

Wpływ sposobu wyznaczania parametrów linii 110 kV na dokładność obliczeń sieciowych

Streszczenie. Elektroenergetyczna linia napowietrzna prądu przemiennego służy do przesyłania energii elektrycznej pomiędzy dwoma punktami sieci elektroenergetycznej. Składa się z przewodów, izolatorów, konstrukcji wsporczych i osprzętu. Linia elektroenergetyczna charakteryzowana jest przez rezystancję, reaktancję, susceptancję i konduktancję. Artykuł ma na celu wykazanie jak zmiany w sposobie modelowania linii wpływają na obliczenia techniczne w energetyce min. rozptyły mocy, obliczenia zwarciove oraz nastawy zabezpieczeń linii elektroenergetycznych. Autorzy chcą znaleźć odpowiedź na pytanie, jak duży jest ten wpływ i czy dodatkowy nakład pracy związany z dokładnym modelowaniem linii jest uzasadniony.

Abstract. Overhead AC power lines are meant for transmitting electric energy between two points of an electricity network system. They are composed of conductors, insulators, supporting structures and conductor fittings. The paper presents a basic theory concerning determination of parameters for equivalent diagrams of electric power lines. However, its main objective is to show how changes in modeling of the lines can influence accuracy of power engineering calculations such as calculations of the load flow, short circuits and protection settings for electric power lines. For that purpose, numerous simulations have been performed. In some cases information technology tools (Power Factory software) have been used to support the line modeling process. The Authors' objective is to answer the questions of how great is the discussed influence and whether it is justified to use more laborious procedures related to very accurate modeling of power lines. (A method for determining parameters of 110 kV lines and its effect on the accuracy of network calculations).

Słowa kluczowe: schemat zastępczy linii WN, obliczenia i symulacje w energetyce, narzędzia symulacyjne, dokładność obliczeń.

Keywords: equivalent diagram for HV lines, calculations and simulations in power engineering, simulation tools, accuracy of calculations.

doi:10.12915/pe.2014.04.44

Wstęp

Poprawne określenie parametrów linii jest bardzo istotne w aspekcie analiz rozptyłów mocy, obliczeniach zwarciowych i stabilnościowych oraz nastaw zabezpieczeń linii elektroenergetycznych. W większości obliczeń i analiz linia elektroenergetyczna 110 kV odwzorowywana jest w postaci czwórnika charakteryzowanego przez rezystancję, reaktancję, susceptancję i konduktancję. Wartości tych parametrów zależą od wielu czynników związanych m.in. z konstrukcją linii i w zasadzie powinny być określane dla każdego elementarnego odcinka rozpatrywanej linii oddzielnie. Osobnym zagadnieniem jest sposób modelowania zjawisk związanych z ulotem i pojemnością linii względem ziemi. W artykule zaprezentowano podstawy teoretyczne wyznaczania parametrów schematów zastępczych linii elektroenergetycznych. Zasadniczym jednak celem artykułu jest wykazanie, jak zmiany w sposobie modelowania linii wpływają na dokładność obliczeń technicznych w energetyce min. rozptyły mocy, obliczenia zwarciove oraz nastawy zabezpieczeń linii elektroenergetycznych. W tym celu przeprowadzono liczne symulacje, podczas których zmieniano parametry linii stosując różne sposoby jej modelowania, m.in. wykorzystując narzędzia informatyczne wspomagające proces modelowania linii (np. program Power Factory).

Matematyczne modelowanie linii WN

Rozdział zawiera podstawowe zagadnienia teoretyczne dotyczące wyznaczania parametrów linii elektroenergetycznych WN. Opisuje fizyczną interpretację parametrów (rezystancja, reaktancja indukcyjna, konduktancja, susceptancja pojemnościowa) oraz pojęcie obwodu ziemnopowrotnego. Linię napowietrzną możemy zamodelować za pomocą schematów zastępczych, które wynikają z fizycznych parametrów i ich powiązań między sobą.

