

Dr hab. inż. Jacek Paś, prof. WAT

Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Elektroniki
Instytut Systemów Elektronicznych
Zakład Eksploatacji Systemów Elektronicznych
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Polska
E-mail: jacek.pas@wat.edu.pl

Dr hab. inż. Adam Rosiński

Politechnika Warszawska
Wydział Transportu
Zakład Telekomunikacji w Transporcie
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Polska
E-mail: adro@wt.pw.edu.pl

Wybrane zagadnienia oceny niezawodnościowo-eksploatacyjnej transportowych systemów elektronicznych z uwzględnieniem zakłóceń elektromagnetycznych

Słowa kluczowe: eksploatacja, niezawodność, zakłócenia elektromagnetyczne, transportowe systemy elektroniczne

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienia związane z analizą niezawodnościowo-eksploatacyjną transportowych systemów elektronicznych, które są eksploatowane w określonym środowisku. Występujące na rozległym obszarze transportowym zaburzenia elektromagnetyczne zamierzone lub niezamierzone (stacjonarne lub ruchome) mogą być przyczyną zakłócenia ich funkcjonowania. Dlatego tak istotne jest prawidłowe funkcjonowanie transportowych systemów elektronicznych w zniekształconym środowisku elektromagnetycznym. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów podstawowych charakterystyk promieniowania niskiej częstotliwości dla zasilaczy, które zostały przeprowadzone dla dwóch zakresów częstotliwości: (0÷400) Hz i (400÷6500) Hz. Zaprezentowano wpływ zmiany napięcia obciążenia na pole elektryczne E [V/m] wytwarzane przez zasilacz, oraz wpływ zmiany prądu obciążenia zasilacza na indukcję pola magnetycznego B [nT]. Następnie opracowano graf relacji w transportowym systemie elektronicznym z uwzględnieniem poziomów zakłóceń pola elektrycznego i magnetycznego. Umożliwiło to wyznaczenie zależności pozwalających na określenie wartości prawdopodobieństw przebywania systemu w wyróżnionych stanach. Zaprezentowana w artykule metodyka analizy niezawodnościowo-eksploatacyjnej transportowych systemów elektronicznych z uwzględnieniem zakłóceń elektromagnetycznych może być użyta podczas projektowania systemów elektronicznych stosowanych w transporcie.

1. Wprowadzenie

Transportowe systemy elektroniczne funkcjonują w zróżnicowanych, często ekstremalnych warunkach eksploatacyjnych. Wieloletnie obserwacje ich procesu użytkowania w środowisku transportowym potwierdzają zależność ich poprawnego działania od niezawodności części składowych oraz efektywnego zarządzania procesem ich eksploatacji [6,7,8]. Analiza zjawisk eksploatacyjnych powinna zatem uwzględniać nie tylko podejście

niezawodnościowe, ale także efektywność zarządzania eksploatacją. W tym celu autorzy artykułu dokonali odwzorowania zjawisk zachodzących w rzeczywistości (z uwzględnieniem zakłóceń elektromagnetycznych) w modelu badawczym transportowego systemu elektronicznego.

Transportowe systemy elektroniczne są elementem wielu systemów transportowych. Ich prawidłowe funkcjonowanie ma istotny wpływ na bezpieczeństwo i sprawność procesu przemieszczania ludzi i ładunków. Zawodność urządzeń elektronicznych oraz błędy w działaniu operatorów mogą prowadzić do stanów zagrożenia bezpieczeństwa [11,15,18,30]. Teoria niezawodności zajmuje się analizą wpływu uszkodzeń urządzeń i błędów popełnianych przez operatorów na określone wskaźniki niezawodnościowe [24,26]. Obszarem zainteresowań teorii bezpieczeństwa są skutki uszkodzeń i błędów, które prowadzą do zagrożenia bezpieczeństwa. Bardzo istotna jest tu kwestia prawidłowego określenia, który ze stanów systemu można uznać za dopuszczalny lub niedopuszczalny z punktu widzenia bezpieczeństwa.

Stan zagrożenia bezpieczeństwa może być stanem odwracalnym, gdy istnieje możliwość podjęcia działań zmierzających do przywrócenia stanu pełnej zdatności (np. zdiagnozowanie uszkodzenia i podjęcie naprawy, skorygowanie błędu operatora, zneutralizowanie zdarzenia zewnętrznego). Realizacja przeciwdziałania musi być wykonana w czasie dyspozycyjnym. W przypadku, gdy podjęte przeciwdziałanie jest nieskuteczne, lub trwa zbyt długo, system przechodzi ze stanu zagrożenia bezpieczeństwa do stanu niebezpieczeństwa, nazywanego też stanem zawodności bezpieczeństwa.

Zwiększanie poziomu bezpieczeństwa transportowych systemów elektronicznych można zrealizować poprzez poprawę ich parametrów niezawodnościowych. Wzrost niezawodności można uzyskać podnosząc niezawodność elementów składowych lub stosując struktury nadmiarowe [20,21,25,32]. Pierwsze rozwiązanie ma na celu zapobieganie uszkodzeniom. W drugim przypadku zastosowanie podwójnej lub potrójnej nadmiarowości prowadzi co prawda do rozbudowy systemu, ale umożliwia tolerowanie występujących uszkodzeń. Nadmiarowość może dotyczyć zarówno podzespołów urządzenia, modułów systemu, jak też np. komputerów sterujących procesami transportowymi. Istotna jest też jakość informacji [10,28,29], jaką otrzymują systemy z czujników [4,9]. W niektórych pracach naukowych proponuje się zastosowanie logiki rozmytej [27] lub sztucznych sieci neuronowych [5]. Na funkcjonowanie transportowych systemów elektronicznych mają także istotny wpływ drgania [2], ale nie są one w niniejszym artykule uwzględnione.

Transportowe systemy elektroniczne pracują w zróżnicowanych warunkach eksploatacyjnych występujących na obszarach transportowych. Ich poprawne funkcjonowanie jest uzależnione nie tylko od niezawodności poszczególnych części składowych tworzących system, ale także od poziomu zakłóceń elektromagnetycznych [12,14] i przyjętych do realizacji strategii eksploatacji.

