

Sposoby eliminacji radioelektrycznych zaburzeń przewodzonych w przetwornicach wagonowych

Łukasz JOHN¹

Streszczenie

W artykule przedstawiono potencjalne główne źródła zaburzeń radioelektrycznych, które mogą wystąpić w wielosystemowych przetwornicach wagonowych lub pomocniczych przetwornicach statycznych montowanych na pojazdach szynowych miejskich takich, jak tramwaje, metro lub w taborze kolejowym. Opisano metodę badań przetwornic wagonowych w zakresie emisji zaburzeń przewodzonych na ich wejściowym porcie zasilania wysokiego napięcia (WN) i wyjściowych portach niskiego napięcia (NN), w odniesieniu do normatywnych dopuszczalnych poziomów emisji zaburzeń radioelektrycznych. Ponadto, przedstawiono praktyczne sposoby zabezpieczenia przetwornic wagonowych przed oddziaływaniem wysokich wartości zaburzeń radioelektrycznych, które są wynikiem złych konstrukcji urządzenia podczas projektowania i produkcji.

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, zaburzenia radioelektryczne, dopuszczalny poziom emisji, przetwornica wagonowa

1. Wstęp

Kolejowe pojazdy szynowe (lokomotywy elektryczne, elektryczne zespoły trakcyjne lub wagony pasażerskie), stanowią specyficzne i złożone środowisko elektromagnetyczne. Urządzenia pracujące w tym środowisku nie powinny wzajemnie wpływać na siebie, w szczególności urządzenia elektryczne, zasilane napięciem 3 kV DC z sieci trakcyjnej, nie powinny wprowadzać nadmiernych zaburzeń elektromagnetycznych, przenikających do urządzeń montowanych w pojazdach miejskich i kolejowych. Zaburzeniami radioelektrycznymi przewodzonymi są wszelkie niepożądane sygnały elektryczne, występujące w paśmie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz.

Coraz większe nasycenie taboru urządzeniami elektronicznymi w naturalny sposób wymusza konieczność współistnienia tych urządzeń w środowisku elektromagnetycznym. Do istotnych pokładowych urządzeń elektronicznych można zaliczyć między innymi przetwornice wagonowe wysokiego i niskiego napięcia, które są na przykład przeznaczone do zasilania napięciem 3–400 V AC, 230 V AC 50 Hz lub 110 V DC, w tym do ładowania baterii wagonowych, odbiorników wagonowych kolejowych pojazdów szynowych dalekobieżnych lub szynowych pojazdów miejskich jak tramwaje lub składy wagonów metra.

Przetwornice wagonowe nie powinny wytwarzać zaburzeń elektromagnetycznych o poziomach wyższych niż dopuszczalne, określone w odpowiednich normach doty-

czących taboru szynowego miejskiego oraz kolejowego. Jednym z podstawowych sposobów ograniczenia wpływu źródeł zaburzeń zasilanych z obwodu głównego jest separacja galwaniczna obwodów wysokiego i niskiego napięcia, która jest obecnie stosowana w nowoczesnych przetwornicach wagonowych. Ograniczenie możliwości wystąpienia sprzężenia indukcyjnego pomiędzy tymi obwodami zapewnia na ogół znaczne obniżenie poziomu zaburzeń pod warunkiem, że elementy dołączone do obwodu niskiego napięcia nie wytwarzają zaburzeń radioelektrycznych przekraczających dopuszczalne poziomy. Jeżeli takie zjawisko występuje, wtedy konieczne jest stosowanie filtrów, ekranowania lub dodatkowej separacji źródeł.

