

Badania kompatybilności elektromagnetycznej taboru kolejowego

Łukasz JOHN¹, Artur DŁUŻNIEWSKI²

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę badań taboru kolejowego, wykonywanych na terenie Toru Doświadczalnego Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie, w zakresie oceny emisji zaburzeń promieniowanych generowanych przez tabor, poziomu zaburzeń przewodzonych w pokładowej sieci zasilania niskiego napięcia oraz pól magnetycznych AC i DC generowanych przez urządzenia elektryczne i elektroniczne, instalowane na taborze kolejowym, z uwzględnieniem dopuszczalnych poziomów zapisanych w normach i innych dokumentach. Opisano metodykę pomiarów emisji zaburzeń promieniowanych, przewodzonych oraz pól magnetycznych. W artykule przedstawiono główne źródła zaburzeń radioelektrycznych występujących na terenach kolejowych, jak również źródła zaburzeń radioelektrycznych w pokładowej sieci zasilającej. Zamieszczono również przykładowe wyniki normatywnych pomiarów na przykładzie spalinowego zespołu trakcyjnego. Opisano metodę szacowania niepewności pomiarów w badaniach emisji zaburzeń od taboru kolejowego.

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, zaburzenia radioelektryczne, tabor kolejowy, metodyka pomiarów, indukcja magnetyczna

1. Wstęp

Kolejowe środowisko elektromagnetyczne jest bardzo specyficzne ze względu na występowanie w nim wielu różnych systemów elektrycznych i elektronicznych współpracujących ze sobą, które niejednokrotnie są rozmieszczone na dużym obszarze. Z tego względu, badania EMC i pól magnetycznych taboru szynowego powinny być przeprowadzane na specjalnie do tego przeznaczonym, a nie tylko adaptowanym na potrzeby badań poligonie pomiarowym.

Ocena stanu środowiska elektromagnetycznego dotyczy wartości natężenia pola elektromagnetycznego zaburzeń radioelektrycznych pochodzących od pojazdów trakcyjnych poruszających się na szlaku, promieniowania sieci trakcyjnej, poziomu zaburzeń radioelektrycznych i przepięć w energetycznej sieci zasilania obiektów stacjonarnych i w pokładowej sieci zasilania pojazdów trakcyjnych oraz wagonów pasażerskich.

2. Uwarunkowania badań taboru kolejowego

W zakres certyfikacji kolejowego taboru szynowego wchodzi badania kompatybilności elektromagnetycznej.

Wynikają one z zapisów zawartych w Dyrektywie kompatybilności elektromagnetycznej EMC 2014/30/UE [2]. Obejmuje ona swym zakresem urządzenia, systemy instalacji stacjonarnych i ruchomych, urządzenia końcowe, które mogą być źródłem zaburzeń elektromagnetycznych, jeżeli ich działanie może mieć wpływ na generowane zaburzenia elektromagnetyczne. Zawarte w niej zapisy określają zasady wprowadzenia na rynek lub do użytkowania nowych urządzeń i zasadnicze procedury związane z kontrolą oraz oznakowaniem znakiem CE. W przypadku emisji zaburzeń promieniowanych i przewodzonych, normy zharmonizowane podają wymagania dotyczące zakresu częstotliwości, dla których należy wykonać badania, dopuszczalne poziomy emisji oraz precyzują metodykę wykonywania badań.

Zgodnie z obecnie obowiązującym dokumentem „Lista Prezesa UTK” [3], dla pojazdów kolejowych należy przeprowadzić badania pomiaru zaburzeń radioelektrycznych promieniowanych, przewodzonych i oddziaływania pól magnetycznych.

Przeprowadzanie badań taboru kolejowego pod względem kompatybilności elektromagnetycznej jest ważne nie tylko z powodu możliwości występowania negatywnego oddziaływania na urządzenia sterowania ruchem kolejowym.

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

² Mgr inż.; Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia w Zielonce, Laboratorium Badań Kompatybilności Elektromagnetycznej i Pomiarów Pól Elektromagnetycznych; e-mail: dluzniewskia@witu.mil.pl.

wym (srk), co może mieć bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo ruchu kolejowego, ale również na urządzenia i systemy użytku publicznego. Jest to związane z tym, że w strefie oddziaływania taboru kolejowego coraz częściej znajdują się obiekty publiczne, począwszy od domów jednorodzinnych, a kończąc na ogromnych centrach handlowych, wyposażonych w różnorodne systemy i urządzenia elektroniczne. W związku z tym, zdefiniowano główne źródła zaburzeń radioelektrycznych występujących na terenie kolejowym. Do najważniejszych obiektów generujących zaburzenia radioelektryczne na terenach kolejowych należą:

- elektryczne i spalinowo-elektryczne pojazdy trakcyjne,
- sieć trakcyjna,
- podstacje trakcyjne,
- urządzenia sterowania ruchem kolejowym.

Sieć trakcyjna sama w sobie nie jest źródłem zaburzeń radioelektrycznych, jest jednak linią transmisyjną dla zaburzeń radioelektrycznych. Ponadto, kolejowe obiekty ruchome, takie jak lokomotywy elektryczne, elektryczne zespoły trakcyjne i wagony pasażerskie, stanowią specyficzne i złożone środowisko elektromagnetyczne. Urządzenia pracujące w tym środowisku nie powinny wzajemnie na siebie wpływać, a w szczególności urządzenia takie, jak falowniki trakcyjne lub przetwornice zasilane napięciem trakcyjnym 3 kV DC, nie powinny wprowadzać nadmiernych zaburzeń elektromagnetycznych do obwodów sieci zasilania niskiego napięcia oraz obwodów przysyłania sygnałów zainstalowanych w pokładowych urządzeniach elektrycznych.

Eksploatacja wielu urządzeń elektrycznych i elektronicznych zainstalowanych w miejscu pracy, jak również instalacje będące wyposażeniem budynków, w których znajdują się pomieszczenia pracy, jest związana z oddziaływaniem pól elektromagnetycznych. Do najliczniejszych źródeł pól elektromagnetycznych występujących w środowisku pracy należą instalacje elektroenergetyczne oraz urządzenia do elektronicznej ochrony artykułów przemysłowych, np. tzw. bramki detekcyjne, systemy bezprzewodowego przesyła-

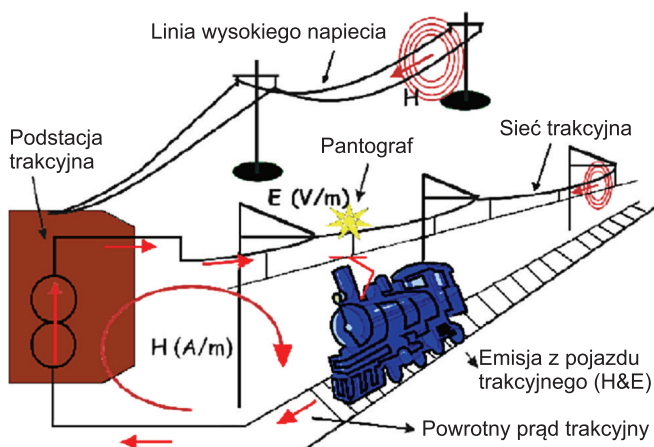
nia informacji, a także urządzenia przemysłowe i medyczne. Konieczne jest zatem rozpoznanie źródeł pól elektromagnetycznych i przeanalizowanie zgodności ich poziomów z aktualnie obowiązującymi przepisami prawnymi.

