

## OBLICZANIE PRĄDÓW W PRZEWODACH ODGROMOWYCH W LINII NAPOWIETRZNO-KABLOWEJ

Jacek KLUCZNIK<sup>1</sup>, Krzysztof DOBRZYŃSKI<sup>2</sup>

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki

1. tel.: 58 3471798, e-mail: jacek.klucznik@pg.edu.pl

2. tel.: 58 3471798, e-mail: krzysztof.dobrzynski@pg.edu.pl

**Streszczenie:** W referacie analizowana jest linia napowietrzno-kablowa 110 kV. Referat prezentuje wpływ sposobu uziemienia żył powrotnych kabla WN na wartości prądów przy zwarciach jednofazowych, ze szczególnym uwzględnieniem prądów płynących w przewodach odgromowych linii napowietrznej. Wykazano, że dobór przewodów odgromowych linii napowietrznej powinien uwzględniać nie tylko parametry odcinka linii kablowej, ale także sposób uziemienia żył powrotnych.

**Słowa kluczowe:** przewody odgromowe, zwarcia, linie napowietrzne, linie kablowe.

### 1. WSTĘP

Obecnie budowa nowych napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia jest utrudniona ze względu na złożone przepisy prawne oraz coraz częstsze problemy z uzyskaniem terenu na posadowienie słupów i wygospodarowaniem pasa terenu, nad którym przebiegać będzie linia. Problem z pozyskaniem terenu dotyczy zwłaszcza dużych aglomeracji miejskich, gdzie często są obszary, w których nie ma żadnych możliwości zbudowania linii napowietrznej. Dlatego coraz częściej spotykane są układy, w których część linii prowadzona jest jako linia kablowa, a część jako napowietrzna.

Jednym z istotnych elementów projektowania nowej linii lub modernizacji linii istniejącej, są obliczenia zwarciowe, będące podstawą doboru przewodów odgromowych linii napowietrznej. Dokładne wyznaczenie rozptyłu prądów w przewodach odgromowych pozwala na dobór przewodu odgromowego pod kątem wytrzymałości zwarciowej, ale także na ocenę zagrożeń porażeniowych jakie pojawiają się w przypadku przepływów prądów zwarciowych przez słupy i ich uziomy. Powyższe powoduje, że obliczenia takie powinny być wykonywane w sposób możliwie dokładny.

W przypadku linii napowietrznej nie zawierającej odcinków kablowych istnieją różne metody obliczeń wartości prądów w przewodach odgromowych. Metody te można podzielić na oparte o modele dwuprzewodowe, gdzie modelowany jest jeden przewód fazowy i jeden przewód odgromowy np. [1], oparte o modele czteroprzewodowe gdzie modelowane są trzy przewody fazowe i przewód odgromowy np. [2] oraz wykorzystujące modele wieloprzewodowe, gdzie modelowane są wszystkie

przewody fazowe i odgromowe jakie występują w analizowanej linii [3].

Brak jest natomiast w literaturze opisów metod obliczeń rozptyłu prądów w układach napowietrzno-kablowych oraz określenia wpływu układu pracy żył powrotnych kabla na rozptył prądów w przewodach odgromowych. Niniejszy referat jest zatem próbą odpowiedzi na pytanie, jak należy uwzględnić w procesie doboru przewodów odgromowych linii napowietrznej wpływ odcinków kablowych.

### 2. MODEL LINII KABLOWEJ

Linie kablowe wysokiego napięcia zwykle budowane są z wykorzystaniem kabli jednofazowych, mających okrągłą żyłę roboczą i współosiową, cylindryczną żyłę powrotną. Linie kablowe zbudowane z takich kabli, mogą pracować w kilku różnych układach [4, 5]: z jednostronnie uziemionymi żyłami powrotnymi (na początku, końcu lub w środku linii kablowej), z dwustronnie uziemionymi żyłami powrotnymi, z dwustronnie uziemionymi żyłami powrotnymi i zastosowaniem przepleceń żył powrotnych (ang. *Cross-bonding*). Dodatkowo możliwe jest stosowanie przeplecenia żył roboczych, a także poprowadzenie wzdłuż linii kablowej dodatkowego kabla (lub kabli), tzw. ECC (ang. *Earth Continuity Conductor*).