W artykule zaprezentowano pomiary widma pola elektromagnetycznego, które powstało w wyniku użytkowania zasilaczy stosowanych w transportowych systemach elektronicznych. Analiza otrzymanych wyników umożliwiła opracowanie modelu badawczego transportowego systemu elektronicznego, a następnie przeprowadzenie analizy niezawodnościowo-eksploatacyjnej z uwzględnieniem zakłóceń elektromagnetycznych.

2. Transportowe systemy elektroniczne

Wzajemne współistnienie transportowych systemów elektronicznych i ich prawidłowe funkcjonowanie na obszarze transportowym w określonym środowisku elektromagnetycznym oraz funkcjonowanie bez wprowadzania w to środowisko niedopuszczalnych zniekształceń elektromagnetycznych można zdefiniować jako kompatybilność elektromagnetyczną [1,3,13].

W przypadku oddziaływania zakłóceń elektromagnetycznych na transportowe systemy elektroniczne możemy wyróżnić cztery stany pracy tych systemów:

- system nie reaguje na zakłócenie zewnętrzne i wewnętrzne – poziom zakłóceń jest zbyt mały, nie zostały przekroczone dopuszczalne poziomy zakłóceń, system pozostaje w danym stanie eksploatacyjnym, w którym aktualnie się znajduje,
- urządzenia wchodzące w skład systemu sterowania samoczynnie likwidują zakłócenia poprzez zastosowane filtry pasywne lub aktywne, ekranowanie, odpowiednie rozmieszczenie lub rozwiązania układowe,
- wystąpienie zakłócenia o wartościach nie przekraczających dopuszczalne powoduje przejście systemu ze stanu zdatności do stanu częściowej zdatności – przywrócenie stanu zdatności wymaga podjęcia określonych działań,
- wystąpienie zakłócenia o wartościach przekraczających dopuszczalne powoduje uszkodzenie systemu, a tym samym przejście ze stanu zdatności do stanu niezdatności.

Transportowe systemy elektroniczne zainstalowane w obiektach stacjonarnych i ruchomych są użytkowane w określonym środowisku elektromagnetycznym. Naturalne środowisko elektromagnetyczne kształtowane przez zjawiska występujące na ziemi jest poważnie zniekształcone na obszarze transportowym. Jednym z przyczyn tego jest występowanie dużej liczby źródeł pól elektromagnetycznych promieniujących w sposób zamierzony lub niezamierzony. Każde urządzenie elektryczne lub elektroniczne zasilane energią elektryczną wytwarza własne pole elektromagnetyczne, które jest związane z jego pracą [22,23]. Na obszarze transportowym wykorzystywane są różnego rodzaju urządzenia i systemy elektroniczne, zasilane z różnych typów zasilaczy. Powinny one prawidłowo funkcjonować niezależnie od występujących zakłóceń, które na nie oddziałują.

Zakłócenia elektromagnetyczne o szerokim paśmie częstotliwości generowane przez różne urządzenia użytkowane na obszarze transportowym jednocześnie oddziałują na transportowe systemy elektroniczne. Widmo sygnałów zakłóceń wynika z częstotliwości pracy systemów (urządzeń), ich harmonicznych oraz częstotliwości intermodulacyjnych, które są wynikiem nieliniowości np. elementów elektronicznych.

Od nowoczesnych transportowych systemów elektronicznych stosowanych m.in. w transporcie wymaga się spełnienia wielu wymagań. Można do nich zaliczyć m.in. miniaturyzację, ograniczony poboru energii elektrycznej, dużą niezawodność działania. Wprowadzenie tych ograniczeń może skutkować tym, że poziom sygnałów użytecznych urządzeń może być porównywalny z poziomem zakłóceń generowanych np. przez stacjonarne i ruchome źródła zakłóceń (np. stacje bazowe, radiowe, linie średnich i wysokich napięć, stacje transformatorowe, urządzenia elektryczne powszechnego użytku). Dlatego też konieczne jest przeprowadzenie analizy niezawodnościowo-eksploatacyjnej systemów z uwzględnieniem zakłóceń elektromagnetycznych.

3. Analiza niezawodnościowo-eksploatacyjna transportowych systemów elektronicznych z uwzględnieniem zakłóceń elektromagnetycznych

Do pomiaru charakterystyk promieniowania niskiej częstotliwości zasilaczy transportowych systemów elektronicznych wykorzystano analizator widma o częstotliwości pracy od 0 Hz do 100 kHz. Widmo promieniowania z zakresu niskich częstotliwości, a taki został przyjęty do analizy funkcjonowania urządzeń, jest podzielone na dwa podzakresy: ELF i VLF. Obserwując zmiany poszczególnych składowych widma promieniowanego przez zasilacze można scharakteryzować stan ich pracy.

Pomiar podstawowych charakterystyk promieniowania niskiej częstotliwości został przeprowadzony dla dwóch zakresów częstotliwości: (0÷400) Hz i (400÷6500) Hz. Pomiar

powyżej częstotliwości 6,5 kHz jest mało przydatny z punktu widzenia diagnostyki urządzenia, gdyż poszczególne składowe widma promieniowania pola elektromagnetycznego mają bardzo małe wartości. W tabelach 1 i 2 przedstawiono wpływ zmiany napięcia obciążenia na pole elektryczne E [V/m] wytwarzane przez zasilacz, oraz wpływ zmiany prądu obciążenia zasilacza na indukcję pola magnetycznego B [nT]. Składowe E, B pola elektromagnetycznego są wytwarzane w sposób niezamierzony przez badane zasilacze elektronicznych systemów transportowych. Aby określić wpływ w/w parametrów (prądu obciążenia, napięcia wyjściowego) zasilacza systemu opracowano i zbudowano stanowisko pomiarowe do pomiaru pól rozproszonych E, B wytwarzanych przez badane urządzenia.

