wcześniejszym artykule [17] została dokonana szczegółowa analiza oraz badania symulacyjne wyżej wymienionych struktur, z których w kolejnej pracy [18] zostały wybrane dwie do badań eksperymentalnych: typ III oraz IV, gdzie zbadano ich właściwości i zweryfikowano warunki poprawnej pracy.

Stanowisko pomiarowe

Do badania filtrów pasywnych, aktywnych i hybrydowych dla zaburzeń wspólnych zostało zaproponowane stanowisko pomiarowe, które składa się ze sztucznych sieci, źródła zaburzeń, separatora zaburzeń wspólnych CM i analizatora widma. Schemat tego stanowiska został przedstawiony na rysunku 3.

W niniejszym artykule z uwagi na to, że badane były tylko zaburzenia wspólne CM, w układach pomiarowych filtrów EMI nie występowały kondensatory klasy X. Jak wcześniej wskazano, zaburzenia wspólne i różnicowe rozpatruje się osobno, i we wszystkich układach pomiarowych pominięto elementy filtru, które nie mają wpływu na badaną składową wspólną przewodzonych.



Rys.3. Zaproponowane stanowisko pomiarowe

Sieci sztuczne użyte w stanowisku to dwie sieci jednofazowe firmy R&S, typ: ESH3-Z6, których zadaniem jest stabilizacja warunków pomiarowych. Sieci te są zgodne z normą PN-EN 55025 dotyczącą pomiarów w przemyśle motoryzacyjnym.

Kolejnym elementem jest źródło zaburzeń, którym jest falownik z dołączonym na jego wyjściu 3-fazowym silnikiem indukcyjnym.

Do pomiaru zaburzeń wspólnych sygnał pomiarowy z obu sieci podany jest na separator zaburzeń wspólnych CM, którego zadaniem jest wydzielenie z badanego sygnału składowej symetrycznej mierzonego sygnału.

Ostatnią częścią stanowiska jest analizator widma firmy GW Instek, typ: GSP-827. Dokonuje on analizy widma sygnału zaburzeń wspólnych w zakresie od 9 kHz do 30 MHz.

W tabeli 1 zostały przedstawione wyniki pomiarów modułu impedancji sieci zasilającej $|Z_s|$ oraz odbiornika $|Z_n|$ dla zaburzeń wspólnych.

Tabela 1. Zmierzonego modułu impedancji sieci zasilającej i odbiornika dla zaburzeń wspólnych przy różnych częstotliwościach

f , kHz	0,1	1	10	100	200
$ Z_s $, Ω	7000	520	10	2,8	5,7
$ Z_n $, k Ω	>100	70	2,8	0,29	0,14

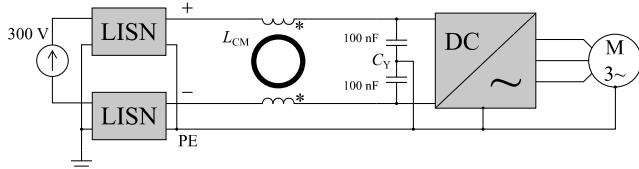
Z pomiarów wynika, że w całym zakresie częstotliwości moduł impedancji sieci jest dużo mniejszy od modułu impedancji odbiornika $|Z_s| \ll |Z_n|$. Dlatego do tłumienia zaburzeń przewodzonych przez filtry aktywne oraz hybrydowe wybrano strukturę typu III.

Kondensatory $C_Y = 100$ nF są włączone na stałe przy wszystkich pomiarach i dodatkowo zmniejszają moduł impedancji falownika dla zaburzeń wspólnych, a tym samym ich poziom. Wstępne zmniejszenie poziomu tych zaburzeń było niezbędne do poprawnej pracy filtrów aktywnych i hybrydowych, ponieważ bez tego nie można było uzyskać stabilnej pracy części aktywnej (następowało przesterowanie wejścia wzmacniacza i wzrost poziomu zaburzeń).