Podobne zjawisko może występować w środowisku kolejowym, a ściślej mówiąc w taborze kolejowym, na którym są instalowane urządzenia elektryczne i elektroniczne. Potencjalne źródła zakłóceń pokazano schematycznie na rysunkach 1 i 2.

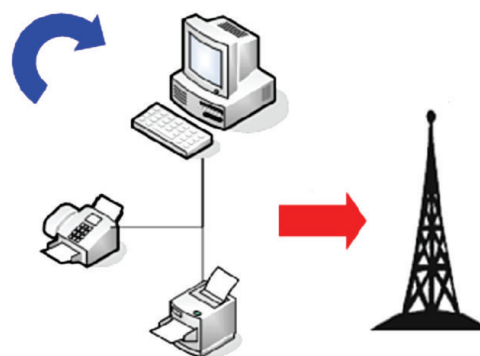
3. Metodyka pomiarów badań EMC pojazdów trakcyjnych

Badania kompatybilności elektromagnetycznej kolejowego taboru szynowego są przeprowadzane na podstawie metodyki oraz obowiązujących wymagań normatywnych zawartych w następujących normach:

- PN-EN 55016-2-1: 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 [11];
- PN-EN 50121-1: Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 1: Postanowienia ogólne [4];
- PN-EN 50121-2: Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 2: Oddziaływanie systemu kolejowego na otoczenie [5];
- PN-EN 50121-3-1: Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 3-1: Tabor – Pociąg i kompletny pojazd [6];
- PN-EN 50121-3-2: Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 3-2: Tabor – Aparatura [7];
- PN-EN 50500 + A1: Procedury pomiaru poziomów pól magnetycznych generowanych przez urządzenia elektroniczne i elektryczne w środowisku kolejowym w odniesieniu do narażenia ludzi [9].



Rys. 1. Podstawowe źródła zaburzeń elektromagnetycznych występujących na terenie kolejowym [rys. A. Dłużniewski]



Rys. 2. Inne źródła zaburzeń elektromagnetycznych [rys. A. Dłużniewski]

Wymienione normy definiują kompatybilność elektromagnetyczną, jako zdolność danego urządzenia elektrycznego lub elektronicznego do poprawnej pracy w określonym środowisku elektromagnetycznym bez emitowania pola elektromagnetycznego zakłócającego poprawną pracę innych urządzeń pracujących w tym środowisku. Badania kompatybilności elektromagnetycznej można rozważać w dwóch aspektach:

- 1) jako oddziaływanie systemu lub urządzenia przez emisję fal elektromagnetycznych na inne systemy lub urządzenia znajdujące się w pobliskim środowisku elektromagnetycznym,
- 2) odporności urządzeń definiowanej jako zdolność pracy systemu, urządzenia bez pogorszenia jakości działania w miejscu, gdzie występują zaburzenia elektromagnetyczne.

Badania kolejowego taboru szynowego pod względem generowanej emisji zaburzeń radioelektrycznych są wykonywane dla emisji zaburzeń promieniowanych i przewodzonych.

3.1. Pomiar emisji zaburzeń promieniowanych

Zaburzenie radioelektryczne promieniowane definiuje się jako zaburzenie wysyłane w formie fal elektromagnetycznych. Ze względu na specyfikę urządzeń trakcji elektrycznej (wysokie napięcie i duże pobory prądu), pomiary poziomu zaburzeń promieniowanych wykonuje się wyłącznie jako pomiary natężenia pola w odległości 10 m od osi toru. Ze względu na szeroki zakres częstotliwości, pomiary zaburzeń promieniowanych przez tabor kolejowy należy wykonywać za pomocą trzech typów anten, co ilustruje rysunek 3. Aktualne zalecenia zawarte w normie [5] dopuszczają przeprowadzanie pomiarów za pomocą anten dwóch typów: aktywnej ramowej i logarytmiczno-periodycznej. W skład układu pomiarowego wchodzi odbiornik pomiarowy EMI (*Electromagnetic Interference*) spełniający wymagania normy [10] oraz komputer pomiarowy.

Pomiary emisji zaburzeń promieniowanych wykonuje się w paśmie 150 kHz÷1 GHz z podziałem na siedem podzakresów zgodnie z zapisami normy [6] zamieszczonych w tabelicy 1.

Tabela 1

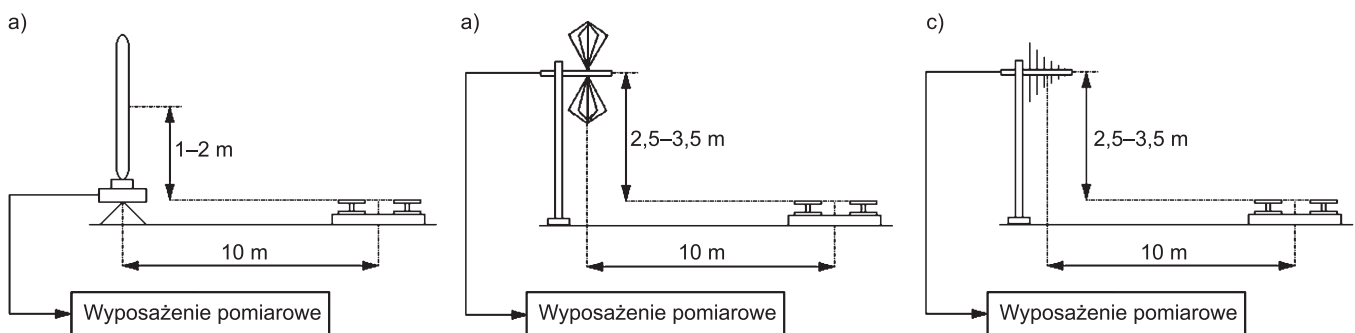
Podział podzakresów częstotliwości do przeprowadzenia pomiarów

Podzakresy częstotliwości	Rodzaj pomiarów
150 kHz÷1,15 MHz 1 MHz÷11 MHz 10÷20 MHz 20÷30 MHz	pomiar składowej magnetycznej natężenia pola zaburzeń przy zastosowaniu anteny ramowej
30÷230 MHz	pomiar pionowej składowej elektrycznej natężenia pola przy zastosowaniu anteny dwustożkowej
200÷500 MHz 500 MHz÷1 GHz	pomiar pionowej składowej elektrycznej natężenia pola przy zastosowaniu anteny logarytmiczno-periodycznej