Rezystancja

Rezystancją jednostkową przewodu R' nazywa się rezystancję jaką przedstawia przewód o długości jednego kilometra przy przepływie przez niego prądu przemiennego [1]. Wartość rezystancji linii o długości l wyznacza się ze wzoru:

$$(1) \quad R = R' \cdot l,$$

gdzie: l – długość linii w km; R' – rezystancja jednostkowa. Znając przekrój przewodu o raz materiał z jakiego został wykonany można obliczyć wartość rezystancji jednostkowej z następującej zależności:

$$(2) \quad R' = \frac{1000}{\gamma \cdot S},$$

gdzie: γ – konduktywność przewodu wyrażona w $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$; S – przekrój przewodu w mm^2 .

Dodatkowo na wartość rezystancji linii wpływa temperatura oraz efekt naskórkowości (*skin effect*). Efekty te mogą być uwzględniane przy modelowaniu linii, bądź nie, w zależności od potrzeb i oczekiwanej dokładności modelu.

Reaktancja indukcyjna

Reaktancja jednostkowa linii związana jest z indukcyjnością, która jest ilorzem strumienia magnetycznego przenikającego przestrzeń ograniczoną przewodami i prądu przemiennego, który ten strumień wywołał. Indukcyjność linii zależy od szeregu czynników, a w szczególności: od liczby przewodów linii (jednofazowa, trójfazowa), od wzajemnej odległości i układu zawieszenia przewodów, średnicy przewodów, materiału, z którego je wykonano, liczby przewodów w wiązce oraz indukcyjności wzajemnej. Indukcyjność wzajemna jest uwarunkowana wpływem pozostałych przewodów linii trójfazowej jednotorowej lub wielotorowej. Reaktancję jednostkową X' można obliczyć z zależności:

$$(3) \quad X' = \omega \cdot L',$$

gdzie: ω – pulsacja prądu przemiennego w $1/\text{s}$, L' – indukcyjność jednostkowa w H/km .

Bez szczegółowego wyprowadzania wzoru na indukcyjność fazową linii trójfazowej można przyjąć że:

$$(4) \quad L' = 4.6 \cdot 10^{-4} \cdot \log \frac{b_{sr}}{0.78 \cdot r_z},$$

gdzie: b_{sr} – średnia geometryczna odległość rozważanego przewodu od pozostałych przewodów, r_z – promień zastępczy przewodu.

Konduktancja

Fizyczna interpretacja tego parametru wynika z faktu, iż izolacja linii napowietrznej nigdy nie ma nieskończonej dużej rezystancji. W liniach wysokiego napięcia występuje zjawisko ulotu, a więc obwód elektryczny zamyka się przez powietrze. Intensywność ulotu (upływność) zależy min. od długości i rodzaju linii. Przy wykonywaniu różnego rodzaju obliczeń, wśród parametrów modelujących linię napowietrznej, konduktancję uwzględnia się bardzo rzadko, gdyż straty mocy czynnej związane z ulotem są bardzo małe w stosunku do strat mocy czynnej na elementach podłużnych.

Susceptancja

Susceptancja linii związana jest z jej pojemnością. Pojemność ta jest wypadkową powstałą z superpozycji cząstkowych pojemności pomiędzy poszczególnymi fazami oraz między każdą z faz w stosunku do ziemi. Pojemność linii zależy od wysokości zawieszenia przewodów, od średniej geometrycznej odległości między przewodami oraz od promienia przewodu. Pojemności linii z przewodami wiążkowymi są większe. Susceptancję pojemnościową roboczą jednej fazy oblicza się ze wzoru:

$$(5) \quad B = 2\pi f C,$$

gdzie: C – pojemność robocza jednostkowa dla jednego przewodu w F/km.