Pomiar tłumienia zaburzeń CM przez filtry pasywne

Pomiar tłumienia zaburzeń wspólnych przez filtry pasywne będzie stanowił punkt odniesienia w analizie i porównaniu wyników otrzymanych z pomiarów tłumienia

filtrów aktywnych i hybrydowych. W pracy dokonano pomiaru filtrów pasywnych z zastosowaniem w ich konstrukcji różnych typów rdzeni ferromagnetycznych, uzyskując różne wartości modułu tłumienności wtrąceniowej. Zastosowane w filtrach rdzenie różnią się między sobą materiałem, z którego zostały wykonane, przenikalnością magnetyczną, rozmiarem i ceną. Do pomiarów rdzeni zostało wykorzystane stanowisko pomiarowe przedstawione na rysunku 3, a na rysunku 4 przedstawiono schemat układu, w którym przeprowadzono badanie filtrów pasywnych z wykorzystaniem różnych typów rdzeni ferromagnetycznych.



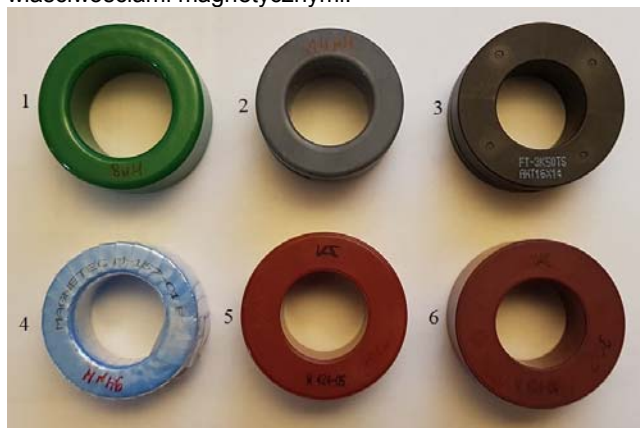
Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego do porównania właściwości rdzeni dla zaburzeń wspólnych

W eksperymencie wykorzystano rdzenie magnetyczne (dwa ferrytowe MnZn i cztery nanokrystaliczne), których zestawienie zostało przedstawione w tabeli 2. Podana wartość współczynnika AL została wyznaczona pomiarowo.

Tabela 2. Zestawienie podstawowych parametrów badanych rdzeni

Lp.	Oznaczenie	Typ rdzenia	AL , nH	Waga, g	Przybliżona cena, PLN
1	NCD, EZ209951	Ferrytowy	8000	77	6
2	KOLEKTOR, T 12G 36/23 19 09		14000	62	8
3	HITACHI, FT 3K50TS	Nanokryst.	48000	76	28
4	MAGNETEC, M 157 01 F1		94000	68	44
5	VAC, W 424 05		106000	72,5	50
6	VAC, W 424 04		143000	70,5	38

Na rysunku 5 przedstawiono zdjęcie badanych rdzeni. Rdzenie te są zbliżone do siebie wymiarami geometrycznymi, choć różnią się diametralnie właściwościami magnetycznymi.

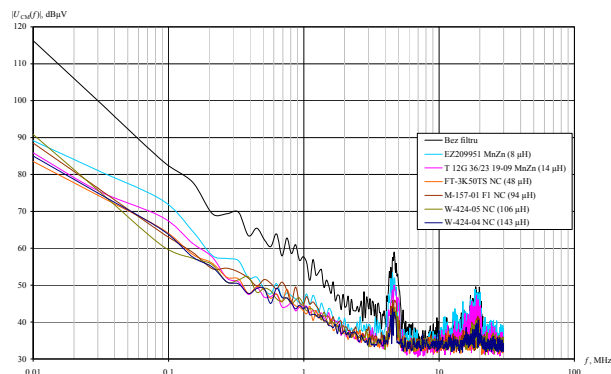


Rys. 5. Zdjęcie badanych rdzeni (z tabeli 2)

Rdzenie proszkowe mają współczynnik AL wielokrotnie mniejszy od rdzeni nanokrystalicznych, jednak są od nich od 3 do 5 razy tańsze.

Na rysunku 6 zostało przedstawione zestawienie zmierzonych widm zaburzeń wspólnych generowanych przez falownik po stłumieniu ich przez filtry pasywne zbudowane przy użyciu badanych rdzeni. Na

charakterystyce zamieszczono też widmo zaburzeń CM bez cewek sprzężonych. Na każdym z rdzeni nawinięty był tylko jeden zwój, ponieważ właściwości tłumiące tak powstałego filtru zależą wyłącznie od właściwości magnetycznych i geometrycznych użytego rdzenia. Indukcyjności cewek sprzężonych L_{CM} miały zatem wartości takie jak współczynniki AL badanych rdzeni, czyli odpowiednio: 8 μ H, 14 μ H, 48 μ H, 94 μ H, 106 μ H oraz 143 μ H.



