

Oddziaływanie zakłóceń elektromagnetycznych na transportowe systemy bezpieczeństwa

Jacek Paś
Janusz Dyduch

W artykule przedstawiono wpływ oddziaływania zakłóceń na eksploatację transportowego systemu nadzoru. Transportowy system nadzoru powinien działać prawidłowo w obecności zakłóceń wewnętrznych i zewnętrznych.

W XX wieku, w wyniku działalności człowieka wprowadzone zostały sztuczne czynniki kształtujące elektroklimat. Na skutek powstania niezliczonych źródeł promieniowania nastąpiły poważne zmiany w środowisku elektromagnetycznym Ziemi.

Rozwój elektrotechniki i elektroniki spowodował wprowadzenie sztucznych źródeł promieniowania elektromagnetycznego niejonizującego, emitujących pola w bardzo szerokim zakresie częstotliwości. Przykładowo, w zakresie wielkich częstotliwości są nimi stacje radiolokacyjne, telewizyjne i radiofoniczne, urządzenia nawigacyjne i telekomunikacyjne; w zakresie małych częstotliwości – linie przesyłowe wysokiego, średniego i niskiego napięcia, linie zasilające tabor kolejowy i systemy sterowania ruchem kolejowym, stacje transformatorowe, energetyczne piony zasilające, odbiorniki energii elektrycznej, np. systemy bezpieczeństwa, trakcyjne silniki elektryczne itd. Wprowadzenie tworzyw sztucznych do szerokiego użytku, w tym również do zastosowań w kolejnictwie, stało się przyczyną powstania kolejnych

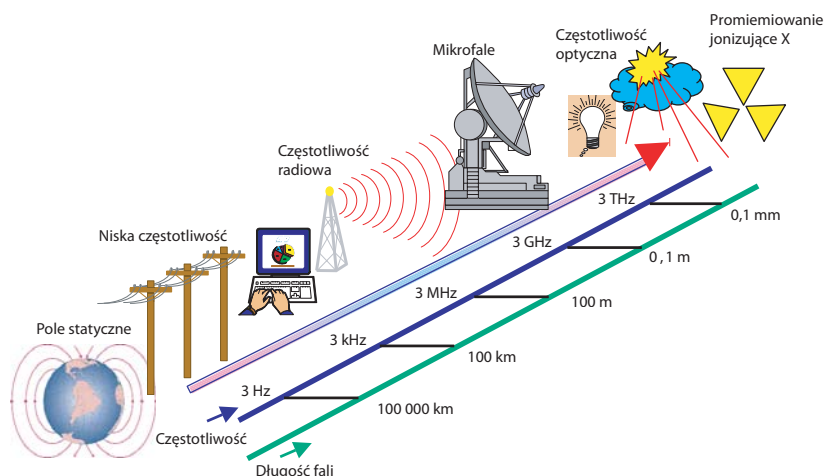
źródeł niebezpiecznej elektryczności statycznej a tym samym pól elektrostatycznych. Na rys. 1 przedstawiono widmo pola elektromagnetycznego promieniowanego przez wybrane źródła.

Środowisko elektromagnetyczne na rozległym obszarze kolejowym

Problem powstawania zakłóceń elektromagnetycznych pojawił się we wczesnym okresie rozwoju radiofonii. W wielu krajach przed II wojną światową istniały służby państwowe zajmujące się zakłóceniami – np. w Anglii powstały one już w 1920 r. W okresie przedwojennym około 10 % skarg na zakłócanie odbioru radiowego dotyczyło miejskiej trakcji elektrycznej. W tym czasie odbiorniki radiowe pracowały w zakresie fal długich i średnich, właśnie dla tego zakresu widma elektromagnetycznego urządzenia trakcji elektrycznej stanowiły duże zagrożenie. Gwałtowny rozwój radiofonii i telewizji po 1945 r., wykorzystywanie coraz wyższych

