

## ANALIZA WPLYWU RODZAJU KONSTRUKCJI WSPORCZEJ NA ZJAWISKO PRZESKOKU ODWROTNEGO W LINIACH NAPIOWIETRZNYCH WYSOKICH NAPIĘĆ

Anna SOSNA, Mariusz BENESZ

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki  
tel.: 12 617-36-53, e-mail: anna.sosna.1@gmail.com, mariusz.benesz@agh.edu.pl

**Streszczenie:** W pracy przeanalizowany zostanie jeden z możliwych scenariuszy powstawania narażeń napięciowych, a mianowicie wystąpienie zjawiska przeskoku odwrotnego. W scenariuszu tym w wyniku wyładowania atmosferycznego do uziemionych elementów konstrukcyjnych linii może dojść do utraty wytrzymałości elektrycznej zastosowanego łańcucha izolatorów. Rezultatem pracy jest określenie charakterystycznych wartości szczytowych prądu wyładowania atmosferycznego  $I_{P_{Omin}}$  powyżej, której na układzie izolacyjnym dochodzi do zjawiska przeskoku odwrotnego. Obliczenia przeprowadzono na wybranych sylwetkach konstrukcji wsporczych (typu przelotowego), stosowanych w liniach o napięciu nominalnym 110 kV, 220 kV i 400 kV. Uwzględniane sylwetki wsporcze (serii SL24, C3, H52, M52, Y25 i Z52) różnią się między sobą pod względem m.in. geometrii zawieszenia przewodów i wysokości.

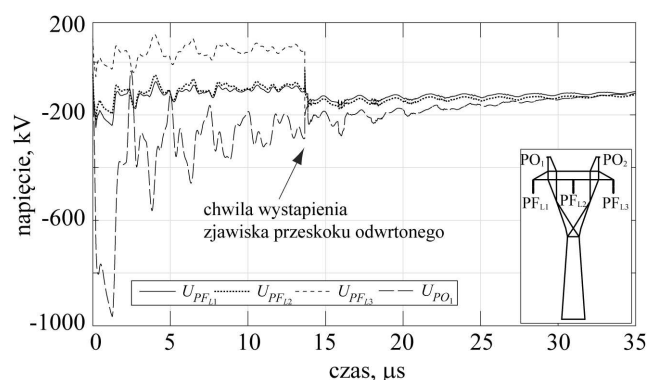
**Słowa kluczowe:** zjawisko przeskoku odwrotnego, metoda rozwoju lidera, modelowanie, EMTP-ATP.

### 1. WPROWADZENIE

Niezawodność systemów przesyłu i rozdziału energii elektrycznej zależy m.in. od postępów w identyfikacji narażeń napięciowych, którym poddawane są układy izolacyjne urządzeń i aparatów elektrycznych podczas ich pracy. Jednym z najistotniejszych zakłóceń (z punktu widzenia np. koordynacji izolacji czy doboru odległości bezpiecznych) są narażenia napięciowe wywołane bezpośrednim wyładowaniem atmosferycznym do elementów konstrukcyjnych linii napowietrznej [1]. Przy analizie tego typu narażenia napięciowego rozpatruje się w zasadzie dwa zagadnienia: zawodność ochrony odgromowej oraz zjawisko przeskoku odwrotnego. Przypadki te można powiązać z charakterystycznymi wartościami szczytowymi prądu wyładowania atmosferycznego: maksymalną wartością prądu wyładowania atmosferycznego, które może uderzyć w przewód fazowy ( $I_{BU_{max}}$ ) oraz minimalną wartość prądu wyładowania atmosferycznego, które powoduje wystąpienie zjawiska przeskoku odwrotnego ( $I_{P_{Omin}}$ ). Pomiędzy tymi wartościami zakłada się, że zastosowana ochrona odgromowa spełnia swoje zadania.