Tabela 1. Pole elektryczne E [V/m] wytwarzane przez badane zasilacze dla poszczególnych składowych widma sygnału (prąd obciążenia constans, zmiana napięcia wyjściowego dla danego typu zasilacza)

Typ zasilacza	P339		BS525		5353	
	U=10V I=3A	U=20V I=3A	U=15V I=1A	U=30V I=1A	U=20V I=1,8A	U=48V I=1,8A
50	1,603	1,799	1,71	2,64	1,628	2,277
100	0,0053	0,0058	0,0062	0,0073	0,003	0,003
150	0,174	0,241	0,174	0,34	0,16	0,21
350	0,13	0,18	0,1294	0,14	0,12	0,22
1250	0,173	0,18	0,0196	0,021	0,016	0,015

Tabela 2. Indukcja pola magnetycznego B[nT] wytwarzanego przez badane zasilacze dla poszczególnych składowych widma sygnału (napięcie obciążenia constans, zmiana prądu wyjściowego dla danego typu zasilacza)

Typ zasilacza	P339		BS525		5353	
	U=10V I=1A	U=10V I=4A	U=30V I=0,5A	U=30V I=1A	U=48V I=0,5A	U=48V I=1,8A
50	1834,25	1883,65	3556,3	4358,6	2540,9	2851,02
100	527,84	901,57	53	109,5	44,8	125,9
150	5134,52	4623,81	188	590	512,9	575,4
250	845,28	1096,48	169	199,8	46,1	316,3
350	134,74	121,62	42,5	467,4	14,2	50,2
550	4,47	13,96	1,7	4,6	2,99	5,7

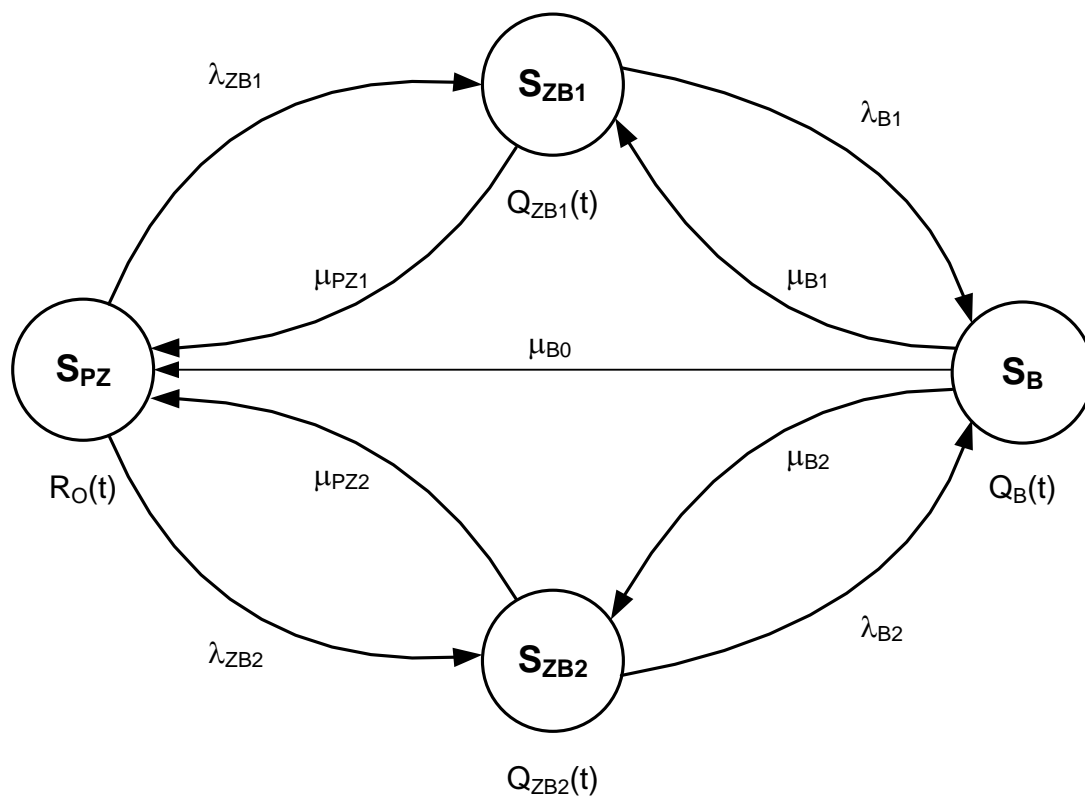
Badając wpływ napięcia obciążenia na widmo pola elektromagnetycznego można zauważyć dla poszczególnych typów zasilaczy wzrost amplitudy składowej harmonicznej widma sygnału (tab. 1). Dla zasilacza typu P339 największy wpływ zauważono dla harmonicznej 150 Hz – z wartości 0,174 V/m wzrost do 0,241 V/m, przy wzroście napięcia

zasilającego z 10V do 20V. Także dla składowej częstotliwości sieci energetycznej 50Hz nastąpił wzrost amplitudy, ale był on mniejszy i wyniósł tylko 10,89%. Dla pozostałych zasilaczy także można zauważyć wzrost amplitudy poszczególnych harmoniczných ze wzrostem napięcia zasilającego. Największy przyrost wystąpił dla częstotliwości 100 Hz dla zasilacza BS525 i wyniósł 48,8%. Dla wyższych częstotliwości (powyżej 350Hz) poszczególne składowe pola przy zmianie napięcia zasilającego na obciążeniu nie miały dużych wartości amplitud. Przyrost wartości amplitud był bardzo mały wraz ze wzrostem napięcia obciążenia.

Podobne zjawisko wzrostu amplitudy poszczególnych harmoniczných pola elektromagnetycznego można, zaobserwować dla indukcji B pola magnetycznego. Wzrost wartości indukcji pola zauważono przy zwiększaniu prądu obciążenia pobieranego z zasilacza (tab. 2). Znaczący wzrost amplitudy harmoniczných pola elektromagnetycznego można zaobserwować dla wyższych częstotliwości, tj. 250, 350, 550Hz. Dla częstotliwości 350 Hz, wzrost amplitudy harmoniczných dla zasilacza BS525 wyniósł aż 90,9%. Jednak przy wzroście prądu obciążenia zaobserwowano także przyrosty wartości poszczególnych harmoniczných ujemnych. Zjawisko to m. in. może być związane z oddawaniem energii pola z jednych prążków widma do drugich. Badając dokładnie przyrosty indukcji B pola magnetycznego i natężenia E pola elektrycznego można uzyskać informację o stanie obciążenia prądowego i napięciowego zasilacza.

