

dr inż. Stanisław Młynarski

Politechnika Krakowska
31-864 Kraków, al. Jana Pawła II 37,
tel.: (012) 374 33 22,
email: mlynarski_st@poczta.onet.pl;

dr hab. inż. Robert Pilch

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30,
tel.: (012) 617 31 25,
email: pilch@agh.edu.pl;

dr inż. Maksymilian Smolnik

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30,
tel.: (012) 617 31 25,
email: smolnik@agh.edu.pl;

prof. Jan Szybka

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30,
tel.: (012) 617 31 25,
email: szybja@agh.edu.pl

mgr inż. Grzegorz Wiązania

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30,
tel.: (012) 617 31 25,
email: wiazania@agh.edu.pl

Metoda szybkiej oceny niezawodności układów typu k z n

Słowa kluczowe: *algorytmizacja; inżynieria niezawodności; procesy Markowa; układy związane z bezpieczeństwem; układy typu k z n*

Streszczenie: Norma IEC 61508 może być stosowana do oceny poziomu bezpieczeństwa układów technicznych typu k z n , w których elementy mogą pozostawać w jednym z czterech różnych stanów. Przyjęcie takiego modelu prowadzi do ogromnej złożoności obliczeń analitycznych i ograniczeń w praktycznych możliwościach ich zastosowania. W związku z tym, do oceny niezawodności tego typu układów opracowano komputerową metodę wykorzystującą procesy Markowa. Następnie przeprowadzono algorytmizację opracowanej procedury obliczeniowej, co pozwoliło na analizę systemów obejmujących dużą liczbę elementów. Na podstawie opracowanego algorytmu przeprowadzono przykładowe obliczenia.

Opracowaną metodę zweryfikowano porównując otrzymane wyniki z wynikami uzyskanymi metodą analityczną oraz metodą symulacyjną. Zgodność wyników uzyskanych w tych dwóch metodach potwierdza prawidłowość opracowanej procedury i proponowanego programu komputerowego, który oferuje obecnie możliwość wykonywania obliczeń dla struktur typu k z n z więcej niż trzema elementami wymaganymi do prawidłowego funkcjonowania całego systemu i znacząco przyspiesza

obliczenia. Niezawodność i bezpieczeństwo są priorytetami w eksploatacji systemów technicznych i mają szczególne znaczenie w przypadkach, gdy wystąpienie awarii stanowi zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi, powoduje ryzyko ekologiczne lub znaczne straty finansowe.

Oznaczenia

k – minimalna liczba zdalnych elementów warunkująca zdatność układu typu k z n ,
 n – liczba elementów tworzących układ typu k z n ,
SIL – Poziom Nienaruszalności Bezpieczeństwa (Safety Integrity Level),
 λ – intensywność uszkodzeń elementu,
 μ – intensywność odnowy elementu,
MTTR – średni czas trwania odnowy.

Dla modelowania SIL:

λ_D – intensywność uszkodzeń niebezpiecznych elementu,
 λ_{DD} – intensywność uszkodzeń niebezpiecznych wykrywalnych testem diagnostycznym,
 λ_{DU} – intensywność uszkodzeń niebezpiecznych niewykrywalnych testem diagnostycznym,
 DC – pokrycie diagnostyczne (wartość z przedziału (0, 1)),
 μ_{DD} – intensywność odnowy uszkodzeń wykrywalnych testem diagnostycznym,
 μ_{DU} – intensywność odnowy uszkodzeń niewykrywalnych testem diagnostycznym,
 T_1 – odstęp testu okresowego,
 T_2 – odstęp testu diagnostycznego.

Dla modelowania za pomocą procesów Markowa:

S_i – i -ty stan układu,
 S_P – stan pochłaniania,
 n_U – liczba rodzajów (form) uszkodzeń elementu,
 λ_j – intensywność j -tego typu uszkodzeń,
 μ_j – intensywność odnowy z j -tego typu uszkodzeń.

1. Wprowadzenie

Do oceny niezawodności odnawialnych układów o złożonych strukturach niezawodnościowych, których czasy pracy do wystąpienia uszkodzeń i czasy odnow obiektów technicznych można opisać rozkładami wykładniczymi, z powodzeniem stosuje się procesy Markowa [3, 11, 14]. Ograniczenia wynikające z zastosowania rozkładów wykładniczych do opisu procesów uszkodzeń i odnow nie wpływają w sposób istotny na możliwości praktycznego wykorzystania tych procedur obliczeniowych. Interesujące zastopowanie dla prognozowania uszkodzeń przedstawiono w [2]. W stosowanych modelach obliczeniowych najczęściej przyjmuje się, że obiekty techniczne są dwustanowe, tzn. mogą być w stanie zdatności lub niezdatności.

Niezawodność ściśle związana jest z bezpieczeństwem eksploatacji złożonych układów technicznych i korelacja między nimi wyraźnie widoczna jest w normach IEC 61508 i IEC 61511 [7, 9].

W niniejszym artykule przedstawiono problemy związane z bezpieczeństwem złożonych układów technicznych, w pierwszej kolejności charakteryzując założenia przyjmowane w procedurach obliczeniowych stosowanych w wyżej wymienionych normach, a następnie omawiając jak te założenia komplikują grafy stanów i obliczenia niezawodnościowe, sformułowali założenia do algorytmizacji procedur obliczeniowych z zastosowaniem procesów

Markowa. Na podstawie przeprowadzonej analizy opracowali program obliczeniowy, który z powodzeniem może być zastosowany do weryfikacji obliczeń przeprowadzanych według normy IEC 61508.

Poprawność funkcjonowania opracowanego programu obliczeniowego zweryfikowano na wybranych przykładach, porównując uzyskane wyniki z rezultatami uzyskanymi z obliczeń analitycznych. Dodatkowo przeprowadzono obliczenia porównawcze korzystając z oprogramowania BlockSim Reliasoft.

2. Założenia do oceny prawdopodobieństwa uszkodzenia układów związanych z bezpieczeństwem

Normy IEC 61508 i IEC 61511 zostały opracowane ze względu na potrzeby, pojawiające się w zakresie kształtowania bezpieczeństwa funkcjonowania systemów technicznych, których awaria w trakcie eksploatacji może stanowić poważne zagrożenie ekologiczne, a nawet dla życia i zdrowia ludzi.