W przypadku analizy możliwości wystąpienia zjawiska przeskoku odwrotnego, rozpatruje się sytuację, w której wyładowanie atmosferyczne następuje do uziemionych elementów linii napowietrznej (konstrukcji wsporczej lub przewodów odgromowych). Efektem tego jest nagły i duży wzrost potencjału elektrycznego tych elementów względem ziemi i przewodów fazowych, co przy niekorzystnych

warunkach (m.in. skończonej wytrzymałości udarowej zastosowanego łańcucha izolatorów) może prowadzić do wystąpienia przeskoku odwrotnego. W takiej sytuacji następuje zrównanie się potencjałów elektrycznych przewodu fazowego (przewodów fazowych) z uziemionymi elementami konstrukcyjnymi linii. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe napięć podczas wystąpienia przeskoku odwrotnego na konstrukcji wsporczej serii H52, przy wartości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego równej 149,7 kA.

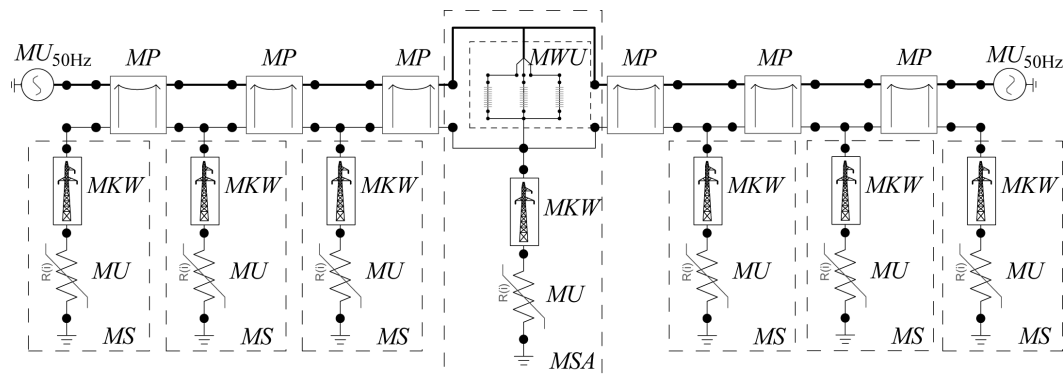


Rys. 1. Przykładowe przebiegi czasowe napięć przy wystąpieniu zjawiska przeskoku odwrotnego na konstrukcji wsporczej typu H52

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki analizy możliwości wystąpienia zjawiska przeskoku odwrotnego w linii napowietrznej wysokich napięć. Głównym celem przeprowadzanych analiz jest określenie charakterystycznej wartości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego ( $I_{P_{Omin}}$ ). Wartość tę określono w oparciu o metodę rozwoju lidera [2]. W przeprowadzonych analizach uwzględniono sylwetki konstrukcji wsporczych (serii SL24, C3, H52, M52, Y25 i Z52), które różnią się między sobą pod względem m.in. geometrii zawieszenia przewodów i wysokości.

### 2. UKŁAD DO SYMULACJI WYSTĄPIENIA ZJAWISKA PRZESKOKU ODWROTNEGO

W celu analizy możliwości wystąpienia zjawiska przeskoku odwrotnego należy opracować model matematyczny układu złożony z modeli cząstkowych. Modele te uwzględniają właściwości poszczególnych elementów linii elektroenergetycznych (przewody fazowe i odgromowe, konstrukcje wsporcze, układy łańcuchów izolatorów linii napowietrznej, uziemienie konstrukcji



Rys. 2. Układ do symulacji zjawiska przeskoku odwrotnego wykonany w programie EMTP-ATP