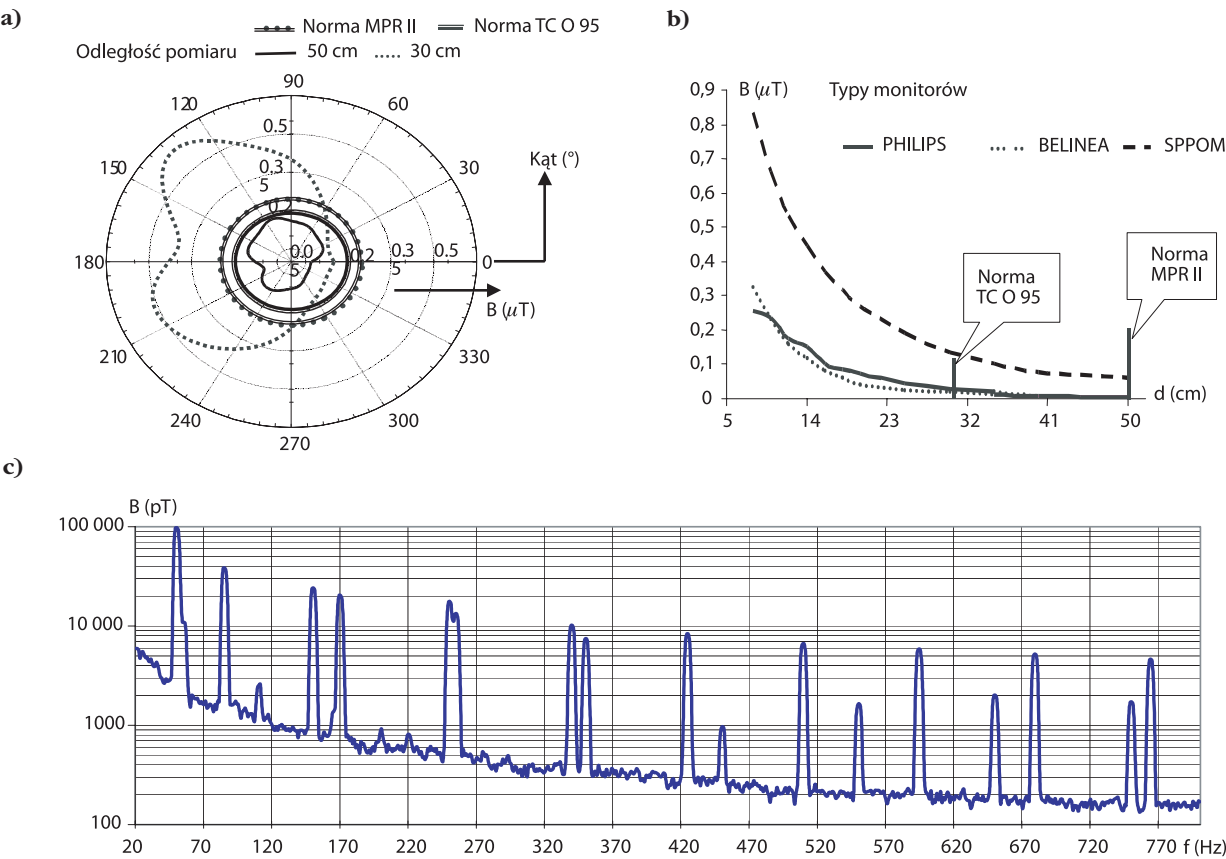
częstotliwości przy nadawaniu spowodowało, że liczba skarg na zakłócania w Anglii wzrosła na przestrzeni lat 1947–1956 do ponad 160 tys. rocznie (dla porównania w 1934 r. liczba skarg wynosiła około 34 tys.). Jednak liczba skarg na zakłócanie odbioru przez trakcję elektryczną w tych latach zmalała. Powodem było przejście na nadawanie programów radiowych na falach ultra-krótkich z wykorzystaniem modulacji częstotliwości (FM) przy wcześniejszym nadawaniu z wykorzystaniem modulacji amplitudy (AM), mniej odpornej na zakłócenia [1].

W Polsce rozpoczęto badania nad wpływem zakłóceń na odbiór radiowy w 1935 r. W 1937 r. powołano zespoły do spraw usuwania zakłóceń na terenach będących w zasięgu działania poszczególnych radiostacji. W tym samym czasie wydano i wprowadzono do użytku Polską Normę Elektryczną PN/E-58 *Wskazówki usuwania zakłóceń w odbiorze radiofonicznym pochodzących od różnych urządzeń elektrycznych* [1]. Pierwsze ba-