Analizując otrzymane wyniki pomiarów można stwierdzić, iż transportowy system elektroniczny (eksploatowany w środowisku transportowym, gdzie występują zakłócenia elektromagnetyczne) może przebywać w określonych stanach [19,31]. Zatem słuszna wydaje się teza, by dokonać analizy niezawodnościowo-eksploatacyjnej. Dzięki temu uzyskamy zależności pozwalające wyznaczyć wartości prawdopodobieństw przebywania systemu w wyróżnionych stanach eksploatacyjnych.

Przeprowadzając analizę funkcjonowania transportowego systemu elektronicznego, można zilustrować relacje zachodzące w tej strukturze, w aspekcie niezawodnościowo-eksploatacyjnym, tak jak przedstawia to rys. 1.



Rys. 1. Relacje w transportowym systemie elektronicznym

Oznaczenia na rys.:

- $R_O(t)$ – funkcja prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanie pełnej zdolności S_{PZ} ,
- $Q_{ZB1}(t)$ – funkcja prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanie zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} ,
- $Q_{ZB2}(t)$ – funkcja prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanie zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB2} ,
- $Q_B(t)$ – funkcja prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanie zawodności bezpieczeństwa S_B ,
- λ_{ZB1} – intensywność przejść ze stanu pełnej zdolności S_{PZ} do stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} ,
- λ_{ZB2} – intensywność przejść ze stanu pełnej zdolności S_{PZ} do stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB2} ,
- μ_{PZ1} – intensywność przejść ze stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} do stanu pełnej zdolności S_{PZ} ,
- μ_{PZ2} – intensywność przejść ze stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB2} do stanu pełnej zdolności S_{PZ} ,
- λ_{B1} – intensywność przejść ze stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} do stanu zawodności bezpieczeństwa S_B ,
- λ_{B2} – intensywność przejść ze stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB2} do stanu zawodności bezpieczeństwa S_B ,
- μ_{B1} – intensywność przejść ze stanu zawodności bezpieczeństwa S_B do stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} ,
- μ_{B2} – intensywność przejść ze stanu zawodności bezpieczeństwa S_B do stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB2} ,
- μ_{B0} – intensywność przejść ze stanu zawodności bezpieczeństwa S_B do stanu pełnej zdolności S_{PZ} .

Stan pełnej zdadności S_{PZ} jest stanem, w którym prawidłowo funkcjonuje transportowy system elektroniczny. Stan zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} jest stanem, w którym transportowy system elektroniczny jest częściowo zdadny (zakłócenia pola elektrycznego nie przekraczają wartości dopuszczalnych). Stan zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB2} jest stanem, w którym transportowy system elektroniczny jest częściowo zdadny (zakłócenia pola magnetycznego nie przekraczają wartości dopuszczalnych). Stan zawodności bezpieczeństwa S_B jest stanem, w którym transportowy system elektroniczny jest niezadny (zakłócenia pola elektrycznego i pola magnetycznego przekraczają wartości dopuszczalne).

Jeśli transportowy system elektroniczny jest w stanie pełnej zdadności S_{PZ} i pojawia się zakłócenie pola elektrycznego to następuje przejście systemu do stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} z intensywnością λ_{ZB1} . Jeśli system jest w stanie zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} to możliwe jest przejście do stanu pełnej zdadności S_{PZ} pod warunkiem podjęcia działań polegających na przywróceniu stanu zdadności.

Gdy istnieje stan zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} a dodatkowo pojawia się zakłócenie pola magnetycznego to następuje przejście do stanu zawodności bezpieczeństwa S_B z intensywnością λ_{B1} . Zwrotne przejście do stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} ze stanu zawodności bezpieczeństwa S_B jest możliwe pod warunkiem podjęcia działań polegających na ograniczeniu poziomu zakłóceń pola magnetycznego do wartości z przedziału dopuszczalnego.

Jeśli transportowy system elektroniczny jest w stanie pełnej zdadności S_{PZ} i pojawia się zakłócenie pola magnetycznego to następuje przejście systemu do stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB2} z intensywnością λ_{ZB2} . Jeśli system jest w stanie zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB2} to możliwe jest przejście do stanu pełnej zdadności S_{PZ} pod warunkiem podjęcia działań polegających na przywróceniu stanu zdadności.

Gdy istnieje stan zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB2} a dodatkowo pojawia się zakłócenie pola elektrycznego to następuje przejście do stanu zawodności bezpieczeństwa S_B z intensywnością λ_{B2} . Zwrotne przejście do stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB2} ze stanu zawodności bezpieczeństwa S_B jest możliwe pod warunkiem podjęcia działań polegających na ograniczeniu poziomu zakłóceń pola elektrycznego do wartości z przedziału dopuszczalnego.

Jeśli transportowy system elektroniczny jest w stanie zawodności bezpieczeństwa S_B i nastąpi ograniczenie zakłóceń pola magnetycznego i elektrycznego, to następuje przejście systemu do stanu pełnej zdadności S_{PZ} z intensywnością μ_{B0} .

System przedstawiony na rys. 1 może być opisany następującymi równaniami Kołmogorowa-Chapmana:

$$\begin{aligned}
 R_0'(t) &= -\lambda_{ZB1} \cdot R_0(t) + \mu_{PZ1} \cdot Q_{ZB1}(t) - \lambda_{ZB2} \cdot R_0(t) + \mu_{PZ2} \cdot Q_{ZB2}(t) + \mu_{B0} \cdot Q_B(t) \\
 Q_{ZB1}'(t) &= \lambda_{ZB1} \cdot R_0(t) - \mu_{PZ1} \cdot Q_{ZB1}(t) - \lambda_{B1} \cdot Q_{ZB1}(t) + \mu_{B1} \cdot Q_B(t) \\
 Q_{ZB2}'(t) &= \lambda_{ZB2} \cdot R_0(t) - \mu_{PZ2} \cdot Q_{ZB2}(t) - \lambda_{B2} \cdot Q_{ZB2}(t) + \mu_{B2} \cdot Q_B(t) \\
 Q_B'(t) &= \lambda_{B1} \cdot Q_{ZB1}(t) + \lambda_{B2} \cdot Q_{ZB2}(t) - \mu_{B0} \cdot Q_B(t) - \mu_{B1} \cdot Q_B(t) - \mu_{B2} \cdot Q_B(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Przyjmując warunki początkowe:

$$\begin{aligned}
 R_0(0) &= 1 \\
 Q_{ZB1}(0) &= Q_{ZB2}(0) = Q_B(0) = 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

