

**Marcin KOWALSKI, Jan MAGOTT**  
Politechnika Wrocławska, Wrocław

## **GRAFY NIEZDATNOŚCI Z ZALEŻNOŚCIAMI CZASOWYMI**

### **Słowa kluczowe**

Drzewa niezdatności, dynamiczne drzewa niezdatności, probabilistyczne drzewa niezdatności z zależnościami czasowymi, system tramwajowy komunikacji miejskiej.

### **Streszczenie**

W pracy wprowadzono grafy niezdatności z zależnościami czasowymi. Pokazano, w których kierunkach są one rozwinięciem drzew niezdatności z zależnościami czasowymi. Grafy te użyto do zamodelowania systemu tramwajowego Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego (MPK) we Wrocławiu. W tym systemie są tramwaje rezerwy zimnej. Tramwaj uszkodzony jest zastępowany rezerwowym lub jeśli zostanie naprawiony przed zakończeniem wymiany, to naprawiony podejmuje pracę, a rezerwowym jest zwalniany. Rezerwa czasowa określa długość przedziału czasu, w którym powinna być zakończona naprawa uszkodzonego tramwaju lub wymiana uszkodzonego na rezerwowym.

### **Wprowadzenie**

Standardowe drzewa niezdatności są używane w niezawodności i analizie bezpieczeństwa [5] od pięćdziesięciu lat.

Drzewa te w ich pierwotnej postaci nie miały dużej mocy opisowej wyrażania systemów rzeczywistych. Czynnikiem, które zwiększyły ich stosowalność, były następujące prace: [4], gdzie wprowadzono dynamiczne drzewa niezdatno-

ści zawierające bramki dynamiczne i [3], w której zdefiniowano bramki naprawcze. W celu wyznaczenia rozwiązania, narzędzie RELEX [13] transformuje bramki dynamiczne w modele Markowa. W [3] elementy dynamicznych drzew niezdatności z bramkami naprawczymi są translowane w podklasę kolorowanych sieci Petriego nazywanych sieciami stochastycznymi dobrze zbudowanymi. Te ostatnie są konwertowane w modele Markowa. W pracy [11] przedstawiono translację dynamicznych drzew niezdatności w sieci Bayesa.

Dynamiczne drzewa niezdatności z bramkami naprawczymi nie umożliwiają wyrażania takich cech jak np. rezerwa czasowa. W celu zwiększenia mocy opisowej drzew niezdatności w kierunku wyznaczania skomplikowanych zależności czasowych, w pracy [2] wprowadzono probabilistyczne drzewa niezdatności z zależnościami czasowymi (PDNZC). Drzewa te wzorowane są częściowo na drzewach niezdatności z zależnościami czasowymi przedstawionymi w pracach [6], [10]. PDNZC składają się z bramek, zdarzeń oraz połączeń bramek ze zdarzeniami. Bramki podzielone są na dwie zasadnicze kategorie, a mianowicie: uogólniające i przyczynowe. W pracy [2] probabilistyczne drzewa niezdatności zostały użyte do koordynacji czasowej zabezpieczeń odległościowych szeroko stosowanych w zabezpieczaniu linii wysokich napięć w elektroenergetyce.

W pracy [9] przeanalizowano moc opisową probabilistycznych drzew niezdatności z zależnościami czasowymi w wyrażaniu sieci PERT i dynamicznych drzew niezdatności (DDN). Pokazano, jak za pomocą PDNZC można wyrazić sieci PERT. Badając moc opisową PDNZC w wyrażaniu DDN, skoncentrowano się na reprezentacji następujących bramek dynamicznych: priorytetowej AND, komponentów rezerwowych z rezerwą zimną, funkcjonalnej zależności.

Badania nad grafami niezdatności z zależnościami czasowymi zostały w dużej mierze zainspirowane działaniem systemu tramwajowego Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego (MPK) we Wrocławiu, którego analizę rozpoczęto w pracy [12]. W tym systemie są tramwaje rezerwy zimnej. Tramwaj uszkodzony jest zastępowany rezerwowym lub jeśli zostanie naprawiony przed zakończeniem wymiany, to podejmuje pracę. Rezerwa czasowa określa długość przedziału czasu, w którym powinna być zakończona wymiana lub naprawa uszkodzonego tramwaju, czyli zastąpienie uszkodzonego tramwaju – sprawnym.

