

ANALIZA MOŻLIWOŚCI USZKODZENIA APARATURY STACYJNEJ W WYNIKU WYŁADOWANIA ATMOSFERYCZNEGO DO LINII NAWIETRZNEJ O NAPIĘCIU 110 kV

Anna SOSNA, Mariusz BENESZ

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki
tel.: (12) 617-2599 e-mail: anna.sosna.1@gmail.com, mariusz.benesz@agh.edu.pl

Streszczenie: Artykuł ma na celu przybliżenie problemów związanych z napięciowymi narażeniami systemu elektroenergetycznego, wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi. Przeprowadzona została analiza możliwości uszkodzenia aparatury stacyjnej w wyniku wyładowania atmosferycznego do elementów linii napowietrznej zasilającej rozpatrywaną stację 110 kV/SN. Obliczenia przeprowadzono w ujęciu statystycznym na wybranym fragmencie linii elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 110 kV, składającej się z różnego typu sylwetek konstrukcji wsporczych, a także modelu stacji 110 kV/SN. Symulacje zostały wykonane przy użyciu programu The Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP).

Słowa kluczowe: przeskok odwrotny, zawodność ochrony odgromowej, przepięcia, modelowanie w EMTP-ATP.

1. WPROWADZENIE

Poprawny dobór układów izolacyjnych jest jednym z czynników decydującym o niezawodności i bezpieczeństwie systemu elektroenergetycznego. Dobry układ izolacyjny w trakcie „swojego życia” poddawany jest różnym narażeniom napięciowym, które można podzielić na narażenia napięciem roboczym i narażenia od przepięć. O ile układy izolacyjne są w stanie pracować przez pewien czas przy napięciu nieco wyższym od napięcia znamionowego, o tyle w przypadku wystąpienia przepięcia może dojść do ich uszkodzenia.

Zatem, dobór układu izolacyjnego jest wynikiem pewnych obliczeń, stanowiących kompromis pomiędzy zadowalającymi właściwościami elektrycznymi a rozsądnymi kosztami inwestycyjnymi. Obliczenia te są powiązane z zagadnieniami związanymi z m.in. szeroko rozumianą koordynacją izolacji, w szczególności z doбором wewnętrznych i zewnętrznych odstępów izolacyjnych [1-3]. Przykładowo dla urządzeń i aparatury elektrycznej o napięciu znamionowym 110 kV zalecany znamionowy poziom izolacji dla przepięć o stromym czole wynosi 450 kV (4,48 j.w.) lub 550 kV (5,48 j.w.) [1].

Wśród zakłóceń w pracy systemu elektroenergetycznego jednym z najgroźniejszych są przepięcia spowodowane bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi do elementów konstrukcyjnych napowietrznych linii elektroenergetycznych. W przypadku bezpośrednich wyładowań atmosferycznych brane są pod uwagę dwa możliwe scenariusze źródeł tych zakłóceń: zawodność ochrony odgromowej i zjawisko przeskoku

odwrotnego. Pierwszy scenariusz dotyczy sytuacji, w której pomimo zastosowanych przewodów odgromowych możliwe jest bezpośrednie wyładowanie atmosferyczne do przewodu fazowego. Drugi scenariusz dotyczy sytuacji utraty wytrzymałości elektrycznej zastosowanego układu izolacji. Rozważane scenariusze można powiązać z charakterystycznymi wartościami szczytowymi prądu wyładowania atmosferycznego: maksymalną wartością prądu, który może uderzyć w przewód fazowy (I_{BUmax}) oraz minimalną wartość prądu, który może spowodować przeskok odwrotny (I_{Pomin}). Pomiędzy tymi wartościami przyjmuje się, że ochrona odgromowa spełnia swoje zadania.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki analizy możliwości uszkodzenia aparatury stacyjnej rozdzielni 110 kV. Głównym celem przeprowadzanych analiz jest określenie poziomów narażeń napięciowych (spowodowanych bezpośrednim wyładowaniem atmosferycznym do linii zasilającej stację 110 kV/SN) w 2 charakterystycznych miejscach rozdzielni 110 kV (na podejściu do stacji oraz przy transformatorach). Poziomy narażeń określono w ujęciu statystycznym, przy uwzględnieniu dwóch scenariuszy bezpośredniego wyładowania atmosferycznego: zawodności ochrony odgromowej oraz zjawiska przeskoku odwrotnego.

