PRACE NAUKOWE Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie
Technika, Informatyka, Inżynieria Bezpieczeństwa 2014, t. II, s. 91–106

http://dx.doi.org/10.16926/tiib.2014.02.07

Andrey Grishkevich
Politechnika Częstochowska
al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa
e-mail: a.grischkevich@el.pcz.czest.pl, grishkev_ramb@rambler.ru

INTERWAŁOWE OSZACOWANIA WSKAŹNIKÓW NIEZAWODNOŚCI STRUKTURALNEJ SYSTEMÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH NA PODSTAWIE METOD OPTYMALIZACJI

Streszczenie. Sformułowano zadanie oszacowania interwałowego wkładu stanu uszkodzenia w wypadkowe wskaźniki niezawodności strukturalnej złożonego systemu w postaci zadania optymalizacji na prostopadłościanie. Zaprezentowano wyniki rozwiązania numerycznego zadań optymalizacji testowych wartości wskaźników niezawodności elementów systemu z wykorzystaniem komputera. Sformułowano zalecenia wyboru początkowych przybliżeń w celu zmniejszenia złożoności optymalizacji.
Słowa kluczowe: bezpieczeństwo energetyczne, niezawodność strukturalna, model Markowa, twierdzenie Becka-Nikela, optymalizacja, eksperyment numeryczny.

INTERVAL ESTIMATIONS FOR STRUCTURE RELIABILITY INDICES OF ELECTRIC POWER SYSTEMS BASED ON OPTIMIZATION METHODS

Abstract. The problem of an interval estimation of the failure states contribution in the resulting reliability indices of a complex system is defined in terms of the optimization problem in a parallelepiped. The resulting numerical solution of the following optimization problem, obtained with the help of the computer and the test data for the reliability indices of the system elements, is presented. The recommendations for choosing the initial approximations with the purpose of reducing the complexity of the optimization process are stated.
Keywords: energy safety, structural reliability, Markow model, theorem Becka-Nickela, optimization, numerical experiment.

Wprowadzenie

Ważnym elementem bezpieczeństwa energetycznego kraju/regionu jest zapewnienie niezawodnego funkcjonowania systemów elektroenergetycznych i nieprzerwanych dostaw energii elektrycznej do odbiorców.

Wskutek awarii systemowych powstają przerwy w zasilaniu energią elektryczną, które mogą doprowadzić do znacznych strat, szacowanych nie tylko pod względem materialnym, ale także pod względem stanu bezpieczeństwa personelu obsługującego i osób będących użytkownikami. 14 sierpnia 2003 roku w największych miastach USA i Kanady doszło do odłączenia zasilania energią elektryczną o czasie trwania kilku sekund [14], co doprowadziło do tak zwanego kaskadowego rozwoju awarii i zniszczeń wielu instalacji. Obszar obejmujący tereny zamieszkane i przemysłowe, które znalazły się bez zasilania energią elektryczną, obejmował ponad 24 tysiące kilometrów kwadratowych. Doszło do zatrzymania pracy ponad 100 elektrowni. Na terytorium zamieszkałym przez około 50 milionów osób na ponad 10 godzin została praktycznie wstrzymana działalność socjalna.

Obliczanie niezawodności strukturalnej systemów elektroenergetycznych

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 *In* to stan normalnej pracy elementu I, *Is* – stan między uszkodzeniem elementu i zakończeniem przełączeń operacyjnych, *Ir* – stan remontu awaryjnego elementu, *Im* – stan remontu zapobiegawczego (zamierzonego odłączenia) elementu. Wskaźniki niezawodności $\lambda = (\lambda_i)$ elementu I wyrażają się wektorem

$$\lambda = \lambda_I = (\lambda_i)_{1\times 5} = (LnsI,\ LnmI,\ TsrI,\ TrnI,\ TmnI)\,, \qquad (1)$$

gdzie: *LnsI, LnmI* – parametry strumienia (intensywność) uszkodzeń (przejść od stanu *In* w stan *Is*) i remontów profilaktycznych (*In* $\rightarrow$ *Im*) elementu *I* odpowiednio; *TsrI*=1/*MsrI*, *TrnI*=1/*MrnI*, *TmnI*=1/*MmnI* – średni czas przełączeń (*Is* $\rightarrow$ *Ir*), awaryjnego (*Ir* $\rightarrow$ *In*) i zapobiegawczego (*Im* $\rightarrow$ *In*) remontów elementu *I* odpowiednio. Przytoczone zależności przedstawiają model Markowa funkcjonowania jednego elementu systemu elektroenergetycznego z punktu widzenia niezawodności.