W wielu przypadkach spełnienie często bardzo rygorystycznych wymagań odnośnie do bezpieczeństwa eksploatacji możliwe jest tylko poprzez wprowadzenie dodatkowych układów – układów związanych z bezpieczeństwem. Zadaniem ich jest ciągle monitorowanie wybranych parametrów eksploatowanego układu a w przypadku osiągnięcia przez nie wartości granicznych lub wystąpienia określonych symptomów realizacja zaprogramowanych funkcji, tak aby zapobiec wystąpieniu zdarzenia niebezpiecznego.

Stąd też metodyka obliczeń w wyżej wymienionych normach oparta jest na wymaganiach odnośnie do bezpieczeństwa eksploatacji danego układu, wyrażanych najczęściej jako akceptowalny dla niego poziom ryzyka (rozumiany tu jako iloczyn częstości występowania zdarzeń niebezpiecznych i ich konsekwencji) [7]. Przyjmując niezmiennosć konsekwencji zdarzeń niebezpiecznych, możliwość obniżenia ryzyka z poziomu generowanego przez eksploatowany układ do poziomu akceptowalnego zależy więc od niezawodności funkcjonowania zastosowanego dodatkowego układu związanego z bezpieczeństwem. W związku z tym dla układu związanego z bezpieczeństwem określa się dopuszczalne wartości tzw. średnich prawdopodobieństw jego uszkodzenia (PFD – Probability of Failure on Demand lub PFH – Probability of Failure per Hour), które będą warunkować obniżenie ryzyka do poziomu przynajmniej akceptowalnego [4]. Wartości te wyznaczane są na podstawie ilorazu [7, 11]:

$$PFD \leq \frac{P_A}{P_B} \quad (1)$$

gdzie:

P_A – akceptowalna wartość częstości zdarzeń niebezpiecznych,

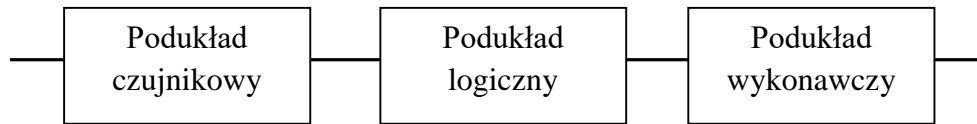
P_B – wartość częstości zdarzeń niebezpiecznych generowanych przez eksploatowany układ.

W celu łatwego posługiwania się tymi wartościami i możliwości klasyfikacji układów bezpieczeństwa ze względu na możliwy stopień obniżenia przez nie ryzyka przyjęto przedziały wartości prawdopodobieństw PFD i PFH jako tzw. poziomy nienaruszalności bezpieczeństwa od SIL1 do SIL4 (Safety Integrity Level) [5, 7, 9].

W procesie projektowania oraz kontroli stosowanych w przemyśle układów związanych z bezpieczeństwem konieczne jest więc wyznaczenie wartości PFD lub PFH i sprawdzenie, czy mieszczą się w zakresie poziomu SIL, wymaganego dla nich w związku z koniecznym obniżeniem ryzyka.

Eksploatowane układy związane z bezpieczeństwem składają się zwykle z trzech (rysunek 1), połączonych szeregowo podukładów [7]:

- podukładu czujnikowego – elementów mierzących wartości określonych parametrów,
- podukładu logicznego – przetwarzającego sygnały z czujników i na podstawie zaprogramowanych funkcji, w zależności od wartości i liczby sygnałów, uruchamiających podukład wykonawczy,
- podukładu wykonawczego – elementów realizujących daną funkcję bezpieczeństwa, mającą zapobiec zdarzeniu niebezpiecznemu.



Rys. 1. Struktura układu związanego z bezpieczeństwem

Każdy z wyróżnionych podukładów posiada określoną strukturę niezawodnościową typu kzn a analizę niezawodnościową prowadzi się tylko w okresie ich normalnej pracy – gdy wartości intensywności uszkodzeń obiektów λ są stałe, niezależne od czasu (por. [1]). Ponieważ podukłady te składają się z urządzeń elektronicznych, elektrycznych i z programowalną elektroniką (E/E/PE) istnieją możliwości ich diagnostyki w czasie pracy. Jest to realizowane poprzez testy diagnostyczne wykonywane w odstępie czasu T_2 . Jest to istotne, ponieważ umożliwia szybkie wykrycie pewnej części występujących uszkodzeń obiektów skracając ich czas przebywania w stanie niezdatności. Spośród wszystkich uszkodzeń niebezpiecznych obiektu, tę część uszkodzeń, które można wykryć testem diagnostycznym określa wartość pokrycia diagnostycznego obiektu (DC). Zakładając, że uszkodzenia wykrywalne i niewykrywalne testem diagnostycznym występują niezależnie można zapisać:

$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU} \quad (2)$$

W przypadku gdy λ_D i DC są znane można obliczyć:

$$\lambda_{DD} = DC \cdot \lambda_D \quad (3)$$

oraz

$$\lambda_{DU} = (1 - DC) \cdot \lambda_D \quad (4)$$

Wszystkie uszkodzenia obiektów niewykryte testem diagnostycznym są wykrywane w czasie testu okresowego wykonywanego w odstępie czasu T_1 , przy czym $T_1 \gg T_2$. Test okresowy polega na sprawdzeniu wszystkich elementów i zakłada się jego stuprocentową skuteczność w wykrywaniu wszystkich rodzajów uszkodzeń obiektów.

Na podstawie powyższych założeń można przyjąć, że każdy z obiektów może znajdować się w stanie niezawodnościowym zdatności lub w stanach niezdatności wynikających z różnych możliwych rodzajów uszkodzeń. Mogą to być stany:

- zdatności,
- niezdatności ze względu na uszkodzenie wykrywalne testem diagnostycznym,
- niezdatności ze względu na uszkodzenie niewykrywalne testem diagnostycznym,
- niezdatności ze względu na obydwa rodzaje uszkodzeń.

