

Zaburzenia niskiej częstotliwości w środowisku elektromagnetycznym kolei - przepisy i zagadnienia teoretyczne stosowane w badaniach wykonywanych przez Instytut Kolejnictwa

Low-frequency disturbances in the electromagnetic environment of railways - regulations and theoretical issues used in research carried out by the Railway Institute



Juliusz Furman

Mgr inż.

Instytut Kolejnictwa
ORCID: 0000-0002-4160-3372
jfurman@ikolej.pl

Streszczenie: Zintensyfikowanie ruchu kolejowego w obszarze Unii Europejskiej wymaga stosowania urządzeń elektroenergetycznych dużej mocy. Pomimo wielu działań mitygujących związanych z modernizacją i budową nowych linii kolejowych i pojazdów kolejowych z bardziej wydajną technologią trakcyjną umożliwiającą osiągnięcie dużych prędkości i mocy pociągów następuje wzrost poziomu zaburzeń elektromagnetycznych. Zaburzenia zawarte napięciu zasilającym i w prądzie płynącym w sieci trakcyjnej i w sieci powrotnej generują zmienne pola elektryczne i magnetyczne, które oddziałują na instalacje elektryczne i elektroniczne pojazdu trakcyjnego oraz systemy elektryczne i elektroniczne instalowane wzdłuż sieci kolejowej w obszarze kolei i jak i poza tym obszarem. Pomimo wysokiego poziomu sformalizowania dobrych praktyk w zakresie projektowania urządzeń odpornych na większość zaburzeń elektromagnetycznych powstających w środowisku kolejowym nadal zdarzają się przypadki zakłóceń, które wymagają dochodzenia przyczyn ich powstania. Niniejszy artykuł zawiera szereg teoretycznych i praktycznych problemów związanych z wykazaniem właściwej odporności urządzeń na zakłócenia elektromagnetyczne niskiej częstotliwości.

Słowa kluczowe: Zakłócenia; Sprzężenia; EMC

Abstract: The intensification of rail traffic in the European Union requires the use of high-power electrical power devices. Despite many mitigation measures related to the modernization and construction of new railway lines and rail vehicles with more efficient traction technology enabling the achievement of high speeds and high power trains, the level of electromagnetic disturbances is increasing. Disturbances contained in the supply voltage and in the current flowing in the traction network and in the return network generate variable electric and magnetic fields that affect the electrical and electronic devices of the traction vehicle and the electrical and electronic systems installed along the rail network in the rail area and outside this area. Despite the high level of formalization of good practices in the design of devices resistant to most electromagnetic disturbances arising in the rail environment, there are still cases of disturbances that require investigation of their causes. This article contains a number of theoretical and practical problems related to demonstrating the proper resistance of devices to low-frequency electromagnetic interference.

Keywords: Interference; Coupling; EMC

Wstęp

Współczesne systemy kolejowe odgrywają istotną rolę w łagodzeniu zanieczyszczeniom środowiska i zatorów powodowanych przez ruch drogowy. Priorytetem obecnie opracowywanych i wdrażanych rozwiązań technologicznych w dziedzinie transportu kolejowego jest przyjazny dla środowiska sposób działania umożliwiający osiągnięcie wysokich

wskaźników zdolności przewozowych, bezpieczeństwa transportu oraz niezawodności i odporności na warunki środowiskowe. Te wyjątkowe cechy mogą zapewnić kolejowe systemy zasilania elektrycznego oraz nowoczesny tabor kolejowy, który docelowo może poruszać się z prędkościami 200-250 km/h i większymi. Osiągnięcie dużych prędkości taboru kolejowego w sieciach prądu stałego jest możliwe między innymi dzięki

wprowadzeniu technologii trakcyjnych umożliwiających utrzymanie stabilnego i wysokiego napięcia w sieci trakcyjnej, zastosowaniu lżejszych, bardziej aerodynamicznych pojazdów trakcyjnych wyposażonych w zaawansowane systemy hamulcowe i napędowe, modernizacji infrastruktury w obszarze obciążeni i prędkości oraz zastosowanie zaawansowanych systemów zarządzania ruchem kolejowym, które pozwalają na

bardziej efektywne i bezpieczne prowadzenie pociągów. Ze względu na wymagane duże moce systemu zasilania konieczne jest stosowanie pojazdów trakcyjnych wyposażonych w urządzenia energoelektroniczne dużej mocy z przekształtnikami trakcyjnymi i pomocniczymi, które pomimo określonych działań mitygujących powodują wzrost poziomu zaburzeń elektromagnetycznych. Zaburzenia zawarte w prądzie płynącym w sieci trakcyjnej i w sieci powrotnej generują zmienne pola magnetyczne, które oddziałują na instalacje elektryczne i elektroniczne pojazdu trakcyjnego oraz systemy elektryczne i elektroniczne instalowane wzdłuż sieci kolejowej. Wzrost ogólnego poziomu zaburzeń i ich wzajemne interferencje mogą zmniejszać rzeczywistą odporność urządzeń telekomunikacyjnych i automatyki kolejowej na zakłócenia. W tym kontekście wskazane jest kompleksowe ujęcie problematyki zakłóceń emc w systemie i w otoczeniu kolei. Tematem artykułu określenie wyzwań teoretycznych i praktycznych w zakresie badań i oceny oddziaływania zaburzeń generowanych w środowisku kolejowym w Polsce wynikające z doświadczeń badawczych Instytutu Kolejnictwa.

Problematyka zaburzeń elektromagnetycznych w środowisku kolejowym w literaturze

Badania elektrycznych systemów trakcyjnych ze szczególnym uwzględnieniem funkcjonalności, kompatybilności elektromagnetycznej i zakłóceń z innymi systemami elektrycznymi są przedmiotem wielu publikacji zarówno krajowych [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8] [8] jak i zagranicznych [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15]. W tym zakresie dominują zagadnienia dotyczące jakości energii w tym napięć zasilających [10], [11], [12], funkcjonowania urządzeń kondycjonujących jakość energii [3], technik przetwarzania energii, zakłóceń elektromagnetycznych [1], [2], [6], [10],

badania emc [1], [5]. Odnośnie oddziaływania systemów energetycznych i systemów zasilania trakcyjnego na systemy automatyki i systemy telekomunikacyjne opracowano szereg zaleceń i dobrych praktyk, które w tym zakresie minimalizują ich negatywne skutki [13], [17], [18].