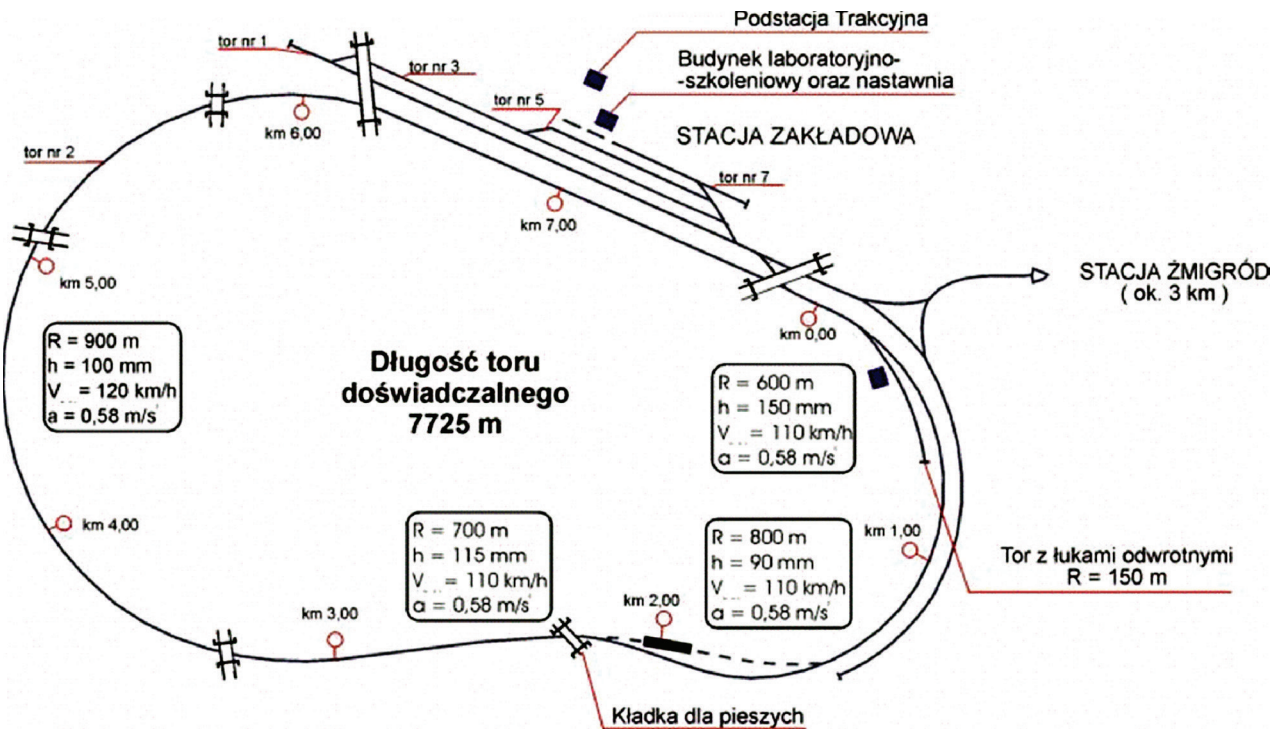
Anteny należy umieszczać w odległości 10 m od osi toru. Podczas pomiarów składowej magnetycznej w paśmie od 150 kHz do 30 MHz, antena ramowa powinna być umieszczona na wysokości od 1 m do 2 m mierzonej ponad poziom główki szyny, natomiast dla pasma częstotliwości od 30 MHz do 1 GHz antena dwustożkowa i logarytmiczno-periodyczna powinna być umieszczona na wysokości od 2,5 m do 3,5 m.

Ponieważ na wynik pomiaru mają wpływ konstrukcje wsporcze górnej sieci trakcyjnej, punkt pomiaru powinien znajdować się w środku pomiędzy konstrukcjami, po przeciwnej stronie toru. W przypadku, gdy badania są prowadzone na linii dwutorowej, anteny powinny być zlokalizowane po stronie toru, po którym porusza się badany pojazd trakcyjny. Jeżeli obiekt badań zasilany jest z tak zwanej trzeciej szyny, to anteny pomiarowe powinny znajdować się po stronie tej szyny. Jest to istotne, ponieważ badany jest zawsze najgorszy przypadek. Lokalizacja punktu pomiarowego powinna uwzględniać „nieskończoność” górnej sieci trakcyjnej (lub trzeciej szyny) po obu stronach punktu pomiarowego na odległość 200 m.

Pomiary emisji zaburzeń promieniowanych powinny być wykonywane w oddaleniu od drzew, ścian i tuneli. Norma [5] zaleca również oddalenie punktu pomiarowego od linii zasilających dużych mocy, w tym kabli podziemnych i podstacji transformatorowych. Obiektem w pełni spełnia-



Rys. 3. Wymagane anteny do pomiaru zaburzeń emisji promieniowanej: a) antena ramowa, b) antena dwustożkowa, c) antena logarytmiczno-periodyczna [rys. Ł. John]



Rys. 4. Schemat Toru Doświadczalnego Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie; opracowanie własne Ł. John na podstawie [14]

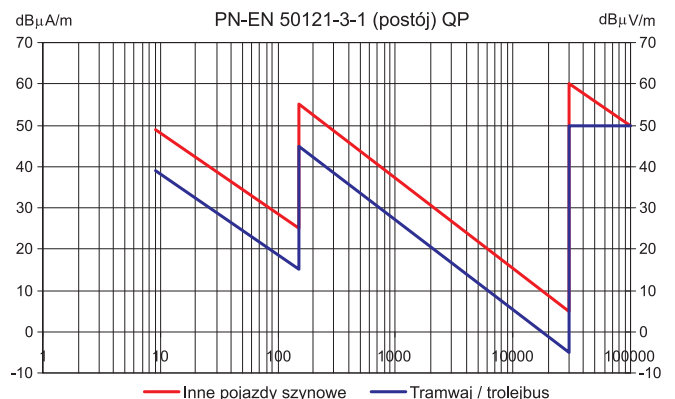
jącym wymagania zawarte w normie [5] jest Tor Doświadczalny Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie, którego schemat przedstawiono na rysunku 4. Na rysunku 5 przedstawiono stanowisko pomiarowe Laboratorium Automatyki i Telekomunikacji Instytutu Kolejnictwa (LA) do badań EMC pojazdów kolejowych.



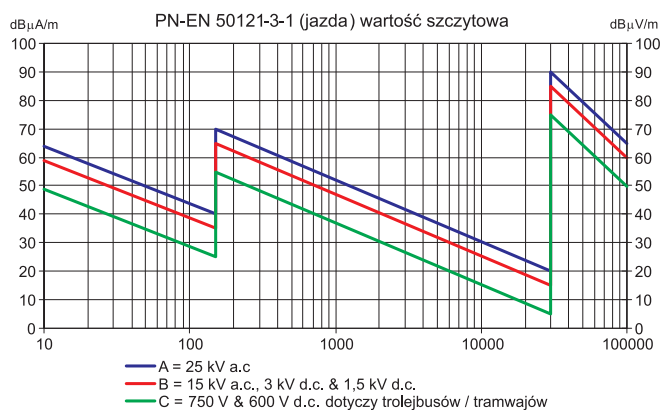
Rys. 5. Stanowisko EMC na Torze Doświadczalnym Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie [fot. Ł. John]

Przed przystąpieniem do pomiarów badanego obiektu należy sprawdzić, czy na każdej wybranej częstotliwości pomiarowej, zawartej w wymaganym paśmie częstotliwości, nie występują nadmierne postronne zaburzenia radioelektryczne zwane tłem. Poziom zaburzeń obcych stanowiących tło, powinien być mniejszy o co najmniej 6 dB od dopuszczalnych poziomów dla danego zakresu pomiarowego. W przypadku stwierdzenia zbyt wysokiego poziomu emisji zaburzeń postronnych (tła) dla danej częstotliwości lub dla pasma częstotliwości, zakres ten nie jest poddawany ocenie.

Dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń promieniowanych dla dwóch trybów badawczych są zawarte w normie [6] w postaci wykresów przedstawionych na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Dopuszczalne wartości zaburzeń na postoju [opracowanie własne A. Dłużniewski]



Rys. 7. Dopuszczalne wartości zaburzeń w trakcie jazdy [opracowanie własne A. Dłużniewski]

3.2. Pomiar emisji zaburzeń radioelektrycznych przewodzonych w pokładowej sieci zasilania niskiego napięcia

Emisja zaburzeń radioelektrycznych przewodzonych, jest definiowana jako zaburzenie rozchodzące się wzdłuż przewodów elektrycznych lub linii transmisji sygnałów. Pomiar normatywny emisji zaburzeń przewodzonych w pokładowej sieci zasilania niskiego napięcia są wykonywane podczas postoju pojazdu, zgodnie z wyposażeniem pomiarowym według normy [10] oraz zakresem pomiarowym według normy [7].

Zgodnie z zaleceniami normy [7], wykonuje się pomiary składowej niesymetrycznej napięcia zaburzeń radioelektrycznych w zakresie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz, z podziałem na dwa podzakresy częstotliwości:

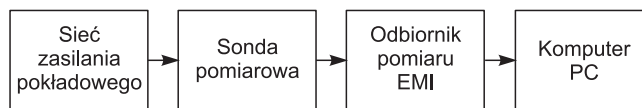
- 150 kHz–500 kHz,
- 500 kHz–30 MHz.

Pomiar emisji zaburzeń przewodzonych jest wykonywany na wszystkich portach pokładowej sieci zasilającej napięcia przemiennego i stałego, do których można zaliczyć:

- porty pomocniczego źródła zasilania napięcia przemiennego lub napięcia stałego,
- porty baterii akumulatorów,
- porty pomiarowe i porty sterowania służące do zasilania urządzeń elektronicznych.

Typowe wartości napięcia zasilania pokładowego w pojazdach są zdefiniowane w normie [8] i wynoszą: 24 V DC, 28 V DC, 36 V DC, 48 V DC, 72 V DC, 96 V DC, 110 V DC oraz 230 V AC.

Do pomiaru zaburzeń przewodzonych wykorzystuje się wysokonapięciową sondę pomiarową, do której przez kabel koncentryczny podłączony jest odbiornik pomiarowy EMI, co ilustruje rysunek 8. Uzyskane wyniki są porównywane z wykonanymi uprzednio pomiarami zaburzeń postronnych (tła) występującymi w pokładowej sieci zasilającej niskiego napięcia przy odłączonym zasilaniu.



Rys. 8. Schemat blokowy układu pomiarowego do pomiaru zakłóceń radioelektrycznych w pokładowej sieci niskiego napięcia [rys. Ł. John]

Odbiornik pomiarowy EMI wchodzący w skład wyposażenia pomiarowego musi spełniać wymagania normy [10]. Dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń przewodzonych zawarte są w normie [7] i wynoszą:

- 1) dla pasma częstotliwości 150 kHz–500 kHz: **99 dBμV**,
- 2) dla pasma częstotliwości 500 kHz–30 MHz: **93 dBμV**.

4. Metodyka pomiarów pól magnetycznych AC i DC generowanych w taborze kolejowym

Zgodnie z zapisami normy [9], pomiary poziomów pól magnetycznych AC i DC dla taboru kolejowego należy przeprowadzać w rzeczywistych warunkach atmosferycznych, w wymaganym przez normę paśmie częstotliwości od 0 Hz do 1 Hz dla pola DC i od 5 Hz do 20 kHz dla pola AC. Pomiary są przeprowadzane dla 3 osi składowych natężenia pola magnetycznego przy założeniu, że jedna oś jest równoległa do szyny. Pomiary wykonuje się w dwóch trybach pracy pojazdu szynowego:

1. **Tryb statyczny** – pojazd jest na postoju i podłączony do trakcji z załączonymi wszystkim pokładowymi urządzeniami np. takimi, jak: klimatyzacja, ogrzewanie, oświetlenie wewnętrzne i zewnętrzne, włączone są wszystkie urządzenia elektroniczne. W tym przypadku pomiary wykonuje się zarówno wewnątrz pojazdu (kabina maszynisty oraz przedziały pasażerskie), jak i na zewnątrz pojazdu w pobliżu zainstalowanych urządzeń elektrycznych takich, jak np.: silniki trakcyjne, przetwornice, falowniki, przekształtniki.
2. **Tryb dynamiczny** – stojący obiekt zaczyna się poruszać i z największym możliwym przyspieszeniem rozpędza się do maksymalnej prędkości eksploatacyjnej, utrzymuje tę prędkość na wybiegu przez 10 s, a następnie maksymalnie hamuje, aż do całkowitego zatrzymania. Wszystkie obwody pomocnicze i wszystkie urządzenia powinny być włączone (np. klimatyzacja, ogrzewanie, światła).

Może wystąpić sytuacja (np. w transporcie miejskim), że istniejące warunki terenowe lub system zasilania nie pozwalają na rozpędzenie taboru do maksymalnej prędkości eksploatacyjnej podczas przeprowadzania testu. W tym przypadku maksymalna wartość natężenia emisji pól magnetycznych powinna być obliczona na podstawie uzyskanych wyników pomiarów oraz monitorowania linii z wykorzystaniem określonej w normie metody. Przykłady tego typu metod zamieszczone są szczegółowo w normach [9 i 13].

Pomiary pól magnetycznych powinny być przeprowadzone w miejscach i punktach przestrzennych wewnątrz i na zewnątrz taboru, określonych szczegółowo w tabeli 2. Podobny schemat oznaczeń punktów pomiarowych w dwuczłonowym elektrycznym zespole trakcyjnym przedstawiono na rysunku 9.

Tablica 2
Lokalizacja punktów przestrzennych wykonywanych pomiarów

Lokalizacja punktów pomiarowych	Odległość pionowa od podłogi [m]	Odległość pozioma od ścian [m]
Dostępne tylko dla pracowników. Pomiar blisko źródła emisji urządzeń, gdzie przebywają pracownicy podczas wykonywania normalnych prac.	0,9 1,5	≥ 0,3
Ogólnodostępne. Pomiar w najbliższym możliwym położeniu od źródła emisji, gdzie mogą przebywać pasażerowie.	0,3 0,9 1,5	≥ 0,3
Dostępne dla personelu i ogólnodostępne. Pomiar na zewnątrz w pobliżu, np. przetwornicy.	0,3 1,5 2,5	0,3

[Opracowanie własne Ł. John]

Zgodnie z wymaganiami normy [9], do pomiarów pól magnetycznych stosuje się następującą aparaturę pomiarową:

- miernik pola magnetycznego DC,
- miernik pola magnetycznego AC wraz z sondą pola o powierzchni przekroju poprzecznego wynoszącej 100 cm²,
- termohigrobarometr z panelem odczytowym do określenia rzeczywistych warunków atmosferycznych,
- komputer z oprogramowaniem do analizy FFT otrzymanych wyników z pomiarów.