Wskaźniki niezawodności elementów I, K wyrażają się wektorem

$$\lambda = \lambda_{IK} = \lambda_I \lambda_K = (\lambda_i)_{1\times 10} = \\ =(LnsI,\ LnmI,\ TsrI,\ TrnI,\ TmnI,\ LnsK,\ LnmK,\ TsrK,\ TrnK,\ TmnK). \tag{2}$$

W przypadku trzech lub więcej elementów parametry niezawodności są określone podobnie.

Stan systemu

$$\omega = \{I\alpha \ : \ I \in L,\ \alpha \in \{M,N,R,S\}\} \in \Omega \tag{3}$$

określa się przez stan każdego elementu systemu.

Ustanowione prawdopodobieństwa stanów ze znanymi ograniczeniami spełniają układ równań [4, 6, 9]

$$\begin{cases} P_{1\times n} A^T_{n\times n} = O_{1\times n} (A_{n\times n} P_{n\times 1} = O_{n\times 1}), \\ P_{1\times n} I_{n\times 1} = 1, \end{cases} \tag{4}$$

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; $A^T_{n\times n}$ – interwałowa macierz intensywności przejść; $A_{n\times n} = (a_{ij})$ – macierz transponowana interwałowa intensywności przejść, której elementy

$$\begin{cases} a_{ij} = \lambda_{ij} \text{ przy } i \neq j, \\ a_{ii} = -\sum\limits_{j\neq i} \lambda_{ij}, \end{cases} \tag{5}$$

wyraża się przez λ_{ij} – intensywności przejść od stanu i w stan j. Macierz intensywności modelu funkcjonowania jednego elementu systemu elektroenergetycznego (4 rzędu) uwzględniona w [18], dwóch elementów (15 rzędu) – w [16], trzech elementów (54 rzędu) – w [8, 17]. W niniejszej pracy badano podstawowe wersje modeli funkcjonowania dwóch i trzech elementów z punktu widzenia ich niezawodności.

Prawdopodobieństwa stacjonarne stanów $P\omega=P\omega(\lambda)$, $\omega\in\Omega$ w układzie równań (4) są funkcjami parametrów $\lambda=(\lambda_i)$. W przypadku modeli funkcjonowania jednego elementa rozpatrują się funkcje

$$P\omega(\lambda) = P\omega(\lambda_I),\ \omega\in\{In, Is, Ir, Im\}, \tag{6}$$

w przypadku modeli funkcjonowania dwóch elementów –

$$P\omega(\lambda) = P\omega(\lambda_I\lambda_K), \quad \omega\in\{PIsKm, PIrKm, PIsKr, PIrKr, PImKr, PIsKs, PIrKs, PImKs\}, \tag{7}$$

w przypadku modeli funkcjonowania trzech elementów –

$$P\omega(\lambda) = P\omega(\lambda_I\lambda_K\lambda_O),$$

$$\omega\in\{PIsKmOs, PIrKmOs, PIsKrOs, PIrKrOs, PImKrOs, PIsKsOs, PIrKsOs, PImKsOs, PIsKmOr, PIrKmOr, PIsKrOr, PIrKrOr, PImKrOr, PIsKsOr, PIrKsOr, PImKsOr, PIsKrOm, PIrKrOm, PIsKsOm, PIrKsOm\}. \tag{8}$$

Zadanie oszacowania niezawodności systemu elektroenergetycznego metodą przestrzeni stanów (procesów Markowa) [3, 4] polega na określeniu asymptotycznych wartości wskaźników niezawodności strukturalnej:

1. Prawdopodobieństwo stanu uszkodzenia systemu P_F

$$P_F = \sum_{\omega\in\Omega_F} P_\omega, \tag{9}$$

gdzie: P_ω – prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanie ω, $\Omega_F \subseteq \Omega$ – podzbiór stanów uszkodzenia systemu.