Charakterystyka środowiska elektromagnetycznego (EM)

Teoretyczne i praktyczne podstawy regulacji w zakresie ochrony sieci telekomunikacyjnej przed szkodliwym wpływem systemów energetycznych i zelektryfikowanych linii kolejowych były przedmiotem prac Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego (International Telecommunication Union - ITU) wyspecjalizowanej agencji ONZ ds. technologii informacyjnych i komunikacyjnych. W efekcie tych prac stworzono wytyczne, zawarte w dziewięciu tomach, których celem jest kompleksowe podejście do zagadnienia ochrony sieci telekomunikacyjnej przed zjawiskami elektromagnetycznymi. Te wytyczne IUT dotyczą następujących zagadnień:

- kwestie ogólne ułatwiające zrozumienie zasad projektowania, konstruowania i eksploatacji obiektów telekomunikacyjnych, energetycznych i zelektryfikowanej kolei - tom I,
- praktyczne przykłady obliczeń indukowanych napięć i prądów - tom II,
- teoria zjawisk fizycznych i zalecane metody obliczeniowe w zakresie dotyczącym sprzężeń pojemnościowych, indukcyjnych i przewodzonych - tom III,
- informacje dotyczące indukowania prądów i napięć w zelektryfikowanych systemach kolejowych - tom IV,
- informacje dotyczące indukowania prądów i napięć w instalacjach przesyłowych i dystrybucji energii - tom V,
- wpływ indukowanych napięć i prądów na bezpieczeństwo i zakłócenia urządzeń oraz zalecane

wartości graniczne - tom VI,

- zalecane środki ochrony i środki ostrożności - tom VII,
- porady dotyczące elementów ochronnych lub złożonych urządzeń ochronnych - tom VIII,
- informacje na temat odpowiednich technik badawczych i pomiarowych - tom IX.

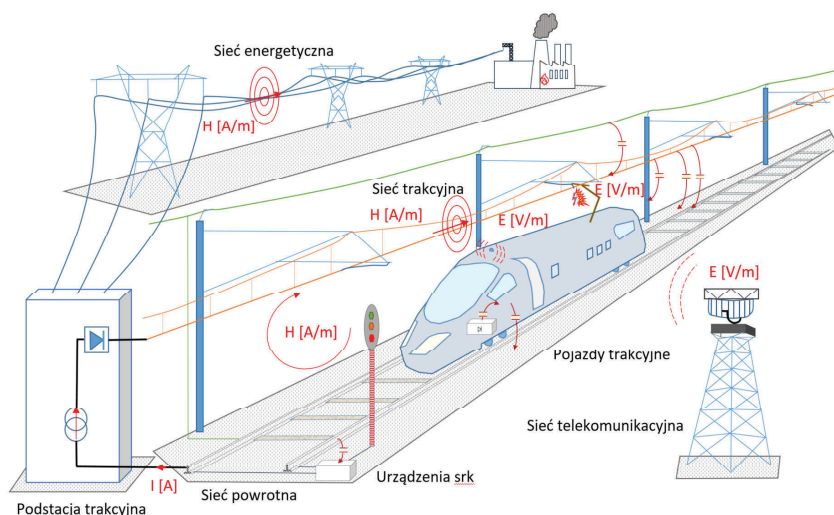
Zasady zarządzania zakłóceniami elektromagnetycznymi w systemach telekomunikacyjnych spowodowanych systemami elektroenergetycznymi zostały zawarte w rekomendacjach ITU-T Rec. K.68 (04/2008). Rekomendacje te odnoszą się do warunków instalacji systemów energetycznych i telekomunikacyjnych oraz do sytuacji, jakie należy zbadać w kontekście oddziaływania napięć sterujących systemów elektroenergetycznych i zelektryfikowanych systemów trakcyjnych prądu przemiennego i prądu stałego na systemy telekomunikacyjne.

W systemach kolejowym Unii Europejskiej zdefiniowano wymagania bezproblemowego przemieszczanie się pociągów po infrastrukturze kolejowej krajów członkowskich. Różne przytorowe i pokładowe urządzenia sterowania ruchem tworzą podsystem sterowanie którego celem jest niezawodne i bezpieczne prowadzenie ruchu kolejowego. Jego integralną częścią są systemy wykrywania pociągów, których zadaniem jest wytworzenie dostarczenie bezpiecznej informacji o zajętości określonych odcinków toru kolejowego. Systemy wykrywania pociągu są rozproszone wzdłuż linii kolejowych i są narażone na oddziaływania elektromagnetyczne środowiska kolejowego. W kontekście zapewnienia interoperacyjności stosowana jest zasada zarządzania częstotliwością określona w dokumencie ERA/ERTMS/033281 [23]. Zarządzanie częstotliwością opiera się na integracji znanych i preferowanych poziomów odporności systemów wykrywania pociągu w połączeniu z emisjami taboru kolejowego. Wśród systemów wykrywania

pociągu wyróżnia się obwody torowe, liczniki osi oraz pętle indukcyjne.

Obwody torowe wykorzystują szyny jako część ich obwodu detekcji pociągu. Szyny są jednocześnie siecią powrotną prądu trakcyjnego do podstacji. Specyfikacja PN-EN 50617-1 [17] określa parametry techniczne obwodów torowych związane z limitami emisji prądu zakłócającego dla taboru kolejowego. Norma podaje wartości graniczne dla zapewnienia kompatybilności między taborem kolejowym a obwodami torowymi w warunkach występowania typowych zjawisk zakłócających związanych z zasilaniem trakcyjnym (przebiegi, prąd zwarciaowy i podstawowe efekty przejściowe: rozruch, wyłączenia zasilania) i zaleca stosowanie powiązanych z nimi zabezpieczeń. Norma podaje wartości graniczne dla zapewnienia kompatybilności między taborem kolejowym a obwodami torowymi w warunkach występowania typowych zjawisk zakłócających związanych z zasilaniem trakcyjnym (przebiegi, prąd zwarciaowy i podstawowe efekty przejściowe: rozruch, wyłączenia zasilania) i zaleca stosowanie powiązanych z nimi zabezpieczeń. W rozdziale dotyczącym EMC dokument ten zaleca przeprowadzenie badań odporności urządzeń wykrywania pociągu w warunkach laboratoryjnych na typowe zakłócenia spotykane w warunkach docelowej eksploatacji w zakresie pól elektromagnetycznych, zakłóceń radiowych i przepięć generowanych poprzez eksploatowany system kolejowy i generowanych pośrednio w efekcie wyładowań atmosferycznych. Sposoby pomiaru zaburzeń zawartych w prądzie trakcyjnym zawarte są w specyfikacjach PN-EN 50238-1 [19] i CLC/TS 50238-2 [20]. W zakresie dotyczącym ochrony przed przepięciami w planie zarządzania uziemieniami zaleca się stosowanie wymagań normy PN-EN 50124-2 [22].

Czujniki koła stosowane w licznikach osi z zasady są mocowane do szyn i nie są z nimi galwanicznie połączone. Czujniki te wytwarzają pola



1. Źródła zakłóceń elektromagnetycznych w środowisku kolejowym (opracowanie własne)

magnetyczne, które reagują na obecność i przemieszczanie się mas metalowych po szynach. Specyfikacja PN-EN 50617-1 [18] określa parametry techniczne liczników osi związane z limitami emisji pola magnetycznego dla taboru kolejowego. Sposób pomiaru pól magnetycznych powinien być zgodny z zaleceniami specyfikacji PN-EN 50238-1 [19] i CLC/TS 50238-3 [21].

Podstawą działania pętli indukcyjnej, jest zjawisko prądów wirowych w masach metalowych, które przemieszczają się w zmiennym polu magnetycznym pętli. Pętle indukcyjne zmieniają indukcyjność pola elektromagnetycznego pod wpływem znajdujących się nad nią pojazdów. Tę zmianę można obserwować na zaciskach pętli jako zmianę w zachowaniu elektrycznego np.: zmiany amplitudy, fazy, częstotliwości rezonansowej) itp.. Zawarta w dokumencie ERA/ERTMS/033281 [23] metoda pomiarowa sprawdzenia poprawności zgodności pojazdu z pętlami zawiera graniczne wartości względnych zmian indukcyjności pętli podczas przejazdu pojazdu kolejowego.