*MP* – model przęsała, *MS* – model konstrukcji, *MSA* – model konstrukcji, do której następowało wyładowanie atmosferyczne, *MWU* – model wytrzymałości udarowej łańcucha izolatorów, *MKW* – impedancja falowa konstrukcji wsporczej, *MU* – model uziomu, *MU<sub>50Hz</sub>* – model źródła napięcia częstotliwości sieciowej

wsporczych oraz źródła napięcia przemiennego o częstotliwości sieciowej) oraz zachodzące w układzie zjawiska fizyczne (wyładowanie atmosferyczne, wyładowanie iskrowe występujące przy utracie wytrzymałości elektrycznej na elementach izolacyjnych linii napowietrznych, zjawiska nieliniowe zachodzące w gruncie podczas przepływu prądu piorunowego oraz propagację fal przepięciowych). Na rysunku 2 przedstawiono opracowany w programie EMTP-ATP model do analizy zjawiska przeskoku odwrotnego w elektroenergetycznych liniach wysokiego napięcia [1,3].

### 3. ANALIZOWANE KONSTRUKCJE WSPORCZE

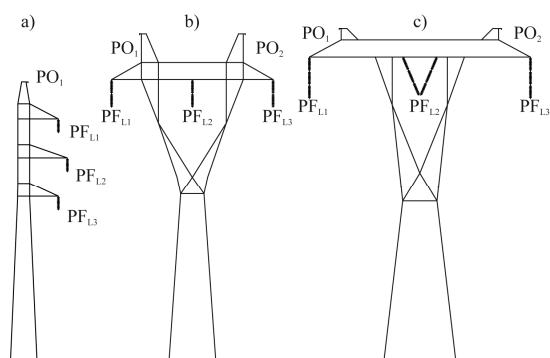
Analizę wystąpienia zjawiska przeskoku odwrotnego przeprowadzono dla spotykanych konstrukcji wsporczych linii napowietrznych o napięciu nominalnym 110 kV, 220 kV i 400 kV. Analizy dotyczyły konstrukcji wsporczych typu przelotowego stosowanych w liniach napowietrznych jedno- i dwutorowych. Sylwetki analizowanych konstrukcji wsporczych przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

### 4. WYNIKI PRZEPROWADZONEJ ANALIZY

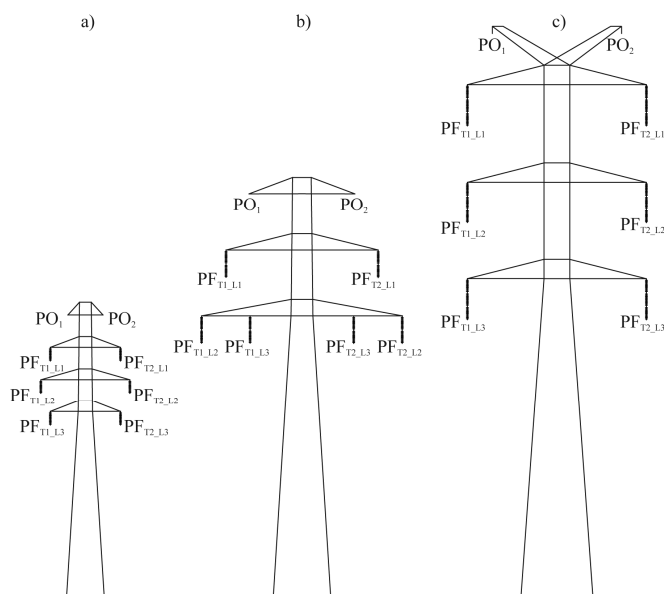
Analizy wystąpienia zjawiska przeskoku odwrotnego na izolacji linii napowietrznej o napięciu nominalnym 110 kV, 220 kV i 400 kV dokonano opierając się na modelu rozwoju lidera oraz uwzględniając opisany układ do symulacji wykonany w programie EMTP-ATP. Cechą charakterystyczną przeskoku odwrotnego jest to, że występuje on po przekroczeniu pewnej minimalnej wartości prądu wyładowania atmosferycznego  $I_{P0min}$ .

