

Obliczenia prądów płynących w uziemieniach słupów w czasie zwarć jednofazowych w liniach wysokiego napięcia

Streszczenie. Wartości prądów płynących w uziemieniach słupów elektroenergetycznych linii napowietrznych podczas zwarć jednofazowych są istotne dla oceny zagrożenia porażeniowego w otoczeniu linii. W artykule przedstawiono dwa modele do obliczania rozpyły tych prądów. Pierwszy z nich to dokładny model wielofazowy, natomiast drugi jest jego uproszczeniem do modelu jednofazowego. Przedstawiono również wyniki obliczeń wartości prądów płynących w uziemieniach słupów linii 110 kV podczas zwarć jednofazowych.

Abstract. The values of the currents flowing in earthing system of overhead line towers during single-phase faults are important for assessing the risk of electric shock in neighborhood of the line. The article presents two models to calculate these currents. The first is accurate, multiphase model, while the second is its simplification to a single-phase model. Results of calculations of currents flowing in towers earthing system during single-phase faults in 110 kV overhead line are also presented in the article. (**Calculation of currents flowing in the towers earthing system during single-phase faults in high voltage overhead lines.**)

Słowa kluczowe: linie napowietrzne wysokich napięć, uziemienia słupów, zwarcia jednofazowe.

Keywords: high voltage overhead lines, tower earthing systems, single-phase short-circuits.

Wprowadzenie

Znajomość wartości prądów płynących w uziemieniach słupów napowietrznych linii wysokich napięć podczas zwarć doziemnych jednofazowych, ma istotne znaczenia dla oceny zagrożenia porażeniowego ludzi i zwierząt [1, 2]. Pomimo, że obliczenia zwarciowe uznawane są za jedne z prostszych obliczeń systemów elektroenergetycznych, to ścisły opis matematyczny zjawisk zachodzących przy zwarciach jest zagadnieniem złożonym [3, 4]. Z tego powodu w obliczeniach praktycznych, szczególnie w obliczeniach normatywnych, z natury rzeczy muszą być przyjmowane założenia upraszczające. Z drugiej strony, popełniane są również błędy, przy czym jednym z częstszych jest brak rozróżnienia pomiędzy prądem w miejscu zwarcia, a prądem zwarciowym przepływającym przez dany element sieci, np. słup linii elektroenergetycznej.

W artykule przedstawiono problematykę obliczania prądów płynących w uziemieniach słupów napowietrznych linii wysokich napięć podczas zwarć jednofazowych do konstrukcji wsporczych. Zaproponowano dwa modele obliczania tych prądów:

- 1) model wielofazowy stworzony w oparciu o program komputerowy *EMTP-ATP*,
- 2) model jednofazowy, będący uproszczeniem modelu wielofazowego.

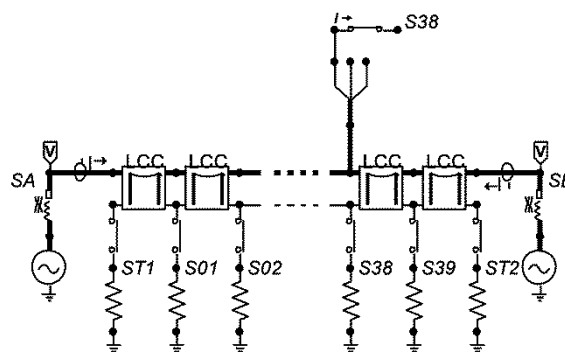
Przedstawiono również przykładowe wyniki obliczeń prądów w uziemieniach linii 110 kV oraz ocenę zasadności zastosowania modelu uproszczonego w zastosowaniu do linii z jednym oraz z dwoma przewodami odgromowymi.

Modele do wyznaczania prądów w uziomach

Model wielofazowy elektroenergetycznej linii napowietrznej stworzony został w oparciu o program komputerowy *EMTP-ATP* (ElectroMagnetic Transients Program – Alternative Transients Program) [5]. Przykładową strukturę modelu wybranej linii 110 kV przedstawiono na rysunku 1. Składa się z on z trzech zasadniczych części:

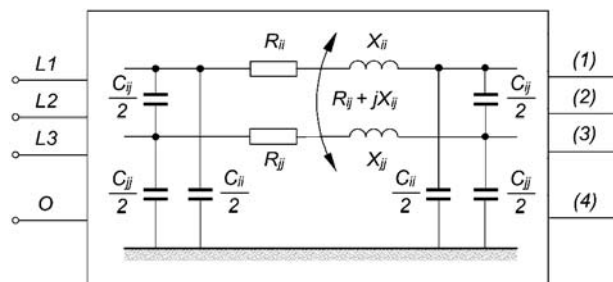
- 1) modelu linii, który stanowi czterdzieści kaskadowo połączonych bloków *LCC*, będących modelami 38 przęseł oraz 2 podejść do rozdzielni na obu końcach linii, a także czterdzieści rezystorów przyłączonych do węzłów *ST1*, *S01÷S39*, *ST2* – rezystory te odwzorują uziemienia stacji oraz słupów i są przyłączone do przewodu odgromowego,

- 2) modeli systemów zasilających 110 kV SA i SB, będących szeregowym połączeniem źródeł napięciowych oraz elementów odwzorowujących impedancje zwarciowe systemów dla składowej symetrycznej zgodnej oraz zerowej,
- 3) modelu zwarcia, przyłączanego do danego słupa (na rysunku 1 jest to słup nr 38).

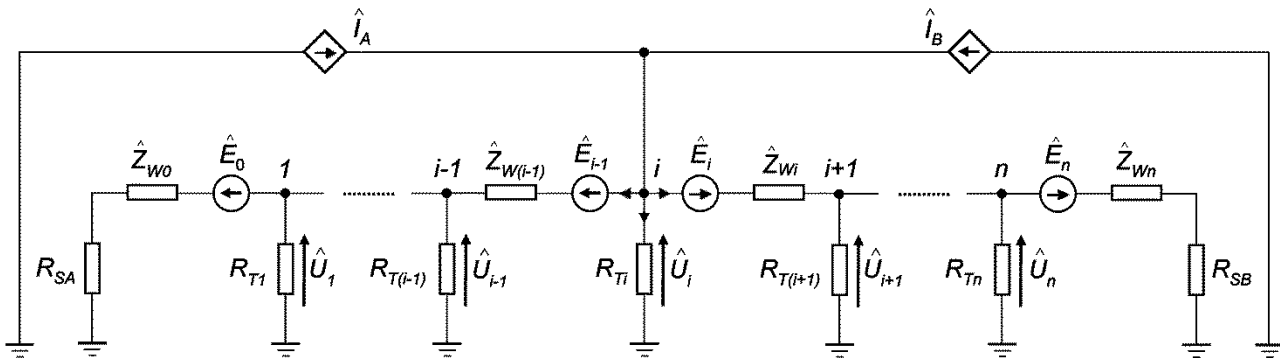


Rys. 1. Przykładowy schemat modelu wielofazowego jednotorowej linii elektroenergetycznej z jednym przewodem odgromowym

Model wielofazowy pozwala wyznaczyć wartości prądów płynących w uziemieniach linii elektroenergetycznych o dowolnych konfiguracjach przewodów. Nie istnieją przy tym żadne ograniczenia co do liczby torów i przewodów odgromowych, ich konstrukcji a także rozmieszczenia w przestrzeni, liczby i długości przęseł, itp. Modelami przęseł są sprzężone pojemnościowo i magnetycznie czwórniki typu II (rys. 2), których parametry określone są przez program na podstawie danych konstrukcyjnych linii.



Rys. 2. Model przęśla jednotorowej linii elektroenergetycznej z jednym przewodem odgromowym w postaci czwórnika typu II



Rys. 3. Schemat modelu jednofazowego linii elektroenergetycznej z jednym przewodem odgromowym

Model jednofazowy jest z założenia modelem o dużej dokładności obliczeń, stanowi jednak istotne uproszczenie modelu wielofazowego. Dla modelu jednofazowego przyjęto następujące założenia:

- uwzględnia się tylko przewód fazowy dotknięty zwarciem oraz przewody odgromowe,
- miejsce zwarcia jest zasilane prądowo, przy czym wartości prądów zwarciovych wyznaczone są w oparciu o stosowaną powszechnie metodę normatywną,
- model składa się z n przęseł, przy czym do przęseł zaliczane są również podejścia linii do stacji.

Schemat modelu jednofazowego dla linii z jednym przewodem odgromowym przedstawiono na rysunku 3.