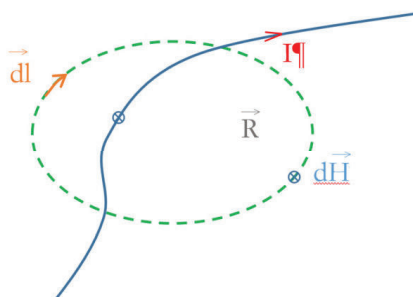
Podstawy teoretyczne

Zakłócenia elektromagnetyczne definiuje się jako zjawisko, w którym pole elektromagnetyczne (oddziałuje z innym, powodując zniekształcenie obu pól. Sprzężenie elektromagnetyczne między źródłem zaburzeń a

systemem poddanym zakłóceniom jest przedstawiane więc jako transfer energii wynikający z wzajemnego powiązania obu pól elektromagnetycznych, który modyfikuje cechy fizyczne i wydajność tych systemów [10].

Zakłócenia elektromagnetyczne i kompatybilność elektromagnetyczna odgrywają znaczącą rolę w ogólnej wydajności systemów zasilania trakcyjnego i sygnalizacji. Zakłócenia elektromagnetyczne w systemie zasilania trakcyjnego mogą objawiać się powstawaniem prądu/napięcia, sprzężenia pola elektrycznego/magnetycznego i można je podzielić na cztery typy oddziaływania: przewodzone, indukowane, elektrostatyczne i promieniowane [10], [11]. Na Rys. 1 przedstawiono różne oddziaływania zakłóceń elektromagnetycznych między systemami zasilania, infrastrukturą i środowiskiem otaczającym. Te zakłócenia elektromagnetyczne są znane jako:

- napięcie zakłóceń indukowanych spowodowane sprzężeniem indukcyjno-pojemnościowym trójfazowych linii przesyłowych sieci energetycznej prądu przemianowego w pobliżu sieci trakcyjnej i podstacji trakcyjnych,
- indukowane napięcie interferencyjne przez sprzężenie indukcyjne/pojemnościowe przewodów sieci trakcyjnej,
- przewodzone zakłócenia między szynami a systemami sygnaliza-



2. Powiązanie natężenia pola magnetycznego z prądem płynącym przez przewodnik

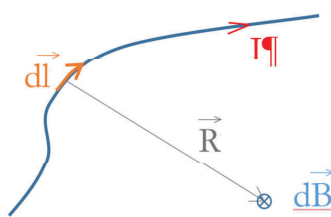
- cyjnymi/obwodami torowymi, zakłócenia indukowane/wypromieniowane powodowane przez wyładowania łukowe pantografu.

Sprężenie indukcyjne polega na oddziaływaniu sąsiadujących obwodów poprzez ich indukcyjność wzajemną. Kabel przewodzący prąd emituje do otoczenia zakłócenie w postaci pola magnetycznego. Jeśli w pobliżu znajdzie się zamknięta pętla obwodu elektrycznego to przejmuje część energii tego pola magnetycznego.

Sprężenie pojemnościowe polega na indukowaniu ładunków w obwodzie zakłócanym na skutek zmiennego, zewnętrznego pola elektrycznego. Natężenie pola elektrycznego jest proporcjonalne do napięcia i powierzchni oddziaływujących na siebie obiektów oraz odwrotnie proporcjonalne do odległości pomiędzy nimi.

Sprężenie przewodzone występuje wówczas, gdy różne obwody mają wspólne impedancje. Tak jest w przypadku uziemień obiektów, których istotą jest odniesienie do odległej ziemi w oddalonej o kilometry.

Sprężenie promieniowane dotyczy pól elektromagnetycznych o dużych częstotliwościach, które łatwo rozchodzą się (ulegają propagacji) na duże odległości – fale radiowe, fale telefonii komórkowej jak również zaburzenia impulsowe takie jak: wyładowania atmosferyczne czy też utrata kontaktu odbieraka prądu z siecią trakcyjną.



3. Powiązanie indukcji pola magnetycznego z prądem płynącym przez przewodnik

Sprężenie indukcyjne

Wielkością fizyczną, która charakteryzuje pole magnetyczne jest natężenie pola magnetycznego \vec{H} .

Całka okrężna wektora natężenia pola magnetycznego wzdłuż dowolnego zamkniętego konturu linii wokół przewodnika z prądem jest równa natężeniu prądu płynącego przez ten przewodnik opisana wzorem (1) i przedstawiona na Rys. 2:

$$I = \oint \vec{H} \, dl \quad (1)$$

Gęstość linii sił pola magnetycznego jest związana są przenikalnością magnetyczną ośrodka, w którym się znajduje. Wielkością, która wiąże natężenie pola magnetycznego \vec{H} z przenikalnością magnetyczną ośrodka jest wektorowa wartość indukcji magnetycznej \vec{B} . Zależność jest opisana wzorem (2) i przedstawiona na Rys. 3.

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (2)$$

gdzie:

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni, równa $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m}/\text{A} \approx 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ T}\cdot\text{m}/\text{A}$.

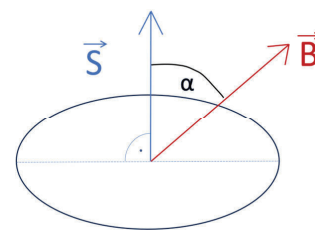
μ - względna przenikalność magnetyczna ośrodka. W powietrzu bliska 1. Zgodnie z prawem Biota-Savarta wkład do wektora pola magnetycznego $d\vec{B}$, którego źródłem jest odcinek dl linii do długości dl z prądem I , w punkcie odległym o R od tego odcinka wyraża się wzorem:

$$d\vec{B} = I \times \frac{\mu_0}{4\pi} \times \frac{d\vec{l} \times \vec{R}}{R^3} \quad (3)$$

gdzie:

I – prąd przewodnika

μ_0 – stała dielektryczna próżni



4. Strumień magnetyczny przepływający przez powierzchnię S

$d\vec{l}$ - jest wektorem o kierunku zgodnym z kierunkiem prądu płynącego przez odcinek przewodnika o długości dl

$d\vec{R}$ - jest wektorem wodzącym od odcinka przewodnika z płynącym prądem do miejsca, dla którego określana jest wartość indukcji pola magnetycznego.

$d\vec{B}$ - jest wektorem indukcji pola magnetycznego.