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

$$f_F = \sum_{\omega\in\Omega_F} f_\omega = \sum_{\omega\in\Omega_F} P_\omega\Big(\sum_{\nu\in\Omega_W}\lambda_{\omega\nu}\Big), \tag{10}$$

gdzie: f_ω – intensywność przejścia systemu w stan ω, $\lambda_{\omega\nu}$ – intensywność przejść systemu ze stanu ω w stan ν, $\Omega_W \subseteq \Omega$ – podzbiór stanów pracy systemu.

3. Średni czas trwania stanu uszkodzenia systemu T_F

$$T_F = P_F / f_F, \tag{11}$$

który jest równy średniej długotrwałości przebywania systemu w stanie awaryjnym Ω_F.

4. Średni czas pracy bezawaryjnej systemu T_W

$$T_W = (1 - P_F) / f_F , \tag{12}$$

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

Obliczenia niezawodności są zwykle ograniczone rozpatrzeniem stanów uszkodzenia jednego, dwóch lub trzech elementów.

Oszacowania interwałowe wskaźników niezawodności strukturalnej stanów

Dane liczbowe, szczególnie obejmujące wskaźniki niezawodności elementów, są bardzo umowne. Logicznie jest uznawać, że wskaźniki niezawodności λ elementów znane są z pewną niepewnością, którą będziemy zakładać jako interwałową (przedziałowa)

$$\lambda_{\min,i} \le \lambda_i \le \lambda_{\max,i} . \tag{13}$$

Interwal $[\lambda_{\min,i}, \lambda_{\max,i}]$ określa się za pomocą parametrów λ_i^c, ε

$$[\lambda_{\min,i}, \lambda_{\max,i}] = [\lambda_i^c (1-\varepsilon), \lambda_i^c (1+\varepsilon)] \quad (\lambda_i^c = \frac{\lambda_{\min,i} + \lambda_{\max,i}}{2}), \tag{14}$$

lub za pomocą zmiennej warunkowej $\lambda^0 = (\lambda_i^0)$,

$$\lambda_i = \lambda_{\min i} + (\lambda_{\max i} - \lambda_{\min i})\lambda_i^0 \quad (\lambda_i^0 = \frac{\lambda_i - \lambda_{\min i}}{\lambda_{\max i} - \lambda_{\min i}}), \lambda_i^0 \in [0,1] . \tag{15}$$

Korzystanie ze zmiennej λ^0 jest bardzo wygodnie w opisie rozwiązań w granicznych punktach interwałów danych.

Niepewność powinna być także cechą prawdopodobieństw stanów (wskaźników niezawodności strukturalnej systemu)

$$P_{\min \omega} \le P_\omega \le P_{\max \omega}, \tag{16}$$

uzyskanych za pomocą metod obliczeniowych na podstawie danych początkowych. W związku z tym okazuje się ważny rozwój metod otrzymywania oszacowań interwałowych wskaźników niezawodności strukturalnej z przyjętymi założeniami nieokreśloności początkowych danych [6].

Interwałowe oszacowania formuł o postaci cząstkowej w obliczeniach niezawodności strukturalnej rozpatrzono w [1, 5, 12].

Podstawowym podejściem otrzymywania interwałowych ocen staje się metoda Monte Carlo (statystycznego modelowania) [9]. Jednakże jest ona bardzo pracochłonna. Do tego potrzeba wykorzystać zasoby obliczeniowe superkomputerów z odpowiednim oprogramowaniem i dobre generatory liczb losowych (generowania długich niepowtarzalnych ciągów liczb).

W przypadku monotoniczności funkcji $P\omega(\lambda)$ oszacowania interwałowe wskaźników niezawodności strukturalnej osiąga się na granicach interwałów danych początkowych. To twierdzenie, znane jako twierdzenie Becka-Nikela [19, 241, twierdzenie 5.3.4], jest słuszne w przypadku modeli funkcjonowania jednego elementu [2]. Statystyczne próby [9, 10] nie zaprzeczyły twierdzeniu Becka-Nikela, dotyczącego modeli funkcjonowania dwóch i trzech elementów. Takie wyniki pozwalają wystarczająco skutecznie otrzymywać oceny interwałowe metodą przeszukiwania wartości granicznych interwałów danych początkowych [10]. W obecnym artykule bada się możliwości obniżenia pracochłonności otrzymywania wskazanych ocen interwałowych przez wykorzystanie metod optymalizacji. Zaletą proponowanego podejścia stała się możliwość przeprowadzenia obliczeń na komputerze osobistym (bez wykorzystania superkomputera).