Pojęcie obwodu ziemnopowrotnego

Elementarnym pojęciem związanym z modelowaniem linii jest pojęcie obwodu ziemnopowrotnego. Składa się on z zawieszoności nad ziemią pojedynczego przewodu, przez który płynie prąd powracający następnie przez ziemię uważaną za jednolitą przewodzącą półprzestrzeń [2]. Napięcie indukowane w przewodzie odniesione do prądu I jest miarą impedancji wzajemnej obwodów ziemnopowrotnych. Zagadnienie rozplywu prądu w ziemi jest jednym z bardziej skomplikowanych zagadnień teorii pola elektromagnetycznego. Można je rozwiązać kilkoma sposobami, określonymi jako rozwiązanie Carlsona, rozwiązanie Rudenberga, czy też inne rozwiązania wykorzystujące bezpośrednio równania Maxwell'a. W wyniku zastosowania skomplikowanego aparatu matematycznego (równanie różniczkowe cząstkowe pola elektromagnetycznego rozwiązywane za pomocą funkcji Bassela) otrzymuje się przybliżone wzory na jednostkową impedancję własną obwodu ziemnopowrotnego oraz jednostkową impedancję wzajemną dwóch równoległych obwodów ziemnopowrotnych znajdujących się w pewnej odległości od siebie.

Obliczanie składowej zerowej

Często zakłada się, że impedancja zgodna i przeciwna linii są sobie równe i oblicza się je według wzorów z poprzednich rozdziałów. Równość ta wynika z symetrii linii oraz z faktu, że linia jest elementem statycznym. Impedancja zerowa natomiast w znacznym stopniu zależy od konstrukcji linii, m. in. od liczby przewodów odgromowych czy liczby torów linii. Przewody odgromowe można traktować jako zamknięte pętle ziemnopowrotne, biegnące równoległe do przewodów roboczych [3]. Uwzględnianie wszystkich czynników przy obliczeniach może okazać się dużym wyzwaniem numerycznym, dlatego dla uproszczenia analizy stosowane są wzory uproszczone wiążące rezystancję dla składowej symetrycznej zgodnej z rezystancją zerową:

$$(6) \quad R_0 = R_1 + 0,15 \cdot R_1.$$

Natomiast stosunek reaktancji dla składowej zerowej do reaktancji dla składowej symetrycznej zgodnej można przyjmować jako:

$$(7) \quad X_0 = (2 \div 3) \cdot X_1.$$

Dokładne odwzorowanie składowych zerowych linii ma istotne znaczenie w przypadku obliczeń prądów zwarć jednofazowych w tym analiz automatyk systemowych [4] oraz współczynników kompensacji ziemnozwarciowej w automatyce EAZ.

Sposoby modelowania linii w programie Power Factory Opis środowiska obliczeniowego

Na rynku można znaleźć wiele programów do analizy pracy systemu energetycznego o różnej funkcjonalności. Na uwagę zasługuje program PowerFactory firmy DlgSILENT wykorzystywany do wszechstronnego modelowania, analizy i symulacji sieci elektroenergetycznej. Rozbudowane funkcje PowerFactory umożliwiają przeprowadzenie obliczeń rozplywowych, zwarciowych, badań stabilności, doboru aparatury zabezpieczeniowej i wiele innych. W programie można modelować dowolny element systemu energetycznego z różnym stopniem szczegółowości oraz prowadzić symulacje statyczne i dynamiczne [5].

Uproszczony sposób modelowania linii

W programie Power Factory linię napowietrzną WN łączącą dwie rozdzielnie można modelować na wiele różnych sposobów. Najprostszy sposób polega na podaniu wybranych parametrów jednostkowych oraz długości linii. Wartości parametrów jednostkowych można pobrać z podręczników, poradników lub katalogów, można je także obliczyć (zależności (2) – (5)). Okno uproszczonego modelowania parametrów linii zostało przedstawione na rysunku 1.

Resulting Values	
Rated Current	0.605 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	10.46948 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	72.77657 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	3.1 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	10. Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0. Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0. Ohm
Earth-Fault Current, Ise	0. A
Earth Factor, Magnitude	0.3333333
Earth Factor, Angle	180. deg

Rys.1. Podstawowe okno konfiguracji parametrów linii

Power Factory pozwala również na wprowadzenie wartości parametrów dla składowych zerowych, zarówno przewodów roboczych jak i odgromowych (rysunek 2).

