



Wiesław NOWAK, Rafał TARKO

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

## Komputerowe symulacje narażeń przepięciowych dla potrzeb wymiarowania odstępów izolacyjnych linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zastosowanie probabilistycznych symulacji rozkładów statystycznych przepięć łączeniowych w koordynacji izolacji napowietrznych linii elektroenergetycznych. Przedstawiono również przykładowe wyniki badań przepięć związanych z załączeniami linii 400 kV.

**Abstract.** (Computer simulation of overvoltage risks for dimensioning of clearances of high and extra high power lines). The application of probabilistic simulations of switching overvoltages statistical distributions for insulation coordination of overhead power lines is discussed in the paper. Exemplary results of research of overvoltages caused by switching the 400 kV line are also presented.

**Słowa kluczowe:** linie elektroenergetyczne, łączenie, przepięcia, rozkłady statystyczne  
**Keywords:** power lines, switching, overvoltages, statistical distributions

### Wstęp

W koordynacji izolacji układów elektroenergetycznych stosowane są dwie grupy procedur. Pierwsza z nich – procedury deterministyczne – w ogólnym ujęciu bazuje na koncepcji marginesu koordynacyjnego, będącym w istocie różnicą poziomu wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego i poziomu ochrony przepięciowej. Druga grupa procedur – procedury statystyczne – bazuje na koncepcji ryzyka, będącym prawdopodobieństwem uszkodzenia układu izolacyjnego pod wpływem działania narażeń przepięciowych:

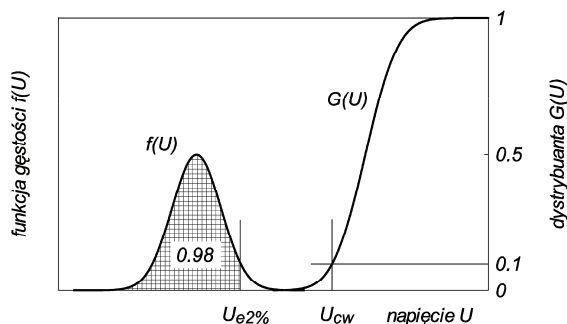
$$(1) \quad R = \int_0^{\infty} f(U)G(U)dU$$

gdzie:  $R$  – ryzyko uszkodzenia,  $G(U)$  – dystrybuanta wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego,  $f(U)$  – funkcja gęstości rozkładu wartości przepięć.

Stosowane są również uproszczenia, np. metoda proponowana w normie [1, 2], w której prawdopodobieństwo uszkodzenia układu izolacyjnego, określone jest pośrednio przez statystyczny współczynnik koordynacyjny  $K_{cs}$ :

$$(2) \quad K_{cs} = \frac{U_{cw}}{U_{e2\%}}$$

gdzie:  $U_{cw}$  – koordynacyjne napięcie wytrzymałwane,  $U_{e2\%}$  – przepięcie statystyczne.



Rys. 1. Interpretacja przepięcia statystycznego  $U_{e2\%}$  i koordynacyjnego napięcia wytrzymałwanego  $U_{cw}$

Z matematycznego punktu widzenia, koordynacyjne napięcie wytrzymałwane  $U_{cw}$  jest kwantylem rzędu 0,1 wytrzymałości elektrycznej, natomiast przepięcie statystyczne  $U_{e2\%}$  jest kwantylem rzędu 0,98 wartości szczytowych przepięć – rysunek 1.

Procedury statystyczne są stosowane między innymi w wymiarowaniu minimalnych odstępów izolacyjnych linii elektroenergetycznych o napięciu powyżej 45 kV [3]. Ich zastosowanie wymaga znajomości rozkładów statystycznych narażeń przepięciowych. Rozkłady te oraz wartości liczbowe ich parametrów, mogą być otrzymane dzięki modelowaniu matematycznemu, symulacjom komputerowym oraz odpowiednim badaniom i analizom statystycznym.