Rys. 6. Zestawienie zmierzonych widm zaburzeń wspólnych generowanych przez falownik bez filtru oraz z filtrami zbudowanymi na badanych rdzeniach

Z widm tych można odczytać, że im większe wartości indukcyjności cewek sprzężonych L_{CM} , tym mniejszy jest zarejestrowany poziom zaburzeń wspólnych.

Odnosząc poziom zaburzeń generowanych przez odbiornik z zamontowanym filtrem do poziomu zaburzeń bez filtru, można określić moduł tłumienności wtrąceniowej $|L|$. Im większa jest wartość tego modułu, tym lepszym tłumieniem charakteryzuje się dany filtr. Różnice w module tłumienności wtrąceniowej dla różnych rdzeni, w zależności od częstotliwości, wahają się od kilku do kilkunastu decybeli. Natomiast moduł tłumienności wtrąceniowej badanych zestawów (w stosunku do poziomu zaburzeń generowanych przez falownik bez filtrów) wynosił w zależności od częstotliwości od 1 dB do nawet 25 dB. Istotny spadek poziomu zaburzeń, w stosunku do układu bez filtrów, jest zauważalny szczególnie dla częstotliwości poniżej 1 MHz.

W tabeli 3 zostały zestawione dla wybranych częstotliwości zmierzone poziomy zaburzeń wspólnych po zastosowaniu filtrów pasywnych oraz poziomy tych zaburzeń bez filtru.

Tabela 3. Zestawienie zmierzonych poziomów zaburzeń CM dla filtrów pasywnych

Lp.	Oznaczenie	L_{CM} , μ H	Poziomy zaburzeń $ U_{CM} $, dBuV			
			10 kHz	150 kHz	1 MHz	10 MHz
1	Bez rdzenia	-	116,3	78	58	34,9
2	EZ209951	8	89,1	64,7	45,3	36,3
3	T 12G 36/23 19 09	14	85,8	61,4	44,1	35,4
4	FT 3K50TS	48	83,5	58,4	43,1	35
5	M 157 01 F1	94	88,5	58,9	44,6	32,4
6	W 424 05	106	90,9	57,3	44,9	33,5
7	W 424 04	143	85	57,7	43,6	32,7

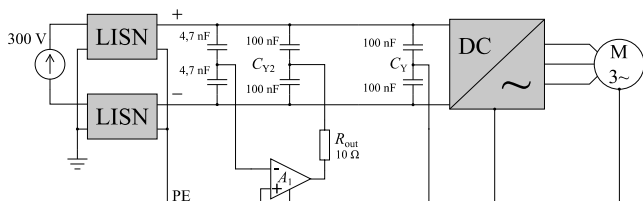
Według przeprowadzonej analizy, najlepszym rdzeniem jest W 424-04, ponieważ uzyskana średnia wartość poziomu zaburzeń generowanych przez falownik po stłumieniu ich filtrem z wykorzystaniem tego rdzenia jest najmniejsza.

Pomiar tłumienia zaburzeń CM z zastosowaniem filtrów aktywnych

Kolejnym krokiem jest zastosowanie filtrów aktywnych do tłumienia zaburzeń przewodzonych. Na rysunku 7 został

przedstawiony schemat zaproponowanego stanowiska pomiarowego.

Zgodnie z przeprowadzoną w poprzedniej pracy analizą [17], do tłumienia zaburzeń wspólnych CM został wybrany filtr typu III. Skonstruowany filtr jest strukturą poddającą detekcji napięcie i kompensującą prąd zaburzeń.



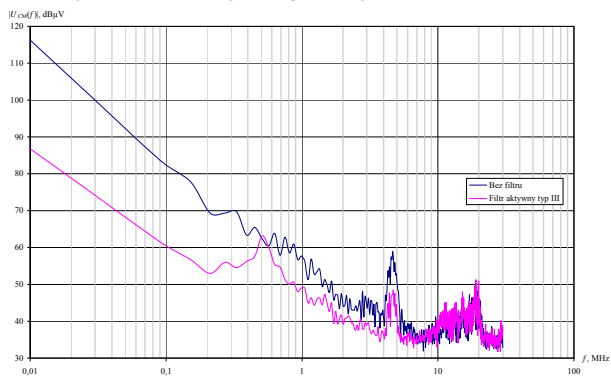
Rys. 7. Schemat stanowiska pomiarowego do badania filtrów aktywnych dla zaburzeń wspólnych