Optymalizacyjne podejście do otrzymywania interwałowych oszacowań wskaźników niezawodności strukturalnej stanów

Jako oszacowanie interwałowe prawdopodobieństwa stanu ω można przyjąć rozwiązania następujących zadań optymalizacji

$$P_{\min,\omega} = \min_{\forall \lambda_i \in [\lambda_{\min,i},\lambda_{\max,i}]} P_\omega(\lambda) = \min_{\forall \lambda_i^0 \in [0,1]} P_\omega(\lambda^0)\,, \tag{17}$$

$$P_{\max,\omega} = \max_{\forall \lambda_i \in [\lambda_{\min,i},\lambda_{\max,i}]} P_\omega(\lambda) = \max_{\forall \lambda_i^0 \in [0,1]} P_\omega(\lambda^0)\,. \tag{18}$$

Tak więc, znajdowanie oszacowania interwałowego (16) sprowadza się do dwukrotnego rozwiązania zadania optymalizacji funkcji $P\omega(\lambda)$ (17), (18) na prostopadłościanie wielowymiarowym $\lambda_{\min} \le \lambda \le \lambda_{\max}$.

Znajdywanie maksimum w wyrażeniu (18) można zastąpić znajdywaniem minimum po zmianie znaku w wyrażeniu (4), tj. znalezienia minimum rozwiązania układu

$$\begin{cases} P_{1\times n} A_{n\times n}^T = O_{1\times n}\,(A_{n\times n} P_{n\times 1} = O_{n\times 1}), \\ P_{1\times n} I_{n\times 1} = -1\,. \end{cases} \tag{19}$$

W przypadku znajdywania oszacowań interwałowych stanów jednego, dwóch albo trzech elementów funkcja celu zadania optymalizacji (17) może być wrażona odpowiednio przez (6), (7) i (8).

Dalsze badanie przedstawionego podejścia wymaga wyboru oprogramowania do rozwiązania problemu optymalizacji (17) i przeprowadzenia eksperymentów numeryczych na komputerze.

Eksperyment numeryczny

Dane testowe wskaźników niezawodności elementów *I, K, O* (parametr λ_i^c) są wzięte z [7, 11]. Przyjmiemy 10% nieokreśloność wskaźników niezawodności (tabela 1) (parametr ε=0,1 w wyrażeniu (14)).

Tab. 1. Wskaźniki testowe przedziałowe niezawodności elementów systemu elektroenergetycznego

Element		***I***	***K***	***O***
Lns	1/ *rok*	[0,009;0,011]	[0,036;0,044]	[0,018;0,022]
Lnm	1/ *rok*	[1,98;2,42]	[0,9;1,1]	[5,67;6,93]
Tsr	*godz.*	[1,8;2,2]	[1,8;2,2]	[1,8;2,2]
Trn	*godz.*	[10,251;12,529	[1,971;2,409]	[197,1;240,9]
Tmn	*godz.*	[7,164;8,756]	[6,3;7,7]	[10,638;13,002]

Iloczyn kartezjański wskazanych przedziałów przedstawia obszar optymalizacji zadań (17) i (18). Jest to prostopadłościan w przestrzeni pięciowymiarowej utworzony z parametrów elementu *I* (z parametrów elementów *I*, *K* w przestrzeni dziesięciowymiarowej; z parametrów elementów *I*, *K*, *O* w przestrzeni piętnastowymiarowej).

Rozwiązywanie zadań optymalizacji (17), (18) wykonywano na komputerze za pomocą procedury minbleicoptimize( ) w wersji języka programowania C++ z pakietu programów ALGLIB [15]. W celu znajdywania funkcji celu (6), (7), (8) rozwiązywano systemy równań liniowych (4), (19) z użyciem procedury rmatrixsolve() pakietu programów ALGLIB. Funkcja minbleicoptimize() stosowała różniczkowanie numeryczne w celu znajdywania gradientu funkcji celu.