2. ROZPATRYWANE SCENARIUSZE BEZPOŚREDNIEGO WYŁADOWANIA ATMOSFERYCZNEGO

2.1. Scenariusz pierwszy – zawodność ochrony odgromowej

Najczęściej stosowaną metodą analizy zawodności ochrony odgromowej jest metoda oparta na teorii elektrometrycznej. W myśl tej teorii definiuje się tzw. odległość decyzji, czyli odległość pomiędzy czołem lidera wyładowania piorunowego a elementem, do którego może nastąpić wyładowanie. Odległości decyzji (do przewodów i powierzchni ziemi) można określić na podstawie następujących zależności [4]:

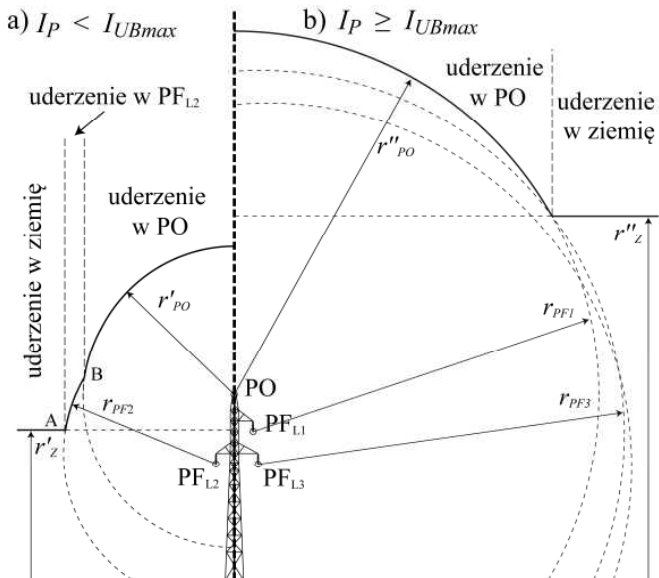
$$r_p = 10 \cdot I^{0,65} \quad (1)$$

$$r_z = k \cdot r_p \quad (2)$$

$$k = \begin{cases} 0,36 + 0,17 \cdot \ln(43 - h_{SR}) & \text{dla } h_{SR} < 40 \text{ m} \\ 0,55 & \text{dla } h_{SR} \geq 40 \text{ m} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie: r_P , r_Z – odległość decyzji wyładowania odpowiednio do przewodu (fazowego lub odgromowego) i do powierzchni ziemi [m], I – wartość szczytowa prądu wyładowania atmosferycznego [kA], h_{SR} – średnia wysokość zawieszenia przewodów na danej konstrukcji.

Interpretację graficzną teorii elektogeometrycznej dla dwóch wartości szczytowych prądu wyładowania atmosferycznego I_P przedstawiono na rysunku 1. W przypadku, gdy $I_P < I_{UBmax}$ (rysunek 1a) istnieje możliwość bezpośredniego wyładowania atmosferycznego do przewodów fazowych. Z kolei dla przypadku, gdy $I_P \geq I_{UBmax}$ (rysunek 1b) wyładowanie atmosferyczne następuje do przewodów odgromowych lub powierzchni ziemi.



Rys. 1. Graficzna interpretacja teorii elektogeometrycznej w przypadku: a) zawodności ochrony odgromowej; b) zachowanej ochrony odgromowej (konstrukcja wsporcza serii S24 typu P)