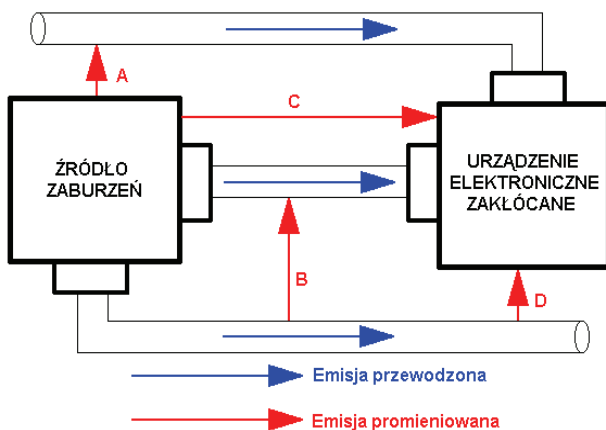
2. Drogi przenikania zaburzeń radioelektrycznych i ich charakterystyka

Efekt ubocznym pracy niemal wszystkich urządzeń elektrycznych i elektronicznych są zaburzenia radioelektryczne, które są zaliczane do grupy zaburzeń o małej energii.

Przenikanie zaburzeń do innych urządzeń odbywa się w wyniku promieniowania poszczególnych obwodów wejściowych lub wyjściowych urządzenia, istnienia sprzężeń indukcyjnych lub pojemnościowych między rozpatrywanymi obwodami i urządzeniami sąsiednimi lub przewodowego wprowadzania tych zaburzeń do energetycznej sieci zasilającej [2].

¹ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Automatyki i Telekomunikacji; e-mail: ljohn@ikolej.pl.

Zjawiska te dotyczą urządzeń znajdujących się w danym środowisku elektromagnetycznym, jak również złożonych systemów zawierających potencjalne źródła zaburzeń. W przypadku oddziaływania przez pole elektromagnetyczne i sprzężenia pojemnościowe oraz indukcyjne, przenikanie energii następuje w wyniku niedoskonałego ekranowania. Zjawisko to ilustruje rysunek 1.



Rys. 1. Drogi rozchodzenia się zaburzeń radioelektrycznych promieniowanych i przewodzonych: Linia A – sprzężone bezpośrednio od źródła do odbiornika, Linia B – przewody połączeniowe stanowią źródło emisji zaburzeń, Linia C – emisja zaburzeń dla portu obudowy, Linia D – przenikanie zaburzeń drogą sprzężeń [rysunek własny Ł. John]

3. Rodzaje i charakterystyka przetwornic wagonowych

W pojazdach kolejowych oraz miejskich taboru szynowego można wyróżnić 2 rodzaje przetwornic wagonowych:

- Przetwornice statyczne jednosystemowe o jednym napięciu wyjściowym.
- Przetwornice statyczne wielosystemowe, które są przeznaczone do zasilania instalacji wagonowych przy wykorzystaniu energii elektrycznej z sieci trakcyjnej. Takie przetwornice są dostosowane do pracy przy zasilaniu napięciami występującymi w europejskich systemach trakcyjnych, zgodnych z zapisami w obligatoryjnych i rekomendowanych kartach UIC: 550 OR [4], 550-1 OR [5] i 550-2 OR [6].

Do najważniejszych parametrów technicznych przetwornic wagonowych zalicza się:

- nominalne napięcie wejściowe zasilania wraz z jego zakresem zmian,
- zakres funkcjonalności napięcia wejściowego,
- całkowita moc przetwornicy,
- napięcie wyjściowe przemiennego AC 1-fazowe lub 3-fazowe i stałe DC,
- stabilność napięcia wyjściowego DC,
- stabilizacja napięcia wyjściowego AC,
- tętnienia napięć wyjściowych,
- stabilność częstotliwości napięcia wyjściowego AC,

- sprawność ogólna przetwornicy,
- zakres temperatury pracy przetwornicy.

Parametry wyjść AC i DC przetwornic są dostosowywane do potrzeb odbiorników wagonowych i charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami eksploatacyjnymi. Napięcia wyjściowe AC mają bardzo niski poziom współczynnika zawartości harmonicznych THD (*Total Harmonic Distortion*), co minimalizuje straty w przypadku zasilania silników trakcyjnych. W przypadku wyjść stałych DC, przetwornice współpracują ze wszystkimi typami baterii i akumulatorów, zapewniając jednocześnie poprawne charakterystyki ładowania oraz kompensację termiczną ich napięć. W wagonach z ogrzewaniem lub klimatyzacją, przetwornice mogą być wyposażone w falowniki trakcyjne o zmiennej częstotliwości wyjściowej.

