



Analiza występowania zaburzeń przewodzonych w wybranych urządzeniach kolejowych — wpływ obciążenia na wyniki pomiaru

KAMIL BIAŁEK¹, JACEK PAŚ

¹Institut Kolejnictwa, Laboratorium Automatyki i Telekomunikacji,
ul. Józefa Chłopickiego 50, 04-275 Warszawa, kbialek@ikolej.pl
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki,
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, jacek.pas@wat.edu.pl

Streszczenie. Parametrem sygnałów zakłócających decydującym o rodzaju sprzężenia jest częstotliwość zakłócająca. Dla częstotliwości mniejszych od 30 MHz dominują zakłócenia przewodzone. W artykule przedstawiono analizę występowania zakłóceń w systemie elektronicznym oraz wpływ obciążenia wybranego urządzenia kolejowego na wynik pomiaru emisji zaburzeń przewodzonych.

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, widmo, zakłócenia, sprzężenie indukcyjne i pojemnościowe.
DOI: 10.5604/01.3001.0013.3010

1. Wstęp

Urządzenia kolejowe eksploatowane w środowisku kolejowym powinny spełniać określone normy dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej EMC. Spełnienie wymagań normatywnych gwarantuje, że urządzenie nie będzie zakłócać pracy innych urządzeń elektronicznych znajdujących się w pobliżu oraz będzie odporne na otaczające je zaburzenia elektromagnetyczne [1, 3, 7].

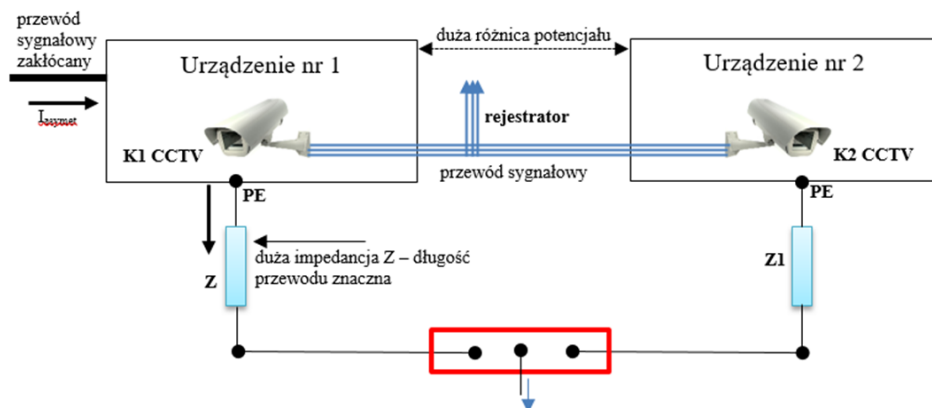
Zakłócenia w przypadku urządzeń niezasilanych bezpośrednio z sieci niskiego napięcia 230 V, 50 Hz przedostają się poprzez sprzężenia pojemnościowe, galwaniczne lub indukcyjne. Mają bardzo duże znaczenie w przypadku małych odległości pomiędzy danymi urządzeniami elektronicznymi, które występują w systemie (np. system sygnalizacji pożaru (SSP), system telewizji dozorowej (CCTV) itd.) [2, 8, 17, 18].

Znacznie większy zasięg mają zakłócenia rozchodzące się wzdłuż przewodów zasilających — tzw. zaburzenia przewodzone, które dominują dla częstotliwości mniejszych od 30 MHz.

Źródła przewodzonych zaburzeń elektromagnetycznych zawierają składową symetryczną zakłóceń — międzyprzewodową oraz składową niesymetryczną — między przewodem a ziemią. Zaburzenia symetryczne wnikają do urządzeń, jednak amplituda tych sygnałów jest bardzo mała. Decydujące znaczenie przy rozpatrywaniu zagadnienia kompatybilności elektromagnetycznej dla elementów wykonawczych systemu ma składowa niesymetryczna.