Parameters per Length 1,2-Sequence	
Resistance R' (20°C)	0.124 Ohm/km
Reactance X'	0.4 Ohm/km

Parameters per Length Zero Sequence	
Resistance R0'	0. Ohm/km
Reactance X0'	0. Ohm/km

Parameters per Length, Neutral	
Resistance Rn'	0. Ohm/km
Reactance Xn'	0. Ohm/km

Parameters per Length, Phase-Neutral Coupling	
Resistance Rpn'	0. Ohm/km
Reactance Xpn'	0. Ohm/km

Rys.2. Edycja jednostkowych parametrów linii (składowe 1, 2, 0)

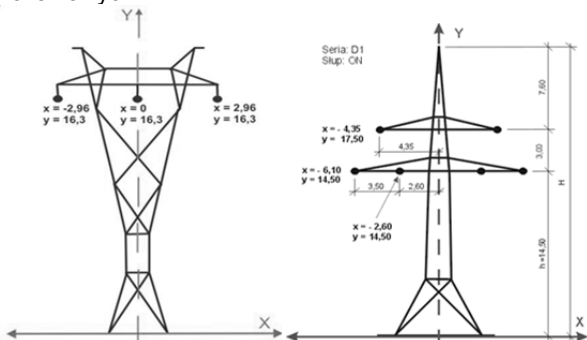
Dokładność odwzorowania parametrów linii definiowana jest na etapie opisu linii i to użytkownik określa w jaki sposób budowany będzie model matematyczny.

Dokładne modelowanie linii z uwzględnieniem typu przewodu i sylwetki słupa

Innym podejściem jest automatyczne wyznaczanie parametrów jednostkowych linii na podstawie jej budowy (geometria słupa, typ przewodów roboczych i odgromowych, zwis, efekt naskórkowości itp.). Na podstawie paszportu linii określamy przeszło budowę i wyposażenie analizowanego odcinka linii. Można w ten sposób wyznaczać parametry jednostkowe każdego przęsła i sumować je dla całego odcinka, na którym występuje konkretny typ słupa i przewodu. W przypadku gdy na trasie linii dominuje jeden przekrój przewodu zawieszony na tej samej konstrukcji wsporczej można w ten sposób obliczyć parametry jednostkowe dla całej linii. W artykule analizie poddano przewody robocze AFL-6 240 mm² i odgromowe AFL-1,7 70 mm² zawieszony na słupie serii S24P.

Konwencja oznaczeń słupów w katalogu

Konwencja oznaczenia słupów w katalogu została przedstawiona na rysunku 3. Konstrukcję słupa umieszczono w układzie współrzędnych, co ułatwia interpretację (oznaczenia x, y są odległościami od odpowiadających im osi i przyjmują wartości dodatnie lub ujemne w zależności od lokalizacji w konkretnej ćwiartce układu współrzędnych). Zastosowany sposób prezentacji sylwetek słupów umożliwia wykorzystanie przedstawionych na rysunkach danych w zaawansowanych aplikacjach obliczeniowych.



Rys.3. Oznaczenia słupów a) słup jedtorowy serii A, model P, b) słup dwutorowy: ON serii:D1

Dokładne podejście do modelowania przewodów linii polega na podaniu podstawowych informacji o tych przewodach (przekrój, materiał, wymiary).

Rys.4. Wprowadzanie typu przewodu roboczego i odgromowego

Rys.5. Szczegółowy opis przewodu roboczego

Wyznaczenie parametrów schematu zastępczego linii WN wymaga także podania parametrów opisujących geometrię słupa (współrzędne zawieszenia przewodów na konstrukcji wsporczej). Odległości te wynikają bezpośrednio z budowy słupa, a wymiary można znaleźć w katalogach [6].

