

Jacek PAŚ
Adam ROSIŃSKI

SELECTED ISSUES REGARDING THE RELIABILITY-OPERATIONAL ASSESSMENT OF ELECTRONIC TRANSPORT SYSTEMS WITH REGARD TO ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE

WYBRANE ZAGADNIENIA OCENY NIEZAWODNOŚCIOWO-EKSPLOATACYJNEJ TRANSPORTOWYCH SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM ZAKŁÓCEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH*

The article presents issues associated with the reliability-operational analysis of electronic transport systems, which are operated in a defined environment. Intended or unintended (static or mobile) electromagnetic interference, which are present over a broad transport area, can cause interference of its functioning. That is why correct functioning of electronic transport systems in a distorted electromagnetic environment is so important. The articles measurement results of low frequency radiation basic characteristics for power supplies, which were carried out for two frequency ranges: (0÷400) Hz and (400÷6500) Hz. The impact of the load's voltage change on the electric field E [V/m] produced by the power supply and the impact of power supply load's current changes on the induction of the magnetic field B [nT] were presented. Next, a graph of relations in an electronic transport system, with regard to level of interference in electric and magnetic fields, was developed. This allowed to determine the relations, which enable to define the probability values of a system being in the distinguished states. The methodology of the reliability-operational analysis of electronic transport systems with regard to electromagnetic interference presented in this article, may be used during designing of electronic systems used in transport.

Keywords: operation, reliability, electromagnetic interference, electronic transport systems.

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.

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

1. Introduction

Electronic transport systems function in different, often extreme, operational conditions. Many years of observations of their use process in a transport environment confirm the dependence of their correct operation on the reliability of the components and effective management of their operation process [6, 7, 8]. The analysis of operational phenomena should, therefore, take into account not only the reliability approach but also the effectiveness of operational management. For this purpose, the authors imitated the phenomena undergoing in reality (including electromagnetic interference) in a research model of an electronic transport system.

Electronic transport systems are elements in many transport systems. Their proper functioning significantly impacts the safety and

efficiency of the process of transporting humans and cargo. Unreliability of electrical equipment and operator errors may lead to safety hazard states [11, 15, 18, 30]. The theory of unreliability deals with the analysis of the impact of equipment damage and operator errors on defined unreliability indicators [24, 26]. The scope of interest of the theory of safety are the results of damages and errors, which lead to safety hazards. Very important is the issue of correct determination which of the system's states can be deemed permissible or impermissible, from the safety point of view.

The safety hazard state may be a reversible state, when there is a possibility to take actions aimed at restoring the state of full worthiness (e.g. Diagnosing a damage and attempting repair, correcting an operator error, neutralising an external event). The

(*) Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny w elektronicznym wydaniu kwartalnika na stronie www.ein.org.pl

execution of a counter-action has to be performed in the availability time. In case of the counter-action being ineffective or is taking too long, the system switches from the safety hazard state to a hazard state, also called the safety unreliability state.

An increase of the level of electronic transport systems' safety may be executed through improving their reliability parameters. An increase in reliability can be achieved by the increased reliability of components or using redundant structures [20, 21, 25, 32]. The first solution is aimed at preventing damages. In the second case, the use of double or triple redundancy leads to, admittedly, expansion of the system but enables tolerating the occurring damages. Redundancy may concern the devices subassemblies, system modules, as well as e.g. computers controlling transport processes. The quality of information [10, 28, 29], which the systems receive from sensors is also important [4, 9]. Some scientific papers propose to use fuzzy logic [27] or artificial neuron networks [5]. Electronic transport systems are also significantly impacted by vibrations [2] but they are not taken into consideration in this article.

Electronic transport systems operate in various operating conditions present in transport areas. Their correct functioning is conditioned not only on the reliability of individual components comprising the system but also on the level of electromagnetic interference [12, 14] and the operational strategies adopted for implementation

The article presents measurements of the electromagnetic spectrum, which was created as a result of the use of power supplies used in electronic transport systems. An analysis of the obtained results made it possible to develop a research model of an electronic transport system and then, to carry out the reliability-operational analysis with regard to electromagnetic interference.

2. Electronic transport systems

Mutual coexistence of electronic transport systems and their correct functioning in the transport domain in a defined electromagnetic environment and the functioning without introducing unacceptable electromagnetic interference into that environment, can be defined as electromagnetic compatibility [1, 3, 13].