2. Analiza występowania zaburzeń przewodzonych

Prawidłowa transmisja, przetwarzanie i wykorzystanie sygnałów elektrycznych w urządzeniach kolejowych wymaga, aby w układach istniały punkty i/lub płaszczyzny ekwipotencjalne (stałe w czasie potencjały, niezależne od wartości wpływających lub wypływających prądów). Te punkty lub płaszczyzny odniesienia w danym podzespolu, urządzeniu lub systemie kolejowym stanowią tzw. masę (nazywane są również uziemieniami dla sygnałów). Nazwa uziemienie jest w pełni adekwatna w przypadku, gdy punkt lub dana płaszczyzna jest na potencjale ziemi (istnieje połączenie fizyczne z ziemią). Punkty i płaszczyzny znajdujące się na potencjale masy są bezpieczne dla człowieka. W praktyce zawsze punkty lub płaszczyzny odniesienia nie są ekwipotencjalne — uziemienie posiada małą, niezerową impedancję (rezystancję). Wtedy w obwodach elektrycznych i elektronicznych urządzeń kolejowych powstają pętle uziemienia. Jeżeli źródło sygnału i odbiornik (np. obciążenie — bateria akumulatorów w pojeździe kolejowym) są dołączone do takiej płaszczyzny odniesienia w dostatecznie odległych punktach, to między tymi punktami powstaje różnica potencjałów, wskutek czego pojawia się płynący w tym obwodzie prąd (rys. 1). Jeżeli do jednej płaszczyzny lub punktu uziemienia dołączono wiele źródeł sygnałów i obciążeń, powstają liczne, także wspólne ścieżki powrotu, którymi płyną prądy od obciążeń do źródeł. Zachodzi wówczas wzajemne niepożądane zjawisko — zakłócające oddziaływanie poszczególnych obwodów. Wtedy punkty płaszczyzny — odniesienia posiadają różne potencjały. Jeżeli rozpatrzmy dwa punkty, które umieszczone są w odległości np. 1 m na płaszczyźnie metalowej (obudowa przewodząca pojazdu kolejowego) stanowiącej płaszczyznę odniesienia dla sygnałów roboczych — pomiędzy tymi punktami wystąpi różnica potencjałów U dla danej częstotliwości f spowodowana np. oddziaływaniem niezamierzonego pola magnetycznego, które wytwarza zasilający przewód elektryczny zasilacza impulsowego (rys. 2).



Rys. 1. Urządzenia systemu CCTV połączone promieniowo — duża impedancja wspólna między wzajemnie połączonymi K1 a K2, oznaczenia na rysunku: Z, Z1 — impedancja uziemienia, K1, K2 CCTV — kamery telewizji dozorowej, PE — przewód ochronny

Impedancję Z określoną pomiędzy tymi dwoma punktami można zapisać według zależności (1):

$$Z \approx R = R_{RF} \left(1 + \frac{\text{tg} 2\Pi l}{\lambda l} \right) \cdot \frac{l}{w} \quad (1)$$

Wartość impedancji zależna jest od częstotliwości (długości fali λ) występujących zakłóceń w danym urządzeniu kolejowym. Dla różnych zakresów częstotliwości impedancję Z można opisać za pomocą wyrażeń (2-4):

$$Z \cong R_{RF} \left(1 + \frac{2\Pi l}{\lambda l} \right) \cdot \frac{l}{w} \cong k \cdot R_{DC} \left(1 + \frac{2\Pi l}{\lambda} \right) \cdot \frac{l}{w} \text{ dla } l < \frac{\lambda}{10} \quad (2)$$

$$Z \cong R_{RF} \cdot \frac{l}{w} \cong k \cdot R_{DC} \cdot \frac{l}{w} \text{ dla } l < \frac{\lambda}{20} \quad (3)$$

$$Z \cong R_{RF} \cdot \frac{2l}{w} \cong 2k \cdot R_{RF} \cdot \frac{l}{w} \text{ dla } l \approx \frac{\lambda}{8} \quad (4)$$

gdzie: $R_{RF} \left[\frac{\Omega}{\square} \right]$ — rezystancja powierzchniowa dla prądu zmiennego,

