

Analiza przebiegów łączeniowych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych w ujęciu statystycznym

Streszczenie. W artykule przedstawiono modele probabilistyczne zdarzeń, będących przyczyną powstawania przebiegów łączeniowych, determinujących wymiarowanie odstępów izolacyjnych w liniach napowietrznych. Badano zarówno przebiegi występujące w czasie załączania linii jak i przy samoczynnym ponownym załączaniu. Otrzymane rozkłady statystyczne wykorzystano do wymiarowania odstępów powietrznych izolacji faza-ziemia oraz faza-faza. Analizy przeprowadzono zarówno z uwzględnieniem, jak i pominięciem ochrony przebiegowej rozważanej linii.

Abstract. The article presents the probabilistic models of events, being the cause of switching overvoltages, determining the dimensioning of insulation gaps in the overhead lines. Values of overvoltages occurring during switching on the lines and occurring during their automatic reclosing were calculated. The statistical distributions of overvoltages, being the result of calculation, were used for dimensioning of phase-to-ground and phase-to-phase air gaps insulation. Analyses were performed both with and without taking into account the line surge protection. (**Analysis of switching overvoltages in the overhead power lines in statistical terms**)

Słowa kluczowe: linie napowietrzne wysokich napięć, przebiegi łączeniowe, analiza statystyczna, koordynacja izolacji.

Keywords: high voltage overhead lines, switching overvoltage, statistical analysis, insulation coordination.

Wprowadzenie

Czynności łączeniowe wykonywane w systemach elektroenergetycznych są źródłem przebiegów. Przebiegi łączeniowe mogą powstawać podczas załączania linii elektroenergetycznych, wyłączania zwarć i powtórnego załączania linii, wyłączania prądów o charakterze indukcyjnym lub pojemnościowym oraz w gazowych układach izolacyjnych.

Przebiegi łączeniowe stanowią najistotniejszy rodzaj narażeń, które determinują wymiarowanie i koordynację izolacji w systemach elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, ze względu na krytyczną wytrzymałość elektryczną dużych odstępów powietrznych [1, 2]. Dotyczy to nie tylko izolacji fazowej i międzyfazowej linii i stacji elektroenergetycznych, ale również, ze względu na napięcia powrotne, izolacji wzdłużnej wyłączników. Najbardziej istotnymi, z punktu widzenia izolacji powietrznej, procesami łączeniowymi są załączania linii oraz ponowne załączania linii wywołane działaniem automatyki samoczynnego ponownego załączania (SPZ).

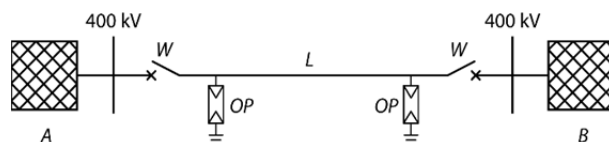
Parametry przebiegów zależą między innymi od: mocy zwarciowej w punkcie przyłączenia linii, długości linii oraz stopnia i charakteru jej obciążenia, a także od chwili uzyskania styczności styków wyłącznika. Ponieważ ostatni czynnik jest zmienną losową, to poziom przebiegów w czasie załączania linii również jest zmienną losową [3, 4, 5, 6, 7, 8].

W niniejszym artykule przedstawiono zastosowanie metod statystycznych do analizy narażeń przebiegowych linii elektroenergetycznych wysokich napięć, wywołanych procesami ich załączania oraz powtórnego załączania. Otrzymane rozkłady statystyczne przebiegów mają zastosowanie w koordynacji izolacji linii elektroenergetycznych, której celem jest określenie minimalnych odstępów zapewniających wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego.