PDNZC ani DDN z bramkami naprawczymi nie wystarczają do wyrażenia tego systemu.

W pracy [8] opracowano model analizowanego systemu MPK z wykorzystaniem stochastycznych sieci Petriego wysokiego poziomu. Model ten bazuje na standardowych sieciach Petriego wysokiego poziomu [7] oraz uogólnionych stochastycznych sieciach Petriego [1]. Sieci Petriego wysokiego poziomu uważane są za mało przyjazne praktykom. Stąd nasze poszukiwania konstrukcji języka do wyrażania m. in. wymienionego systemu komunikacji miejskiej są zorientowane na dobór jak najprostszyc konstrukcji sieci Petriego.

W celu zamodelowania tego systemu, w tej pracy do zbioru elementów PDNZC będą dodane nowe elementy oparte na sieci Petriego. Uzyskane w rezultacie struktury zawierają cykle. Stąd wprowadzone będzie pojęcie grafów niezdatności z zależnościami czasowymi.

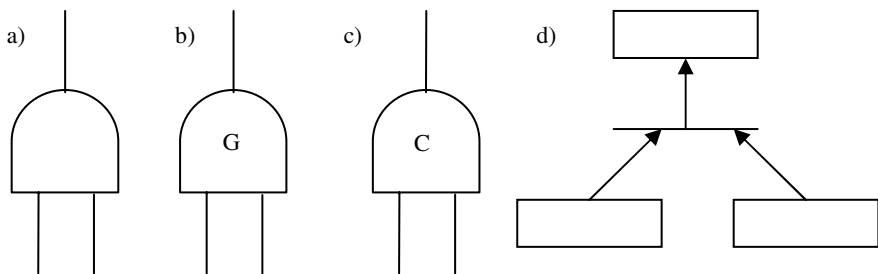
W kontekście poprzednich badań grafy niezdatności dostarczają nie tylko ogólnego w sensie użytego języka, ale również intuicyjnego dla inżyniera modelu poprawnie specyfikującego kryteria niezawodnościowe.

Struktura pracy jest następująca. W sekcji 1 omówione zostały PDNZC. Na ich podstawie w sekcji 2 wyprowadzono grafy niezdatności z zależnościami czasowymi. Sekcja 3 zawiera demonstrację zastosowania tych grafów na opisanym wyżej problemie komunikacji MPK z tramwajami rezerwowymi.

### 1. Probabilistyczne drzewa niezdatności z zależnościami czasowymi

PDNZC składają się ze zdarzeń, bramek i łuków między zdarzeniami i bramkami. W PDNZC, podobnie jak w drzewach niezdatności z zależnościami czasowymi [6], [10], występują bramki uogólniające i przyczynowe. W przypadku bramek uogólniających, zdarzenie wyjściowe jest kombinacją zdarzeń wejściowych. Bramki przyczynowe charakteryzują się czasem opóźnienia zdarzenia wyjściowego (efektu) względem zdarzeń wejściowych (przyczyn). Bramki uogólniające oznaczane są symbolem „G”, natomiast przyczynowe – symbolem „C”.

Przedstawimy różnice i podobieństwa między bramkami logicznymi układów cyfrowych a bramkami PDNZC na przykładzie bramek AND. Bramki te przedstawione są na rys. 1.



Rys. 1. Bramki: a) logiczna AND układów cyfrowych, b) uogólniająca PDNZC, c) przyczynowa PDNZC, d) proste przejście z dwoma zdarzeniami wejściowymi i jednym wyjściowym

Bramka logiczna AND układów cyfrowych (rys. 1a) charakteryzowana jest formułą logiczną:  $z = x \wedge y$ , gdzie „ $\wedge$ ” jest symbolem operatora logicznego AND,  $x$ ,  $y$  – zmienne wejściowe,  $z$  – zmienna wyjściowa. Jest to model formal-

ny. Rzeczywiste bramki logiczne charakteryzowane są ponadto czasem propagacji sygnału z wejścia na wyjście, który wyraża czas opóźnienia między zmiennymi wejściowymi a zmienną wyjściową.

