

Włodzimierz CHOROMAŃSKI¹
Janusz DYDUCH²
Jacek PAŚ³

MINIMALIZACJA WPŁYWU ZAKŁÓCEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH ODDZIAŁYWUJĄCYCH NA SYSTEM STEROWANIA PERSONAL RAPID TRANSIT

System Personal Rapid Transit eksploatowany jest w różnych warunkach otaczającego go środowiska elektromagnetycznego. Występujące na rozległym obszarze „kolejowym” zaburzenia elektromagnetyczne zamierzone lub niezamierzone /stacjonarne lub ruchome/ mogą być przyczyną zakłócenia systemu sterowania PRT. System sterowania odpowiada za bezpieczeństwo transportu PRT - proces przemieszczania ludzi i/ lub ładunków. Zakłócenie podstawowych funkcji systemu sterowania może być przyczyną wystąpienia zagrożeń życia i zdrowia ludzi. Niniejszy referat przedstawia sposoby minimalizacji wpływu zakłóceń elektromagnetycznych na system sterowania PRT.

MINIMIZATION OF INFLUENCE OF ELEKTROMAGNETIC DISTURBANCES ON PERSONAL RAPID TRANSIT CONTROL SYSTEM

Personal Rapid Transit control system is exploited in diverse electromagnetic environments. The unintentional or intentional electromagnetic disturbances on a vast railway area can disturb operation of PRT control system. The security systems are responsible for security of humans and goods transpiration and therefore their disturbance can threaten life or health their disturbance can threaten life or health of people. exploitation decisions in the reference to these systems. The paper presents the ways of minimization of the influence of electromagnetic disturbances on PRT control system.

1. WSTĘP

Personal Rapid Transit (PRT) to zero-emisyjny system transportu publicznego o charakterze indywidualnym [1]. System zapewnia transport „od drzwi do drzwi” – bez

¹Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, Zakład Teorii Konstrukcji Urządzeń Transportowych, Polska, 00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75, tel.: 22 2345409, e-mail: wch@it.pw.edu.pl

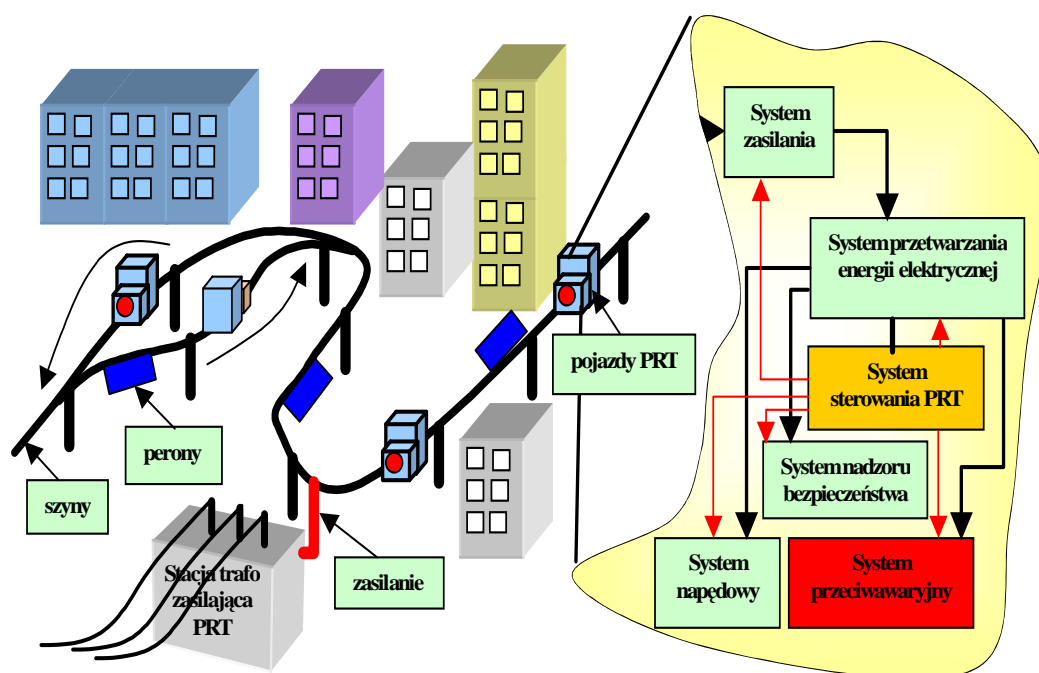
²Politechnika Radomska, Wydział Transportu i Elektrotechniki, Zakład Systemów Sterowania w Transporcie, Polska, 26-600 Radom, ul. Malczewskiego 29, tel.483617765:, e-mail: dyduch.janusz@gmail.pl

³Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Zakład Eksploatacji Systemów Elektronicznych, Polska, 00-908 Warszawa, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, tel.: 22 6837534, e-mail: JPaś@wel.wat.edu.pl

przystanków pośrednich z przystosowaniem dla osób niepełnosprawnych. Przy realizacji projektu przyjęto następujące założenia:

- zapewnienie maksymalnego bezpieczeństwa podróżnych;
- zapewnienie maksymalnej niezawodności działania systemu PRT;
- ograniczenie zużycia energii (minimum energochłonności);
- ergonomia (przystosowanie dla osób niepełnosprawnych);
- brak oddziaływania systemu PRT na otaczające środowisko (brak emisji zanieczyszczeń przez system transportowy – np. CO₂, hałasu, drgań mechanicznych, generacji niezamierzonego zakłócającego pola elektromagnetycznego).

Spełnienie tych założeń (szczególnie pierwszych dwóch punktów) uzależnione jest od systemu(ów) sterowania PRT. Na system sterowania realizujący określone zadania operacyjne oddziałują zakłócenia elektromagnetyczne wytwarzane w sposób zamierzony (np. systemy łączności, stacje radiowe, TV, i inne) oraz niezamierzony (uboczny efekt przetwarzania sygnałów elektrycznych w systemach PRT oraz otaczającej infrastruktury elektrycznej – np. elektroenergetyczne linie zasilające, stacje transformatorowe) – rys. 1.



Rys. 1 Infrastruktura systemu PRT – połączenia systemu sterowania

2. ODDZIAŁYWANIE ZAKŁÓCEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH NA SYSTEMY STEROWANIA PRT

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 niezliczonych sztucznych źródeł promieniowania elektromagnetycznego niejonizującego, emitujących pola w bardzo szerokim zakresie częstotliwości. Od nowoczesnych urządzeń elektronicznych stosowanych w systemach sterowania SRK, TSN i PRT wymaga się m. in. miniaturyzacji, ograniczonego poboru energii elektrycznej, dużej niezawodności działania [2]. Wprowadzenie tych ograniczeń skutkuje tym, że poziom sygnałów użytecznych urządzeń może być porównywalny z poziomem zakłóceń generowanych np. przez stacjonarne i ruchome źródła zakłóceń (np. stacje bazowe, radiowe, TV, linie ŚN, WN, stacje transformatorowe, urządzenia elektryczne powszechnego użytku, pojazdy trakcyjne, itd.).

Dlatego takim ważnym problemem jest ciągle diagnozowanie stanu środowiska elektromagnetycznego przy wprowadzaniu nowych urządzeń i systemów, których moc znamionowa jest duża, np. zmiana mocy stacji transformatorowej, zastosowanie silników napędowych o większej mocy w pojazdach trakcyjnych, zwiększenie mocy nadajników stacji telefonii komórkowej. Problemem zakłóceń elektromagnetycznych pojawił się we wczesnym okresie rozwoju radiofonii.

W wielu krajach już przed II wojną światową istniały służby państwowe zajmujące się zakłóceniami – np. w Anglii powstały one już w roku 1920. 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, a to właśnie dla tego zakresu widma elektromagnetycznego urządzenia trakcji elektrycznej stanowiły duże zagrożenie. Gwałtowny rozwój radiofonii i telewizji po roku 1945, wykorzystywanie coraz wyższych częstotliwości przy nadawaniu spowodowało, że liczba skarg na zakłócania w Anglii wzrosła na przestrzeni lat 1947-1956 do ponad 160 tysięcy rocznie (dla porównania w roku 1934 liczba skarg wynosiła około 34 tysiące). Jednak liczba skarg na zakłócanie odbioru przez trakcję elektryczną w tych latach zmalała – powodem tego może być przejście na nadawanie programów radiowych na falach ultrakrótkich z wykorzystaniem modulacji częstotliwości (FM) przy wcześniejszym nadawaniu z wykorzystaniem modulacji amplitudy (AM), mniej odpornej na zakłócenia [3,4].

Rozpatrując oddziaływanie zakłóceń na systemy sterowania PRT należy uwzględnić następujące kryteria:

- ❑ **odporności systemu sterowania PRT na zakłócenia** - definiowanej jako zdolność zachowania poprawnego działania urządzeń systemu podczas występowania zakłóceń;
- ❑ **podatności systemu sterowania PRT na zakłócenia** – tj. reakcji pracującego systemu na zakłócenia zewnętrzne lub wewnętrzne;
- ❑ **wytrzymałości systemu sterowania PRT na zakłócenia** – to znaczy zdolności do zachowania pierwotnych właściwości systemu po ustąpieniu zakłócenia.