Jako parametry procedury minbleicoptimize( ) były brane wartości

$$\begin{gathered}\text{epsg=1e-014; epsf=0; epsx=0;}\\ \text{epso=1e-012; epsi=1e-013;}\end{gathered} \tag{20}$$

diffstep=1e-007 (diffstep=1e-008);

w modelach funkcjonowania dwóch elementów skala zmiennych wynosiła

real_1d_array s = "[
1,1,100000000000000,
100000000000000, 100000000000000,
1,1,100000000000000,
100000000000000, 100000000000000
]"; (21)

w modelach funkcjonowania trzech elementów –

real_1d_array s = "[
1,1,1000000000000000,
1000000000000000,1000000000000000,
1,1,1000000000000000,
1000000000000000,1000000000000000,
1,1,1000000000000000,
1000000000000000,1000000000000000
]"; (22)

W tabeli 2 przedstawiono wyniki rozwiązywania problemów optymalizacji (17), (18) na prostopadłościanie wielowymiarowym (tabela 1) w przypadkach stanów jednego (model funkcjonowania jednego elementu), dwóch (model funkcjonowania dwóch elementów) i trzech (model funkcjonowania trzech elementów) elementów.

Tab. 2. Rozwiązanie problemów optymalizacyjnych (17), (18) stanów ω modeli jedno-, dwu- i trzyelementowych

Pω	$[\arg\min P_\omega(\lambda^0), \arg\max P_\omega(\lambda^0)]$
PIm	[10001,01110]
PIn	[11000,00111]
PIr	[01010,10101]
PIs	[01100,10011]
PIm+ PIr	[00011,11100]
PIsKm	[0110010001,1001101110]
PIrKm	[0101010001,1010101110]
PIsKr	[0110001110,1001110001]

Pω	$[\arg\min P_\omega(\lambda^0), \arg\max P_\omega(\lambda^0)]$
PIrKr	[0111001110,1000110001]
PImKr	[1000101010,0111010101]
PIsKs	[0110001100,1001110011]
PIrKs	[0111001100,1000110011]
PImKs	[1000101100,0111010011]
PIrKm+PIrKr+PImKr	[0001100011,1110011100]
PIsKm+PIsKr	[0110000011,1001111100]
PIsKm+PIsKr+PIrKs+PImKs	[0011100111,1100011000]
PIsKmOs	[011001000101100, 100110111010011]
PIrKmOs	[010101000101100, 101010111010011]
PIsKrOs	[011000111001100, 100111000110011]
PIrKrOs	[011100111001100, 100011000110011]
PImKrOs	[100010101001100, 011101010110011]
PIsKsOs	[011000110001100, 100111001110011]
PIrKsOs	[011100110001100, 100011001110011]
PImKsOs	[100010110001100, 011101001110011]
PIsKmOr	[011001000101010, 100110111010101]
PIrKmOr	[010101000101010, 101010111010101]
PIsKrOr	[011000111001010, 100111000110101]
PIrKrOr	[011100111001010, 100011000110101]
PImKrOr	[100010101001010,

Pω	$[\arg\min P_\omega(\lambda^0), \arg\max P_\omega(\lambda^0)]$
	011101010110101]
PIsKsOr	[011000110001010, 100111001110101]
PIrKsOr	[011100110001010, 100011001110101]
PImKsOr	[100010110001010, 011101001110101]
PIsKrOm	[011000101010001, 100111010101110]
PIrKrOm	[010100101010001, 101011010101110]
PIsKsOm	[011000110010001, 100111001101110]
PIrKsOm	[010100110010001, 101011001101110]
PIrKrOr+PIrKrOm+PIrKmOr+PImKrOr	[000110001100011, 111001110011100]
PIsKrOr+PIsKrOm+PIsKmOr	[011000001100011, 100111110011100]
PIrKsOs+PImKsOs	[000110110001100, 111001001110011]
PIsKrOr+PIrKsOr+PIsKrOm+ PIsKmOr+PIrKsOm+PImKsOr	[001110011100011, 110001100011100]
PIrKsOs+PIsKrOs+PIsKmOs+ PImKsOs	[001110011101100, 110001100010011]
PIsKrOr+PIrKsOs+PIsKmOr+ PIsKrOm+PImKsOs	[001110011100111, 110001100011000]
PIsKrOr+PIrKsOr+PIsKrOm+ PIsKmOr+PIrKsOm+PImKsOr+ PIrKrOs+PIrKmOs+PImKrOs	[001110011100111, 110001100011000]
PIrKsOs+PIsKrOs+PIsKmOs+ PImKsOs+PIsKsOr+ PIsKsOm	[001110011100111, 110001100011000]

W procesie eksperymentów numerycznych nie znaleziono lokalnych optimów w wewnętrznych punktach obszaru optymalizacji. Optymalne rozwiązania zadań optymalizacji otrzymywane na granicznych wartościach interwałów (przedziałów) optymalizacji (tabela 2) i zgadzają się z rozwiązaniami, otrzymywanymi przez kombinacje granicznych wartości interwałów danych początkowych [10].

