

Analiza zaburzeń elektromagnetycznych generowanych przez pojazdy szynowe

Jarosław ŁUSZCZ¹, Mariusz BUŁAWA²

Streszczenie

W artykule scharakteryzowano specyfikę zakłóceń elektromagnetycznych w aplikacjach kolejowych. Opisano metody analizy zaburzeń elektromagnetycznych generowanych przez pojazdy szynowe. Przykładowe wyniki analiz w dziedzinie czasu i częstotliwości porównano z wynikami analizy czasowo-częstotliwościowej, umożliwiającej identyfikację i lokalizację źródeł zaburzeń w pojazdach szynowych. Wskazano możliwe przyczyny zmian poziomów zaburzeń generowanych przez pojazdy szynowe w czasie eksploatacji.

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, pojazdy szynowe, emisja przewodzona, zakłócenia

1. Wprowadzenie

Problemy związane z zakłóceniami w układach sterowania ruchem kolejowym (SRK) są znane od dawna, jednak w ostatnich latach ich wielkość i różnorodność znacznie się zwiększyła, co również znajduje odzwierciedlenie w liczbie publikacji poświęconych tej tematyce [2, 3, 6]. Przyczyny wzrostu zagrożeń dla kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) układów stosowanych w kolejnictwie wynikają ze stosowania coraz większej liczby układów elektronicznych, zwłaszcza tzw. układów wrażliwych, funkcjonujących przy niewielkich sygnałach roboczych, o niskich poziomach odporności na zaburzenia elektromagnetyczne.

Drugim czynnikiem, znacznie bardziej zagrażającym EMC, jest stosowanie układów przekształtnikowych energoelektronicznych dużej mocy w układach napędowych pojazdów trakcyjnych. Powoduje to znaczne rozszerzenie widma częstotliwości generowanych zaburzeń elektromagnetycznych oraz dużą zmienność tych zaburzeń w zależności od dynamicznie zmieniających się warunków pracy układu napędowego i stosowanych algorytmów sterowania [7, 8].

Wspomniane przyczyny powodują znaczne zmniejszenie tzw. „zapasu kompatybilności elektromagnetycznej”, definiowanego jako odstęp pomiędzy najwyższymi poziomami spodziewanych emisji zaburzeń oraz najniższymi poziomami odporności na zaburzenia. Pozornie zagadnienie jest proste, wystarczy zagwarantować odpowiedni odstęp, żeby kompatybilność elektromagnetyczna była zapewniona, a zatem zakłócenia systemów nie występowały. Jednak spełnienie tych

warunków w praktyce coraz częściej staje się problemem technicznym bardzo trudnym do rozwiązania i w wielu aplikacjach wymaga indywidualnego podejścia, pomimo spełniania wszelkich wymagań wynikających z dokumentów normalizacyjnych związanych z certyfikacją wszystkich stosowanych podzespołów.

Zalecane standardowe badania certyfikacyjne urządzeń i pojazdów stanowią skuteczne narzędzie umożliwiające zapewnienie kompatybilności elektromagnetycznej w większości aplikacji, jednak nie zapewniają pełnej gwarancji wykluczenia jakichkolwiek zakłóceń. Wynika to z wielkiej różnorodności występujących wzajemnych oddziaływań oraz również różnorodnych i zarazem często zmiennych warunków środowiska elektromagnetycznego eksploatowanych urządzeń. Zalecane badania EMC wykonywane są zazwyczaj w warunkach laboratoryjnych przy zastosowaniu znormalizowanych narażeń testowych oraz uproszczonych konfiguracji testowych. Jednym z możliwych rozwiązań, umożliwiających bardziej zindywidualizowane podejście do analiz EMC, jest wykonywanie badań EMC w miejscu zainstalowania, co zazwyczaj w znacznie większym stopniu odzwierciedla naturalne warunki eksploatacji. Warunki eksploatacji charakteryzują się zazwyczaj potencjalną możliwością nakładania się zaburzeń z wielu źródeł, także z zewnętrznego środowiska elektromagnetycznego. Zjawiska interferencji zaburzeń z wielu źródeł mogą skutecznie zwiększać ryzyko występowania zakłóceń w specyficznych, sprzyjających okolicznościach oraz utrudniać identyfikację ich przyczyn. Zagadnienia efektywności badań EMC w miejscu zainstalowania (*in-situ*)

¹ Dr inż.; Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki; e-mail: jlusz@ely.pg.gda.pl.