Dla stanów niezdatności przyjmuje się odpowiednie intensywności wyjścia z nich – intensywności odnowy elementu:

$$\mu_{DD} = \frac{1}{MTTR} \quad (5)$$

$$\mu_{DU} = \frac{1}{(T_1/2)+MTTR} \quad (6)$$

W praktyce możliwe jest również wystąpienie przypadków kiedy pojedyncze zdarzenie powoduje jednoczesne uszkodzenie wszystkich obiektów w podukładzie, co niezależnie od jego struktury kzn, doprowadza do stanu niezdatności całego układu. Tego typu uszkodzenia określa się jako tzw. uszkodzenia o wspólnej przyczynie. Ich ewentualne udziały określa się zarówno w uszkodzeniach wykrywalnych (β_D) jak i niewykrywalnych (β) testem diagnostycznym i bierze pod uwagę w obliczeniach [11].

Analiza niezawodnościowa układu związanego z bezpieczeństwem polega na wyznaczeniu prawdopodobieństwa, że w przedziale $(0, T_1)$ układ znajduje się w stanie niezdatności. Prawdopodobieństwa te wyznacza się osobno dla każdego z przedstawionych na rysunku 1 podukładów układu związanego z bezpieczeństwem.

Do takich analiz, przy założonych stałych intensywnościach przejść (uszkodzeń i odnow elementów), można zastosować procesy Markowa. W przedstawionej sytuacji jest to o tyle utrudnione, że nawet dla pojedynczego elementu wystąpią cztery możliwe stany na grafie przejść – rysunek 2, zamiast dwóch stanów – zdatności lub niezdatności – przyjmowanych w obliczeniach niezawodnościowych. Natomiast wzrost liczby elementów w badanym układzie powoduje szybki wzrost liczby tych stanów, co w efekcie bardzo utrudnia możliwość analizy oraz wykonania obliczeń.

3. Zastosowanie procesów Markowa w szacowaniu niezawodności struktur progowych typu kzn

Szacowanie niezawodności struktur progowych typu kzn, w których obiekty mogą być odnawiane w trakcie eksploatacji układu, może być prowadzone z wykorzystaniem procesów Markowa. Zależnie od przyjętych założeń, wynikających z praktyki eksploatacyjnej lub z wytycznych normatywnych dotyczących szacowania niezawodności, model obliczeniowy może być budowany w różny sposób. Wobec tego, liczba stanów n_{ES} w których może znajdować się pojedynczy obiekt wynosi:

$$n_{ES} = 1 + n_U, \quad (7)$$

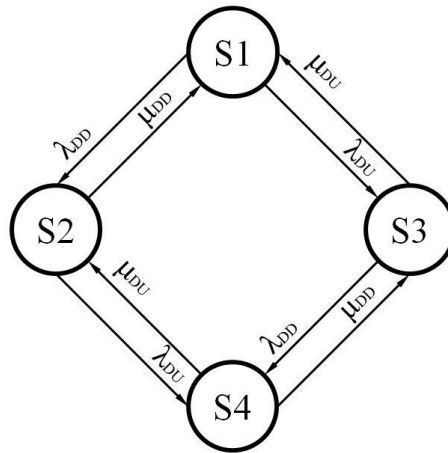
a liczba stanów n_S , w których może pozostawać rozpatrywany układ, jest równa:

$$n_S = (n_{ES})^n = (1 + n_U)^n \quad (8)$$

Wymieniony stan pochłaniania (S_p) jest stanem całkowitej niezdatności układu. Jeżeli układ znajdzie się w tym stanie, to jest on w całości (ze wszystkimi budującymi go obiektami) kwalifikowany do odnowy. W praktyce stan pochłaniania może, ale nie musi być uwzględniany w modelu niezawodnościowym. Jeżeli przyjmuje się, że układ może zostać odnowiony w dowolnej chwili, bez względu na liczbę uszkodzonych obiektów i kryterium jego zdatności, to stan pochłaniania może nie występować w modelu. W takiej sytuacji, stany zdatności układu wyróżniane są spośród ogółu jego stanów (od $i = 1$ do $i = n_S$) na podstawie przyjętego kryterium zdatności, w odniesieniu do stanów poszczególnych obiektów, z których zbudowany jest ten układ.

Dla trzech możliwych form uszkodzeń obiektów (opisanych w poprzednim rozdziale, gdy $n_U = 3$), liczba stanów, w których może znajdować się pojedynczy obiekt wynosi cztery (zgodnie ze wzorem 7), co przedstawiono na rysunku 2 [10].

Przykładowe liczby stanów całego układu n_S , zależnie od liczby obiektów n , zostały podane w tabeli 1.



Rys. 2. Graf przejść układu o strukturze 1 z 1 (S1 stan zdatności) [10]

Tab. 1. Liczba stanów n_S układu zbudowanego z obiektów, dla których $n_U = 3$, przy różnej liczbie wszystkich obiektów n budujących ten układ

n	1	2	3	4	5	...	10
n_S	4	16	64	256	1024	...	1048576

Wraz ze wzrastającą liczbą elementów układu, liczba stanów, w których może się on znajdować, gwałtownie rośnie. Utrudnia to szacowanie niezawodności bardziej złożonych układów, ze względu na potrzebę budowy grafu przejść pomiędzy wszystkimi rozpatrywanymi stanami, jak i z uwagi na konieczność identyfikacji możliwości samych przejść. Przy wspomnianych czterech możliwych stanach każdego obiektu, ręczna budowa grafu przejść, już dla struktury o trzech elementach, staje się bardzo czasochłonna.

równań różniczkowych dla układów zbudowanych z większej liczby obiektów, co przedstawiono w kolejnym rozdziale.