$R_{RF} = 0,26 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}$ — rezystancja dla miedzi,

$R_{RF} = 0,26 \cdot 10^{-6} \sqrt{\mu_w \cdot f} / \sigma_w$ — rezystancja dla innych metali znajdujących się w pojeździe kolejowym,

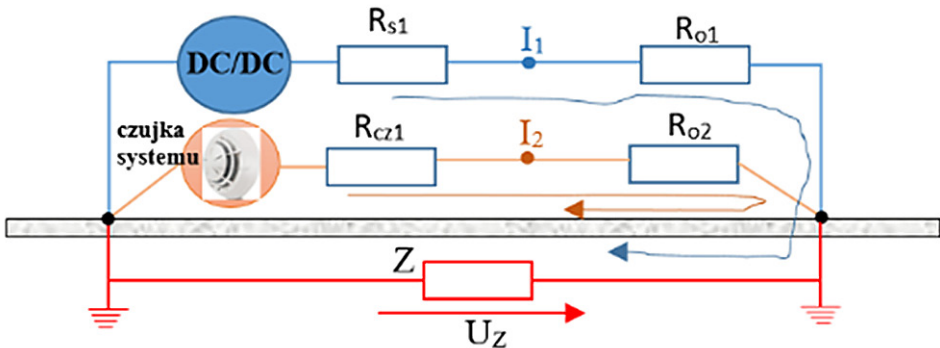
σ_w — względna konduktywność metalu odniesiona do miedzi,
 μ_w — względna przenikalność metalu odniesiona do miedzi,
 l [m] — długość fali odpowiadająca częstotliwości pola zakłócającego w układzie, urządzeniu lub systemie elektronicznym zlokalizowanym w pojeździe kolejowym,

$R_{DC} \left[\frac{\Omega}{\square} \right]$ — rezystancja powierzchniowa dla prądu stałego,

k — liczba określająca stosunek R_{RF}/R_{DC} .

Zależności 1-4 umożliwią oszacowanie impedancji płaszczyzn masy o różnych rozmiarach, wykonanych z różnych metali, dla wybranych częstotliwości sygnałów zakłóceń, które mogą wystąpić w elektronicznych systemach bezpieczeństwa. Z zależności 1 wynika, że impedancja między dwoma punktami na płaszczyźnie ekwipotencjalnej może mieć różne wartości. Dla płaszczyzny odniesienia wykonanej z metalu o następujących właściwościach elektrycznych ($\sigma_w = 10^{-1}$, $\mu_w = 10^3$) i wymiarach: długość $l = 70$ cm, szerokość $w = 1$ cm wartość impedancji Z między skrajnymi punktami na płaszczyźnie przy częstotliwości zakłóceń $f = 100$ kHz ($\lambda = 3$ km) można oszacować, wykorzystując zależność 3. Z zależności wynika, że $1/\lambda = 2,3 \cdot 10^{-4} < 1/20$. Impedancja Z dla tego przypadku wyniesie

$$Z \cong R_{RF} \cdot \frac{l}{w} = 0,57 \Omega \quad (5)$$



Rys. 2. Zakłócenia spowodowane sprzężeniem obwodów o różnych poziomach sygnału na wspólnej impedancji Z płaszczyzny uziemienia, gdzie: R_{s1} , R_{s2} – rezystancja wewnętrzna źródła zasilacza DC/DC i czujki elektronicznego systemu bezpieczeństwa; R_{o1} , R_{o2} – rezystancja obciążenia obwodu zasilacza i czujki systemu bezpieczeństwa

Źródłem zakłóceń jest obwód nr 1, odbiornikiem zakłóceń jest elektroniczny system bezpieczeństwa, a sygnał zakłóceń przenoszony jest przez wspólną płaszczyznę odniesienia charakteryzowaną przez impedancję uziemienia Z [2, 5, 7].