### Statystyczna koordynacja odstępów izolacyjnych linii

Podstawą wymiarowania wewnętrznych i zewnętrznych odstępów izolacyjnych linii elektroenergetycznych są odstęp minimalne (tab. 1), zapewniające wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego linii w określonych warunkach narażeń napięciowych.

Tabela 1. Minimalne odstępów izolacyjne umożliwiające uniknięcie przeskołu według PN-EN 50341-1:2005 [3]

Odstęp	Pomiędzy	Stosowany	Rodzaj narażeń
$D_{el}$	przewodami fazowymi a obiektami o potencjale ziemi	do izolacji zewnętrznej oraz izolacji wewnętrznej	przepięcia o stromym czole, przepięcia o łagodnym czole
$D_{pp}$	przewodami fazowymi		
$D_{50Hz-p-e}$	przewodami fazowymi a obiektami o potencjale ziemi	do izolacji wewnętrznej	napięcie o częstotliwości sieciowej (w ekstremalnych warunkach wiatrowych)
$D_{50Hz-p-p}$	przewodami fazowymi		

Statystyczna metoda określania minimalnych odstępów izolacyjnych [3] oparta jest na dokumentach PN-EN 60071 [1, 2] oraz Raportie Nr 72 CIGRE [4]. Jej podstawą jest określenie dla danego rodzaju narażeń, koordynacyjnego napięcia wytrzymałwanego  $U_{cw}$  oraz przepięcia reprezentatywnego  $U_{rp}$  – tabela 2.

Tabela 2. Koordynacyjne napięcia wytrzymawane i przepięcia reprezentatywne według [3]

Rodzaj narażeń	Koordynacyjne napięcie wytrzymawane $U_{cw}$ w [kV]	Przepięcie reprezentatywne $U_{rp}$	
		faza – ziemia	faza - faza
Przepięcia o stromym czole	$K_a K_z K_{g-ff} \cdot 530d$	$U_{90\%-ff-is}$	$1,2U_{90\%-ff-is}$
Przepięcia o łagodnym czole	$K_a K_z K_{g-sf} \cdot 1080 \ln(0,46d + 1)$	$K_{cs} U_{e2\%-sf}$	$1,4K_{cs} U_{e2\%-sf}$
Napięcie o częstotliwości sieciowej	$K_a K_z K_{g-pf} \cdot 750 \sqrt{2} \ln(0,55d^{1,2} + 1)$	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_s$	$\sqrt{2} U_s$

$K_a$  – współczynnik poprawkowy na wysokość,  $K_z$  – współczynnik odchylenia,  $K_{g-ff}$ ,  $K_{g-sf}$ ,  $K_{g-pf}$  – współczynniki przerwy iskrowej,  $d$  – odstęp izolacyjny wyrażony w metrach,  $K_{cs}$  – statystyczny współczynnik koordynacyjny,  $U_{90\%-ff-is}$  – 90-procentowe wytrzymawane napięcie udarowe piorunowe łańcuchów izolatorów zamontowanych na linii,  $U_{e2\%-sf}$  – przepięcie o łagodnym czole, którego wartość może być przekroczona z prawdopodobieństwem 2%,  $U_s$  – najwyższe napięcie sieci

Jako minimalne odstępów  $D_{el}$  i  $D_{pp}$  oraz  $D_{50Hz}$  przyjmowane są wartości odstępów  $d$ , spełniające równanie:

$$(3) \quad U_{cw} = U_{rp}$$

Koordynacyjne napięcia wytrzymawane dla przepięć o stromym i łagodnym czole, są kwantylami rzędu 0,1 statystycznych rozkładów wytrzymałości elektrycznej. Przy założeniu względnego odchylenia standardowego  $z = 0,03$  dla przepięć o stromym czole oraz  $z = 0,06$  dla przepięć o łagodnym czole, współczynniki odchylenia  $K_z$  wynoszą odpowiednio 0,961 oraz 0,922. Dla napięć o częstotliwości sieciowej,  $U_{cw}$  jest kwantylem rzędu 0 (100-procentowym napięciem wytrzymawanym), który jest wartością lewostronnego ucięcia rozkładu wytrzymałości elektrycznej. Przy założeniu względnego odchylenia standardowego  $z = 0,03$ , współczynnik odchylenia  $K_z$  dla napięcia o częstotliwości sieciowej, wynosi 0,91.