W PDNZC zdarzenie  $x$  występuje w przedziale czasu liczonym od chwili startu  $\tau(xs)$  do chwili końca  $\tau(xe)$  tego zdarzenia. W szczególnym przypadku zdarzenie może trwać czas zerowy, tzn.  $\tau(xs) = \tau(xe)$ .

Niech  $x(t)$  oznacza wartość logiczną zmiennej  $x$  w chwili  $t$ . Ponadto, niech  $T$  ( $F$ ) oznaczają odpowiednio: Prawda (Fałsz), a  $z = B(x_1, \dots, x_n)$  jest funkcją boolowską, w której  $x_1, \dots, x_n, z$  są zmiennymi. Zdarzenie  $z$  zachodzi w chwili  $t$  wtedy, i tylko wtedy, gdy  $z(t) = T$ .

$$z(t) = T \Leftrightarrow B(x_1(t), \dots, x_n(t)) = T.$$

Bramkę uogólniającą AND (GAND) (rys. 1 b) wyraża formuła:

$$\begin{aligned} occur(z) &\Rightarrow occur(x) \wedge occur(y) \wedge overlap(x, y) \wedge \\ &\max(\tau(xs), \tau(ys)) = \tau(zs) \wedge \min(\tau(xe), \tau(ye)) = \tau(ze) \end{aligned}$$

gdzie:  $occur(z)$  jest formułą logiczną o znaczeniu: zdarzenie  $z$  wystąpiło.

Znaczenie formuły opisującej bramkę GAND jest następujące: jeśli zdarzenie wyjściowe wystąpiło, to obydwie zdarzenia na wejściach wystąpiły jednocześnie. Ponadto zdarzenie wyjściowe trwało tak długo, jak długo zdarzenia wejściowe występowały jednocześnie. Zatem chwila startu zdarzenia  $z$  jest równa chwili startu późniejszego z tych zdarzeń. Z kolei chwila jego zakończenia jest równa wcześniejszej spośród chwil zakończenia obydwu zdarzeń wejściowych. Przykładem bramki GAND jest bramka ze zdarzeniami wejściowymi E10, E11 i zdarzeniem wyjściowym E12.

Niech  $R(X)$  będzie realizacją zmiennej losowej  $X$ , tzn. wartością generowaną zgodnie z rozkładem zmiennej  $X$ .

Rozważmy przyczynową bramkę AND (rys. 1c). Niech  $d$  będzie zmienną losową czasu opóźnienia między chwilą startu późniejszego ze zdarzeń wejściowych a chwilą wystąpienia zdarzenia wyjściowego.

Przyczynowa bramka AND (CAND) opisana jest wyrażeniem:

$$\begin{aligned} occur(z) &\Rightarrow ((occur(x) \wedge occur(y) \wedge \\ &(\tau(xs) \leq \tau(ys) \Rightarrow \tau(zs) = \tau(ys) + R(d)) \wedge . \\ &(\tau(ys) \leq \tau(xs) \Rightarrow \tau(zs) = \tau(xs) + R(d))) \end{aligned}$$

Bramka przyczynowa OR (COR) określona jest następująco:

$$occur(z) \Rightarrow$$

$$((occur(x) \wedge \tau(zs) = \tau(xs) + R(d1)) \vee (occur(y) \wedge \tau(zs) = \tau(ys) + R(d2))).$$

gdzie:  $d1$  (lub  $d2$ ) – zmienna losowa, która reprezentuje opóźnienie czasowe między chwilą wystąpienia (startem) przyczyny  $x$  (lub  $y$ ), a chwilą wystąpienia efektu  $z$ .

Powyższa formuła ma następujące znaczenie: jeśli zdarzenie  $z$  wystąpiło, to wystąpiło zdarzenie  $x$  lub  $y$ . Ponadto zdarzenie  $z$  wystartowało w chwili  $R(d1)$ , (lub  $R(d2)$ ) względem chwili startu zdarzenia  $x$  (lub  $y$ ).

Przykładem tej bramki jest bramka na rys. 5 ze zdarzeniami wejściowymi E7, E8, zdarzeniem wyjściowym E9. Czas opóźnienia dla zdarzenia E8 jest wyrażony rozkładem Weibulla, natomiast czas opóźnienia dla E7 jest zerowy.