² Dr inż.; voestalpine TENS sp. z o.o, Sopot.

są obecnie przedmiotem wielu analiz [1, 4, 10] oraz są także coraz częściej uwzględniane w aktualizowanych wymaganiach normalizacyjnych [5].

Badania EMC wykonywane w miejscu zainstalowania systemów elektronicznych stosowanych w aplikacjach kolejowych są jedną z bardziej skutecznych metod szczegółowej identyfikacji źródeł zakłóceń. Specyfika tych aplikacji, zarówno w zakresie najczęściej spotykanych źródeł zaburzeń, jak i potencjalnych systemów zakłócających, wymaga stosowania specjalnych metod pomiarowych. Podstawowe zalecenia dotyczące badań emisji zaburzeń przewodzonych i promieniowanych zostały zaproponowane w normach branżowych [9]. Ustanowione ujednoczenie warunków wykonywania pomiarów zaburzeń generowanych przez pojazdy trakcyjne w warunkach eksploatacyjnych pozwala na prowadzenie badań, których celem jest określanie wymagań granicznych dla pojazdów. Ze względu na specyfikę źródeł zaburzeń w postaci szybko przemieszczających się pojazdów szynowych z zainstalowanymi przekształtnikami energoelektronicznymi, do pomiarów są wymagane specjalne rejestratory. Typowe odbiorniki pomiarowe zaburzeń elektromagnetycznych, stosowane w laboratoriach badawczych EMC, są niewystarczające.

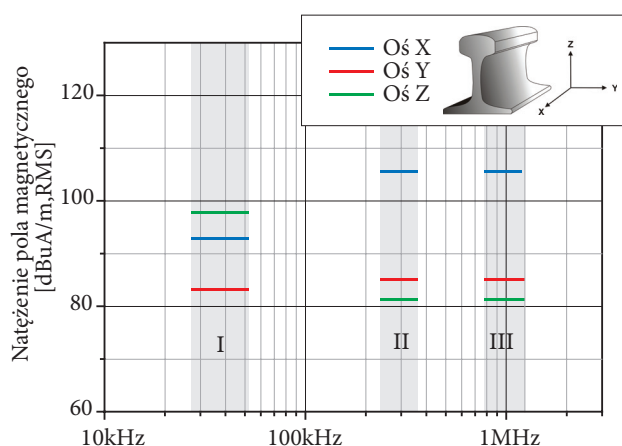
2. Specyfika oddziaływań zakłócających w systemach kolejowych

Zaburzeniami elektromagnetycznymi są wszelkie sygnały elektryczne wytwarzane bezpośrednio przez zmiany prądów i napięć w obwodach elektrycznych albo pośrednio przez pola bliskie (składowe elektryczne i magnetyczne) oraz dalekie (elektromagnetyczne). Mogą one być przyczyną niepożądanych oddziaływań pomiędzy różnymi systemami, w szczególności elektronicznymi, na skutek niezamierzonej propagacji pomiędzy sąsiadującymi obwodami. W aplikacjach trakcyjnych szczególnie trudnym zagadnieniem jest oddziaływanie przejeżdżających pojazdów szynowych na systemy detekcji. Specyfika tych aplikacji powoduje, że szczególne znaczenie mają oddziaływania składowych magnetycznych pól bliskich w określonych zakresach częstotliwości. Dwa główne źródła emisji zaburzeń to urządzenia zabudowane w taborze oraz przepływ prądu w szynie.