Z przetwornicami najczęściej może współpracować trakcyjny falownik pomocniczy, zasilany z przetwornicy lub baterii akumulatorów 24 V DC lub 110 V DC, zapewniając w ten sposób zasilanie odbiorników wagonowych napięciem przemiennym 230 V AC, np. gniazdek do laptopów lub ładowarek do telefonów komórkowych bez uwzględnienia portu ładowania USB, którego przebadanie pod względem zakłóceń jest niemożliwe. Obecnie, prawie wszystkie rodzaje przetwornic są wyposażone w systemy diagnostyczno-sterujące oparte na interfejsie CAN 2.0 lub RS 232.

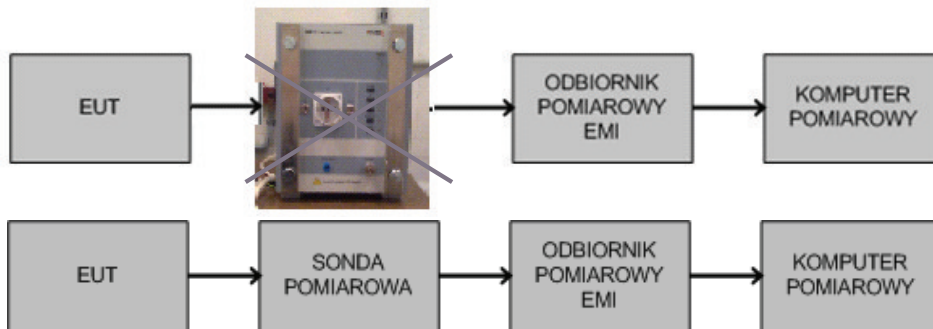
4. Metodyka pomiaru emisji zaburzeń radioelektrycznych przetwornic wagonowych

Emisja zaburzeń przewodzonych jest definiowana jako zaburzenie radioelektryczne, rozchodzące się wzdłuż ich przewodów elektrycznych zasilania lub linii transmisji sygnałów [11]. Pomiary normatywne emisji zaburzeń przewodzonych przetwornic wagonowych są wykonywane dla znamionowego obciążenia, zgodnie z metodyką i zaleceniami zapisanymi w normie [10]. Pomiary napięcia zaburzeń radioelektrycznych, zgodnie z wymaganiami normy [8], przeprowadza się w zakresie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz, z podziałem na dwa podzakresy częstotliwości:

- 150 kHz÷500 kHz,
- 500 kHz÷30 MHz.

Pomiar emisji zaburzeń przewodzonych jest wykonywany dla przetwornic wagonowych w zależności od ich konstrukcji oraz zastosowania na jej wszystkich portach, do których można zaliczyć:

- porty wejściowe wysokiego napięcia HV (*High Voltage*),
- porty wyjściowe niskiego napięcia LV (*Low Voltage*), np. 1-fazowe i 3-fazowe AC oraz wyjściowe DC,
- porty przeznaczone do zasilania baterii akumulatorów,
- porty pomiarowe służące do zasilania urządzeń elektronicznych,
- porty sterowania służące do zasilania urządzeń elektronicznych.



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego do pomiaru zakłóceń radioelektrycznych na portach WE/WY przetwornic wagonowych [rysunek własny Ł. John]

Do pomiaru emisji zaburzeń przewodzonych wykorzystuje się wysokonapięciową sondę pomiarową (a nie jak w przypadku badania urządzeń sieć sztuczną), do której przez koncentryczny kabel pomiarowy podłączony jest odbiornik pomiarowy, co ilustruje rysunek 2.

Całe wyposażenie pomiarowe wchodzące w skład toru pomiarowego musi być wzorcowane i musi spełniać wymagania normy [9]. Dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń przewodzonych zawarte są w normie [8] i wynoszą:

- dla zakresu częstotliwości 150 kHz÷500 kHz – 99 dB μ V,
- dla zakresu częstotliwości 500 kHz÷30 MHz – 93 dB μ V.