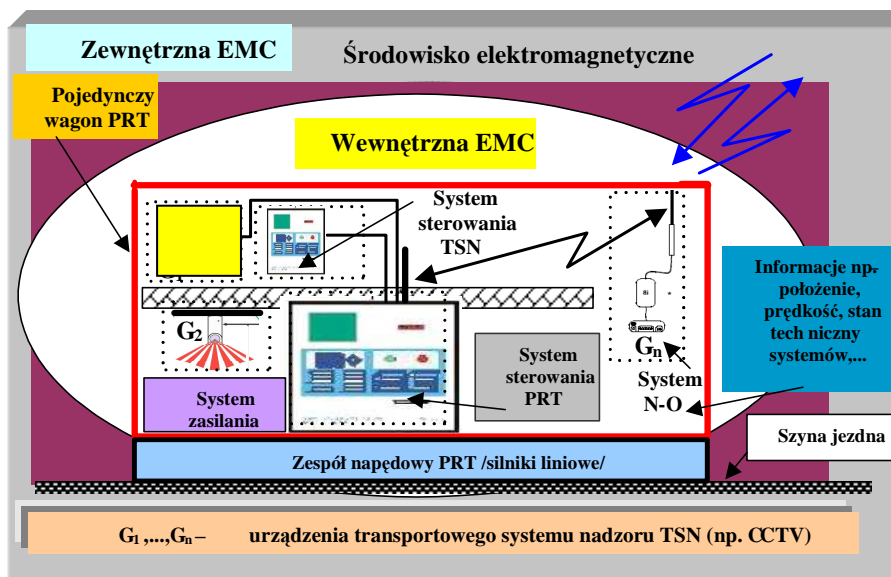
Przy projektowaniu systemu sterowania PRT trzeba uwzględnić warunki środowiskowe panujące na „obszarze kolejowym” i dobrać odpowiednie do nich urządzenia wchodzące w skład systemu. Do ich wyznaczenia należy znać parametry,

charakterystyki i rozkłady promieniowania poszczególnych urządzeń, które zniekształcają środowisko elektromagnetyczne występujące na „obszarze kolejowym”.

W przypadku oddziaływania zakłóceń na systemy sterowania PRT możemy wyróżnić cztery stany pracy tego systemu:

- ❑ system sterowania **nie reaguje** na zakłócenie zewnętrzne i wewnętrzne – poziom zakłóceń zbyt mały, nie został przekroczony dopuszczalny poziom zakłóceń, system pozostaje w danym stanie eksploatacyjnym, w którym akurat się znajduje;
- ❑ urządzenia wchodzące w skład systemu sterowania PRT **samoczynnie likwidują zakłócenia** poprzez zastosowane filtry pasywne lub aktywne lub rozwiązania układowe;
- ❑ wystąpienie zakłócenia powoduje przejście systemu sterowania PRT **ze stanu zdatności od stanu niezdatności** – przywrócenie stanu zdatności wymaga interwencji obsługi;
- ❑ wystąpienie zakłócenia w systemie sterowania PRT powoduje **uszkodzenie systemu – całkowite lub częściowe, system niezdatny**.

Określenie warunków dopuszczalnych, wobec oddziaływania zewnętrznych pól elektromagnetycznych na pracę urządzeń elektronicznych oraz sprzętu zawierającego układy elektroniczne, zdefiniowano jako kompatybilność elektromagnetyczną – rys. 2.



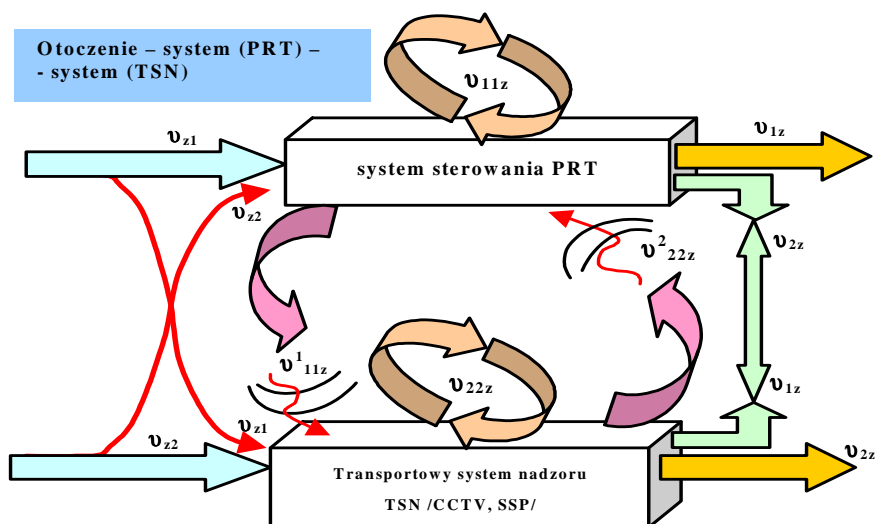
Rys. 2 Kompatybilność elektromagnetyczna zewnętrzna i wewnętrzna systemów sterowania PRT