Analizując obwód nr 1, napięcie U_z będzie określone wyrażeniem 6

$$U_z = E_1 \frac{Z}{R_{s1} + R_{o1} + Z} \quad (6)$$

Obwód nr 2 jest odbiornikiem zakłóceń, składowa zakłóceń na rezystancji R_{o2} będzie wynosiła:

$$U_{zo2} = U_z \frac{R_{o2}}{R_{s2} + R_{o2} + Z} \quad (7)$$

Napięcie zakłóceń dla obwodu 2 z uwzględnieniem obwodu nr 1 (napięcie U_z) będzie wynosiło:

$$U_{zo2} = E_1 \frac{ZR_{o2}}{(R_{s1} + R_{o1})(R_{s2} + R_{o2})} \quad (8)$$

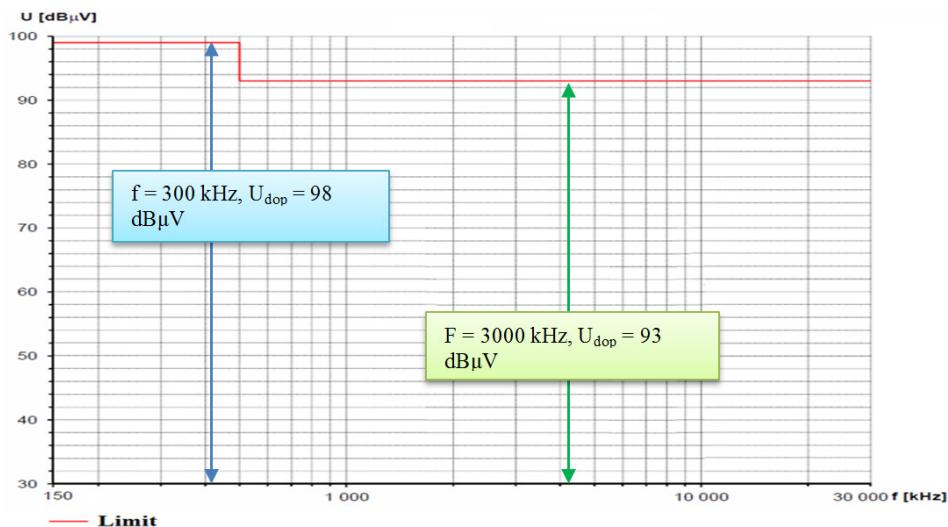
3. Pomiar emisji zaburzeń przewodzonych — wpływ obciążenia na wynik pomiaru

Badania kompatybilności elektromagnetycznej emisji zaburzeń przewodzonych urządzeń kolejowych przeprowadzane są zgodnie z metodyką zawartą w normie PN-EN 55016-2-1 [10] dla składowej niesymetrycznej napięcia zaburzeń radioelektrycznych w zakresie częstotliwości od 150 kHz do 30 MHz, z podziałem na dwa podzakresy częstotliwości:

- 150 ÷ 500 kHz,
- 500 kHz ÷ 30 MHz.

Dopuszczalne poziomy emisji zaburzeń przewodzonych zawarte w normie PN-EN 50121-3-2 [11] przedstawiono na rysunku 3.

Pomiar emisji zaburzeń przewodzonych wykonywany jest na wszystkich portach wejściowych oraz wyjściowych danego urządzenia. W artykule przedstawiono pomiar emisji zaburzeń przewodzonych zasilacza impulsowego pracującego bez obciążenia, na jałowo oraz obciążonego impedancją znamionową, wtedy na wyjściu występuje tzw. moc znamionowa. Zasilacz przeznaczony jest do zasilania obwodów oświetleniowych taboru kolejowego. Do pomiaru emisji zaburzeń przewodzonych wykorzystuje się sieć sztuczną, do której poprzez kabel koncentryczny podłączony jest odbiornik pomiarowy (rys. 4).

