

Dr hab. inż. prof. WAT Jacek Paś

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

Mł. bryg. dr inż. Tomasz Klimczak

Szkoła Główna Służby Pożarniczej
Juliusza Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa, Polska
E-mail: tklimczak@sgsp.edu.pl

Wybrane zagadnienia oceny niezawodnościowo-eksploatacyjnej systemów sygnalizacji pożaru

Słowa kluczowe: eksploatacja, niezawodność, systemy sygnalizacji pożaru

Streszczenie: W artykule przeprowadzono analizę problemów eksploatacyjnych i niezawodnościowych, która dotyczy wybranych systemów sygnalizacji pożaru (SSP) o różnej strukturze funkcjonalnej. Systemy te są użytkowane na rozległym obszarze transportowym, w określonym środowisku. Można wyróżnić trzy podstawowe struktury tych systemów - skupiona, rozproszona i mieszana. Dany rodzaj struktury funkcjonalnej systemu, który jest użytkowany w obiekcie (na danym obszarze) jest funkcją zależną od konfiguracji, wewnętrznych połączeń elementów i urządzeń oraz opracowanego scenariusza postępowania na wypadek pożaru. Zastosowanie danej struktury systemu do ochrony pożarowej zależy także od przepisów prawnych warunkujących dopuszczenie danego obiektu (obszaru) do użytkowania. Proces realizacji scenariusza w czasie pożaru jest gwarantowany przez algorytm zaimplementowany w centrali alarmowej oraz innych elementach systemu. Realizacja wszystkich wymagań wobec systemu określonych w danym algorytmie postępowania uwarunkowana jest np. odpowiednią strukturą niezawodnościową i warunkami środowiskowymi. W artykule przedstawiono analizę procesu eksploatacji wybranych SSP, które są użytkowane na obszarze transportowym. Zaprezentowano rzeczywiste wyniki badań procesu eksploatacji, np. czasy trwania naprawy oraz uszkodzenia. Następnie opracowano graf relacji eksploatacyjnych z uwzględnieniem przeprowadzonych badań eksploatacyjnych. Umożliwiło to wyznaczenie zależności pozwalających na określenie parametrów eksploatacyjnych i niezawodnościowych przebywania SSP w wyróżnionych do rozważań stanach. Przedstawiona w artykule metodyka badania SSP ze względu na spełnienie określonych wymagań eksploatacyjnych może być użyta podczas opracowywania scenariusza pożarowego oraz projektowania systemów z uwzględnieniem różnych dostępnych rozwiązań technicznych.

1. Wprowadzenie

Transportowe systemy sygnalizacji pożaru funkcjonują w zróżnicowanych, często ekstremalnych warunkach eksploatacyjnych. Linie sygnalizacji pożaru typu A, B, pętle dozorowe, centrale alarmowe znajdują się wewnątrz obiektów budowlanych (np. dworce

kolejowe, nastawnie, stacje transformatorowe, rozdzielnie), jak i na zewnątrz, w środowisku ogólnodostępnym (np. dworce kolejowe, przejścia, wiaty magazynowe, itd.) [10,11,12]. Długookresowe badania procesu eksploatacji SSP potwierdzają tezę iż właściwe funkcjonowanie tych platform bezpieczeństwa jest funkcją niezawodności elementów składowych – czujek, modułów, central, itd. Proces obsługi i serwisu, dostęp do części zapasowych i realizacja przeglądów okresowych warunkuje także odpowiedni poziom niezawodności [4,6,16,17,19]. Analiza zjawisk eksploatacyjnych, które występują w SSP powinna uwzględniać dwa ważne zagadnienia, podejście niezawodnościowe już podczas opracowywania scenariusza projektowania zabezpieczenia pożarowego, ale także efektywność zarządzania eksploatacją tych złożonych obiektów technicznych – tj. np. dostępność serwisu, realizacji przeglądów profilaktycznych oraz parametrów środowiska w których są użytkowane [7,12,16]. W tym celu autorzy artykułu wybrali dwa reprezentatywne SSP, które są najczęściej użytkowane na rozległych terenach transportowych i dokonali odwzorowania zjawisk zachodzących w rzeczywistości eksploatacyjnej w opracowane modele badawcze [10,11].

Systemy sygnalizacji pożarowej są jednymi z bardzo istotnych elektronicznych systemów bezpieczeństwa (często instalowane w obiektach ze względu na istniejące wymagania ustawowo-prawne), które są eksploatowane na rozległych terenach transportowych. Właściwe funkcjonowanie platform bezpieczeństwa to realizacja wcześniej założonego procesu transportowego o akceptowalnym ryzyku niesprzyjających oddziaływań zewnętrznych i wewnętrznych (np. pożar, włamanie, napad, atak terrorystyczny, itd.) [6,16,19]. Zawodność poszczególnych urządzeń i systemów elektronicznych oraz błędy w działaniu operatorów nadzorujących na bieżąco proces eksploatacji mogą prowadzić do wystąpienia stanów zagrożenia lub zawodności bezpieczeństwa [5,8,18,21]. Teoria z zakresu bezpieczeństwa i ryzyka odpowiada m. in. na pytania dotyczące skutków awarii, uszkodzeń i błędów operatora. Jest to przyczyną wystąpienia stanów niedopuszczalnych w tych systemach np. zawodności lub zagrożenia bezpieczeństwa. Istotnym zagadnieniem które powinno być doprecyzowane przez eksploatatorów platform bezpieczeństwa to określenie zbioru dopuszczalnych i niedopuszczalnych stanów SSP ze względu na bezpieczeństwo danego obiektu transportowego [6,16,19,23,28,29]. Bardzo istotna jest tu kwestia prawidłowego doprecyzowania, który ze stanów SSP można uznać za dopuszczalny lub niedopuszczalny z punktu widzenia bezpieczeństwa lub opracowanego wstępnie scenariusza pożarowego dla obiektu transportowego [10,11,12,16,19].

Zbiór stanów niedopuszczalnych występujących w SSP może być odwracalny w przypadku istnienia w tym systemie elementów lub urządzeń które inicjują lub przerywają proces uszkodzenia lub awarii (w tym błędy działania operatora) [6,16,19]. Realizacja przeciwdziałania musi być wykonana w czasie dyspozycyjnym, gdzie istnieje (czas) możliwość odparowania sytuacji niebezpiecznej [16]. Takie postępowanie jest możliwe kiedy w platformach bezpieczeństwa istnieje zbiór „rezerwuar” dopuszczalnych działań przeciwwawaryjnych. Wtedy nie jest możliwa realizacja przejść ze stanów dozwolonych (np. dozowanie) do zabronionych (np. awaria modułu, centrali – stan zagrożenia bezpieczeństwa) [6,10,11,16,19].

Żywotność platform bezpieczeństwa w przypadku oddziaływań niesprzyjających można zwiększyć poprzez realizację dostępnych działań – np. stosując nadmiarowość lub rozwiązania techniczne zwiększające niezawodność samych urządzeń [10,12,16,19]. Czujka(i) które wykorzystują wiele detektorów reagujących na zjawisko pożaru. Stosowanie nadmiarowości to tolerowanie niektórych uszkodzeń a także rozbudowa systemu. Drugi przypadek to zapobieganie uszkodzeniom katastroficznym – np. czujki w systemie [10,11].

Nadmiarowość może dotyczyć zarówno samych podzespołów urządzenia, modułów systemu, jak też np. komputerów sterujących procesami eksploatacyjnymi elektronicznymi

systemów bezpieczeństwa. Istotna jest też jakość informacji [6,13,14,15,16,23,24] jaką otrzymują systemy z czujników [10,11], które są zainstalowane na rozległym terenie transportowym gdzie występuje zniekształcone środowisko elektromagnetyczne (duże poziomy sygnałów zakłócających) [1,7,18,20,21]. W niektórych pracach naukowych proponuje się zastosowanie logiki rozmytej [22] lub sztucznych sieci neuronowych [2,4,5,9], które są już wykorzystywane na poziomie czujek do wypracowania sygnałów alarmu. Na funkcjonowanie transportowych systemów elektronicznych mają także istotny wpływ warunki środowiskowe, temperatura, wilgotność, drgania i wibracje [3], a także zakłócenia elektromagnetyczne [2,4,6,16,20,21] ale nie są one uwzględnione w artykule. W artykule przeprowadzono analizę eksploatacyjno-niezawodnościową SSP. Systemy te są użytkowane na rozległym terenie transportowym. Analiza otrzymanych wyników procesu eksploatacji, tj. pomiar czasów odnowy i wystąpienia uszkodzeń umożliwiła opracowanie modelu badawczego SSP, a następnie przeprowadzenie analizy niezawodnościowo-eksploatacyjnej z uwzględnieniem wyznaczonych czasów odnowy i uszkodzeń [2,8,9,16,17,19,26,28].