Pierwsze definicje tego pojęcia pochodzą z Departamentu Obrony USA z 1967 r. Zawierały one pojęcie kompatybilności ogólnej, konstrukcyjnej i operacyjnej. Na ich podstawie, w 1976 r. wprowadzono międzynarodową definicję, której brzmienie jest prawie identyczne z określeniem przytoczonym w międzynarodowej normie IEC 50 (161) z 1990 r., zawartym następnie w projekcie Polskiej Normy Pr. PN-T-01030. Według tej normy

przyjmuje się, że: „kompatybilnością elektromagnetyczną jest zdolność urządzenia lub systemu do zadowalającego działania w określonym środowisku elektromagnetycznym równocześnie bez wprowadzania do tego środowiska niedopuszczalnych zaburzeń elektromagnetycznych”

Jeżeli istnieją dwa różne systemy znajdujące się wewnątrz pojedynczego wagonu systemu PRT, np system nadzoru SSWiN (system sygnalizacji włamania i napadu) oraz system sterowania /lub zasilania, przetwarzania energii, itd./ to mechanizm wzajemnego oddziaływania zaburzeń elektromagnetycznych tych systemów oraz środowiska elektromagnetycznego został przedstawiony na rys. 3 Niepożądana emisja energii elektromagnetycznej, nie przenosząca informacji użytecznej, interferencje oraz niepożądane odpowiedzi systemów – stanowią czynnik ograniczający przesyłanie i przetwarzanie informacji za pomocą sygnałów elektrycznych.

Systemy mogą wytwarzać niepożądaną emisję np. v_{11z} ; v_{22z} ; v_{11z}^1 ; v_{11z}^2 i wykazywać niepożądane odpowiedzi np. v_{z1} ; v_{z2} zakłócające normalne działanie tych systemów. W przypadku większej liczby takich współistniejących systemów – występuje odpowiednio więcej „kombinacji” zakłóceń; jeżeli n oznacza liczbę systemów (w tym systemy PRT), to liczba tych kombinacji wynosi n^2 – rys. 3.



v_{1z} ; v_{2z} - zaburzenia elektromagnetyczne wytwarzane przez TSN oddziałujące na inne systemy znajdujące się na rozległym obszarze kolejowym;

v_{z1} ; v_{z2} - zaburzenia elektromagnetyczne zewnętrzne pochodzące od innych urządzeń, systemów (np. SRK, trakcji kolejowej), które znajdują się na rozległym obszarze kolejowym;

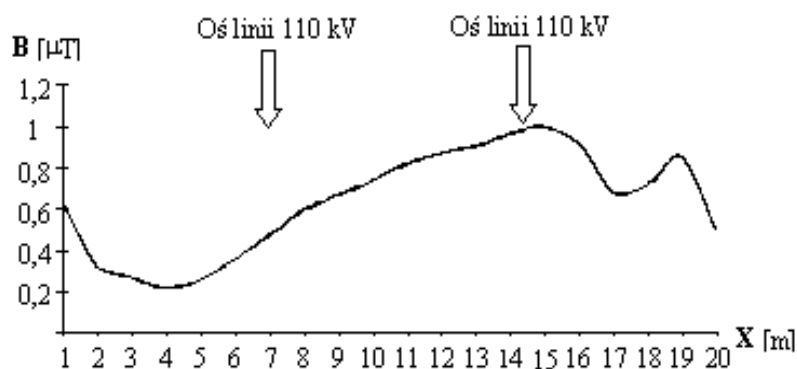
v_{11z} ; v_{22z} - zaburzenia elektromagnetyczne generowane przez transportowy system nadzoru oddziałujące na elementy składowe tego systemu;

v_{11z}^1 ; v_{11z}^2 - wzajemne oddziaływanie zaburzeń generowanych przez TSN ↔ system sterowania PRT.

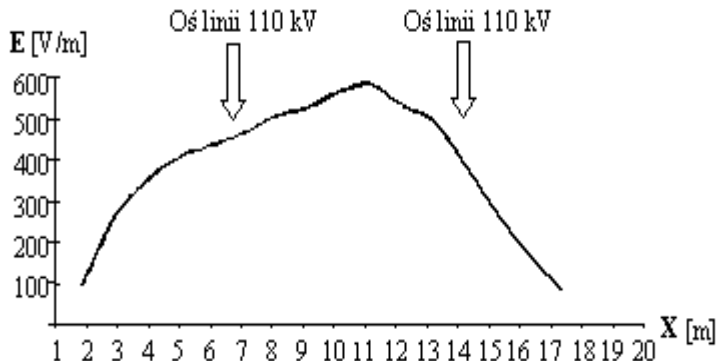
Rys. 3 Mechanizm wzajemnego oddziaływania elektromagnetycznego systemów PRT i TSN oraz środowiska elektromagnetycznego

2. WYBRANE ZEWNĘTRZNE ŹRÓDŁA ELEKTROMAGNETYCZNYCH ZAKŁÓCEŃ

Trakcja kolejowa PRT zasilana będzie z linii elektroenergetycznej wysokiego napięcia – 110, 220 kV. Wokół przewodów energetycznych powstają pola elektromagnetyczne, które oddziałują na systemy i materię żywą. Rozkład pola wytwarzanego przez linie elektroenergetyczne został przedstawiony na rys. 4, 5.