W uproszczeniu odcinek długiego przewodu wytwarza w odległości R pole magnetyczne o natężeniu B

$$B = I \times \frac{\mu_0}{2\pi R} \quad (4)$$

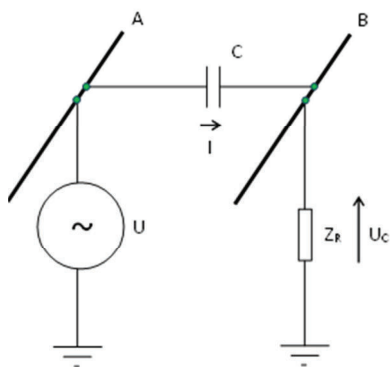
Linie sił pola magnetycznego objęte powierzchnią S (ograniczoną przez zamknięty obwód elektryczny) tworzą strumień magnetyczny Φ_B zgodnie ze wzorem (5) i Rys. 4.

$$\Phi_B = \int \vec{B} \times d\vec{S} = \int B \times dS \times \cos \alpha \quad (5)$$

Zmiana strumienia magnetycznego przepływającego przez powierzchnię S ograniczoną przez zamknięty obwód elektryczny, na który oddziałuje pole magnetyczne długiego odcinka z prądem jest źródłem siły elektromotorycznej ϵ zgodnie z wzorem (6). Zaindukowane napięcie zakłóca pracę tego obwodu elektrycznego.

$$\epsilon = \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (6)$$

Zmiana strumienia magnetycznego może być powodowana obecnością harmonicznymi zawartych w prądzie sieci trakcyjnej i powrotnej generującego zmienne pole magnetyczne.



5. Schemat układu opisującego mechanizm sprzężenia pojemnościowego dwu przewodów

Sprężenie pojemnościowe

Efekt występowania zmiennego pola elektrycznego pomiędzy przewodami prowadzonymi w niewielkiej odległości, z których każdy może być traktowany jako okładka kondensatora. Powoduje to powstanie na impedancji Z_r napięcia zakłóceń o wartości U_c . W przypadku sprzężenia pojemnościowego, następuje przepływ prądu I , którego wartość jest określona wzorem (7).

Schemat układu opisującego mechanizm sprzężenia pojemnościowego dwu przewodów przedstawiono na Rys. 5.

$$I = \frac{U}{Z_C + Z_R} \quad (7)$$

$$U_C = \frac{U \times Z_R}{Z_C + Z_R} \quad (8)$$

W praktyce, wyznaczenie wartości prądu wpływającego poprzez pojemność pasozytniczą do połączenia zakłócanego nie wymaga znajomości natężenia pola elektrycznego. Znając wartość pojemności sprzęgającej pomiędzy zakłócającymi się

przewodami możemy zapisać

$$I = 2 \pi f C U \quad (9)$$

lub inaczej

$$I = C \frac{du}{dt} \quad (10)$$

gdzie:

I – prąd zakłócający [A]

f – częstotliwość napięcia [Hz]

C – pojemność sprzęgająca pomiędzy obwodami [F]

U – napięcie zakłócające [V]

du – wartość międzyszczytowa napięcia zakłócającego [V]

dt – czas narastania napięcia zakłócającego od 10% do 90% [s].

Pojemność pomiędzy parą przewodów można traktować jako kondensator płaski. W przypadku kondensatora płaskiego, czyli najprostszego do analizy układu, pojemność jest określona wzorem (11):

$$C = \frac{\epsilon_w \times \epsilon_0 \times S}{d} \quad (11)$$

gdzie: C – pojemność kondensatora płaskiego

ϵ_w – przenikalność dielektryczna względna

ϵ_0 – przenikalność dielektryczna próżni (8,86 10⁻¹² F/m.)

S – pole powierzchni elektrod

d – odległość pomiędzy elektrodami

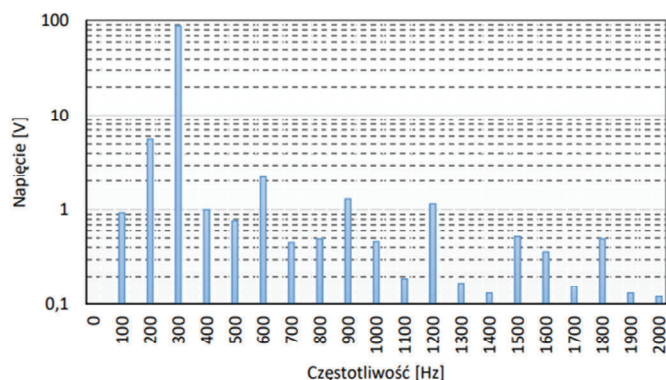
W zakresie wysokich częstotliwości i wysokich napięć odległość wpływu odniesienia powinna wynosić 100 m tylko wtedy, gdy zarówno linia indukowana, jak i indukująca znajdują się

w powietrzu i nie są ekranowane [14]. We wszystkich innych sytuacjach sprzężenie pojemnościowe jest zaniedbywane. W zakresie częstotliwości akustycznych ze względu na małą pojemność i dużą reaktancję ten wpływ można pominąć. Sprężenia pojemnościowe należy uwzględniać w propagacji innych typów sprzężeń (zamykają pętle zakłócanych obwodów) w szczególności w sprzężeniu indukcyjnym i przewodnym. W modelu sieci powrotnej prądu trakcyjnego istotny jest wkład rozproszonych pojemności wzdłuż torów kolejowych, które wprowadzają wyższe harmoniczne prądów trakcyjnych do ziemi.

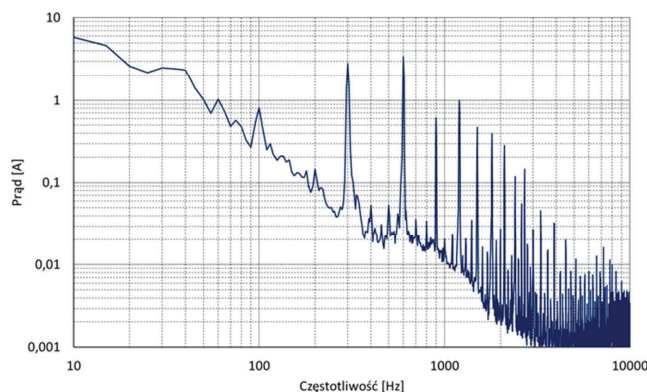
Przykład wartości skutecznych harmonicznych zawartych w napięciu wyjściowym 12-pulsowej podstacji trakcyjnej przedstawiono w pracy [2] i na Rys. 6.

Sprężenie przewodzone

Cechą charakterystyczną obiektów kolejowych jest rozproszone rozmieszczenie elementów infrastruktury i połączeń elektrycznych pomiędzy nimi. W nieelektryfikowanej sieci kolejowej połączenia takie stanowią tory kolejowe sieci, linie energetyczne, telekomunikacyjne, automatyki kolejowej i przemysłowej, zasilania elektrycznego budynków i urządzeń kolejowych związanych z prowadzeniem działalności eksploatacyjnej. Dodatkowo w zelektryfikowanej sieci kolejowej pojawiają się linie i podstacje energetyczne i trakcyjne a tory kolejowe stanowią element



6. Przykład wartości skutecznych harmonicznych zawartych w napięciu wyjściowym 12-pulsowej podstacji trakcyjnej (oszacowane na podstawie danych literaturowych [2])



7. Przykład zakłóceń generowanych do sieci trakcyjnej przez pojazd trakcyjny – harmoniczne zawarte w paśmie od 10 Hz do 10kHz (opracowanie własne na podstawie rzeczywistych pomiarów)

sieci powrotnej przewodzącej prąd trakcyjny. W sprzężeniu przewodowym prąd (uziemia obiektu, prąd powrotny w torze, prąd upływający z toru kolejowego do ziemi rozproszony wzdłuż linii kolejowej) pochodzący od jednego źródła oddziałuje poprzez wspólne impedancje na inne obiekty i urządzenia zainstalowane w torze lub w otoczeniu linii kolejowej [2]. Przy obliczaniu granicznej odległości oddziaływania, przy której należy uwzględnić narażenie na zakłócenia dla sprzężenia przewodzącego należy uwzględnić rezystywność powierzchniowej warstwy gruntu, w której osadzony jest układ elektrod uziemiających (siatki) obiektu. Specyfikacja [14] podaje w sposób tabelaryzowany maksymalne odległości od różnych typów obiektów, które można pominąć w analizie źródeł wnoszących zakłócenia do obiektów telekomunikacyjnych.