Ze względu na spełniane funkcje, układy detekcji koła są umieszczane bezpośrednio przy szynach, gdzie płyną znaczne prądy robocze, generujące wysokie składowe magnetyczne. Potencjały elektryczne występujące w szynach są zazwyczaj bardzo niewielkie i dlatego oddziaływania przez składowe elektryczne wytwarzanych pól są najczęściej pomijane w analizach. Układy detekcji są zasilane z innych źródeł niż pojazdy, dlatego bezpośrednie oddziaływanie składowych

magnetycznych przez obwody zasilania, jeśli występuje, to najczęściej wynika z niegalwanicznych sprzężeń przez pola bliskie. Z punktu widzenia układów detekcji koła, każde zakłócenie można scharakteryzować m.in. przez jego poziom oraz czas trwania. Zakłócenia o poziomie przekraczającym dopuszczalną granicę odporności, jednak o krótkim czasie trwania, nie muszą powodować zaburzeń w pracy urządzenia.

Selektywny charakter najczęściej występujących zakłóceń wynika ze specyfiki układów elektronicznych stosowanych w czujnikach obecności koła, w których detekcja jest realizowana w ściśle określonych przedziałach częstotliwości. W tych przedziałach częstotliwości (I: 27 – 52 kHz, II: 235–3 63 kHz i III: 790–1240 kHz) zostały ustalone dopuszczalne poziomy emisji pola magnetycznego [9] skoordynowane z wymaganymi poziomami odporności układów detekcji osi przy założeniu wymaganych marginesów bezpieczeństwa (rys. 1).



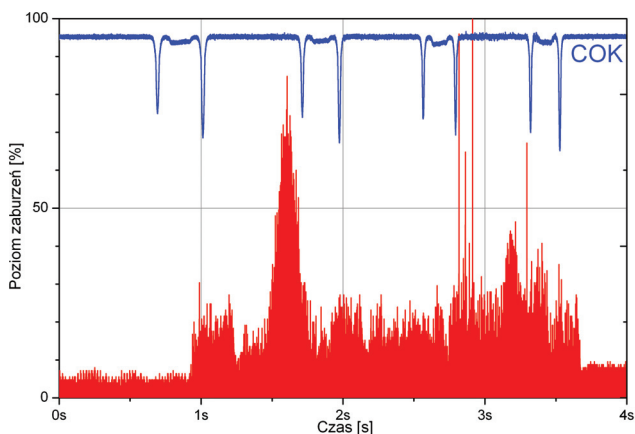
Rys. 1. Zakresy częstotliwości stosowanych w układach detekcji osi oraz dopuszczalne poziomy emisji szerokopasmowej pola magnetycznego w poszczególnych kierunkach X, Y i Z

3. Analiza zaburzeń przewodzonych generowanych przez pojazdy

Wymagania kompatybilności wynikające z zaleceń normalizacyjnych uwzględniają poziomy maksymalne, co pozwala stwierdzić, czy poziom kompatybilności jest zachowany. W przypadkach, gdy jednak występują przekroczenia dopuszczalnych poziomów emisji lub zakłócenia, do rozwiązywania potencjalnych problemów EMC są niezbędne bardziej szczegółowe informacje na temat występujących emisji, które umożliwiłyby identyfikację przyczyn. Charakterystyka widmowa maksymalnych poziomów emisji pozwala określić jedynie zakresy częstotliwości, w których mogą wystąpić problemy EMC. Do analizy przyczyn występowania zawyżonych poziomów maksymalnych

emisji zazwyczaj bardzo przydatne są informacje nt. zmian tych emisji w czasie oraz powiązanie tych zmian z pracą różnych podzespołów pojazdu, np. z poziomem obciążenia lub pobieranym prądem. W pojazdach szynowych szczególnie znaczenia nabiera też korelacja emisji obserwowanych w czasie z położeniem pojazdu, co pozwala na zlokalizowanie urządzeń pokładowych, które mogą być potencjalnym źródłem.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładową charakterystykę emisji pojazdu szynowego w czasie w odniesieniu do położenia kół pojazdu, które zostało zarejestrowane przez czujnik obecności koła (COK). Przedstawiony na rysunku sygnał zaburzeń został zarejestrowany za pomocą anteny pomiarowej umieszczonej przy szynie zgodnie z wymaganiami specyfikacji technicznej CLC/TS 50238-3. Poziomy zarejestrowanych zaburzeń przedstawiono w wartościach względnych (procentowych) odniesionych do największej wartości zarejestrowanej w czasie przejazdu całego pojazdu. Na podstawie tej charakterystyki można wyraźnie określić rejon pojazdu o najwyższej intensywności emisji. W badanym przypadku jest to przedział czasu od około 1,5 do 1,7 sekundy, czyli przed trzecią osią wagonu, natomiast w rejonie za szóstą osią są widoczne najwyższe zarejestrowane wartości napięć zaburzeń, mają one jednak znacznie bardziej krótkotrwały charakter w stosunku do poprzedniego wagonu.