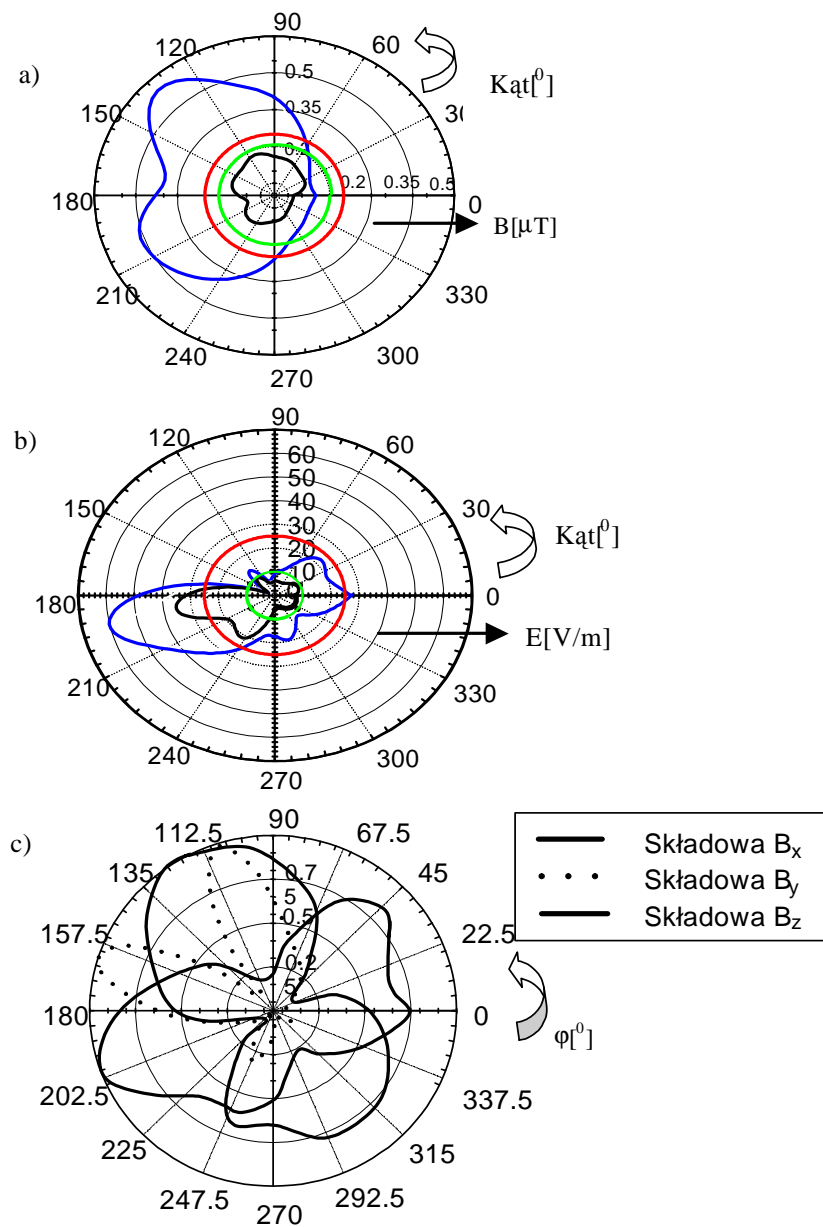


Rys. 4 Rozkład linii pola magnetycznego $B[\mu T]$, wytwarzany przez dwie linie energetyczne napowietrzne zasilające trakcję kolejową



Rys. 5 Rozkład linii pola elektrycznego $E[V/m]$, wytwarzany przez dwie linie energetyczne napowietrzne zasilające trakcję kolejową