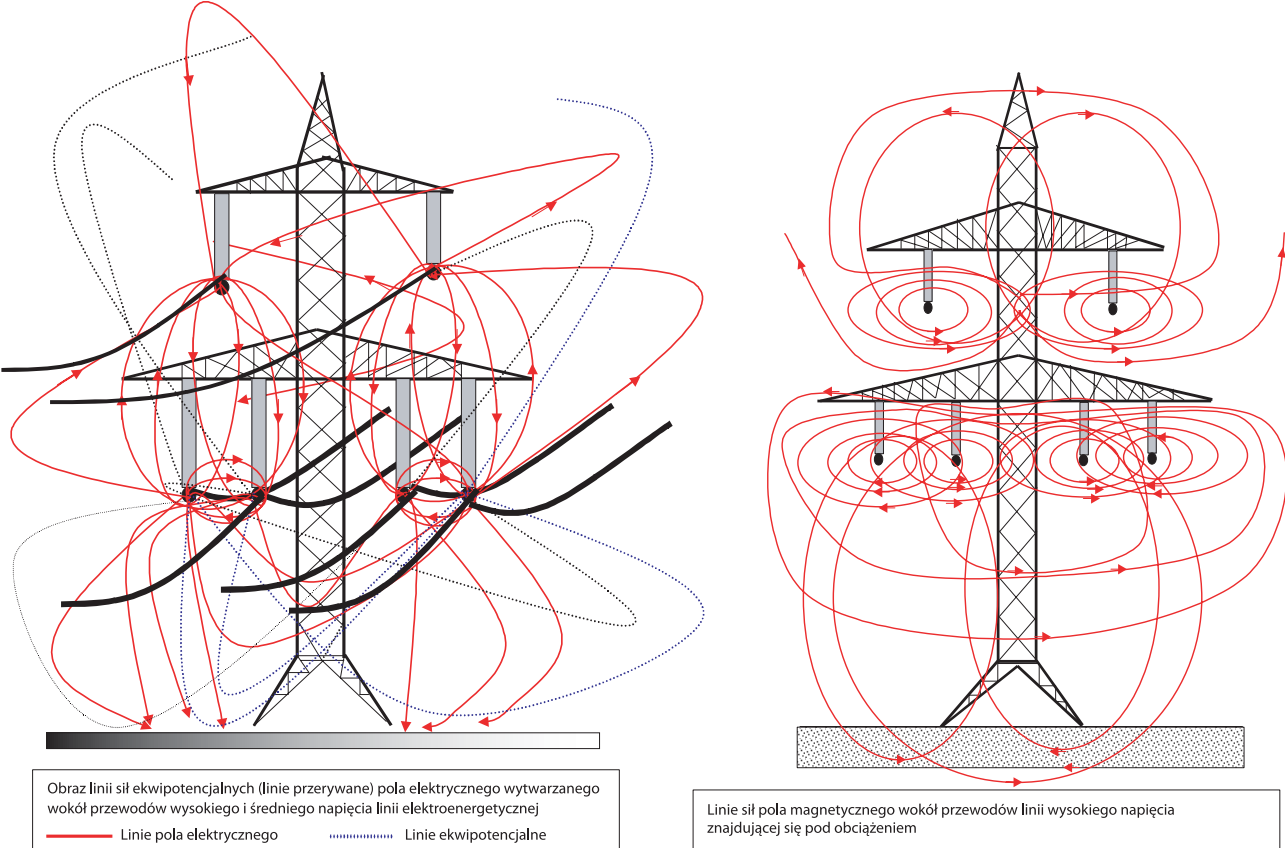


Rys. 1. Widmo pola elektromagnetycznego promieniowanego przez wybrane źródła

prof. dr hab. inż. Janusz Dyduch – Politechnika Radomska, Instytut Automatyki i Telematyki,
mgr inż. Jacek Paś – Wojskowa Akademia Techniczna,
Instytut Systemów Elektronicznych, Zakład Eksploatacji Systemów Elektronicznych.



Rys. 2. Charakterystyki a) promieniowania dookólna dla monitora PHILIPS w promieniu 30 cm i 50 cm, b) rozkład indukcji B pola magnetycznego w funkcji odległości od ekranu monitora dla zakresu częstotliwości ELF, c) widmo zakłóceń generowane przez monitor komputerowy typu PHILIPS – rozkład indukcji B pola magnetycznego (sonda pomiarowa w czasie wykonywania pomiarów znajdowała się w odległości 50 cm od ekranu monitora)



Rys. 3. Rozkład linii sił pola elektrycznego i magnetycznego wokół przewodów linii elektroenergetycznej zasilającej urządzenia na rozległym obszarze kolejowym

dania wpływu zakłóceń pochodzących od miejskiej trakcji elektrycznej zostały przeprowadzone przez Państwowy Instytut Telekomunikacji w 1936 r. Podobnie jak w innych krajach, około 10 % wniesionych skarg na zakłócenia elektromagnetyczne w odbiorze radiowym dotyczyło zakłóceń pochodzących od miejskiej trakcji elektrycznej.

Wzrost gospodarczy i rosnąca wymiana handlowa po II wojnie światowej ma bezpośredni wpływ na stały rozwój rynku transportu – w tym transportu kolejowego. Większość linii kolejowych zostaje zelektryfikowana, a do urządzeń sterowania ruchem kolejowym w coraz większym stopniu zostają wprowadzone urządzenia elektroniczne zawierające elementy i układy, które są podatne na wpływ zakłóceń elektromagnetycznych. Wzrastające zagrożenie pospolitymi przestępstwami oraz terroryzmem wymusiło stosowanie w transporcie systemów bezpieczeństwa.

