

Interwałowe oszacowania wskaźników niezawodności strukturalnej systemów elektroenergetycznych

Streszczenie. Otrzymano interwałowe oszacowania wypadkowych wskaźników niezawodności strukturalnej systemów elektroenergetycznych na podstawie rozwiązań układów równań liniowych na krańcach interwałów danych początkowych. Uwzględniono interwałowe wartości udziałów stanów awaryjnych w wypadkowych wskaźnikach niezawodności dla testowych wartości danych początkowych.

Abstract. Generation of interval estimations of resultant indices of electric power systems' structural reliability on the basis of solutions of linear equations systems on border intervals of initial data is considered. Interval values for the contribution of the failure states of the resulting reliability for the test values of the original data are given. (**Interval estimations for structural reliability indices of electric power systems**).

Słowa kluczowe: analiza interwałowa (przedziałowa), niezawodność strukturalna, model Markowa, twierdzenie Becka-Nikela.

Keywords: interval analysis, structural reliability, Markov model, Beck-Nickel theorem.

doi:10.12915/pe.2014.06.49

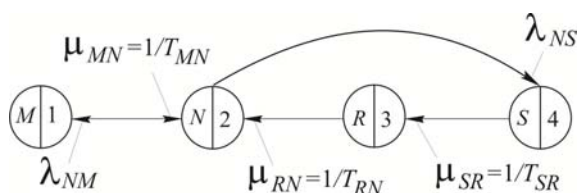
Wstęp

Obecnie rozwijane są metody otrzymywania interwałowych oszacowań wypadkowych wskaźników niezawodności systemów złożonych przy interwałowym zadaniu wskaźników niezawodności elementów [1]. Podejścia takie pozwalają na uwzględnienie wpływu nieokreśloności danych początkowych (zależnych od czynników obiektywnych i subiektywnych) oraz błędów formalnych modeli matematycznych.

Podstawowym podejściem otrzymywania oszacowań interwałowych staje się metoda Monte-Carlo (modelowania statystycznego) [2]. Jednak przy ustalonych warunkach (twierdzenie Becka-Nikela [3, str. 241, twierdzenie 5.3.4]) podobne oszacowania mogą być otrzymywane przy znacznie mniejszej liczbie prób. W artykule badane są oszacowania interwałowych prawdopodobieństw stanów funkcjonowania jednego, dwóch i trzech elementów systemu elektroenergetycznego rozważane z punktu widzenia niezawodności i otrzymywane przez wybór granicznych wartości interwałów danych początkowych.

Interwałowe oszacowania wskaźników niezawodności

Każdy element $I \in L$ systemu elektroenergetycznego (w zastosowaniu do elektroenergetyki to transformator, wyłącznik itd.) może znajdować się w jednym z czterech stanów. Przyjmujemy założenie, że $I_N = I_2$ – stan normalnej pracy elementu, $I_S = I_4$ – stan między uszkodzeniem elementu i zakończeniem przełączeń operacyjnych, $I_R = I_3$ – stan awaryjnego remontu elementu, $I_M = I_1$ – stan remontu zapobiegawczego (zamierzonego odłączenia) elementu. Stany M, R, S , będziemy uznawać za stany uszkodzenia elementu (w tym sensie, że dowolny stan elementu, z wyjątkiem stanu N , charakteryzuje się obniżeniem zdolności do pracy tego elementu lub zmniejszeniem liczby funkcji, które jest zdolny wykonywać ten element). Model Markowa funkcjonowania jednego elementu I z odpowiednimi intensywnościami przejścia "lambda" i "my" między stanami przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Model Markowa jednego elementu I

Wprowadzone prawdopodobieństwa stanów ze znanymi ograniczeniami spełniają układ interwałowych równań algebraicznych liniowych

$$(1) \quad \begin{cases} P_{1 \times n} [A_{n \times n}^T] = O_{1 \times n} \\ ([A_{n \times n}] P_{n \times 1} = O_{n \times 1}), \\ P_{1 \times n} I_{n \times 1} = 1, \end{cases}$$

gdzie: n – liczba rozpatrywanych stanów; $P=(p_i)$ – wektor, którego i -m członem jest p_i , tj. stacjonarne prawdopodobieństwo znalezienia się w i -m stanie; O – wektor zerowy; $[A_{n \times n}]$ – interwałowa macierz intensywności przejść; $[A_{n \times n}]=(a_{ij})$ – macierz transponowana interwałowa intensywności przejść, której elementy (liczby interwałowe)