Na bramkę przyczynową OR może być nałożony dodatkowy warunek, np.:

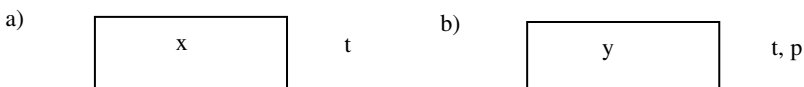
$$\tau(zs) = \min\{\tau(xs) + R(d1), \tau(ys) + R(d2)\},$$

tzn. start zdarzenia wyjściowego następuje w chwili wcześniej upływającego opóźnienia.

## 2. Grafy niezdatności z zależnościami czasowymi

Zdarzenie  $x$  występujące w PDNZC ilustrowane jest prostokątem z czasem jego trwania  $t$  (rys. 2a). Czas trwania może być wyrażony zmienną losową, stałą lub być równy nieskończoności ( $\infty$ ).

Zdarzenia grafów niezdatności z zależnościami czasowymi (GNZC) są dwu typów: proste i parametryczne. Proste charakteryzowane są tak samo jak zdarzenia PDNZC, natomiast zdarzenie złożone  $y$  poza czasem jego trwania opisane jest wartością parametru  $p \in P$ , gdzie  $P$  jest zbiorem wartości parametru zdarzenia  $y$  (rys. 2b). Parametr może wyrażać np. identyfikator zdarzenia.



Rys. 2. Zdarzenia: a) proste, b) parametryczne

W GNZC, poza bramkami PDNZC zwanymi prostymi są bramki parametryczne. Bramka parametryczna charakteryzuje się następującą własnością: wszystkie zdarzenia wejściowe i wyjściowe są parametrycznymi z równymi

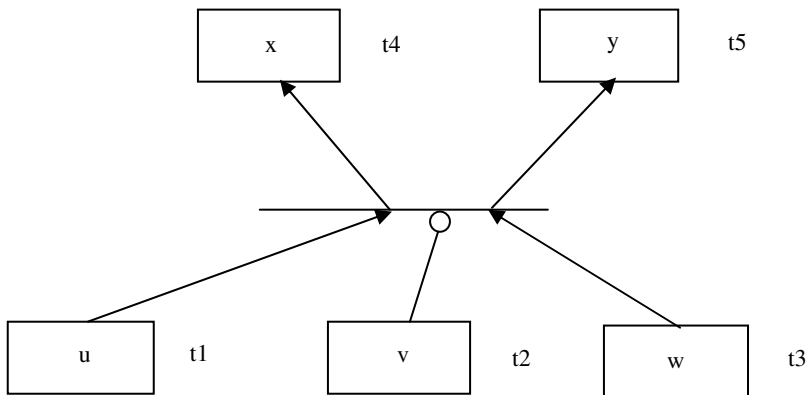
zbiorami wartości parametrów. Reprezentacja graficzna bramki parametrycznej w GNZC jest taka sama jak bramki tego samego typu w PDNZC. Zdarzenie wyjściowe ma tę samą wartość parametru jak jego przyczyny będące zdarzeniami wejściowymi.

Ponadto w porównaniu z PDNZC wprowadzamy bramkę opóźnienia. Bramka ta jest obrazowana symbolem klepsydry w postaci dwu trójkątów połączonych wierzchołkami, np. bramka łącząca poprzez łuki zdarzenia E2 i E4 na rys. 5. Parametr czasowy tej bramki reprezentuje opóźnienie między startem zdarzenia wejściowego a startem zdarzenia wyjściowego.

W GNZC w porównaniu z PDNZC wprowadzone zostają, inspirowane sieciami Petriego, przejścia, które mogą być proste i parametryczne. Przejście proste charakteryzuje się własnością: wszystkie zdarzenia wejściowe i wyjściowe są prostymi.

Rysunek 1d ilustruje różnice między bramkami uogólniającymi i przyczynowymi a przejściami prostymi. Odpalenie przejścia powoduje zakończenie zdarzeń wejściowych i wystąpienie (start) zdarzenia wyjściowego. Przejścia zostały wprowadzone w celu reprezentacji procesów powtarzalnych.

