

Dominik Duda¹, Zbigniew Gacek¹

PRÓBA MODELOWANIA STRUMIENI USZKODZEŃ I ODNOWIEŃ WYBRANYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH

Streszczenie: W referacie zaproponowano nietypowe zastosowanie sieci Petriego do modelowania strumieni uszkodzeń i odnowień wybranych układów izolacyjnych w sieciach elektroenergetycznych. Zdefiniowano sieć Petriego „w czasie”, rozszerzoną o tzw. miejsca decyzyjne. Taka sieć umożliwia odwzorowanie losowego charakteru procesów uszkodzeń oraz modelowanie strategii obsługi eksploatacyjnej układów izolacyjnych. Pozwala to na analizę wpływu wybranej strategii obsługi na strumień uszkodzeń. Referat zawiera przykładowe modele strategii obsługi eksploatacyjnej wybranych układów izolacyjnych w liniach kablowych.

Słowa kluczowe: strumień zakłóceń, strumień odnowień, sieć Petriego

1. Wstęp

Elektroenergetyczne linie kablowe i napowietrzne można traktować z punktu widzenia niezawodnościowego jako obiekty naprawialne. Założenie to jest słuszne pod warunkiem, że linie rozpatrywane są jako całość, gdyż ich poszczególne elementy (izolatory, mufy, głowice) są często elementami nienaprawialnymi, pracującymi do pierwszego uszkodzenia. Po uszkodzeniu obiektu odnawialnego dokonywana jest jego odnowa, która może mieć różnorodny charakter. Uszkodzony obiekt można wymienić na identyczny nowy, poddać go naprawie, która – w pełni lub częściowo – przywróci jego pierwotne własności. Chwile awarii i czasy przywracania im sprawności technicznej linii napowietrznych lub kablowych tworzą tzw. strumienie uszkodzeń i – odpowiednio – odnowień. Przedział czasu pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami, nazywany czasem poprawnej pracy, jest wielkością losową. Dotyczy to również czasu dokonywania odnowy, który może zostać pominięty wtedy, gdy jest znacznie krótszy od czasu poprawnej pracy obiektu. Strumień uszkodzeń jest wtedy równoważny strumieniowi odnowień. Rzeczywisty strumień uszkodzeń jest wynikiem ujawniających się wad technicznych, powstających wskutek postępujących z upływem czasu procesów starzeniowych oraz prowadzonej obsługi eksploatacyjnej. Celem działań eksploatacyjnych jest zapewnienie odbiorcom ciągłej dostawy energii elektrycznej o odpowiedniej jakości,

¹ Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2,44-100 Gliwice

poprzez wydłużenie czasu poprawnej pracy i skrócenie czasu dokonywania odnowień. Strumienie uszkodzeń i odnowień można zatem traktować jako miernik efektywności zastosowanego rodzaju obsługi eksploatacyjnej.

2. Sieci Petriego

Badanie wielu zjawisk, obiektów i procesów nie jest możliwe do przeprowadzenia w warunkach rzeczywistych. Przyczyną tego mogą być trudności w wykonaniu pomiarów, obserwacji lub zbyt długi czas trwania badań obiektu rzeczywistego. Badania takie należy więc przeprowadzać w sposób pośredni – za pomocą specjalnie skonstruowanych modeli (odwzorowań). Są one reprezentacją istotnych cech, na przykład dynamiki zachowań badanego obiektu. Do modelowania oraz analizy strumieni uszkodzeń i odnowień można wykorzystać tzw. sieci Petriego. Sieci te pozwalają w przejrzysty sposób odwzorować logiczne współzależności między poszczególnymi stanami technicznymi w jakich może znajdować się układ izolacyjny podczas eksploatacji. Ich niewątpliwą zaletą jest możliwość rozszerzenia sieci o tzw. miejsca decyzyjne i modelowanie losowego procesu uszkodzeń. Siecią Petriego nazywa się wyrażenie [2, 4]:

$$N = (A, T, F, K, W, M0, R, t) \quad (1)$$

gdzie: A – zbiór miejsc $A = S \cup D$, gdzie S jest zbiorem miejsc elementarnych w sieci, a D jest zbiorem miejsc decyzyjnych, T – zbiór tranzycji (przejść), F – relacja przepływu $F \subseteq (A \times T) \cup (T \times A)$, K – pojemność miejsc $S \rightarrow N$, przy czym N jest zbiorem liczb całkowitych dodatnich, W – waga łuków $F \rightarrow N \cup \{0\}$, $M0$ – znakowanie początkowe $S \rightarrow N \cup \{0\}$ oraz $M0(s) \leq K(s)$, R – rejestr, t – parametr reprezentujący czas.