Stosując przekształcenie Laplace'a otrzymujemy następujący układ równań liniowych:

$$\begin{aligned}
s \cdot R_0^*(s) - 1 &= -\lambda_{ZB1} \cdot R_0^*(s) + \mu_{PZ1} \cdot Q_{ZB1}^*(s) - \lambda_{ZB2} \cdot R_0^*(s) + \mu_{PZ2} \cdot Q_{ZB2}^*(s) + \mu_{B0} \cdot Q_B^*(s) \\
s \cdot Q_{ZB1}^*(s) &= \lambda_{ZB1} \cdot R_0^*(s) - \mu_{PZ1} \cdot Q_{ZB1}^*(s) - \lambda_{B1} \cdot Q_{ZB1}^*(s) + \mu_{B1} \cdot Q_B^*(s) \\
s \cdot Q_{ZB2}^*(s) &= \lambda_{ZB2} \cdot R_0^*(s) - \mu_{PZ2} \cdot Q_{ZB2}^*(s) - \lambda_{B2} \cdot Q_{ZB2}^*(s) + \mu_{B2} \cdot Q_B^*(s) \\
s \cdot Q_B^*(s) &= \lambda_{B1} \cdot Q_{ZB1}^*(s) + \lambda_{B2} \cdot Q_{ZB2}^*(s) - \mu_{B0} \cdot Q_B^*(s) - \mu_{B1} \cdot Q_B^*(s) - \mu_{B2} \cdot Q_B^*(s)
\end{aligned} \tag{3}$$

Prawdopodobieństwa przebywania systemu w wyróżnionych stanach funkcjonalnych w ujęciu symbolicznym (Laplace'a) mają postać następującą:

$$\begin{aligned}
R_0^*(s) &= \frac{b_2 \cdot \lambda_{B1} \cdot \mu_{B1} - b_1 \cdot b_2 \cdot c + b_1 \cdot \lambda_{B2} \cdot \mu_{B2}}{a \cdot b_2 \cdot \lambda_{B1} \cdot \mu_{B1} - a \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot c + a \cdot b_1 \cdot \lambda_{B2} \cdot \mu_{B2} + b_2 \cdot c \cdot \lambda_{ZB1} \cdot \mu_{PZ1} + b_1 \cdot c \cdot \lambda_{ZB2} \cdot \mu_{PZ2} +} \\
&\quad + b_2 \cdot \lambda_{B1} \cdot \mu_{B0} \cdot \lambda_{ZB1} + b_1 \cdot \mu_{B0} \cdot \lambda_{B2} \cdot \lambda_{ZB2} - \lambda_{B1} \cdot \mu_{B1} \cdot \lambda_{ZB2} \cdot \mu_{PZ2} + \lambda_{B1} \cdot \mu_{B2} \cdot \lambda_{ZB1} \cdot \mu_{PZ2} + \\
&\quad + \lambda_{B2} \cdot \mu_{B1} \cdot \mu_{PZ1} \cdot \lambda_{ZB2} - \lambda_{B2} \cdot \mu_{B2} \cdot \lambda_{ZB1} \cdot \mu_{PZ1} \\
Q_{ZB1}^*(s) &= - \frac{b_2 \cdot c \cdot \lambda_{ZB1} + \lambda_{B2} \cdot \mu_{B1} \cdot \lambda_{ZB2} - \lambda_{B2} \cdot \mu_{B2} \cdot \lambda_{ZB1}}{a \cdot b_2 \cdot \lambda_{B1} \cdot \mu_{B1} - a \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot c + a \cdot b_1 \cdot \lambda_{B2} \cdot \mu_{B2} + b_2 \cdot c \cdot \lambda_{ZB1} \cdot \mu_{PZ1} + b_1 \cdot c \cdot \lambda_{ZB2} \cdot \mu_{PZ2} +} \\
&\quad + b_2 \cdot \lambda_{B1} \cdot \mu_{B0} \cdot \lambda_{ZB1} + b_1 \cdot \mu_{B0} \cdot \lambda_{B2} \cdot \lambda_{ZB2} - \lambda_{B1} \cdot \mu_{B1} \cdot \lambda_{ZB2} \cdot \mu_{PZ2} + \lambda_{B1} \cdot \mu_{B2} \cdot \lambda_{ZB1} \cdot \mu_{PZ2} + \\
&\quad + \lambda_{B2} \cdot \mu_{B1} \cdot \mu_{PZ1} \cdot \lambda_{ZB2} - \lambda_{B2} \cdot \mu_{B2} \cdot \lambda_{ZB1} \cdot \mu_{PZ1} \\
Q_{ZB2}^*(s) &= - \frac{b_1 \cdot c \cdot \lambda_{ZB2} + \lambda_{B1} \cdot \mu_{B2} \cdot \lambda_{ZB1} - \lambda_{B1} \cdot \mu_{B1} \cdot \lambda_{ZB2}}{a \cdot b_2 \cdot \lambda_{B1} \cdot \mu_{B1} - a \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot c + a \cdot b_1 \cdot \lambda_{B2} \cdot \mu_{B2} + b_2 \cdot c \cdot \lambda_{ZB1} \cdot \mu_{PZ1} + b_1 \cdot c \cdot \lambda_{ZB2} \cdot \mu_{PZ2} +} \\
&\quad + b_2 \cdot \lambda_{B1} \cdot \mu_{B0} \cdot \lambda_{ZB1} + b_1 \cdot \mu_{B0} \cdot \lambda_{B2} \cdot \lambda_{ZB2} - \lambda_{B1} \cdot \mu_{B1} \cdot \lambda_{ZB2} \cdot \mu_{PZ2} + \lambda_{B1} \cdot \mu_{B2} \cdot \lambda_{ZB1} \cdot \mu_{PZ2} + \\
&\quad + \lambda_{B2} \cdot \mu_{B1} \cdot \mu_{PZ1} \cdot \lambda_{ZB2} - \lambda_{B2} \cdot \mu_{B2} \cdot \lambda_{ZB1} \cdot \mu_{PZ1} \\
Q_B^*(s) &= - \frac{b_2 \cdot \lambda_{B1} \cdot \lambda_{ZB1} + b_1 \cdot \lambda_{B2} \cdot \lambda_{ZB2}}{a \cdot b_2 \cdot \lambda_{B1} \cdot \mu_{B1} - a \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot c + a \cdot b_1 \cdot \lambda_{B2} \cdot \mu_{B2} + b_2 \cdot c \cdot \lambda_{ZB1} \cdot \mu_{PZ1} + b_1 \cdot c \cdot \lambda_{ZB2} \cdot \mu_{PZ2} +} \\
&\quad + b_2 \cdot \lambda_{B1} \cdot \mu_{B0} \cdot \lambda_{ZB1} + b_1 \cdot \mu_{B0} \cdot \lambda_{B2} \cdot \lambda_{ZB2} - \lambda_{B1} \cdot \mu_{B1} \cdot \lambda_{ZB2} \cdot \mu_{PZ2} + \lambda_{B1} \cdot \mu_{B2} \cdot \lambda_{ZB1} \cdot \mu_{PZ2} + \\
&\quad + \lambda_{B2} \cdot \mu_{B1} \cdot \mu_{PZ1} \cdot \lambda_{ZB2} - \lambda_{B2} \cdot \mu_{B2} \cdot \lambda_{ZB1} \cdot \mu_{PZ1}
\end{aligned} \tag{4}$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
a &= s + \lambda_{ZB1} + \lambda_{ZB2} \\
b_1 &= s + \mu_{PZ1} + \lambda_{B1} \\
b_2 &= s + \mu_{PZ2} + \lambda_{B2} \\
c &= s + \mu_{B1} + \mu_{B2} + \mu_{B0}
\end{aligned}$$