4. Algorytmizacja procedury oceny niezawodności układów związanych z bezpieczeństwem z wykorzystaniem procesów Markowa

W związku z występowaniem dużej liczby stanów układu, nawet przy niewielkiej liczbie obiektów wchodzących w jego skład, występują duże trudności przy wyznaczaniu prawdopodobieństwa przejścia układu w stan niezdatności. Przykład stopnia skomplikowania problemu dla układu składającego się z jednego, dwóch i trzech obiektów przedstawiono w formie uproszczonego grafu przejść między stanami układu (rysunek 4). Wierzchołki grafu odwzorowujące stany układu ponumerowano, każdy z nich oznaczono odpowiednim punktem stanowiącym wierzchołek, a krawędzie pokazujące ścieżki, według których system może zmieniać swój stan, zaznaczono liniami. Dla większej liczby obiektów rysunki stają się mało czytelne.

Widoczny rosnący stopień komplikacji analizowanych układów uzasadnia potrzebę opracowania programu obliczeniowego, który ze względu na dużą liczbę zmiennych wymagał przyjęcia odpowiedniej formy ich zapisu.

Stan układu jest ciągiem stanów poszczególnych obiektów technicznych, co można zapisać wyrażeniem:

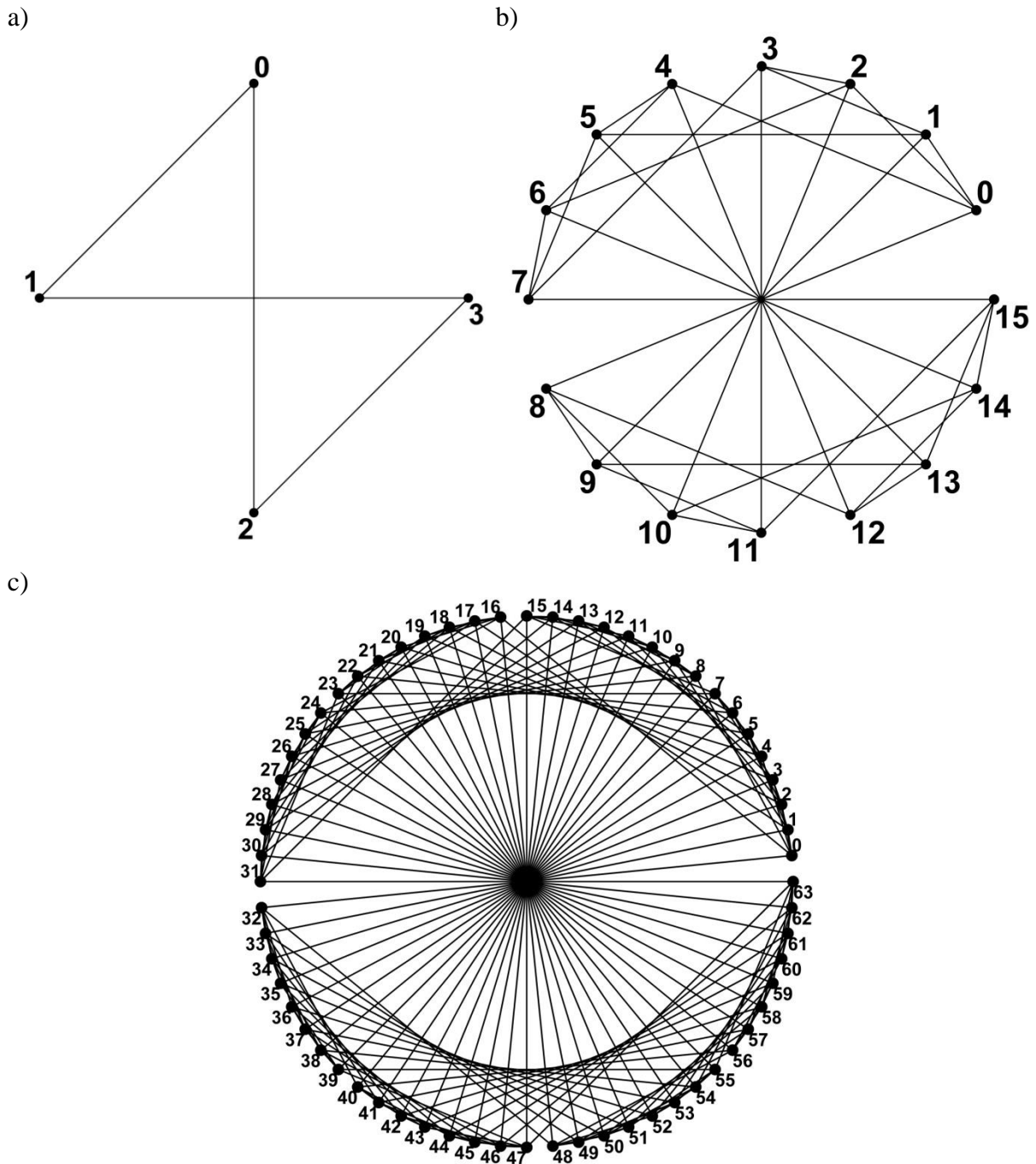
$$S_{SYS,i,j} = \{S_{OT,1}, S_{OT,2}, \dots, S_{OT,j}, \dots, S_{OT,n}\} \quad (9)$$

gdzie:

$S_{SYS,i}$ – i-ty stan systemu,

$S_{OT,j}$ – stany poszczególnych obiektów technicznych.

Każdy z obiektów może przebywać w jednym z czterech stanów, co zapisano w kodzie dwójkowym wykorzystując dwa znaki: 00, 01, 10 lub 11. Przyjmując taką regułę notacji poszczególne stany systemu będą wektorami stanu, o liczbie elementów dwukrotnie większej od liczby obiektów technicznych w systemie, a każdy element takiego ciągu będzie przyjmował wartość zero lub jeden. Zakładając, że stany układu zostaną ponumerowane od zera do $4^n - 1$, zaproponowana forma zapisu będzie stanowić przekształcenie wzajemnie jednoznaczne, pomiędzy numerem stanu i a jego wektorem stanu, polegające na przeliczeniu wartości dziesiętnej na binarną, bądź na odwrót (np. $i=0$ jest przeliczane jako $(00)_{\text{binary}}$ a $i=3$ jest przeliczane jako $(11)_{\text{binary}}$ jak na rysunku 4a). Zaproponowana forma zapisu pozwala na znaczną oszczędność pamięci komputera i uproszczenie algorytmu obliczeniowego.