Miejsce elementarne (S) oznacza stan, w jakim może znajdować się rozważany obiekt. Graficznie jest ono najczęściej reprezentowane za pomocą okręgu. Jeśli obiekt znajduje się w stanie reprezentowanym przez dane miejsce, to stosuje się znacznik (kropkę) wewnątrz okręgu (Rys. 1a). W przypadku modelowania strumieni uszkodzeń i odnowień miejsce elementarne może oznaczać na przykład stan poprawnej pracy albo odnowę poawaryjną lub profilaktyczną. Warunki określające przejście pomiędzy poszczególnymi stanami stanowią odwzorowanie czasu pozostawania obiektu w danym stanie. Warunki te określane są w tzw. miejscach decyzyjnych (D), przedstawionych graficznie na rysunku 1c. Czas poprawnej pracy lub czas odnowy jest wielkością losową, zatem miejsca decyzyjne muszą umożliwić odwzorowanie losowego charakteru modelowanych zjawisk. Tranzycja (przejście), reprezentowana graficznie jak na rysunku 1b, umożliwia przejście znacznika pomiędzy stanami po spełnieniu warunków:

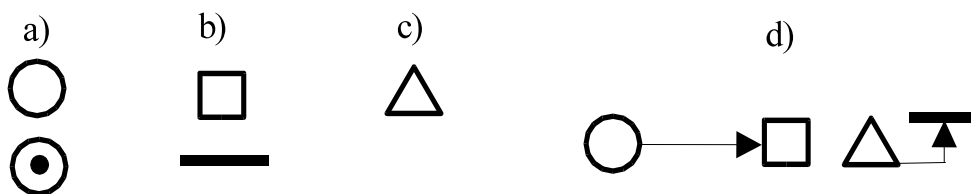
$$(s_i \in I(t_n)) \wedge (M(s_i) \neq 0) \quad (2a)$$

$$\tau \geq \tau_d \text{ gdy } d \in I(t_n) \quad (2b)$$

gdzie: $I(t_n)$ – zbiór miejsc wejściowych przejścia t_n , $M(s_i)$ – znakowanie miejsca s_i , d – miejsce decyzyjne, τ – czas przebywania znacznika w elementarnym miejscu sieci, τ_d – czas wygenerowany w miejscu decyzyjnym d .

Relacja przepływu (F) określa zbiór łuków skierowanych (połączeń pomiędzy miejscami i tranzycjami) i przedstawiana jest jak na rysunku 1d. Dla każdego miejsca w sieci pojem-

ność miejsc (K) określa maksymalną liczbę znaczników, jaką miejsce to może zawierać. Waga (W) ustala krotność łuków skierowanych. Znakowanie początkowe (M0) określa liczbę znaczników w poszczególnych miejscach sieci w chwili rozpoczęcia symulacji. Rejestr (R) jest zbiorem znakowań, które zmieniają się w poszczególnych krokach symulacji. Po zakończeniu symulacji rejestr stanowi rezultat przeprowadzonej symulacji.



Rys. 1. Sposoby znakowania elementów sieci (wg [3]): a) miejsce elementarne, b) tranzycja, c) miejsce decyzyjne, d) łuk skierowany wg [3]

3. Przykład realizacji

Przykład sieci Petriego odwzorowujący strumień uszkodzeń i odnowień, który jest rezultatem działań eksploatacyjnych polegających jedynie na odnowach wymuszonych awarią, przedstawia rysunek 2a. Strategia odnowień wymuszonych nie daje jednak możliwości wpływania na generowany strumień uszkodzeń. Możliwość wpływania na strumień uszkodzeń i odnowień uzyskuje się stosując strategię obsługi zapewniającą możliwość diagnozowania stanu technicznego i dokonywania odnów profilaktycznych w przypadku negatywnych wyników kontroli. Model takiej strategii, przedstawiony na rysunku 2b, jest modelem strategii z odnowami profilaktycznymi i okresową kontrolą obiektu. Taka strategia może znaleźć zastosowanie np. podczas eksploatacji linii kablowych.