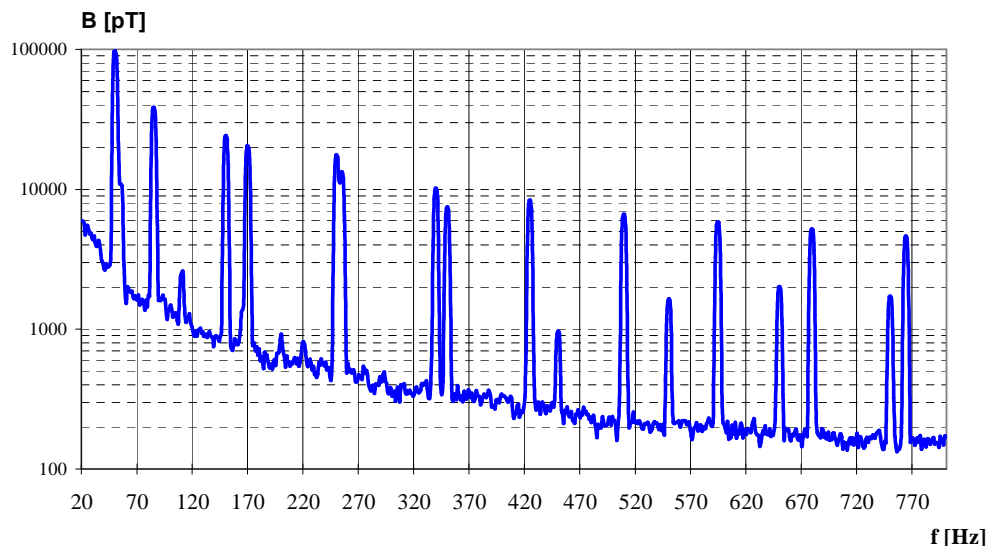
Systemy sterowania PRT do zobrazowania stanów pracy, sterowania i komunikacji użytkownik – system wyposażone będą w monitory komputerowe, które są źródłem niezamierzonego zaburzenia elektromagnetycznego rys. 6. Widmo promieniowania elektromagnetycznego niezamierzonego wytwarzanego przez monitor systemu sterowania PRT dla indukcji B pola magnetycznego przedstawiono na rys. 7.



Oznaczenia na rysunku a), b): — Norma MPR II — Norma TCO' 95
 Monitor systemu sterowania — Odległość pomiaru — 50 cm — 30cm

Rys. 6. Charakterystyki promieniowania elektromagnetycznego wytwarzanego przez monitor systemu sterowania PRT a) charakterystyka dookólna dla indukcji B pola magnetycznego, b) charakterystyka dookólna dla natężenia E pola elektrycznego,

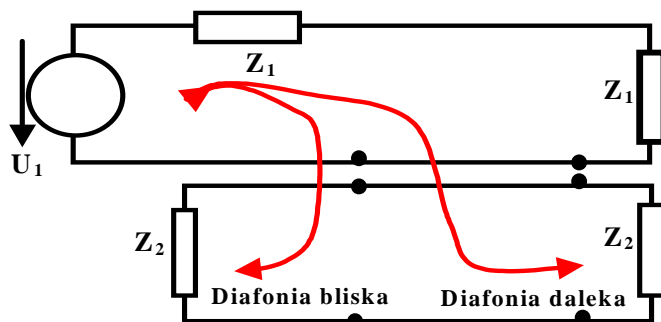
c) unormowana charakterystyka dookólna składowych B_x , B_y , B_z [μT] indukcji B pola magnetycznego dla zakresu częstotliwości ELF



Rys. 7. Widmo promieniowania elektromagnetycznego wytwarzanego przez monitor systemu sterowania PRT dla indukcji B pola magnetycznego

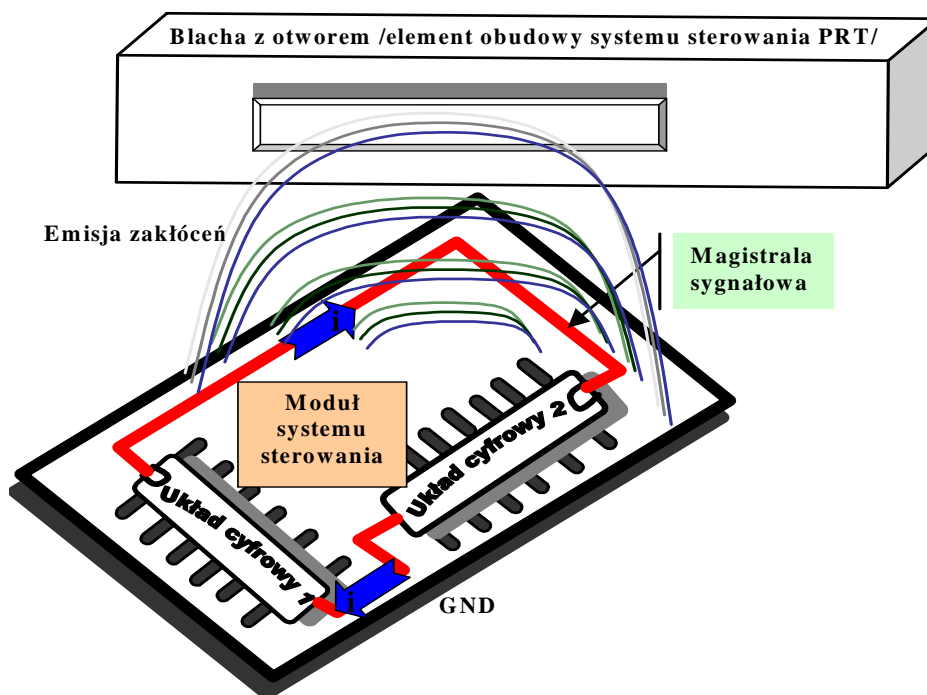
3. SPRZEŻENIA ZAKŁÓCEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH Z SYSTEMEM STEROWANIA PRT – WYBRANE ZAGADNIENIA