Jeśli weźmiemy pod uwagę optymalne rozwiązanie w postaci liczby binarnej, to z wykorzystaniem bitowej operacji alternatywy wykluczającej "^" (bitowa suma modulo 2) można otrzymać

$$\arg\ \min\ P_{\omega}(\lambda^{0})\wedge \arg\ \max\ P_{\omega}(\lambda^{0}) = 11\ldots 1\,. \tag{23}$$

Tj. minimum i maksimum funkcji celu znajdują się w przeciwległych wierzchołkach prostopadłościanu wielowymiarowego obszaru optymalizacji. Może to być wykorzystane do wyboru początkowego przybliżenia podczas inicjalizacji metod optymalizacji.

Rozważamy rozwiązywania problemów optymalizacji:

$$\begin{gathered} PIrKm \in [1.917230626\text{e-}009,\ 4.680891788\text{e-}009], \\ PIrKr \in [8.506673238\text{e-}011,\ 1.900155993\text{e-}010], \\ PImKr \in [7.848752145\text{e-}009,\ 1.898038447\text{e-}008], \\ PIrKm+PIrKr+PImKr \in [9.855221017\text{e-}009,\ 2.384120166\text{e-}008]. \end{gathered} \tag{24}$$

Zgodnie z zasadami działań nad liczbami interwałowymi [13], mamy

$$\begin{gathered} [PIrKm]+[PIrKr]+[PImKr]= \\ [1.917230626\text{e-}009 + 8.506673238\text{e-}011 + 7.848752145\text{e-}009, \\ 4.680891788\text{e-}009 + 1.900155993\text{e-}010 + 1.898038447\text{e-}008]= \\ [9.851049503\text{e-}009,\ 2.385129186\text{e-}008]. \end{gathered} \tag{25}$$

Spełnione jest zawieranie

$$\begin{gathered} [9.855221017\text{e-}009,\ 2.384120166\text{e-}008] \subseteq \\ [9.851049503\text{e-}009,\ 2.385129186\text{e-}008]. \end{gathered} \tag{26}$$

Zatem przedział oszacowania wartości *PIrKm+PIrKr+PImKr* przez wartość $[PIrKm]+[PIrKr]+[PImKr]$ okazuje się zawyżony. To wynika z położenia optymalnych rozwiązań do *PIrKm, PIrKr, PImKr* w różnych wierzchołkach prostopadłościanu wielowymiarowego (tabela 2). Wskazaną informację należy uwzględniać w interwałowym uogólnieniu formuł (9) i (10).

Wybór początkowych przybliżeń metod optymalizacji

Porównanie ilości operacji przez mietodę przelicznia możliwych kombinacji wartości krańców interwałów danych początkowych i metod optymalizacji z różnym wyborem początkowych przybliżeń oparto na zliczeniu liczby rozwiązań układów równań liniowych (tabela 3).

Tab. 3. Liczba rozwiązań układu równań liniowych (4), (19)

$P\omega$	**Przeliczne kombinacji granicznych wartości interwałów danych początkowych**	**Metoda wyboru przybliżeń początkowych**			
		1	**2**	**3**	**4**
Pm	32	427	233	28	430
PIn	32	432	230	28	424
PIr	32	436	232	28	536
PIs	32	410	219	28	398
PIsKm	1024	1242	645	48	1388
PIrKm	1024	1263	666	48	1388
PIsKr	1024	1159	593	48	1104
PIrKr	1024	1205	637	48	1322
PImKr	1024	1301	664	48	1434
PIsKs	1024	1344	696	48	1482
PIrKs	1024	1163	616	48	1320
PImKs	1024	1280	664	48	1497
PIsKmOs	32768	2757	1428	68	3010
PIrKmOs	32768	2230	1149	68	2514
PIsKrOs	32768	2431	1234	68	2407
PIrKrOs	32768	2226	1178	68	2295
PImKrOs	32768	2529	1314	68	2691
PIsKsOs	32768	2555	1327	68	2686
PIrKsOs	32768	2474	1271	68	2762
PImKsOs	32768	2901	1469	68	3158