Analiza schematu modelu z rysunku 3 może zostać przeprowadzona w oparciu o metodę napięć węzłowych, które stanowią zbiór $n-1$ napięć na uziemieniach $\hat{U}_1, \dots, \hat{U}_{n-1}$. W metodzie tej zapisywane są równania bilansów prądowych dla poszczególnych punktów przyłączenia uziemień słupów do przewodu odgromowego. Równania te w postaci macierzowej mają następującą postać:

$$(1) \quad \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{I}$$

gdzie: \mathbf{Y} – macierz admitancyjna węzłowa, \mathbf{U} – wektor napięć węzłowych, \mathbf{I} – wektor prądów

$$(2) \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \hat{Y}_{W1} & \hat{Y}_{M1} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \hat{Y}_{M1} & \hat{Y}_{W2} & \hat{Y}_{M2} & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \hat{Y}_{Wj} & \hat{Y}_{Mj} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \hat{Y}_{Mj} & \ddots & \ddots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \hat{Y}_{W(n-1)} & \hat{Y}_{M(n-1)} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \hat{Y}_{M(n-1)} & \hat{Y}_{Wn} \end{bmatrix}$$

$$(3) \quad \hat{Y}_{W1} = \frac{1}{R_{SA} + \hat{Z}_{W0}} + \frac{1}{R_{T1}} + \frac{1}{\hat{Z}_{W1}}$$

$$(4) \quad \hat{Y}_{Wj} = \frac{1}{\hat{Z}_{W(j-1)}} + \frac{1}{R_{Tj}} + \frac{1}{\hat{Z}_{W(j+1)}}, \quad j = 2, \dots, n-1$$

$$(5) \quad \hat{Y}_{Wn} = \frac{1}{\hat{Z}_{W(n-1)}} + \frac{1}{R_{Tn}} + \frac{1}{\hat{Z}_{Wn} + R_{SB}}$$

$$(6) \quad \hat{Y}_{Mj} = -\frac{1}{\hat{Z}_{Wj}}, \quad j = 1, \dots, n$$

gdzie: \hat{Z}_W – impedancja własna odcinka przewodu odgromowego o długości jednego przęsła, R_T – rezystancja uziemienia słupa, R_S – rezystancja uziemienia stacji.

$$(7) \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \vdots \\ \hat{U}_j \\ \vdots \\ \hat{U}_{n-1} \\ \hat{U}_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \\ \vdots \\ \hat{I}_j \\ \vdots \\ \hat{I}_{n-1} \\ \hat{I}_n \end{bmatrix}$$

$$(8) \quad \hat{I}_1 = -\frac{\hat{E}_0}{R_{SA} + \hat{Z}_{W0}} + \frac{\hat{E}_1}{\hat{Z}_{W0}}$$

$$(9) \quad \hat{I}_j = \begin{cases} -\frac{\hat{E}_{j-1}}{\hat{Z}_{W(j-1)}} + \frac{\hat{E}_j}{\hat{Z}_{Wj}} & \text{dla } j = 2, \dots, i-1 \\ -\frac{\hat{E}_{j-1}}{\hat{Z}_{W(j-1)}} - \frac{\hat{E}_j}{\hat{Z}_{Wj}} + \hat{I}_A + \hat{I}_B & \text{dla } j = i \\ \frac{\hat{E}_{j-1}}{\hat{Z}_{W(j-1)}} - \frac{\hat{E}_j}{\hat{Z}_{Wj}} & \text{dla } j = i+1, \dots, n-1 \end{cases}$$

gdzie: \hat{I}_A, \hat{I}_B – prądy zwarciovie dopływające od stacji A i B do miejsca zwarcia, \hat{E} – siła elektromotoryczna indukowana w przewodzie odgromowym przez prądy zwarciovie płynące w przewodach fazowych,

$$(10) \quad \hat{E}_j = \begin{cases} \hat{Z}_{Mj} \hat{I}_A & \text{dla } j < i-1 \\ \hat{Z}_{Mj} \hat{I}_B & \text{dla } j \geq i \end{cases}$$

gdzie: \hat{Z}_M – impedancja wzajemna pomiędzy przewodem fazowym a przewodem odgromowym o długości jednego przęsła.

W przypadku linii z dwoma przewodami odgromowymi zastępuje się je jednym przewodem w następujący sposób:

- wartości impedancji \hat{Z}_W przyjmuje się dwukrotnie mniejsze,
- wartości impedancji \hat{Z}_M wyznacza się dla uśrednionego geometrycznie odstęp pomiędzy przewodami odgromowymi i przewodem fazowym,
- zaniebuje się oddziaływanie (sprężenie) pomiędzy przewodami odgromowymi.