Przy określaniu środowiska elektromagnetycznego na terenie kolejowym, należy wyróżnić **wewnętrzne** oraz **zewnętrzne źródła pól elektromagnetycznych**. W zakresie małych częstotliwości, wewnętrznymi źródłami pól elektrycznych i magnetycznych są urządzenia zasilane energią elektryczną, eksploatowane czasowo lub stanowiące wyposażenie danego pomieszczenia, np. systemy komputerowe (jednostka centralna, monitor). Również rolę źródeł wewnętrznych mogą pełnić instalacje elektryczne, przewody zasilające i systemy bezpieczeństwa. Źródła te generują pola elektromagnetyczne niezamierzone, które mogą być przyczyną zakłóceń (rys. 2). Do zewnętrznych źródeł można zaliczyć przesyłowe linie elektroenergetyczne, trakcję zasilającą tabor kolejowy i systemy sterowania ruchem kolejowym (SRK) oraz stacje transformatorowe (rys. 3). Oddzielną grupę stanowią impulsowe źródła zakłóceń elektromagnetycznych, naturalne lub sztuczne. Źródłami naturalnymi są wyładowania atmosferyczne, które generują pola elektryczne i magnetyczne z szerokiego zakresu częstotliwości. Pola wytwarzane podczas wyładowań atmosferycznych indukują w liniach przesyłowych, trakcyjnych, liniach dozorowych systemu bezpieczeństwa, systemach SRK, odbiornikach energii elektrycznej oraz układach elektronicznych prądy zakłócające ich pracę [1, 4]. Wartości indukowanych prądów i napięć mogą być przyczyną zniszczenia mniej odpornych elementów i urządzeń elektronicznych. Także procesy związane z komutacją prądów o dużych natężeniach (sieć elektroenergetyczna, rozruch, hamowanie, włączanie lub wyłączanie elektrycznych pojazdów trakcyjnych) są powodem znacznego zniekształcenia **tła elektromagnetycznego** [1, 6]. Tłem elektromagnetycznym nazywane jest pole elektryczne i magnetyczne występujące w danym środowisku przy braku oddziaływania potencjalnych źródeł wewnętrznych i zewnętrznych.

Ogólnie źródła zakłóceń występujące na obszarze kolejowym można podzielić na:

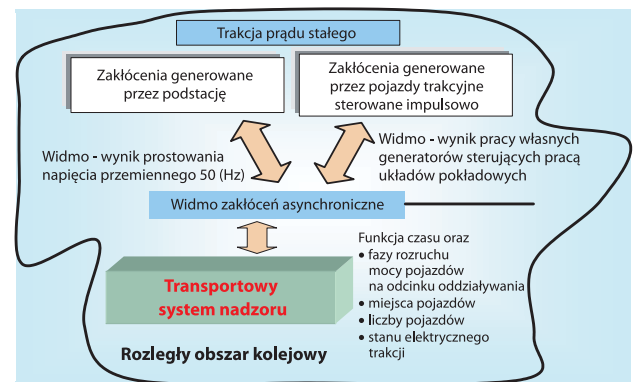
a) stacjonarne (zakłócenia pochodzące od systemów zasilania trakcji kolejowej)

b) ruchome (zakłócenia pochodzące od elektrycznych pojazdów trakcyjnych).

Aby określić wielkość zakłóceń elektromagnetycznych występujących na obszarze kolejowym należy określić parametry:

- obwodów, w których płynie prąd o dużej wartości (podstaje trakcyjne, sieć trakcyjna, sieć powrotna, pojazdy trakcyjne, elektroenergetyczna sieć zasilająca)
- obwodów, w których płynie prąd o małych wartościach (systemy sterowania ruchem kolejowym, systemy telekomunikacyjne, transportowe systemy bezpieczeństwa itd.).

Zakłócenia generowane przez podstację oraz pojazdy trakcyjne (rys. 4) są zakłóceniami asynchronicznymi (sieć trakcji prądu stałego), w przeciwieństwie do trakcji prądu przemiennego (zakłócenia synchroniczne). W trakcji prądu przemiennego występuje zasilanie jednostronne (każdy następny odcinek trakcji zasilany jest z innej fazy). Zakłócenia generowane w sieci trakcyjnej prądu przemiennego są zsynchronizowane z częstotliwością podstawową dla danego systemu zasilania trakcyjnego.



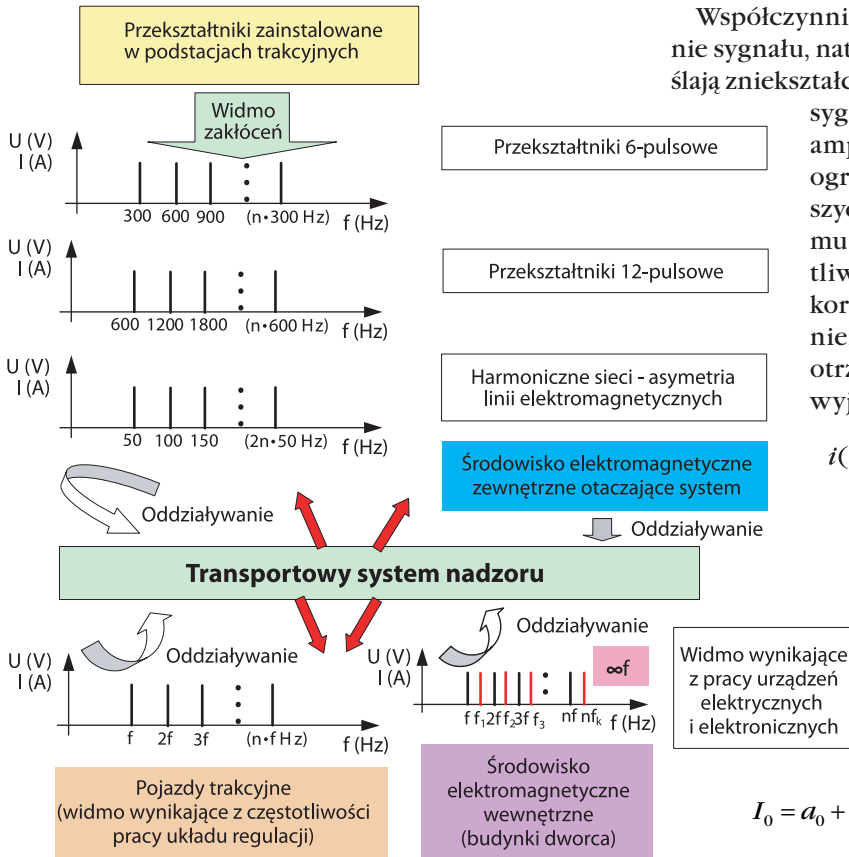
Rys. 4. Zakłócenia generowane w rozległym obszarze kolejowym pochodzące od zakłóceń generowanych przez podstację oraz pojazdy trakcyjne