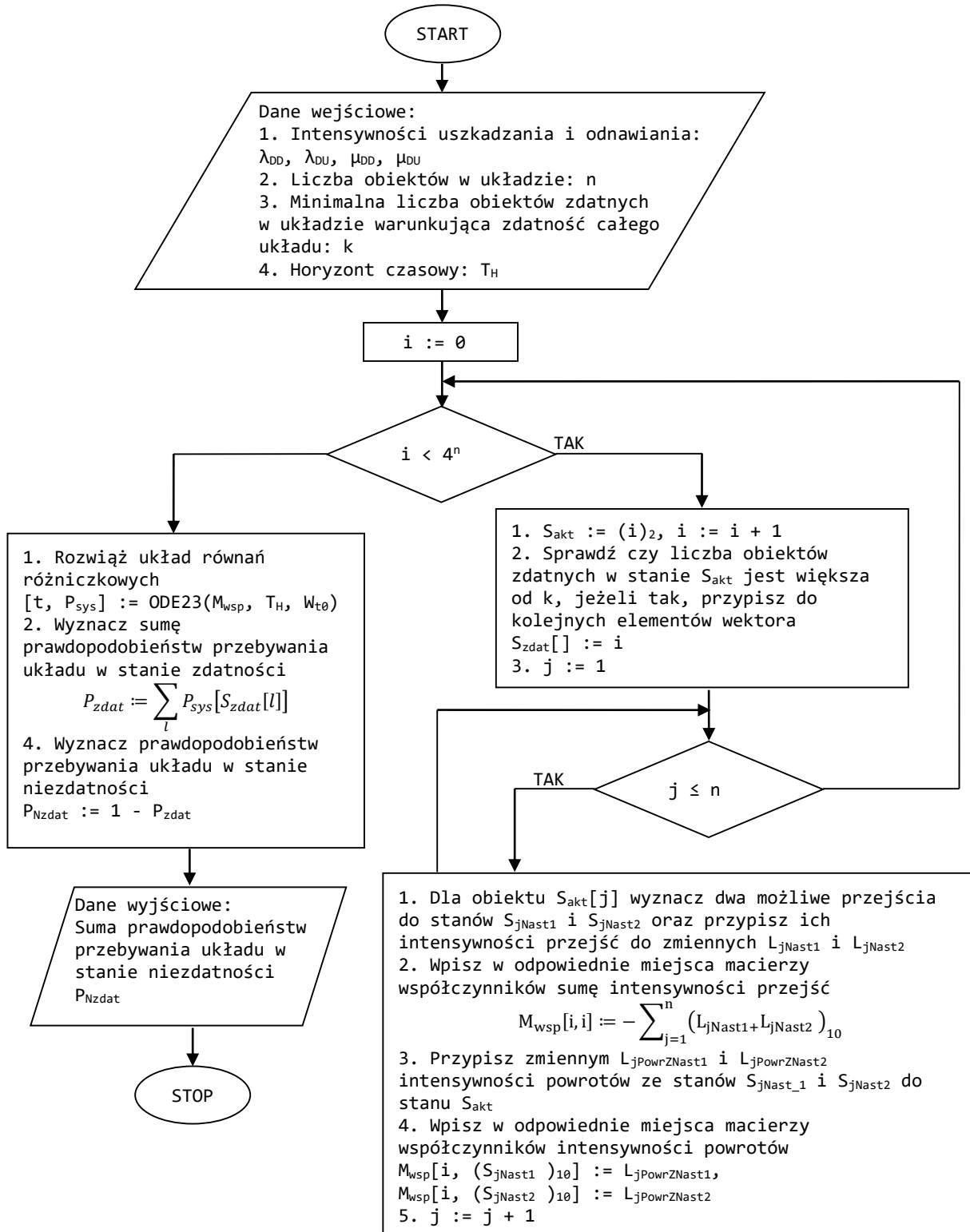
Rys. 4. Grafy przejść między stanami dla układów o różnej liczbie obiektów (a – układ jednoelementowy, b – układ dwuelementowy, c – układ trzejelementowy)

Algorytm zapisany w postaci schematu blokowego przedstawiono na rysunku 5 i jest on realizowany zgodnie z poniższym opisem.

Danymi wejściowymi są intensywności uszkodzania i odnawiania λ_{DD} , λ_{DU} , μ_{DD} , μ_{DU} , poszczególnych obiektów układu, liczba obiektów układu n , minimalna liczba obiektów zdalnych warunkująca stan zdatności układu k oraz horyzont czasowy T_H .

Pośrednim wynikiem działania programu jest macierz współczynników układu równań różniczkowych Kołmogorowa, a wynikiem końcowym prawdopodobieństwo przebywania układu w stanie niezdatności P_{Nzdat} .

W celu wyznaczenia wartości macierzy współczynników M_{wsp} należy określić możliwe przejścia pomiędzy poszczególnymi stanami i intensywności tych przejść. Jest to realizowane w dwóch pętlach. W pętli, której warunkiem jest wyrażenie $i < 4^n$ następuje przekształcenie licznika i na odpowiadający mu wektor stanu S_{akt} przy pomocy operacji $[]_2$ oznaczającej zamianę liczby w systemie dziesiętnym na liczbę w systemie dwójkowym.