Do oszacowania poziomów indukcji magnetycznej wewnątrz i na zewnątrz pojazdu kolejowego, jako kryterium oceny przyjmuje się wymagania zapisane w dokumencie [1].

5. Przykładowe wyniki pomiarów emisji zaburzeń promieniowanych taboru kolejowego

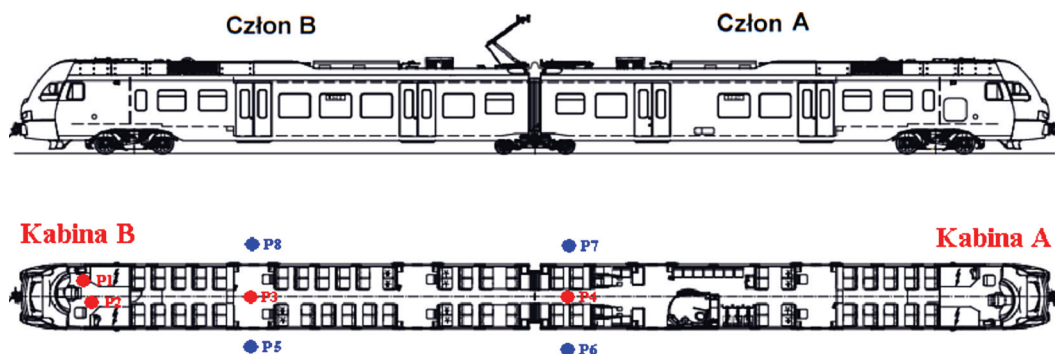
Na rysunku 10 i 11 pokazano przykładowe wyniki pomiarów emisji zaburzeń promieniowanych pochodzących od spalinowego zespołu trakcyjnego z uwzględnieniem wymagań zawartych w normie i poziomu zaburzeń postronnych. Jest to pomiar natężenia pola magnetycznego wyrażonego w [dBμA/m] w funkcji częstotliwości [MHz]. Kolorem brązowym zaznaczono linię oznaczającą dopuszczalny poziom emisji zaburzeń promieniowanych, których pojazd nie powinien przekroczyć. Pomiary przeprowadzono w trybie postoju pojazdu (kolor niebieski na rysunku 10 z uwzględnieniem wartości quasi-szczytowej QP) oraz w trybie jazdy pojazdu (kolor czerwony na rysunku 11).

Podczas postoju, pojazd znajdował się na wprost anten i miał włączone wszystkie urządzenia pokładowe, które mogą być potencjalnym źródłem zaburzeń radioelektrycznych. Podczas jazdy, pomiar był wykonywany na stanowisku pomiarowym przy prędkości lokomotywy 50 km/h (±10 km/h) z poborem mocy wynoszącym przed anteną 30%. Zalecenia normatywne przewidują również przeprowadzanie badań taboru elektrycznego w trakcie hamowania pojazdu przed antenami, ale tylko w pojazdach, w których zachodzi zjawisko rekuperacji energii do sieci trakcyjnej.

Na rysunkach 10 i 11 zamieszczono wyniki pomiarów zaburzeń promieniowanych pochodzących z pojazdu trakcyjnego podczas postoju pojazdu oraz w trakcie przejazdu przed antenami pomiarowymi z wymaganą prędkością.

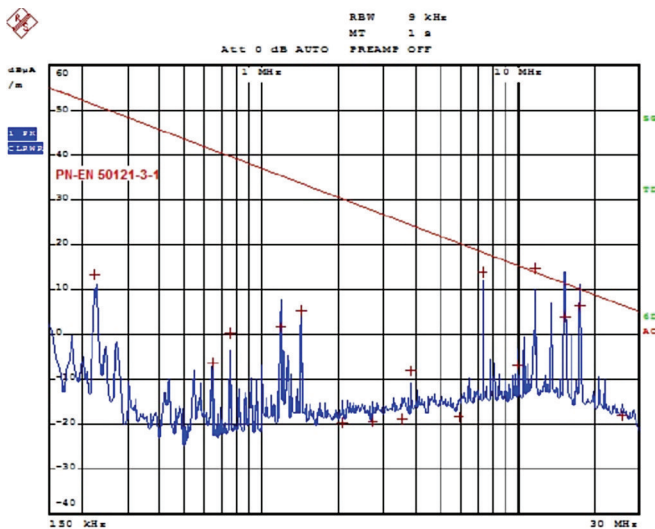
Na wartości uzyskane z pomiarów mają wpływ zaburzenia postronne, które powinny być mniejsze od wartości dopuszczalnej o co najmniej 6 dB. Zgodnie z zaleceniami normy [5] na tych częstotliwościach, na których wystąpiły przekroczenia wartości dopuszczalnych poziomów emisji zaburzeń promieniowanych, wyniki z pomiarów nie podlegały ocenie w związku z wysokim poziomem zaburzeń postronnych. W przypadku badanego pojazdu taka sytuacja miała miejsce w paśmie częstotliwości 11 MHz.

Na rysunkach 12 i 13 pokazano przykładowe wyniki pomiarów normatywnych emisji zaburzeń przewodzonych w w pokładowej sieci niskiego napięcia spalinowego zespołu

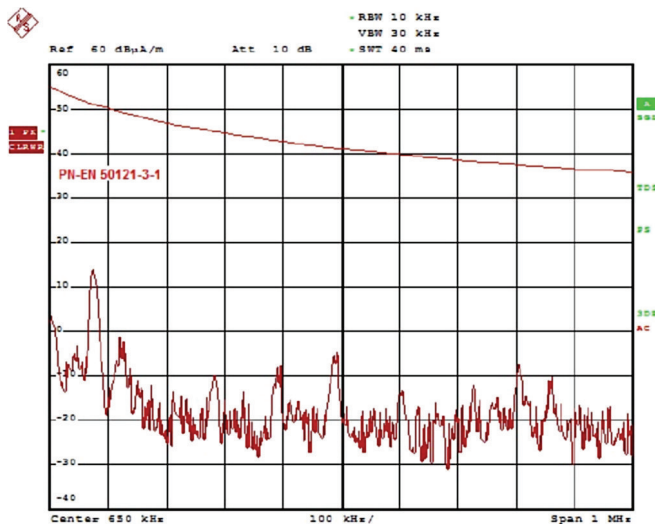


Rys. 9. Przykładowa lokalizacja punktów pomiarowych wewnątrz i na zewnątrz spalinowego zespołu trakcyjnego [rys. Ł. John]

trakcyjnego z uwzględnieniem wymagań zawartych w normie [7] i poziomu zaburzeń postronnych. Jest to pomiar napięcia zaburzeń wyrażonego w [dB μ A] w funkcji częstotliwości [MHz]. Liniją czerwoną zaznaczono dopuszczalny poziom emisji zaburzeń przewodzonych, których pojazd nie powinien przekroczyć.