nizowane z częstotliwością podstawową dla danego systemu zasilania trakcyjnego.

Źródłami zakłóceń oddziałujących na transportowy system bezpieczeństwa są:

- podstaje trakcyjne z zainstalowanymi przekształtnikami
- sterowane impulsowo pojazdy trakcyjne
- urządzenia elektryczne i elektroniczne zainstalowane w budynku dworcowym (np. systemy komputerowe, elektroniczne planszowe rozkłady jazdy, wewnętrzne linie zasilające, elektryczne systemy grzewcze, elektryczne linie zasilające oświetlenie wewnętrzne i zewnętrzne itd.)
- zakłócenia elektromagnetyczne zewnętrzne (pochodzące od nadajników stacji bazowych, tramwajowej trakcji zasilania przebiegającej w pobliżu budynków dworca; elektroenergetycznej linii zasilania wysokiego napięcia, stacji transformatorowych zasilających dworzec kolejowy i trakcję kolejową itd. – rys. 5).

Ze względu na nieliniowość charakterystyk urządzeń przetwarzających energię elektryczną, zarówno

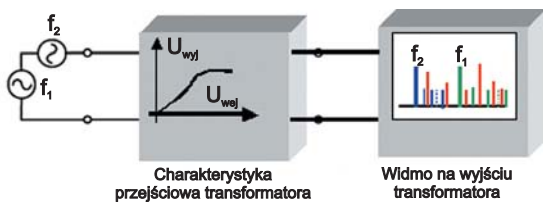


Rys. 5. Źródła zakłóceń oddziałujących na transportowy system bezpieczeństwa zainstalowany na rozległym obszarze kolejowym

w systemie nadzoru, jak i w systemach zainstalowanych na dworcu kolejowym (np. wzmacniacze, stacje transformatorowe) należy w widmie sygnałów zakłócających (rys. 5) uwzględnić także zakłócenia intermodulacyjne (rys. 6).

Zniekształcenia nieliniowe (w tym zniekształcenia intermodulacyjne) powstają w czasie przetwarzania sygnałów przez elementy o charakterystykach nieliniowych, na które oddziałują dwa sygnały o różnych częstotliwościach. Sygnał wyjściowy urządzenia – np. prąd może być przedstawiony w funkcji sygnału wejściowego (np. napięcie) z wykorzystaniem rozwinięcia w szereg potęgowy (aproksymacja elementu nieliniowego):

$$i(t) = a_0 + a_1 U(t) + a_2 U^2(t) + a_3 U^3(t) + \dots \quad (1)$$



gdzie:

f_1 - źródło zakłóceń o częstotliwościach pulsacji prostowników, tj. $n \cdot 300$ Hz lub $n \cdot 600$ Hz

f_2 - źródło zakłóceń o częstotliwościach harmonicznych sieci ($2n+50$) Hz, $n=1, 2, \dots, \infty$

oznaczenia: — f_2 - częstotliwość podstawowa sieci i jej harmoniczne

— f_1 - częstotliwości harmoniczne prostowników

— f_i - częstotliwość zakłóceń intermodulacyjnych np. $\pm 2f_1 \pm f_2$; $\pm 3f_1 \pm 2f_2$; ...