Rys. 2. Poziomy generowanych zaburzeń w czasie przejazdu

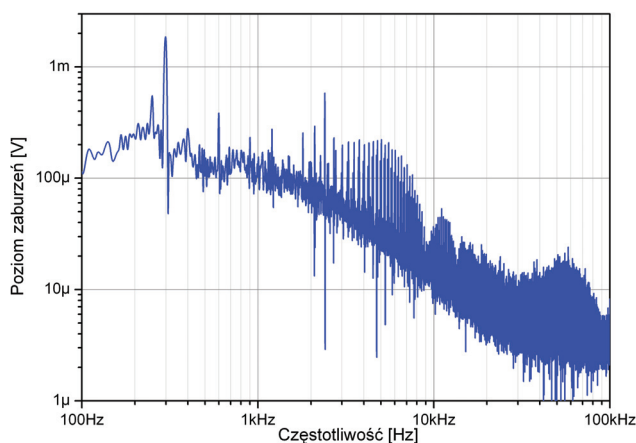
4. Analiza zaburzeń w dziedzinie częstotliwości

Zakres przeprowadzonych analiz częstotliwościowych był ograniczony do 100 kHz, co obejmuje jedynie pierwszy przedział częstotliwości (27–52 kHz) specyfikowany przez wymagania normy [9]. Ograniczenie to wynikało z zastosowanych przetworników pola bliskiego, które dzięki temu pozwoliły na obserwację

emisji zaburzeń w zakresie niższych częstotliwości, od 100 Hz do 10 kHz. W tym zakresie częstotliwości zawierają się częstotliwości modulacji (PWM) najczęściej stosowanych przetwornic impulsowych dużych mocy, co skutkuje znacznymi poziomami emisji. Zakłócające oddziaływanie układów impulsowych w zakresie podstawowych częstotliwości modulacji na systemy automatyki torowej jest również częstą przyczyną problemów, pomimo, że nie jest to bezpośrednio oddziaływanie na układy detekcji pracujące w zakresie wyższych pasm częstotliwości. Szczególnie podatne na ten rodzaj zaburzeń są tory transmisji sygnałów analogowych oraz tory zasilania zlokalizowane w pobliżu miejsc przepływu głównych prądów zasilania.

Wyniki analizy częstotliwościowej zaburzeń przedstawiono na rysunku 3; są to wartości maksymalne, które wystąpiły w czasie całego okresu rejestracji. Przedstawiona charakterystyka widmowa wykazuje dominującą częstotliwość emisji 300 Hz oraz również wyraźnie widoczne, nieco mniejsze amplitudy poszczególnych składowych harmonicznych pochodzące od tej częstotliwości, tj. 600 Hz, 900 Hz, 1,2 kHz itd. W zakresie niskich częstotliwości na charakterystyce widmowej udało się również zidentyfikować częstotliwość 250 Hz, której źródłem jest sieć zasilająca o częstotliwości 50 Hz.

Kolejne źródło zwiększonej emisji można wyróżnić w zakresie częstotliwości od 3 do 8 kHz, która nakłada się na pozostałe pochodzące od innych źródeł i dlatego bliższa identyfikacja wymaga bardziej szczegółowych analiz.