W procesie eksploatacji linii kablowej można wyróżnić następujące stany reprezentowane w sieci Petriego przez miejsca (S):

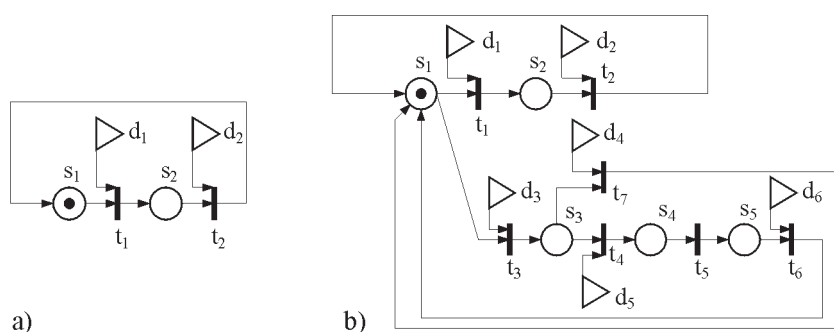
1. praca normalna (s_1),
2. awaria i odnowa poawaryjna (s_2),
3. kontrola diagnostyczna (s_3),
4. negatywny wynik kontroli diagnostycznej (s_4),
5. ustalenie przyczyny negatywnego wyniku kontroli i odnowienie profilaktyczne (s_5).

Miejsca decyzyjne przedstawione w modelach (Rys. 2) określają następujące parametry: czas poprawnej pracy (d_1), czas dokonywania odnowienia (d_2 , d_6), czas pomiędzy kontrolami diagnostycznymi (d_3), wyniki kontroli diagnostycznej (d_4 , d_5). Model przedstawiony na rysunku 3 powstał przy następujących uproszczeniach [1]:

- każda odnowa własności technicznych doprowadza do pełnej sprawności (pomija się konieczność badań poawaryjnych oraz kolejnego odnowienia, gdy wyniki kontroli poawaryjnej są negatywne);
- podczas kontroli profilaktycznej energia jest dostarczana odbiorcom innym torem zasilania, a jej jakość nie zostaje pogorszona;
- pomija się możliwość warunkowej pracy kabla, pomimo negatywnych wyników kontroli profilaktycznej i opóźnienia odnowienia profilaktycznego;

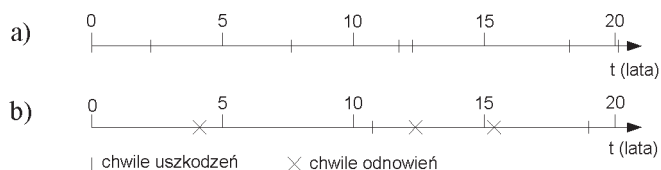
- jedynie stan awaryjny (s_2) jest stanem niekorzystnym (przerwa w dostawie energii i pogorszenie jej jakości);
- kontrola diagnostyczna jest kontrolą nieniszczącą i nie powoduje pogorszenia stanu technicznego badanego obiektu.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji strategii odnowień wymuszonych i strategii odnowień profilaktycznych zamodelowanych za pomocą sieci Petriego można przedstawić przykładowe strumienie uszkodzeń (Rys. 3). Dla uproszczenia pominięto tu czasy dokonywania odnowień. W symulacjach założono wykładniczy rozkład prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy i przyjęto jednakowy parametr λ tego rozkładu. Symulacje przeprowadzono dla 20 letniego okresu eksploatacji.