Rys. 6. Zakłócenia intermodulacyjne

Współczynnik a_1 reprezentuje liniowe przetwarzanie sygnału, natomiast pozostałe współczynniki określają zniekształcenia sygnału. Zakładając, że amplitudy

sygnału zakłóceń są małe w stosunku do amplitudy sygnału wejściowego, można ograniczyć szereg potęgowy (1) do pierwszych trzech składników. Stosując jako wymuszenie sygnał harmoniczny o częstotliwości $f = 50$ Hz i amplitudzie U_m oraz korzystając z zależności (1), z ograniczeniem do trzech pierwszych składników, otrzymuje się wyrażenie opisujące sygnał wyjściowy w funkcji czasu

$$i(t) \approx a_0 + a_1 U_m \cos 2\pi f t + a_2 U_m^2 \cos^2 2\pi f t + a_3 U_m^3 \cos^3 2\pi f t \quad (2)$$

oraz porządkując równanie względem $2\pi f t$ otrzymuje się widmo sygnału wyjściowego o postaci

$$i = I_0 + I_1 \cos 2\pi f t + I_2 \cos 2\pi 2 f t + I_3 \cos 2\pi 3 f t \quad (3)$$

gdzie:

$$I_0 = a_0 + \frac{1}{2} a_2 U_m^2, \quad I_1 = a_1 U_m + \frac{3}{4} a_3 U_m^3$$

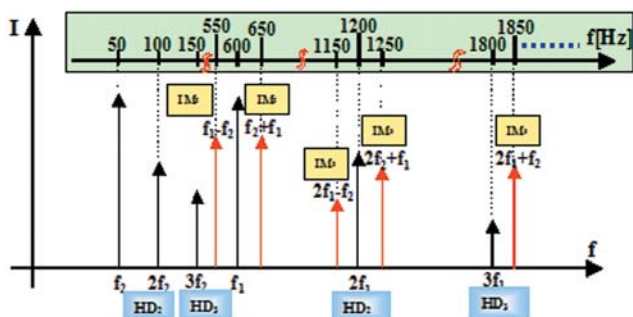
$$I_2 = \frac{1}{2} a_2 U_m^2, \quad I_3 = \frac{1}{4} a_3 U_m^3 \quad (4)$$

Amplitudy I_n poszczególnych składowych, o częstotliwościach $n f$ określają zniekształcenia harmoniczne n -tego rzędu. Jeśli jako wymuszenie zastosowana zostanie suma sygnałów harmonicznych o różnych częstotliwościach f_1 i f_2 (sygnały o częstotliwościach sieci i zakłóceń prostowników), to widmo sygnału wyjściowego wzbogaci się nie tylko o harmoniczne drugiego sygnału wejściowego, ale również składowe kombinacyjne o częstotliwościach $i \cdot f_1 \pm j \cdot f_2$ dla $i, j = 1, 2, \dots$. Składowe kombinacyjne występujące w widmie sygnału wyjściowego powodują zniekształcenia zwane zniekształceniami intermodulacyjnymi. Jeśli amplitudy wejściowych sygnałów harmonicznych będą równe U_{m1} i U_{m2} , to wyrażenie opisujące sygnał wyjściowy w funkcji czasu przyjmie postać

$$i(t) \approx a_0 + a_1 (U_{m1} \cos 2\pi f_1 t + U_{m2} \cos 2\pi f_2 t) + a_2 (U_{m1} \cos 2\pi f_1 t + U_{m2} \cos 2\pi f_2 t)^2 + a_3 (U_{m1} \cos 2\pi f_1 t + U_{m2} \cos 2\pi f_2 t)^3 \quad (5)$$

Korzystając ze wzorów skróconego mnożenia, zależności trygonometrycznych oraz porządkując równanie względem argumentu funkcji harmonicznej, otrzymuje się

$$i = I_0 + I_{10} \cos 2\pi f_1 t + I_{01} \cos 2\pi f_2 t + I_{20} \cos 2\pi 2 f_1 t + I_{02} \cos 2\pi 2 f_2 t + I_{30} \cos 2\pi 3 f_1 t + I_{03} \cos 2\pi 3 f_2 t + I_{11} [\cos 2\pi (f_1 - f_2) t + \cos 2\pi (f_1 + f_2) t] + I_{12} [\cos 2\pi (2 f_2 - f_1) t + \cos 2\pi (2 f_2 + f_1) t] + I_{21} [\cos 2\pi (2 f_1 - f_2) t + \cos 2\pi (2 f_1 + f_2) t] \quad (6)$$



Rys. 7. Widmo sygnału wyjściowego zakłóceń w trakcji zasilającej w przypadku oddziaływania dwóch sygnałów na element o nieliniowej charakterystyce