Przepięcia reprezentatywne dla narażeń o stromym czole określone są na podstawie wartości  $U_{90\%-ff-is}$ , będącej 90-procentowym wytrzymawanym napięciem udarowym piorunowym łańcuchów izolatorów zamontowanych na linii. Dla narażeń o łagodnym czole, przepięcia reprezentatywne określone są na podstawie wartości  $U_{e2\%-sf}$ , która może być przekroczona z prawdopodobieństwem 2%. Wartość  $U_{e2\%-sf}$  jest przepięciem statystycznym, które z formalnego punktu widzenia jest kwantylem rzędu 0,98 rozkładu wartości szczytowych przepięć o łagodnym czole (rys. 1).

### Symulacje probabilistyczne narażeń przepięciowych

Podstawowe rodzaje narażeń przepięciowych istotne dla linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć to: a) przepięcia atmosferyczne w grupie przepięć o stromym czole; b) w grupie przepięć o łagodnym czole: przepięcia łączeniowe przy załączaniu i powtórny załączaniu linii, a także przepięcia ziemnozwarciowe.

Załączeniu linii elektroenergetycznej towarzyszą przepięcia łączeniowe, których parametry zależne są między innymi od losowości czasu (fazy) uzyskania styczności styków wyłącznika. Poziom przepięcie łączeniowych jest więc zmienną losową [np. 5, 6], którą opisuje odpowiedni rozkład i parametry statystyczne, wykorzystywane w wymiarowaniu odstępów  $D_{el}$  i  $D_{pp}$  (tab. 2).

Rozkłady statystyczne wartości szczytowych przepięć otrzymywane są na podstawie symulacji probabilistycznych z zastosowaniem odpowiednich programów komputerowych. Obecnie, wykorzystywany jest przede wszystkim program EMT-ATP, w którym zaimplementowana jest analiza statystyczna układów elektroenergetycznych. Jednym z podstawowych elementów układu jest wówczas wyłącznik statystyczny, którego zamknięcie, jak i otwarcie, może odbywać się w sposób losowy. Czas zamknięcia

(otwarcia) wyłącznika jest zmienną losową z rozkładu jednostajnego albo normalnego, o wartości oczekiwanej  $T$  i odchyleniu standardowym  $Dev$ . Ponadto wyłącznik może działać niezależnie (tryb Independent) lub może być uzależniony od innego wyłącznika (tryb Master lub Slave).

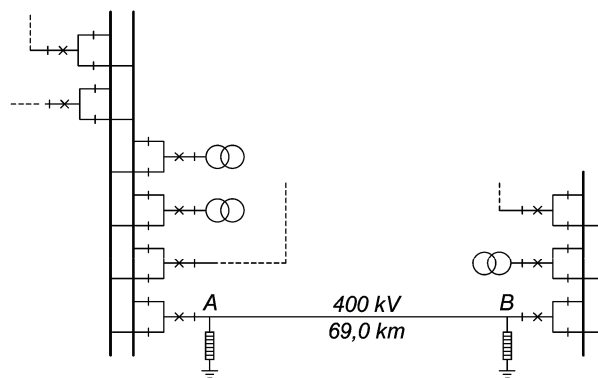
Proces symulacji układu jest przeprowadzony  $N$ -krotnie, przy czym w kolejnym  $i$ -tym cyklu ( $i = 1, \dots, N$ ), wykonywana jest niezależna symulacja układu dla wylosowanych parametrów wyłączników statystycznych. Po każdym  $i$ -tym cyklu wyprowadzane są między innymi ekstrema globalne obserwowanych przebiegów oraz odpowiadające im czasy wystąpienia. W celu otrzymania rozkładów statystycznych wartości szczytowych przepięć, zalecenia normatywne [1, 2] proponują dwie metody postępowania.