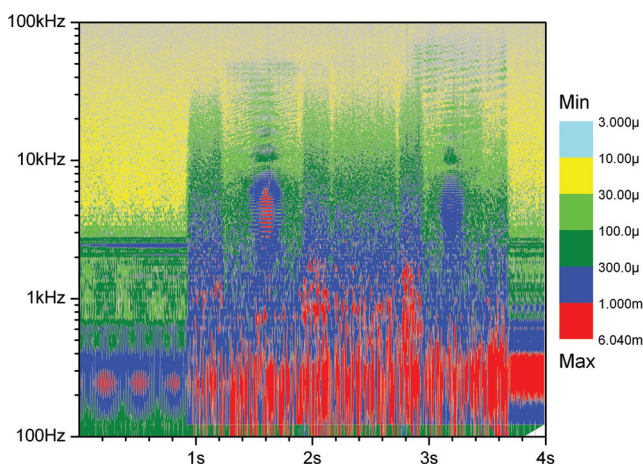
Rys. 3. Wartości maksymalne generowanych zaburzeń podczas przejazdu w dziedzinie częstotliwości

5. Analiza czasowo-częstotliwościowa

Analiza czasowo-częstotliwościowa stwarza największe możliwości identyfikacji generowanych poziomów zaburzeń w korelacji z czasem ich występowania, co pozwala na znaczne możliwości lokalizacji podzespołów pojazdu, które są ich źródłem zaburzeń. Dokładność

identyfikacji czasowo-częstotliwościowa jest w znacznym stopniu uzależniona od parametrów rejestracji przebiegów. Sygnały pochodzące od najczęściej spotykanych typowych źródeł zaburzeń charakteryzują się znaczną zmiennością poziomów sygnałów w zależności od zakresu częstotliwości, co wymaga dużej dynamiki układu pomiarowego. Ponadto konieczność stosowania wysokich częstotliwości próbkowania pozwalających na uzyskanie odpowiednio szerokiego zakresu częstotliwości charakterystyk widmowych, prowadzi do znacznych ilości danych, których przetwarzanie w szczególności w czasie rzeczywistym wymaga znacznych zasobów sprzętowych. Realizacja tego zadania bez specjalizowanych układów optymalizujących potrzebne zasoby sprzętowe i czasowe jest trudna, dlatego przedstawione analizy ograniczono do częstotliwości 100 kHz.

Rysunek 4 przedstawia wyniki analizy czasowo-częstotliwościowej przeprowadzonej dla badanego przejazdu i pomimo wielu ograniczeń pozwala zaprezentować możliwości identyfikacyjne tej metody. W początkowej fazie przejazdu w czasie do około 1 sekundy można zauważyć zaburzenia spowodowane przez prądy płynące w szynie, ponieważ oddalenie pojazdu od przetwornika pomiarowego wskazuje zmniejszony udział emisji pochodzących od podzespołów zlokalizowanych na pojeździe. Wyraźny nagły wzrost emisji wraz pojawieniem się pierwszej osi pojazdu dodatkowo potwierdza ten wniosek. W czasie bezpośrednio przed pojawieniem się pierwszej osi pojazdu w rejonie zastosowanego czujnika pomiarowego można wyróżnić dwa wyraźne widoczne źródła emisji od prądów płynących w szynach, około 250 Hz oraz około 2,5 kHz (rys. 4, przedział czasu 0-1 s). Następnie wraz z pojawieniem się osi następuje znaczny wzrost emisji w zakresie częstotliwości do 10 kHz. Przejazdy poszczególnych osi wyraźnie zwiększają emisję, co



Rys. 4. Analiza czasowo-częstotliwościowa zaburzeń generowanych podczas przejazdu

uwidaczniają przedziały czasowe w pobliżu 1, 2, 2, 8 i 3,6 sekundy. Ponadto w środkowym rejonie obu wagonów (czasy około 1,6 i 3,2 sekundy) pojawia się wcześniej wspomniana emisja w zakresie częstotliwości 3-8 kHz, co wskazuje na pracę odrębnego podzespołu pojazdu zlokalizowanego w tej części podwozia.

6. Podsumowanie i wnioski

Celem przeprowadzonych badań było określenie przydatności metody analizy czasowo-częstotliwościowej do identyfikacji i lokalizacji źródeł zaburzeń w pojazdach szynowych powodujących zakłócenia w systemach sterowania ruchem kolejowym. Wstępne badania emisji pola magnetycznego przez wybrane pojazdy trakcyjne wskazują, że te badania mogą być cennym źródłem informacji do celów diagnostycznych w sytuacjach, kiedy występują zagrożenia kompatybilności elektromagnetycznej.