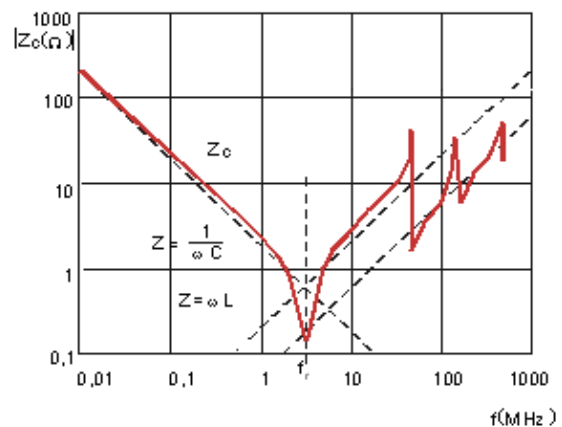
Zgodnie z wymaganiami normy [8] przekształtniki trakcyjne i pomocnicze o mocy powyżej 50 kVA nie wymagają indywidualnego badania, lecz należy je wykonać podczas badań pojazdu jako całości.

5. Sposoby zabezpieczeń przetwornic wagonowych przed oddziaływaniem zaburzeń radioelektrycznych

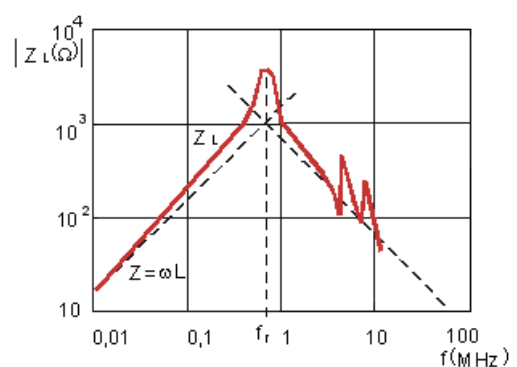
Celem zabezpieczania urządzeń przed zaburzeniami radioelektrycznymi jest niedopuszczenie do nadmiernej emisji, jak również do przenikania tej energii do danego urządzenia [7]. Podstawowymi środkami służącymi do realizacji tego zadania są układy tłumiące zaburzenia w postaci elementów LC oraz ekranowanie obwodów i poszczególnych bloków.

Prawidłowy dobór elementów L i C musi być skorelowany z zakresem tłumionych częstotliwości oraz parametrami obwodu. Wynika to z występowania częstotliwości rezonansowych dla danego elementu. Przykładową charakterystykę impedancji Z_c (reaktancji) typowego elementu pojemnościowego – kondensatora w funkcji częstotliwości ilustruje rysunek 3, natomiast charakterystykę impedancji Z_L (reaktancji) dla typowego elementu w postaci dławika – rysunek 4. Na wartość częstotliwości rezonansowej f_r mają wpływ: konstrukcja elementu, długość i rodzaj wyprowadzeń elektrod oraz pojemność pasożytnicza pomiędzy zwojami. Rodzaj zastosowanej konstrukcji jest uzależniony od konkretnych elementów w wytypowanych obwodach.

Wśród dostępnych na rynku kondensatorów stosowanych do zabezpieczania przeciwzakłóceniewego, bardzo korzystnymi parametrami charakteryzują się kondensatory przepustowe, których częstotliwość rezonansowa może wynosić powyżej 100 MHz.



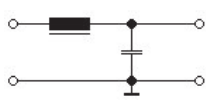
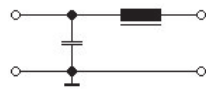
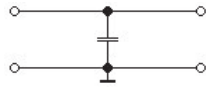
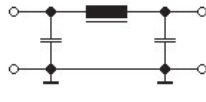

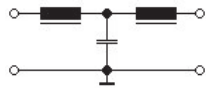
Rys. 3. Charakterystyka impedancji kondensatora w funkcji częstotliwości [rysunek własny Ł. John]



Rys. 4. Charakterystyka impedancji dławika w funkcji częstotliwości [rysunek własny Ł. John]

Prawidłowy dobór elementów L i C pod względem częstotliwości oraz ich skuteczność eliminacji zaburzeń zależy w dużym stopniu od znajomości parametrów obwodu. W tabelicy 1 pokazano, jakie kryteria należy stosować przy instalowaniu elementów LC w wybranym obwodzie.