Nadrzędnym celem wykonanych symulacji było określenie wartości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego  $I_{P0min}$  powyżej, której układ izolacyjny traci swoje właściwości. Symulacje zostały przeprowadzone, dla każdej z rozpatrywanych konstrukcji wsporczych, przy następujących założeniach [1,3,4]:

- uwzględnieniu poziomu napięcia o częstotliwości sieciowej  $U_N$ ,
- uwzględnieniu kąta przesunięcia dwóch trójfazowych źródeł napięcia przemiennego, dołączonych do końcowych przęsał rozpatrywanego układu, w taki sposób, aby narażenie układu izolacyjnego było największe (wartość prądu powodującego wystąpienie przeskoku odwrotnego była najmniejsza).
- model wytrzymałości udarowej uwzględniano tylko na



Rys. 3. Sylwetki analizowanych konstrukcji wsporczych linii 1-torowych typu przelotowego serii: a) SL24; b) H52; c) Y25



Rys. 4. Sylwetki analizowanych konstrukcji wsporczych linii 2-torowych typu przelotowego serii: a) C3; b) M52; c) Z52

- konstrukcji wsporczej, do której następowało wyładowanie atmosferyczne.
- rozważono układ siedmiosłupowy, uwzględniając znamionowe długości przęsał dla poszczególnych konstrukcji wsporczych.
- model uziomu odwzorowano jako rezystancję nieliniową [1,4], w oparciu o przyjętą wartość rezystywności gruntu  $\rho_E = 200 \Omega m$  oraz rezystancji statycznej uziemienia  $R_{St} = 10 \Omega$  (dla  $U_N = 110 kV$ ) lub  $R_{St} = 15 \Omega$  (dla  $U_N = 220 kV$  i  $400 kV$ ).

- symulacje dotyczyły bezpośredniego uderzenia wyładowania atmosferycznego w konstrukcję wsporczą linii napowietrznej w chwili  $t = 0$  s.
- uwzględnieniu modelu kształtu prądu wyładowania atmosferycznego 2-wykładniczego (model *Cigre Type 15* w programie EMTP-ATP) o stałym czasie do półszczytu ( $75 \mu\text{s}$ ) i czasie do szczytu określanego na podstawie przyjętej wartości szczytowej prądu [4].

Wartości  $I_{P_{Omin}}$  powyżej, których układ izolacyjny traci swoje właściwości zestawiono w tabelicy 1. Na podstawie tych wartości można dostrzec wzrost wartości  $I_{P_{Omin}}$  wraz ze wzrostem napięcia nominalnego sieci.

Tabela 1. Minimalne wartości  $I_{P_{Omin}}$  (kA) powodujące wystąpienie zjawiska przeskoła odwrotnego.

Typ konstrukcji wsporczej					
SL24	H52	Y25	C3	M52	Z52
47,3	114,3	228,9	45,5	78,5	74,5