Użyty w stanowisku z rysunku 7, wzmacniacz A_1 jest tym samym wzmacniaczem, co układ przedstawiony w pracy [18], a jego wzmocnienie napięciowe zostało ustawione na 100 V/V. Dodatkowa rezystancja R_{out} wprowadza pewną stratność do układu i poprawia stabilność filtru. Detekcja napięcia zaburzeń wspólnych dokonywana jest poprzez kondensatory 4,7 nF, które wraz z rezystancją wejściową wzmacniacza, tworzą filtr górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej $f_g \cong 2,4$ kHz (2). Prąd zaburzeń jest kompensowany poprzez kondensatory C_{Y2} o wartości 100 nF.

$$(2) \quad f_g = \frac{1}{2\pi R_{we} C} \cong 2,4 \text{ kHz}$$

gdzie: f_g – częstotliwość graniczna filtru na wejściu wzmacniacza A_1 , R_{we} – rezystancja wejściowa wzmacniacza A_1 ok. 7 k Ω , C – wartość pojemności na wejściu wzmacniacza ok. 9,4 nF.

Na rysunku 8 przedstawiono widmo zaburzeń wspólnych generowanych przez falownik z zastosowaniem wyłącznie filtru aktywnego typu III oraz dla porównania widmo tych zaburzeń, jakie generuje falownik bez filtru.



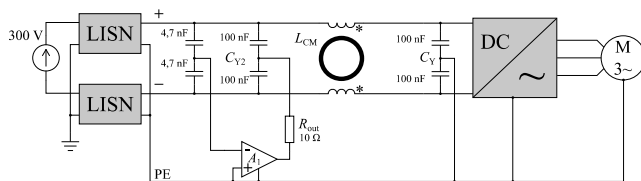
Rys. 8. Zmierzone widmo zaburzeń CM generowanych przez falownik bez filtru oraz z filtrem aktywnym typu III

Na widmie tym widać wyraźny spadek poziomu zaburzeń wspólnych dla częstotliwości poniżej 500 kHz, sięgający nawet 25 dB. Dla wyższych częstotliwości tłumienie jest nieco mniejsze i wynosi ok. 10 dB, a powyżej 10 MHz następuje nawet nieznaczny ich wzrost, co jest niepożądane. Wzrost poziomu zaburzeń spowodowany jest ograniczeniem pasma wzmacniacza A_1 i powstającymi z tego powodu przesunięciami w fazie dla wyższych częstotliwości. Moc pobierana przez filtr aktywny wynosiła ok. 2 W.

Poprawę skuteczności tłumienia filtrów aktywnych można uzyskać poprzez połączenie ich z filtrami pasywnymi tworząc filtry hybrydowe.

Pomiar tłumienia zaburzeń CM z zastosowaniem filtrów hybrydowych

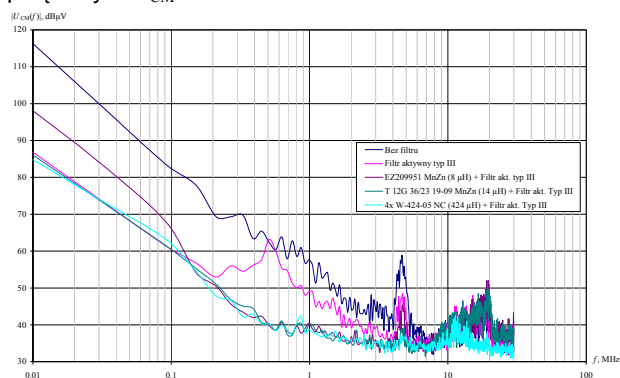
W kolejnym eksperymencie przedstawiono wyniki pomiarów z połączenia filtra aktywnego i pasywnego. Schemat stanowiska pomiarowego został przedstawiony na rysunku 9.



Rys. 9. Schemat stanowiska pomiarowego do badania filtrów hybrydowych dla zaburzeń wspólnych

Jest to układ analogiczny do przedstawionego w poprzednim rozdziale, z tym wyjątkiem, że pomiędzy falownikiem, a filtrem aktywnym zostały włączone cewki sprzężone L_{CM} . Powodują one zwiększenie modułu impedancji falownika dla zaburzeń wspólnych, a co z tym idzie, zmniejszenie poziomu zaburzeń bezpośrednio przed filtrem aktywnym.