W pierwszej, zwanej metodą fazowej wartości szczytowej, z każdej symulacji operacji łączeniowej do analizy statystycznej brane są trzy wartości, będące największymi wartościami szczytowymi przepięcia na izolacji faza-ziemia, faza-faza oraz na izolacji wzdłużnej. Otrzymany w ten sposób rozkład jest stosowany jako identyczny dla każdego rodzaju izolacji.

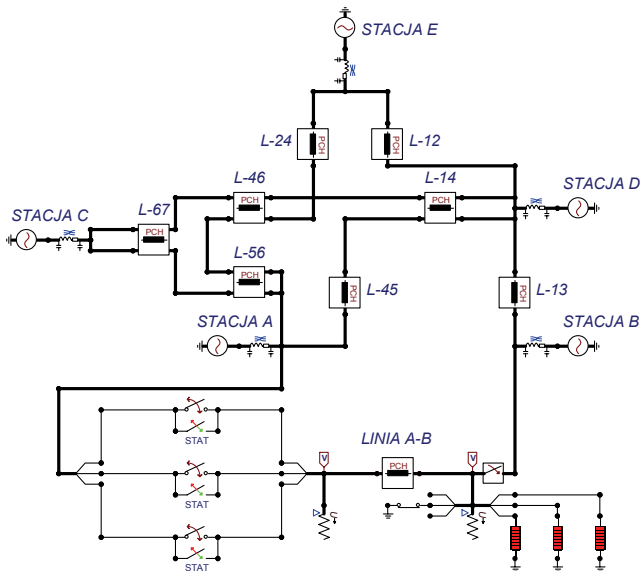
W metodzie drugiej, zwanej metodą zdarzeniowej wartości szczytowej, dla izolacji faza-ziemia, faza-faza oraz dla izolacji wzdłużnej otrzymywane są trzy rozkłady na podstawie największych w danej symulacji wartości przepięć.

### Analizowany układ

Przedmiotem rozważań był układ elektroenergetyczny o napięciu 400 kV (rys. 2), w którym stację A i stację B połączył ma jednotorowa linia o długości 69 km [7]. W celu wyznaczenia statystycznych rozkładów wartości szczytowych przepięć, powstających w wyniku procesów łączeniowych w linii A – B, układ ten odwzorowano w programie EMT-ATP (rys. 3), z wykorzystaniem między innymi zasad przedstawionych w publikacji [8].



Rys. 2. Układ elektroenergetyczny 400 kV



Rys. 3. Odwzorowanie układu 400 kV w preprocesorze ATPDraw programu EMTP-ATP

Zasadnicze elementy modelu przedstawionego na rysunku 3 stanowią:

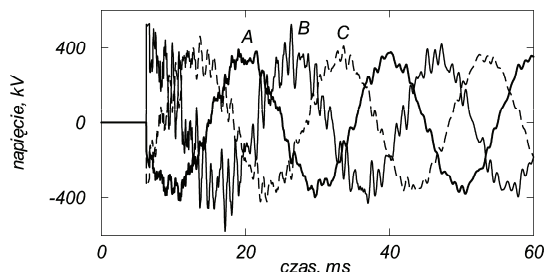
- odcinki wieloprzewodowych linii długich o parametrach zależnych od częstotliwości, łączące stacje A, B, C, D, E, w tym model rozważanej linii A – B,
- wyłączniki statystyczne STAT w stacji A,
- modele bezskiernikowych ograniczników prądów na końcu linii A – B w stacji B.

Analiza obejmowała statystyczne określenie poziomu narażeń przepięciowych izolacji linii w następujących przypadkach:

- załączanie linii A – B w stanie jałowym bez ograniczników prądów,
- załączanie linii A – B w stanie jałowym z ogranicznikami prądów,
- ponowne załączanie linii A – B w stanie zwarcia jednofazowego bez ograniczników prądów,
- ponowne załączanie linii A – B w stanie zwarcia jednofazowego z ogranicznikami prądów.