Metoda ta może być również stosowana w okresowych badaniach porównawczych dla tych samych pojazdów w celu monitorowania zmian ich stanu technicznego pod względem emisji zaburzeń elektromagnetycznych. W okresie eksploatacji, tabor kolejowy podlega starzeniu, a także jest naprawiany, co może również wpływać na zmianę charakterystyki emisji zaburzeń danego pojazdu.

Znacznym utrudnieniem w stosowaniu zaprezentowanej metody identyfikacji źródeł zaburzeń w pojazdach szynowych może być zmienność emisji w zależności od poziomu obciążenia potencjalnych źródeł zaburzeń, co powoduje konieczność wykonywania wielokrotnych badań, jeśli nie jest możliwe uzyskanie powtarzalnych warunków pracy.

Literatura

1. Bellan D. et al.: *Time-domain measurement and spectral analysis of nonstationary low-frequency magnetic-field emissions on board of rolling stock*, Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on , vol.46, no.1, pp.12,23, Feb. 2004.
2. Białoń A., Adamski D., Pajka P.: *Badanie kompatybilności elektromagnetycznej taboru z urządzeniami wykrywania pociągu z uwzględnieniem normy EN 50238*, Problemy Kolejnictwa, Zeszyt nr 152, 2011.
3. Białoń A., Dłużniewski A., John Ł.: *Emisja zaburzeń radioelektrycznych generowanych przez tabor kolejowy*, Problemy Kolejnictwa Zeszyt nr 152, 2011.
4. Białoń A., Laskowski M.: *Poziomy zaburzeń elektromagnetycznych w sieci pokładowej niskiego napięcia pojazdów trakcyjnych i wagonów pasażerskich*. Technika Transportu Szynowego 5-6/2007.

5. CISPR/TR 16-2-5 ed1.0 Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods, Part 2-5: In situ measurements for disturbing emissions produced by physically large equipment.
6. Czuchra, W., Jakubas W., Zając W.: *Zakłócenia w obwodach torowych od pól magnetycznych pojazdów trakcyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, Czasopismo Techniczne, Elektrotechnika 2011, Tom R. 108, z. 1-E.
7. Łuszcz J., Dworakowski P.: *Destructive Consequences of PWM Inverter Feeding for Traction AC Motors*. Modern Electric Traction: Power Supply / Ed. K. Karwowski, A. Szelaąg, University of Technology Faculty of Electrical and Control Engineering, Gdańsk, University of Technology, 2009, s. 151-161.
8. Łuszcz J., Dworakowski P.: *Destructive impact of PWM inverters on traction AC motors*, Electromotion, Vol. 17, Issue. 1 (2010), s. 55-60.
9. PN-EN 50238:2003: Zastosowania kolejowe. Kompatybilność pomiędzy taborem a urządzeniami wykrywania pociągów.
10. Rowell, A.J. et al.: *Rolling stock EMC emission measurements*, EMC Assurance in a Railway Environment, IEE (Ref. No. 2003/10332), vol., no., pp.7/1,7/5, 9 Sept. 2003.

Analysis of Electromagnetic Disturbances Generated by Rolling Stocks

Summary

The paper presents the specific character of electromagnetic interference in railway applications. Methods of analysis of electromagnetic disturbances generated by track vehicles have been described. Exemplary results of analyses in time and frequency domain are compared to the results of time – frequency analysis which enable identification and the localization of disturbances sources in track vehicles. The paper indicates possible reasons of changes of levels of generated disturbances by track vehicles in their life cycle.

Keywords: electromagnetic compatibility, rolling stocks, conducted emission, interferences

Анализ электромагнитных помех сгенерированных единицами подвижного состава

Резюме

В докладе представлена характеристика электромагнитных помех в железнодорожных приложениях. Описаны методы анализа электромагнитных помех сгенерированных единицами подвижного состава. Представлены примерные результаты анализов временных рядов и частотных анализов и сравнены с результатами анализов временных рядов и частотных анализов позволяющих идентифицировать и находить источники помех в единицах подвижного состава. Указаны возможные причины изменений уровней помех сгенерированных единицами подвижного состава во время эксплуатации.

Ключевые слова: электромагнитная совместность, помехи