In the case of the impact of electromagnetic interference on electronic transport systems, we can distinguish four operating states for these systems:

- the system does not react to external and internal interference – the interference level is too low, permissible interference levels were not exceeded, the system remains in a given operating state in which it currently is,
- the devices comprising the control system automatically remove interference through used passive or active filters, screening, correct distribution or system solutions,
- the occurrence of interference with values not exceeding the permissible ones, causes the system to switch from the worthiness state to the partial worthiness states – restoration of the worthiness state requires taking specific actions,
- the occurrence of interference with values exceeding the permissible ones, damages the system, and thus, the transition from the worthiness to the unworthiness state.

Electronic transport systems are installed in stationary and mobile facilities, and are used in a defined electromagnetic environment. Natu-

ral electromagnetic environment is shaped by the phenomena that occur on the ground, but is seriously distorted on the transport area. One of the reasons for that is the presence of a high number of electromagnetic fields, radiating in intended or unintended manners. Each electric or electronic device, supplied with electric power, produces its own electromagnetic field, which is associated with its operation [22, 23]. Electronic devices and systems, supplied by feeders of different types, are used over the transport area. They should function properly, regardless of the present interference, which have effect on them.

Electromagnetic interference with a broad frequency band, generated by different devices used over the transport area simultaneously, at the same time impact the electronic transport systems. The interference signal spectrum results from the operating frequency of systems (devices), their harmonics and the intermodulation frequencies, which are the result of non-linearity, e.g. of electronic elements.

Modern electronic transport systems used, i.a., in transport, are expected to satisfy many requirements. They can include, i.a., miniaturization, limited electrical energy consumption, high reliability. Introducing these limitations may result in the fact that the level of useful signals from devices may be comparable to the level of interference generated by, e.g., stationary and mobile interference sources (e.g. base and radio stations, MV and LV lines, transformer stations, commonly use electrical devices). That is why, it is necessary to perform a reliability-operational analysis of the systems, with regard to electromagnetic interference.

3. Reliability-operational analysis of electronic transport systems with regard to electromagnetic interference

In order to measure the low frequency radiation characteristics of power feeders of electronic transport systems, a spectrum analyser, with an operating frequency of 0 Hz to 100 kHz, was used. The radiation spectrum in the low frequency range, and this was adopted for the device functional analysis, is divided into two sub-ranges: ELF and VLF. Observing the changes of individual spectrum components radiated by the power supplies, their operating state can be characterized.

The measurement of the low frequency radiation basic characteristics was carried out for two frequency ranges: (0÷400) Hz and (400÷6500) Hz. A measurement above the frequency of 6.5 kHz is of little usefulness from the point of view of the device's diagnostics, since particular components of the electromagnetic field radiation have very small values. Tables 1 and 2 present the impact of the load's voltage change on the electric field E [V/m] produced by the power supply and the impact of power supply load's current changes on the induction of the magnetic field B [nT]. The E, B components

Table 1. Electrical field E [V/m] produced by tested power supplies for individual signal spectrum components (load current constant, change of the output voltage for a given power supply type)

Power supply type	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

Table 2. Induction of the magnetic field B [nT] produced by tested power supplies for individual signal spectrum components (load voltage constant, change of the output current for a given power supply type)

Power supply type	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
Frequency [Hz]						
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

of the electromagnetic field are produced in an unintended way by the tested power supplies of the electronic transport systems. In order to determine the impact of the am parameters (load current, output voltage) of the system's power supply, a measurement stand for measuring diffused fields E, B produced by the tested devices was developed and constructed.

When testing the impact of load voltage on the spectrum of an electromagnetic field, the increase of signal spectrum harmonics component amplitude can be noticed for particular power supply types (tab. 1). For the P339 power supply, the biggest impact was noticed for the 150 Hz harmonics – the value of 0.174 V/m increased to 0.241 V/m, with the increase of the supply voltage from 10V to 20V. Also for the power grid's component frequency of 50Hz there was an increase of amplitude, but it was smaller and amounted to only 10.89%. For the remaining power supplies, an increase of the amplitude of individual harmonics, together with an increase of the supply voltage, can also be noticed. The biggest increase was for the frequency of 100 Hz, for the BS525 power supply and amounted to 48.8%. For higher frequencies (above 350 Hz), individual field components with the change of the supply load voltage, did not have high amplitude values. The increase of the amplitude values was very small, together with the increase of the load voltage.