Dla urządzeń sterowania ruchem instalowanych w torze opracowane są wymagania dotyczące granicznych poziomów zakłóceń zawartych w prądzie trakcyjnym. Wymagania te udostępnia zarządca infrastruktury kolejowej, a kolejowy organ do spraw bezpieczeństwa przedstawia je jako przepisy krajowe. Przykład zakłóceń w paśmie częstotliwości od 10 Hz do 10 kHz generowanych w prądzie trakcyjnym łącznie przez pojazd i podstację trakcyjną przedstawiono na Rys. 7.

Sprzężenia pola elektromagnetycznego z przewodem

Sprzężenia pola elektromagnetycznego z przewodem należą do oddziaływań promieniowanych. Podstawowe harmoniczne pola elektrycznego i magnetycznego generowane przez sieci energetyczne i trakcyjne mieszczą się w paśmie od 0 Hz do częstotliwości akustycznych (20 Hz - 20 kHz). Pola sygnałów o takich częstotliwościach mają długie fale (30 km przy częstotliwości 10 kHz i około 6000 km przy częstotliwości 50

Hz) i są uważane za pola, a nie promieniowanie, ponieważ ich energia nie jest emitowana daleko od źródła. Oznacza to, że pola elektryczne i magnetyczne mają niezależne charakterystyki i dlatego muszą być szacowane lub mierzone osobno. Jeżeli odległość pomiędzy przewodami zakłócającym i zakłócanym jest większa niż 1/10 długości fali to emitowane pole elektromagnetyczne może oddziaływać na drugi przewód [6]. Poprzez mechanizm utworzenia wtórnego pola elektromagnetycznego drugi przewód oddziałuje na pierwotne pole. Propagacja fali elektromagnetycznej zależy od częstotliwości sygnału, geometrii przewodu oraz przeszkód tłumiących (przewodzących i nieprzewodzących). Pola elektryczne są łatwo blokowane przez materiały stałe, w tym budynki i drzewa. Dlatego poziomy pól elektrycznych o częstotliwościach roboczych sieci zasilającej i trakcyjnej, są bardzo niskie i generalnie nie stanowią problemu dla bezpieczeństwa ludzi i urządzeń. Natomiast pola magnetyczne dla tych częstotliwości nie są tak łatwo ekranowane ale szybko zanikają wraz ze wzrostem odległości od źródła. Fala elektromagnetyczna podlega rozproszeniu na przeszkodach (zjawisko ugięcia fali) i zanika z powodu pochłaniania energii przez cząsteczki atmosfery. Fale elektromagnetyczne o częstotliwości mniejszej niż 10 kHz i długości powyżej 30 km muszą podlegać rozproszeniu a ich potencjalny wpływ na linie przewodzące jest nieznaczny.

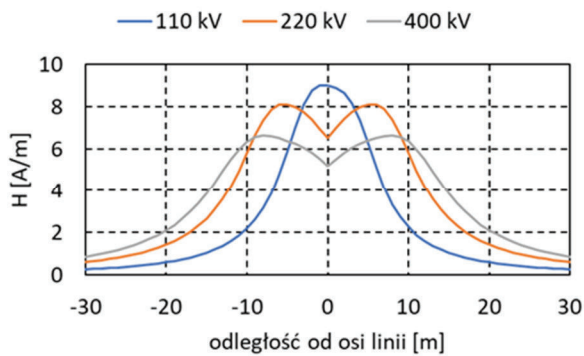
Zjawiska rezonansowe

Najtrudniejszą do zidentyfikowania przyczyną występowania zakłóceń urządzeń sterowania ruchem kolejowym są zjawiska rezonansowe wynikające z obecności rozproszonych indukcyjności wzdłużnych oraz pojemności doziemnych i międzyprzewodowych oraz charakterystyk reaktancyjnych urządzeń połączonych galwanicznie z torem i siecią trakcyjną [10]. Zjawiska rezonansowe mogą

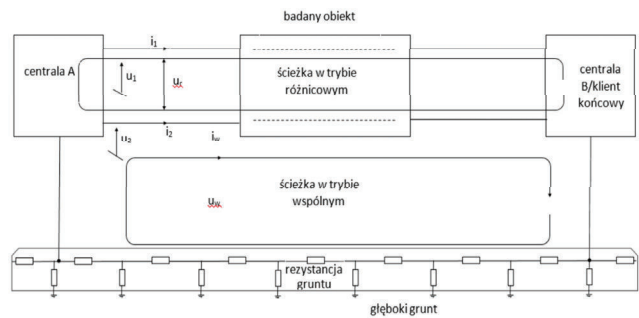
w sposób istotny zwiększyć poziomy zakłóceń w torach kolejowych. Rozróżnia się dwa typy rezonansów szeregowy i równoległy. Rezonans równoległy jest najczęściej identyfikowany jako przyczyna zakłóceń urządzeń kolejowych. Powstawanie warunków do wystąpienia rezonansu równoległego przypisywane jest sieci trakcyjnej z jej wieloprzewodową konstrukcją, z indukcyjnym charakterem przewodów oraz ich pojemnością doziemną i z torami kolejowymi. Rezonans szeregowy przypisywany jest udziałowi wyposażenia podstacji trakcyjnych i pojazdu – filtrów, kondycjonerów sygnału zasilającego, które razem z siecią trakcyjną i powrotną tworzą obwody rezonansowe. Rezonans szeregowy rzadko jest identyfikowany jako przyczyna zakłóceń ponieważ już w trakcie projektowania pojazdu lub linii kolejowej uwzględnia się odpowiednio charakterystyki urządzeń przytorowych lub urządzeń zasilania pojazdu. Tym niemniej w praktyce zdarzają się przypadki zakłóceń rezonansowych. Przepisy określające dopuszczalne poziomy zakłóceń na urządzenia automatyki kolejowej z zasady uwzględniają zakłócenia przypisane wyłącznie podstawowym rodzajom sprzężeń. Metody badawcze w tym zakresie powinny umożliwić wyodrębnianie pierwotnych źródeł zakłóceń, przypisywanych do poszczególnych rodzajów sprzężeń, w kontekście indukowania zjawisk rezonansowych zakłócających pracę urządzeń. Wykrycie niewłaściwego działania urządzeń sterowania ruchem kolejowym z powodu zjawisk rezonansowych może wymagać zmiany konfiguracji wyposażenia torowego (np. poprzez dobór zmianę na inne urządzenie o innej częstotliwości roboczej).