Prądy płynące w uziemieniach \mathbf{I}_U wyznacza się przez obliczenie z równania (1) napięć węzłowych \mathbf{U} i podzielenie ich przez wartość rezystancji uziemienia słupów R_T :

$$(11) \quad \mathbf{I}_U = \text{diag}\left(\frac{1}{R_{T1}}, \dots, \frac{1}{R_{Tn}}\right) \cdot \mathbf{Y}^{-1} \cdot \mathbf{I}$$

Impedancje zwarciovne własne i wzajemne

Impedancje podłużne (zwarciovne) wyznaczane są w oparciu o teorię obwodów ziemnopowrotnych [6]. Podstawowym założeniem jest, że przewód jest nieskończenie długi i równoległy do powierzchni ziemi oraz, że ziemia jest przewodnikiem jednorodnym.

Impedancja własna \hat{Z}_W przewodu linii jest równa sumie impedancji wewnętrznej \hat{Z}_{in} oraz impedancji zewnętrznej \hat{Z}_{ex} [6]:

$$(12) \quad \hat{Z}_W = \hat{Z}_{in} + \hat{Z}_{ex}$$

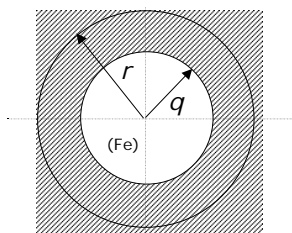
Impedancja wewnętrzna posiada część rzeczywistą, którą stanowi rezystancja przewodu R_{in} oraz część urojona, będącą reaktancją wewnętrzną przewodu X_{in} :

$$(13) \quad \hat{Z}_{in} = R_{in} + jX_{in}$$

Jednostkowa reaktancja wewnętrzna przewodu walcowego nie zależy od jego wymiarów i wynosi:

$$(14) \quad X'_{in} = \frac{\omega\mu}{8\pi} \cdot 10^3, \quad \Omega/\text{km}$$

gdzie: μ – przenikalność magnetyczna materiału przewodu, ω – pulsacja prądu. Reaktancja wewnętrzna przewodu typu AFL wyznaczana jest tak, jak dla przewodu rurowego – rysunek 4.



Rys. 4. Wymiary geometryczne przewodu rurowego

Jednostkowa reaktancja wewnętrzna przewodu rurowego jest określona zależnością:

$$(15) \quad X'_{in} = \frac{\mu_0\omega}{2\pi} \left[\frac{q^4}{(r^2 - q^2)^2} \ln \frac{r}{q} - \frac{3q^2 - r^2}{4(r^2 - q^2)} \right] \cdot 10^3, \quad \Omega/\text{km}$$

gdzie: q, r – wymiary geometryczne przewodu.

Jednostkowa impedancja zewnętrzna może być wyznaczona z zależności:

$$(16) \quad Z'_{ex} = \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\pi}{4} + j \ln \frac{1,85}{r_o \sqrt{\frac{\mu_0\omega}{\rho}}} \right) \cdot 10^3, \quad \Omega/\text{km}$$

gdzie: ρ – rezystywność gruntu, $\Omega \cdot \text{m}$, r_o – promień przewodu, m.

Jednostkowa impedancja wzajemna pomiędzy dwoma przewodami linii może być wyznaczona z zależności [6]:

$$(17) \quad Z'_M \approx \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \left(\frac{\pi}{4} + j \ln \frac{1,85}{\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}} \cdot D} \right) \cdot 10^3, \quad \Omega/\text{km}$$

gdzie: D – odstęp pomiędzy przewodami, m.

Znając impedancje własne i wzajemne linii można przy określonych założeniach wyznaczyć impedancje linii dla składowych symetrycznych. Zagadnienia te są szczegółowo przedstawione w publikacjach [3, 6].