Pω	**Przeliczne kombinacji granicznych wartości interwałów danych początkowych**	**Metoda wyboru przybliżeń początkowych**			
		1	**2**	**3**	**4**
PIsKmOr	32768	2401	1250	68	2530
PIrKmOr	32768	2343	1223	68	2592
PIsKrOr	32768	2273	1155	68	2530
PIrKrOr	32768	2419	1293	68	2606
PImKrOr	32768	2376	1190	68	2505
PIsKsOr	32768	2653	1343	68	2844
PIrKsOr	32768	2380	1258	68	2666
PImKsOr	32768	2500	1252	68	2661
PIsKrOm	32768	2245	1174	68	2407
PIrKrOm	32768	2148	1108	68	2376
PIsKsOm	32768	2586	1327	68	2777
PIrKsOm	32768	2212	1172	68	2467

Używano różne metody wyboru przybliżeń początkowych.

Metoda 1. Procedura optymalizacji do zadań (17) i (18) zaczyna się od wartości λ^c.

Metoda 2. Do zadania (17) procedura optymalizacji zaczyna się od wartości λ^c. Do zadania (18), jako początkowa wartość, jest wybrana wartość wierzchołka prostopadłościana wielowymiarowego przeciwległa w stosunku do otrzymywanej na etapie rozwiązywania zadania (17).

Metoda 3. Ocenia się przyrost funkcji

$$\frac{\Delta_{\lambda_i} P_\omega}{\Delta \lambda_i} \tag{27}$$

w pewnym punkcie obszaru optymalizacji, na przykład $\lambda = \lambda^c$. Jeżeli

$$\frac{\Delta_{\lambda_i} P_\omega}{\Delta \lambda_i} > 0, \tag{28}$$

to w charakterze współrzędnej i początkowego przybliżenia rozwiązania zadania minimalizacji (17) (zadania maksymalizacji (18)) wybiera się

$\lambda_{\min,i}$ ($\lambda_{\max,i}$), w przeciwnym przypadku – $\lambda_{\max,i}$ ($\lambda_{\min,i}$). Modeluje się przypadek «najpomyślniejszego przewidywania albo najmniejszej liczby kroków optymalizacji».

Metoda 4. Wybór realizuje się przeciwnie do przypadku 3. Modeluje się przypadek «najbardziej niepomyślnego przewidywania albo największej liczby kroków optymalizacji».

W przypadku modeli funkcjonowania jednego elementu nie zaleca się stosowania metod optymalizacji. Metoda optymalizacji nie prowadzi do zmniejszenia liczby iteracji. Rozwiązywanie 32 układów równań liniowych 4 rzędu nie jest trudne.

W przypadku modeli funkcjonowania dwóch elementów zaleca się stosowanie metody optymalizacji z przewidywaniem punktu ekstremum. W przypadku niefortunnego przewidywania nieznaczne zwiększenie liczby iteracji jest kompensowane przez znaczne zmniejszenie liczby iteracji – w przypadku pomyślnego przewidywania.

W przypadku modeli funkcjonowania trzech elementów zaleca się stosowanie metod optymalizacji. Wtedy zastosowanie metod optymalizacji zapewnia wystarczająco wyraźną przewagę każdemu wyborowi punktów startowych, ale wymaga strojenia skali zmiennych (22) i parametrów procedury (20).

Kroki procedury optymalizacji modeli funkcjonowania dwóch i trzech elementów służą w charakterze dodatkowej kontroli na obecność ekstremów lokalnych wewnątrz obszarzu optymalizacji (w odniesieniu do mietod przebierania możliwych kombinacji wartości krańców interwałów danych początkowych). W celu praktycznego wykorzystania metod optymalizacji zaleca się wbudować w program komputerowy blok dodatkowej analizy na wypadek wykrycia ekstremów lokalnych wewnątrz obszarzu optymalizacji.