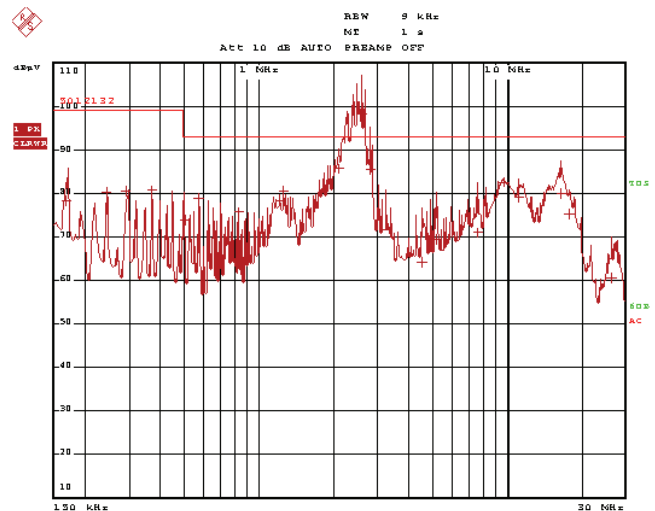
Tablica 1
Stosowane w praktyce konfiguracje elementów przeciwzakłóceńowych w zależności od impedancji linii zasilania i odbiornika energii

Impedancja źródła zaburzeń	Topologia filtru	Impedancja zakłócanego urządzenia
Niska		Wysoka
Wysoka		Niska
Wysoka		Wysoka
Wysoka – Nieznana		Wysoka – Nieznana
Niska		Niska
Niska – Nieznana		Niska – Nieznana

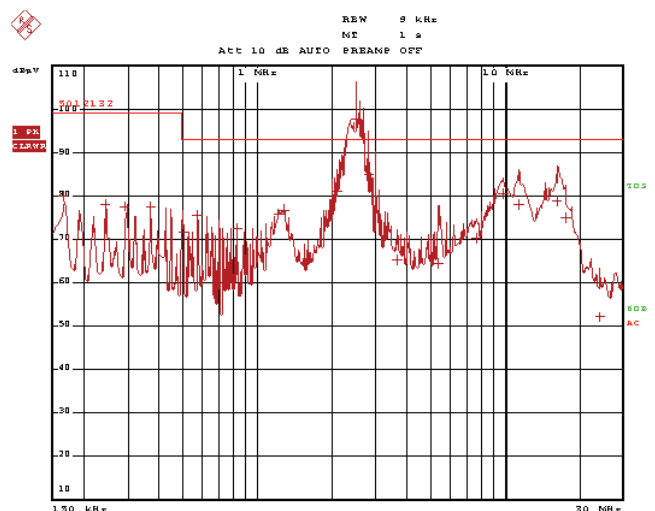
[Opracowanie własne]