Analizowany układ elektroenergetyczny, jego model i metodyka badawcza

Przedmiotem rozważań jest układ elektroenergetyczny 400 kV, którego schemat przedstawiono na rysunku 1. W układzie tym systemy elektroenergetyczne A i B (o mocy zwarciowej odpowiednio 20 i 15 GVA) łączy napowietrzna jednorodna linia 400 kV o długości 50 km. W rozdzielniach, do których jest przyłączona linia, zainstalowane są ograniczniki przebiegów o następujących łączeniowych poziomach ochrony:

- 656 kV dla prądu wyładowczego 30/60 μ s 1 kA;
- 679 kV dla prądu wyładowczego 30/60 μ s 2 kA;
- 696 kV dla prądu wyładowczego 30/60 μ s 3 kA.

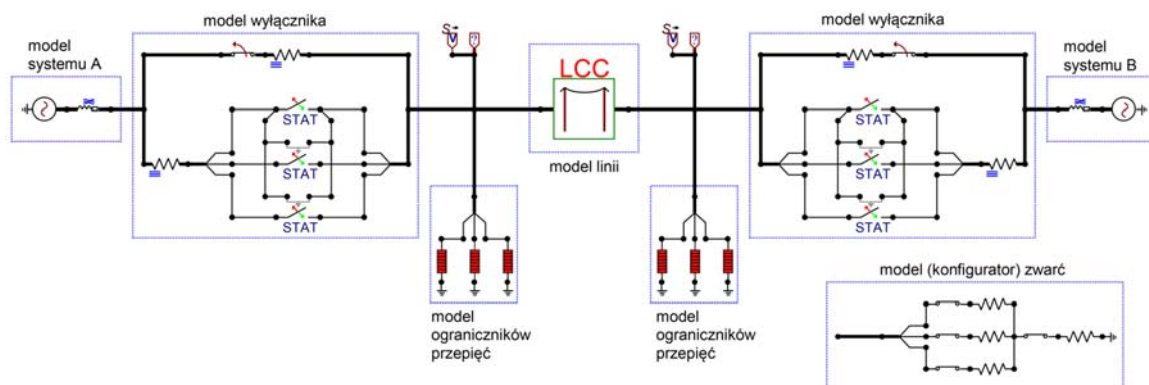


Rys.1. Analizowany układ elektroenergetyczny 400 kV (A, B - systemy elektroenergetyczne, L - jednorodna linia przesyłowa, W - wyłączniki liniowe, OP - ograniczniki przebiegów (EXLIM P-E336-EH420))

W celu przeprowadzenia statystycznej analizy rozkładów wartości szczytowych przebiegów powstających w wyniku procesów łączeniowych w linii L, opracowano model komputerowy tego układu w programie EMTP-ATP-(rys. 2), uwzględniając zalecenia przedstawione w publikacjach [9, 10]. Ze względu na własności dynamiczne i statyczne najbardziej adekwatny jest model linii elektroenergetycznej opracowany przez J. R. Martí'ego [11]. Model analizowanego układu składa się z następujących modeli cząstkowych:

- model jednorodnej linii 400 kV;
- modeli systemów elektroenergetycznych A i B (złożonych z szeregowo połączonych idealnych źródeł napięcia i zastępczych impedancji zwarciowych określonych w dziedzinie składowych symetrycznych);
- modeli wyłączników liniowych w rozdzielniach A i B, w których odwzorowano ich własności losowe;
- modeli ograniczników przebiegów w rozdzielniach A i B, które odwzorowują ich własności dynamiczne [12];
- model (konfigurator) zwarć symetrycznych i niesymetrycznych.

Jednym z podstawowych elementów modelu układu jest wyłącznik statystyczny STAT (rys. 2), którego zamknięcie, jak i otwarcie, może odbywać się w sposób losowy. Czas, w którym następuje zetknięcie lub rozdzielenie styków wyłącznika jest zmienną losową z rozkładu jednostajnego, normalnego albo liniowego, o wartości oczekiwanej T i odchyleniu standardowym σ . Ponadto wyłącznik może działać niezależnie (tryb *Independent*) lub zależnie od innego wyłącznika (tryb *Master* lub *Slave*).