$$(2) \quad \begin{cases} [a_{ij}] = [\lambda_{ij}], \quad i \neq j, \\ [a_{ii}] = -\sum_{j \neq i} [\lambda_{ij}], \end{cases}$$

wyraża się przez intensywności przejść od stanu i w stan j

$$(3) \quad \begin{aligned} [\lambda_{ij}] &= [\lambda_{ij, \min}; \lambda_{ij, \max}] = \\ &= [\lambda_{ij}^c (1 - \varepsilon); \lambda_{ij}^c (1 + \varepsilon)], \\ \lambda_{ij}^c &= (\lambda_{ij, \min} + \lambda_{ij, \max}) / 2. \end{aligned}$$

We wzorach (1)–(3) dla wskazania liczb interwałowych wykorzystano nawiasy kwadratowe.

Elementy macierzy interwałowej $[A]$ są zależne na skutek wzorów (2). Odpowiednio układ (1) przedstawia interwałowy układ równań liniowych z powiązаныmi parametrami [3].

Dokładny opis zbioru rozwiązań interwałowego układu równań jest zbyt trudny, tak że zwykle ograniczamy się do znajdowania tych lub innych jego oszacowań. Przy tym największą wartość posiada interwałowe oszacowania zbioru rozwiązań $\Xi([A])$ układu równań (1), tj. uzyskanie wektora interwałowego $[P]=[p_i]$, zawierającego $\Xi([A])$ [3]. Wskazany wymóg opisuje się warunkiem $\forall X \in \Xi([A]) \Rightarrow X \in [P]$.

Zadanie oszacowania niezawodności systemu elektroenergetycznego metodą przestrzeni stanów (procesów Markowa) [4, 5] polega na określeniu asymptotycznych interwałowych wartości wskaźników niezawodności:

1. Prawdopodobieństwo stanu uszkodzenia systemu P_F

$$(4) \quad [P_F] = \sum_{\omega \in \Omega_F} [P_\omega],$$

gdzie P_ω – prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanie ω , Ω_F – podzbiór stanów uszkodzenia systemu.

2. Średni parametr strumienia (intensywność) uszkodzeń systemu f_F (częstotliwość powstania stanu uszkodzenia systemu)

$$(5) \quad [f_F] = \sum_{\omega \in \Omega_F} [f_\omega] = \sum_{\omega \in \Omega_F} [P_\omega] \left(\sum_{v \in \Omega_W} [f_{\omega v}] \right),$$

gdzie f_ω – intensywność przejścia systemu w stan ω , $f_{\omega v}$ – intensywność przejść systemu ze stanu ω w stan v , Ω_W – podzbiór stanów pracy systemu.

3. Średni czas trwania stanu awaryjnego systemu T_F

$$(6) \quad [T_F] = \frac{[P_F]}{[f_F]},$$

który jest równy średniemu czasowi przebywania systemu w stanie awaryjnym Ω_F .

4. Średni czas pracy bezawaryjnej systemu T_W

$$(7) \quad [T_W] = \frac{1 - [P_F]}{[f_F]},$$

który jest równy wartości średniej czasu przebywania systemu w stanie pracy Ω_W .

Stan ω , będący stanem uszkodzenia systemu, nazywa się stanem minimalnym (MC-stanem, minimal-cut failure state) [4, 6], jeśli dowolne wyjście ze stanu ω drogą awaryjnego lub profilaktycznego remontu bądź przełączeń przywraca system do stanu pracy poprawnej. Przy praktycznych obliczeniach niezawodności wygodnym okazuje się rozpatrzenie tylko podzbioru stanów minimalnych, odpowiadającego jednoczesnym uszkodzeniom 1, 2 i 3 elementów. Odpowiada to rozpatrzeniu modelu funkcjonowania jednego, dwóch i trzech elementów.