6. Przykładowe wyniki z pomiarów przetwornicy wagonowej wraz z zastosowaniem środka zaradczego

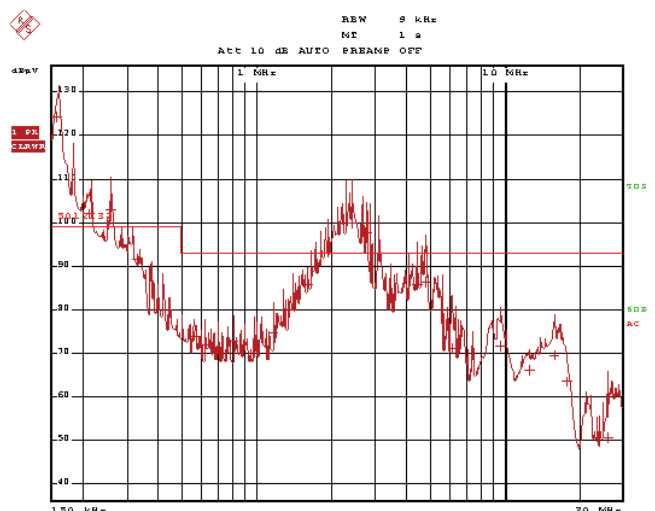
W toku prowadzonych przez Instytut Kolejnictwa pomiarów emisji zaburzeń przewodzonych przetwornic wagonowych zaobserwowano, że większość z nich nie spełnia wymagań normatywnych, dotyczących emisji zaburzeń przewodzonych na porcie wejściowym wysokiego napięcia i portach wyjściowych niskiego napięcia. Takim przykładem była przebadana przez Laboratorium Automatyki i Telekomunikacji Instytutu Kolejnictwa wielosystemowa przetwornica statyczna, która jest przeznaczona do przetwarzania napięć stałych i przemiennych z głównego przewodu zasilania wagonowego 3 kV DC – w europejskiej trakcji kolejowej – na napięcie stałe 24 V DC oraz przemiennie 230 V AC wykorzystywane w instalacjach niskiego napięcia pojazdu trakcyjnego. Na rysunkach 5–8 przedstawiono przebiegi charakterystyk napięcia zaburzeń radioelektrycznych w funkcji częstotliwości badanych portów wyjściowych. Czerwona, pozioma linia wskazuje graniczne, dopuszczalne wartości napięcia zaburzeń radioelektrycznych, których przetwornica nie powinna przekraczać.



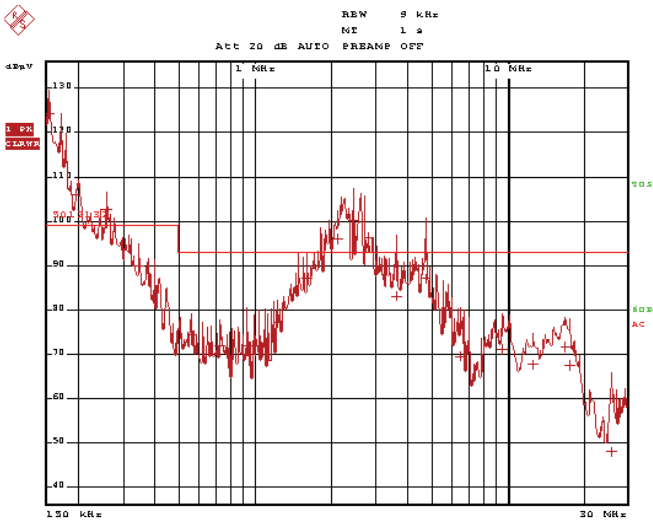
Rys. 5. Emisja zaburzeń przewodzonych przetwornicy na porcie wyjściowym +24 V DC, obciążenie znamionowe 13 kW [rysunek własny Ł. John]



Rys. 6. Emisja zaburzeń przewodzonych przetwornicy na porcie wyjściowym -24 V DC, obciążenie znamionowe 13 kW [rysunek własny Ł. John]

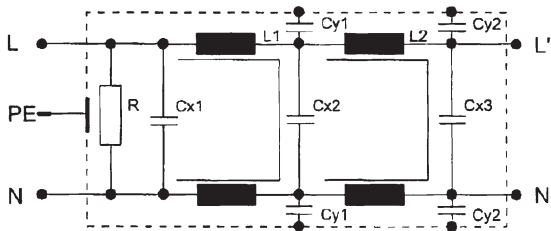


Rys. 7. Emisja zaburzeń przewodzonych przetwornicy na porcie wyjściowym L 230 V AC, obciążenie znamionowe 13 kW [rysunek własny Ł. John]



Rys. 8. Emisja zaburzeń przewodzonych przetwornicy na porcie wyjściowym N 230 V AC, obciążenie znamionowe 13 kW [rysunek własny Ł. John]

We wszystkich badanych przypadkach, wartości napięcia zaburzeń przewodzonych przy określonych częstotliwościach przekraczały wartości dopuszczalne wskazane w normie [8]. W celu obniżenia poziomu napięcia zaburzeń radioelektrycznych, generowanych przez przetwornicę, producent zastosował filtr przeciwzakłócenia typu CNW 102/20 z karty katalogowej [3], którego schemat pokazano na rysunku 9.