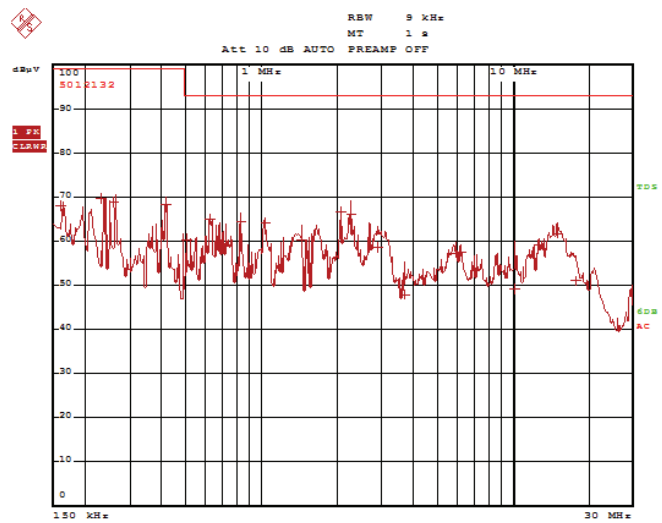


Rys. 10. Widok ekranu rejestracji zaburzenia promieniowanego taboru na postoju [A. Dłużniewski]



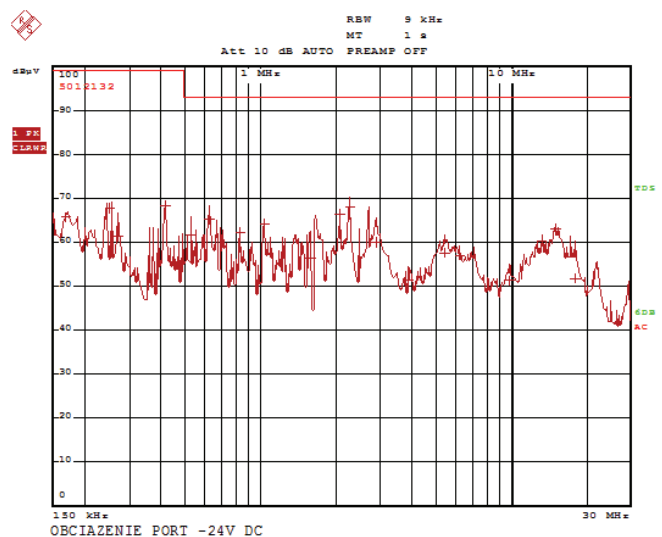
Rys. 11. Widok ekranu rejestracji zaburzenia promieniowanego taboru w czasie jazdy [A. Dłużniewski]

Pomiary emisji zaburzeń przewodzonych wykonano podczas postoju pojazdu zgodnie z normą [3], przy maksymalnym jego obciążeniu (włączona klimatyzacja, oświetlenie, włączony system informacji pasażerskiej). W praktyce maksymalne obciążenie uzyskiwane jest dla wariantu z włączoną klimatyzacją. Pomiary przeprowadzono dla przyłącza zasilania pokładowego niskiego napięcia 24 V DC dla obwodu zasilania „+” i „-”. Wariant taki jest determinowany tym, że wszystkie pokładowe urządzenia sterujące były zasilane z wymienionego portu zasilającego.



OBCIĄŻENIE PORT +24V DC

Rys. 12. Widok ekranu rejestracji zaburzenia emisji przewodzonej dla portu +24 V DC [Ł. John]



OBCIĄŻENIE PORTU -24V DC

Rys. 13. Widok ekranu rejestracji zaburzenia emisji przewodzonej dla portu -24 V DC [Ł. John]

Podczas pomiarów indukcji pola magnetycznego DC, wynik pomiaru przeważnie odczytuje się bezpośrednio z przyrządu pomiarowego, otrzymując zapis w formie numerycznej lub graficznej, w zależności od badanego trybu pracy pojazdu i zastosowanego detektora w mierniku.

W trakcie pomiarów indukcji pola magnetycznego AC, wynikiem pomiaru są rezultaty z wcześniejszego sumowania trzech składowych pola w przedziale czasu po filtrowaniu zarejestrowanych próbek. W tym celu stosuje się miernik natężenia pola magnetycznego o odpowiednich parametrach lub przeprowadza się analizę widmową FFT mierzonych składników natężenia pola.

W tabelicy 3 przedstawiono wyniki pomiarów pól magnetycznych DC w wybranych punktach pomiarowych dla kabiny maszynisty i przedziału pasażerskiego obu pojazdów kolejowych, w celu ich porównania.

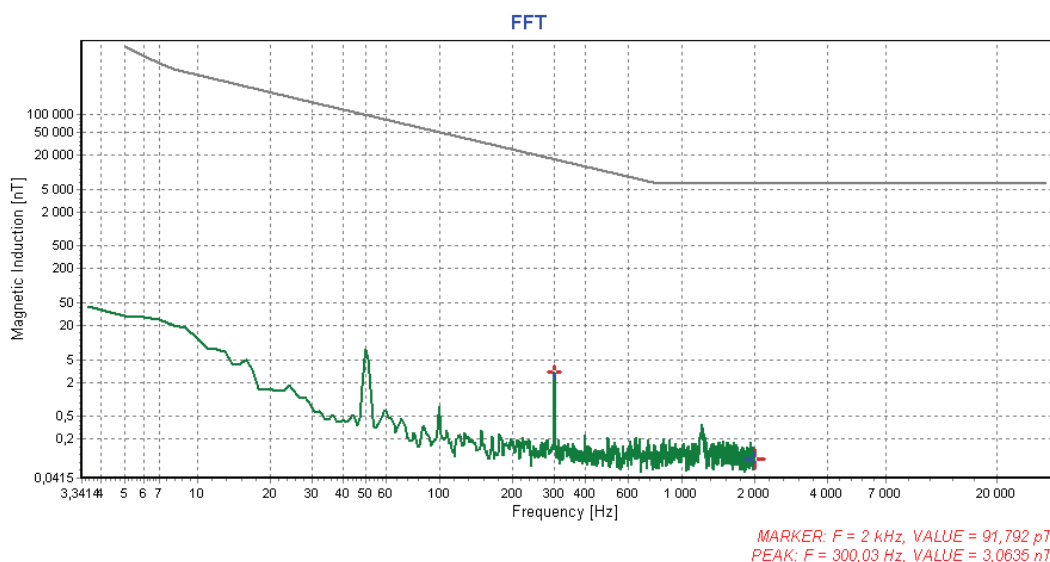
Tablica 3

Wyniki pomiarów pola magnetycznego DC w pojazdach

Rodzaj pojazdu	Punkt pomiarowy	Tryb pracy	Wysokość punktu pomiarowego [m]	Odległość punktu pomiarowego [m]	Wynik pomiaru B_{max} [μ T]
Elektryczny zespół trakcyjny	P1 kabina maszynisty	Postój	0,9	0,3	220
		Postój	1,5	0,3	180
		Jazda	0,9	0,3	237
		Jazda	1,5	0,3	245
Elektryczny zespół trakcyjny	P3 przedział pasażerski człon B	Postój	0,3	1,1	238
		Postój	0,9	1,1	266
		Postój	1,5	1,1	256
		Jazda	0,3	1,1	239
		Jazda	0,9	1,1	280
		Jazda	1,5	1,1	276