2. Reprezentatywne transportowe systemy sygnalizacji pożaru.

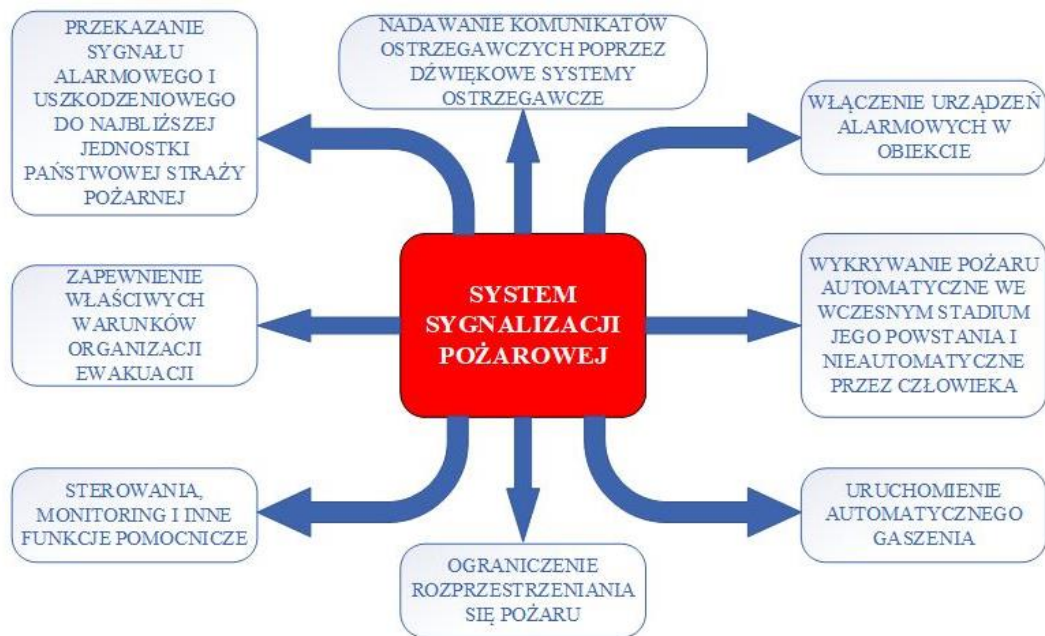
Obiekty transportowe w dobie szybkiego postępu technologicznego i stałego rozwoju infrastruktury narażone są na wiele zagrożeń [6,16,19,25,26,27]. Zagrożenia bezpośrednio niezwiązane z pożarem, jak np. zagrożenia terrorystyczne, mogą być jego źródłem [6,16,19]. Dlatego bardzo ważnym aspektem jest prawidłowe zabezpieczenie obiektów transportowych w czynne i bierne zabezpieczenia przeciwpożarowe – rys. 1.



Rys. 1. Statystyka liczby pożarów w obiektach obsługi pasażerów w komunikacji, w szczególności dworcach kolejowych i autobusowych, portach rzecznych i morskich, dworcach lotniczych w latach 2014-2017

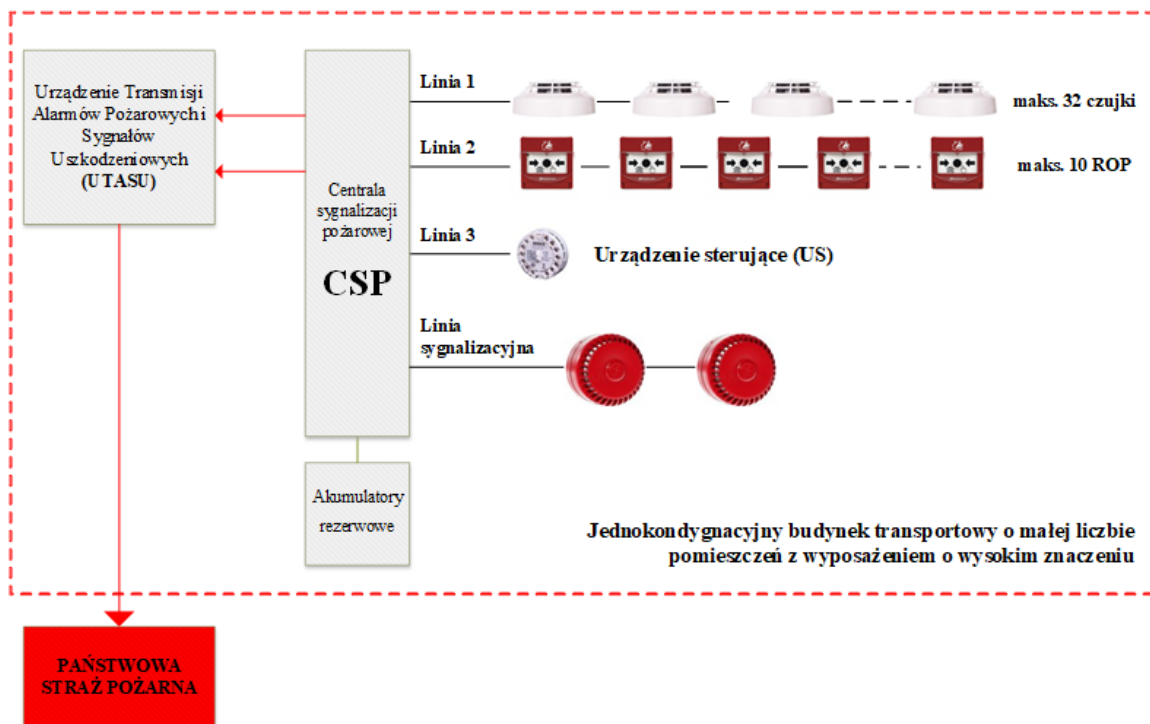
Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji (MSWiA) Dz. U. Nr 109, poz. 719 przez techniczne środki zabezpieczenia przeciwpożarowego należy rozumieć urządzenia, sprzęt, instalacje i rozwiązania budowlane służące zapobieganiu powstawaniu i rozprzestrzenianiu się pożarów. Przez pojęcie urządzenia przeciwpożarowe podane w rozporządzeniu należy rozumieć (stałe lub półstałe, uruchamiane ręcznie lub samoczynnie urządzenia) służące do zapobiegania powstaniu, wykrywania, zwalczania pożaru lub ograniczania jego skutków. W szczególności są to stałe i półstałe urządzenia gaśnicze i zabezpieczające, urządzenia inertyzujące, urządzenia wchodzące w skład dźwiękowego systemu ostrzegawczego (DSO) i SSP. SSP to system obejmujący urządzenia

sygnalizacyjno-alarmowe, służące do samoczynnego wykrywania i przekazywania informacji o pożarze, a także urządzenia odbiorcze alarmów pożarowych i urządzenia odbiorcze sygnałów uszkodzeniowych - rysunek 2 [6,10,11,16,19].



Rys. 2. Podstawowe zadania realizowane przez system sygnalizacji pożarowej.

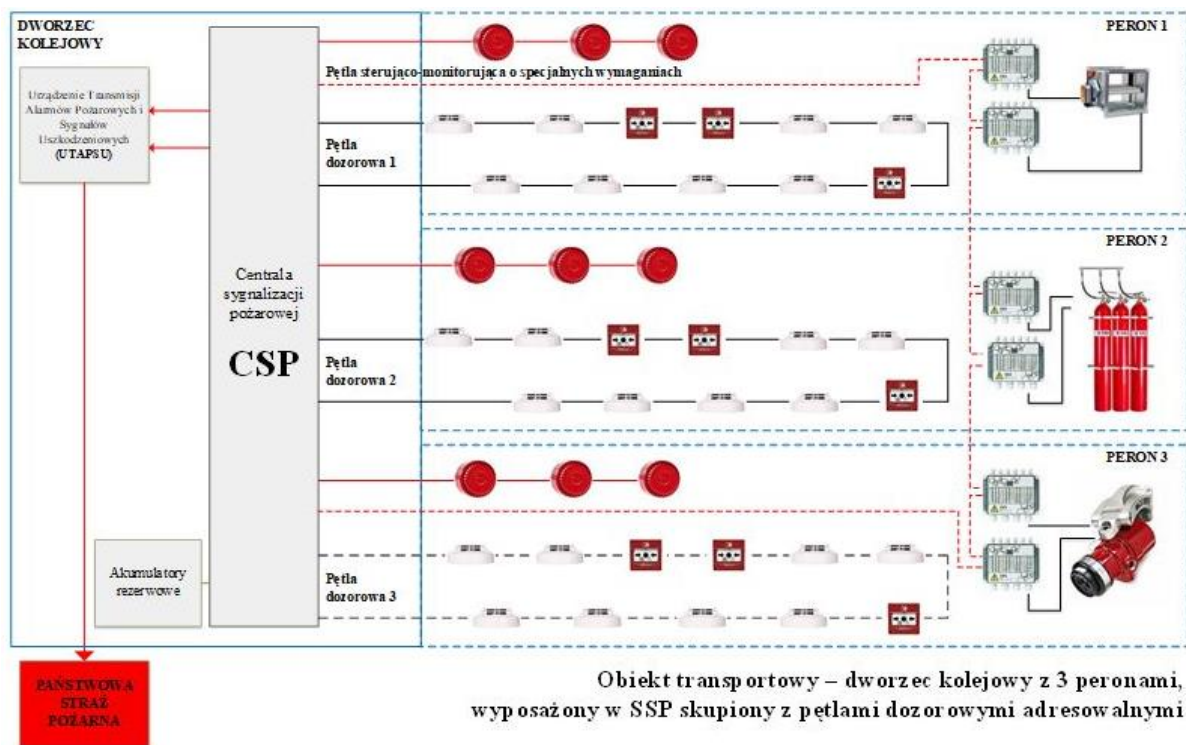
W zależności od budowy, konfiguracji oraz typu zastosowanych elementów liniowych wyróżnia się kilka rodzajów SSP - rysunek 3.



Rys. 3. SSP skupiony z liniami dozorowymi otwartymi z połączeniem do systemu monitoringu sygnałów pożarowych i sygnałów uszkodzeniowych do PSP (CSP – centrala sygnalizacji pożaru)

Zastosowanie danego rodzaju systemu uzależnione jest od wymagań przepisów prawnych wobec SSP, scenariusza pożarowego, który musi być zrealizowany, wymagań prawnych wobec danego obiektu podlegającego ochronie, przyjętego zakresu ochrony oraz wymagań funkcjonalno-użytkowych, które ma spełniać instalacja. Dokładność wskazania miejsca powstania pożaru (źródła ognia) przez centralę zależy od zastosowanego SSP. Z kolei stawiany wymóg dokładności lokalizacji pożaru, stanowi kryterium wyboru rodzaju systemu sygnalizacji pożarowej [10,12].