W eksperymencie sprawdzono jaki wpływ na tłumienie zaburzeń ma zastosowanie różnych typów rdzeni magnetycznych w połączeniu z filtrem aktywnym. Zastosowane rdzenie różnią się między sobą typem (ferrytowe, nanokrystaliczne) oraz przede wszystkim przenikalnością magnetyczną, a w konsekwencji indukcyjnościami zbudowanych przy ich użyciu cewek sprzężonych L_{CM} .



Rys. 10. Zestawienie zmierzonych widm zaburzeń wspólnych generowanych przez falownik bez filtru, z filtrem aktywnym oraz z filtrami hybrydowymi zbudowanymi z użyciem badanych rdzeni

Na rysunku 10 zostało przedstawione zestawienie otrzymanych widm zaburzeń wspólnych wraz z widmem zaburzeń bez filtrów i z widmem przy zastosowaniu samego filtru aktywnego typu III. Na charakterystyce tej należy zauważyć, że dodanie pewnej indukcyjności (L_{CM}) na drodze zaburzeń wspólnych powoduje poprawę tłumienia zaburzeń CM w porównaniu do samego filtru aktywnego, co szczególnie jest widoczne w zakresie częstotliwości od 200 kHz do 10 MHz. Przy filtrze hybrydowym z rdzeniem EZ209951 o indukcyjności $L_{CM} = 8 \mu\text{H}$ pogarsza się tłumienie dla częstotliwości poniżej 150 kHz, co spowodowane jest przez jego zbyt małą wartość indukcyjności i większe straty, które w połączeniu z filtrem aktywnym powodują spadek tłumienności. Jednak już przy cewkach sprzężonych o indukcyjności 14 μH zachodzi sytuacja, w której następuje poprawa w całym zakresie badanych częstotliwości. Dalsze zwiększanie wartości indukcyjności powoduje jedynie poprawę tłumienia filtru dla częstotliwości powyżej 10 MHz i dla weryfikacji pomiarów w ostatnim przypadku zostały zastosowane rdzenie

nanokrystaliczne o bardzo dużej przenikalności magnetycznej, dające wypadkową indukcyjność $L_{CM} = 424 \mu\text{H}$. Przy takiej konfiguracji zaobserwowano wyraźny spadek poziomu zaburzeń CM dla częstotliwości powyżej 15 MHz. Moc pobierana przez filtr aktywny wynosiła, podobnie jak w poprzednim eksperymencie ok. 2 W.

Podsumowanie

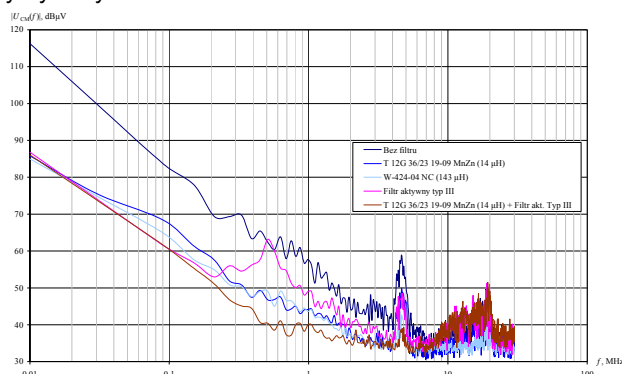
W niniejszym artykule przeprowadzono badania filtrów pasywnych, aktywnych oraz hybrydowych. Uwaga w tych badaniach została skupiona na tłumieniu zaburzeń przewodzonych wspólnych CM, które jak wcześniej wspomniano, stanowią problem techniczny przy budowie filtrów EMI. W filtrach przeciwburzeniowych dla przekształtników w samochodach elektrycznych, ze względu na sposób dystrybucji energii (szynoprzewody), znacząco utrudnione jest nawijanie uzwojeń na rdzeniach. Wymusza to stosowanie w konstrukcji cewek sprzężonych L_{CM} jednego zwoju (przewleczenie szynoprzewodów przez rdzeń) i poleganie wyłącznie na właściwościach magnetycznych oraz wymiarach geometrycznych zastosowanych do ich konstrukcji materiałów. Dlatego we wszystkich badaniach założono nawinięcie tylko jednego zwoju, a zwiększenie wartości indukcyjności dla wybranego materiału magnetycznego zrealizowano poprzez zwiększenie liczby rdzeni.