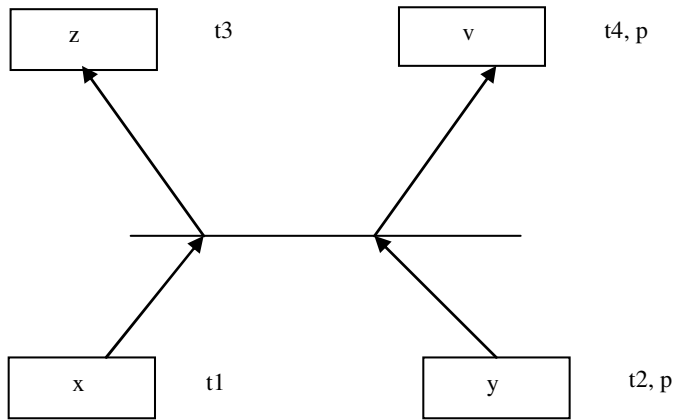
Bardziej skomplikowane przejście proste jest zawarte na rys. 3.



Rys. 3. Przejście proste z trzema zdarzeniami wejściowymi  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , w tym zdarzeniem hamującym  $v$ , zdarzeniami wyjściowymi  $x$ ,  $y$

Przejście to jest incydentne ze zdarzeniem hamującym  $v$  połączonym łukiem zakończonym kółkiem. Aby przejście z rys. 3 mogło być odpalane, muszą trwać zdarzenia wejściowe  $u$ ,  $w$  oraz nie może trwać zdarzenie hamujące  $v$ . Zdarzenie hamujące zostało wprowadzone w celu zwiększenia mocy opisowej.

Przejście parametryczne charakteryzuje się własnością: co najmniej jedno zdarzenie wejściowe lub wyjściowe jest parametryczne.



Rys. 4. Przejście ze zdarzeniami prostymi  $x$ ,  $z$  i zdarzeniami parametrycznymi  $y$ ,  $v$

Podczas odpalania przejścia parametrycznego spełnione musi być ograniczenie: uczestniczące w odpaleniu zdarzenia parametryczne muszą mieć te same wartości parametrów.

W przypadku jednoczesnego spełnienia warunków odpalania przejścia i wystąpienia zdarzeń wejściowych bramki przyczynowej o zerowym czasie opóźnienia – jako pierwsze nastąpi odpalenie przejścia, a dopiero po tym może wystąpić zdarzenie wyjściowe bramki przyczynowej.

### 3. Przykład modelowania systemu transportu MPK Wrocław

Drzewa niezdatności, nawet z użyciem jakichkolwiek dotychczas opracowanych rozszerzeń, nie pozwalają na wyrażenie niezawodności systemu tramwajowego miasta Wrocławia. Opracowanie modelu niezawodnościowego jest możliwe przy pomocy grafów niezdatności z zależnościami czasowymi.

Tramwaje ulegają uszkodzeniu w losowych chwilach czasu. Zepsuty tramwaj poddawany jest naprawie, a na jego miejsce wysyłany jest jeden z kilku wozów zapasowych (rezerwa zimna), jeśli jest dostępny. Czas powrotu uszkodzonego tramwaju na trasę określa się czasem dostawy. Z kolei czas, po którym tramwaj rezerwowy przejmie zadania uszkodzonego, to czas wymiany. Zakładamy, że tramwaje rezerwowe nie ulegają uszkodzeniom. Jeśli ani dostawa, ani wymiana nie wydarzą się w ciągu pewnego ustalonego odcinka (rezerwa czasowa), rozpoczyna się hazard. Zdarzenie to ulega zakończeniu, gdy zajdzie albo wymiana, albo dostawa. Przy analizie niezawodności interesujące parametry to liczba awarii, prawdopodobieństwo hazardu dla jednego uszkodzenia oraz średni czas hazardu.

Graf niezdatności tego systemu przedstawiono na rysunku 5. Model można podzielić na trzy obszary. Pierwszy, obejmujący zdarzenia E1, E2, E3, E4 oraz E5 opisuje awarię systemu technicznego rozumianą jako uszkodzenie tramwaju w trakcie jego kursu. Drugi obszar definiuje hazard, czyli awarię nadsystemu, przy pomocy zdarzeń E10, E11 oraz E12. Ostatni obszar stanowią zdarzenia E6, E7, E8 i E9, E13 i E14 modelujące proces wymiany uszkodzonego tramwaju na inny z puli wozów rezerwowych i włączenie tramwaju naprawionego do ruchu.