Coordinate of Earth Conductors [m]:		
	X	Y
Earth Conductor 1	0	22,1

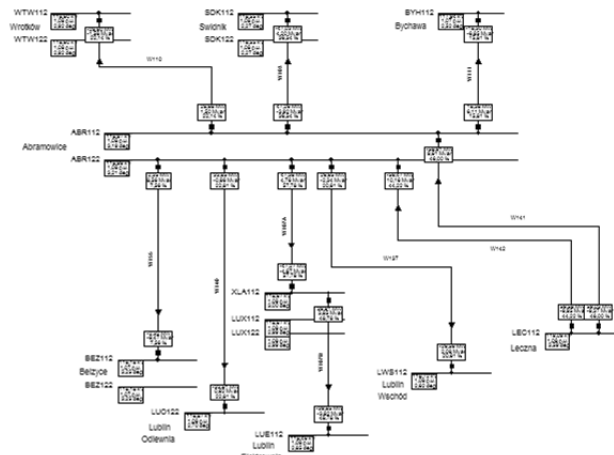
Coordinate of Line Circuits [m]:						
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
Circuit 1	-2,85	-2,85	3,65	19,1	15,8	15,8

Rys.6. Zawieszenie przewodów na konstrukcji wsporczej

Badania symulacyjne

Analiza rozplywowa

W artykule przeanalizowano wpływ sposobu modelowania linii na jej parametry oraz wyniki podstawowych obliczeń sieciowych. Badano linię opisaną domyślnymi parametrami podstawowymi (R, X) oraz wyznaczonymi na podstawie budowy przewodu i konstrukcji wsporczych, rozpatrzono linie bez uwzględnienia przewodów odgromowych (przypadek teoretyczny) oraz linie z przewodami odgromowymi. Modelowano także zwis przewodów, uwzględniano rezystywność gruntu oraz efekt naskórkowości. W tym celu zbudowano model numeryczny sieci krajowej i obliczono rozpyły mocy w tej sieci oraz wartości prądów zwarciovych w wybranych węzłach sieci. Do analizy szczegółowej wybrano linię 110 kV wychodzącą ze stacji Abramowice (jedna ze stacji systemowych w okolicy Lublina) – rysunek 7.



Rys.7. Analizowany fragment sieci 110 kV

Ocenie wariantowej poddano linię 110 kV relacji Abramowice – Bychawa. Dla każdego przypadku (różny sposób modelowania linii) określono napięcia w węzłach, moce czynne i bierne płynące linią oraz straty mocy w linii (Tabela 1).

1. Wariant uproszczony

Resulting Values	
Rated Current	0,605 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	10,46948 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	72,77657 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	3,1 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	10, Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0, Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0, Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0, A
Earth Factor, Magnitude	0,3333333
Earth Factor, Angle	180, deg

2. Parametry określone na podstawie budowy przewodu i słupa

Resulting Values	
Rated Current	0,605 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	10,51519 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	72,82363 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	3,105282 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	10,04621 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	10,03684 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	31,29804 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	7,88014 A
Earth Factor, Magnitude	0,7086156
Earth Factor, Angle	-0,8880236 deg

3. Parametry wyznaczone na podstawie budowy przewodu i słupa – uwzględniono efekt naskórkowości.

Resulting Values	
Rated Current	0,605 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	10,51837 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	72,75391 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	3,118448 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	10,04547 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	10,04996 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	31,29742 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	7,88014 A
Earth Factor, Magnitude	0,7084044
Earth Factor, Angle	-0,8181136 deg

4. Parametry wyznaczone na podstawie budowy przewodu i słupa, uwzględniono naskórkowość i zwis przewodów

Resulting Values	
Rated Current	0,605 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	10,5185 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	72,75774 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	3,117818 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	10,0458 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	9,94007 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	31,33788 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	8,678119 A
Earth Factor, Magnitude	0,7085401
Earth Factor, Angle	-0,5238548 deg

5. Parametry wyznaczone na podstawie budowy przewodu i słupa – bez uwzględnienia przewodu odgromowego

Resulting Values	
Rated Current	0,605 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	10,51619 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	72,85499 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	3,100078 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	10,04887 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	6,715138 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	34,53614 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	8,10807 A
Earth Factor, Magnitude	0,7845901
Earth Factor, Angle	8,747087 deg