Rys. 2. Sieć Petriego – a) model strategii odnowień wymuszonych, b) model strategii odnowień profilaktycznych z okresową kontrolą obiektu

Różnice widoczne w przedstawionych strumieniach wynikają z działań poprzedzających awarie wykonywanych w ramach strategii odnowień profilaktycznych. Z rysunku 3 wynika, że zastosowanie odpowiedniego rodzaju strategii ma znaczący wpływ na ilość awarii jakie mogą wystąpić w czasie eksploatacji.

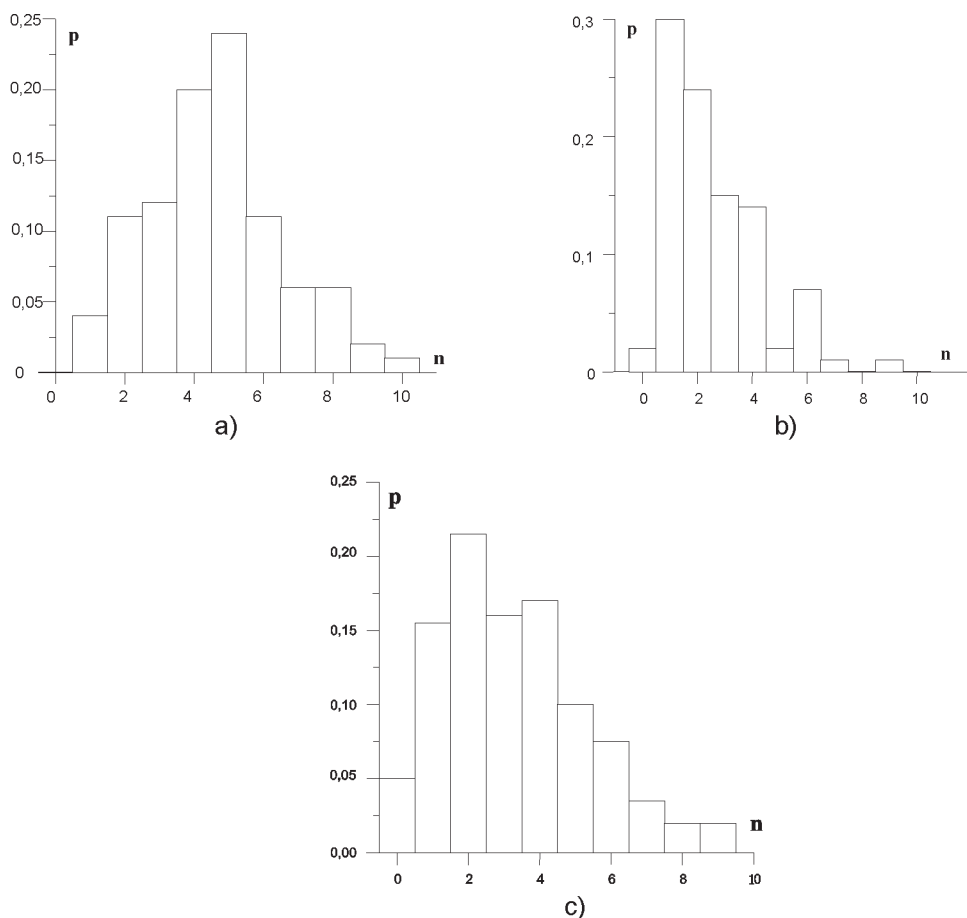


Rys. 3. Ilustracja przykładowych strumieni uszkodzeń będących wynikiem: a) strategii odnowień wymuszonych,

Kolejnym ważnym parametrem wpływającym na ilość awarii jest czas pomiędzy kolejnymi kontrolami diagnostycznymi. Ma on tym większe znaczenie, im szybciej zachodzą procesy degradacyjne prowadzące do awarii. Celem zobrazowania wpływu przedziału czasu pomiędzy kolejnymi kontrolami diagnostycznymi wykonano 200 symulacji za pomocą sieci Petriego, których wyniki przedstawiono w postaci histogramów.