W SSP konwencjonalnym (nieadresowalnym) wskazanie miejsca wykrycia pożaru jest ograniczone do linii dozorowej, natomiast w systemie adresowalnym centrala wskazuje miejsce pojawienia się pożaru z dokładnością do czujki pożarowej (w zależności od konfiguracji do strefy dozorowej) [11,12]. Rodzaj SSP, który jest zainstalowany w obiekcie transportowym ma wpływ na podział obiektu na strefy dozorowe. Pętla sterująco-monitorująca musi być wykonana wg specjalnych wymagań, w taki sposób, aby zachować ciągłość dostawy energii lub przekazu sygnału przez czas wymagany do uruchomienia i działania urządzenia, zgodnie z §187 ust. 2 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. (Dz. U. Nr 75, poz. 6900 z późniejszymi zm. z uwagi na małą rozległość obiektu transportowego [10,11,12,16], krótkie odległości przebiegu okablowania pętlowego oraz małą liczbę sterowań i monitorowań, często wykorzystuje się jedną pętlę sterująco-monitorującą np. wszystkie perony – rysunek 4.

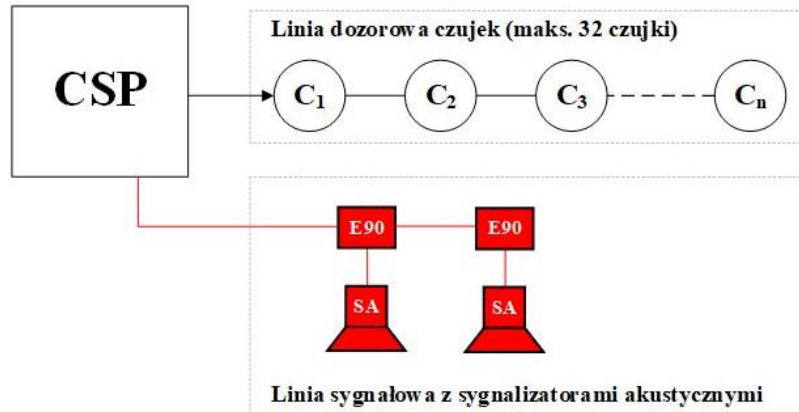


Rys. 4. Schemat systemu sygnalizacji pożarowej skupionego z pętlami dozorowymi adresowalnymi na dworcu kolejowym z trzema peronami

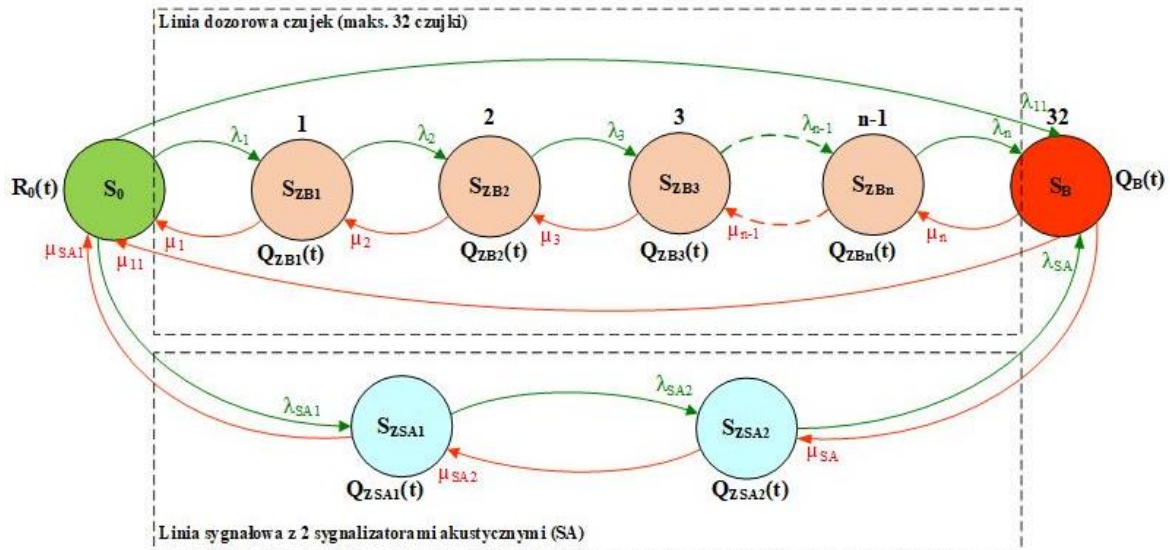
3. Analiza wybranych zagadnień procesów niezawodnościowych i eksploatacyjnych SSP

System sygnalizacji pożarowej skupiony, oparty na konwencjonalnej centrali sygnalizacji pożarowej z jedną linią dozorową otwartą wyposażoną w maksymalnie 32 czujki pożarowe oraz linią sygnałową z dwoma sygnalizatorami akustycznymi przedstawiono na rysunku 5. Natomiast na rysunku 6 przedstawiono relacje zachodzące w systemie skupionym

z centralą sygnalizacji pożarowej, do której przyłączono linię dozоровą otwartą z czujkami optycznymi dymu oraz linię sygnalizacyjną z sygnalizatorami akustycznymi.



Rys. 5. SSP skupiony z linią dozоровą otwartą i linią sygnałową z sygnalizatorami akustycznymi



Rys. 6. Relacje zachodzące w systemie skupionym z CSP, do której przyłączono linie dozоровą otwartą z czujkami optycznymi dymu i linię sygnalizacyjną z sygnalizatorami

Relacje zachodzące w systemie – rys. 6 można opisać następującymi zależnościami (1):

$$\begin{aligned}
 R_0'(t) &= -\lambda_{11} \cdot R_0(t) - \lambda_1 \cdot R_0(t) - \lambda_{SA1} \cdot R_0(t) + \mu_{11} \cdot Q_B(t) + \mu_1 \cdot Q_{ZB1}(t) + \mu_{SA1} \cdot Q_{ZSA1}(t) \\
 Q'_{ZB1}(t) &= -\lambda_2 \cdot Q_{ZB1}(t) - \mu_1 \cdot Q_{ZB1}(t) + \lambda_1 \cdot R_0(t) + \mu_2 \cdot Q_{ZB2}(t) \\
 Q'_{ZB2}(t) &= -\lambda_3 \cdot Q_{ZB2}(t) - \mu_2 \cdot Q_{ZB2}(t) + \lambda_2 \cdot Q_{ZB1}(t) + \mu_3 \cdot Q_{ZB3}(t) \\
 Q'_{ZB3}(t) &= -\lambda_{n-1} \cdot Q_{ZB3}(t) - \mu_3 \cdot Q_{ZB3}(t) + \lambda_3 \cdot Q_{ZB2}(t) + \mu_{n-1} \cdot Q_{ZBn}(t) \\
 &\dots \\
 Q'_{ZBn}(t) &= -\lambda_n \cdot Q_{ZBn}(t) - \mu_{n-1} \cdot Q_{ZBn}(t) + \lambda_{n-1} \cdot Q_{ZB3}(t) + \mu_n \cdot Q_B(t) \\
 Q'_{ZSA1}(t) &= -\lambda_{SA2} \cdot Q_{ZSA1}(t) - \mu_{SA1} \cdot Q_{ZSA1}(t) + \lambda_{SA1} \cdot R_0(t) + \mu_{SA2} \cdot Q_{ZSA2}(t) \\
 Q'_{ZSA2}(t) &= -\lambda_{SA} \cdot Q_{ZSA2}(t) - \mu_{SA2} \cdot Q_{ZSA2}(t) + \lambda_{SA2} \cdot Q_{ZSA1}(t) + \mu_{SA} \cdot Q_B(t) \\
 Q'_B(t) &= -\mu_{11} \cdot Q_B(t) - \mu_n \cdot Q_B(t) - \mu_{SA} \cdot Q_B(t) + \lambda_{11} \cdot R_0(t) + \lambda_n \cdot Q_{ZBn}(t) + \lambda_{SA} \cdot Q_{ZSA2}(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Przyjmując warunki początkowe (2):

$$\begin{aligned} R_0(t) &= 1 \\ Q_{ZB1}(0) &= Q_{ZB2}(0) = Q_{ZB3}(0) = \dots = Q_{ZBn}(0) = Q_B(0) = \\ &= Q_{ZSA1}(0) = Q_{ZSA2}(0) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