Rys.2. Model analizowanego układu elektroenergetycznego 400 kV opracowany w programie EMTP-ATP

W przypadku symulacji procesu złączania rozważanej linii założono [10], że wyłącznik w fazie L1 jest typu *Master*, a czas, w którym następuje zetknięcie styków wyłącznika jest zmienną losową z rozkładu jednostajnego w przedziale od $t_{Ca} = 15$ ms do $t_{Cb} = 35$ ms (o szerokości jednego okresu przebiegu o częstotliwości 50 Hz). Funkcja gęstości rozkładu czasu, w którym następuje zetknięcie styków wyłącznika jest wyrażona zależnością:

$$(1) \quad (t_C) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t_C < t_{Ca} \\ \frac{1}{t_{Cb} + t_{Ca}} & \text{dla } t_{Ca} \leq t_C \leq t_{Cb} \\ 0 & \text{dla } t_C > t_{Cb} \end{cases}$$

Wartość oczekiwana T i odchylenie standardowe Dev zmiennej losowej t_C opisanej rozkładem (1) wynoszą:

$$(2) \quad T = \frac{t_{Ca} + t_{Cb}}{2}$$

$$(3) \quad Dev = \frac{t_{Cb} - t_{Ca}}{\sqrt{12}}$$

Założono, że wyłączniki w pozostałych fazach są typu *Slave*, dla których załączenie odbywa się z opóźnieniem Δt_C względem zamknięcia wyłącznika typu *Master*. Ponadto założono, że opóźnienie zamknięcia jest zmienną losową podlegającą rozkładowi normalnemu o funkcji gęstości:

$$(4) \quad f(\Delta t_C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_C} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta t_C - \mu_C}{\sigma_C}\right)^2\right]$$

gdzie: μ_C , σ_C – wartość oczekiwana i odchylenie standardowe zmiennej Δt_C (przyjęto, że wyłączniki *Slave* mają parametry $\mu_C = 5$ ms, $\sigma_C = 1,6$ ms).

W przypadku symulacji powtórnego załączania linii przyjęto takie same założenia, co do parametrów wyłączników statystycznych, z tą jednak różnicą, że $t_{Ca} = 200$ ms oraz $t_{Cb} = 220$ ms ze względu na wcześniejszą symulację procesu wyłączenia linii wywołanego zakłóceniem zwarciovym.

Proces symulacji przeprowadzany był n -krotnie dla losowanych parametrów wyłączników statystycznych. Po każdym i -tym cyklu ($i = 1, \dots, n$) rejestrowane były ekstrema globalne obserwowanych przebiegów oraz odpowiadające im czasy wystąpienia.

Normy [13, 14] proponują dwie metody wyznaczenia rozkładów statystycznych wartości szczytowych przepięć,

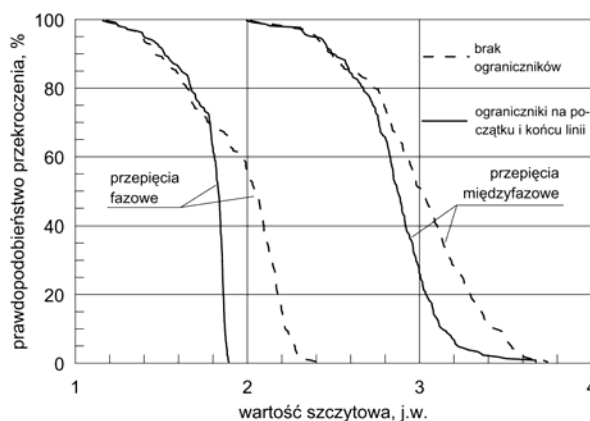
mających zastosowanie w procesie koordynacji izolacji: *metoda fazowej wartości szczytowej* oraz *metoda zdarzeniowej wartości szczytowej*. W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych zastosowano metodę zdarzeniowej wartości szczytowej, otrzymując rozkłady statystyczne przepięć istotne dla koordynacji izolacji faza-ziemia oraz faza-faza rozpatrywanej linii 400 kV.