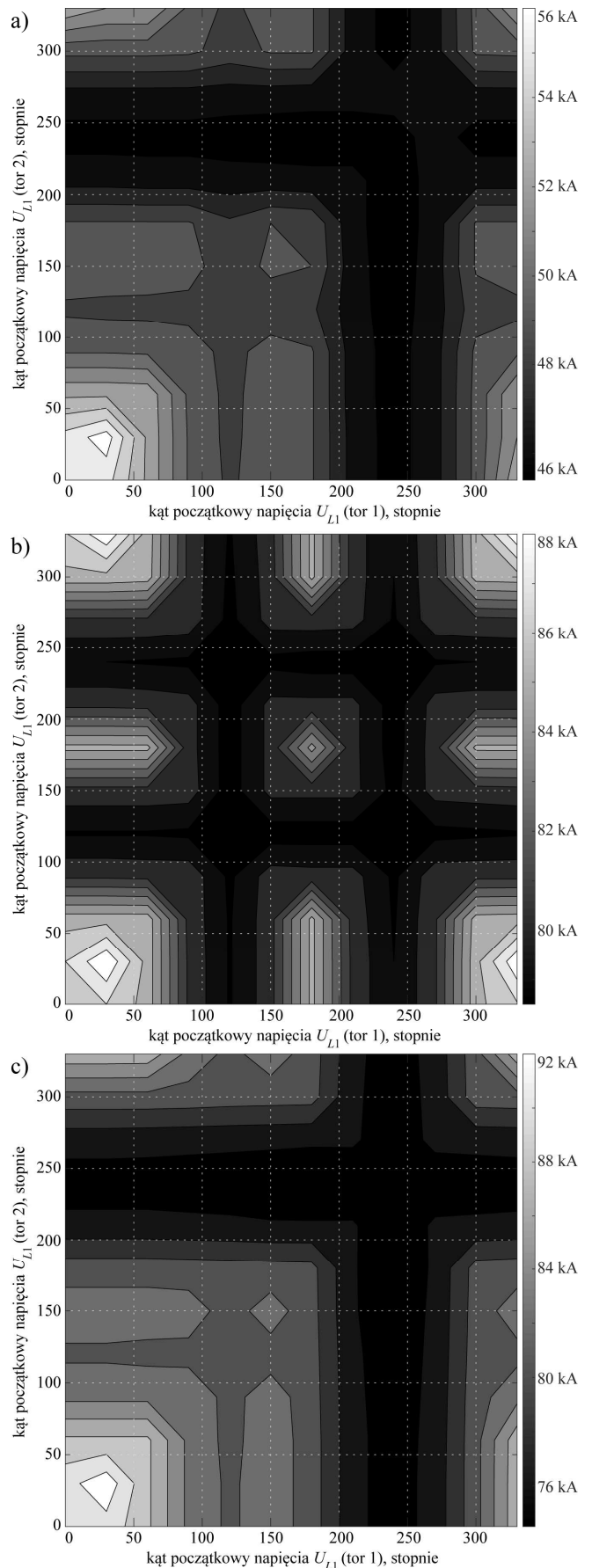
Przeprowadzone symulacje uwiarydliły duży wpływ wartości chwilowej napięcia w chwili wyładowania atmosferycznego na otrzymywane wartości  $I_{P_{Omin}}$ . Zależność tą sprawdzono poprzez zmianę kąta początkowego napięcia częstotliwości sieciowej trójfazowych źródeł napięcia przemiennego, dołączonych do końcowych przęseł rozpatrywanego układu (rys. 2). Zmian kąta początkowego napięcia (fazy L1) dokonano z krokiem co 30 stopni. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunkach 5 i 6, odpowiednio dla konstrukcji 2-torowych i 1-torowych.

Niezależnie od typu konstrukcji wsporczej (poziomu napięcia) w liniach jednotorowych minimalne wartości  $I_{P_{Omin}}$  otrzymano przy kącie początkowym napięcia  $U_{L1}$  równym  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  lub  $240^\circ$ , odpowiednio przy przeskołach odwrotnych w fazie L1, L2 i L3. W przeprowadzonych badaniach uwiarydliła się wpływ geometrii zawieszenia przewodów na fazę najbardziej narażoną na wystąpienie zjawiska przeskoła odwrotnego (o najmniejszej wartości  $I_{P_{Omin}}$ ). Dla sylwetki SL24 jest to faza L3, zaś dla sylwek H52 i Y25 są to fazy L1 lub L3.