Analiza prądów w uziomach linii 110 kV

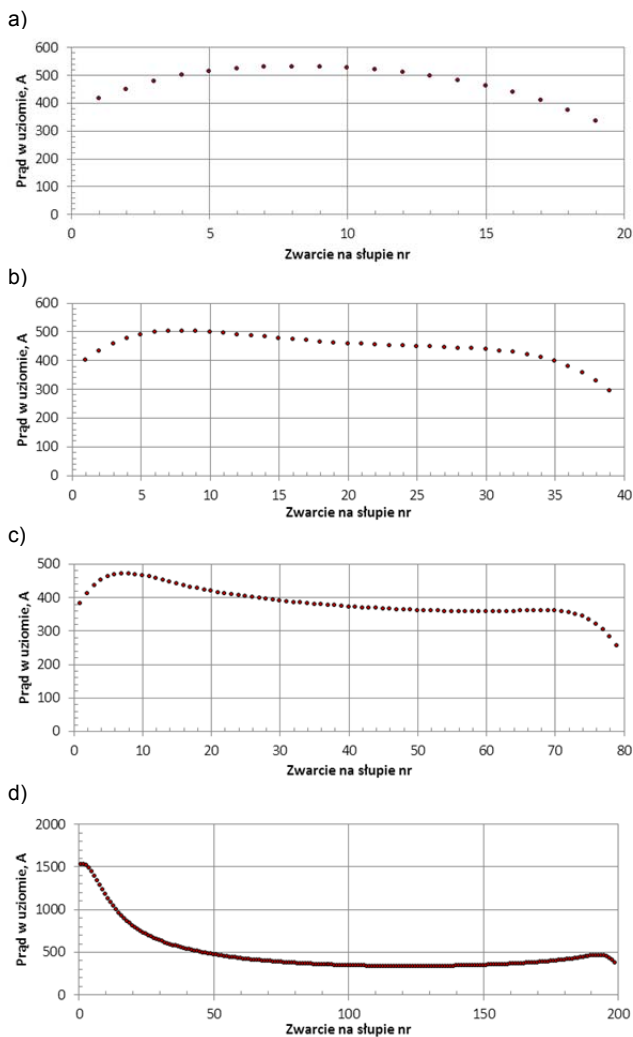
Zastosowanie zaproponowanych modeli matematycznych elektroenergetycznej linii napowietrznej, do wyznaczania spodziewanych wartości prądów płynących w konstrukcjach wsporczych podczas zwarc doziemnych w liniach napowietrznych, jest obarczone pewnym błędem, wynikającym z przyjętych założeń oraz uproszczeń. W celu oceny możliwości wykorzystania tych modeli w praktycznych obliczeniach prądów płynących w uziemieniach, przeprowadzono wielowariantową analizę oraz wyznaczono względne błędy obliczonych wartości prądów. Wykazała ona, że modele wielofazowe i modele jednofazowe linii napowietrznych z jednym przewodem odgromowym dają praktycznie identyczne wartości prądów płynących w uziemieniach.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń prądów płynących w uziemieniach, w postaci wykresów wartości skutecznych prądów płynących w uziemieniach słupów ze zwarciem w funkcji lokalizacji zwarcia. Dotyczą one jednotorowej linii napowietrznej 110 kV z jednym przewodem odgromowym prowadzonej na słupach serii B2. Przewody fazowe są wykonane z linki AFL-6 240 mm², natomiast przewody odgromowe – AFL-1,7 70 mm². Założono ponadto, że rezystancje uziemienia wszystkich słupów są jednakowe na całej długości linii. Takie samo założenie przyjęto również dla rezystancji uziemień stacji A i B. Stosunki X_0/X_1 w rozdzielniach A i B założono na poziomie 2. Pozostałe parametry sieci wybranych analizowanych wariantów zestawiono w tabeli 1.

Tabela. 1. Parametry sieci elektroenergetycznej dla analizowanych wariantów

Parametr	Wariant			
	1	2	3	4
Długość linii, km	5	10	20	50
Średnia długość przęsła, m	250	250	250	250
Liczba przęsła, szt.	20	40	80	200
Rezystancja uziemienia słupów, Ω	10	10	10	10
Rezystancja uziemienia stacji, Ω	0,5	0,5	0,5	0,5
Moc zwarciovna systemu A, MVA	2000	2000	2000	10000
Moc zwarciovna systemu B, MVA	1000	1000	1000	2000