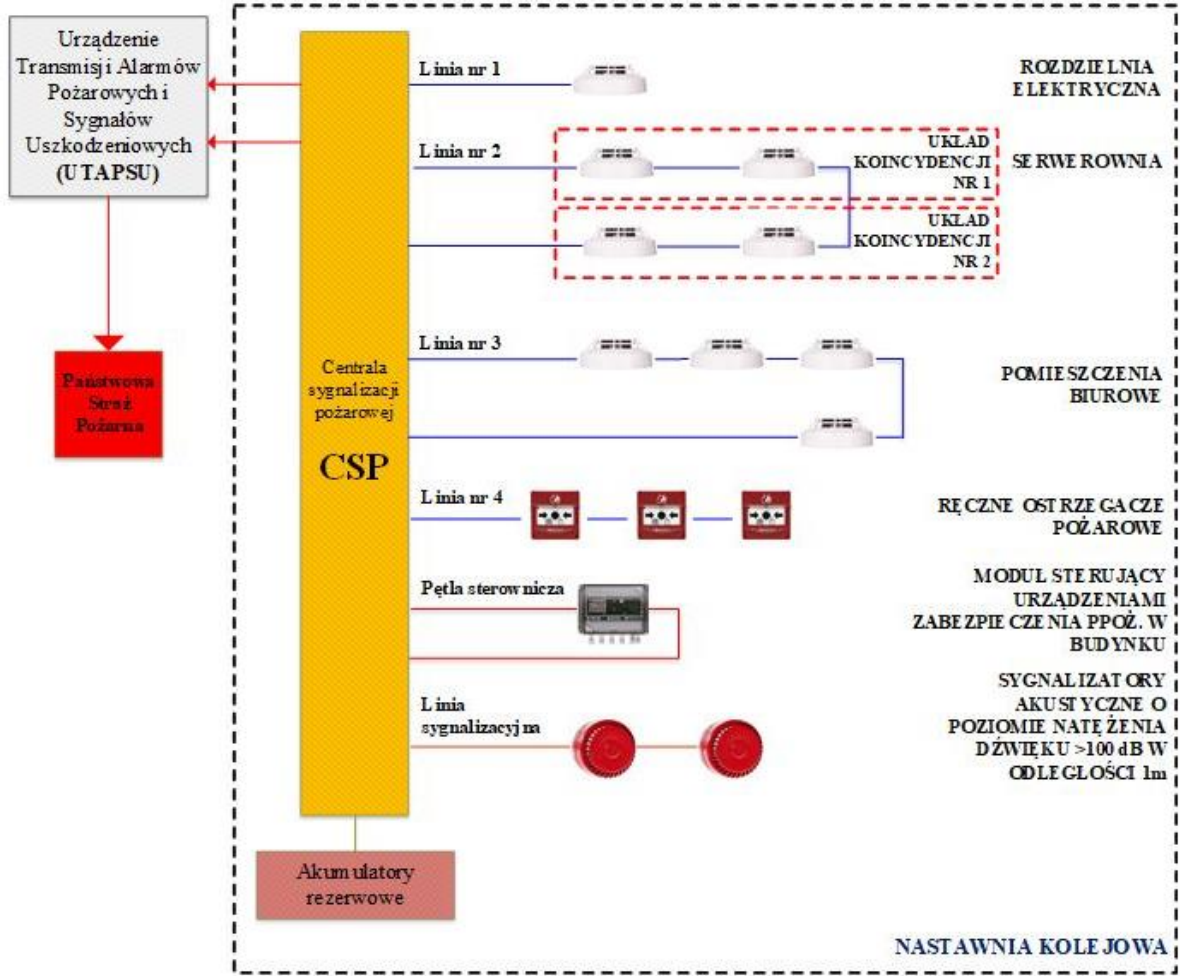
- $R_0(t)$ – funkcja prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanie pełnej zdatności S_{PZ} ;
- $Q_{ZB1}(t)$, $Q_{ZBn}(t)$, $Q_{ZSA1}(t)$, $Q_{ZSA2}(t)$ – funkcja prawdopodobieństwa przebywania systemu w poszczególnych stanach zagrożenia bezpieczeństwa;
- $Q_B(t)$ – funkcja prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanie zawodności bezpieczeństwa S_B ;
- λ_{11} – intensywność przejścia ze stanu pełnej zdatności S_{PZ} do stanu zawodności bezpieczeństwa S_B ;
- μ_{11} – intensywność przejścia ze stanu zawodności bezpieczeństwa S_B do stanu pełnej zdatności S_{PZ} ;
- $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ – intensywności przejść ze stanu pełnej zdatności S_{PZ} lub ze stanu zagrożenia bezpieczeństwa $S_{ZB1,2,\dots}$ do stanu zawodności bezpieczeństwa $Q_B(t)$, lub stanu zagrożenia bezpieczeństwa lub zawodności bezpieczeństwa S_{ZB} – zgodnie z oznaczeniem jak na rysunku 6;
- μ_1, μ_2, \dots – intensywności przejść ze stanu zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZB} do stanu pełnej zdatności S_{PZ} , ze stanu zawodności bezpieczeństwa do stanu zagrożenia bezpieczeństwa $Q_{ZBn}, Q_{ZB}, Q_{ZB2}, \dots$ – zgodnie z oznaczeniami jak na rysunku 6.

Na rysunku 7 przedstawiono SSP skupiony, oparty o adresowalną CSP, do której dołączono linie otwarte czujek i ręcznych ostrzegaczy pożarowych. Wszystkie elementy wyposażone są w izolatory zwarć. System składa się z linii pętlowych, w części których zaprogramowano czujki w układach koincydencyjnych, pętli sterowniczej z modułem sterującym urządzeniami zabezpieczenia przeciwpożarowego oraz instalacjami technicznymi i bezpieczeństwa w budynku nastawni kolejowej. Do centrali podłączono także linię sygnalizacyjną z sygnalizatorami akustycznymi [6,10,11,12].

Na rysunku 7 przedstawiono relacje zachodzące w systemie w systemie skupionym z adresowalną centralą sygnalizacji pożarowej z liniami otwartymi, pętlowymi i linią sygnalizacyjną. Relacje zachodzące w systemie – rys. 7 można opisać następującymi zależnościami (3). Relacje zachodzące w systemie skupionym przedstawiono na rysunku 8.

Ze względu na różne struktury SSP, które są eksploatowane na rozległym obszarze transportowym relacje pomiędzy poszczególnymi urządzeniami w systemach mogą być różne, co przedstawiono na rysunkach 6 i 8. System przedstawiony na rysunku 7 ma bardziej rozbudowaną strukturę niezawodnościową ze względu na występowanie większej liczby chronionych pożarowo obiektów – serwerownie, pomieszczenia biurowe i rozdzielnię elektryczną. Z tego względu można wyodrębnić osobne linie dozоровe 1,2,3 oraz pętlę sterowniczą i linię sygnalizacyjną.

Dodatkowo w linii dozоровej nr 2 zastosowano alarmowanie w układzie koincydencji. W tak zaprojektowanym SSP należy wyodrębnić więcej stanów eksploatacyjnych przez co układ równań (3) opisujących zachowanie się systemu podczas procesu eksploatacji staje się złożony.

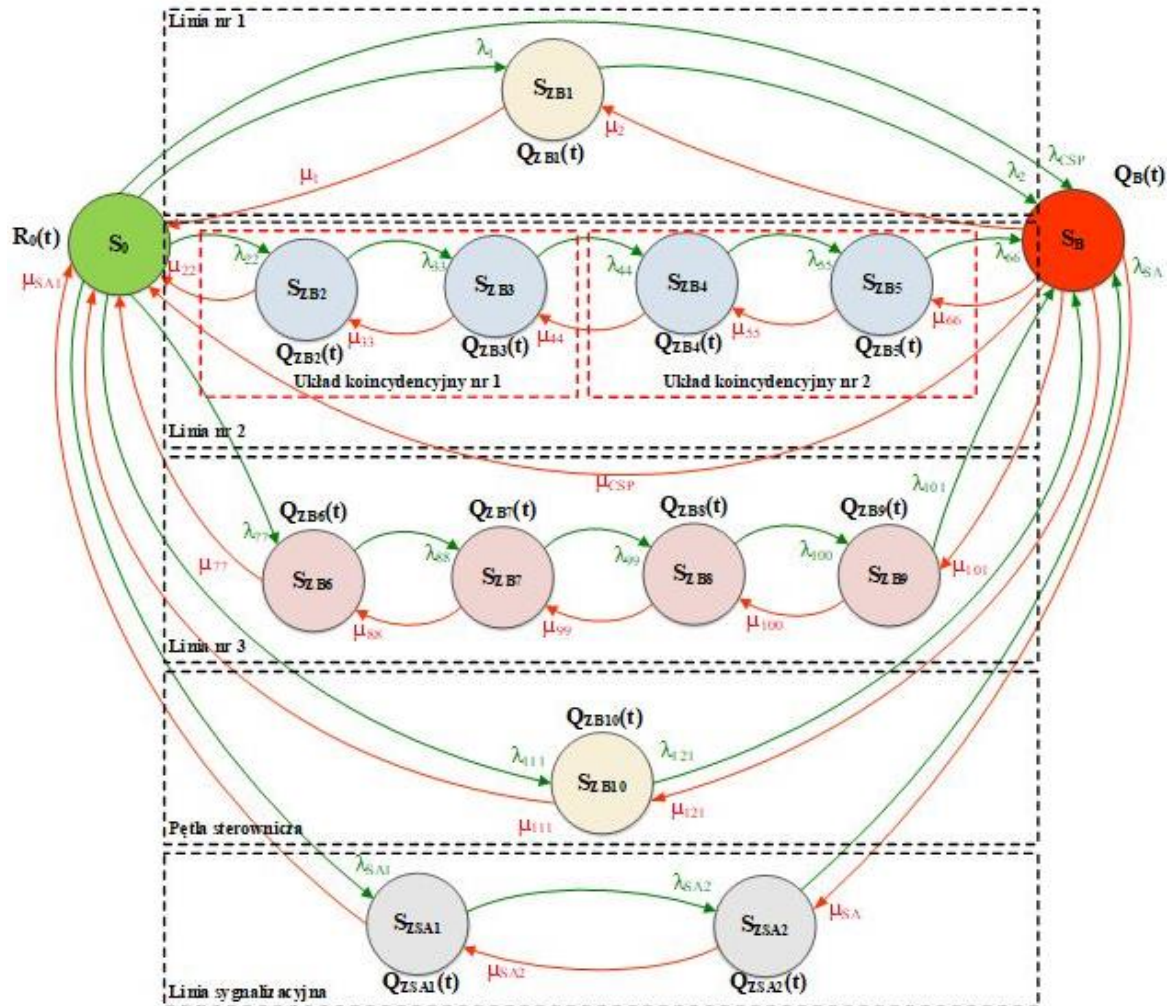


Rys. 7. SSP skupiony z adresowalną centralą sygnalizacji pożarowej z liniami otwartymi, pętlowymi i linią sygnalizacyjną