Model funkcjonowania 2 i 3 elementów buduje się na podstawie modelu jednoelementowego. Stan systemu określają stany każdego z elementów systemu. Zabronione są stany z podwójnymi i potrójnymi profilaktycznymi remontami zapobiegawczymi (zamierzonymi odłączeniami) elementów. Przy kilku uszkodzonych elementach (stany elementów S, R, M) w systemie możliwe są przejścia każdego uszkodzonego elementu systemu ze stanu «cięższego uszkodzenia» w stan «mniej ciężkiego uszkodzenia», tj. dozwolone są przejścia $S \rightarrow R$, $R \rightarrow N$, $M \rightarrow N$. Nie ma priorytetów obsługi uszkodzonych elementów systemu w różnych stanach uszkodzenia. Zapobiegawcza naprawa elementu systemu nie może być rozpoczęta, jeżeli w systemie są uszkodzenia lub też prowadzi się naprawy innych elementów systemu, tak że wyłączenie rozpatrywanego elementu prowadzi do uszkodzenia systemu. Macierz intensywności dla modeli jednego elementu występuje w [7], dwóch elementów – w [8], trzech elementów – w [9, 10].

Twierdzenie Becka-Nikela dla modeli funkcjonowania jednego elementu

Układ równań, opisujący funkcjonowanie jednego elementu, spełnia twierdzenie Becka-Nikela.

Twierdzenie (Becka-Nikela dla układu równań interwałowych liniowych, opisujących funkcjonowanie jednego elementu). Dla układu (1) liniowych interwałowych algebraicznych równań, opisujących funkcjonowanie jednego elementu, ściśle oszacowanie współrzędnych zbioru rozwiązań $\Xi([A])$ otrzymuje się z rozwiązania układów równań

$$(8) \quad A_1 P = B,$$

gdzie macierz A_1 utworzona na podstawie końców interwałów danych wejściowych $[\lambda_{NS}]$, $[\lambda_{NM}]$, $[T_{SR}]$, $[T_{RN}]$, $[T_{MN}]$ tego elementu.

Pozwala to poprzez przegląd $2^5=32$ przypadków uzyskać ściśle interwałowe oszacowania prawdopodobieństw stanów.

Testowe dane numeryczne dotyczące wskaźników niezawodności elementów I, K, O są wzięte z [6]. Założono nieokreśloność wskaźników niezawodności w wysokości 10% (tabela 1) (parametr $\varepsilon=0,1$ w (3)).

Tabela 1. Wartości testowe interwałowych wskaźników niezawodności elementów systemu elektroenergetycznego

Element	$[\lambda_{NS}]$	$[T_{SR}]$	$[T_{RN}]$	$[\lambda_{NM}]$	$[T_{MN}]$
	[1/rok]	[godz]	[godz]	[1/rok]	[godz]
I	[0,009;0,011]	[1,8;2,2]	[10,251;12,529]	[1,98;2,42]	[7,164;8,756]
K	[0,036;0,044]	[1,8;2,2]	[1,971;2,409]	[0,9;1,1]	[6,3;7,7]
O	[0,018;0,022]	[1,8;2,2]	[197,1;240,9]	[5,67;6,93]	[10,638;13,002]

Znajdowanie współrzędnych minimów i maksimów $2^5=32$ rozwiązań układu (1) modeli jednego elementu przy wskaźnikach niezawodności elementu I , przedstawionych w tabeli 1, pozwala otrzymać interwałowe prawdopodobieństwa stanów, przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Interwałowe oszacowania wkładu stanów ω modelu jednoelementowym

Interwałowe oszacowania wkładu stanów w prawdopodobieństwo awarii systemu elektroenergetycznego
$[P_{im}] = [0,0016166126575500044; 0,0024130282391821344]$
$[P_{in}] = [0,99756853612964103; 0,99837101647865967]$
$[P_{i1}] = [1,050630127777758 \cdot 10^{-5}; 1,5707046143780759 \cdot 10^{-5}]$
$[P_{is}] = [1,8448254706911827 \cdot 10^{-6}; 2,7580479585564903 \cdot 10^{-6}]$
Interwałowe oszacowania wkładu stanów w intensywność awarii systemu elektroenergetycznego
[1/rok]
$[f_{im}] = [1,9760526545866106; 2,4151902041255195]$
$[f_{in}] = [1,9850413740677133; 2,4261616794160945]$
$[f_{i1}] = [0,0089781469433378724; 0,010982051014801984]$
$[f_{is}] = [0,0089781469433383859; 0,010982051014801913]$

Statystyczne sprawdzanie twierdzenia Becka-Nikela dla modeli funkcjonowania dwóch i trzech elementów

Twierdzenie Becka-Nikela w ogólnym przypadku nie jest spełnione (nie jest słuszne) dla systemów liniowych równań algebraicznych z powiązаныmi parametrami. Jednak badanie rozwiązań kombinacji granicznych wartości interwałów danych początkowych daje znaczące skrócenie czasowi komputerowego obliczania w porównaniu z metodą modelowania statystycznego. Poniżej przedstawiono wyniki porównania wskazanych metod.