Rozwiązanie powyższego zestawu równań w dziedzinie czasu jest kolejnym etapem analizy i nie jest tu omawiane.

4. Modelowanie procesu eksploatacyjnego transportowego systemu elektronicznego

Metody i badania symulacyjno-komputerowe dają możliwość stosunkowo szybkiego określenia wpływu zmian wskaźników niezawodnościowych poszczególnych elementów na niezawodność całego systemu. Oczywiście wcześniej musi być znana struktura niezawodnościowa systemu oraz charakterystyki niezawodnościowe poszczególnych elementów i układów.

Korzystając ze wspomaganie komputerowego można wyznaczyć wartość prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanie pełnej zdatności R_0 . Postępowanie takie przedstawia poniższy przykład.

Przykład

Przyjmijmy następujące wartości opisujące analizowany układ:

- czas badań – 1 rok (wartość tego czasu oraz następnych podano w jednostkach, jako godz. [h]):

$$t = 8760 [h]$$

- nieuszkodzalność systemu w przypadku występowania zakłóceń pola elektrycznego o wartościach z przedziału dopuszczalnego:

$$R_{ZB1}(t) = 0,949$$

- nieuszkodzalność systemu w przypadku występowania zakłóceń pola magnetycznego o wartościach z przedziału dopuszczalnego:

$$R_{ZB2}(t) = 0,991$$

- intensywność przejść ze stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} do stanu zawodności bezpieczeństwa S_B :

$$\lambda_{B1} = 0,000001$$

- intensywność przejść ze stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB2} do stanu zawodności bezpieczeństwa S_B :

$$\lambda_{B2} = 0,000006$$

- intensywność przejść ze stanu zawodności bezpieczeństwa S_B do stanu pełnej zdatności S_{PZ} :

$$\mu_{B0} = 0,01$$

- intensywność przejść ze stanu zawodności bezpieczeństwa S_B do stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} :

$$\mu_{B1} = 0,1$$

- intensywność przejść ze stanu zawodności bezpieczeństwa S_B do stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB2} :

$$\mu_{B2} = 0,1$$

Znając wartość nieuszkodzalności $R_{ZB1}(t)$, można oszacować intensywność przejść ze stanu pełnej zdatności do stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB1} . Zakładając najprostsz, wykładniczy model rozkładu czasu zdatności, możemy wykorzystać następującą zależność:

$$R_{ZB1}(t) = e^{-\lambda_{ZB1}t} \text{ dla } t \geq 0 \quad (5)$$

więc

$$\lambda_{ZB1} = -\frac{\ln R_{ZB1}(t)}{t} \quad (6)$$

Dla $t = 8760 [h]$ i $R_{ZB1}(t) = 0,949$ otrzymuje się:

$$\lambda_{ZB1} = -\frac{\ln R_{ZB1}(t)}{t} = -\frac{\ln 0,949}{8760} = 0,000006 \left[\frac{1}{h} \right] \quad (7)$$

Znając wartość nieuszkodzalności $R_{ZB2}(t)$, można oszacować intensywność przejść ze stanu pełnej zdatności do stanu zawodności bezpieczeństwa S_{ZB2} . Dla rozkładu wykładniczego mamy następującą zależność:

$$R_{ZB2}(t) = e^{-\lambda_{ZB2}t} \text{ dla } t \geq 0 \quad (8)$$

więc

$$\lambda_{ZB2} = -\frac{\ln R_{ZB2}(t)}{t} \quad (9)$$

Dla $t = 8760$ [h] i $R_{ZB2}(t) = 0,991$ otrzymuje się:

$$\lambda_{ZB2} = -\frac{\ln R_{ZB2}(t)}{t} = -\frac{\ln 0,991}{8760} = 0,000001 \left[\frac{1}{h} \right] \quad (10)$$