Pole elektryczne i magnetyczne wokół linii elektroenergetycznych i sieci trakcyjnych

Linie elektroenergetyczne stanowią najważniejsze źródło zakłóceń pola elektromagnetycznego w o częstotli-



8. Przykłady rozkładu amplitud natężenia pola magnetycznego pod liniami 110 kV, 220 kV i 400 kV obliczone metodą symulacyjną (opracowanie własne)



9. Mechanizm indukowania szumu zakłócającego w obiektach telekomunikacyjnych

wości 50 Hz. Przewody fazowe mają pewien potencjał względem ziemi oraz przepływa przez nie prąd roboczy. Natężenie pola magnetycznego jest uzależnione od przepływającego prądu natomiast napięcie w przewodach linii energetycznych decyduje o wartości natężenia pola elektrycznego. Na rozkłady natężeń PE i PM pod liniami ma wpływ sposób prowadzenia przewodów: wysokość nad ziemią, odległość między przewodami, średnica. Istnieje wiele sposobów analitycznego wyznaczania natężenia pola elektrycznego pod liniami dla ich częstotliwości roboczych [7], [8] wykonywanych dla zapewnienia bezpieczeństwa zdrowotnego ludzi. Przykład algorytmu wykorzystującego metodę odbić zwierciadlanych i zasadę superpozycji podany jest w pracy [7]. W rozpatrywanym modelu przyjęto pewne uproszczenia:

- przewody linii energetycznych są prostoliniowe, nieskończenie długie, o przekroju walca, równoległe względem siebie i ziemi;
- otaczające powietrze ma przenikalność dielektryczną próżni i przewodność równą zeru;
- brak w napięciu harmonicznych częstotliwości innych niż robocza,
- brak sprzężeń między przewodami, między przewodami a ziemią i innymi obiektami.

Z powodu przesunięcia w czasie napięć na poszczególnych przewodach fazowych pole elektryczne pod linią jest superpozycją dwóch pól wirujących \vec{E}_1 i \vec{E}_2 w przeciwnych kierunkach z prędkością kątową ω :

$$\vec{E}(x, y, t) = \sqrt{2}\vec{E}_1(x, y)e^{j\omega t} + \sqrt{2}\vec{E}_2(x, y)e^{-j\omega t} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_1(x, y) &= 0,5[\vec{E}_y(x, y) + 0,5[\vec{E}_x(x, y)]] = \\ &= E_1(x, y)e^{-j\beta_1\omega t} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_2(x, y) &= 0,5[\vec{E}_y^*(x, y) + \vec{E}_x^*(x, y)] = \\ &= E_2(x, y)e^{-j\beta_2\omega t} \end{aligned} \quad (14)$$

gdzie:
 \vec{E}_x^* , \vec{E}_y^* – liczby sprzężone do \vec{E}_x , \vec{E}_y (składowa pionowa (OX) i pozioma (OY)),

a suma kątów $\beta_1(x, y)$ i $\beta_2(x, y)$ jest stała i wynosi:

$$\beta_1(x, y) + \beta_2(x, y) = \beta(x, y) \quad (15)$$

$\beta(x, y)$ jest kątem nachylenia elipsy nakreślonej przez wektor natężenia pola elektrycznego.

Podobną metodę zastosowano do obliczenia wartości natężenia pola magnetycznego [7].

W opracowanym własnym narzędziu symulacyjnym z uproszczonym modelem rozkładu magnetycznych pomijającym pojemnościowe sprzężenia przewodów fazowych pomiędzy sobą oraz z przewodem ochrony odgromowej w Instytucie Kolejnictwa wykonano symulacje rozkładu natężeń pola magnetycznego dla linii 110 kV, 220 kV i 400 kV w odległości 2 m od ziemi dla prądów fazowych 250 A i określonej konfiguracji prowadzenia przewodów. W modelu do symulacji rozkładu pola magne-

Tab. 1. Konfiguracja linii zasilających zastosowana do symulacji rozkładu pola elektrycznego i magnetycznego

Przewód	Przekrój przewodu [mm ²]	Odległość od osi linii [m]	Wysokość nad ziemią [m]
Linia 110 kV na słupach serii S24			
L1	240	-2,65	5,85
L2	240	2,85	9,15
L3	240	3,65	5,85
Odgr.	95		12,15
Linia 220 kV na słupach serii H52			
L1	525	-7,60	6,70
L2	525	0,00	6,70
L3	525	7,60	6,70
Odgr. 1	70	-5,60	10,80
Odgr. 2	70	5,60	10,80
Linia 400 kV na słupach serii Y52 (podwójne przewody fazowe oddalone o 0,4 m)			
L1	2x525	-10,30	7,80
L2	2x525	0,00	7,80
L3	2x525	10,30	7,80
Odgr. 1	70	-8,20	13,70
Odgr. 2	70	8,20	13,70

tycznego zsumowano przyczynki składowych poziomych i pionowych wnoszone przez poszczególne przewody fazowe a następnie za pomocą sumowania geometrycznego wyznaczono przebiegi amplitud pola w czasie. Wartości maksymalne amplitud pola magnetycznego zostały użyte do sporządzenia odpowiednich wykresów. Wyniki przeprowadzonych symulacji przedstawiono na Rys. 8. Konfiguracja linii zasilających zastosowana do symulacji rozkładu magnetycznego przedstawiona została w Tab. 1. Opracowany model powinien być zweryfikowany pomiarami w warunkach terenowych.

Odpowiednie modele obliczeń pól magnetycznych i elektrycznych w otoczeniu zelektryfikowanych linii kolejowych powinny być utworzone w celu zobrazowania cech tego środowiska elektromagnetycznego. W tym zakresie należy uwzględnić konstrukcję sieci trakcyjnej, sieci powrotnej, liczbę torów oraz parametry napięcia i prądu trakcyjnego z uwzględnieniem harmonicznych zawartych w tych sygnałach.

Oddziaływanie zakłóceń na instalacje telekomunikacyjne i automatyki kolejowej

Zagadnienia teoretyczne dotyczące mechanizmu sprzężenia indukcyjnego generującego zakłócenia w instalacjach telekomunikacyjnych zostały szczegółowo opisane w wytycznych i rekomendacjach ITU [15]. W środowisku elektromagnetycznym, między czynnymi przewodami instalacji telekomunikacyjnych a galwanicznie połączonym przewodem odniesienia (uziemieniem lub innym wspólnym przewodnikiem) może pojawić się indukowane napięcie i prąd. Zakłócenie to, zwane zakłóceniem w trybie wspólnym (asymetrycznym), rozchodzi się w sieci wzdłuż metalowych struktur przewodów (pary przewodów, osłony, uziomy) i indukuje napięcia nałożone na użyteczne sygnały. Za szum uznaje się niepożądany sygnał elektryczny o częstotliwości

mniejszej niż 200 kHz [10]. Taki szum zakłócający pracę urządzeń może być spowodowany przez jedno lub więcej z następujących zjawisk [15]:

- konwersja sygnałów z trybu wspólnego na tryb różnicowy (wprowadzanych wzdłuż przewodów) z powodu asymetrii linii, terminala, urządzeń przełączających i innych urządzeń,
- nasycenie obwodów zasilania, filtra kodera/dekodera sygnałów,
- kwantyzacja zniekształceń napięcia w trybie różnicowym - wytwarzana przez asymetrię,
- intermodulacja między sygnałem o częstotliwości podstawowej a sygnałem zaburzenia.

Asymetria dotyczy impedancji i admitancji, które mogą być rozmieszczone wzdłuż linii lub skoncentrowane w porcie wejściowym sprzętu. Gdy zakłócenie w trybie wspólnym zostanie odłożone na asymetrii, wygeneruje źródło różnicowe (generator szumów).