A similar phenomenon of the increase in the amplitude of electromagnetic field's individual harmonics can be observed for magnetic field B induction. An increase of the field's induction was noticed during the increase of the load current drawn from a power supply (tab. 2). A significant increase of the harmonics amplitude of the

electromagnetic field can be observed for higher frequencies, i.e., 250, 350, 550 Hz. For the frequency of 350 Hz, the increase of the harmonics amplitude for the BS525 power supply was as much as 90.9%. However, with the increase of the load current, increases of individual negative harmonics were also observed. This phenomenon, i.a., can be associated with returning the field's energy from some spectrum bands to others. By thoroughly studying the increase of magnetic field's B induction and electric field's E

current, we can obtain information about the state of the power supply load's current and voltage.

Analysing the obtained results, we can conclude that an electronic transport system (operated in a transport environment, with electromagnetic interference present) can be in the distinguished states [19, 31]. Therefore, the idea to carry out the reliability-operational analysis seems reasonable. Thanks to that, we will obtain relations, which allow to determine the probability values of the system being in the distinguished operational states

By conducting the reliability and exploitation analysis of the electronic transport system, it is possible to illustrate the relationships in it, as shown in Figure 1.

Denotations in figures:

- $R_O(t)$ – the function of probability of system staying in state of full ability S_{PZ} ,
- $Q_{ZB1}(t)$ – the function of probability of system staying in state of the impendency over safety S_{ZB1} ,
- $Q_{ZB2}(t)$ – the function of probability of system staying in state of the impendency over safety S_{ZB2} ,
- $Q_B(t)$ – the function of probability of system staying in state of unreliability of safety S_B ,
- λ_{ZB1} – transition rate from the state of full ability S_{PZ} into the state of the impendency over safety S_{ZB1} ,
- λ_{ZB2} – transition rate from the state of full ability S_{PZ} into the state of the impendency over safety S_{ZB2} ,
- μ_{PZ1} – transition rate from the state of the impendency over safety S_{ZB1} into the state of full ability S_{PZ} ,
- μ_{PZ2} – transition rate from the state of the impendency over safety S_{ZB2} into the state of full ability S_{PZ} ,
- λ_{B1} – transition rate from the state of the impendency over safety S_{ZB1} into the state of unreliability of safety S_B ,
- λ_{B2} – transition rate from the state of the impendency over safety S_{ZB2} into the state of unreliability of safety S_B ,
- μ_{B1} – transition rate from the state of unreliability of safety S_B into the state of the impendency over safety S_{ZB1} ,
- μ_{B2} – transition rate from the state of unreliability of safety S_B into the state of the impendency over safety S_{ZB2} ,
- μ_{B0} – transition rate from the state of unreliability of safety S_B into the state of full ability S_{PZ} .

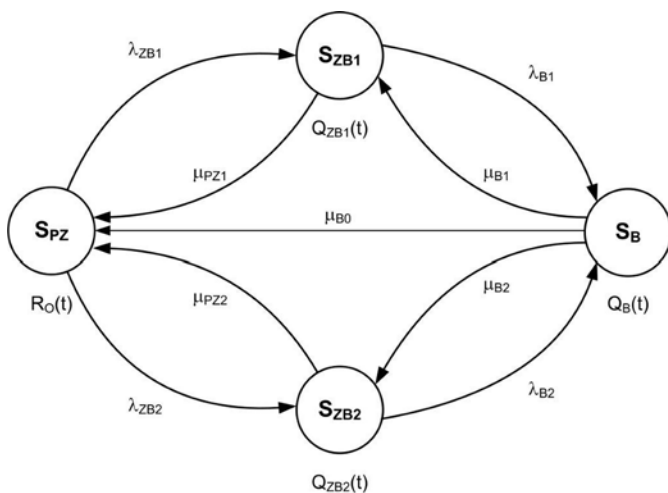


Fig. 1. Relations in an electronic transport system

Full worthiness state S_{PZ} is a state, in which the electronic transport system functions correctly. The safety hazard state S_{ZB1} is a state, in which the electronic transport system is partially fit for use (interference of the electric field do not exceed permissible values) The safety hazard state S_{ZB2} is a state, in which an electronic

transport system is partially fit for use (interference of the magnetic field do not exceed permissible values) The safety hazard state S_B is a state, in which the electronic transport system is unfit for use (interference of the electric and magnetic fields exceed permissible values).