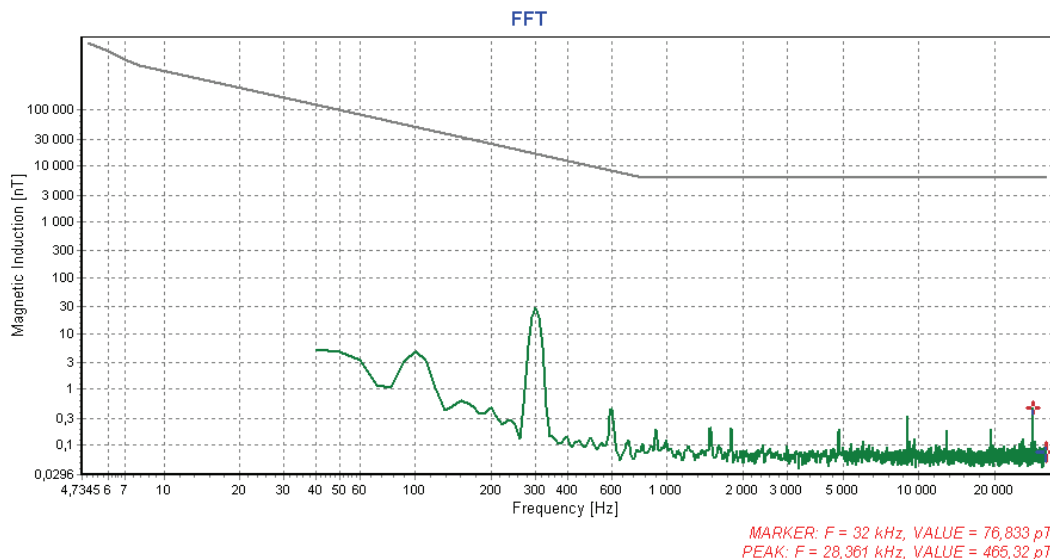
Na rysunkach 14–17 zamieszczono przykładowe charakterystyki poziomów indukcji pola magnetycznego w funkcji częstotliwości, otrzymane z pomiarów pól ma-

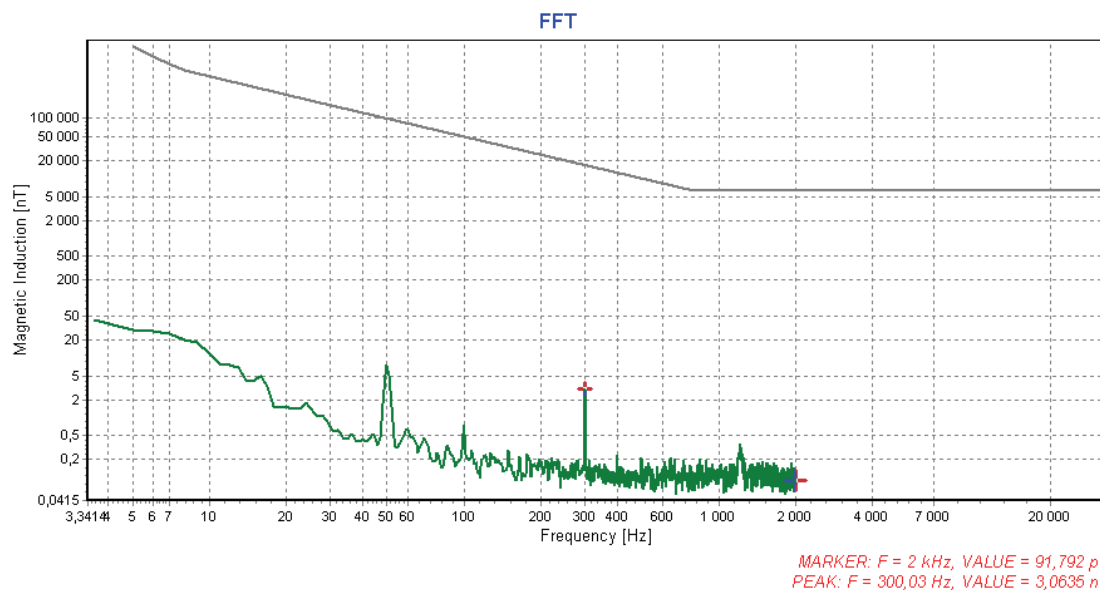
gnetycznych AC, po dokonanej przez oprogramowanie analizie widma w trybie FFT dla obu pojazdów kolejowych w kabinie maszynisty.



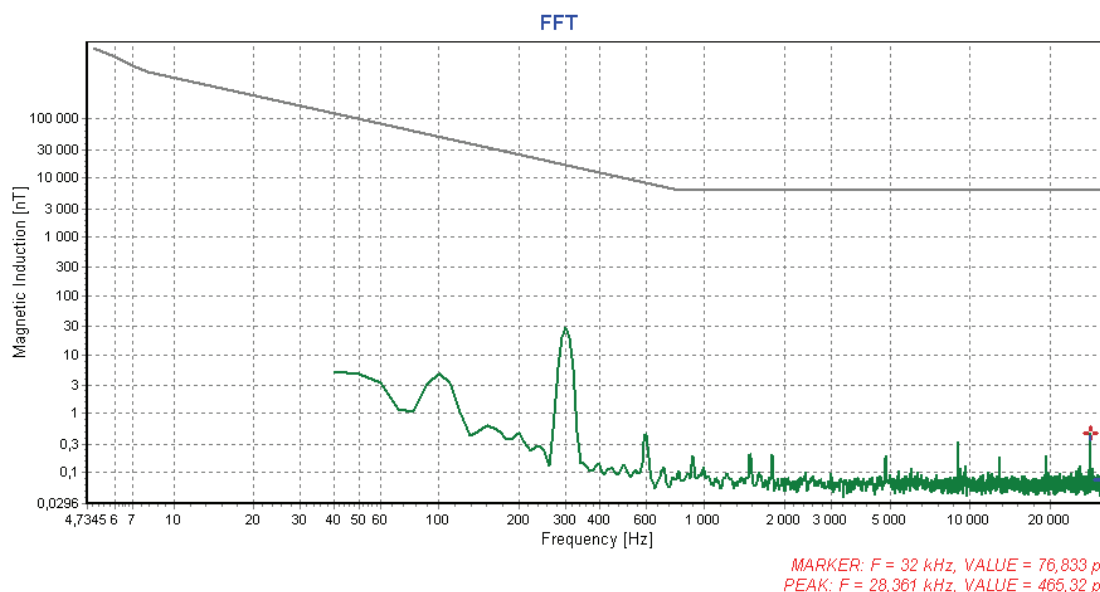
Rys. 14. Widok ekranu rejestracji indukcji pola magnetycznego w funkcji częstotliwości elektrycznego zespołu trakcyjnego: punkt pomiarowy P1, postój, wysokość 0,9 m, zakres pomiarowy 5 Hz–2 kHz [badania własne A. Dłużniewski]