Wyniki badań przepięć łączeniowych w linii 400 kV

Symulacje probabilistyczne przeprowadzono dla czterech przypadków procesów łączeniowych rozpatrywanej linii 400 kV, tj.: załączenie linii przy braku i w obecności ograniczników przepięć oraz ponowne załączenie linii również przy braku i w obecności ograniczników. Dla każdego przypadku proces symulacji przeprowadzany był 200-krotnie przy losowanych parametrach wyłączników statystycznych. W efekcie symulacji otrzymano cztery, 200-elementowe próby losowe zawierające sześć zmiennych losowych (trzy napięcia fazowe i trzy napięcia międzyfazowe). Próby te poddano analizie statystycznej.

Podsumowaniem analizy probabilistycznej są przedstawione na rysunku 3 prawdopodobieństwa przekroczenia wartości szczytowych przepięć fazowych i międzyfazowych powstających przy załączaniu rozważanej linii 400 kV.

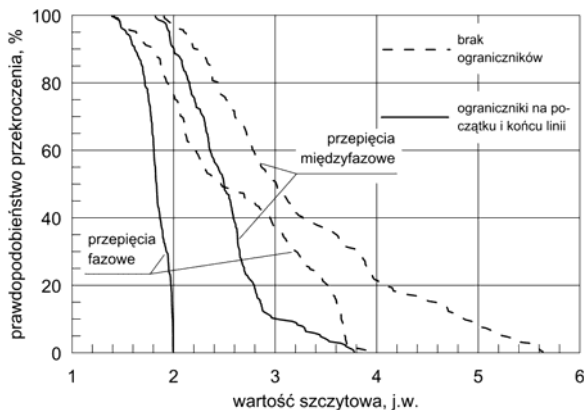
$$(5) \quad P(U_m > u_m) = 1 - F(u_m)$$



Rys.3. Prawdopodobieństwo przekroczenia wartości szczytowej przepięć fazowych i międzyfazowych przy załączaniu linii 400 kV [15]

Analogiczne prawdopodobieństwa, ale dla przypadku ponownego załączania linii przedstawiono na rysunku 4. Z

formalnego punktu widzenia, krzywe zawarte na rysunkach 3 i 4 są dopełnieniem do jedności (100%) dystrybuanty $F(u_m)$ zmiennej losowej U_m , jaką jest wartość szczytowa przepięcia.



Rys.4. Prawdopodobieństwo przekroczenia wartości szczytowej przepięć fazowych i międzyfazowych przy ponownym załączeniu linii 400 kV [15]

Zastosoowanie symulacji probabilistycznych przy projektowaniu napowietrznych linii elektroenergetycznych

Niezawodna eksploatacja napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokich napięć uwarunkowana jest niezawodnością ich układów izolacyjnych. Zagadnienia te stanowią dwie grupy problemów, z których pierwsza dotyczy obszaru koordynacji izolacji, a druga wymiarowania wewnętrznych i zewnętrznych odstępów izolacyjnych linii elektroenergetycznych [13, 14, 16].

Celem koordynacji izolacji linii jest wybór zbioru standardowych napięć wytrzymywanych (probierczych) projektowanej linii zgodnie z normą [16], a także określenie odstępów minimalnych (tabela 1), zapewniających wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego linii w określonych warunkach narażeń napięciowych. Z kolei odstęp te, są podstawą dalszego wyznaczenia zarówno wewnętrznych, jak zewnętrznych odstępów izolacyjnych.