Zdarzenia E3 oraz E13 są typu prostego, pozostałe to zdarzenia parametryzowane numerem awarii systemu technicznego. Wszystkie użyte przejścia, oznaczone symbolami T1-T8 na rysunku, są parametryczne.

W chwili początkowej występują zdarzenia: E1, E3 oraz E13. Zdarzenie E3 występuje raz. Zdarzenie E13 występuje tyle razy, ile wozów rezerwowych dostępnych jest w systemie, krotność wystąpienia zdarzenia E1 w chwili początkowej określa liczbę awaryjnych kursów w systemie transportowym i warunkuje czas symulacji. Każdy taki rozróżnialny kurs powoduje kolejne wystąpienie zdarzenia E4 o odpowiednim identyfikatorze. Każde kolejne wystąpienie jest przesunięte względem poprzedniego o czas związany z realizacją zmiennej losowej definiującej kolejne momenty awarii systemu technicznego. Zmienna ta przypisana jest do bramki opóźnienia na wejściu zdarzenia E4 i ma rozkład Weibulla z podanymi parametrami kształtu i skali. Aby zapewnić cykliczność odpalania tej bramy, czyli zapewnić występowanie E4 o kolejnych identyfikatorach, zbudowano cykl w obszarze pierwszym przy pomocy dwóch przejść oraz zdarzeń E2, E3 oraz E4. Przejście T1 kończy zdarzenie E3 i tym samym blokuje zachodzenie kolejnych zdarzeń E2 aż do momentu zajścia zdarzenia E4 i odpalenia przejścia T2 ponownie rozpoczynającego E3.

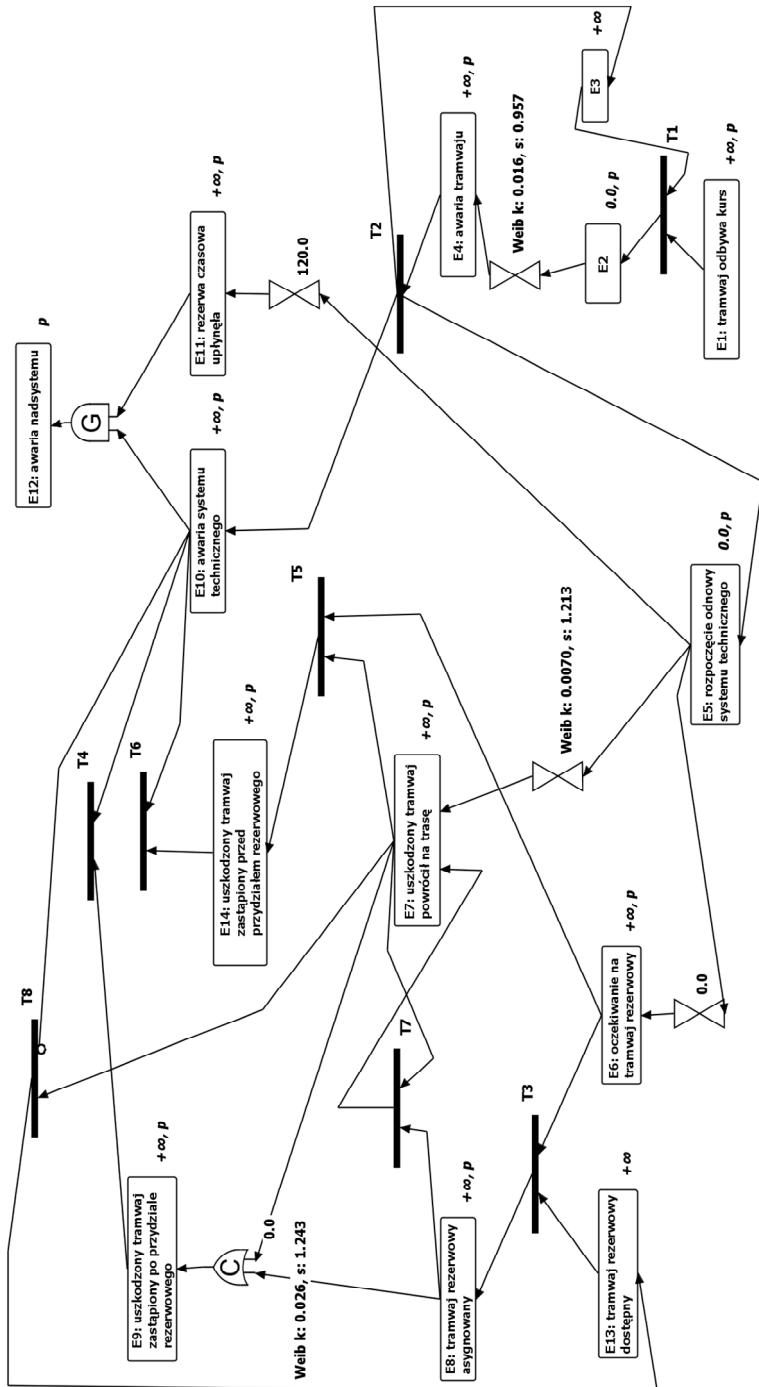
Awaria kolejnego tramwaju rozpoczyna: oczekiwanie na jego wymianę na tramwaj rezerwowy, dostawę, awarię systemu technicznego oraz odmierzenie rezerwy czasowej.