Rys. 9. Schemat ideowy filtra przeciwzakłócenia typu CNW 102/20 [rysunek własny Ł. John]

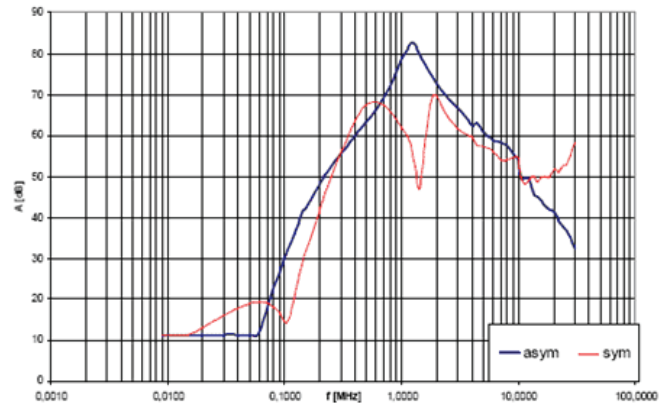
W tabelicy 2 zestawiono podstawowe parametry elementów filtra przeciwzakłócenia, natomiast charakterystykę tłumienności filtra w funkcji częstotliwości przedstawiono na rysunku 10.

Tabela 2

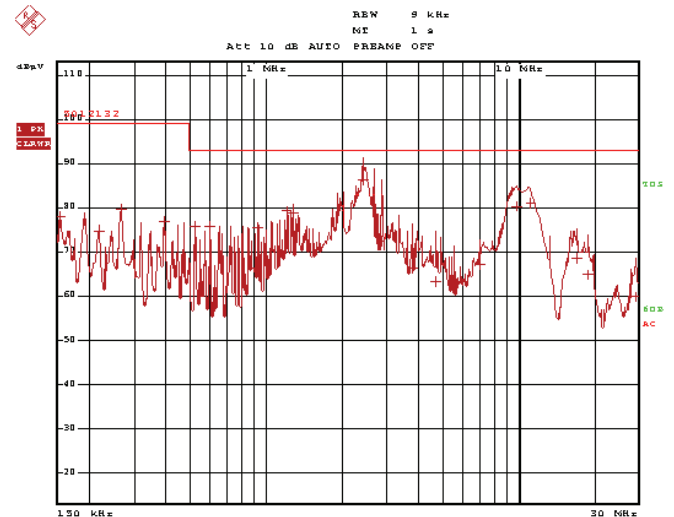
Parametry zastosowanego filtra przeciwzakłócenia

Typ	Prąd [A]	C_x [μ F]	L [mH]	R [k Ω]
CNW102/20	20	0,94	2	560

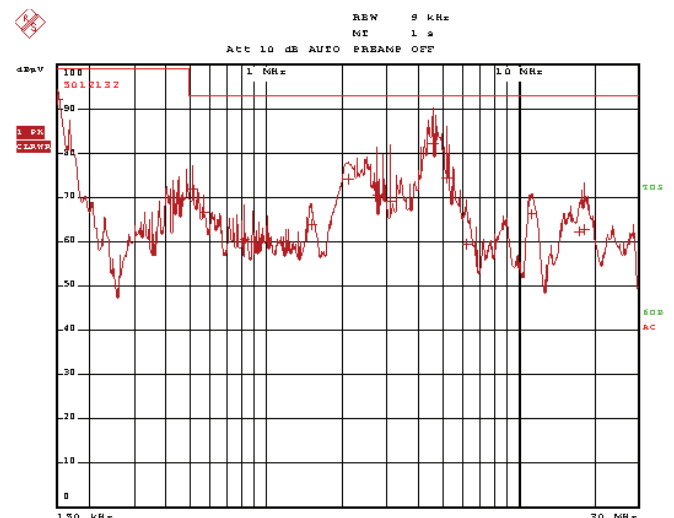
Zastosowanie filtra przeciwzakłócenia na wyjściu przetwornicy umożliwiło wyeliminowanie zaburzeń radioelektrycznych generowanych na jej portach wyjściowych ± 24 V DC i 230 V AC do poziomów mniejszych od dopuszczalnej wartości emisji granicznej, co przedstawiono na rysunkach 11 i 12.