Macierz intensywności dla modelu dwóch elementów charakteryzuje się dziesięcioma parametrami. Znalezienie współrzędnych minimów i maksimów $2^{10}=1024$ rozwiązań układu (1) modelu dwóch elementów przy wskaźnikach niezawodności elementów I, K , przedstawionych w tabeli 1,

pozwała otrzymać interwałowe prawdopodobieństwa stanów, przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3. Interwałowe oszacowania wkładu stanów ω modelu dwójelementowego

Interwałowe oszacowania wkładu stanów w prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu elektroenergetycznego	
$[P_{IsKm}] = [9,2810546142115725 \cdot 10^{-10}; 2,0720875470292388 \cdot 10^{-9}]$	$[P_{IrKsOs}] = [7,7492982882724404 \cdot 10^{-13}; 2,1229420167797927 \cdot 10^{-12}]$
$[P_{IrKm}] = [1,9172306268926734 \cdot 10^{-9}; 4,6808917887946029 \cdot 10^{-9}]$	$[P_{IrKsOs}] = [3,1669201251791093 \cdot 10^{-12}; 8,6752057707724723 \cdot 10^{-12}]$
$[P_{IsKr}] = [1,4936673201848365 \cdot 10^{-11}; 3,3366484617771229 \cdot 10^{-11}]$	$[P_{ImKsOs}] = [1,891583510496986 \cdot 10^{-10}; 5,4741795776231346 \cdot 10^{-10}]$
$[P_{IrKr}] = [8,5066732387148519 \cdot 10^{-11}; 1,9001559939519131 \cdot 10^{-10}]$	$[P_{IsKsOs}] = [7,286076533647478 \cdot 10^{-13}; 1,9960740144245438 \cdot 10^{-12}]$
$[P_{ImKr}] = [7,8487521453062969 \cdot 10^{-9}; 1,8980384473993723 \cdot 10^{-8}]$	$[P_{IrKsOs}] = [3,0101024506040204 \cdot 10^{-12}; 8,2461615904866699 \cdot 10^{-12}]$
$[P_{IsKs}] = [1,3637329143535479 \cdot 10^{-11}; 3,0465085282964205 \cdot 10^{-11}]$	$[P_{ImKsOs}] = [3,7801615780631434 \cdot 10^{-10}; 1,0339858536679467 \cdot 10^{-9}]$
$[P_{IrKs}] = [7,7686756914991386 \cdot 10^{-11}; 1,7352955743221489 \cdot 10^{-10}]$	$[P_{IsKmOr}] = [1,7269213219983887 \cdot 10^{-9}; 5,1664845060619389 \cdot 10^{-9}]$
$[P_{ImKs}] = [9,5477037530269132 \cdot 10^{-9}; 2,1295671389579177 \cdot 10^{-8}]$	$[P_{IrKmOr}] = [1,8184621483737294 \cdot 10^{-9}; 5,4379330594472742 \cdot 10^{-9}]$
Interwałowe oszacowania wkładu stanów w intensywność uszkodzeń systemu elektroenergetycznego, [1/rok]	
$[P_{IsKm}] = [5,8072856178176749 \cdot 10^{-6}; 1,0608018590627805 \cdot 10^{-5}]$	$[P_{IsKrOs}] = [5,5997929495838071 \cdot 10^{-11}; 1,533727141420627 \cdot 10^{-10}]$
$[P_{IrKm}] = [4,3042234579119234 \cdot 10^{-6}; 8,5980782260877978 \cdot 10^{-6}]$	$[P_{IrKrOr}] = [1,8215024949278 \cdot 10^{-10}; 4,9886253541730248 \cdot 10^{-10}]$
$[P_{IsKr}] = [1,3907702381276586 \cdot 10^{-7}; 2,5419194645174808 \cdot 10^{-7}]$	$[P_{ImKrOr}] = [1,8033768319566417 \cdot 10^{-8}; 5,3427956718347599 \cdot 10^{-8}]$
$[P_{IrKr}] = [4,5076820829869353 \cdot 10^{-7}; 8,2382052511348015 \cdot 10^{-7}]$	$[P_{IsKsOr}] = [5,3434138333925279 \cdot 10^{-11}; 1,4635624710740352 \cdot 10^{-10}]$
$[P_{ImKr}] = [4,4480528608930636 \cdot 10^{-5}; 8,8008931230628594 \cdot 10^{-5}]$	$[P_{IrKsOr}] = [1,794908648805845 \cdot 10^{-10}; 4,9157520453438977 \cdot 10^{-10}]$
$[P_{IsKs}] = [1,3273667033041199 \cdot 10^{-7}; 2,4261286098069673 \cdot 10^{-7}]$	$[P_{ImKsOr}] = [1,7944547471481372 \cdot 10^{-8}; 5,2880773080732728 \cdot 10^{-8}]$
$[P_{IrKs}] = [4,4446282869005925 \cdot 10^{-7}; 8,1229117967882705 \cdot 10^{-7}]$	$[P_{IsKmOm}] = [4,2997342817044925 \cdot 10^{-10}; 1,2175828028464543 \cdot 10^{-9}]$
$[P_{ImKs}] = [5,8140099091851839 \cdot 10^{-5}; 0,00010610121951467742]$	$[P_{IrKrOm}] = [2,6001454611581592 \cdot 10^{-9}; 7,4364672146508828 \cdot 10^{-9}]$
	$[P_{IsKsOm}] = [8,361735123985403 \cdot 10^{-10}; 2,2759009670519795 \cdot 10^{-9}]$
	$[P_{IrKsOm}] = [2,1701664213960773 \cdot 10^{-9}; 6,2189045352662493 \cdot 10^{-9}]$