2.2. Scenariusz drugi – zjawisko przeskoku odwrotnego

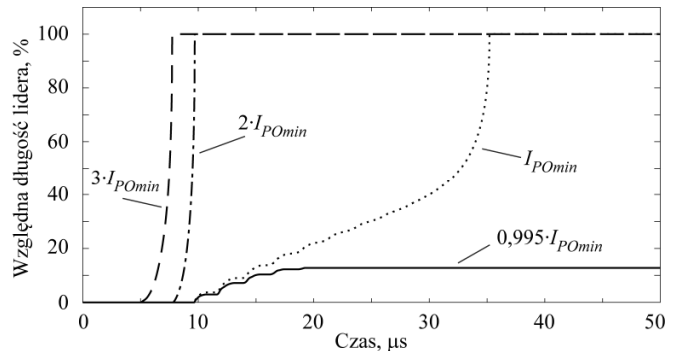
Obecnie najczęściej stosowanymi podejściami odwzorowującymi właściwości układu izolacyjnego (proces utraty wytrzymałości elektrycznej) są podejścia oparte na metodzie rozwoju lidera (ang. Leader Development Method - LDM). Metoda ta opiera się na zjawiskach fizycznych zachodzących podczas utraty wytrzymałości elektrycznych dużych odstępów izolacyjnych. W podejściu zaproponowanym przez Motoyama zakłada się, że czas utraty wytrzymałości elektrycznej jest określany jako suma dwóch składowych: czasu fazy strimerowej i czasu fazy liderowej, które można powiązać z zależnościami [5]:

$$\int_0^{T_S} u(t) dt = \begin{cases} 400 \cdot D + 50 & \text{dla biegunowości dodatniej} \\ 460 \cdot D + 150 & \text{dla biegunowości ujemnej} \end{cases} \quad (4)$$

$$v(t > T_S) = K \cdot u(t) \cdot [u(t) / (D - L(t)) - E_0] \quad (5)$$

gdzie: T_S – czas fazy strimerowej [s], $u(t)$ – wartość chwilowa napięcia na układzie izolacyjnym [kV], D – odstęp izolacyjny [m], K , E_0 – współczynniki zależnie od biegunowości i typu układu izolacyjnego (np. dla przerw powietrznych lub izolatorów długopniowych $K = 0,8$ lub $1,0$ [$m^2 MV^{-2} s^{-1}$] zaś $E_0 = 600$ lub 670 [kV/m] – odpowiednio dla biegunowości dodatniej i ujemnej)

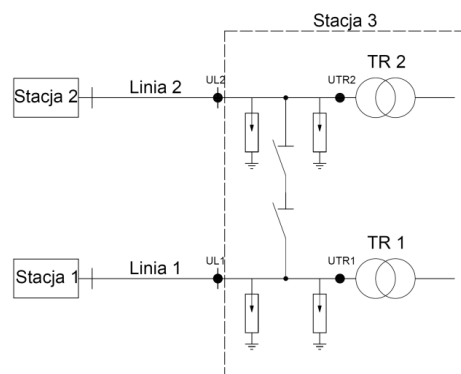
Charakterystyczną cechą zjawiska przeskoku odwrotnego jest, że pojawia się on po przekroczeniu pewnej minimalnej wartości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego I_{POmin} (rys. 2). Wartości I_{POmin} , jak i moment wystąpienia zjawiska przeskoku odwrotnego zależą od przyjętego kształtu prądu wyładowania atmosferycznego. W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych przyjęto kształt prądu w wklęsłym czole, o stałym czasie do półszczytu (równym $75 \mu s$) i zmiennym (uzależnionym od wartości szczytowej prądu) czasie do szczytu (na podstawie danych statystycznych zaczerpniętych z [6]).



Rys. 2. Graficzna interpretacja rozwoju lidera dla różnych wartości szczytowych wyładowania atmosferycznego

3. ANALIZOWANA SIEĆ O NAPIĘCIU 110 kV

Na rysunku 3 przedstawiono układ poddany analizie. Układ składa się z dwóch linii napowietrznych zasilających stację 110 kV/SN (Stacja 3). W przeprowadzonych analizach założono, że bezpośrednie wyładowania atmosferyczne następują do elementów linii 1. Linia ta składa się z 16 konstrukcji wsporczych serii S24 (w tym słupy przelotowe P jak i słupy mocne typu ON90, ON120 i ON150).