Przenoszenie się sygnałów elektrycznych z jednego obwodu do drugiego przez sprzężenie indukcyjne lub pojemnościowe nazywane bywa **diafonia – lub przesłuchem**. Jeżeli obwód zakłócający i wrażliwy zamknięte są na obu końcach rezystancją o wartości odpowiadającej impedancji charakterystycznej to eksploatowane są one w warunkach dopasowania. Ten rodzaj pracy jest istotny w przypadku pracy z wyższymi częstotliwościami (np. transmisja danych na krótkich odcinkach z logiką ECL), wówczas przy przenoszeniu sygnałów (impulsowych) nie wystąpią odbicia – rys. 8.



Rys. 8. Diafonia bliska i daleka w układach przesyłu informacji systemu sterowania PRT

Począwszy od częstotliwości 400 MHz zakłócenia rozchodzą się bezpośrednio przez otwory, uszczelnienia i szczeliny obudowy systemu sterowania PRT. Dla tej częstotliwości długość fali jest wystarczająco mała ($\lambda=0,75\text{m}$), aby znaleźć warunki dogodne dla takiego rozprzeszczenia się. Warunki rozprzeszczenia się (dyspersji) zakłóceń, wynikają z parametrów otworów oraz pętli prądowych między układami cyfrowymi 1, 2 systemu sterowania PRT – rys. 9. Powstała w układzie pętla prądowa jest powodem emisji zakłóceń elektromagnetycznych, których natężenie pola elektrycznego można obliczyć według wzoru 1.

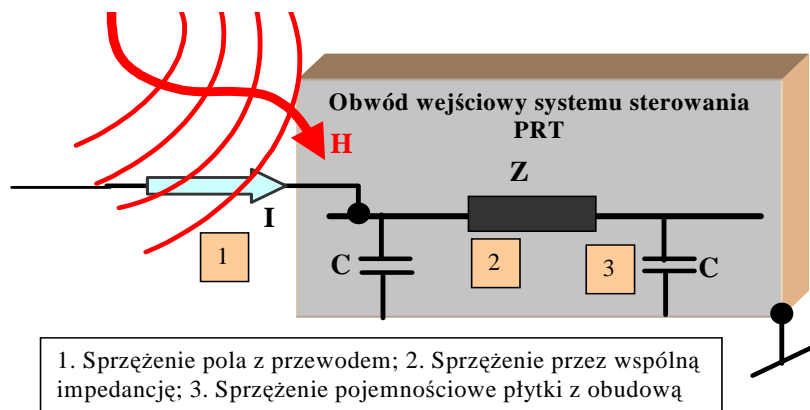


$$E = 131 \cdot 10^{-16} \cdot (f^2 \cdot A \cdot I) \cdot \left(\frac{1}{r}\right) \cdot \sin \Theta \quad (1)$$

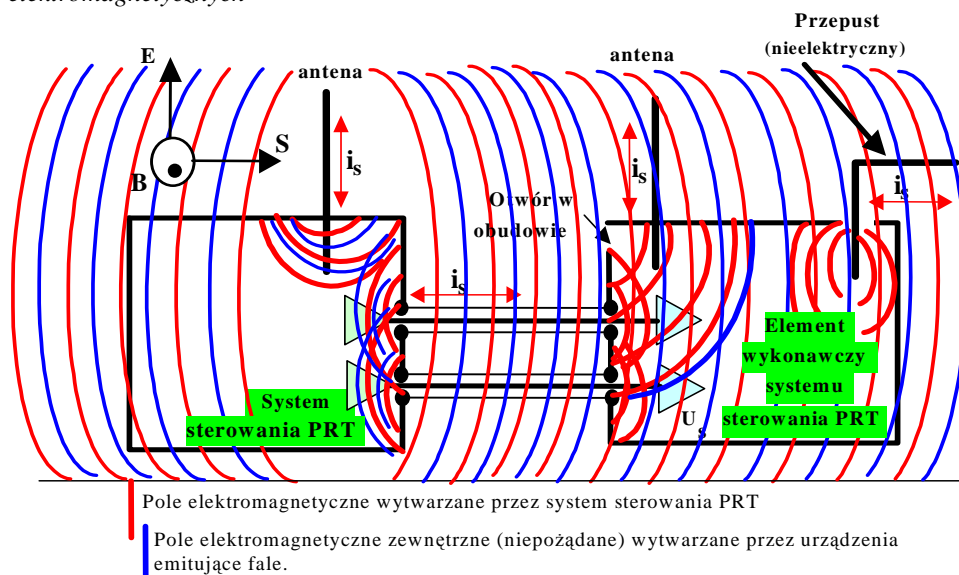
gdzie: f – częstotliwość sygnału; A – powierzchnia pętli prądowej; I – natężenie prądu obwodu; r – odległość od pętli; Θ – kąt charakteryzujący usytuowanie obwodu w przestrzeni