Mechanizm indukowania szumu obiektach telekomunikacyjnych trybach wspólnym i różnicowym zobrazowany jest na Rys. 9. Istnienie takiego mechanizmu generowania zakłóceń taki można rozszerzyć na obiekty systemów automatyki kolejowej z rozproszoną lokalizacją urządzeń połączonych za pomocą kabli przewodzących prąd.

Zależność napięć i prądów sygnałów zakłócających w trybie wspólnym u_w i i_w i różnicowym u_r przedstawiono za pomocą wzorów (16), (17) i (18).

$$u_r = u_1 - u_2 \quad (16)$$

$$u_w = \frac{u_1 + u_2}{2} \quad (17)$$

$$i_w = i_1 + i_2 \quad (18)$$

W połączeniu różnicowym prąd płynie jednym przewodem i_1 i powraca innymi przewodami i_2 płynąc w przeciwnym kierunku. Zasilanie oraz sygnały w dwuprzewodowych połączeniach układów elektronicznych są

przesyłane różnicowo. Użyteczne napięcie różnicowe ur mierzy się między przewodami wejść aktywnych układu. W ten sam sposób można zmierzyć również napięcie zakłóceń. Ponieważ przewody łączy dwuprzewodowego zwykle położone są blisko siebie i nie przebiegają w bezpośrednim sąsiedztwie linii zasilających i kolejowej sieci trakcyjnej, zakłócenia różnicowe nie powinny wnikać do sygnału użytecznego. W takim przypadku zakłócenia różnicowe są pomijane.

W zakresie częstotliwości akustycznych wartość zaindukowanych napięć w istotny sposób zależy od rezystywności głębokich warstw gruntu (od kilkuset do kilku tysięcy metrów) co ma kluczowe znaczenie ze względu na głęboką penetrację prądów niskich częstotliwości w ziemi. W tym zakresie istotne jest rozróżnienie między środowiskiem zurbanizowanym, z gęstym występowaniem podziemnych konstrukcji przewodzących prąd, i wiejskim z niską gęstością konstrukcji metalowych pozostających w bezpośrednim kontakcie elektrycznym z glebą. Prądy upływające do ziemi od obiektów zasilania i obiektów trakcyjnych zmieniają potencjał uziemień bliskich obiektów.

Operator systemów trakcji prądu przemiennego zobowiązany jest do udostępnienia wartości wszystkich istotnych harmonicznych prądu, biorąc pod uwagę rezonans układu, pojemność systemu oraz uwzględniając każdy elektryczny pojazd kolejowy jako źródło prądu. Alternatywnie, operator trakcji podaje wartość prądu psofometrycznego przy czym należy uwzględnić ilość pociągów w obrębie sekcji zasilania i scenariusz poboru prądu podstacji przez te pociągi.

W systemach trakcji prądu stałego, w odniesieniu do sprzężenia indukcyjnego, prądy indukujące są zarówno:

- prądem tętnienia wynikającym z prostowania, ocenianym (za pomocą obliczeń lub pomiarów) w najgorszych warunkach pracy

(na przykład podczas konserwacji instalacji),

- prąd wynikający ze wzorca obciążenia składami pociągów.

Podmiot zarządzający trakcją musi podawać takie wartości. Sposób przeprowadzenia pomiarów prądu psofometrycznego w prądzie trakcyjnym określa specyfikacja [16].

Rekomendacje [14] definiują pojęcia napięcia lub prądu psofometrycznego na linii telefonicznej (trybach wspólnym lub różnicowym), U_p lub I_p , które określa się wyrażeniem:

$$U_p = \frac{1}{p_{800}} \times \sqrt{\sum(p_f \times U_f)^2} \quad [V] \quad (19),$$

$$I_p = \frac{1}{p_{800}} \times \sqrt{\sum(p_f \times I_f)^2} \quad [A] \quad (20),$$

w którym:

U_f lub I_f jest składową o częstotliwości f odpowiednio napięcia lub prądu, p_f wynosi współczynnik ważkości dla tej częstotliwości, odzwierciedlający reakcję ucha ludzkiego na tę częstotliwość, określony w tabeli załącznika I do rekomendacji ITU-T Rec. K.68 (04/2008) [14].

Tabela w dodatku I [14] podaje wartości p_f dla różnych częstotliwości, gdy p_{800} jest umownie równe 1000.

Wartość graniczna napięcia psofometrycznego indukowanego między parą przewodów łączących dwie centrale telekomunikacyjne, wytwarzanego w normalnych warunkach eksploatacyjnych łącznie przez wszystkie linie energetyczne i trakcyjne wynosi 0,5 mV na dowolnym zacisku indukowanej instalacji telekomunikacyjnej [14]. Przekroczenie tej wartości granicznej może pogorszyć jakość usługi głosowej oferowanej przez zakłócaną instalację telekomunikacyjną. Dopuszczalna wartość indukowanego wzdłużnego napięcia psofometrycznego na dowolnym zacisku linii telekomunikacyjnej wynosi 200 mV [14]. W przypadku zakłóceń elektromagnetycznych pochodzących od sieci trakcyjnej gdy indukowane napięcie psofometryczne jest większe niż wartość graniczna 0,5

mV, ale niższe niż 2,5 mV to szum jest dopuszczalny, jeżeli w dowolnym przedziale czasu trwającym do jednej minuty suma iloczynów wartości napięcia psofometrycznego większego niż 0,5 mV i adekwatnego czasu ich trwania ($[s]$) jest mniejsza lub równa 30 mV.

Badania środowiska elektromagnetycznego

Ocena aktualnego stanu środowiska elektromagnetycznego dotyczy wartości natężenia pola elektromagnetycznego zaburzeń elektromagnetycznych pochodzących od pojazdów trakcyjnych, w tym nowoczesnych lokomotyw poruszających się na szlaku, promieniowania sieci trakcyjnej, poziomu zaburzeń radioelektrycznych oraz przepięć w energetycznej sieci zasilania i obiektów stacjonarnych w pokładowej sieci zasilania pojazdów trakcyjnych oraz wagonów pasażerskich. Przegląd wykonywanych w tym zakresie badań przez personel badawczy Instytutu Kolejnictwa przedstawiono w pracy [1].

Przeprowadzenie badań kompatybilności elektromagnetycznej nowoczesnych lokomotyw i innych pojazdów szynowych jest bardzo ważne, z uwagi na możliwość negatywnego oddziaływania na urządzenia sterowania ruchem kolejowym oraz urządzenia w otoczeniu obszaru kolejowego, co może mieć bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo ruchu kolejowego, ale również na systemy i urządzenia użytku publicznego.

W sytuacjach wymagających dochodzenia przyczyn zakłóconego działania urządzeń automatyki kolejowej i urządzeń telekomunikacyjnych i urządzeń użytku publicznego w otoczeniu kolejowym prowadzi się analizy i pomiary wartości zaburzeń wnoszonych do zakłóconych systemów i urządzeń. Jest to wiedza ekspercka, wymagająca dużego doświadczenia i znajomości zasad konstrukcji urządzeń i systemów kolejowych, specyfiki warunków

technicznych i środowiskowych w systemie kolejowym. Pracownicy Instytutu Kolejnictwa posiadają w tym zakresie wyjątkowe doświadczenie i kompetencje wynikające z wieloletniej pracy na rzecz systemów kolejowych.