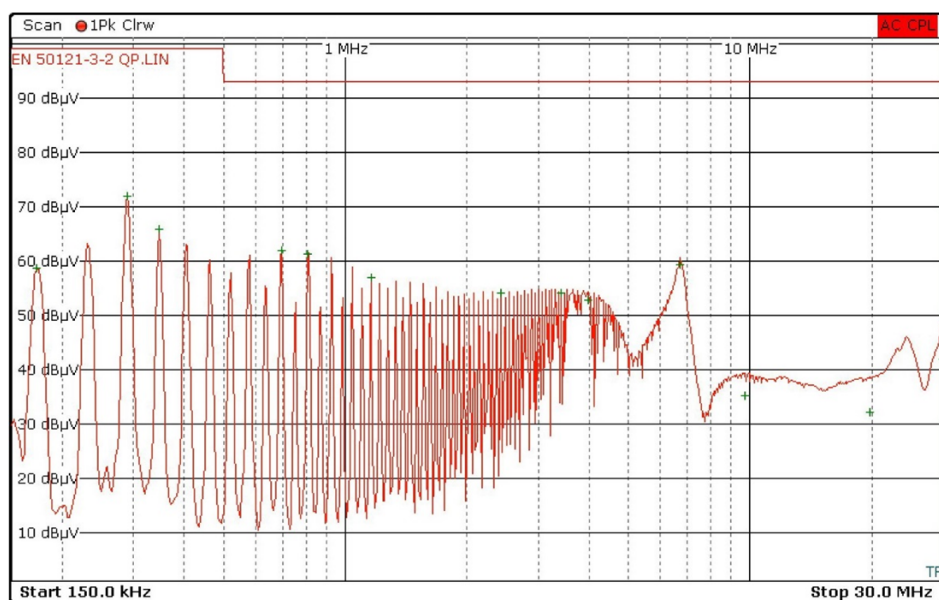


Rys. 3. Dopuszczalne wartości emisji zaburzeń przewodzonych zawarte w normie PN-EN 50121-3-2



Rys. 4. Stanowisko do pomiaru zaburzeń przewodzonych zasilania obwodów oświetleniowych taboru kolejowego

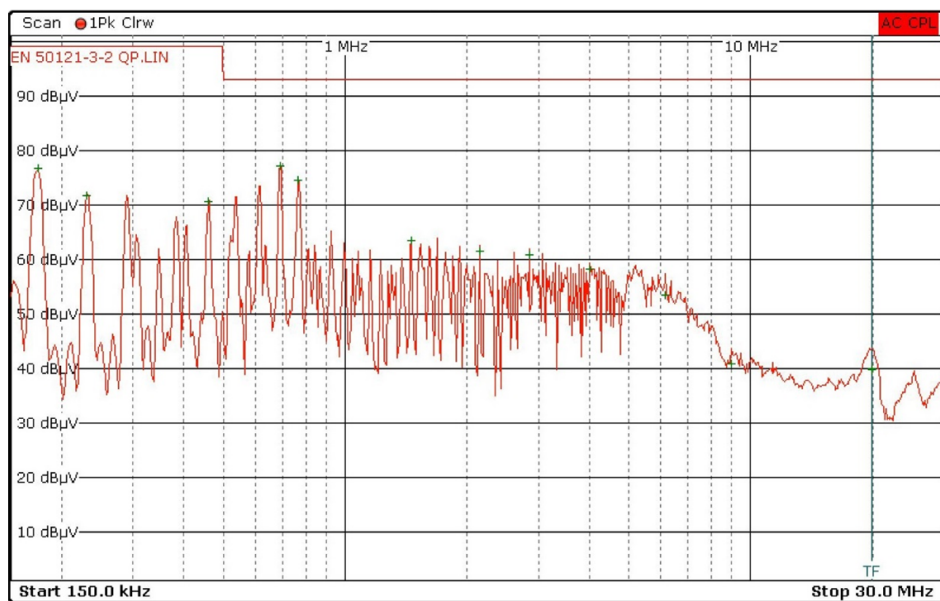
Pomiar zaburzeń elektromagnetycznych wykonano przy użyciu detektora quasi-peak QP (detektor wartości quasi-szczytowych). Detektor quasi-peak podczas wykonywania pomiarów umożliwia pomiar maksymalnej wartości sygnału po detekcji w ściśle ustalonym czasie wykonywania pomiaru. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów zaburzeń przewodzonych zasilacza impulsowego pracującego w stanie jałowym dla portu wyjściowego. Napięcie zasilania równe + 24 V DC, natomiast na rysunku 7 i 8 zasilacza obciążonego na moc znamionową.