Rozpoczęcie dostawy sygnalizowane jest zajściem zdarzenia E5 na skutek zadziałania przejścia T2. Równocześnie ze zdarzeniem E5 zachodzi E10, ponieważ od tej chwili zaczyna się również awaria systemu technicznego.

Zakończenie rezerwy czasowej (na rys. 5 jest to 120 minut przypisane do bramki opóźnienia) dla uszkodzonego tramwaju sygnalizowane jest zajściem zdarzenia E11. Jeśli awaria systemu zakończy się (czyli: E10 zakończy się) przed upłynięciem rezerwy czasowej, hazard (zdarzenie E12) nie zajdzie. W przeciwnym wypadku czas występowania zdarzenia E12, tj. pozostały do zakończenia awarii systemu technicznego czas, to awaria nadsystemu. Takie zachowanie definiowane jest przez uogólniającą bramkę AND na wejściu E12. Pozostała część modelu zapewnia zakończenie kluczowego zdarzenia E10.

Proces wymiany specyfikowany jest przez cykl w trzecim obszarze. Natychmiast po zajściu zdarzenia E5 zaczyna się oczekiwanie na tramwaj zapasowy (E6). Jeśli jest dostępny, czyli zachodzi jakieś zdarzenie E13, przejście T3





Rys. 5. Graf niezdatności z zależnościami czasowymi dla MPK Wrocław

zakończy oczekiwanie oraz dokona alokacji tramwaju zapasowego, czyli rozpocznie E8. Proces wymiany trwa czas opóźnienia dla zdarzenia E8 lewego wejścia bramki COR. Czas ten jest opisany zmienną losową o rozkładzie Weibulla. Po zajściu wymiany, przejście T4 kończy zdarzenia E9 oraz E10. Ponadto zdarzenie E10 nie blokuje teraz przejścia T8. Gdy zajdzie dostawa, czyli wystąpi E7, alokowany tramwaj rezerwowy zostanie zwrócony do puli przez odpalenie przejścia T8. Opisany w tym paragrafie proces to jedna z możliwości udostępnienia sprawnego tramwaju przed rezerwa czasową lub zakończenia hazardu.

Druga możliwość wynika z wystąpienia dostawy zepsutego tramwaju przed zakończeniem wymiany na tramwaj rezerwowy. Dostawa uszkodzonego tramwaju sygnalizowana jest zajściem zdarzenia E7. W tej sytuacji należy dokonać synchronizacji z procesem wymiany. Są dwa przypadki.

Jeśli nie zaszła alokacja wozu zapasowego (występuje E6, ale nie występuje jeszcze E8), nie należy go zwracać do puli. Na skutek odpalenia przejścia T5 wymiana ulega anulowaniu i rozpoczyna się E14. Następnie odpalenie przejścia T6 kończy E14 i E10. Zakończenie E10 odblokowuje przejście T8, które jednak nie może być odpalone ze względu na brak E7. Prawdopodobnie, nie nastąpi E13, tj. tramwaj rezerwowy nie jest zwracany.