Wnioski

1. Rozwiązywanie problemów optymalizacji nie zaprzeczyło twierdzeniu Becka-Nikela w przypadkach modeli dwóch i trzech elementów. Wyniki eksperymentu wskazują na monotoniczność funkcji celu optymalizacji.
2. Metody optymalizacji zaleca się wykorzystywać do poszukiwania oszacowań interwałowych prawdopodobieństw stanów dwóch lub trzech elementów systemów elektroenergetycznych.
3. Przedziałowe oszacowanie prawdopodobieństwa sumy stanów jest efektywniejsze (ma mniejszą średnicę) w porównaniu z sumą przedziałów oszacowań poszczególnych stanów tego samego zestawu elementów systemu.

Literatura

[1] Bai X., Asgarpoor S., Fuzzy-based approaches to substation reliability evaluation, Electric power system research, № 69, 2004, p. 197-204, DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2003.08.011

[2] Burmutajew A.E., Oszacowanie niezawodności strukturalnej kompleksów elektrotechnicznych i układów dostarczania energii (streszczenie pracy doktorskiej), The Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratów, 2011, http://www.sstu.ru/files/aspirantura/Burmutaev-130212.doc (data dostępu: 7.07.2014).

[3] Dhillon B.S., Singh C., Engineering Reliability: New Techniques and Applications, John Wiley and Sons, New York, 1981.

[4] Endrenyi J., Reliability Modeling in Electric Power Systems, John Wiley and Sons, New York, 1978.

[5] Filipiak S., Methods of reliability estimations of high/medium voltage electrical substations, Numerical Methods and Computer Systems in Automatic Control and Electrical Engineering, Częstochowa University of Technology, Częstochowa, 2005, s. 97-102.

[6] Ge H., Asgarpoor S., Reliability evaluation of equipment and substations with fuzzy Markov processes, IEEE Transactions on Power Systems, Vol 25, No 3, 2010, p. 1319-1328, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2038387

[7] Grishkevich A.A., Combinatory methods of research of extreme structures of mathematical models of electric circuits and systems, Publishing house JuUrGu, Chelyabinsk, 2004.

[8] 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 sourences, operating torecasting in electric power systems, Sekcja Wydawnictwa Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2010, p. 97-104.

[9] Grishkevich A., Burmutaev A., Modelowanie statystyczne oszacowań interwałowych wskaźników niezawodności strukturalnej układów elektrycznych, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Vol R88, Nr 8, 2012, p. 77-79.

[10] Grishkevich A., Grishkevich M., Interwałowe oszacowania wskaźników niezawodności strukturalnej systemów elektroenergetycznych, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Vol R90, Nr 6, 2014, p. 249-252.

[11] Grishkevich A.A., Hudym V.I., Kruczinin A.M., Sawicki A., Zagadnienia energetyczne wybranych współczesnych urządzeń i systemów elektrostalowniczych, Seria Monografie Nr 195, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2010.

[12] Grishkevich A.A., Piątek Ł., Burmutaew A., Метод интервальной оценки показателей структурной надежности схем систем электроснабжения, Proceedings of the Fifth International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2009, Technical University of Kosice, Slovakia, 2009, p. 302-304.
[13] Jaulin L., Kieffer M., Didrit O., Walter E., Applied interval analysis, Springer, London, 2001,
DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-0249-6
http://www.nsc.ru/interval/Library/ApplBooks/ApIntAnal.pdf (data dostępu: 7.07.2014).
[14] http://en.wikipedia.org/wiki/Northeast_blackout_of_2003, Northeast blackout of 2003 (data dostępu: 7.07.2014).
[15] http://www.alglib.net/, ALGLIB cross-platform numerical analysis and data processing library (data dostępu: 7.07.2014).
[16] Гришкевич А.А., Бурмутаев А.Е., Аналитические формулы для вычисления вклада сечений в результирующие показатели надежности, Синтез, анализ и диагностика электронных цепей, Вып 7, УлГТУ, Ульяновск, 2009, с. 113–117.
[17] Гришкевич А.А., Бурмутаев А.Е., Компьютерая модель функционирования трех элементов электрической системы с точки зрения надежности, Синтез, анализ и диагностика электронных цепей, Вып 8, УлГТУ, Ульяновск, 2010, с. 131–142.
[18] 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, Том 16, Вып 1, 2009, с. 111-112.
[19] Шарый С.П., Конечномерный интервальный анализ, Институт вычислительных технологий СО РАН, 2013,
http://www.nsc.ru/interval/Library/InteBooks/SharyBook.pdf (data dostępu: 7.07.2014).