W pierwszej kolejności zostały przebadane filtry pasywne, do których budowy użyto różnego typu pojedynczych rdzeni magnetycznych. Rdzenie te różniły się między sobą przede wszystkim przenikalnością, a indukcyjność zrealizowanych przy ich użyciu cewek sprzężonych L_{CM} była równa liczbie AL . Badane były rdzenie dwóch typów: ferrytowe oraz nanokrystaliczne. Różnica między tymi dwoma technologiami polega przede wszystkim na możliwości do uzyskania przenikalności magnetycznej, przy tych samych wymiarach geometrycznych, ze znaczącą przewagą dla materiałów nanokrystalicznych. Przewaga ta wiąże się też bezpośrednio ze wzrostem ich ceny. W tabeli 2 zostało przedstawione zestawienie parametrów badanych rdzeni, a na rysunku 6 zestawiono widma zaburzeń wspólnych generowanych przez falownik, po stłumieniu ich przez filtry pasywne, zbudowane z wykorzystaniem badanych rdzeni. Z przeprowadzonych analiz wynika, że moduł tłumienności wtrąceniowej filtru jest zależy od indukcyjności cewek sprzężonych L_{CM} , czyli od przenikalności magnetycznej użytego rdzenia. Im zastosowany rdzeń ma większą przenikalność, tym większa wartość modułu tłumienności została uzyskana. W zależności od częstotliwości wartości te zmieniają się od 1 dB do nawet 25 dB, a różnice między badanymi rdzeniami wynosiły od 1 dB do 12 dB.

W dalszej kolejności zostały przeprowadzone badania filtrów aktywnych oraz hybrydowych. W pierwszym eksperymencie z aktywnym tłumieniem zaburzeń przewodzonych CM, został użyty wyłącznie filtr aktywny typu III (detekcja napięcia i kompensacja prądu zaburzeń). Widmo zaburzeń wspólnych generowanych przez falownik po stłumieniu ich filtrem aktywnym zostało przedstawione na rysunku 8. Moduł tłumienności wtrąceniowej w zakresie od 9 kHz do 200 kHz wynosi 25 dB. Należy zauważyć, że przy częstotliwości 500 kHz następuje utrata tłumienności wtrąceniowej do poziomu 0 dB, a od ok. 600 kHz do 6 MHz moduł tłumienności wtrąceniowej nie jest większy niż 10 dB. Powyżej 10 MHz następuje też nieznaczne wzmocnienie zaburzeń, co jest niepożądane. Wzmocnienie to wynika z ograniczonego pasma przenoszenia użytego w filtrze wzmacniacza i powstających tym samym przesunięć w fazie między sygnałem wejściowym i wyjściowym w filtrze aktywnym. Poprawę można uzyskać stosując na wyjściu

i wyjściu wzmacniacza filtry mające bardziej strome zbocza, jednak ze względu na zamkniętą pętlę w jakiej on pracuje, ograniczy to jego maksymalne wzmocnienie, a tym samym moduł tłumienności wtrąceniowej możliwy do uzyskania.

W celu uzyskania większej tłumienności, były analizowane filtry hybrydowe, czyli połączenie filtrów pasywnych z aktywnymi. Pozwoliło to zminimalizować niedoskonałości w charakterystyce modułu tłumienności wtrąceniowej filtru aktywnego. Filtr pasywny został umieszczony bezpośrednio na wyjściu źródła zaburzeń (falownika), a następnie zastosowano filtr aktywny typu III. Do konstrukcji filtrów hybrydowych użyto tych samych rdzeni, co przy pomiarach filtrów pasywnych. Zastosowanie cewek sprzężonych L_{CM} wprowadza dodatkową impedancję w torze tłumionych przez filtr aktywny zaburzeń CM, zwiększając tym samym moduł impedancji odbiornika przez niego widziany. Pozwala to na wstępne stłumienie zaburzeń wspólnych i odciążenie filtru aktywnego oraz poprawę tłumienności w zakresie częstotliwości od 100 kHz do 600 kHz. Na rysunku 10 zostały przedstawione widma zaburzeń wspólnych po stłumieniu ich filtrami hybrydowymi w zestawieniu z widmem zaburzeń po stłumieniu wyłącznie filtrem aktywnym. Z przeprowadzonej analizy wynika, że uzyskano znaczącą poprawę i podobieństwo do charakterystyk tłumienia zaburzeń przez filtry pasywne. Należy też zauważyć, że zwiększanie indukcyjności cewek sprzężonych L_{CM} powyżej pewnej wartości (w tym przypadku 14 μH) nie powoduje poprawy tłumienności wtrąceniowej do częstotliwości ok. 10 MHz, natomiast następuje zwiększenie tłumienności powyżej tej częstotliwości. Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej filtrów pasywnych, aktywnych oraz hybrydowych należy stwierdzić, że najlepsze właściwości tłumiące uzyskuje się z wykorzystaniem filtrów hybrydowych.



