



Szczepan MOSKWA, Romuald WŁODEK

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Katedra Elektroenergetyki

Zastosowanie procesów losowych Markowa w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych

Streszczenie. Diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych narażonych na działanie różnych czynników o charakterze losowym może zostać rozszerzona o analizę matematyczną otrzymanych danych. Referat przedstawia możliwości zastosowania teorii procesów losowych Markowa w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych w postaci modeli matematycznych będących podstawą symulacji dyspozycyjności urządzenia w czasie.

Abstract. (Application of Markov random processes in diagnostics of electrical power devices). Diagnostics of electrical power devices exposed to different random factors can be expanded in mathematical analysis of collected data. The paper presents possibilities of Markov random processes application in diagnostics. The mathematical models are a basis for simulation of devices availability in the course of time.

Słowa kluczowe: awaryjność urządzeń elektroenergetycznych, diagnostyka, proces Markowa.

Keywords: failure frequency of power electric devices, diagnostic, Markov process.

Wstęp

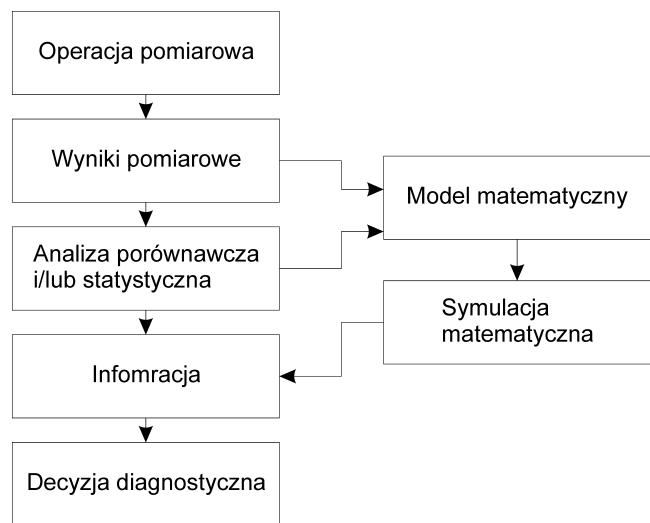
Działania diagnostyczne podejmowane w trakcie eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych mają na celu określenie aktualnego stanu urządzenia ze względu na możliwość wykonywania stawianych mu zadań. Ocenę stanu technicznego badanego urządzenia oraz decyzję o jego dalszej eksploatacji podejmuje się na podstawie danych pomiarowych z badań okresowych danego urządzenia elektroenergetycznego. Ze względu na specyfikę pracy tych urządzeń w dużej mierze są to badania określające właściwości elektryczne takie jak np. rezystancja izolacji, współczynnik strat dielektrycznych, poziom i intensywność wyładowań niepełnych, czy ciągłość torów prądowych. Oczywiście oględziny obejmują też ocenę mechanicznych uszkodzeń konstrukcji, uszkodzeń termicznych itp. Wszelkie zmiany fizyczne, jakim podlegają urządzenia wynikają z działania czasu – starzenie; i użytkowania urządzeń – zużycie; jak również narażeń losowych działających na urządzenia, np. przepięcia, czynniki atmosferyczne, uszkodzenia mechaniczne, działanie ludzi i zwierząt.

W związku z powyższym ocena możliwości pracy badanego urządzenia, w zakładanym okresie czasu jest bardzo subiektywna i oparta na przyjętych założeniach, na przykład stabilne warunki pracy, dające się przewidzieć obciążenie itp. Wszelkie wymienione elementy wpływające na pracę urządzenia jak również sam proces jego eksploatacji, posiadają charakter stochastyczny lub nawet losowy. W związku z powyższym zastosowanie teorii procesów losowych Markowa w analizie diagnostycznej daje możliwość lepszej oceny zdolności urządzenia oraz podjęcia działań prewencyjnych w celu uniknięcia awarii.