Drugi przypadek występuje, gdy wóz zapasowy został alokowany i jest już w drodze (występuje E8, a nie występuje E6). Po zajściu dostawy należy zwrócić tramwaj zapasowy do puli. Odpalenie przejścia T7 zakończy E8, a drugie wejście bramki COR rozpocznie zdarzenie E9. Przejście T4 zakończy E9 i E10. Tym samym zachodzi E7, ale nie zachodzi E10, a więc tramwaj rezerwowy zostanie oddany do puli, co jest modelowane wystąpieniem E13 po odpaleniu przejścia T8.

## Podsumowanie

Grafy niezdatności z zależnościami czasowymi są pierwszym rozszerzeniem probabilistycznych drzew niezdatności z zależnościami czasowymi pozwalającymi modelować systemy z uszkodzeniami i naprawą, komponentami rezerwowymi i rezerwą czasową. Omówiono działanie rozszerzeń na tle jednego z takich systemów, a mianowicie systemu tramwajowego MPK we Wrocławiu.

## Bibliografia

1. Ajmone Marsa M., Balbo G., Conte G.: A class of generalized stochastic Petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems, *ACM Transactions on Computer Systems*, Vol. 2, May 1984, 93–122.
2. Babczyński T., Łukowicz M., Magott J.: Time coordination of distance protections using probabilistic fault trees with time dependencies, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 3, July 2010, 1402–1409.

3. Bobbio A., Codetta D.: Parametric fault trees with dynamic gates and repair boxes, in: Proc. Annual Symposium on Reliability and Maintainability, 2004, 459–465.
4. Dugan J.B., Bavuso S.J., Boyd M.A.: Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 41, 1992, No 3, 363–367.
5. Fault Tree Analysis (FTA), International Technical Commission, IEC Standard, Publication 1025, 1990. Analiza drzew niezdatności (FTA), PN-IEC 1025, 1994.
6. Górski J.: Extending Safety Analysis Techniques With Formal Semantics, Technology and Assessment of Safety-Critical Systems. (eds.) Redmill F.J. & Anderson T., Springer-Verlag, 1994, 147–163.
7. ISO/IEC 15909-1, High-level Petri nets: Concepts, definitions and graphical notation, 2004.
8. Kowalski M., Magott J., Nowakowski T., Werbińska-Wojciechowska S.: Analysis of transportation system with the use of Petri nets, Analiza systemu transportowego z użyciem sieci Petriego, Eksploatacja i Niezawodność, Maintenance and Reliability, w druku, 2011.
9. Magott J.: Moc opisowa drzew niezdatności z zależnościami czasowymi, Problemy eksploatacji, Maintenance Problems, 4/2009, 33–40.
10. Magott J., Skrobanek P.: Method of time Petri net analysis for analysis of fault trees with time dependencies, IEE Proceedings – Computers and Digital Techniques, vol. 149, No. 6, 2002, pp. 257–271.
11. Montani S., Portinale L., Bobbio A., Codetta-Raiteri D.: RADYBAN: a tool for reliability analysis of dynamic fault trees through conversion into dynamic Bayesian networks, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 93, Issue 7, July 2008, 922–932.
12. Werbińska-Wojciechowska S.: Model logistycznego wsparcia systemu eksploatacji środków transportu, praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wrocław, raport: PRE 3/2008.
13. <http://www.relex.com/resources/art> Artykuły na temat drzew niezdatności firmy Relex.

Recenzent:

**Krzysztof KOŁOWROCKI**

### **Fault graphs with time dependencies**

#### **Key words**

Dynamic fault tree, fault tree with time dependencies, city tram transport system.

## Summary

Fault Graphs with Time Dependencies (FGTDs), having roots in Probabilistic Fault Trees with Time Dependencies (PFTTDs), are defined in the paper. New constructs of FGTDs in comparison with PFTTDs are parametric events, parametric gates, and transitions. The transitions are based on Petri nets. The graphs were employed to model the dependability of a transportation system in which a cold spare tram acts on behalf of a damaged one after replacement time. Once the damaged tram has been repaired, the spare one returns to the pool. A time resource delimits a time interval, in which replacement with a spare tram or delivery of the damaged tram after repair should take place.