Rys. 11. Zestawienie zmierzonych widm zaburzeń wspólnych generowanych przez falownik bez filtru, z filtrami pasywnymi, z filtrem aktywnym oraz z filtrem hybrydowym

Na rysunku 11 przedstawiono widma zarejestrowanych zaburzeń wspólnych, generowanych przez falownik bez filtrów na wyjściu, po stłumieniu ich filtrami pasywnymi, w konstrukcji których użyto dwa różne rdzenie (ferrytowe T 12G 36/23 19-09 oraz nanokrystaliczny W-424-04), z filtrem aktywnym oraz filtrem hybrydowym. Zauważono, że dodanie dodatkowych cewek sprzężonych ($L_{CM} = 14 \mu\text{H}$) między filtrem aktywnym, a źródłem zaburzeń (falownikiem), powoduje obniżenie poziomu zaburzeń w paśmie od 50 kHz do 6 MHz nawet o 10 dB w stosunku do samych filtrów pasywnych. Powyżej 6 MHz spadek ten nie jest już widoczny ze względu na ograniczenie w paśmie przenoszenia wzmacniacza użytego do konstrukcji filtru aktywnego.

Analizując wyniki z przeprowadzonych eksperymentów stwierdzono, że filtr hybrydowy z rdzeniem ferrytowym

T 12G 36/23 19-09 o indukcyjności 14 μH , wykonany z materiału o mniejszej przenikalności magnetycznej, pozwala uzyskać o 10 dB większy moduł tłumienności, jak przy zastosowaniu filtru pasywnego, z rdzeniem nanokrystalicznym W-424-04 o 10 razy większej przenikalności. Z przeprowadzonej analizy wynika, że za pomocą filtru hybrydowego można uzyskać lepszą redukcję zaburzeń z wykorzystaniem rdzeni ferrytowych o mniejszej przenikalności w porównaniu do rdzeni nanokrystalicznych. Rdzenie o mniejszej przenikalności magnetycznej są tańsze, tak więc zabieg ten pozwala zmniejszyć ogólny koszt filtru. Szacunkowa cena układu aktywnego to ok. 10 zł i jest dużo mniejsza od ceny rdzenia (ok. 50 zł). Waga części aktywnej filtru to zaledwie 25 g, natomiast użyty rdzeń waży ok. 70 g (nie wliczając wagi drutu nawojowego), a stosując rdzeń o mniejszej przenikalności można zmniejszyć jego gabaryty i masę.

Zastosowanie filtrów aktywnych i hybrydowych niesie za sobą jednak pewne konsekwencje i ograniczenia. Układy aktywne z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego, w przeciwieństwie do układów pasywnych, narażone są na wzbudzenie się przy zmianie warunków pracy, co w konsekwencji uniemożliwia zaprojektowanie uniwersalnego filtru aktywnego o dużej skuteczności tłumienia zaburzeń i szerokim spektrum zastosowań. Filtry aktywne wymagają również zasilania, a straty energii, ze względu ograniczoną sprawność elementów aktywnych, zawsze będą większe niż w filtrach pasywnych. Przerwanie lub wzbudzenie się filtru aktywnego niesie też ryzyko podniesienia poziomu zaburzeń zamiast ich tłumienia. Same filtry aktywne szybciej się nasycają niż filtry hybrydowe. Temperatura pracy filtrów aktywnych również będzie niższa niż filtrów pasywnych, ponieważ temperatura półprzewodników nie może przekraczać 150°C. Temperatura otoczenia pracy tych elementów musi być zatem niższa. Filtry aktywne są też dużo bardziej narażone na uszkodzenie niż filtry pasywne. Delikatne elementy półprzewodnikowe są wrażliwe na przepięcia, które mogą wystąpić w sieci zasilającej podczas normalnego użytkowania urządzeń (przepięcia, wylądowania atmosferyczne, elektrostatyka). Filtry pasywne w tym przypadku są bardziej odporne i trudniej o ich uszkodzenie.