Rys. 5. Pomiar emisji zaburzeń przewodzonych zasilacza impulsowego: port + 24 V DC, stan jałowy

Trace/Detector	Frequency	Level dBµV	DeltaLimit
1 Quasi Peak	172.5000 kHz	58.68	-40.32 dB
1 Quasi Peak	289.5000 kHz	71.82	-27.18 dB
1 Quasi Peak	348.0000 kHz	65.69	-33.31 dB
1 Quasi Peak	694.5000 kHz	61.88	-31.12 dB
1 Quasi Peak	809.2500 kHz	61.14	-31.86 dB
1 Quasi Peak	1.1580 MHz	56.85	-36.15 dB
1 Quasi Peak	2.4315 MHz	54.08	-38.92 dB
1 Quasi Peak	3.4148 MHz	53.98	-39.02 dB
1 Quasi Peak	3.9930 MHz	52.66	-40.34 dB
1 Quasi Peak	6.7155 MHz	59.33	-33.67 dB
1 Quasi Peak	9.7238 MHz	35.06	-57.94 dB
1 Quasi Peak	19.8533 MHz	32.08	-60.92 dB
1 Quasi Peak	29.9850 MHz	41.94	-51.06 dB

Rys. 6. Wykaz wartości zmierzonych dla zasilacza pracującego w stanie jałowym, port urządzenia + 24V DC

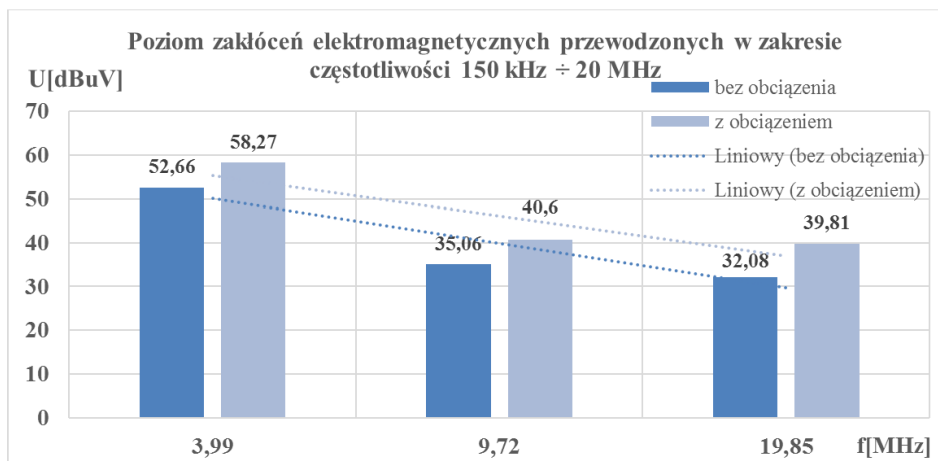


Rys. 7. Pomiar emisji zaburzeń przewodzonych zasilacza impulsowego: port + 24V DC, znamionowe obciążenie urządzenia