$$\begin{aligned}
R_0'(t) &= -\lambda_{CSP} \cdot R_0(t) - \lambda_1 \cdot R_0(t) - \lambda_{22} \cdot R_0(t) - \lambda_{77} \cdot R_0(t) - \lambda_{111} \cdot R_0(t) - \lambda_{SA1} \cdot R_0(t) + \\
&+ \mu_{CSP} \cdot Q_B(t) + \mu_1 \cdot Q_{ZB1}(t) + \mu_{22} \cdot Q_{ZB2}(t) + \mu_{77} \cdot Q_{ZB6}(t) + \mu_{111} \cdot Q_{ZB10}(t) + \mu_{SA1} \cdot Q_{ZSA1}(t) \\
Q'_{ZB1}(t) &= -\mu_1 \cdot Q_{ZB1}(t) - \lambda_2 \cdot Q_{ZB1}(t) + \mu_2 \cdot Q_B(t) + \lambda_1 \cdot R_0(t) \\
Q'_{ZB2}(t) &= -\mu_{22} \cdot Q_{ZB2}(t) - \lambda_{33} \cdot Q_{ZB2}(t) + \mu_{33} \cdot Q_{ZB3}(t) + \lambda_{22} \cdot R_0(t) \\
Q'_{ZB3}(t) &= -\mu_{33} \cdot Q_{ZB3}(t) - \lambda_{44} \cdot Q_{ZB3}(t) + \mu_{44} \cdot Q_{ZB4}(t) + \lambda_{33} \cdot Q_{ZB2}(t) \\
Q'_{ZB4}(t) &= -\mu_{44} \cdot Q_{ZB4}(t) - \lambda_{55} \cdot Q_{ZB4}(t) + \mu_{55} \cdot Q_{ZB5}(t) + \lambda_{44} \cdot Q_{ZB3}(t) \\
Q'_{ZB5}(t) &= -\mu_{55} \cdot Q_{ZB5}(t) - \lambda_{66} \cdot Q_{ZB5}(t) + \mu_{66} \cdot Q_B(t) + \lambda_{55} \cdot Q_{ZB4}(t) \\
Q'_{ZB6}(t) &= -\mu_{77} \cdot Q_{ZB6}(t) - \lambda_{88} \cdot Q_{ZB6}(t) + \mu_{88} \cdot Q_{ZB7}(t) + \lambda_{77} \cdot R_0(t) \\
Q'_{ZB7}(t) &= -\mu_{88} \cdot Q_{ZB7}(t) - \lambda_{99} \cdot Q_{ZB7}(t) + \mu_{99} \cdot Q_{ZB8}(t) + \lambda_{88} \cdot Q_{ZB6}(t) \\
Q'_{ZB8}(t) &= -\mu_{99} \cdot Q_{ZB8}(t) - \lambda_{100} \cdot Q_{ZB8}(t) + \mu_{100} \cdot Q_{ZB9}(t) + \lambda_{99} \cdot Q_{ZB7}(t) \\
Q'_{ZB9}(t) &= -\mu_{100} \cdot Q_{ZB9}(t) - \lambda_{101} \cdot Q_{ZB9}(t) + \mu_{101} \cdot Q_B(t) + \lambda_{100} \cdot Q_{ZB8}(t) \\
Q'_{ZB10}(t) &= -\mu_{111} \cdot Q_{ZB10}(t) - \lambda_{121} \cdot Q_{ZB10}(t) + \mu_{121} \cdot Q_B(t) + \lambda_{111} \cdot R_0(t) \\
Q'_{ZSA1}(t) &= -\mu_{SA1} \cdot Q_{ZSA1}(t) - \lambda_{SA2} \cdot Q_{ZSA1}(t) + \mu_{SA2} \cdot Q_{ZSA2}(t) + \lambda_{SA1} \cdot R_0(t) \\
Q'_{ZSA2}(t) &= -\mu_{SA2} \cdot Q_{ZSA2}(t) - \lambda_{SA} \cdot Q_{ZSA2}(t) + \mu_{SA} \cdot Q_B(t) + \lambda_{SA2} \cdot Q_{ZSA1}(t) \\
Q'_B(t) &= -\mu_{CSP} \cdot Q_B(t) - \mu_2 \cdot Q_B(t) - \mu_{66} \cdot Q_B(t) - \mu_{101} \cdot Q_B(t) - \mu_{121} \cdot Q_B(t) - \mu_{SA} \cdot Q_B(t) + \\
&+ \lambda_{CSP} \cdot R_0(t) + \lambda_2 \cdot Q_{ZB1}(t) + \lambda_{66} \cdot Q_{ZB5}(t) + \lambda_{101} \cdot Q_{ZB9}(t) + \lambda_{121} \cdot Q_{ZB10}(t) + \lambda_{SA} \cdot Q_{ZSA2}(t)
\end{aligned} \tag{3}$$

Przyjmując warunki początkowe (4):

$$\begin{aligned}
 R_0(t) &= 1 \\
 Q_{ZB1}(0) &= Q_{ZB2}(0) = Q_{ZB3}(0) = Q_{ZB4}(0) = Q_{ZB5}(0) = Q_{ZB6}(0) = Q_{ZB7}(0) = \\
 &= Q_{ZB8}(0) = Q_{ZB9}(0) = Q_{ZB10}(0) = Q_{ZSA1}(0) = Q_{ZSA2}(0) = Q_B(0) = 0
 \end{aligned}
 \tag{4}$$



Rys. 8. Relacje zachodzące w systemie skupionym z adresowalną centralą sygnalizacji pożarowej z liniami otwartymi, pętlowymi i linią sygnalizacyjną.

4. Statystyka eksploatacyjna (naprawy, uszkodzenia) dotycząca reprezentatywnych SSP

Analizę w zakresie procesu eksploatacji SSP przeprowadzono dla $n = 20$ różnych systemów. Struktura badanych SSP odpowiadała reprezentatywnym systemom stosowanym do ochrony przeciwpożarowej obiektów transportowych. Badania eksploatacyjne SSP, obejmowały: odnowę, czas wystąpienie uszkodzenia i napraw. Badania zostały przeprowadzone dla następujących rodzajów SSP eksploatowanych na terenie transportowym:

- SSP z adresowalną centralą sygnalizacji pożarowej i jedną detekcyjną pętlą dozorową ($n = 15$ sztuk);
- SSP z adresowalną centralą sygnalizacji pożarowej i dwiema detekcyjnymi pętlami dozorowymi ($n = 3$ sztuk);

- c) SSP z adresowalną CSP, z trzema pętłami dozorowymi, jedną pętlą sterująco-monitorującą do monitorowania stałych urządzeń gaśniczych oraz generowanie sygnału inicjującego do ich wyzwolenia (n = 2 sztuk).

Wszystkie wymienione SSP były eksploatowane w zbliżonych warunkach środowiskowych (temperatura, wilgotność, ciśnienie, itd.) w transportowych obiektach budowlanych. Ze względu na znaczenie SSP w zapewnieniu bezpieczeństwa w procesie transportowym, serwis zajmujący się procesem naprawy i odnowy był dostępny w ciągu 2 godzin od zgłoszenia awarii przez osoby nadzorujące eksploatację (dla n = 15 SSP). Pozostałe systemy (n = 5) miały wydłużony czas reakcji na zgłoszenie awarii do 4 godzin ze względu na nadzorowanie obiektów transportowych – budynków, które bezpośrednio nie zagrażają procesowi transportu pasażerów (np. magazyny, wiaty, itd.). W tabelach 1 - 3 przedstawiono przykładowe wyniki badań procesu eksploatacji SSP.

Tabela 1. Badanie procesu eksploatacji SSP użytkowanych w obiektach transportowych

L.p.	Rodzaj uszkodzenia	Czas wystąpienia awarii	Czas usunięcia awarii	Czas naprawy	Rodzaj naprawy
1	Zakłócenie linii nr 3	03.01.2018 godz. 14:32	03.01.2018 godz. 18:10	3h 38 min.	Poprawa przyłączenia linii do zacisków centrali i reset centrali
2	Usterka czujki 3/57	19.01.2018 godz. 8:10	19.01.2018 godz. 15:50	7h 40 min.	Reset centrali
3	Usterka czujki 3/57	01.02.2018 godz. 18:10	02.02.2018 godz. 23:30	5h 20 min.	Wymiana czujki na nową
n-2	Zakłócenie linii nr 1	01.12.2018 godz. 4:15	01.12.2018 godz. 9:00	4h 45 min.	Reset centrali
n-1	Usterka czujki 3/11	15.12.2018 godz. 11:15	15.12.2018 godz. 14:20	4h 5 min.	Wymiana gniazda czujki
n	Błąd Cos2 komunikacji	27.12.2018 godz. 15:05	28.12.2018 godz. 9:05	18h 5 min.	Reset CSO2 i centrali sygnalizacji pożarowej

W tabeli 1 przedstawiono reprezentatywne rodzaje uszkodzenia dla wybranych SSP. Dane opracowano na podstawie zbioru uszkodzeń z n = 20 SSP, które są eksploatowane na rozległym obszarze transportowym. Dla danego rodzaju uszkodzenia występującego w SSP (n = 20 sztuk), przyjęto maksymalny czas naprawy. W czasie naprawy nie uwzględniono czasów przyjazdu serwisu (dla tego rodzaju SSP serwis powinien być na miejscu).