Rys. 10. Przebieg charakterystyki tłumienności filtra typu CNW 102/20 w funkcji częstotliwości [rysunek własny Ł. John]



Rys. 11. Emisja zaburzeń przewodzonych przetwornicy z filtrem na porcie wyjściowym +24 V DC i -24V DC, obciążenie znamionowe 13 kW [rysunek własny Ł. John]



Rys. 12. Emisja zaburzeń przewodzonych przetwornicy z filtrem na porcie wyjściowym L i N 230 V AC, obciążenie znamionowe 13 kW [rysunek własny Ł. John]

7. Podsumowanie

Do najważniejszych sposobów eliminacji zaburzeń, w celu zapewnienia kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń w zakresie emisji przewodzonej należą: ekranowanie, filtrowanie, uziemianie, separacja obwodów, właściwy dobór wartości impedancji obwodu oraz dobór kabli [1].

Tłumienie zaburzeń może być realizowane przy samym źródle, za pomocą jednego z opisanych sposobów, jak również przez eliminację dróg przenikania zaburzeń do urządzenia. Zagadnienia dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej należy uwzględnić już w pierwszym etapie projektowania danego urządzenia. Dostępne metody tłumienia są zależne od zakresu tłumionych częstotliwości, co jest związane z kosztami wytworzenia elementu w produkcji. Stosowanie zewnętrznych elementów tłumiących zaburzenia w postaci elementów czynnych L i C (filtrów LC), w większości przypadków powinno być ostatecznym rozwiązaniem dla zaburzeń o niskiej energii.

Jak wynika z aktualnie obowiązujących wymagań normatywnych, dotyczących urządzeń elektronicznych montowanych na taborze, każda przetwornica wagonowa przed zamontowaniem na pojeździe, musi być przebadana pod względem kompatybilności elektromagnetycznej w zakresie pomiaru emisji zaburzeń promieniowanych dla jej portu obudowy oraz w zakresie emisji zaburzeń przewodzonych na jej wysokonapięciowym porcie wejściowym i niskonapięciowych portach wyjściowych. Celem tych badań jest określenie, czy dany typ przetwornicy nie emituje do pojazdu żadnych dodatkowych zakłóceń, które mogłyby pogorszyć poprawną pracę pojazdu bądź zakłócać inne elektryczne i elektroniczne urządzenia zamontowane na tym pojeździe.

Bibliografia

1. Baker D.G.: *Electromagnetic Compatibility – Analysis and Case Studies in Transportation*, WILEY & Sons 2016 r.
2. Charoy A.: *Zakłócenia w urządzeniach elektronicznych*, Tom 1,2,3,4, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2000.
3. Karta katalogowa filtru typu CNW 102/20 (single-phase mains filters 2-lines) firmy REO Inductive Components, 02.09.2013 r.
4. Karta UIC 550 OR – Power supply installations for passenger stock, International Union of Railways.
5. Karta UIC 550-1 OR – Electrical switch cabinets on passenger stock, International Union of Railways.
6. Karta UIC 550-2 OR – Power Supply Systems for Passenger Coaches. Type testing, International Union of Railways.
7. Montrose M.I., Nakauchi E.M.: *Testing for EMC Compliance: Approaches and Techniques*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 2014 r.
8. PN-EN 50121-3-2:2017-04: Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 3-2: Tabor – Aparatura, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2017.
9. PN-EN 55016-1-1:2010/A1:2011/A2:2014: Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i metod pomiaru zaburzeń radioelektrycznych oraz odporności na zaburzenia – Część 1-1: Aparatura do pomiaru zaburzeń radioelektrycznych i do badań odporności – Aparatura pomiarowa, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2014.
10. PN-EN 55016-2-1:2014-09 + A1:2017-12: Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i metod pomiaru zaburzeń radioelektrycznych oraz odporności na zaburzenia – Część 2-1: Metody pomiaru zaburzeń i badania odporności – Pomiar zaburzeń przewodzonych, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2017.
11. Williams T.: *EMC for product designer*, Nediton Newnes 1992 r.