### Wyniki symulacji

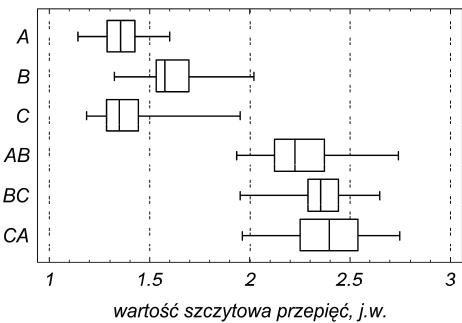
Przepięcia łączeniowe mają na ogół kształt wieloczęstotliwościowych tłumionych oscylacji – rysunek 4. Oprócz narażenia izolacji fazowej i międzyfazowej, przepięcia łączeniowe mogą powstawać również na izolacji wzdłużnej przerw międzystykowych łączników.



Rys. 4. Przykładowe przebiegi czasowe napięć fazowych przy załączaniu linii A – B w stanie jałowym

Na rysunku 5 przedstawiono w postaci wykresów typu Box-and-Whisker, przykładowe wizualizacje rozkładów statystycznych przepięć na końcu linii od strony rozdzielni B, otrzymane w wyniku symulacji  $N = 200$  załączeń linii w roz-

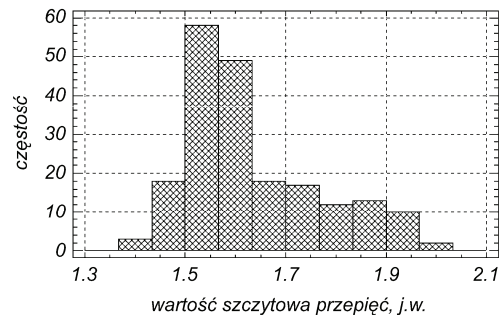
dzielni A oraz analizy statystycznej przebiegów czasowych. Wykresy te ilustrują podstawowe deskrytory: wartość najmniejszą, kwartył dolny, medianę, kwartył górny oraz wartość największą. „Pudełka” A, B, C dotyczą narażeń izolacji faza-ziemia, natomiast „pudełka” AB, BC, CA – izolacji faza-faza.



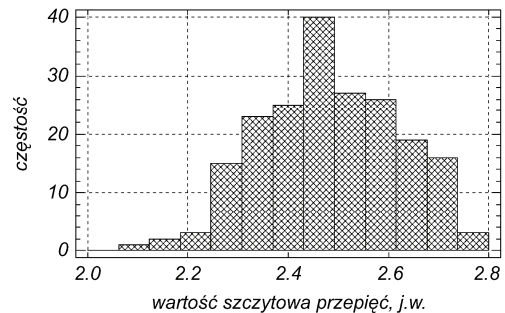
Rys. 5. Wykresy Box-and-Whisker narażeń przepięciowych izolacji fazowej A, B, C i międzyfazowej AB, BC, CA przy załączaniu linii A – B w stanie jałowym; 1 j.w. = 342,9 kV

Histogramy wypadkowych rozkładów wartości szczytowych przepięć dla izolacji faza-ziemia oraz faza-faza, otrzymanych z wykorzystaniem metody zdarzeniowej przedstawiono na rys. 6. Histogramy te dają pełny obraz losowego charakteru narażeń i są podstawą wyznaczenia m.in. kwantyli wyższych rzędu, w szczególności przepięcia statystycznego  $U_{e2\%}$ .

a)



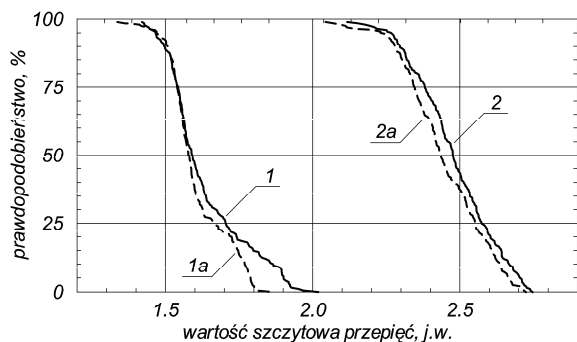
b)