If an electronic transport system is in a state of full worthiness S_{PZ} and there appears an electric field interference, then it switches to the safety hazard state S_{ZB1} with the intensity λ_{ZB1} . If the system is in the safety hazard state S_{ZB1} , then it is possible to switch to the full worthiness state S_{PZ} , provided that actions are taken aimed at restoring the worthiness state.

In case of a safety hazard state S_{ZB1} and additionally, there appears an interference of the magnetic field, then the system switches to the safety unreliability state S_B with the intensity λ_{B1} . Return transition of the safety hazard state S_{ZB1} from the safety unreliability state S_B is possible, provided actions are taken, aimed at mitigating the level of magnetic field interference, to a value in the permissible range.

If an electronic transport system is in a state of full worthiness S_{PZ} and there appears a magnetic field interference, then it switches to the safety hazard state S_{ZB2} with the intensity λ_{ZB2} . If the system is in the safety hazard state S_{ZB2} , then it is possible to switch to the full worthiness state S_{PZ} , provided that actions are taken aimed at restoring the worthiness state.

In case of a safety hazard state S_{ZB2} and additionally, there appears an interference of the electric field, then the system switches to the safety unreliability state S_B with the intensity λ_{B2} . Return transition of the safety hazard state S_{ZB2} from the safety unreliability state S_B is possible, provided actions are taken, aimed at mitigating the level of electric field interference, to a value in the permissible range.

If an electronic transport system is in the safety unreliability state S_B and there are interference in the magnetic and electric fields, then the system switches to the full worthiness state S_{PZ} with the intensity μ_{B0} .

The system illustrated in fig. 1 may be described by the following Chapman–Kolmogorov equations:

$$\begin{aligned} \dot{R}_0(t) &= -\lambda_{ZB1} \times R_0(t) + \mu_{PZ1} \times Q_{ZB1}(t) - \lambda_{ZB2} \times R_0(t) + \mu_{PZ2} \times Q_{ZB2}(t) + \mu_{B0} \times Q_B(t) \\ \dot{Q}_{ZB1}(t) &= \lambda_{ZB1} \times R_0(t) - \mu_{PZ1} \times Q_{ZB1}(t) - \lambda_{B1} \times Q_{ZB1}(t) + \mu_{B1} \times Q_B(t) \\ \dot{Q}_{ZB2}(t) &= \lambda_{ZB2} \times R_0(t) - \mu_{PZ2} \times Q_{ZB2}(t) - \lambda_{B2} \times Q_{ZB2}(t) + \mu_{B2} \times Q_B(t) \\ \dot{Q}_B(t) &= \lambda_{B1} \times Q_{ZB1}(t) + \lambda_{B2} \times Q_{ZB2}(t) - \mu_{B0} \times Q_B(t) - \mu_{B1} \times Q_B(t) - \mu_{B2} \times Q_B(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Given the initial conditions:

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

Laplace transform yields the following system of linear equations:

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

Probabilities of system staying in a distinguished functional states in symbolic (Laplace) terms have the following form:

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

where:

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

Solution to the above set of equations in the time domain is the next step in the analysis and is not discussed here.

4. Modelling an operation process of an electronic transport system

Computer simulation and computer-aided analysis facilitate to relatively quickly determine the influence of change in reliability-exploitation parameters of individual components on reliability of the entire system. Of course, the reliability structure of both the entire system and its components has to be known beforehand.

Using computer aided allows to perform the calculation of the value of probability of system staying in state of full ability R_0 . That procedure is illustrated with below example.