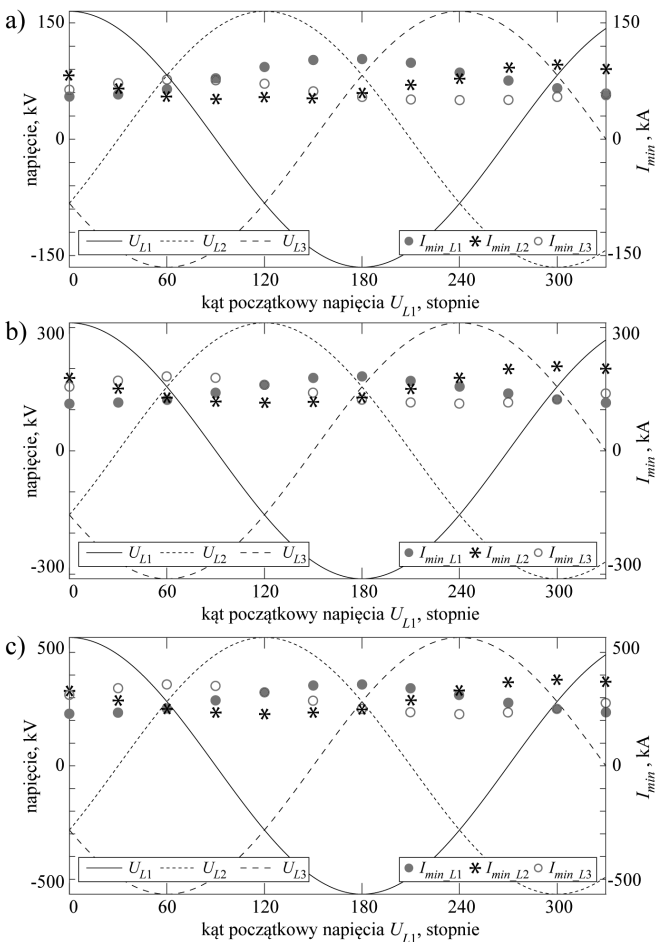
W przypadku linii dwutorowych również można zauważyć, że przewody fazy najbardziej narażonej to przewody faz najdalej położonych od przewodów odgromowych – w przypadku konstrukcji typu C3 i Z52 są to fazy L3, zaś dla konstrukcji typu M52 to fazy L2 lub L3. Podobnie jak przy konstrukcjach linii jednotorowych, również tutaj można określić kąty początkowe napięć  $U_{L1}$ , przy których otrzymać można minimalne wartości  $I_{P_{Omin}}$ . W przypadku układu zawieszenia przewodów pionowo (konstrukcje typu C3 i Z52) wartości  $I_{P_{Omin}}$  powinno się szukać przy kątach początkowych napięć  $U_{L1}$  w obu torach równych  $240^\circ$  (rys. 5), zaś dla układu zawieszenia trójkątnego (konstrukcja typu M52) – dla kombinacji kątów początkowych równych  $120^\circ$  i  $240^\circ$ .

W badaniach sprawdzono również wpływ rezystywności gruntu ( $\rho_E$ ) na wartości  $I_{P_{Omin}}$  (tab. 1) – przy założonej stałej rezystancji statycznej uziemienia  $R_{st}$ . Wartości rezystywności zmieniano w przedziale od 10 do 1000  $\Omega\text{m}$ . Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunku 7. Niezależnie od typu sylwetki wsporczej widoczny jest ten sam charakter zmian, przy czym dla sylwek 2-torowych zakres zmian jest mniejszy niż dla sylwek 1-torowych (uwiarydliła się wpływ wysokości poszczególnych sylwek). Dla niskich wartości  $\rho_E$  otrzymuje się wyższe wartości prądu wyładowania atmosferycznego (powodującego przeskoła).

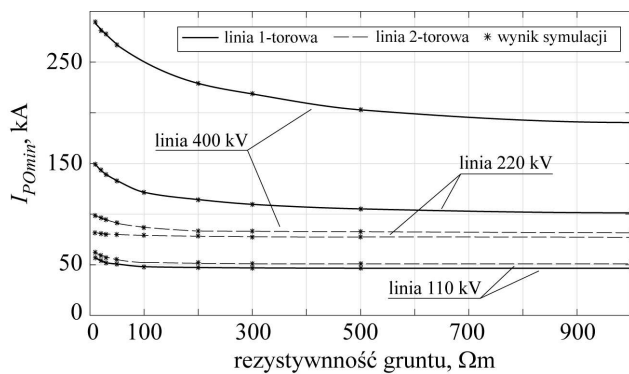
Przy pewnej wartości rezystywności  $\rho_E$  wartość  $I_{P_{Omin}}$  ustala się na jednym poziomie – dla wszystkich sylwek linii 2-torowych oraz sylwetki SL24 jest to wartość 100  $\Omega\text{m}$ , dla sylwetki H52 - 400  $\Omega\text{m}$ , zaś dla sylwetki Y25 - 900  $\Omega\text{m}$ .