Rys. 6. Histogramy częstości narażeń przepięciowych (zdarzeniowa wartość szczytowa) izolacji faza-ziemia (a) oraz faza-faza (b) przy załączaniu linii A – B w stanie jałowym; 1 j.w. = 342,9 kV

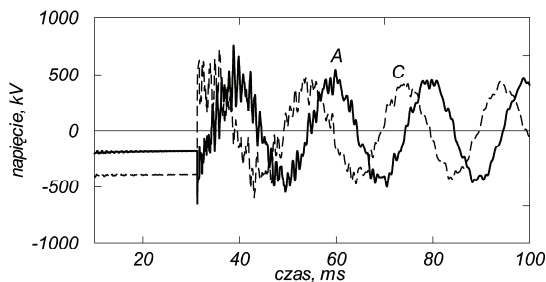
Na rysunku 7 przedstawiono krzywe obrazujące prawdopodobieństwo przekroczenia wartości szczytowej przepięć łączeniowych dla izolacji faza-ziemia (krzywa 1) oraz faza-faza (krzywa 2). Odpowiadające wartości 2% przepięcia statystyczne  $U_{e2\%-sf}$  wynosi 1,93 j.w. (661,2 kV) dla izolacji faza-ziemia oraz 2,73 j.w. (934,8 kV) dla izolacji faza-faza, przy współczynniku  $\alpha = 0,56$ , określającym udział składowej ujemnej. Stosunek tych wielkości kształtuje się na poziomie 1,41 i jest zbliżony z wartością 1,4 zawartą

w tabeli 2. Na rysunku 7 przedstawiono również wpływ ograniczników przepięć na zmianę poziomu przepięć łączeniowych (krzywe 1a i 2a). W prezentowanym przypadku łączniowy poziom ochrony ograniczników wynosi 1,96, co powoduje zmniejszenie wartości  $U_{e2\%}$  z wartości 1,93 do 1,80 dla izolacji faza-ziemia oraz z wartości 2,73 do 2,70 dla izolacji faza-faza.



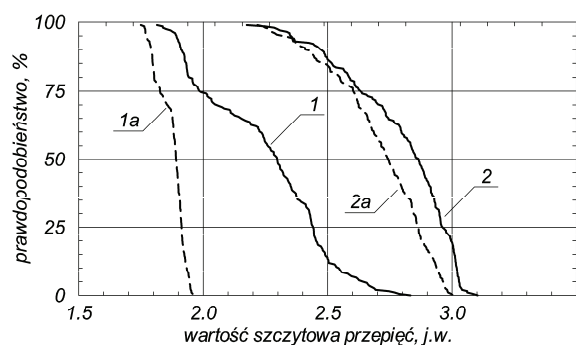
Rys. 7. Krzywe prawdopodobieństwa przekroczenia wartości szczytowej przepięć przy załączaniu linii A – B w stanie jałowym: 1 – izolacja faza-ziemia; 2 – izolacja faza-faza; 1a, 2a – wpływ ograniczników przepięć; 1 j.w. = 342,9 kV

Ponownemu załączaniu linii, wynikającemu z działania automatyki SPZ, towarzyszą przepięcia o większych wartościach, niż przy łączeniu linii w stanie jałowym. Ilustruje to rysunek 8, na którym przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe napięć fazowych przy ponownym załączaniu linii A – B w stanie zwarcia fazy B

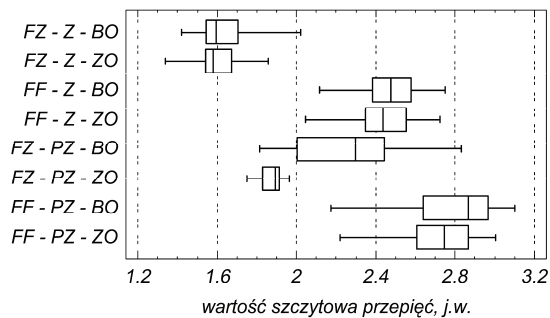


Rys. 8. Przykładowe przebiegi czasowe napięć fazowych przy ponownym załączaniu linii A – B w stanie zwarcia fazy B

Na rysunku 9 przedstawiono krzywe obrazujące prawdopodobieństwo przekroczenia wartości szczytowej przepięć, które otrzymane na podstawie analizy przebiegów czasowych z symulacji 200 ponownych załączeń linii w stanie zwarcia fazy B.