W przypadku braku odnowień profilaktycznych (Rys. 4a) największemu prawdopodobieństwu w założonym okresie i parametrach symulacji odpowiada 5 awarii. Przy zastosowa-

niu okresowych kontroli diagnostycznych i odnowień profilaktycznych (w przypadku negatywnych wyników tych kontroli), liczba awarii zmniejszyła się do poziomu 1-3 awarii (Rys. 4b i c). Skutkiem zwiększenia przedziału czasu pomiędzy kontrolami diagnostycznymi jest wprawdzie pogorszenie jakości przeprowadzanej obsługi, ale mniej prawdopodobne jest wystąpienie takiej samej liczby uszkodzeń jak w przypadku braku działań profilaktycznych.



Rys. 4. Prawdopodobieństwo powstania n uszkodzeń w 20 letnim okresie eksploatacji linii kablowej przy okresowej kontroli obiektu dla $\lambda = 0,0005$ 1/doba: a) brak obsługi profilaktycznej, b) czas pomiędzy kontrolami $T = 500$ dób, c) czas pomiędzy kontrolami $T = 2$ lata

Przedstawione wyniki nie prezentują pełnych możliwości modelowania za pomocą sieci Petriego. Oprócz przedstawionych strumieni uszkodzeń i licznosci awarii w założonym przedziale czasu eksploatacji można modelować m.in.: czasy odnowień poawaryjnych i profilaktycznych (chwile wystąpienia i czasy trwania), liczbę dokonanych kontroli diagnostycznych i liczbę odnowień. Symulację można zaplanować i opracować tak, aby w każdej chwili można było zmienić rozkład prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy, celem odwzorowania procesu starzeniowego charakteryzującego się m.in. rosnącą w funkcją

intensywności uszkodzeń. Ponadto za pomocą sieci Petriego można modelować procesy eksploatacji zachodzące równolegle na wzajemnie rezerwujących się liniach kablowych.

4. Podsumowanie

- Ze względu na brak możliwości przeprowadzania eksperymentalnych czynności obsługowych na rzeczywistych obiektach elektroenergetycznych (m.in. liniach kablowych i napowietrznych) oraz zbyt długi czas trwania takich badań, konieczne i celowe jest stworzenie modeli do badań symulacyjnych.
- Narzędziem przydatnym do modelowania strategii obsługi eksploatacyjnych jest tzw. sieć Petriego, rozszerzona o miejsca decyzyjne i pozwalająca na modelowanie procesów o charakterze losowym.
- Przedstawione przykłady sieci Petriego, odwzorowujące strategie obsługi eksploatacyjnej, umożliwiają ukazanie wpływu kontroli i odnowień profilaktycznych na czas bezawaryjnej pracy linii kablowej. Jak należało oczekiwać, czas pomiędzy kolejnymi kontrolami diagnostycznymi ma istotny wpływ na strumień uszkodzeń powstający podczas eksploatacji linii kablowych.

Literatura

- [1] **Duda D.**: *Modelowanie strategii obsługi eksploatacyjnej elementów sieci elektroenergetycznej*. II Ogólnopolskie Warsztaty Doktoranckie OWD'2000, Istebna-Zaolzie 2000, ss. 215-218.
- [2] **Starke P.**: *Sieci Petri*. Warszawa PWN 1987.
- [3] **Stępień J.C., Stobiecki A., Blank S., Filipiak S.**: *Wykorzystanie sieci Petriego do analizy niezawodnościowej elementów systemu elektroenergetycznego*. V Konferencja Naukowo-Techniczna „Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice ZKwE'2000”, Poznań/Kiekrz 2000, ss. 211-214.
- [4] **Suraj Z., Komarek B.**: *GRAF – system graficznej konstrukcji i analizy sieci Petriego*. Akademia Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1994.

ATTEMPT OF MODELLING OF FAILURE AND RENEWAL STREAMS RELATED TO CHOSEN INSULATING SYSTEMS

Nontypical application of Petri net for modelling of failure and renewal streams of chosen insulating systems in power networks has been proposed. Petri net defined “in time” and extended to the so called decision places, makes possibility for the random character of failure processes and maintenance strategies during operation of insulating systems. That enables to analyse how a selected strategy influences a failure stream. Example models of maintenance services relative to chosen insulating systems of power cable lines are presented.