W tabeli 4 zestawiono zalety i wady filtrów pasywnych, aktywnych i hybrydowych.

Tabela 4. Zestawienie zalet i wad filtrów pasywnych, aktywnych i hybrydowych

Filtr	Zalety	Wady
Pasywny	<ul style="list-style-type: none"> - Niezawodność, - prosta konstrukcja (mała liczba komponentów), - nie wymaga zasilania. 	<ul style="list-style-type: none"> - Współczynnik tłumienności zależy od gabarytów, masy i ceny komponentów, - mniejszy uzyskiwany współczynnik tłumienności, - wysoka cena rdzeni nanokrystalicznych.
Aktywny i hybrydowy	<ul style="list-style-type: none"> - Większy możliwy do uzyskania współczynnik tłumienności wtrąceniowej, - mniejszy rozmiar i masa, - możliwość zastosowania rdzeni o mniejszej przenikalności. 	<ul style="list-style-type: none"> - Podatność na zmiany warunków pracy, - ryzyko wzbudzenia się części aktywnej i zwiększenia poziomu zaburzeń, - wrażliwość na uszkodzenia, - konieczność zasilania elementów aktywnych, - mniejsza sprawność, - wymagana niższa temperatura otoczenia.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Marian Pasko, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10B pok. 203, 44-100 Gliwice, E-mail: Mrian.Pasko@polsl.pl; mgr inż. Marek Szymczak, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10B pok. 203, 44-100 Gliwice E-mail: Marek.Szymczak@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Boroyevich D., Burgos R., Arnedo L., Wang F., Synthesis and integration of future electronic power distribution systems, *Proc. IEEE PCC*, Nagoya, Japan, 2007
- [2] Gerber M., Ferreira J. A.: A system integration philosophy for demanding requirements in power electronics, *Proc. IEEE IAS*, s. 1389-1396, Sep. 2007
- [3] Kolar J. W., Drofenik U., Biela J., Heldwein M. L., Ertl H., Friedli T., Round S. D.: PWM converter density barriers, *Proc. IEEE PCC*, Nagoya, Japan, 2007
- [4] Akagi H., Shimizu T.: Attenuation of Conducted EMI Emissions From an Inverter-Driven Motor, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no 1, Jan. 2008
- [5] Kempski A.: Elektromagnetyczne zaburzenia przewodzone w układach napędów przekształtnikowych, *Oficina Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego*, 2005
- [6] Belko V., Emelyanov O., Ivanov I.: The experimental investigation and numerical simulation of self-healing in metallized film capacitors, *IEEE International Conference on Dielectrics*, 2016
- [7] 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
- [8] 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
- [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] Ala G., Giglia G., Francomano E., Di Piazza M.C., Luna M., Conte G.: Design of EMI Filters using Multi Objective Optimization, 2018 *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe)*, Italy, 2018
- [11] Spadacini G., Grassi F., Pignari S. A.: Conducted emissions in the powertrain of electric vehicles, 2017 *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity*, USA 2017
- [12] Wu M. K. W., Tse C. K.: A review of EMI problems in switch mode power supply design, *J. Elect. Electron. Eng.*, Australia, vol. 16, s. 193-204, 1996
- [13] Wac Włodarczyk A.: Materiały magnetyczne Modelowanie i zastosowania, *Politechnika Lubelska*, Lublin, 2012
- [14] Mazurek P., Wac Włodarczyk A.: Wpływ przenikalności magnetycznej rdzeni dławików przeciwzakłóceńowych na tłumienność wtrąceniową, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 9/2007
- [15] 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
- [16] 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
- [17] Pasko M., Szymczak 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
- [18] Pasko M., Szymczak M., Badanie i symulacja filtrów do tłumienia zaburzeń przewodzonych, *Poznan University Of Technology Academic Journals Electrical Engineering*, no 87, Poznań 2016