Rys. 9. Emisja zakłóceń przez system sterowania PRT umieszczony w obudowie ekranującej

Sposób sprzężenia obwodu wejściowego systemu sterowania PRT z sygnałami zakłóceń elektromagnetycznych został przedstawiony na rys. 10. Przesyłanie informacji o stanie systemu sterowania drogą radiową do ośrodka decyzyjnego nadzorującego pracę całego systemu sterowania ruchem kolejowym powoduje powstanie sprzężeń poprzez otwory, przepusty obudowy systemu – rys. 11.



Rys. 10. Sprzężenie obwodu wejściowego systemu sterowania PRT z sygnałami zakłóceń elektromagnetycznych



Rys. 11. Sprzężenie systemu sterowania i elementu wykonawczego podczas przesyłania informacji drogą radiową – wykorzystanie fal elektromagnetycznych o określonej częstotliwości

4. WNIOSKI

Do określenia oddziaływania zakłóceń elektromagnetycznych na systemy sterowania PRT niezbędne jest określenie:

- rodzaju silnika(ów), który zostanie użyty do napędu (zasilanie prądem stałym lub zmiennym, impulsowym);
- moc znamionowa silników, P_{max} ;

- wartość prądu pobierana przez silniki (stały, zmienny, zmienny 3 fazowy);
- wartość prądu rozruchowego silnika (w układzie sterowania 2-3 I_{zn});
- wartość napięcia zasilającego silniki (stałe, zmienne, zmienne 3 fazowy);
- dopuszczalny spadek napięcia w momencie rozruchu (sieć energetyczna nie przystosowana do dużych obciążeń);
- wartość prądu/napięcia w różnych stanach pracy silnika (np. stan jałowy, ustalony, zwarcia – charakterystyki biegów silnika);
- sposób włączenia/wyłączenia silnika (rozruch/zatrzymanie – stany nieustalone);
- sposób zasilania silnika – np. kabel ekranowany, szyny zasilające, średnica kabla, długość kabla, powierzchnia przekroju, ułożenie kabli);
- parametry uzwojeń silnika (L , r) L/r – stała czasu narastania prądu;
- rozmieszczenie silników napędowych w pojeździe;
- charakterystyki silnika:
 - nieliniowość obwodu magnetycznego silnika (harmoniczne);
 - harmoniczne żłobkowe silnika (obwód magnetyczny);
 - harmoniczne komutatorowe (przełączanie prądu);
 - niesymetryczność stojana względem wirnika (szczelina powietrzna – strumień);
 - sposób sterowania pracą silnika – ciągły/impulsowy;
- źródła promieniowania elektromagnetycznego w najbliższym otoczeniu planowanej inwestycji (elektroklimat).

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Choromański W.: *Prezentacja komputerowa ECO MOBILNOŚĆ*, marzec 2010 – PW.
- [2] Dyduch J., Moczarki J.: *Podstawy eksploatacji systemów sterowania ruchem kolejowym*, Radom, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej 2009.
- [3] Dyduch J., Paś J.: *Eksploatacja transportowych systemów nadzoru na rozległym obszarze kolejowym*, VII Krajowa Konferencja „Diagnostyka Techniczna Urządzeń i Systemów” Diag’ 2009 Ustroń
- [4] Paś J., Dyduch J.: *Oddziaływanie zakłóceń elektromagnetycznych na transportowe systemy bezpieczeństwa*, Pomiary Automatyka Robotyka nr 10/2009
- [5] Dyduch J., Paś J.: *Środowisko elektromagnetyczne na kolei i jego wpływ na systemy bezpieczeństwa*, Transport i Komunikacja nr 1/2009

Praca została wykonana w ramach projektu „ECO Mobilność” realizowanego na Politechnice Warszawskiej. Program współfinansowany jest z Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w ramach Priorytetu I (Badania i rozwój nowoczesnych technologii).