Rys. 5. Uproszczony schemat blokowy algorytmu obliczeniowego

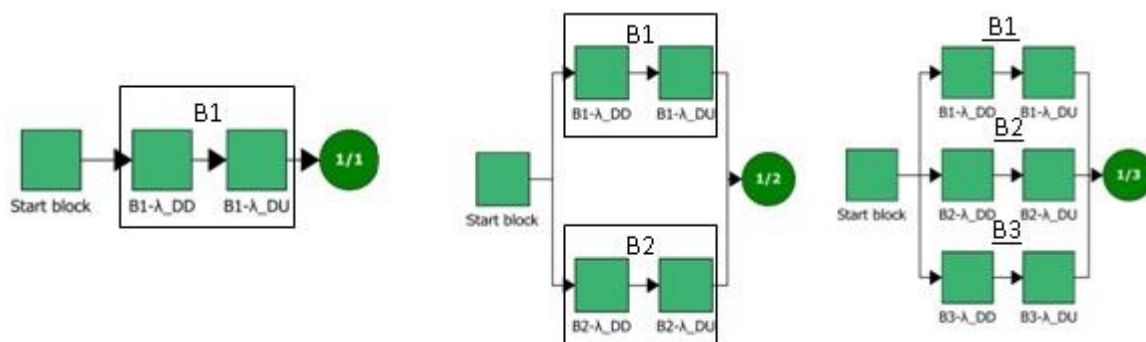
Znając wektor stanu S_{akt} i minimalną liczbę obiektów warunkującą stan zdatności układu k można sprawdzić, czy jest on stanem zdatności układu, jeżeli tak, to do wektora S_{zdat} dodany zostaje kolejny element o wartości równej numerowi stanu powiększonemu o jeden. Kolejna pętla warunkowana wyrażeniem $j \leq n$ sprawdza dla każdego z n obiektów wszystkie możliwe wyjścia ze stanu S_{akt} do stanów S_{jNast1} i S_{jNast2} zgodnie z cyklem na rysunku 5 oraz przypisuje sumę wartości intensywności tych przejść w odpowiednie miejsce macierzy współczynników M_{wsp} . Intensywności powrotów również zostają przypisane w odpowiednie pola macierzy M_{wsp} . Po sprawdzeniu wszystkich stanów, w macierzy M_{wsp} znajdują się współczynniki układu równań Kołmogorowa, który zostaje rozwiązany z wykorzystaniem algorytmu Rungego-Kutty [12] oznaczonego w schemacie jako funkcja ODE23.

Argumentami funkcji ODE23 są: macierz współczynników M_{wsp} , horyzont czasowy T_H oraz warunki początkowe W_{t0} . Wynikiem działania funkcji są prawdopodobieństwa przebywania układu w poszczególnych stanach zestawione w macierzy P_{zdat} . Znając numery stanów zdatności układu zebrane w wektorze S_{zdat} można wyodrębnić z macierzy P_{zdat} pola zawierające prawdopodobieństwa przebywania układu w stanie zdatności. Odjęcie sumy tych pól od jedności pozwala na wyznaczenie prawdopodobieństwa przebywania systemu w stanie niezdatności P_{Nzdat} . Przeprowadzone obliczenia i uzyskane wyniki z zastosowaniem tego programu, przedstawiono w podrozdziale 5.

5. Weryfikacja opracowanego programu i porównanie wyników obliczeń

W niniejszym opracowaniu, obliczenia wskaźników potrzebnych do oceny poziomu nienaruszalności bezpieczeństwa wykonano również z wykorzystaniem oprogramowania BlockSim Reliasoft. Wykorzystanie metody symulacyjnej do analizy czasu poprawnej pracy w środowisku BlockSim wymaga wprowadzania danych wejściowych, do których należą przede wszystkim: struktura niezawodnościowa układu, charakterystyki niezawodnościowe obiektów tego układu, czas trwania symulacji, wyrażony w przyjętych jednostkach wykonywanej pracy oraz liczba powtórzeń symulacji. W efekcie wykonania obliczeń otrzymuje się wartości prawdopodobieństwa uszkodzenia obiektów struktury. Kolejne działania symulacyjnego programu prowadzą do wyliczenia niezawodności układu na podstawie zadeklarowanej wcześniej przez analityka jego struktury niezawodnościowej.

Dla potrzeb niniejszego opracowania przyjęto odstęp testu okresowego $T_1 = 17520$ [h], następnie zastosowano parametry symulacji Monte Carlo. Przyjęto czas zakończenia eksploatacji równy 20000 [h]. Czas ten wyznaczono większy od T_1 ze względu na właściwość procesu obliczeń, którego wyniki na granicach przedziałów wykazują znaczny rozrzut wartości w porównaniu z wartościami znajdującymi się wewnątrz przedziału. Krok obliczeniowy wyrażony przez przyrost czasu = 10 [h] oraz krotność powtórzeń wynosząca 100000 cykli przejść, zostały dobrane w wyniku optymalizacji dokładności i czasu trwania procesu generowania wartości symulacyjnych. Ze względu na konieczność uwzględnienia wyspecyfikowanych frakcji uszkodzeń λ_{DD} i λ_{DU} , które składają się na λ_D , obliczenia przeprowadzono dla przygotowanych do tego celu struktur zastępczych układów kzn. Wybrane ze struktur zostały przedstawione na rysunku 6.



Rys. 6. Wybrane zastępcze schematy blokowe analizowanych struktur kzn

Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wartości czasów T_1 8760 [h] oraz 17520 [h] oraz dla dwóch wartości intensywności uszkodzeń λ_D , wyrażonych przez frakcje λ_{DD} i λ_{DU} . Przyjęto, że wszystkie obiekty w strukturze kzn są identyczne i mają te same parametry niezawodnościowe. Wartości zastosowanych parametrów przedstawione zostały w tabeli 2.