Rys. 3. Układ poddany analizie

4. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH ANALIZ

4.1. Charakterystyczne wartości szczytowe prądu wyładowania atmosferycznego.

Wartości prądu I_{BUmax} zostały określone na podstawie napisanego skryptu w programie Matlab, wyznaczającego wartości odległości decyzji r , przy której ochrona odgromowa jest zachowana (punkty A i B na rysunku 1a pokrywają się, mają te same współrzędne), a następnie opierając się na zależności (1) lub (2) określano szukaną wartość I_{BUmax} . Wartości prądu I_{BUmax} zostały określone dla każdej sylwetki konstrukcji wsporczej należących do

rozpatrywanej linii 1, a wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Zestawienie otrzymanych charakterystycznych wartości szczytowych prądu wyładowania atmosferycznego

Nr słupa	Typ słupa	I_{UBmax} [kA]	I_{POmin} [kA]
1	ON 120+2,5	10,69	140,3
2	P	13,02	123,7
3	ON 150+5	14,43	120,7
4	ON 90+5	14,86	110,6
5	P	13,02	109,5
6	ON 150+2,5	11,27	113,9
7	P-2	10,48	114,8
8	P	13,02	110,1
9	ON 150	8,66	109,1
10	P+5	21,67	104,5
11	P	13,02	110,5
12	ON 120+2,5	10,70	114,8
13	P-2	10,50	117,6
14	ON 120	8,19	115,9
15	ON 120+10	22,10	110,1
16	ON 120+5	13,70	174,9

Wartości I_{POmin} zostały określone na podstawie stworzonego modelu rozpatrywanego układu w programie symulacyjnym EMTP-ATP. Model stworzono w oparciu o wytyczne przedstawione m.in. w [3, 6, 7] i składa się z modeli cząstkowych odzwierciedlających właściwości poszczególnych elementów układu, takich jak:

- źródło napięcia przemiennego o częstotliwości sieciowej: w symulacjach uwzględniono kąt przesunięcia fazowego, dla którego otrzymano najmniejsze wartości I_{POmin} ;
- linie napowietrzne (przewody odgromowe i fazowe, konstrukcje wsporcze, łańcuchy izolatorów linii napowietrznej, uziemienie konstrukcji wsporczych): modele te oparto o profil podłużny linii 1;
- stacja elektroenergetyczna (urządzenia i aparaty elektroenergetyczne, tj. aparatura łączeniowa, przekładniki prądów i napięciowe, ograniczniki przepięć, izolatory wsporcze, transformatory): w symulacjach modele wyposażenia stacji przedstawiono jako elementy skupione L lub C;
- zjawiska fizyczne zachodzące w układzie (wyładowania atmosferyczne, wyładowanie iskrowe towarzyszące utracie wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego linii napowietrznej, zjawiska nieliniowe zachodzące w gruncie podczas przepływu prądu pioruna, zjawiska falowe zachodzące w linii napowietrznej i stacji elektroenergetycznej).

Wartości prądu I_{POmin} zostały określone dla każdej sylwetki konstrukcji wsporczej należących do rozpatrywanej linii 1, a wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 1.

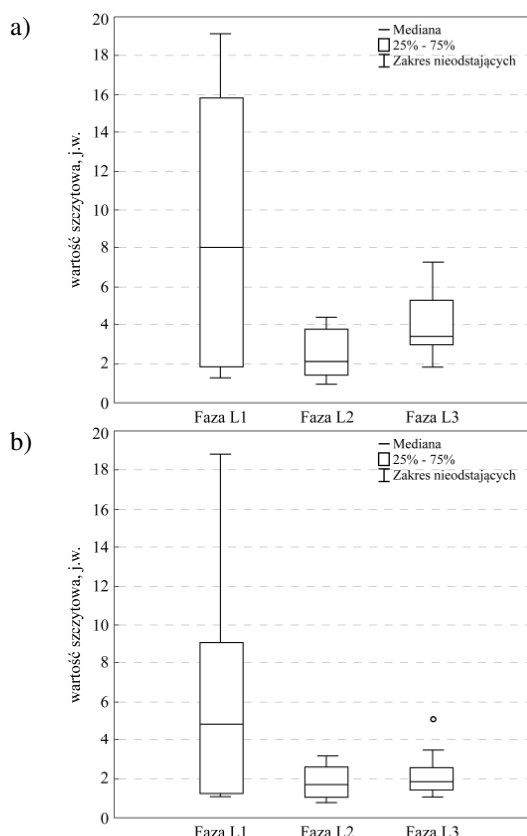
4.2. Poziomy narażeń napięciowych w rozdzielni 110 kV