Tabela 2. Rodzaje napraw wraz z oznaczeniem maksymalnego czasu T_{max} w ujęciu rocznym

L.p.	Naprawa z danego rodzaju uszkodzenia	Czas wystąpienia awarii	Czas usunięcia awarii	Maksymalny czas naprawy [T_{max}]
Uszkodzenie pętli dozorowej 1				
1.	Zakłócenie linii nr 3	03.01.2018 godz. 14:32	03.01.2018 godz. 18:10	3h 38 min.
2.	Zakłócenie linii nr 2	11.03.2018 godz. 15:00	11.03.2018 godz. 16:30	1h 30 min.
3.	Doziemienie pętli nr 1	02.05.2018 godz. 13:30	02.05.2018 godz. 19:00	5h 30 min.
4.	Zakłócenie linii nr 1	01.12.2018 godz. 4:15	01.12.2018 godz. 9:00	4h 45 min.
5.	Błąd komunikacji pętla 1	30.11.2018 godz. 10:30	30.11.2018 godz. 14:30	4h
Uszkodzenie ręcznego ostrzegacza pożarowego				
1.	Usterka ROP 1/10	15.06.2018 godz. 9:20	15.06.2018 godz. 13:20	4h
2.	Usterka ROP 1/10	16.06.2018 godz. 14:00	16.06.2018 godz. 19:05	5h 5 min.
Uszkodzenie zasilania SSP				
1.	Usterka zasilania 230V	27.02.2018 godz. 11:30	27.02.2018 godz. 11:45	15 min.
2.	Usterka akumulatorów CSP	16.04.2018 godz. 19:00	17.04.2018 godz. 8:10	13h 10 min.

Tabela 3. Intensywność uszkodzeń wraz z oznaczeniem czasów niezdatności systemu sygnalizacji pożarowej w ujęciu rocznym (przykład).

L.p.	Naprawa z danego rodzaju uszkodzenia	Czas wystąpienia awarii	Czas usunięcia awarii	Czas naprawy [T _{max}]
Uszkodzenie pętli dozorowej				
1.	Zakłócenie linii nr 3	03.01.2018 godz. 14:32	03.01.2018 godz. 18:10	3h 38 min.
2.	Doziemienie pętli nr 1	02.05.2018 godz. 13:30	02.05.2018 godz. 19:00	5h 30 min.
3.	Zakłócenie linii nr 1	01.12.2018 godz. 4:15	01.12.2018 godz. 9:00	4h 45 min.
4.	Błąd komunikacji pętla 1	30.11.2018 godz. 10:30	30.11.2018 godz. 14:30	4h
Sumaryczny czas niezdatności SSP w ujęciu rocznym:				19h 23 min.
Uszkodzenie zasilania SSP				
1.	Usterka zasilania 230V	27.02.2018 godz. 11:30	27.02.2018 godz. 11:45	15 min.
2.	Usterka akumulatorów CSP	16.04.2018 godz. 19:00	17.04.2018 godz. 8:10	13h 10 min.
Sumaryczny czas niezdatności SSP w ujęciu rocznym:				13h 25 min.

5. Modelowanie procesu eksploatacji SSP w programie RELIASOFT BLOCKSIM

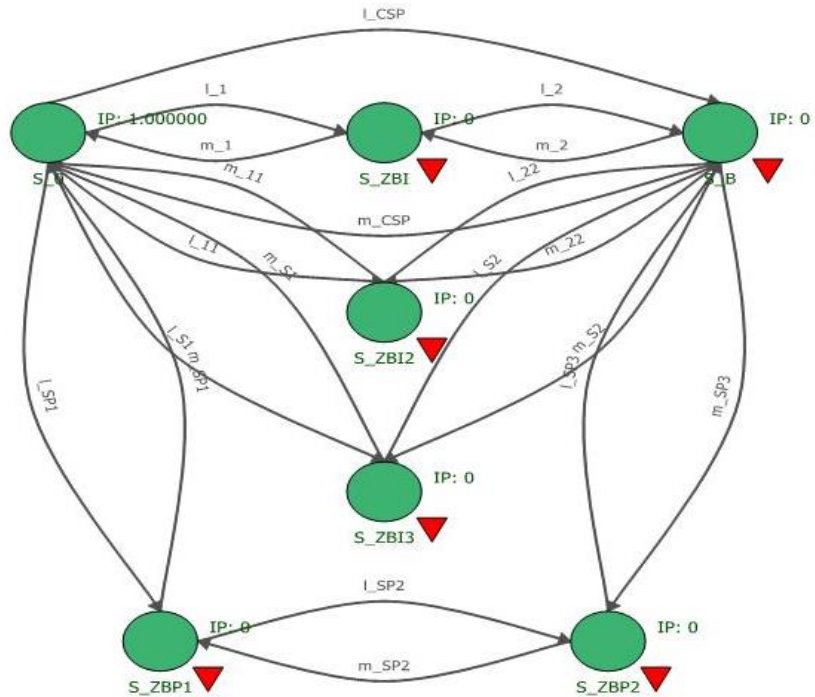
Obliczenia prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanach zagrożenia bezpieczeństwa, zawadności bezpieczeństwa, stanie pełnej zdatności dla modelu procesu eksploatacji SSP przeprowadzono w komercyjnym, specjalistycznym programie obliczeniowym firmy ReliaSoft typu BlockSim. Obliczenia przeprowadzono dla modelu SSP skupionego – linie otwarte, bez powiadamiania. W tabelach 4 i 5 przedstawiono obliczone parametry – np. prawdopodobieństwo początkowe i średnie, współczynnik gotowości dla czasu t w poszczególnych stanach, czas w jakim SSP znajduje się w danym stanie.

Tabela 4. Parametry systemu sygnalizacji pożarowej dla czasu t = 8760 [h]

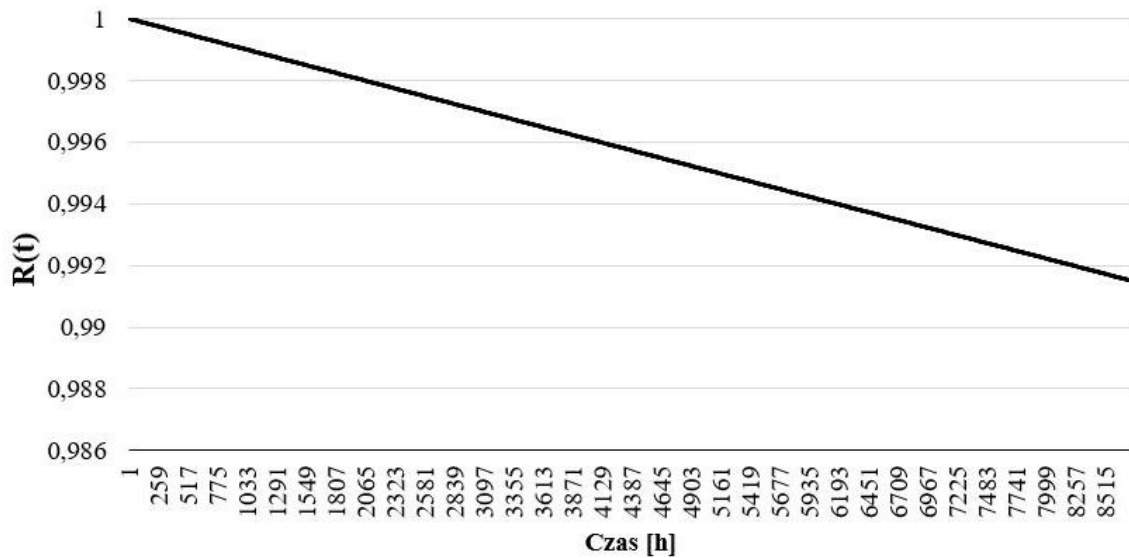
Nazwa stanu	Prawdopodobieństwo początkowe	Średnie prawdopodobieństwo	Gotowość dla czasu t [8760 h]	Nieuszkodzalność dla czasu t	Czas spędzony w danym stanie
S ₀	1	0,999993444	0,999993439	0,991489928	8759,94257
S _B	0	2,245 E-07	2,24528 E-07	0,001526641	0,001966621
S _{ZBI}	0	3,75408 E-06	3,75731 E-06	0,003920964	0,032885763
S _{ZBI2}	0	8,25865 E-07	8,26355 E-07	0,001033117	0,00723458
S _{ZBI3}	0	7,10979 E-07	7,11386 E-07	0,000996234	0,006228174
S _{ZBP1}	0	8,16121 E-07	8,16726 E-07	0,001033117	0,007149221
S _{ZBP2}	0	2,24374 E-07	2,24529 E-07	0	0,001965516

Tabela 5. Macierz intensywności przejść dla poszczególnych stanów SSP dla t = 8760 [h]

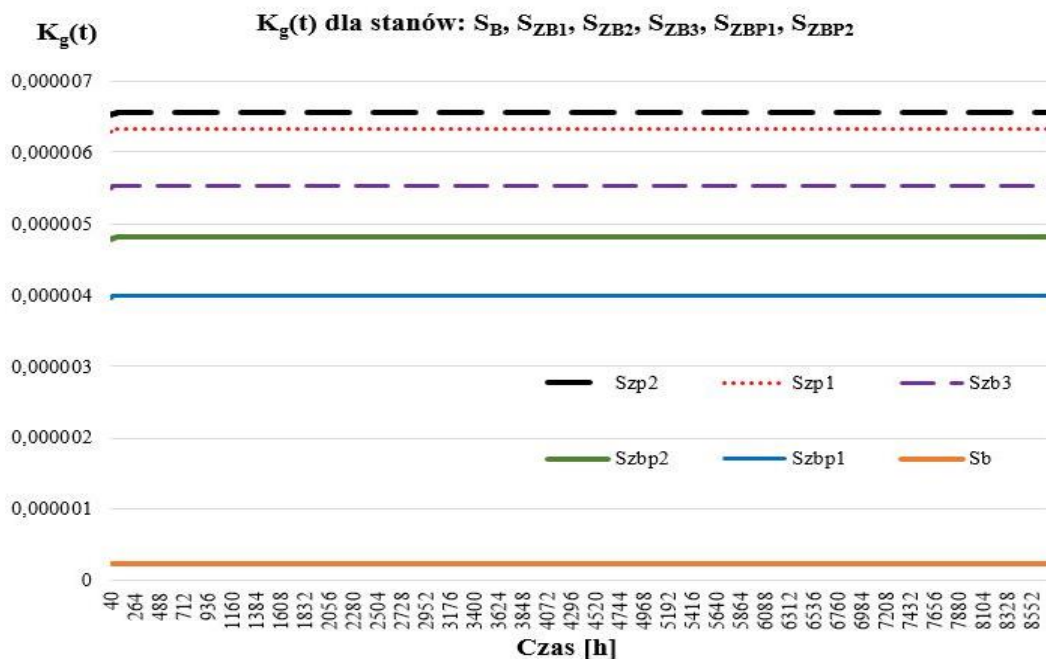
Z → do	S ₀	S _B	S _{ZBI}	S _{ZBI2}	S _{ZBI3}	S _{ZBP1}	S _{ZBP2}
S ₀	-	1,7502 E-07	4,49514 E-07	1,1844 E-07	1,14212 E-07	1,1844 E-07	0
S _B	0,0759	-	0,1818	0,1968	0,125	0	0,2
S _{ZBI}	0,1305	2,52906 E-07	-	0	0	0	0
S _{ZBI2}	0,1968	5,70919 E-08	0	-	0	0	0
S _{ZBI3}	0,2	1,4161 E-08	0	0	-	0	0
S _{ZBP1}	0,2	0	0	0	0	-	1,18 E-07
S _{ZBP2}	0	1,4161 E-08	0	0	0	0,2	-



Rys. 9. Migracja możliwych stanów SSP skupionego z liniami otwartymi, bez powiadamiania PSP (gdzie: PSP – Państwowa Straż Pożarna).