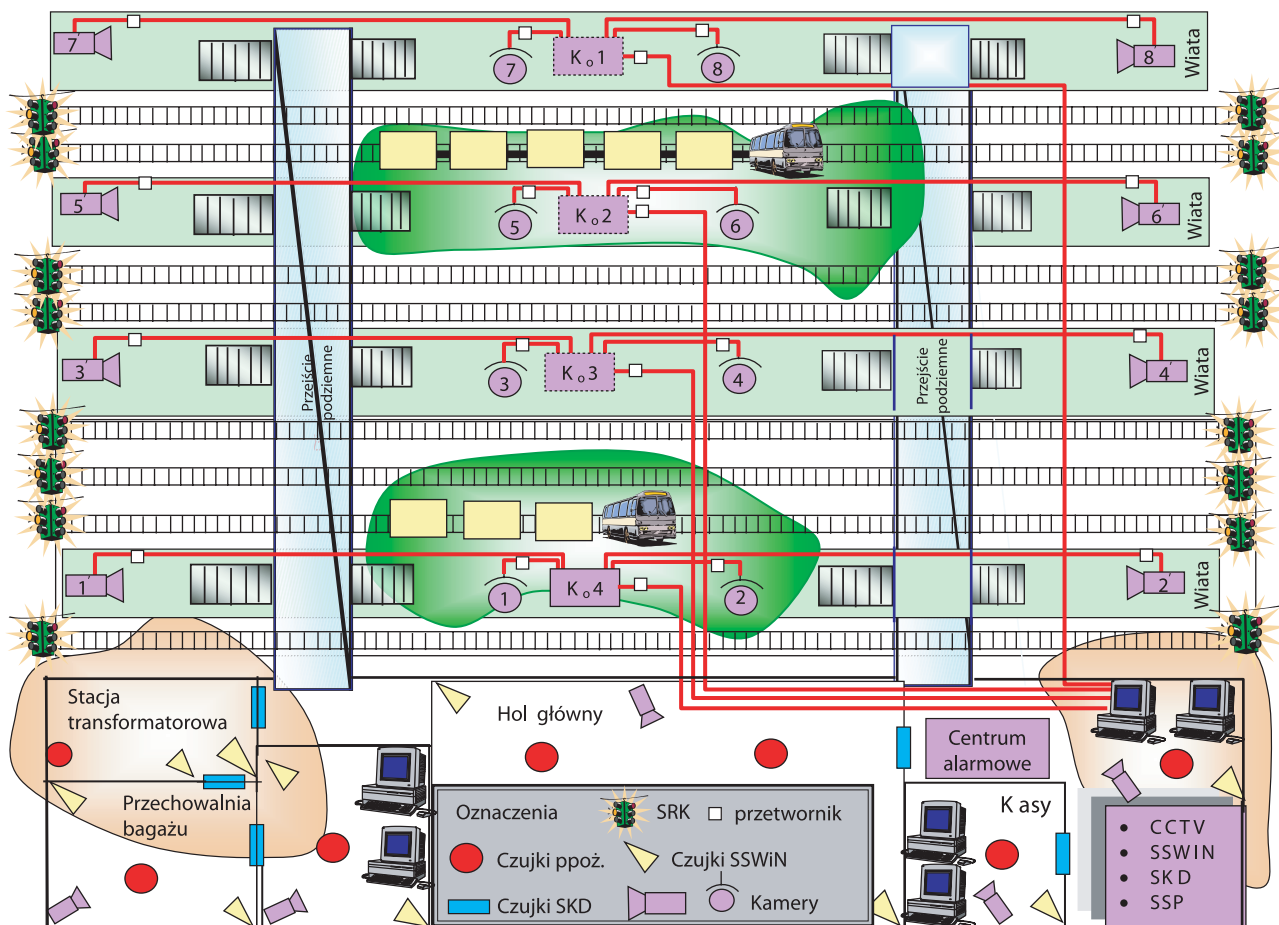
Wartość $i+j=n$ określa zniekształcenia intermodulacyjne n -tego rzędu IM_n (rys. 7).

Transportowe systemy nadzoru na obszarze kolejowym

Transportowe systemy bezpieczeństwa (nadzoru) są to systemy wykrywające zagrożenia występujące w procesie transportowym (zarówno dla obiektów stacjonarnych jak i ruchomych) [4, 5]. Aby zapewnić odpowiedni poziom bezpieczeństwa, na dworcu kolejowym należy zainstalować następujące systemy bezpieczeństwa:

- System Sygnalizacji Włamania i Napadu (SSW i N)
- System Kontroli Dostępu (SKD)
- System Sygnalizacji Przeciwpowarowej (SSP)
- System Nadzoru Wizyjnego (CCTV)
- dźwiękowe systemy ostrzegawcze.

Wymienione systemy powinny być nadzorowane z centrum alarmowego zlokalizowanego w pomieszczeniu na dworcu kolejowym. Obsługa systemu bezpieczeństwa powinna być w pełni zautomatyzowana a sygnały alarmowe zobrazowane na monitorach systemu komputerowego oraz na tablicy synoptycznej. Centrum alarmowe powinno mieć także zapewnioną bezpośrednią łączność ze służbami porządkowymi – policją i Służbą Ochrony Kolei. Centrum alarmowe powinno być odpowiednio zabezpieczone przed osobami postronnymi – zabezpieczenia mechaniczne (drzwi, zamki, kraty), wyposażone w zabezpieczenia elektroniczne (SKD, SSP, CCTV i SSW i N) – rys. 8. Kamery przemysłowe zainstalowane na peronach powinny posiadać odpowiednie parametry wynikające z norm dotyczących systemów alarmowych. Na peronach powinny być instalowane dwa rodzaje kamer (rys. 8) – kamery obrotowe umożliwiające dookólny podgląd sytuacji (kamery 1–8) oraz kamery stacjonarne umieszczone na początku i końcu peronu (kamery 1'–8'). Sygnały wizyjne z kamer, poprzez koncentratory sygnałów (K_01 – K_04), powinny być przesyłane do centrum alarmowego. Z uwagi na poziom zakłó-