Macierz intensywności modelu trzech elementów charakteryzuje się piętnastoma parametrami. Znajdowanie współrzędnych minimów i maksimumów $2^{15}=32768$ rozwiązań układu (1) modelu trzech elementów przy wskaźnikach niezawodności elementów I, K, O , przedstawionych w tabeli 1, pozwala otrzymać interwałowe prawdopodobieństwa stanów, przedstawione w tabeli 4.

Tabela 4. Interwałowe oszacowania wkładu stanów ω modelu trójelementowym

Interwałowe oszacowania wkładu stanów w prawdopodobieństwo uszkodzenia systemu elektroenergetycznego	
$[P_{IsKmOs}] = [3,8207404412859732 \cdot 10^{-15}; 1,2785451660033751 \cdot 10^{-14}]$	
$[P_{IrKmOs}] = [1,9599613615243664 \cdot 10^{-14}; 1,9599613615243664 \cdot 10^{-14}]$	
$[P_{IsKrOs}] = [5,465806002699998 \cdot 10^{-16}; 1,830122428258442 \cdot 10^{-16}]$	
$[P_{IrKrOs}] = [3,115311290590477 \cdot 10^{-16}; 1,0430239952518928 \cdot 10^{-15}]$	
$[P_{ImKrOs}] = [3,9860483555099881 \cdot 10^{-14}; 1,3459822934276237 \cdot 10^{-13}]$	
$[P_{IsKsOs}] = [4,9904633792106023 \cdot 10^{-17}; 1,6709904230342453 \cdot 10^{-16}]$	
$[P_{IrKsOs}] = [2,842968830838485 \cdot 10^{-16}; 9,5190331139790426 \cdot 10^{-16}]$	
$[P_{ImKsOs}] = [3,883727648695011 \cdot 10^{-14}; 1,2983840628250472 \cdot 10^{-13}]$	
$[P_{IsKmOr}] = [3,7220816707060393 \cdot 10^{-13}; 1,245531243576601 \cdot 10^{-12}]$	
$[P_{IrKmOr}] = [7,9427161224631811 \cdot 10^{-13}; 2,9030118471290508 \cdot 10^{-12}]$	
$[P_{IsKrOr}] = [5,985526905730911 \cdot 10^{-15}; 2,0036815386730282 \cdot 10^{-14}]$	
$[P_{IrKrOr}] = [3,408857607311445 \cdot 10^{-14}; 1,1410643984261939 \cdot 10^{-13}]$	
$[P_{ImKrOr}] = [3,1573550344435221 \cdot 10^{-12}; 1,1432880782871558 \cdot 10^{-11}]$	
$[P_{IsKsOr}] = [5,4648550568787223e \cdot 10^{-15}; 1,8294530888425443 \cdot 10^{-14}]$	
$[P_{IrKsOr}] = [3,1131007750616238 \cdot 10^{-14}; 1,0420557963466597 \cdot 10^{-13}]$	
$[P_{ImKsOr}] = [3,8287569455223875 \cdot 10^{-12}; 1,2799814028393892 \cdot 10^{-11}]$	
$[P_{IsKmOm}] = [8,99285140580222 \cdot 10^{-14}; 3,0130172374535303 \cdot 10^{-13}]$	
$[P_{IrKmOm}] = [4,2468978040238348 \cdot 10^{-13}; 1,4845369414440249 \cdot 10^{-12}]$	
$[P_{IsKsOm}] = [8,5908237575192507 \cdot 10^{-14}; 2,8578665111383305 \cdot 10^{-13}]$	
$[P_{IrKsOm}] = [4,5797257385388491 \cdot 10^{-13}; 1,526821938267704 \cdot 10^{-12}]$	
Interwałowe oszacowania wkładu stanów w intensywność uszkodzeń systemu elektroenergetycznego, [1/rok]	
$[P_{IsKmOs}] = [3,7188540295183467 \cdot 10^{-11}; 1,0181868776535968 \cdot 10^{-10}]$	
$[P_{IrKmOs}] = [9,1528290243532507 \cdot 10^{-11}; 2,7149477114450138 \cdot 10^{-10}]$	