Rys. 15. Widok ekranu rejestracji indukcji pola magnetycznego w funkcji częstotliwości elektrycznego zespołu trakcyjnego: punkt pomiarowy P1, postój, wysokość 0,9 m, zakres pomiarowy 2 kHz–20 kHz [badania własne A. Dłużniewski]





Rys. 16. Widok ekranu rejestracji indukcji pola magnetycznego w funkcji częstotliwości elektrycznego zespołu trakcyjnego: punkt pomiarowy P1, postój, wysokość 1,5 m, zakres pomiarowy 5 Hz–2k Hz [badania własne A. Dłużniewski]



Rys. 17. Widok ekranu rejestracji indukcji pola magnetycznego w funkcji częstotliwości elektrycznego zespołu trakcyjnego: punkt pomiarowy P1, postój, wysokość 1,5 m, zakres pomiarowy 2 kHz–20 kHz [badania własne A. Dłużniewski]

Z przedstawionych przykładowych wyników pomiarów poziomów emisji pól magnetycznych AC i DC wewnątrz i na zewnątrz pojazdu, generowanych przez urządzenia elektryczne i elektroniczne wynika, że spełnione są wymagania w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa, dotyczące narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi, w tym polami elektromagnetycznymi. Urządzenia zamontowane na badanym pojeździe nie przekraczają dopuszczalnego poziomu emisji pola magnetycznego AC oznaczonego kolorem szarym na rysunkach 14–17.

6. Niepewność pomiaru badań emisji zaburzeń radioelektrycznych

Pomiar emisji zaburzeń promieniowanych, przewodzonych oraz poziomów pól magnetycznych zawsze jest obciążony błędem pomiarowym wynikającym ze specyfiki metody pomiaru i dokładności zastosowanej aparatury pomiarowej. Prawidłowa ocena uzyskanych wyników wymusza oszacowanie niepewności pomiaru. Najistotniejszym elementem zgodności lub niezgodności wyników z dopuszczalnym poziomem zaburzeń radioelektrycznych zawartych w normie [12], jest

uwzględnienie niepewności pomiarów wynikającej z zastosowanej aparatury pomiarowej. Niepewność aparatury pomiarowej, wykorzystywanej do badań zaburzeń radioelektrycznych, powinno się oceniać uwzględniając wszystkie wymienione wielkości w normie [12].

Niepewność standardową $u(x_i)$ w [dB] oraz współczynnik czułości c_i ocenia się dla estymacji x_i każdej wielkości. Niepewność standardową $u(y_i)$ dla estymacji wielkości u należy obliczyć wykorzystując zależność (1):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_i c_i^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (1)$$

gdzie:

$u_c(y)$ – (złożona) niepewność standardowa wielkości y ,
 c_i – współczynnik czułości,
 $u(x_i)$ – niepewność standardowa estymacji x_i .

Niepewność rozszerzoną wprowadzaną przez aparaturę pomiarową U_{lab} oblicza się wykorzystując zależność (2):

$$U_{lab} = 2 \cdot u_c(y) \quad (2)$$

gdzie:

U_{lab} – niepewność rozszerzona wielkości y ,
 $u_c(y)$ – (złożona) niepewność standardowa wielkości y .

Zgodnie z wymaganiami dokumentów Polskiego Centrum Akredytacji (PCA), oszacowana niepewność pomiaru zaburzeń radioelektrycznych promieniowanych i przewodzonych musi być podana w sprawozdaniu z badań.

7. Podsumowanie

Zdecydowany wpływ na wynik pomiaru ma stan środowiska elektromagnetycznego, w którym występują znaczące poziomy zaburzeń radioelektrycznych postronnych, pochodzących od niezidentyfikowanych źródeł.

Przy wyborze poligonu pomiarowego należy dokładnie przebadac stan środowiska elektromagnetycznego. Jeżeli występują nadmierne poziomy zaburzeń od źródeł postronnych, należy wtedy określić ich pochodzenie i zbadać okres występowania najwyższych poziomów emisji.

W przypadku przeprowadzania badań na nieprawidłowo wybranym poligonie pomiarowym przez mało doświadczony personel, może dojść do złej interpretacji wyników pomiarów.

Przeprowadzane pomiary na terenie Toru Doświadczalnego IK w Żmigrodzie umożliwiają prawidłowe i zgodne z wymaganiami normatywnymi wykonanie badań kompatybilności elektromagnetycznej w zakresie emisji zaburzeń radioelektrycznych i elektromagnetycznych oraz pomiarów pól magnetycznych AC i DC generowanych przez urządzenia elektryczne i elektroniczne montowane na taborze kolejowym.

Bibliografia

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych

- wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (dwudziesta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG) i uchylająca dyrektywę 2004/40/WE z dnia 29.06.2013 r.
2. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/30/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej (wersja przekształcona, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej L96/PL).
3. Lista Prezesa UTK w sprawie właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwi spełnienie zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności systemu kolei, Warszawa dnia 19 stycznia 2017 r.
4. PN-EN 50121-1:2017: Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 1: Postanowienia ogólne.
5. PN-EN 50121-2:2017: Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 2: Oddziaływanie systemu kolejowego na otoczenie.
6. PN-EN 50121-3-1:2017: Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 3-1: Tabor – Pociąg i kompletny pojazd.
7. PN-EN 50121-3-2:2017: Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 3-2: Tabor – Aparatura.
8. PN-EN 50155:20018: Zastosowania kolejowe – Tabor – Wyposażenie elektroniczne.
9. PN-EN 50500:2008/A1:2015: Procedury pomiaru poziomów pól magnetycznych generowanych przez urządzenia elektroniczne i elektryczne w środowisku kolejowym w odniesieniu do narażenia ludzi.
10. 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 (CISPR 16-1-1).
11. PN-EN 55016-2-1:2014/A1:2017: Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i metod pomiaru zaburzeń radioelektrycznych oraz odporności na zaburzenia – Część 2-1: Metody pomiaru zaburzeń i badania odporności – Pomiaru zaburzeń przewodzonych.
12. PN-EN 55016-4-2:2011/A1:2014 Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i metod pomiaru zaburzeń radioelektrycznych oraz odporności na zaburzenia – Część 4-2: Niepewności, statystyka i modelowanie poziomu dopuszczalnego – Niepewność aparatury pomiarowej.
13. PN-EN 62311:2010: Ocena urządzeń elektronicznych i elektrycznych w odniesieniu do ograniczeń ekspozycji ludności w polach elektromagnetycznych (0 Hz–300 GHz).
14. Szulc W.: *Ogólna charakterystyka Toru Doświadczalnego Instytutu Kolejnictwa i rodzaje wykonywanych badań taboru*, Prace Instytutu Kolejnictwa, 2016, z. 150.