Rys. 9. Krzywe prawdopodobieństwa przekroczenia wartości szczytowej przepięć przy ponownym załączaniu linii A – B w stanie zwarcia fazy B: 1 – izolacja faza-ziemia; 2 – izolacja faza-faza; 1a, 2a – wpływ ograniczników przepięć; 1 j.w. = 342,9 kV



Rys. 10. Wykresy Box-and-Whisker narażeń przepięciowych bez ograniczników i z ogranicznikami przepięć: FZ – izolacja faza-ziemia, FF – izolacja faza-faza, Z – załączanie linii, PZ – ponowne załączanie linii, BO – bez ograniczników, ZO – z ogranicznikami; j.w. = 342,9 kV

Odpowiadające wartości 2% przepięcie statystyczne  $U_{e2\%-sf}$  wynosi 2,72 j.w. (932,7 kV) dla izolacji faza-ziemia oraz 3,05 j.w. (1045,8 kV) dla izolacji faza-faza. Ograniczniki przepięć powodują zmniejszenie wartości  $U_{e2\%-sf}$  do 1,95 dla izolacji faza-ziemia oraz do 2,98 dla izolacji faza-faza. Ilustruje to także rysunek 10, na którym porównano wykresy Box-and-Whisker dla załączania i ponownego załączania linii A – B.

### Podsumowanie

Wymiarowanie odstępów izolacyjnych linii elektroenergetycznych wymaga rozwiązania zadania koordynacji izolacji, efektem którego jest określenie odstępów minimalnych. Odstępy minimalne mogą być wyznaczane przy zastosowaniu metody statystycznej. Wykorzystanie tej metody, wymaga pogłębionej analizy narażeń przepięciowych w ujęciu probabilistycznym, pozwalającej na wyznaczenie rozkładów statystycznych poziomów narażeń przepięciowych układu izolacyjnego linii. Należy nadmienić, że do wyznaczenia odstępów minimalnych norma PN-EN 50341-1:2005 proponuje także metodę empiryczną, opartą na – sprawdzonych w praktyce – doświadczeniach krajów europejskich.

### LITERATURA

- [1] PN-EN 60071-1:1999 Koordynacja izolacji. Definicje, zasady i reguły
- [2] PN-EN 60071-2:2000 Koordynacja izolacji. Przewodnik stosowania
- [3] PN-EN 50341-1:2005 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne
- [4] CIGRÉ Working Group 33-07 of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination): *Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation*. CIGRÉ Technical Brochure No. 72, 1992
- [5] Yu C., Petcharaks N., Panprommin C., *The statistical calculation of energization overvoltages, case of EGAT 500 kV lines*, Power Engineering Society Winter Meeting, 23-27 Jan. 2000, IEEE Volume 4, 2705 – 2709
- [6] Martinez J.A., Natarajan R., Camm E., *Comparison of statistical switching results using Gaussian, uniform and systematic switching approaches*. Power Engineering Society Summer Meeting, 16-20 July 2000, IEEE Volume 2, 884 – 889
- [7] Nowak W., Tarko R., Probabilistyczne symulacje narażeń przepięciowych w koordynacji izolacji linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć (w druku), *Energetyka*, 2007
- [8] CIGRÉ Working Group 33-02 of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination): *Guidelines for representation of network elements when calculating transients*. CIGRÉ Technical Brochure No. 39, 1990

**Autorzy:** dr hab. inż. Wiesław Nowak, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: wiesio@agh.edu.pl; mgr inż. Rafał Tarko, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: rtarko@agh.edu.pl