Proces oceny zdolności urządzenia

W budowie układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia stosowane są różnego rodzaju materiały dielektryczne stałe, ciekłe i gazowe oraz ich układy, co skutkuje wieloma różnymi, często skomplikowanymi, procedurami diagnostycznymi. Często same wyniki przeprowadzonych testów i badań nie dają w sposób bezpośredni i jednoznaczny odpowiedzi o stanie badanego układu izolacyjnego [1]. Wówczas o właściwej ocenie stanu technicznego badanego układu izolacyjnego decyduje algorytm przetwarzania otrzymanych danych oraz ich analiz. Dzięki technikom komputerowym można

w procesie diagnostycznym zastosować symulację matematyczną opartą na modelach urządzeń i ich pracy. W zależności od celu można stosować wiele różnych modeli. Wykorzystanie takiego procesu diagnostycznego może w znaczący sposób wpłynąć na poprawę jakości zasilania, bez zwiększania kosztów z tym związanych.



Rys.1. Schemat procedury diagnostycznej.

Model matematyczny wykorzystywany w analizie zdolności urządzenia i oceny prawdopodobieństwa jego ewentualnego uszkodzenia, może być oparty na teorii procesów losowych Markowa. W modelu takim można symulować oddziaływanie narażeń o charakterze losowym.

Na układ izolacyjny oddziałują oprócz narażeń o charakterze czysto elektrycznym, tj. natężenie pola elektrycznego, wyładowań zupełnych i niepełnych, przepięć oraz przetężeń prądowych - również narażenia mechaniczne wywołane przez sam charakter pracy urządzenia bądź układu izolacyjnego. Dodatkowo można wyróżnić statyczne narażenia mechaniczne, które są wynikiem samego ciężaru układu izolacyjnego lub też innych elementów konstrukcyjnych oddziaływujących na układ. Oczywiście pod uwagę należy brać również narażenia środowiskowe, które stanowią podstawę zewnętrznych warunków pracy układów izolacyjnych.

Wszelkiego rodzaju zmiany pogodowe wynikające z naturalnych cykli pór roku występujących na danym terenie, dni burzowe, a więc zwiększona możliwość wystąpienia wyładowań atmosferycznych piorunowych, średnie temperatury roczne i dobowe, opady śniegu i deszczu, itp. - wszystkie te elementy mają wpływ na pracę układu izolacyjnego i powinny być uwzględniane przy diagnostyce urządzeń, zwłaszcza w fazie opracowywania wyników pomiarowych jak również ich zbierania. Uwzględnienie tego jednak w sposób jakościowy i ilościowy jest często niemożliwe lub mało dokładne. Dlatego też wraz z gromadzeniem danych pomiarowych należy w miarę możliwości gromadzić informacje o czynnikach mogących wpływać na stan badanego układu.

Zgromadzone wyniki pomiarowe i dane dotyczące narażeń działających na układ izolacyjny pozwolą na predykcję pracy układu oraz estymację prawdopodobieństwa awarii [2].

W celu wyznaczenia powyższych wartości należy przyjąć pewne poziomy prawdopodobieństw awarii i/lub niezawodności, które będą określać poziomy krytyczne, jak również poszczególne stany układu. Dane takie można uzyskać poprzez analizę statystyczną awaryjności urządzenia. W referacie przedstawiono możliwości zastosowania teorii procesów losowych Markowa do oceny dyspozycyjności urządzenia na przykładzie linii kablowej SN.

Proces Markowa jako model matematyczny procesu uszkodzeń i napraw

Jako podstawę modelu matematycznego opisującego proces uszkodzenia i odnowy urządzenia elektroenergetycznego, przyjęto dyskretny proces Markowa $\{X_t, t \in T\}$. Rozpatrywany układ, może przyjmować jeden z dowolnych stanów S_0, S_1, \dots, S_n , zgodnie z funkcją losową X_t przyjmującą wartości i, j jeżeli w chwili t układ znajduje się w stanie S_i . Proces ten musi spełniać warunek Markowa [3]:

$$(1) \quad P(X_t = j | X_{t_1} = i_1, X_{t_2} = i_2, \dots, X_{t_n} = i_n, X_s = i) = P(X_t = j | X_s = i)$$

dla dowolnego ciągu chwil: $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n < s < t$ ($t_1, t_2, \dots, t_n \in T$) i dowolnych liczb rzeczywistych $i, j, i_1, i_2, \dots, i_n$.