Punktem wyjścia jest określenie przepięć reprezentatywnych U_{rp} oraz napięć wytrzymywanych koordynacyjnych U_{cw} . Narażenia napięciowe, które są brane pod uwagę to: napięcie pracy ciągłej o częstotliwości sieciowej, przepięcia dorywcze, przepięcia o łagodnym czole oraz przepięcia o stromym czole. Dla każdego z tych narażeń wyznaczane są odpowiednie wartości U_{rp} i U_{cw} .

Tabela 1. Odstępy izolacyjne umożliwiające uniknięcie przeskoku [16]

Odstęp	Pomiędzy	Stosowany do	Rodzaj narażeń
D_{el}	Przewodami fazowymi a obiektami o potencjale ziemi	Izolacji zewnętrznej, 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	Izolacji wewnętrznej	Przepięcia częstotliwości sieciowej (w ekstremalnych warunkach wiatrowych)
$D_{50Hz-p-p}$	Przewodami fazowymi		

Istotnymi dla linii napowietrznych przepięciami o łagodnym czole są przepięcia ziemnozwarciowe oraz przepięcia przy załączeniu i powtórny załączeniu linii. Wartość szczytowa przepięcia reprezentatywnego może być albo założoną wartością maksymalną, albo wartością

wyznaczoną z rozkładów statystycznych, takich jak przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Według [16], dla przepięć o łagodnym czole, przepięcia reprezentatywne określane są na podstawie wartości $U_{e2\%-sf}$ dla przepięć faza-ziemia oraz $U_{p2\%-sf}$ dla przepięć faza-faza, które mogą być przekroczone z prawdopodobieństwem 2%:

$$(6) \quad P(U_m > U_{e2\%-sf}) = 0,02$$

$$(7) \quad P(U_m > U_{p2\%-sf}) = 0,02$$

Wartości $U_{e2\%-sf}$ oraz $U_{p2\%-sf}$ są z formalnego punktu widzenia kwantylami rzędu 0,98 odpowiednich rozkładów wartości szczytowych przepięć o łagodnym czole. Wyznaczone na podstawie wyników symulacji probabilistycznych wartości przepięć statystycznych zestawiono w tabeli 2. Podano w niej również wartości $U_{e2\%-sf}$ oraz $U_{p2\%-sf}$ wyznaczone dla przepięć ziemnozwarciowych, powstających w wyniku zwarć doziemnych w rozważanym układzie 400 kV.

Tabela 2. Wartości wyznaczonych przepięć

Izolacja	Ograniczniki przepięć	Przepięcia o łagodnym czole powstające przy		
		zwarcia doziemnym	załączeniu linii	ponownym załączeniu linii
Przepięcia statystyczne $U_{e2\%-sf}$, kV				
faza-ziemia	brak	734	765	1272
	na końcach linii	645	648	682
Przepięcia statystyczne $U_{p2\%-sf}$, kV				
faza-faza	brak	1115	1235	1903
	na końcach linii	1018	1169	1265

Z tabeli 2 wynika, że największe przepięcia o łagodnym czole powstają w efekcie powtórny załączenia linii, i to one powinny być podstawą wyznaczenia przepięć reprezentatywnych U_{rp} , które uzyskuje się przez pomnożenie wartości przepięcia statystycznego przez statystyczny współczynnik koordynacyjny K_{cs} [16]:

– dla izolacji faza-ziemia:

$$(8) \quad U_{rp} = K_{cs} U_{e2\%-sf}$$

– dla izolacji faza-faza:

$$(9) \quad U_{rp} = K_{cs} U_{p2\%-sf}$$

Ryzyko uszkodzenia układu izolacyjnego związane jest ze statystycznym współczynnikiem koordynacyjnym K_{cs} . W celu określania odstępów izolacyjnych, można przyjąć wartość K_{cs} równą 1,05, która odpowiada ryzyku uszkodzeń rzędu 10^{-3} . Jako minimalne odstęp D_{el} i D_{pp} oraz D_{50Hz} przyjmowane są wartości odstępów d , spełniające równanie:

$$(10) \quad U_{cw} = U_{rp}$$

Koordynacyjne napięcie wytrzymywane U_{cw} dla przepięć o łagodnym czole, jest kwantylem rzędu 0,1 statystycznego rozkładu wytrzymałości elektrycznej. Zakładając, że rozkład ten jest rozkładem normalnym o wartości oczekiwanej $U_{50\%}$ i odchyleniu standardowym σ , to napięcie U_{cw} można obliczyć z zależności [16]:

$$(11) \quad U_{cw} = U_{50\%} + z_{0,1}\sigma = U_{50\%}(1 + z_{0,1}\sigma_w)$$

$$(12) \quad U_{50\%} = K_a K_{g-sf} 1080 \cdot \ln(0,46d + 1)$$

w których: $U_{50\%}$ – pięćdziesięcioprocentowe napięcie przeskoku, $z_{0,1}$ – kwantyl rzędu 0,1 rozkładu normalnego unormowanego $N(0,1)$, σ – odchylenie standardowe, σ_w – względne odchylenie standardowe, K_a – współczynnik poprawkowy na wysokość nad poziomem morza, K_{g-sf} – współczynnik przerwy iskrowej dla przepięć o łagodnym czole (tabela 3), d – odstęp izolacyjny.

Tabela 3. Typowe wartości współczynników przerwy iskrowych dla linii elektroenergetycznych [16]

Rodzaj odstępu w powietrzu	Konfiguracja	K_{g-sf}
zewnątrzny	przewód-obiekt	1,30
	przewód-okno	1,25
wewnętrzny	przewód-konstrukcja	1,45
	przewód-przewód	1,60

Wykorzystując zależności (8) ÷ (12) otrzymuje się dla przepięć o łagodnym czole równanie, z którego następnie wyznacza się minimalny odstęp izolacyjny faza-ziemia D_{el} :

$$(13) \quad D_{el} = \frac{1}{0,46} \left\{ \exp \left[\frac{K_{cs} U_{e2\%-sf}}{K_a K_{g-sf} 1080 (1 + z_{0,1} \sigma_w)} - 1 \right] \right\}$$

Minimalny odstęp izolacyjny faza-faza D_{pp} oblicza się z zależności (13), przyjmując w miejsce $U_{e2\%-sf}$ wartości $U_{p2\%-sf}$. W tabeli 4 zestawiono wyznaczone w oparciu o przeprowadzone symulacje probabilistyczne minimalne odstępy izolacyjne rozważanej linii 400 kV.

Tabela 4. Minimalne odstępy izolacyjne linii elektroenergetycznej 400 kV dla przepięć o łagodnym czole

Rodzaj odstępu w powietrzu	Konfiguracja	Minimalny odstęp izolacyjny [m]	
		brak ograniczników	uwzględnienie ograniczników
zewnątrzny	przewód-obiekt	3,92	1,61
	przewód-okno	4,18	1,69
wewnętrzny	przewód-konstrukcja	3,31	1,40
	przewód-przewód	5,44	2,83

Należy zauważyć, że wielkość minimalnych odstępow silnie zależy jest od zastosowanych środków ochrony przepięciowej. Pełna analiza wymaga rozważenia minimalnych odstępow również dla przepięć o stromym czole oraz przepięć dorywczych. Minimalny odstęp izolacyjny, który należy zastosować, jest równy wartości większej spośród odstępow obliczonych ze względu na wytrzymałość na przepięcia piorunowe i przepięcia łączeniowe. Oczywiście do przepięć piorunowych również mogą być aplikowane odpowiednie metody statystyczne.

Podsumowanie

Realizacja podstawowego celu koordynacji izolacji uwarunkowana jest szeregiem czynników, wśród których szczególne miejsce zajmuje doskonalenie metod badań narażeń przepięciowych oraz poszukiwanie nowych algorytmów ich numerycznej identyfikacji. Metody teoretyczne analizy przepięć, wykorzystujące modele matematyczne tych zjawisk wraz z zastosowaniem komputerowej techniki obliczeniowej, są obecnie obszarem intensywnie rozwijanym.