Rys. 10. Nieuszkodzalność $R(t)$ systemu SSP z liniami otwartymi, bez powiadamiania PSP

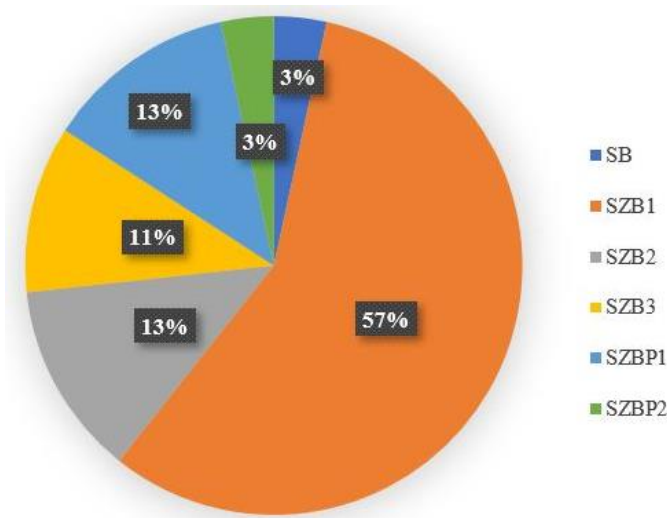


Rys. 11. Współczynniki gotowości strefowe (cząstkowe) dla stanów S_B , S_{ZB1} , S_{ZB2} , S_{ZB3} , S_{ZBP1} , S_{ZBP2} SSP (zawodność i zagrożenie bezpieczeństwa); na wykresie nie zobrazowano stanu S_0 (dla $t = 0$ $S_0(t) = 1$)

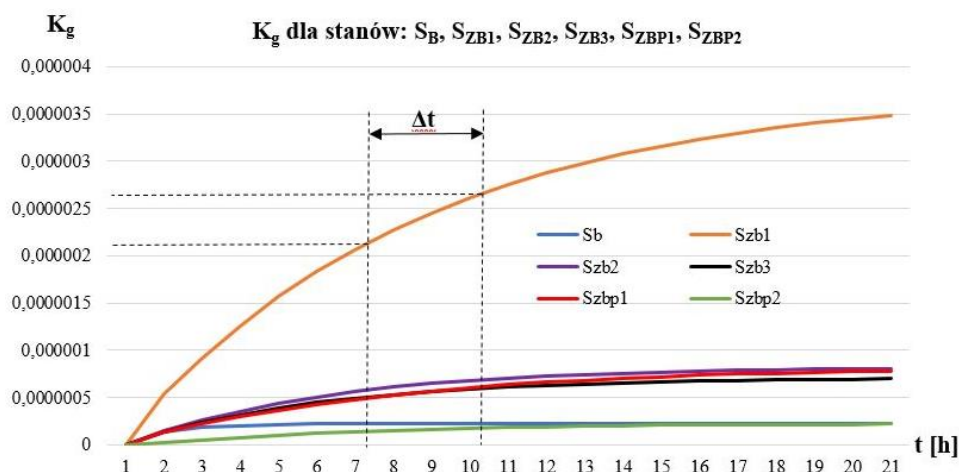
Dla przykładowego czasu eksploatacji $t = 4201$ h wartości współczynnika gotowości $K_g(t)$ dla poszczególnych stanów S_B , S_{ZB1} , S_{ZB2} , S_{ZB3} , S_{ZBP1} , S_{ZBP2} systemu sygnalizacji pożarowej przedstawiono w tabeli 6, a udział procentowy przebywania SSP w określonym stanie na rysunku 12. Na rysunku 13 przedstawiono szybkość narastania wskaźników gotowości stanów dla wybranego przedziału czasu eksploatacji SSP.

Tab. 6. Wartości współczynnika $K_g(t)$ dla poszczególnych stanów SSP w czasie

Czas [h]	Stany systemu sygnalizacji pożarowej					
	S_B	S_{ZB1}	S_{ZB2}	S_{ZB3}	S_{ZBP1}	S_{ZBP2}
	Wartość współczynnika $K_g(t)$					
4201	$2245282 \cdot 10^{-6}$	$3757312 \cdot 10^{-5}$	$82635535 \cdot 10^{-6}$	$71138635 \cdot 10^{-6}$	$81672633 \cdot 10^{-6}$	$2245287 \cdot 10^{-6}$



Rys. 12. Procentowy udział przebywania SSP w określonym stanie w zgodnie z tabelą 6



Rys. 13. Szybkość narastania wskaźników gotowości stanów S_B , S_{ZB1} , S_{ZB2} , S_{ZB3} , S_{ZBP1} , S_{ZBP2} systemu sygnalizacji pożarowej (zawodność i zagrożenie bezpieczeństwa); na wykresie nie zobrazowano stanu S_0 (dla $t = 0$, $K_g(t) = 1$), przyjęto czas $t = 21$ h w celu zobrazowania prędkości zmian parametrów w początkowej fazie zmian stanów przejść

Szybkość narastania wskaźnika gotowości strefowej dla określonego stanu można opisać za pomocą wzoru (5):

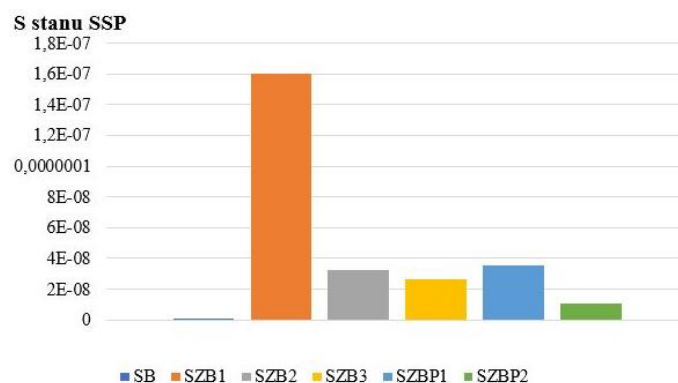
$$S_{ZB1} = \frac{\Delta K_{gSZB1}}{\Delta t} \left[\frac{1}{h} \right] \quad (5)$$

$$S_{ZB1} = \frac{(2,75466E-6) - (2,27438E-6)}{10,25 - 7,25} = 1,08915E-10 \left[\frac{1}{h} \right]$$

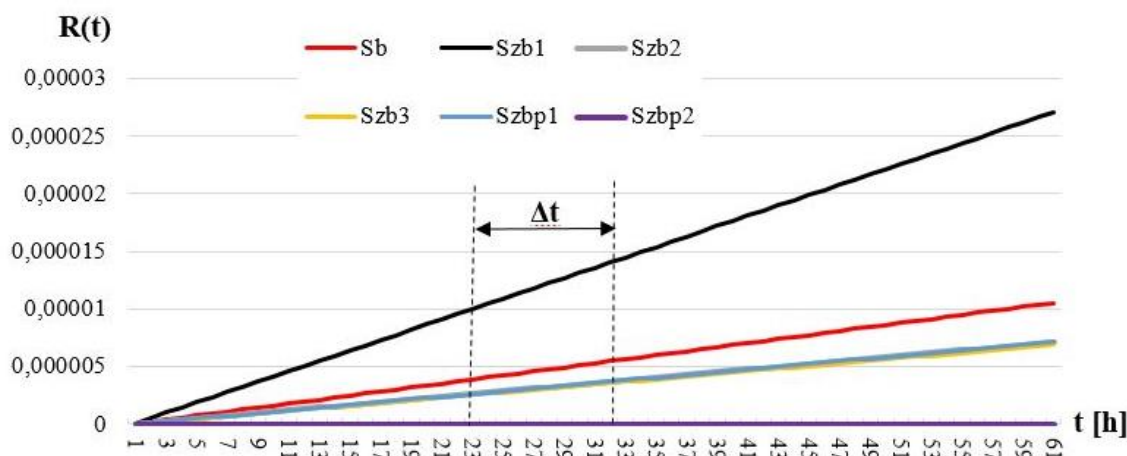
Wartości szybkości narastania wskaźnika gotowości K_g dla pozostałych stanów systemu sygnalizacji pożarowej przedstawiono w tabeli 7 oraz na rysunku 14. Na rysunku 15 przedstawiono prawdopodobieństwo przebywania SSP w poszczególnych stanach.

Tab. 7. Szybkość narastania wskaźników gotowości K_g dla poszczególnych stanów SSP.