Z warunku tego wynika, iż proces Markowa jest procesem „bez pamięci” i prawdopodobieństwo przejścia w danym kroku zależy tylko od stanu aktualnego, a nie od wcześniejszej realizacji procesu.

$$(2) \quad p_{i,j}(s,t) = P(X_t = j | X_s = i), \quad 0 \leq s < t$$

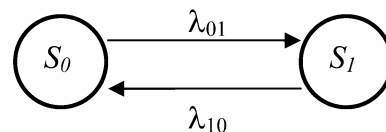
Ponadto warunkowy rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej X_t łącznie z rozkładem zmiennej losowej X_s , pozwalają na wyznaczenie rozkładu zmiennej losowej X_t , pod warunkiem, że zmienna losowa X_s ($s < t$) przyjmie wybrane wartości. Ponieważ procesy Markowa są procesami o przyrostach niezależnych, zatem do ich opisu i analizy wystarczą dwuwymiarowe rozkłady zmiennych. Model matematyczny procesu uszkodzeń i odnowy zbudowany na podstawie powyższych założeń sprowadza się zatem do wyznaczenia odpowiednich układów równań opisujących przejście obiektu pomiędzy możliwymi stanami technicznymi w czasie.

Najprostszy przykład obejmuje układ, gdzie badane urządzenie może się znaleźć tylko w dwóch stanach – S_0, S_1 . Odpowiednio stan S_0 oznacza zdadność urządzenia, a S_1 jego uszkodzenie. Graf przejść pomiędzy tymi stanami został przedstawiony na rysunku 2.

Intensywność przejść pomiędzy stanami jest określana poprzez funkcję (3).

$$(3) \quad \lambda_{ij}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} p_{ij}(t, t + \Delta t), \quad i, j = 0, 1$$

dla $i \neq j$.



Rys.2. Graf przejść dwustanowego dyskretnego procesu Markowa.

Dla regularnego (to znaczy istnieje granica (3)) procesu Markowa można prawdopodobieństwa przejścia pomiędzy stanami w czasie t wyznaczyć z retrospektywnych równań Kołmogorowa [4] mających postać układu równań różniczkowych.

$$(4) \quad \mathbf{P}'(t) = \Lambda \cdot \mathbf{P}(t)$$

Wektor \mathbf{P} reprezentuje prawdopodobieństwa znalezienia się procesu w danym stanie i ma postać:

$$(5) \quad \mathbf{P}(t) = [P_0(t) \ P_1(t)]$$

Natomiast Λ jest macierzą intensywności przejść o postaci:

$$(6) \quad \Lambda = \begin{bmatrix} -\lambda_{01} & \lambda_{10} \\ \lambda_{01} & -\lambda_{10} \end{bmatrix}$$

W związku z powyższym ostatecznie model matematyczny dla rozpatrywanego przypadku jest następujący (7):

$$(7) \quad \begin{cases} p_0'(t) = -\lambda_{01}p_0 + \lambda_{10}p_1 \\ p_1'(t) = \lambda_{01}p_0 - \lambda_{10}p_1 \end{cases}$$

Rozwiązaniem układu równań różniczkowych (7) są równania liniowe w funkcji czasu:

$$(8) \quad p_0(t) = \frac{\lambda_{10}}{\lambda_{01} + \lambda_{10}} + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01} + \lambda_{10}} \cdot e^{-(\lambda_{01} + \lambda_{10})t}$$

$$(9) \quad p_1(t) = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01} + \lambda_{10}} (1 - e^{-(\lambda_{01} + \lambda_{10})t})$$