Tab. 2. Przyjęte wartości danych wejściowych do obliczeń

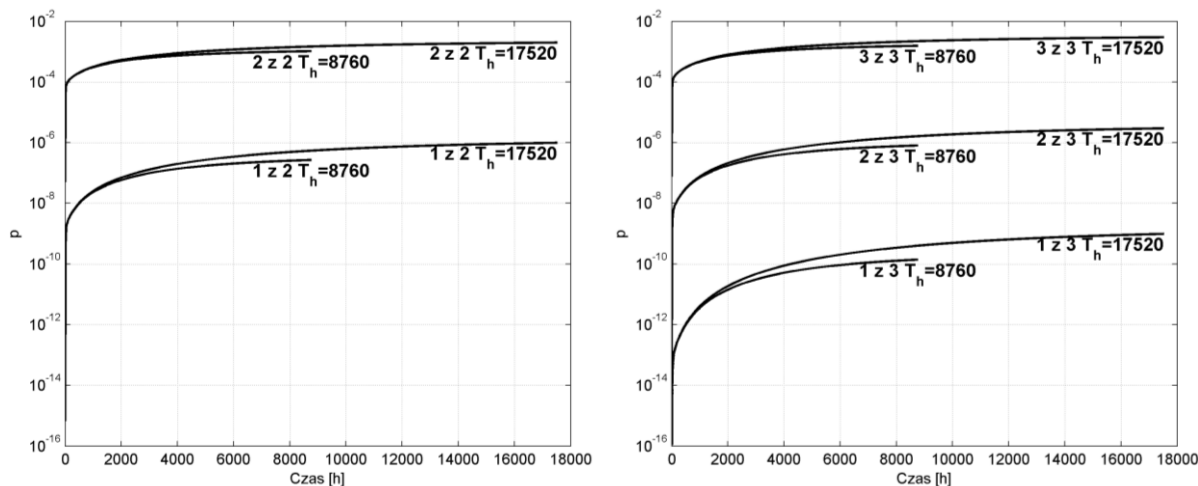
Zestaw danych 1		Zestaw danych 2	
λ_D [1/h]	1,80E-06	λ_D [1/h]	1,25E-04
DC [%]	93	DC [%]	85
λ_{DD} [1/h]	1,67E-06	λ_{DD} [1/h]	1,06E-04
λ_{DU} [1/h]	1,26E-07	λ_{DU} [1/h]	1,88E-05
MTTR [h]	2,40E+01	MTTR [h]	2,40E+01
μ_{DD} [1/h]	$MTTR^{-1}$	μ_{DD} [1/h]	$MTTR^{-1}$
μ_{DU} [1/h]	$((T_1/2)+MTTR)^{-1}$	μ_{DU} [1/h]	$((T_1/2)+MTTR)^{-1}$

Wyniki uzyskane proponowaną w rozdziale 4 niniejszej pracy metodą algorytmizacji procesów Markowa porównano z wynikami obliczeń analitycznych, scharakteryzowanych w rozdziałach 2 i 3, a także z wynikami obliczeń symulacyjnych w oprogramowaniu BlockSim.

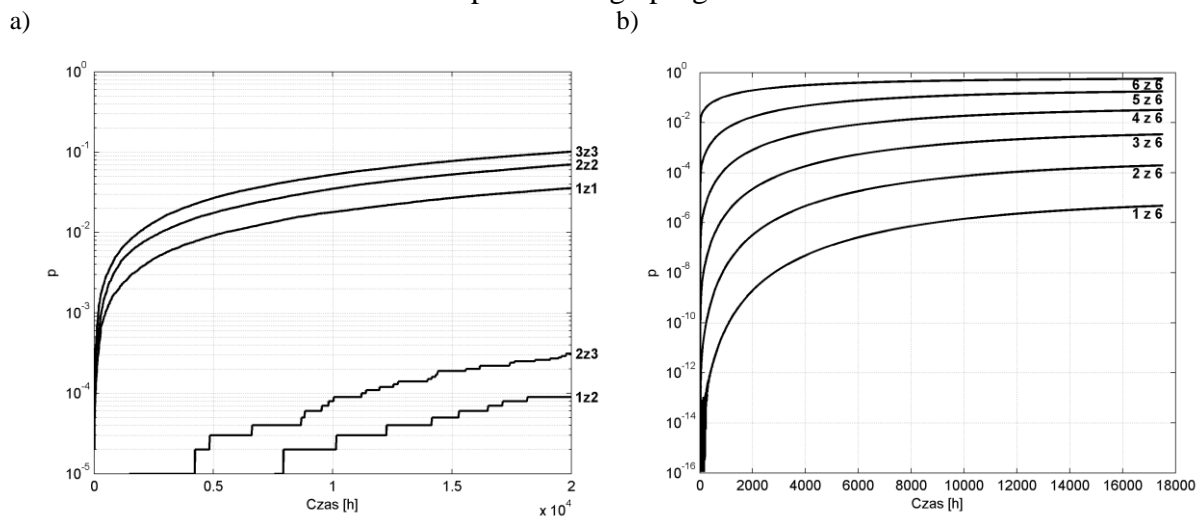
Wyniki prowadzonych obliczeń prawdopodobieństwa przebywania w stanie niezdatności układów o określonych strukturach przedstawione zostały w tabelach 3 i 4.

Tab. 3. Zbiorcze zestawienie wyników obliczeń dla zestawu danych 1 i wybranych struktur niezawodnościowych (a – metoda algorytmizacji, b – metoda analityczna, c – symulacja w programie BlockSim)

Metoda	Horyzont T_1 [h]	Struktura niezawodnościowa					
		1z1	1z2	2z2	1z3	2z3	3z3
a)	8760	5,19E-04	2,69E-07	1,04E-03	1,40E-10	8,08E-07	1,56E-03
	17520	9,96E-04	9,91E-07	1,99E-03	9,87E-10	2,97E-06	2,98E-03
b)	8760	5,19E-04	2,69E-07	1,04E-03	1,40E-10	8,08E-07	1,56E-03
	17520	9,96E-04	9,91E-07	1,99E-03	9,87E-10	2,97E-06	2,98E-03
c)	8760	1,59E-02	2,00E-05	3,04E-02	0	5,00E-05	4,61E-02
	17520	3,13E-02	8,00E-05	6,14E-02	0	2,40E-04	8,96E-02



Rys. 7. Wyniki obliczeń prawdopodobieństw stanów niezdatności układów kzn wg opracowanego programu



Rys. 8. Wyniki obliczeń prawdopodobieństw stanów niezdatności układów kzn według (a – model symulacyjny BlockSim, b – opracowany program dla n=6 elementów)

Tab. 4. Zbiorcze zestawienie wyników obliczeń dla zestawu danych 2 i wybranych struktur niezawodnościowych (a – metoda algorytmizacji, b – metoda analityczna, c – symulacja w programie BlockSim)

Metoda	Horyzont T_1 [h]	Struktura niezawodnościowa					
		1z1	1z2	2z2	1z3	2z3	3z3
a)	8760	6,98E-02	4,87E-03	1,35E-01	3,40E-04	1,39E-02	1,95E-01
	17520	1,30E-01	1,68E-02	2,43E-01	2,19E-03	4,62E-02	3,41E-01
b)	8760	6,98E-02	4,87E-03	1,35E-01	3,40E-04	1,39E-02	1,95E-01
	17520	1,30E-01	1,68E-02	2,43E-01	2,19E-03	4,62E-02	3,41E-01
c)	8760	6,63E-01	1,20E-01	8,87E-01	2,07E-02	2,54E-02	9,62E-01
	17520	8,86E-01	3,16E-01	9,87E-01	1,00E-01	5,33E-02	9,98E-01

Wyniki prowadzonych badań zostały przedstawione w postaci charakterystyk prawdopodobieństwa pozostawania układu w stanie niezdatności, które wykreślono na rysunkach z siatką półlogarytmiczną.