Trace/Detector	Frequency	Level dBμV	DeltaLimit
1 Quasi Peak	174.7500 kHz	76.65	-22.35 dB
1 Quasi Peak	231.0000 kHz	71.61	-27.39 dB
1 Quasi Peak	460.5000 kHz	70.56	-28.44 dB
1 Quasi Peak	692.2500 kHz	77.14	-15.86 dB
1 Quasi Peak	766.5000 kHz	74.52	-18.48 dB
1 Quasi Peak	1.4550 MHz	63.40	-29.60 dB
1 Quasi Peak	2.1480 MHz	61.43	-31.57 dB
1 Quasi Peak	2.8432 MHz	60.76	-32.24 dB
1 Quasi Peak	4.0043 MHz	58.27	-34.73 dB
1 Quasi Peak	6.1463 MHz	53.40	-39.60 dB
1 Quasi Peak	8.9970 MHz	40.78	-52.22 dB
1 Quasi Peak	19.9005 MHz	39.81	-53.19 dB
1 Quasi Peak	19.9770 MHz	39.76	-53.24 dB

Rys. 8. Wartości zmierzone dla zasilacza obciążonego na moc znamionową, port + 24V DC

Po podłączeniu zasilacza do obciążenia znamionowego zaobserwowano zmianę charakteru zaburzeń oraz zwiększony poziom zakłóceń elektromagnetycznych przewodzonych, który wystąpił w zakresie częstotliwości 150 kHz ÷ 20 MHz (rys. 9).



Rys. 9. Poziom zakłóceń elektromagnetycznych przewodzonych w zakresie częstotliwości 150 kHz ÷ 20 MHz bez obciążenia i z obciążeniem, zaznaczono linie trendu zakłóceń dla wybranego pasma zaburzeń

4. Wnioski

Podczas wykonywania badań emisji zaburzeń przewodzonych należy pamiętać, aby urządzenie lub system obciążony były zawsze mocą znamionową. W badanym urządzeniu (zasilacz dużej mocy) zaobserwowano podwyższony poziom zakłóceń wraz ze wzrostem obciążenia urządzenia (tabela 1).

TABELA 1

Poziom zakłóceń wraz ze wzrostem obciążenia urządzenia
w wybranym pasmie częstotliwości badanych

f [MHz]	U [dbuV]	U [dbuV]2
3,99	52,66	58,27
9,72	35,06	40,6
19,85	32,08	39,81
	bez obciążenia	z obciążeniem

Zmiany te wynikają z faktu, że badane urządzenie posiada nierezystancyjną charakterystykę obciążenia [16, 19]. Impedancja obciążenia zawiera pojemności i indukcyjności, które wprowadzają tego typu zakłócenia dla urządzeń zasilających [12, 13, 15].

Projektując urządzenie elektroniczne, np. zasilacz dużej mocy, należy zapewnić pracę tego urządzenia w warunkach środowiska rzeczywistego — w otoczeniu innych elementów i urządzeń, które stanowią inne systemy, np. system sterowania ruchem kolejowym (SRK) [1, 6, 14]. Oznacza to, że na system nie powinny oddziaływać zewnętrzne i wewnętrzne źródła zakłóceń, a i sam system nie powinien być źródłem zakłóceń [4, 5, 8, 9].

Źródło finansowania pracy – środki własne autorów.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na konferencji EKOMILITARIS 2018 „XXXII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna – Inżynieria Bezpieczeństwa – Ochrona przed Skutkami Nadzwyczajnych Zagrożeń, Zakopane 6.09.2018.

Artykuł wpłynął do redakcji 27.09.2018 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 4.06.2019 r.