Na podstawie przedstawionych wyliczeń przeprowadzono symulację dla sieci kablowej SN.

$$(10) \quad w_{a100} = \frac{i_r}{l_{calk}} \cdot 100 \left[\frac{1}{100km} \right]$$

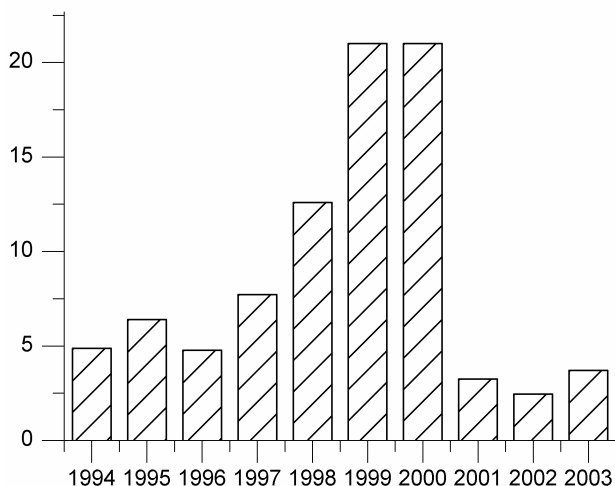
w_{a100} – wskaźnik awarii na rok

i_r – liczba awarii w roku

l_{calk} – długość całkowita linii [km]

Wskaźniki awaryjności wyznaczone według (10) dla tej sieci kablowej w latach 1994–2003 przedstawiono na rysunku 3. Średnia wartość dla badanego okresu wynosi $E(w_{a100}) = 8,78$ awarii na rok/100km. Dla uproszczenia

pominięto okresowość awarii. Przedstawiane obliczenia są tylko przykładowe, celem zobrazowania proponowanych rozwiązań.



Rys.3. Wskaźniki awaryjności linii kablowej SN.

Przyjmując wartość średnią wskaźnika awaryjności jako podstawę symulacji założono, iż intensywność przejść ze stanu zdatności do stanu uszkodzenia wynosi $\lambda_{01} = 0,02405$ dzień⁻¹.

Tradycyjna funkcja niezawodności (ang. reliability) dla badanego urządzenia, nieuwzględniająca procesu odnowy, jest następująca:

$$(11) \quad R(t) = \exp^{-\lambda_{01}t}$$

Model matematyczny przedstawiony powyżej (4),(8),(9) uwzględnia również możliwość odnowy urządzenia. W związku z powyższym prawdopodobieństwo przebywania w stanie S_0 może być traktowane jako dyspozycyjność (ang. *availability*) urządzenia.

$$(12) \quad A(t) = \frac{\lambda_{10}}{\lambda_{01} + \lambda_{10}} + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01} + \lambda_{10}} \cdot e^{-(\lambda_{01} + \lambda_{10})t}$$

Intensywność przejść pomiędzy stanem uszkodzenia S_1 a stanem zdatności S_0 jest wynikiem czasu naprawy/obsługi urządzenia. Przyjęto czas naprawy wg [5] jako zmienną o rozkładzie logarytmiczno normalnym:

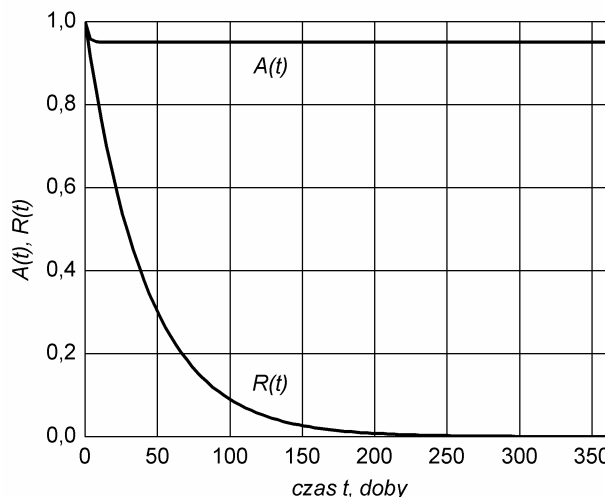
$$(13) \quad f(t_a) = \frac{1}{\sqrt{2t_a}\sigma} \exp\left(-\left[\frac{(\log t_a - \mu)}{2\sigma^2}\right]^2\right)$$

gdzie:

σ - parametr kształtu, μ - parametr skali.

Wartość oczekiwana czasu odnowy dla tego rozkładu wynosi $E(t_a) = 11,07$ h. W związku z powyższym intensywność odnowy przyjęto jako $\lambda_{10} = 0,46125$ dzień⁻¹.

Porównanie wskaźników $R(t)$ oraz $A(t)$ dla okresu 1 roku oraz przyjęte założenia, iż wyjściowym stanem był stan S_0 , zostało przedstawione na rysunku 4. Dzięki znajomości poziomu dyspozycyjności można przyjąć odpowiednią strategię dotyczącą jego eksploatacji poprzez szukanie rozwiązań ograniczających możliwość wystąpienia uszkodzenia lub też zwiększenia intensywności odnowy.

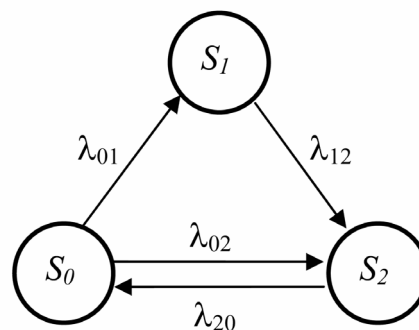


Rys.4. Funkcja niezawodności i dyspozycyjność dla modelu dwustanowego linii kablowej.

Proponowana teoria procesów losowych Markowa oprócz takiego podejścia dwustanowego pozwala na stworzenie modelu uwzględniającego stany pośrednie pomiędzy stanem zdatności i uszkodzenia.

Model trójstanowy

Stany pośrednie modelu mogą odpowiadać częściowym stanom degradacji układu izolacyjnego badanego urządzenia elektroenergetycznego, określanych na podstawie otrzymanych danych pomiarowych. Graf realizacji modelu trójstanowego został przedstawiony poniżej na rysunku 5. Stan S_1 w tym przypadku jest stanem częściowej zdatności, a stan S_2 stanem uszkodzenia.



Rys.5. Graf przejść trójstanowego modelu.

Dla tego przykładu, analogicznie do (4)-(6) układamy, układ równań z macierzą intensywności przejść Λ (14).

$$(14) \quad \Lambda = \begin{bmatrix} -\lambda_{01} - \lambda_{02} & 0 & \lambda_{20} \\ \lambda_{01} & -\lambda_{12} & 0 \\ \lambda_{02} & \lambda_{12} & -\lambda_{20} \end{bmatrix}$$

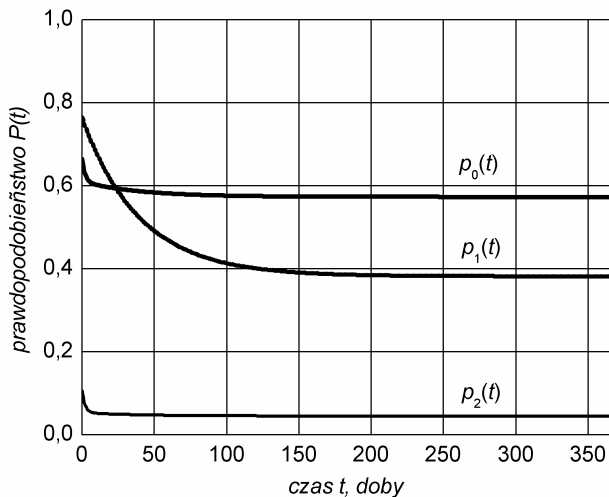
Rozwiązania otrzymanego układu równań, w postaci funkcji prawdopodobieństw przebywania w jednym ze stanów są bardzo rozbudowane. Dla uproszczenia poniżej zostały podane funkcje prawdopodobieństw dla danych wartości intensywności przejść:

$$\begin{aligned}
 p_0(t) &= 0,573 + 0,054e^{-0,475t} + 0,037e^{-0,025t} \\
 (15) \quad p_1(t) &= 0,382 + 0,001e^{-0,475t} + 0,381e^{-0,025t} \\
 p_2(t) &= 0,045 + 0,053e^{-0,475t} + 0,008e^{-0,025t}
 \end{aligned}$$

dla:

$$\begin{aligned}
 \lambda_{01} &= 0,01 \\
 \lambda_{02} &= 0,025 \\
 \lambda_{12} &= 0,015 \\
 \lambda_{20} &= 0,45
 \end{aligned}$$

Przyjęte wartości są czysto teoretyczne, częściowo wzorowane na poprzednich danych. Przebiegi funkcji prawdopodobieństw przedstawia rysunek 5.



Rys.5. Przebiegi funkcji prawdopodobieństwa w czasie, dla modelu trójstanowego.

Dla przyjętych danych wyniki symulacji wskazują, iż pełna dyspozycyjność, czyli przebywanie w stanie S_0 jest ustalona na poziomie 0,58. Natomiast częściowa dyspozycyjność odpowiadająca przebywaniu w stanie S_1 jest już na poziomie 0,39. Dzięki wynikom symulacji można określić czas, w trakcie którego urządzenie może ulec

częściowemu uszkodzeniu i dokonać jego naprawy przed całkowitym uszkodzeniem.

Podsumowanie

Wykorzystanie podczas diagnostyki urządzenia elektroenergetycznego przedstawionych modeli może przyczynić się do lepszego planowania eksploatacji urządzeń poprzez planowanie wymiany elementów, stanowiących potencjalne ryzyko uszkodzenia oraz wyznaczenie optymalnego czasu pracy przy usuwaniu uszkodzenia.

Przedstawione modele mogą w skuteczny sposób wspomagać proces decyzyjny dotyczący eksploatacji.

Analiza narażeń i ich ocena statystyczna mogą służyć do opracowania wiarygodnych danych wejściowych intensywności przejść. Znalezienie zależności funkcyjnych pomiędzy narażeniami i ich skutkami może stanowić podstawę dalszych prac w tym zakresie.

Podziękowania

Praca była sponsorowana przez Komitet Badań Naukowych umowa AGH nr: 18.18.120.398

LITERATURA

- [1] Włodek R., Moskwa Sz., *Model procedury diagnostycznej w eksploatacji urządzeń WN*, Przegląd Elektrotechniczny Konferencje, 1 (2003), nr 1, 228-231
- [2] Włodek R., Moskwa Sz. *Application of stochastic processes theory to diagnostic of high voltage devices*, 6th International Scientific Conference ELECTRIC POWER ENGINEERING 2003, (2003),
- [3] Pukite P., Pukite J., *Modeling for Reliability Analysis: Markov Modeling for Reliability, Maintainability, Safety, and Supportability*, Wiley-IEEE Press, (1998)
- [4] Davis M.H.A., *Markov Models and Optimization*, Chapman & Hall, (1993)
- [5] Kowalski Z., Stępień J. C., *Ocena skutków awarii linii kablowych 15kV*, APE'03, (2003), 245-250

Autorzy: prof. dr hab. inż. Romuald Włodek, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. A. Mickiewicza 30/B1, 30-059 Kraków, E-mail: gewlodek@cyf-kr.edu.pl; mgr inż. Szczepan Moskwa Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. A. Mickiewicza 30/B1, 30-059 Kraków, E-mail: szczepan@agh.edu.pl