W dochodzeniu przyczyn zakłóceń systemów i urządzeń automatyki kolejowej w warunkach rzeczywistej eksploatacji należy przeprowadzić według stosownego planu działań. Plan takich działań powinien obejmować przynajmniej następujące czynności:

- przeprowadzenie wywiadu odnośnie czasu i miejsca występowania powtarzalnych zdarzeń,
- identyfikacja urządzeń ofiar zakłócenia elektromagnetycznego i ich charakterystyk roboczych,
- pomiary wielkości zaburzeń w zasilaniu i sygnałach roboczych ofiar zakłócenia elektromagnetycznego,
- w przypadku stwierdzenia istnienia zaburzeń w zasilaniu i/lub sygnałach roboczych ofiary zakłócenia zidentyfikowanie źródła zakłóceń,
- wdrożenie działań naprawczych.

Poszczególne działania powinny być dokumentowane w celu stworzenia bazy informacyjnej dobrych praktyk w zakresie dochodzenia przyczyn zakłóceń elektromagnetycznych w środowisku kolejowym.

Wnioski

Wiedza dotycząca propagacji zakłóceń w środowisku kolejowym i w otoczeniu kolei powinna być w miarę możliwości powszechna i nie może się ograniczać wyłącznie do środowisk eksperckich.

Modele teoretyczne do szacowania poziomów zakłóceń generowanych w środowisku kolejowym na przewodowe systemy telekomunikacyjne i systemy automatyki kolejowej powinny być rozwijane.

Należy opracować procedury i techniki pomiarowe do weryfikacji

teoretycznych modeli poziomów zakłóceń generowanych w środowisku kolejowym.

Modele teoretyczne i narzędzia pomiarowe do oceny zakłóceń generowanych w środowisku kolejowym powinny uwzględniać istniejące systemy trakcyjne prądu stałego i prądu przemiennego, który w najbliższej przyszłości będzie wdrażany w Polsce.

Modele teoretyczne i narzędzia pomiarowe do oceny zakłóceń generowanych w środowisku kolejowym powinny być wykorzystane do dochodzenia przyczyn zakłócania pracy urządzeń telekomunikacyjnych i automatyki kolejowej w warunkach rzeczywistych. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Zawadka Ł., Adamski D. Problematyka badań oddziaływania taboru kolejowego na urządzenia srk, Problemy Kolejnictwa Zeszyt 200 DOI: 10.36137/2009P
- [2] Szeląg A. Problemy oddziaływania trakcji elektrycznej na środowisko TTS 11-12/2006
- [3] Szeląg A., Maciołek T. Analiza efektywności filtrów wygładzających w podstacjach trakcji kolejowej 3 kV dc przy zaburzeniach napięcia zasilającego TTS 5/2013 r.
- [4] Wojciechowski J. Aspekt zmienności obciążenia w wyznaczaniu strat mocy w systemie zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego AUTOBUSY 12/2018 str. 831-834
- [5] Czuchra W., Żytka M., Bogdan Ankudowicz B. Mikroprocesorowy system do wyznaczania prądu psofometrycznego pojazdu trakcyjnego Pomiar Automatyka Kontrola 2014 R. 60, nr 6
- [6] Łakomiec K., Spadło S., Duś-Spadło J., Mijas R., Serwicki T., Skowron E. Badania kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) instalacji elektronicznych obrabiarek Cz. 1. Charakterystyka zakłóceń nr 1/2018 www.e-obrobkametalu.pl dostęp internetowy <https://bibliotekanauki.pl/articles/404361.pdf>
- [7] Zeńczak M. Analiza pola elektrycznego i magnetycznego wokół linii elektroenergetycznych i wybranych urządzeń elektroenergetycznych Napędy i sterowanie Nr 9 Wrzesień 2011 r.
- [8] Tarko R. Modelowanie ulotu elektrycznego dla analizy warunków eksploatacyjnych wysokonapięciowych układów elektroenergetycznych Rozprawa Doktorska AGH Kraków 2007 r.
- [9] Morant A., Wisten Å., Galar D., Kumar U., Niska S. Railway EMI impact on train operation and environment International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE 17-21 September 2012 DOI: 10.1109/EMCEurope.2012.6396847
- [10] Hamed Jafari Kaleybar, Brenna M., Foidelli F., Saeed Fazel S., Zaninelli D. Power Quality Phenomena in Electric Railway Power Supply Systems: An Exhaustive Framework and Classification, Energies 2020, 13(24), 6662; <https://doi.org/10.3390/en13246662>
- [11] Ogheneovo Johnson D., Alani Hassan Kabiru Issues of Power Quality in Electrical Systems, International Journal of Energy and Power Engineering, 2016 doi: 10.11648/j.ijepe.20160504.12 ISSN: 2326-957X (Print); ISSN: 2326-960X (Online)
- [12] Marinov A., Bekov E., Zahariev S. Practical Approach for Psophometric Noise Measurement in DC/DC Converters June 2020 Conference: 2020 21st International Symposium on Electrical Apparatus & Technologies (SIELA) DOI:10.1109/SIELA49118.2020.9167055
- [13] Schulz W. Overview to ETSI Standards and Guides for Efficient Powering of Telecommunication and Datacom Equipment and Building Vienna, Austria Date of Conference: 10-13 May 2009, VDE ISBN:978-3-8007-3162-6
- [14] Operator responsibilities in the management of electromagnetic interference by power systems on telecommunication systems ITU-T Recommendation K.68 (04/2008)
- [15] Low frequency interference due to unbalance about earth of telecommunication equipment Zakłócenia niskiej częstotliwości spowodowane asymetrią względem uziemienia sprzętu telekomunikacyjnego ITU-T Recommendation K.10 (10/96)
- [16] PN-EN 50121-3-1:2017-05 Zastosowania kolejowe -- Kompatybilność elektromagnetyczna -- Część 3-1: Tabor -- Pociąg i kompletny pojazd
- [17] PN-EN 50617-1: 2024 Zastosowania kolejowe – Techniczne parametry systemów wykrywania pociągu dotyczące interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolejowego – Część 1: Obwody torowe.
- [18] PN-EN 50617-2: 2024 Zastosowania kolejowe – Techniczne parametry systemów wykrywania pociągu dotyczące interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolejowego – Część 2: Liczniki osi.
- [19] PN-EN 50238-1:2020-08 Zastosowania kolejowe -- Kompatybilność pomiędzy taborem a urządzeniami wykrywania pociągów -- Część 1: Postanowienia ogólne
- [20] CLC/TS 50238-2 Railway applications - Compatibility between rolling stock and train detection systems - Part 2: Compatibility with track circuits
- [21] CLC/TS 50238-3 Railway applications. Compatibility between rolling stock and train detection systems Compatibility with axle counters
- [22] PN-EN 50124-2:2017-09 Zastosowania kolejowe -- Koordynacja izolacji -- Część 2: Przepięcia i ochrona przeciwprzepięciowa
- [23] ERA/ERTMS/033281 Version 5.0 Interfaces between control-command and signalling trackside and other subsystems