Rys. 8. Schemat instalacji systemu bezpieczeństwa na obszarze kolejowym

ceń elektromagnetycznych występujący na obszarze kolejowym, sygnały wizyjne z kamer powinny być zamieniane w przetworniku na sygnały optyczne i kablem światłowodowym przesyłane do centrum alarmowego. Obszary zaznaczone kolorem zielonym (rys. 8) przedstawiają zasięg oddziaływania zakłóceń elektromagnetycznych pochodzących od ruchomych środków transportowych (lokomotywy elektryczne), natomiast obszary zaznaczone kolorem pomarańczowym przedstawiają źródła zakłóceń pochodzące od obiektów stacjonarnych [4].

Wnioski

Systemy nadzoru instalowane na rozległych obszarach kolejowych oprócz zapewnienia bezpieczeństwa powinny być odporne na zakłócenia elektromagnetyczne, które występują na tym obszarze. Nowoczesne systemy bezpieczeństwa – czujki, centrale alarmowe, kamery, moduły mocy i rozszerzeń – są zbudowane z układów cyfrowych (mikroprocesory, układy pamięci adresu czujek, specjalizowane układy przetwarzające sygnał, przetworniki itp.) [7]. Układy elektroniczne analogowe i cyfrowe, z których zbudowane są transportowe systemy nadzoru, są wrażliwe na oddziaływanie zakłóceń elektromagnetycznych. W tab. 1. przedstawione zostały typowe podzespoły systemu nadzoru jako potencjalne źródło zakłóceń dla innych urządzeń elektrycznych i elektronicznych oraz wrażliwość tego podzespołu na zakłócenie elektromagnetyczne.

Tab. 1. Ocena ważniejszych podzespołów systemu bezpieczeństwa w zależności od ich zachowań kompatybilnościowych

Podzespół systemu bezpieczeństwa	Źródło zakłóceń	Urządzenie wrażliwe
Systemy pomiarowe – czujniki	–	+
Układy cyfrowe	+	+
Układy analogowe	–	+
Mikroprocesory	+	o
gdzie: + prawdopodobne; o możliwe; – nieprawdopodobne		

Wszystkie systemy bezpieczeństwa instalowane w transportowych systemach nadzoru powinny posiadać certyfikat kompatybilności elektromagnetycznej określony przez normę PN-EN 50130-4 [8]. Spełnienie wymagań określonych w normie skutkuje tym, że podczas eksploatacji intensywność uszkodzeń w systemie pod wpływem występowania zakłóceń elektromagnetycznych o określonych parametrach powinna być bliska zeru (urządzenia systemu nadzoru odporne na zakłócenia). Tylko zakłócenie o dużym poziomie (np. wyładowanie atmosferyczne) może doprowadzić system nadzoru do uszkodzenia.

Bibliografia

1. Laskowski M.: *Główne źródła zakłóceń w elektrycznych pojazdach trakcyjnych oraz wpływ ich parametrów na poziom wytwarzanych zakłóceń radioelektrycznych*. Warszawa 1991.
2. Dyduch J., Moczarski J.: *Podstawy eksploatacji systemów sterowania ruchem kolejowym*. WPR, Radom 2007.
3. Dyduch J.: *Wpływ eksploatacji systemów transportowych na niezawodność bezpieczeństwa*. Kolokwium: *Niezawodność bezpieczeństwa*, Kiekrz 1986.
4. Dyduch J., Paś J.: *Optymalizacja procesu eksploatacji w transportowych systemach nadzoru*. XII Międzynarodowa Konf. Nauk. TransComp, Zakopane 2008.
5. Wawrzyński W.: *Bezpieczeństwo systemów sterowania w transporcie*. Warszawa, Biblioteka Problemów Eksploatacji 2004.
6. Brejwo W., Paś J.: *Wpływ elementów sieci komputerowych na warunki klimatyczne w pomieszczeniu biurowym*. INSTAL nr2/2000 Warszawa.
7. Paś J.: *Wpływ rozrzutu właściwości elementów linii dozorowej na niezawodność funkcjonalną systemów bezpieczeństwa*. VIII Konferencja Metrologia Wspomagana Komputerowo, Waplewo 2008.
8. PN-EN 50130-4:2002/A2:2007, *Systemy alarmowe - Część 4: Kompatybilność elektromagnetyczna - Norma dla grupy wyrobów: Wymagania dotyczące odporności urządzeń systemów alarmowych, pożarowych, włamaniovych i osobistych*. ■