Dla powyższych wartości wejściowych z wykorzystaniem równania (4) otrzymuje się:

$$R_0^*(s) = \frac{3,85003 \cdot 10^{11} \cdot s + 3,3 \cdot 10^{11} \cdot \mu_{PZ1} + 5,5 \cdot 10^{10} \cdot \mu_{PZ2} + 5 \cdot 10^{17} \cdot s^2 \cdot \mu_{PZ1} + 5 \cdot 10^{17} \cdot s^2 \cdot \mu_{PZ2} + 1,050035 \cdot 10^{17} \cdot s^2 + 5 \cdot 10^{17} \cdot s^3 + 1,05003 \cdot 10^{17} \cdot s \cdot \mu_{PZ1} + 1,050005 \cdot 10^{17} \cdot s \cdot \mu_{PZ2} + 1,05 \cdot 10^{17} \cdot \mu_{PZ1} \cdot \mu_{PZ2} + 5 \cdot 10^{17} \cdot s \cdot \mu_{PZ1} \cdot \mu_{PZ2} + 30000}{2,665021 \cdot 10^6 \cdot s + 1,050035 \cdot 10^{17} \cdot s^2 \cdot \mu_{PZ1} + 1,050035 \cdot 10^{17} \cdot s^2 \cdot \mu_{PZ2} - 5 \cdot 10^{17} \cdot s^3 \cdot \mu_{PZ1} + 5 \cdot 10^{17} \cdot s^3 \cdot \mu_{PZ2} + 1,1200275 \cdot 10^{12} \cdot s^2 + 1,05007 \cdot 10^{17} \cdot s^3 + 5 \cdot 10^{17} \cdot s^4 + 4,35003 \cdot 10^{11} \cdot s \cdot \mu_{PZ1} + 6,85003 \cdot 10^{11} \cdot s \cdot \mu_{PZ2} + 1,05 \cdot 10^{17} \cdot s \cdot \mu_{PZ1} \cdot \mu_{PZ2} + 5 \cdot 10^{17} \cdot s^2 \cdot \mu_{PZ1} \cdot \mu_{PZ2}} \quad (11)$$

Przyjmując $\mu_{PZ1} = 0,1$, $\mu_{PZ2} = 0,2$ i stosując przekształcenia Laplace'a otrzymuje się:

$$R_0(t) = 0,00000496942 \cdot e^{-0,199947319 \cdot t} + 0,000059996 \cdot e^{-0,100006 \cdot t} + 3,03804695 \cdot e^{-0,21006058 \cdot t} + 0,9999350039 \quad (12)$$

Ostatecznie otrzymuje się:

$$R_0 = 0,999935$$

Przedstawiona analiza niezawodnościowo-eksploatacyjna transportowego systemu elektronicznego z uwzględnieniem zakłóceń elektromagnetycznych umożliwia liczbową ocenę różnego rodzaju rozwiązań (technicznych i organizacyjnych), które mogą być wdrożone w celu zminimalizowania wpływu zakłóceń elektromagnetycznych na funkcjonowanie systemu.

W celu dokonania minimalizacji wpływu zakłóceń elektromagnetycznych na transportowe systemy elektroniczne należy określić: źródło zakłóceń, odbiornik zakłóceń oraz sposób sprzęgania źródła z odbiornikiem. Istnieją trzy główne sposoby ograniczenia rozchodzenia się zakłóceń:

- zakłócenia mogą być tłumione przy źródle (np. stosowanie ekranowania osłaniającego),
- wykonanie transportowego systemu elektronicznego, który będzie niewrażliwy na wpływające na niego zakłócenia występujące w środowisku elektromagnetycznym (stosowanie elementów elektronicznych wykonanych w odpowiedniej technologii),

- minimalizowanie przenoszenia zakłóceń przez kanały sprzężenia (np. filtry odprzegajające, uziemienia, sprzęgacze optyczne [16,17], ekranowanie, itd.).

Podsumowując rozważania, jeśli konstruktorzy będą znać warunki środowiska elektromagnetycznego (m.in. poprzez zaprezentowane powyżej pomiary i analizy niezawodnościowo–eksploatacyjne) w jakich będzie prawdopodobnie funkcjonował transportowy system elektroniczny, to należy spełnić wymagania EMC, które są zazwyczaj znane i można je uwzględnić w trakcie opracowywania konstrukcji urządzenia.

5. Wnioski

Powszechne stosowanie układów elektrycznych i elektronicznych w transportowych systemach elektronicznych powoduje konieczność funkcjonowania ich w różnorodnych układach przy usytuowaniu bardzo blisko siebie. Skutkiem tego może być zwiększenie wystąpienia prawdopodobieństwa zakłóceń w funkcjonowaniu urządzenia, a tym samym znajdowanie się w stanach częściowej zdatności. Dlatego też projektując transportowe systemy elektroniczne należy przygotować je do pracy w warunkach rzeczywistych, czyli w otoczeniu innych urządzeń. Pomocna może w tym być przedstawiona metodyka analizy niezawodnościowo-eksploatacyjnej transportowych systemów elektronicznych z uwzględnieniem zakłóceń elektromagnetycznych. Pozwala ona liczbowo określić wartości prawdopodobieństw przebywania systemu w wyróżnionych stanach.

W dalszych badaniach autorzy planują zróżnicować stany częściowej zdatności i wyróżnić w nich stany podrzędne. Umożliwi to dokładniejsze odwzorowanie funkcjonowania transportowego systemu elektronicznego użytkowanego w środowisku elektromagnetycznym.

Bibliografia

1. Billinton R, Allan RN. Reliability evaluation of power systems. New York: Plenum Press, 1996.
2. Burdzik R, Konieczny Ł, Figlus T. Concept of on-board comfort vibration monitoring system for vehicles. In the monograph Activities of Transport Telematics, editors: Mikulski J., TST 2013, CCIS 395. Heidelberg: Springer, 2013: 418-425.
3. Charoy A. Interference in electronic equipment. Warsaw: WNT, 1999.
4. Dabrowski T, Bednarek M, Fokow K, Wisnios M. The method of threshold-comparative diagnosing insensitive on disturbances of diagnostic signals. Przegląd Elektrotechniczny - Electrical Review 2012; 88(11A): 93-97.
5. Duer S, Zajkowski K, Duer R, Paś J. Designing of an effective structure of system for the maintenance of a technical object with the using information from an artificial neural network. Neural Computing & Applications 2012; 23(3): 913–925. DOI: 10.1007/s00521-012-1016-0.
6. Dyduch J, Paś J, Rosiński A. The basic of the exploitation of transport electronic systems. Radom: Publishing House of Radom University of Technology, 2011.