Example

The following quantities were defined for the system:

- test duration - 1 year (values of this parameter is given in [h]):

$$t = 8760 \text{ [h]}$$

- non-damageability of the system in the case electric field interference, with values in the permissible range:

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

- non-damageability of the system in the case magnetic field interference, with values in the permissible range:

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

- transition rate from the state of the impendency over safety S_{ZB1} into the state of unreliability of safety S_B :

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

- transition rate from the state of the impendency over safety S_{ZB2} into the state of unreliability of safety S_B :

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

- transition rate from the state of unreliability of safety S_B into the state of full ability S_{PZ} :

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

- transition rate from the state of unreliability of safety S_B into the state of the impendency over safety S_{ZB1} :

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

- transition rate from the state of unreliability of safety S_B into the state of the impendency over safety S_{ZB2} :

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

Knowing the value of reliability $R_{ZB1}(t)$, transition rate from the state of full ability into the state of the impendency over safety S_{ZB1} may be estimated. Provided the up time is described by exponential distribution, the following relationship can be used:

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

thus:

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

For $t = 8760$ [h] and $R_{ZB1}(t) = 0,949$ we obtain:

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

Knowing the value of reliability $R_{ZB2}(t)$, transition rate from the state of full ability into the state of the impendency over safety S_{ZB2} may be estimated. Provided the up time is described by exponential distribution, the following relationship can be used:

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

thus:

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

For $t = 8760$ [h] and $R_{ZB2}(t) = 0,991$ we obtain:

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

For above initial values, by use of (4) equations, following results are obtained:

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

Assuming $\mu_{PZ1} = 0,1$, $\mu_{PZ2} = 0,2$ and using the Laplace's transformation we receive:

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

(12)

Finally, we obtain:

$$R_O = 0,999935$$

The presented reliability-operational analysis of an electronic transport system, taking into account electromagnetic interference, allows numerical assessment of different types of solutions (technical and organizational), which can be implemented in order to mitigate the impact of electromagnetic interference on the system's functioning.

In order to mitigate the impact of electromagnetic interference on electronic transport systems, we need to determine: the interference source, interference receiver and the manner of the source coupling with the receiver. There are three main ways to limit the manners, the interference spreads:

- interference may be suppressed at the source (e.g. use of protective screening),
- execution of an electronic transport system, which shall be insensitive to the interference impacting it, which are present in an electromagnetic environment (use of electronic elements executed with proper technology),
- minimizing the transfer of interference through coupling channels (e.g. decoupling filters, groundings, gate drives [16, 17], screening, etc.).

In conclusion, if the constructors know the conditions of the electromagnetic environment (e.g. through the above presented measurements and reliability-operational analyses), in which the electronic transport system will probably be functioning, then the EMC requirements need to be met, which are usually known and can be taken into account when developing the device's structure.

5. Conclusion

Widespread use of electric and electronic systems in electronic transport systems causes the need of them functioning in a variety of systems, while being located very close to each other. This may result in an increase of the probability of interference in the systems' functioning, thus, being in states of partial worthiness. That is why, when designing electronic transport systems, they need to be prepared for operation in real conditions, meaning, being surrounded by other devices. The presented methodology of reliability-operational analysis of electronic transport systems, taking into account electromagnetic interference, may be helpful in this case. It allows to specify with numbers the probability values of the system being in the distinguished states.

In further studies, the authors plan to differentiate the states of partial worthiness and highlight their subordinate states. This will allow more thorough mapping of the function of an electronic transport system utilized in an electromagnetic environment.

References

1. Billinton R, Allan RN. Reliability evaluation of power systems. New York: Plenum Press, 1996, <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1860-4>.
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, https://doi.org/10.1007/978-3-642-41647-7_51.
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, <https://doi.org/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, <https://doi.org/10.1002/qre.1938>.
8. Jacyna-Gołda 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*, vo. 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, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30281-7>.
13. Ott HW. Electromagnetic compatibility engineering. Wiley, 2009, <https://doi.org/10.1002/9780470508510>.
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, <https://doi.org/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, <https://doi.org/10.1002/mop.20234>.
17. Perlicki K. Impact of an alien wavelength on wavelength division multiplexing transmission quality. *Photonics Letters of Poland* 2012; 4(3): 118-120, <https://doi.org/10.4302/plp.2012.3.12>.
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, https://doi.org/10.1007/978-3-319-07013-1_39.
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, https://doi.org/10.1007/978-3-319-19216-1_41.
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, <https://doi.org/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, https://doi.org/10.1007/978-3-319-00945-2_32.
26. Siergiejczyk M, Rosiński A. Analysis of power supply maintenance in transport telematics system. *Solid State Phenomena* 2014; 210: 14-19, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.210.14>.
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, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.017>.
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: Podofilini L., Sudret B., Stojadinovic B., Zio E., Kröger W. CRC Press/Balkema, 2015: 2685-2691, <https://doi.org/10.1201/b19094-351>.
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., Miszkiewicz 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, https://doi.org/10.1007/978-3-319-24577-5_25.
31. Verma AK, Ajit S, Karanki DR. Reliability and safety engineering. London: Springer, 2010, <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-232-2>.
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, <https://doi.org/10.1201/b18513-17>.
-