Jacek Paś <https://orcid.org/0000-0001-8900-1445>

LITERATURA

- [1] CHAROY A., *Zakłócenia w urządzeniach elektronicznych*, WNT, Warszawa, 1999.
- [2] KOSZMIDER A.L., *Praktyczny poradnik w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej*, ALFA-WEKA, 1998.
- [3] OTT H.W., *Metody redukcji zakłóceń i szumów w układach elektronicznych*, WNT, Warszawa, 1979.
- [4] DYDUCH J., PAŚ J., ROSIŃSKI A., *Podstawy eksploatacji transportowych systemów elektronicznych*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom, 2011.
- [5] SIERGIEJCZYK M., PAŚ J., ROSIŃSKI A., *Issue of reliability – exploitation evaluation of electronic transport systems used in the railway environment with consideration of electromagnetic interference*, IET Intelligent Transport Systems, vol. 10, iss. 9, 2016, pp. 587-593, DOI: 10.1049/iet-its.2015.0183.
- [6] PAŚ J., SIERGIEJCZYK M., *Interference impact on the electronic safety system with a parallel structure*, Diagnostyka, vol. 17, no. 1, 2016, pp. 49-55.
- [7] WILLIAMS TIM, *EMC for product designer*, edition Newnes, 1992.
- [8] MONTROSE M.I., NAKAUCHI E.M., *Testing for EMC Compliance: Approaches and Techniques*, IEEE, 2014.
- [9] BAKER D.G., *Electromagnetic Compatibility – Analysis and Case Studies in Transportation*, WILEY & Sons, 2016.
- [10] PN-EN 55016-2-1:2014-09 + A1:2017-12 *Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i metod pomiaru zaburzeń radioelektrycznych oraz odporności na zaburzenia – Część 2-1: Metody pomiaru zaburzeń i badania odporności – Pomiary zaburzeń przewodzonych*.
- [11] PN-EN 50121-3-2:2017-04 *Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna. Część 3-2: Tabor – Aparatura*.

- [12] BIAŁEK K., PAŚ J., *Analysis of the electromagnetic environment on a large railway area*, Biuletyn WAT, 67, 1, 2018, pp. 53-63, DOI: 10.5604/01.3001.0011.8034.
- [13] BIAŁEK K., PAŚ J., *Badanie emisji zaburzeń promieniowanych pojazdów szynowych w trakcji wielokrotnej*, Technika Transportu Szynowego, TTS, 12, 2017, pp. 738-742.
- [14] SIERGIEJCZYK M., PAŚ J., DUDEK E., *Reliability analysis of aerodrome's electronic security systems taking into account electromagnetic interferences*, Safety and Reliability – Theory and Applications – 27th European Safety and Reliability Conference ESREL 2017, Portoraž, Słowenia, London, 2017, pp. 2285-2292.
- [15] PAŚ J., ROSIŃSKI A., *Selected issues regarding the reliability-operational assessment of electronic transport systems with regard to electromagnetic interference*, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, vol.19, no. 3, 2017, pp. 375-381, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2017.3.8>.
- [16] DUER S., SCATICAILOV S., PAŚ J., DUER R., BERNATOWICZ D., *Taking decisions in the diagnostic intelligent systems on the basis information from an artificial neural network*, 22nd International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy – IMANEE 2018, MATEC Web of Conferences, vol. 178, 2018, pp. 1-6.
- [17] DZIULA P., PAŚ J., *Low Frequency Electromagnetic Interferences Impact on Transport Security Systems Used in Wide Transport Areas*, TransNav. The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, vol. 12, no 2, 2018, pp. 251-258.
- [18] KLIMCZAK T., PAŚ J., *Analysis of reliability structures for fire signaling systems in the field of fire safety and hardware requirements*, Journal of KONBIN, vol. 46, 2018, pp. 191-214.
- [19] KANIEWSKI P., GIL R., KONATOWSKI S., *Estimation of UAV Position with Use of Smoothing Algorithms*, Metrology and Measurement Systems, vol. 24, no. 1, 2017, pp. 127-142.

K. BIAŁEK, J. PAŚ

Analysis of occurrence of guided disorders in selected railway equipment — impact of load on measurement results

Abstract. The parameter of interfering signals, determining the type of coupling, is the disturbing frequency. For frequencies less than 30 MHz, main impact comes by conducted emissions. The article presents an analysis of the occurrence of disturbances and the impact of the load of the selected railway equipment's on the measurement result of the conducted disturbances.

Keywords: electromagnetic field, spectrum, interference, induction and capacitive coupling

DOI: 10.5604/01.3001.0013.3010