L.p.	Stan SSP	Szybkość S narastania wskaźnika gotowości K_g [1/h]
1.	S_B	1,37487E-10
2.	S_{ZB1}	2,08915E-10
3.	S_{ZB2}	4,99493E-11
4.	S_{ZB3}	2,2907E-11
5.	S_{ZBP1}	1,05053E-11
6.	S_{ZBP2}	4,81767E-12



Rys. 14. Szybkość narastania wskaźników gotowości stanów S_B , S_{ZB1} , S_{ZB2} , S_{ZB3} , S_{ZBP1} , S_{ZBP2}

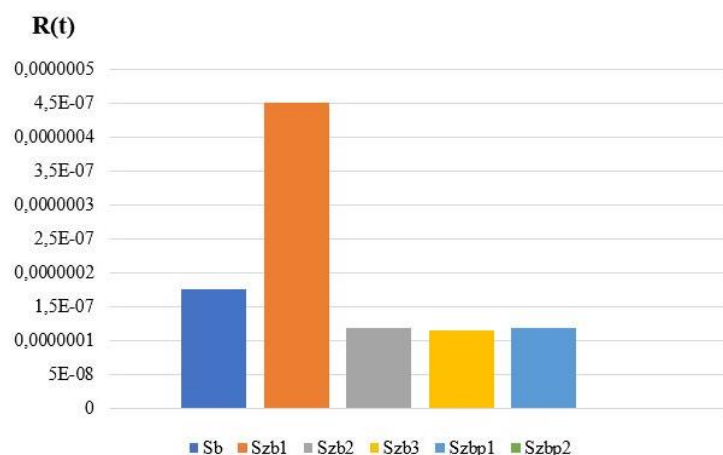


Rys. 15. Prawdopodobieństwo przebywania SSP w stanie R(t) dla stanów S_B, S_{ZB1}, S_{ZB2}, S_{ZB3}, S_{ZBP1}, S_{ZBP2}; na wykresie nie zobrazowano R(t) dla stanu S₀ (dla t = 0, R(t) = 1), przyjęto czas t = 61 h w celu zobrazowania prędkości zmian parametrów w początkowej fazie zmian

Szybkość narastania R(t) w czasie Δt dla określonego stanu opisujemy za pomocą wzoru (6):

$$S_{ZB1} = \frac{\Delta R(t)_{S_{ZB1}}}{\Delta t} \left[\frac{1}{h} \right] \quad (6)$$

$$S_{ZB1} = \frac{(2,75466E - 6) - (2,27438E - 6)}{10,25 - 7,25} = 1,08915E - 10 \left[\frac{1}{h} \right]$$



Rys. 16. Szybkość narastania wartości R(t) w czasie dla wybranych stanów SSP

6. Wnioski

Systemy sygnalizacji pożaru funkcjonujące na rozległych terenach transportowych posiadają różne struktury połączeń, które są funkcją wykonywanych zadań – dozоровanie pożarowe obiektów budowlanych [6,10,11,12,16]. Złożone SSP posiadają kilka – kilkanaście linii pętlowych dozoruujących, linie: sygnalizatorów, sterowania oddymianiem, gaszenia gazem, itd. Ze względu na zakres wykonywanych zadań i sterowań pożarowych struktura niezawodnościowo-eksploatacyjna takich systemów jest mieszana. Stosuje się wszystkie dostępne środki techniczne celem zwiększenia niezawodności SSP. W artykule przedstawiono model i analizę eksploatacyjno-niezawodnościową wybranego SSP, który jest użytkowany na terenie transportowym. W systemie wyróżniono siedem stanów

eksploatacyjnych. Średnia wartość prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanie zdatności wynosi $S_0 = 0,999993444$, natomiast czas spędzony w tym stanie to 8759,94257 [h] (symulację przeprowadzono dla $t = 1$ rok użytkowania SSP). Rozpatrując tzw. współczynniki gotowości strefowe (cząstkowe) $K_{gs}(t)$ dla stanów $S_B, S_{ZB1}, S_{ZB2}, S_{ZB3}, S_{ZBP1}, S_{ZBP2}$ SSP można zauważyć iż w początkowym czasie eksploatacji dominuje stan S_{ZBP2} .

Dlatego projektując SSP należy zwrócić szczególną uwagę na przejście pomiędzy stanami zdatności S_0 a stanem zagrożenia bezpieczeństwa S_{ZBP2} . Określono szybkość narastania wskaźników gotowości stanów $S_B, S_{ZB1}, S_{ZB2}, S_{ZB3}, S_{ZBP1}, S_{ZBP2}$ SSP (zawodność i zagrożenie bezpieczeństwa) w celu zobrazowania szybkości zmian parametrów w początkowej fazie zmian stanów przejść. W początkowym czasie eksploatacji SSP największą wartość otrzymano dla stanu $S_{ZB1} = 2,08915E-10$ [1/h]. Wszystkie współczynniki gotowości strefowej (tzw. cząstkowe) w dalszym procesie eksploatacji stabilizują swoje wartości na stałych poziomach – rys. 13. Wartość prawdopodobieństwa przebywania SSP w stanie $R(t)$ jest bardzo mała dla poszczególnych stanów $S_B, S_{ZB1}, S_{ZB2}, S_{ZB3}, S_{ZBP1}, S_{ZBP2}$ w początkowym okresie eksploatacji - rys. 15. Największa szybkość narastania wartości $R(t)$ w czasie początkowego procesu eksploatacji była dla stanu S_{ZB1} SSP.

Bibliografia

1. Białek K, Paś J. Exploitation of selected railway equipment - conducted disturbance emission examination, *Diagnostyka* 2018; 19(3): 29-35.
2. Branson D. Stirling numbers and Bell numbers, their role in combinatorics and probability, *Math. Scientist* 2000; (25): 1-31.
3. Burdzik R, Konieczny Ł, Figlus T. Concept of on-board comfort vibration monitoring system for vehicles, In the monograph *Activities of Transport Telematics Springer* 2013; 418-425.
4. 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.
5. Duer S, Scaticailov S, Paś J, Duer R, Bernatowicz D. Taking decisions in the diagnostic intelligent systems on the basis information from an artificial neural network, *22nd International Conference on Innovative Manufacturing Engineering and Energy MATEC Web of Conferences* 2018; (178): 1-6.
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. Dziula P, Paś J. Low Frequency Electromagnetic Interferences Impact on Transport Security Systems Used in Wide Transport Areas, *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 2018; 12(2): 251-258.
8. Garmabaki AHS, Ahmadi A, Mahmood YA, Barabadi A. Reliability modelling of multiple repairable units, *Quality and Reliability Engineering International* 2016; 32(7): 2329–2343.

9. Jachimowski R, Żak J, Pyza D. Routes planning problem with heterogeneous suppliers demand, 21st International Conference on Systems Engineering Las Vegas USA 2011; 434-437.
10. Klimczak T, Paś J. Analysis of reliability structures for fire signaling systems in the field of fire safety and hardware requirements, Journal of KONBIN 2018; (64): 191-214.
11. Klimczak T, Paś J. Electromagnetic environment on extensive logistic areas and the proces of using electronic safety system, Politechnika Warszawska Prace Naukowe Transport 2018; (121): 135-146.
12. Klimczak T, Paś J. Analysis of solution of a fire signaling system for a choice railway building, Biuletyn WAT 2018; (67)4: 195-205.
13. Krzykowski M, Paś J, Rosiński A. Assessment of the level of reliability of power supplies of the objects of critical infrastructure, IOP Conf. Series Earth and Environmental Science 2019; 1-9.
14. Lewiński A, Perzyński T, Toruń A. The analysis of open transmission standards in railway control and management, Communications in Computer and Information Science, Berlin Heidelberg Springer-Verlag 2012; (329): 10-17.
15. Łubkowski P, Laskowski D. Selected issues of reliable identification of object in transport systems using video monitoring services, Communication in Computer and Information Science, Berlin Heidelberg Springer 2015; (471): 59-68.
16. Paś J. Operation of electronic transportation systems, Radom Publishing House of University of Technology and Humanities, 2015.
17. Paś J, Duer S. Determination of the impact indicators of electromagnetic interferences on computer information systems, Neural Computing & Applications 2012; 23(7): 2143-2157.
18. Paś J, Rosiński A. Selected issues regarding the reliability-operational assessment of electronic transport systems with regard to electromagnetic interference, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2017; 19(3): 375–381.
19. Rosiński A. Modelling the maintenance process of transport telematics systems, Warsaw Publishing House of Warsaw University of Technology, 2015.
20. Siergiejczyk M, Paś J, Rosiński A. Train call recorder and electromagnetic interference, Diagnostyka 2015; 16(1): 19-22.
21. 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.

22. 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.
23. Stawowy M. Model for information quality determination of teleinformation systems of transport, In: *Proceedings of the European Safety and Reliability Conference ESREL 2014* CRC Press/Balkema 2015; 1909–1914.
24. Stawowy M, Kasprzyk Z. Identifying and simulation of status of an ICT system using rough sets, *Tenth International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX* Springer 2015; (365): 477-484.
25. Warczek J, Młyńczak J, Celiński I. Simulation studies of a shock absorber model proposed under conditions of different kinematic input functions, *Vibroengineering Procedia* 2015; 6: 248–253.
26. 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* London CRC Press/Balkema 2015; 109-115.
27. Weintrit A. Technical infrastructure to support seamless information exchange in e-Navigation, *TST Springer Heidelberg CCIS* 2013; (395): 188–199.
28. Yang L, Yan X. Design for Reliability of Solid State Lighting Products, *Solid State Lighting Technology and Application Series* Springer New York 2013; (1): 497-556.
29. Zajkowski K, Rusica I, Palkova Z. The use of CPC theory for energy description of two nonlinear receivers, *MATEC Web of Conferences* 2018; (178): 1-6.