Poziomy narażeń napięciowych (spowodowanych bezpośrednim wyładowaniem atmosferycznym do linii zasilającej stację 110 kV/SN) określono w ujęciu statystycznym w oparciu o otrzymane charakterystyczne wartości prądów I_{UBmax} i I_{POmin} (tablica 1) oraz stworzony model rozpatrywanego układu w programie symulacyjnym EMTP-ATP. Symulacje w Programie EMTP-ATP zostały przeprowadzone dla czterech wariantów zastosowania środków ochrony przeciwprzepięciowej stacji:

- brak ograniczników przepięć (wariant W1),
- pełna ochrona stacji - ograniczniki przepięć w polach liniowych i transformatorowych stacji (wariant W2),
- częściowa ochrona stacji - ograniczniki przepięć tylko w polach transformatorowych stacji (wariant W3),
- częściowa ochrona stacji - ograniczniki przepięć tylko w polach liniowych stacji (wariant W4).

Dodatkowo w każdym wariantcie rozważano przypadki otwartego i zamkniętego sprzęgła – odpowiednio oznaczenia a i b przy wariantach, oraz zakładano, że wyładowania atmosferyczne następują tylko i wyłącznie w linię 1 (w miejscach lokalizacji poszczególnych konstrukcji wsporczych).

W każdej przeprowadzonej symulacji zapisywane były ekstrema globalne obserwowanych przebiegów napięć fazowych, które zostały poddane analizie statystycznej (przy pomocy programu Statistica). Efektem przeprowadzonej analizy statystycznej było określenie wybranych statystyk opisowych, które pozwalają ująć zbiorczo położenie, rozproszenie i kształt rozkładu empirycznego badanej próbki – wartości szczytowych przepięć w wybranych punktach obserwacyjnych. Na rysunku 4 przedstawiono przykładową graficzną interpretację otrzymanej statystyki opisowej (wykres „Box and Whiskers”) dla wariantu W1 w punkcie UL1, zaś w tablicy 2 zestawiono wartości przepięć statystycznych $U_{p2\%}$ (kwantyle rzędu 0,98) dla rozważanych wariantów obliczeń i punktów obserwacji.



Rys. 4. Przykładowe wyniki analizy statystycznej narażeń napięciowych w punkcie UL1, dla wariantu: a) W1a; b) W1b

Otrzymane statystyki opisowe (rysunek 4 i tablica 2) ukazują dużą rozbieżność w poziomach narażeń napięciowych w poszczególnych fazach. Niezależnie od analizowanego wariantu obliczeń fazami najbardziej narażonymi na pojawienie się przepięć o wartościach przekraczających zalecane poziomy izolacji aparatury

Tablica 2. Otrzymane wartości przepięć statystycznych $U_{p2\%}$ (wartości pogrubione to sytuacja, gdy $U_{p2\%} \geq 4,48$ j.w.)

Punkt obliczeniowy	Wariant obliczeń							
	W1		W2		W3		W4	
	a	b	a	b	a	b	a	b
$U_{p2\%}$ w fazie L1, j.w.								
UL1	19,15	19,01	8,00	7,97	11,88	11,29	8,06	8,05
UL2	0,63	14,28	0,63	2,56	0,63	3,68	0,63	3,33
UTR1	23,95	15,20	3,21	2,70	3,87	3,20	4,15	3,39
UTR2	0,63	15,31	0,63	2,60	0,63	2,97	0,63	3,54
$U_{p2\%}$ w fazie L2, j.w.								
UL1	4,44	3,10	2,02	2,53	2,15	2,36	2,13	2,57
UL2	0,62	2,69	0,62	1,97	0,62	1,83	0,62	2,05
UTR1	4,80	2,72	2,62	1,87	2,40	1,75	2,74	1,96
UTR2	0,62	2,83	0,62	1,84	0,62	1,85	0,62	1,96
$U_{p2\%}$ w fazie L3, j.w.								
UL1	7,25	5,13	2,93	3,51	3,26	4,02	2,97	3,52
UL2	0,92	6,16	0,91	3,17	0,91	3,34	0,91	4,16
UTR1	7,91	6,32	3,24	2,81	3,24	3,14	3,77	4,10
UTR2	0,92	6,48	0,91	3,22	0,91	3,32	0,91	4,57

stacyjnej są fazy L1 i L3 – odpowiednio przewody fazowe najbliższej i najdalej położone względem przewodu odgromowego. Dla fazy L1 przepięcia są wynikiem zawodności ochrony odgromowej, zaś dla fazy L3 są wynikiem wystąpienia zjawiska przeskoaku odwrotnego.