$[P_{IsKrOs}] = [7,7492982882724404 \cdot 10^{-13}; 2,1229420167797927 \cdot 10^{-12}]$
$[P_{IrKsOs}] = [3,1669201251791093 \cdot 10^{-12}; 8,6752057707724723 \cdot 10^{-12}]$
$[P_{ImKsOs}] = [1,891583510496986 \cdot 10^{-10}; 5,4741795776231346 \cdot 10^{-10}]$
$[P_{IsKsOs}] = [7,286076533647478 \cdot 10^{-13}; 1,9960740144245438 \cdot 10^{-12}]$
$[P_{IrKsOs}] = [3,0101024506040204 \cdot 10^{-12}; 8,2461615904866699 \cdot 10^{-12}]$
$[P_{ImKsOs}] = [3,7801615780631434 \cdot 10^{-10}; 1,0339858536679467 \cdot 10^{-9}]$
$[P_{IsKmOr}] = [1,7269213219983887 \cdot 10^{-9}; 5,1664845060619389 \cdot 10^{-9}]$
$[P_{IrKmOr}] = [1,8184621483737294 \cdot 10^{-9}; 5,4379330594472742 \cdot 10^{-9}]$
$[P_{IsKrOr}] = [5,5997929495838071 \cdot 10^{-11}; 1,533727141420627 \cdot 10^{-10}]$
$[P_{IrKrOr}] = [1,8215024949278 \cdot 10^{-10}; 4,9886253541730248 \cdot 10^{-10}]$
$[P_{ImKrOr}] = [1,8033768319566417 \cdot 10^{-8}; 5,3427956718347599 \cdot 10^{-8}]$
$[P_{IsKsOr}] = [5,3434138333925279 \cdot 10^{-11}; 1,4635624710740352 \cdot 10^{-10}]$
$[P_{IrKsOr}] = [1,794908648805845 \cdot 10^{-10}; 4,9157520453438977 \cdot 10^{-10}]$
$[P_{ImKsOr}] = [1,7944547471481372 \cdot 10^{-8}; 5,2880773080732728 \cdot 10^{-8}]$
$[P_{IsKmOm}] = [4,2997342817044925 \cdot 10^{-10}; 1,2175828028464543 \cdot 10^{-9}]$
$[P_{IrKrOm}] = [2,6001454611581592 \cdot 10^{-9}; 7,4364672146508828 \cdot 10^{-9}]$
$[P_{IsKsOm}] = [8,361735123985403 \cdot 10^{-10}; 2,2759009670519795 \cdot 10^{-9}]$
$[P_{IrKsOm}] = [2,1701664213960773 \cdot 10^{-9}; 6,2189045352662493 \cdot 10^{-9}]$

Interwałowe oszacowania prawdopodobieństw stanów systemu, otrzymywane statystycznie (10^7 eksperymentów), dla wszystkich modeli leżą wewnątrz interwałów, otrzymanych przy wszystkich kombinacjach granicznych wartości danych początkowych. Innymi słowy, prawdopodobieństwa stanów systemu, otrzymywane przy przypadkowym zadaniu danych początkowych, równomiernie rozdzielonych wewnątrz odpowiedniego interwału, w żadnym z eksperymentów nie wyszły poza granice interwałów, otrzymanych przy rozpatrzeniu tylko granicznych wartości.