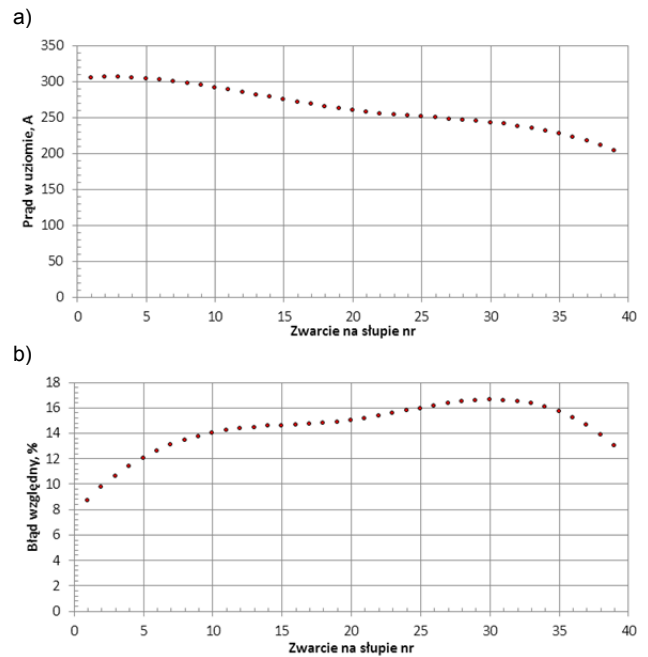
Ponieważ największa spodziewana wartość prądu doziemnego w uziemieniu słupa występuje podczas jednofazowego zwarcia na tym właśnie słupie, analizowano tylko takie przypadki.



Rys. 5. Wartości prądów w uziemieniach słupów w czasie zwarcia jednofazowych: a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3, d) wariant 4

Ponieważ w liniach z dwoma przewodami odgromowymi, na etapie wyznaczania parametrów charakterystycznych linii (impedancji własnych i wzajemnych przewodów odgromowych), wprowadza się pewne założenia upraszczające, model jednofazowy nie jest idealnie zbliżony z dokładnym modelem wielofazowym. Wynika to z założenia o jednakowej impedancji wzajemnej pomiędzy przewodem fazowym dotkniętym zwarcie a przewodami odgromowymi, a także z pominięcia wzajemnego oddziaływania magnetycznego pomiędzy przewodami odgromowymi.

W celu pokazania możliwości zastosowania proponowanych modeli obliczeniowych, na rysunku 6 porównano wyniki otrzymane dla linii z dwoma przewodami odgromowymi (prowadzonymi na słupach serii OS24) dla danych jak w wariantcie 1. Należy zauważyć, że model jednofazowy w stosunku do modelu wielofazowego, wprowadza błąd na poziomie kilkunastu procent. Nasuwa się więc wniosek, że prądy płynące w uziemieniach słupów w liniach wyposażonych w dwa przewody odgromowe, powinny być wyznaczane przy pomocy modelu wielofazowego.



Rys. 6. Wartości prądów w uziemieniach słupów w czasie zwarcia jednofazowych w dwutorowej w linii z dwoma przewodami odgromowymi (a) oraz błędy względne modelu jednofazowego odniesione do wyników z modelu wielofazowego (b)

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że do wyznaczenia prądów w uziemieniach napowietrznych linii elektroenergetycznych z jednym przewodem odgromowym, może mieć zastosowanie zarówno model wielofazowy, jak i jednofazowy. Natomiast do wyznaczania prądów płynących w uziemieniach linii z dwoma przewodami odgromowymi rekomenduje się zastosowanie modelu wielofazowego. Należy podkreślić, że stosowane w praktyce, dalsze uproszczenia modelu jednofazowego są niedopuszczalne i prowadzą do wyników obciążonych istotnym błędem.

Autorzy:

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, dr inż. Mariusz Benez, e-mail: mben@agh.edu.pl, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki

LITERATURA

- [1] Czapp S. i inni, Kłopotliwy przypadek ochrony przeciwporażeniowej w linii elektroenergetycznej o napięciu 110 kV, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 91 NR 3/2015, s. 171-174
- [2] Klucznik J., Czapp S., Computer aided calculations of earth potential raise in high voltage overhead lines, The International Conference on Information and Digital Technologies 2015, Žilina, 7-9 July 2015, pp. 139-144, DOI:10.1109/DT.2015.7222964
- [3] Kacejko P., Machowski J., Zwarcia w systemach elektroenergetycznych (wyd. 3), WNT, Warszawa 2012
- [4] Klucznik J., Lubośny Z., Dobrzyński K., Obliczenia rozptyłu prądów zwarciovych w przewodach odgromowych linii WN, *Acta Energetica* (Konferencja APE '15 *Aktualne problemy w elektroenergetyce*, Jastrzębia Góra, 17-19 czerwca 2015), zeszyt 1, s. 122 - 118, 2015
- [5] *Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book*. Bonneville Power Administration. Portland, Oregon, United States of America, 1995
- [6] Krakowski M., Obwody ziemnopowrotne, WNT, Warszawa 1979