7. Garmabaki A.H.S., Ahmadi A., Mahmood Y.A., Barabadi A. Reliability modelling of multiple repairable units. *Quality and Reliability Engineering International* 2016; 32(7): 2329–2343. DOI: 10.1002/qre.1938.
8. Jacyna-Golda I. Evaluation of operational reliability of the supply chain in terms of the control and management of logistics processes. In *Safety and Reliability: Methodology and Applications - Proceedings of the European Safety and Reliability Conference ESREL 2014*, editors: Nowakowski T., Młyńczak M., Jodejko-Pietruczuk A. & Werbińska-Wojciechowska S. London: CRC Press/Balkema, 2015: 549-558.
9. Kasprzyk Z, Rychlicki M. Analysis of physical layer model of WLAN 802.11g data transmission protocol in wireless networks used by telematic systems. In: *Proceedings of the Ninth International Conference Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX*, given as the monographic publishing series – „Advances in intelligent systems and computing”, vol. 286. Springer, 2014: 265-274.
10. Lewiński A, Perzyński T, Toruń A. The analysis of open transmission standards in railway control and management. *Communications in Computer and Information Science*, vol. 329. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012: 10-17.
11. Łubkowski P, Laskowski D. Selected issues of reliable identification of object in transport systems using video monitoring services. *Communication in Computer and Information Science*, vol. 471. Berlin Heidelberg, Springer, 2015: 59-68.
12. Ogunsola A, Mariscotti A. *Electromagnetic compatibility in railways. Analysis and management*. Springer-Verlag, 2013.
13. Ott HW. *Electromagnetic compatibility engineering*. Wiley, 2009.
14. Paś J, Duer S. Determination of the impact indicators of electromagnetic interferences on computer information systems. *Neural Computing & Applications* 2012; 23(7): 2143-2157. DOI:10.1007/s00521-012-1165-1.
15. Paś J. *Operation of electronic transportation systems*. Radom: Publishing House University of Technology and Humanities, 2015.
16. Perlicki K. Evaluation of the spatial distribution of birefringence in an optical-fiber link. *Microwave and Optical Technology Letters* 2004; 42(2): 147-149.
17. Perlicki K. Impact of an alien wavelength on wavelength division multiplexing transmission quality. *Photonics Letters of Poland* 2012; 4(3): 118-120.
18. Perzyński T, Lewiński A, Łukasik Z. Safety analysis of accidents call system especially related to in-land water transport based on new telematic solutions. *Communications in Computer and Information Science, Tools of Transport Telematics*, vol 531. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015: 90-98
19. Rosiński A. *Modelling the maintenance process of transport telematics systems*. Warsaw: Publishing House Warsaw University of Technology, 2015.

20. Siergiejczyk M, Krzykowska K, Rosiński A. Reliability assessment of cooperation and replacement of surveillance systems in air traffic. In: Proceedings of the Ninth International Conference Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, editors: W. Zamojski, J. Mazurkiewicz, J. Sugier, T. Walkowiak, J. Kacprzyk, given as the monographic publishing series – „Advances in intelligent systems and computing”, vol. 286. Springer, 2014: 403–411.
21. Siergiejczyk M, Krzykowska K, Rosiński A. Reliability assessment of integrated airport surface surveillance system. In: Proceedings of the Tenth International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, editors: W. Zamojski, J. Mazurkiewicz, J. Sugier, T. Walkowiak, J. Kacprzyk, given as the monographic publishing series – „Advances in intelligent systems and computing”, vol. 365. Springer, 2015: 435-443.
22. Siergiejczyk M, Paś J, Rosiński A. Train call recorder and electromagnetic interference. *Diagnostyka* 2015; 16(1): 19-22.
23. 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* 2016; 10(9): 587–593. DOI: 10.1049/iet-its.2015.0183.
24. Siergiejczyk M, Paś J., Rosiński A. Modeling of process of exploitation of transport telematics systems with regard to electromagnetic interferences. In *Tools of Transport Telematics*, editors: Mikulski J., given as the monographic publishing series – „Communications in Computer and Information Science”, vol. 531. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015: 99-107.
25. Siergiejczyk M, Rosiński A, Krzykowska K. Reliability assessment of supporting satellite system EGNOS. In the monograph *New results in dependability and computer systems*, editors: W. Zamojski, J. Mazurkiewicz, J. Sugier, T. Walkowiak, J. Kacprzyk, given as the monographic publishing series – „Advances in intelligent and soft computing”, vol. 224. Springer, 2013: 353–364.
26. Siergiejczyk M, Rosiński A. Analysis of power supply maintenance in transport telematics system. *Solid State Phenomena* 2014; 210: 14–19.
27. Skorupski J, Uchroński P. A fuzzy reasoning system for evaluating the efficiency of cabin luggage screening at airports. *Transportation Research Part C - Emerging Technologies* 2015; 54: 157-175.
28. Stawowy M, Dziula P. Comparison of uncertainty multilayer models of impact of teleinformation devices reliability on information quality. In: Proceedings of the European Safety and Reliability Conference ESREL 2015, editors: Podofillini L., Sudret B., Stojadinovic B., Zio E., Kröger W. CRC Press/Balkema, 2015: 2685-2691.
29. Stawowy M. Model for information quality determination of teleinformation systems of transport. In: Proceedings of the European Safety and Reliability Conference

ESREL 2014, editors: Nowakowski T., Młyńczak M., Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S. CRC Press/Balkema, 2015: 1909–1914.

30. Sumiła M., Miskiewicz A. Analysis of the problem of interference of the public network operators to GSM-R. In Tools of Transport Telematics, editors: Mikulski J., given as the monographic publishing series – „Communications in Computer and Information Science”, vol. 531. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015: 76-82.
31. Verma AK, Ajit S, Karanki DR. Reliability and safety engineering. London: Springer, 2010.
32. Weintrit A., Dziula P., Siergiejczyk M., Rosiński A. Reliability and exploitation analysis of navigational system consisting of ECDIS and ECDIS back-up systems. The monograph Activities in Navigation - Marine Navigation And Safety Of Sea Transportation, editors: Weintrit A. London: CRC Press/Balkema, 2015: 109-115.