Rys. 5. Wpływ wartości chwilowej napięcia o częstotliwości sieciowej na  $I_{P_{Omin}}$ , konstrukcje serii: a) C3; b) M52; c) Z52



Rys. 6. Wpływ wartości chwilowej napięcia o częstotliwości sieciowej na  $I_{P0min}$ , konstrukcje serii: a) SL24; b) H52; c) Y25



Rys. 7. Wpływ rezystywności gruntu na wartości  $I_{P0min}$

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki analizy zjawiska przeskoku odwrotnego w liniach napowietrznych o napięciu nominalnym 110 kV, 220 kV i 400 kV. Celem przeprowadzonych analiz było określenie charakterystycznej wartości szczytowej prądu wyładowania atmosferycznego  $I_{P0min}$ . W przeprowadzonych analizach uwzględniono wybrane konstrukcje wsporcze 1-torowe i 2-torowe.

Wartość  $I_{P0min}$  określono w oparciu o metodę rozwoju lidera. W tym przypadku przewodem najbardziej narażonym na wystąpienie zjawiska przeskoku odwrotnego (o najmniejszych wartościach  $I_{P0min}$ ) jest przewód fazy najdalej położonego względem przewodu odgromowego (przewody fazy L3). W rozpatrywanym scenariuszu uderzenia wyładowania atmosferycznego do elementów linii napowietrznej, duży wpływ na uzyskane wartości  $I_{P0min}$  ma układ zawieszenia przewodów (sylwetka konstrukcji).

Przedstawione zagadnienia analizy zawodności ochrony odgromowej oraz analizy wystąpienia przeskoku odwrotnego stanowią bardzo ważne kwestie m.in. w szeroko rozumianej koordynacji izolacji. Wyniki analiz mogą być przydatne przy określaniu m.in. poziomu narażeń napięciowych spowodowanych wyładowaniem atmosferycznym w różnych miejscach (węzłach) systemu elektroenergetycznego.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Benesz M.: Zastosowanie metod statystycznych do poprawy jakości dostawy energii elektrycznej. Rozprawy Doktorskie, Monografie - Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Wydawnictwa Naukowe AGH, 2017
2. 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
3. Tarko R, Benesz M, Nowak W.: Modelowanie i analiza przeskoku odwrotnego w układach izolacyjnych napowietrznych linii wysokiego napięcia. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 2009; 26; s. 113-116
4. CIGRE Working Group 33.01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination). Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission Lines. Technical bulletin 63, 1991.

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE TOWER TYPE ON BACK FLASHOVER PHENOMENA IN HIGH VOLTAGE OVERHEAD POWER LINES

Among the disturbances in the operation of the power system, one of the most important (from the point of view of e.g. insulation coordination or selection of clearances) are overvoltages caused by direct atmospheric discharge (lightning) to overhead power line structural elements. In the case of direct lightning, one possible scenarios of sources of these disturbance is considered: back flashover phenomena. In this case concerns the situation of loss of electrical strength of the insulation system used. The result of the work is to determine the peak value of lightning current  $I_{P0min}$ , above which in the insulation system is lost electric strength. Calculation were carried out on selected profiles of support structures, dedicated to electrical power system with rated voltage of 110 kV, 220 kV and 400 kV (single-circuit and double-circuit three phase line were considered) - 110 kV (SL24, C3), 220 kV (H52, M52) and 400 kV (Y25, Z52). The support structures differing in the geometry of the wire hanging and their heights. All simulation cases were performed using The Electromagnetic Transients Program - Alternative Transients Program (EMTP-ATP).

**Keywords:** back flashover phenomena, leader development method, modelling, EMTP-ATP.