Zastosowanie procedur statystycznych w koordynacji izolacji napowietrznych linii elektroenergetycznych, wymaga znajomości rozkładów statystycznych narażeń oraz wiarygodnych wartości ich parametrów. Ustalenie zarówno typu rozkładu, jak i estymacja wartości liczbowych jego parametrów, może być otrzymana dzięki modelowaniu

matematycznemu, komputerowym symulacjom oraz odpowiednim badaniom i analizom statystycznym. Rozwój procedur i metod badań numerycznych dla statystycznej oceny narażeń przepięciowych, ma istotne znaczenia dla uściślenia procedur projektowania oraz eksploatacji układów elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć.

Autorzy: dr inż. Mariusz Benesz, e-mail: mben@agh.edu.pl, dr hab. inż. Wiesław Nowak, prof. n., e-mail: wieslaw.nowak@agh.edu.pl, dr inż. Waldemar Szpyra, e-mail: wszpyra@agh.edu.pl, dr inż. Rafał Tarko, e-mail: rtarko@agh.edu.pl, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

LITERATURA

- [1] CIGRÉ Working Group 33-7, Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation, CIGRÉ Technical Brochure no 72
- [2] Praca zbiorowa (red. Koszałuk R.), Technika badań wysokonapięciowych, tom I (1985), WNT
- [3] Mestas P., Tavares M.C., Relevant Parameters in a Statistical Analysis—Application to Transmission-Line Energization, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 29, Issue 6, pp. 2605 - 2613, December 2014
- [4] Martinez J.A., Goldsworthy D., Horton R., Switching Overvoltage Measurements and Simulations—Part I: Field Test Overvoltage Measurements, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 29, Issue 6, pp. 2502 - 2509, December 2014
- [5] Bunov P, et al., Transmission line arresters application for control of switching overvoltages on 500-kV transmission line, T&D Conference and Exposition, 2014 IEEE PES
- [6] Nowak W., Tarko R., Komputerowe symulacje narażeń przepięciowych dla potrzeb wymiarowania odstępow izolacyjnych linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*. 2007, nr 3s, s. 165 - 186
- [7] Nowak W., Tarko R., Probabilistyczne symulacje narażeń przepięciowych w koordynacji izolacji linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, *Energetyka*. 2007, nr 12, s. 81 - 83
- [8] Nowak W., Tarko R., Symulacje komputerowe w statystycznej ocenie narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* z. 23, s. 77 - 80, Wydawnictwo Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2007
- [9] CIGRE WG 33-02, Guidelines for representation of network elements when calculating transients, CIGRE Technical Brochure no 39
- [10] Durbak D.W., et al., Modeling Guidelines for Switching Transients, Report Prepared by the Switching Transients Task Force of the IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group
- [11] Marti J.R., Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-101, 1982, pp. 147 - 155
- [12] IEEE The Working Group 3.4.11, Modeling of metal oxide surge arresters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, pp. 302 - 309, January 1992
- [13] Norma PN-EN 60071-1:2008P, Koordynacja izolacji -- Część 1: Definicje, zasady i reguły
- [14] Norma PN-EN 60071-2:2000P, Koordynacja izolacji - Część 2: Przewodnik stosowania
- [15] Benesz M., Zastosowanie metod statystycznych do poprawy jakości dostawy energii elektrycznej, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2014
- [16] Norma PN-EN 50341-1:2005P, Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV - Część 1: Wymagania ogólne - Specyfikacje wspólne (obecnie Norma wycofana i zastąpiona przez PN-EN 50341-1:2013-03E Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV - Część 1: Wymagania ogólne - Specyfikacje wspólne)