Dodatkowo na rysunku 4 można zauważyć wpływ stanów pracy łącznika sekcyjnego. Przy zamkniętym łączniku uwidacznia się efekt samoochrony stacji, dla którego rozproszenie jak i wartości oczekiwane otrzymywanych przepięć w poszczególnych fazach są mniejsze w stosunku do sytuacji z otwartym łącznikiem.

Analizowane warianty obliczeń potwierdziły potrzebę stosowania środków ochrony przeciwprzepięciowej. Dla wariantu W1, wartości $U_{p2\%}$ kilkunastokrotnie przekraczają zalecane poziomy izolacji aparatury stacyjnej dedykowanych w sieciach 110 kV. Dla pozostałych wariantów, poziomy $U_{p2\%}$ są zdecydowanie mniejsze i tylko dla wariantu W4 w punkcie UTR2 otrzymano wartość $U_{p2\%}$ nieznacznie przekraczającą poziom izolacji równy 450 kV (4,48 j.w.).

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono wyniki analizy możliwości uszkodzenia aparatury stacyjnej w wyniku bezpośredniego wyładowania atmosferycznego. Analizy dokonano w dwóch charakterystycznych miejscach rozdzielni 110 kV oraz przy uwzględnieniu dwóch scenariuszy bezpośredniego wyładowania atmosferycznego do elementów konstrukcyjnych linii zasilającej stację. Analizowane zagadnienie jest przykładem czynności, które można powiązać z szeroko rozumianą koordynacją izolacji.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF DESTROYING SUBSTATION EQUIPMENT AS A RESULT OF A LIGHTNING DISCHARGES TO OVERHEAD POWER LINE

The purpose of this work is to present the problems related to voltage stresses (overvoltages) of the power system caused by atmospheric discharges. Two possible scenarios of sources of these disturbance in the overhead power lines were analyzed in the paper: shielding failure and backflash over phenomena. The possibility of damage to the station equipment as a result of atmospheric discharge to the elements of the overhead power line supplying the considered station 110 kV / MV was analyzed. For this purpose, the overvoltages levels in the 110 kV substation were determined for the characteristic peak values of lightning currents at which the lightning protection is failed or the electrical strength of the insulation system used is lost. The simulations were carried out using The Alternative Transients Program (EMTP-ATP).

Keywords: backflash over phenomena, overvoltages, shielding failure, EMTP-ATP.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Norma PN-EN 60071-1:2008/A1:2010 "Insulation co-ordination. Definitions, principles and rules".
2. Benesz M.: Zastosowanie metod statystycznych do poprawy jakości dostawy energii elektrycznej. Rozprawa Doktorska, Kraków 2014.
3. Benesz M., Nowak W., Szpyra W., Tarko T.: Application of statistical methods in insulation coordination of overhead power lines, Proceedings of the 18th international scientific conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republik, 17-19 May 2017.
4. IEEE Standard 1243-1997: IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines, 1997.
5. Motoyama H.: Experimental study and analysis of breakdown characteristics of long air gaps with short tail lightning impulse. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996;11(2), s. 972-979.
6. CIGRÉ Working Group 33-01 of Study Committee 33 Overvoltages and Insulation Coordination: Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. CIGRÉ Publication, No. 63, 1991.
7. Sosna A., Benesz M.: Analiza wpływu rodzaju konstrukcji wsporczej na zjawisko przeskoaku odwrotnego w liniach napowietrznych wysokich napięć. Zeszyty Naukowe wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej nr 60 Zastosowanie Komputerów w nauce i Technice 2018, s. 113-116, Gdańsk 2018.