Jacek PAŚ

Military University of Technology
Faculty of Electronics
Institute of Electronic Systems
Division of Electronic Systems Exploitations
gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland

Adam ROSIŃSKI

Warsaw University of Technology
Faculty of Transport
Department of Telecommunications in Transport
Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland

E-mails: jacek.pas@wat.edu.pl , adro@wt.pw.edu.pl

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 zdadności (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

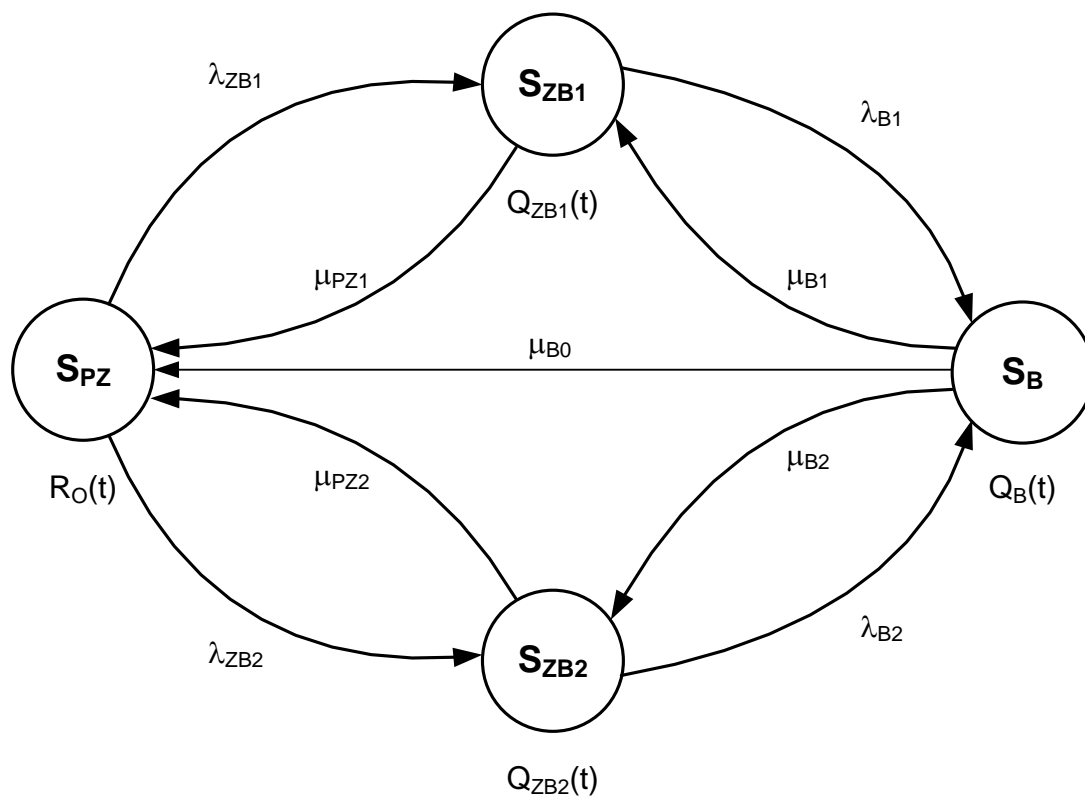
Badając wpływ napięcia obciążenia na widmo pola elektromagnetycznego można zauważyć dla poszczególnych typów zasilaczy wzrost amplitudy składowej harmonicznej widma sygnału (tab. 1). Dla zasilacza typu P339 największy wpływ zauważono dla harmonicznej 150 Hz – z wartości 0,174 V/m wzrost do 0,241 V/m,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