Po przeprowadzeniu 10^7 prób statystycznych dla prawdopodobieństw stanów, błąd między metodą statystyczną obliczania a metodą obliczania na podstawie granicznych wartości interwałów danych dla modelu dwóch elementów nie przekroczył 2%, dla modelu trzech elementów - 7%.

Wnioski

Eksperyment statystyczny nie zaprzeczył twierdzeniu Becka-Nikela dla modeli dwóch i trzech elementów.

Przy znajdowaniu interwałowych oszacowań prawdopodobieństw stanów wydaje się celowym poprzedzać próby statystyczne obliczaniem ich wartości dla wszystkich możliwych kombinacji granicznych wartości danych początkowych.

Przy praktycznym obliczaniu niezawodności zamiast statystycznego modelowania można wykorzystać modelowanie na wszystkich możliwych kombinacjach granicznych wartości danych początkowych. Jednak ze względu na walory heurystyczne takiego podejścia przy zadaniu poziomu ufności prawdopodobieństwa zalecane jest dodatkowe przeprowadzenie eksperymentu statystycznego.

LITERATURA

- [1] Ge H., Asgarpoor S., Reliability evaluation of equipment and substations with fuzzy Markov processes, IEEE Transactions on Power Systems, 25 (2010), nr. 3, 1319-1328.
- [2] Grishkevich A., Burmutaev A., Modelowanie statystyczne oszacowań interwałowych wskaźników niezawodności strukturalnej układów elektrycznych, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), R88(2012), nr. 8, 77-79.
- [3] Шарый С.П., Конечномерный интервальный анализ. <http://www.nsc.ru/interval/Library/InteBooks/SharyBook.pdf>
- [4] Endrenyi J., Reliability Modeling in Electric Power Systems, John Wiley, New York (1978)
- [5] Dhillion B.S., Singh C., Engineering Reliability – New Techniques and Applications, John Wiley & Sons. Inc. Publishers, New York, Chichester, Brisbane, Toronto (1981)

- <http://www.ece.tamu.edu/People/bios/singh/enggreliability/>
- [6] Grishkevich A.A., Hudym V.I., Kruczinin A.M., Sawicki A., Zagadnienia energetyczne wybranych współczesnych urządzeń i systemów elektrotechnicznych, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa (2010)
- [7] Гришкевич А.А., Бурмутаев А.Е. Учет вклада состояний отказа в результирующие показатели надежности на основе решения уравнений Колмогорова для предельных вероятностей состояний, Обозрение прикладной и промышленной математики, 16(2009), вып. 1, 111-112.
- [8] Гришкевич А.А., Бурмутаев А.Е., Аналитические формулы для вычисления вклада сечений в результирующие показатели надежности, Синтез, анализ и диагностика электронных цепей, УлГТУ, Ульяновск (2009), вып. 7, 113–117.
- [9] Гришкевич А.А., Бурмутаев А.Е., Компьютерная модель функционирования трех элементов электрической системы с точки зрения надежности, Синтез, анализ и диагностика электронных цепей, УлГТУ, Ульяновск (2010), вып. 8, 131–142.
- [10] Grishkevich A., Burmutaew A., Modelling the organization of maintenance and emergency repairs for calculating the reliability of electric power systems, The issue of renewable energy sources, operating forecasting in electric power systems: Series Monographs, Sekcja Wydawnictwa Wydziału Zarządzenia Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa (2010), 97-104.

Autorzy: *prof. dr hab. inż. Andrey Grishkevich, Politechnika Częstochowska, Instytut Informatyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: a.grishkevich@el.pcz.czest.pl, grishkev_ramb@rambler.ru; stud. Maria Grishkevich, South Urals State University, Faculties Mechanics and Mathematics, Lenina pr., 76, 454080 Chelyabinsk, Russia, E-mail: gryshkevich.maria@gmail.com*