Uzyskane wyniki z obliczeń analitycznych i przeprowadzonych z zastosowaniem opracowanego programu zawierają porównywalne wartości. Występujące różnice wynikać mogą jedynie z zaokrągleń w obliczeniach wykonywanych techniką cyfrową.

Wyniki obliczeń według programu BlockSim mają wartości pesymistyczne w porównaniu z wynikami uzyskanymi innymi metodami. Daje to możliwość zachowania dużego marginesu bezpieczeństwa. Właściwość ta ma istotne uzasadnienie z uwagi na brak powtarzalności rezultatów symulacji. Jedną z istotnych cech metody symulacyjnej, stanowiącą jej zaletę, jest niewielka wrażliwość na złożoność analizowanej struktury niezawodnościowej i związanych z tym trudności obliczeniowych oraz szybkie uzyskiwanie wyników. Metoda ta może być również stosowana do symulacji wskaźników niezawodnościowych układów, w których nie ma pełnej wiedzy o procesach zachodzących podczas ich eksploatacji.

Metoda symulacji stosowana w pakiecie programu BlockSim, wykorzystująca symulator liczb losowych oparty na algorytmie Ecuyer'a i losowaniu Baysa-Durhama, umożliwia prognozowanie wartości wskaźników niezawodności [8, 13]. Zbudowany w oparciu o wybrane charakterystyki eksploatacyjne model obliczeniowy umożliwia symulację funkcjonowania obiektów oraz procesu obsługowego [6].

6. Wnioski

Do weryfikacji napisanego zgodnie z powyższym algorytmem programu wybrano sześć podstawowych struktur kzn stosowanych w układach związanych z bezpieczeństwem. Wyniki uzyskane z obliczeń przeprowadzonych z zastosowaniem opracowanego programu oraz wg klasycznej metody budowy grafu przejść, pisania równań i ich rozwiązania zostały przedstawione w tabelach 3 i 4 oraz na rysunkach 7 i 8.

Uzyskana w tych dwóch metodach zgodność wyników potwierdza poprawność opracowanej procedury i napisanego programu komputerowego, który daje teraz możliwości wykonywania obliczeń dla struktur kzn przy $k > 3$ i znacznie przyspiesza przeprowadzanie obliczeń.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń według programu BlockSim różnią się od tych dwóch wyżej wymienionych metod, ale dają wartości ze znacznym zapasem bezpieczeństwa, co z praktycznego punktu widzenia jest korzystne.

Niezawodność i bezpieczeństwo są zagadnieniami priorytetowymi w eksploatacji układów technicznych. Stanowi to o możliwościach praktycznego zastosowania przedstawionych metod obliczeniowych. Aspekty bezpieczeństwa eksploatacji nabierają szczególnego znaczenia w przypadkach, gdy wystąpienie uszkodzenia powoduje zagrożenie dla zdrowia i życia ludzi, zagrożenie ekologiczne lub znaczne straty finansowe.

Źródło finansowania

Praca finansowana przez Akademię Górniczo-Hutniczą w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Badania statutowe, nr 11.11.130.174.

Literatura

1. Andrzejczak K. Application of the order statistics to the fault tolerant systems. Journal of KONBiN 2016; 2(38): 77-97.
2. Andrzejczak K., Selech J. Flexible prediction of the vehicle component damage. Proceedings of 22nd International Scientific Conference. Transport Means 2018; p. 987-990.

3. Andrzejczak K, Młyńczak M, Selech J. Poisson-distributed failures in the predicting of the cost of corrective maintenance. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20 (4): 602-609.
4. Chebila M, Innal F. Generalized analytical expressions for safety instrumented systems' performance measures: PFD_{avg} and PFH. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2015; 34: 167-176.
5. Jahanian H. Generalizing PFD formulas of IEC 61508 for KooN configurations. *ISA Transactions* 2015; 55: 168-174.
6. Johnson P E. Monte Carlo Analysis in Academic Research. *The Oxford Handbook of Quantitative Methods in Psychology*. Vol. 1, Oxford University Press, 2013.
7. IEC 61508. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems.
8. Manzini R, Regattieri A, Pham H, Ferrari E. *Maintenance for Industrial Systems*. Springer-Verlag GmbH, 2010.
9. Młynarski S, Pilch R, Kaczor G, Smolnik M, Szkoda M, Szybka J. Wpływ wybranych czynników na poziom nienaruszalności bezpieczeństwa (SIL). *Journal of KONBiN* 2015; 35(3): 85-98.
10. Młynarski S, Pilch R, Smolnik M, Szkoda M, Szybka J. Ocena poziomu nienaruszalności bezpieczeństwa (SIL) wg normy EN 61508 oraz z zastosowaniem procesów Markowa. *Journal of KONBiN* 2015; 35(3): 73-84.
11. Pilch R. Extending the Possibilities of Quantitative Determination of SIL – a Procedure Based on IEC 61508 and the Markov Model with Common Cause Failures. *Quality and Reliability Engineering International* 2017; 33: 337-346.
12. Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, Flannery B P. *Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 2002.
13. System Analysis Reference. *Reliability, Availability & Optimization*. BlockSim 7. Tucson: Reliasoft Corporation, 2007.
14. Tang S, Guo X, Sun X, Xue H, Zhou Z. Unavailability analysis for k-out-of-n: G systems with multiple failure modes based on micro-Markov models. *Mathematical Problems in Engineering*: 2014; article ID 740936, 10.1155/2014/740936.