Tabela 1. Parametry linii określone z różnym stopniem dokładności wraz analizą rozpiływową

typ modelu	R_1	X_1	R_0	X_0	U_{BYH}	U_{ABR}	P	Q	ΔP	ΔQ
	Ω	Ω	Ω	Ω	kV	kV	MW	Mvar	MW	Mvar
1	3,100	10,000	-	-	117,94	118,97	18,407	6,132	0,084	0,712
2	3,105	10,046	10,037	31,298	117,94	118,97	18,386	6,112	0,084	0,732
3	3,118	10,045	10,050	31,297	117,94	118,97	18,384	6,105	0,084	0,732
4	3,118	10,046	9,940	31,338	117,94	118,97	18,384	6,102	0,084	0,737
5	3,100	10,049	6,715	34,536	117,94	118,97	18,382	6,113	0,084	0,734

Tabela 2. Parametry linii określone z różnym stopniem dokładności wraz analizą zwarciovą

typ modelu	R_1	X_1	R_0	X_0	$I_{k^{ABR}}$	$I_{k^{BYH}}$	$I_{k^{ABR}}^{linii}$	I_{kE}^{ABR}	I_{kE}^{BYH}	I_{kEABR}^{linii}
	Ω	Ω	Ω	Ω	kA	kA	kA	kA	kA	kA
1	3,100	10,000	-	-	19,798	7,227	1,282	23,740	7,560	1,310
2	3,105	10,046	10,037	31,298	19,797	7,211	1,280	23,699	6,180	1,196
3	3,118	10,045	10,050	31,297	19,797	7,211	1,280	23,699	6,180	1,196
4	3,118	10,046	9,940	31,338	19,797	7,211	1,280	23,699	6,180	1,196
5	3,100	10,049	6,715	34,536	19,797	7,211	1,280	23,697	6,107	1,189

Analiza zwarciovą

Dla tej samej sieci i tego samego obszaru zainteresowania przeprowadzono obliczenia prądów zwarciovych – linię modelowano na pięć różnych sposobów (tak samo jak w analizie rozpiływowej). W tabeli 2 przedstawiono wartości prądów zwarcia przy zwarciu zlokalizowanym na szynach 110 kV rozdzielni Abramowice.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano różne podejścia do matematycznego modelowania parametrów schematów zastępczych linii elektroenergetycznych. Zasadniczym celem artykułu było wykazanie, jak zmiany w sposobie modelowania linii wpływają na dokładność obliczeń technicznych w energetyce. Na podstawie rzeczywistej sieci przeprowadzono symulacje, podczas których zmieniano parametry linii stosując różne sposoby jej modelowania [7]. Jak widać z przedstawionych wyników symulacji, sposób modelowania nie wpływa zasadniczo na parametry zwarciove ani analizy rozpiływowe. Niewielkie różnice (nieco większe dla składkowej zerowej) wynikają z faktu, iż szczegółową analizą objęto tylko jedną linię. Różnice są większe jeżeli przedstawione podejście zostanie zastosowane do większej liczby linii, wtedy dodatkowy nakład pracy związany z dokładnym modelowaniem linii może być uzasadniony.

LITERATURA

- [1] Handke A., Mitkowski E., Stiller J., Sieci elektroenergetyczne, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1978
- [2] Koszałuk R., Flisowski Z., Metody analizy układów przewodów – ziemia, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 77 (2001), nr 10, 241-246
- [3] Kacejko P., Machowski J., *Zwarcia w systemach elektroenergetycznych*, Warszawa, WNT (2009), wyd. 2
- [4] Wancierz M., Kacejko P., Problematyka likwidacji zwarc jednofazowych na liniach łączących bloki wielkiej mocy z systemem elektroenergetycznym, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 88 (2012), Nr 10a, 289-291
- [5] DigSILENT PowerFactory, PowerFactory User's Manual and Tutorial, Version 14.1, Germany, 2012
- [6] Katalog stupów i fundamentów linii 110 kV, Energoprojekt Kraków, Poznań 1998
- [7] Miller P., Wancierz M., Problematyka wyznaczania i ewidencji parametrów linii WN z wykorzystaniem baz danych, *Poznan University of Technology Academic Journals*, 74 (2013), ISSN 1897-0737

Autorzy:

dr inż. Piotr Miller, dr inż. Marek Wancierz, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: p.miller@pollub.pl; m.wancierz@pollub.pl