Niezależnie od przyjętego sposobu pracy żył powrotnych, odcinek linii kablowej składający się z trzech kabli można odwzorować na potrzeby analiz zwarciowych macierzowym układem równań o następującej postaci:

$$\begin{bmatrix} \delta \underline{U}_r \\ \delta \underline{U}_p \\ \delta \underline{U}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_r & \underline{Z}_{rp} & \underline{Z}_{re} \\ \underline{Z}_{rp} & \underline{Z}_p & \underline{Z}_{pe} \\ \underline{Z}_{re} & \underline{Z}_{pe} & \underline{Z}_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_r \\ \underline{I}_p \\ \underline{I}_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

Gdzie:

$\delta \underline{U}_r$  – wektor strat napięcia w przewodach roboczych,

$\delta \underline{U}_p$  – wektor strat napięcia w przewodach powrotnych,

$\delta \underline{U}_e$  – wektor strat napięcia w przewodach ECC,

$\underline{I}_r$  – wektor prądów w przewodach roboczych,

$\underline{I}_p$  – wektor prądów w przewodach powrotnych,

$\underline{I}_e$  – wektor prądów w przewodach ECC,

$Z_r$  – macierz impedancji własnych i wzajemnych przewodów roboczych,

$Z_p$  – macierz impedancji własnych i wzajemnych przewodów powrotnych,

$Z_c$  – macierz impedancji własnych i wzajemnych przewodów ECC,

$Z_{rp}$  – macierz impedancji wzajemnych przewodów roboczych i przewodów powrotnych,

$Z_{re}$  – macierz impedancji wzajemnych przewodów roboczych i przewodów ECC,

$Z_{pe}$  – macierz impedancji wzajemnych przewodów powrotnych i przewodów ECC.

Poszczególne impedancje własne i wzajemne obliczane są na podstawie przekroju żył, rezystancji właściwej stosowanego materiału, sposobu ułożenia przewodów i odległości między nimi [6]. Wobec ograniczonej objętości referatu szczegółowe wzory nie będą tu prezentowane.

Macierz impedancji wiąże ze sobą prądy i straty napięć, tworząc wieloprzewodowy model sekcji linii kablowej. Można zauważyć, że sposób uziemienia żył powrotnych, stosowanie przeplotów, stosowanie kabla ECC będzie decydował o relacjach pomiędzy prądami a stratami napięcia w układzie. W pewnych przypadkach (obustronne uziemienie żył powrotnych) macierz impedancji może być przekształcona poprzez redukcję Krona do rozmiaru  $3 \times 3$ . Następnie, stosując odpowiednie przekształcenia, możliwe jest wyznaczenie dla analizowanej linii składowych symetrycznych: impedancji zgodnej, przeciwnej i zerowej w celu wykorzystania tych wielkości do obliczeń zwarciovych. Jednak w większości rzeczywistych przypadków stopień skomplikowania układu, a zwłaszcza występowanie niezerowych wartości rezystancji uziemienia żył powrotnych i przewodów ECC powoduje, że wykorzystanie tak obliczonych impedancji zgodnej, przeciwnej i zerowej linii kablowej jest dyskusyjne.

Niniejszy referat bazuje zatem na wykorzystaniu wieloprzewodowego modelu kabla i wieloprzewodowego modelu linii elektroenergetycznej [3], wskazując na zjawiska i problemy jakie występować mogą w linii napowietrzno-kablowej w zależności od sposobu pracy żył powrotnych.

Rozwiązanie przedstawionego problemu wymaga odpowiedniego środowiska obliczeniowego. Mogą być to dedykowane programy umożliwiające analizę systemów elektroenergetycznych np. ATP-EMTP, PowerFactory lub specjalistyczne programy matematyczne np. Matlab, umożliwiające realizację procedur algebraicznych i obliczeń iteracyjnych. W niniejszym referacie wykorzystano w obliczeniach program PowerFactory firmy DlgSILENT.

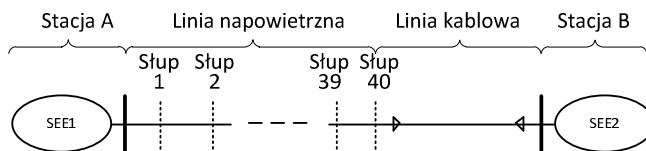
### 3. ANALIZOWANY UKŁAD PRZESYŁOWY

W referacie rozważana jest linia napowietrzno-kablowa 110 kV, łącząca dwie stacje elektroenergetyczne A i B o mocach zwarciovych wynoszących odpowiednio 1500 MVA i 1000 MVA oraz stosunku  $X_0/X_1$  odpowiednio 1,2 i 1,5. Schemat analizowanego układu przedstawiono na rysunku 1.

Przyjęto, że odcinek napowietrzny linii zbudowany jest na słupach serii B2, z przewodami fazowymi AFL-6 240 mm<sup>2</sup> i z przewodem odgromowym AFL-1,7 70 mm<sup>2</sup>. Przyjęto równe rozpiętości przęsła, wynoszące 300 m i całkowitą długość linii napowietrznej wynoszącą 12 km (40 przęsła). Model linii napowietrznej zbudowany jest jako wieloprzewodowy, zawierający dla każdego modelowanego osobno przęsła: trzy przewody fazowe, przewód odgromowy

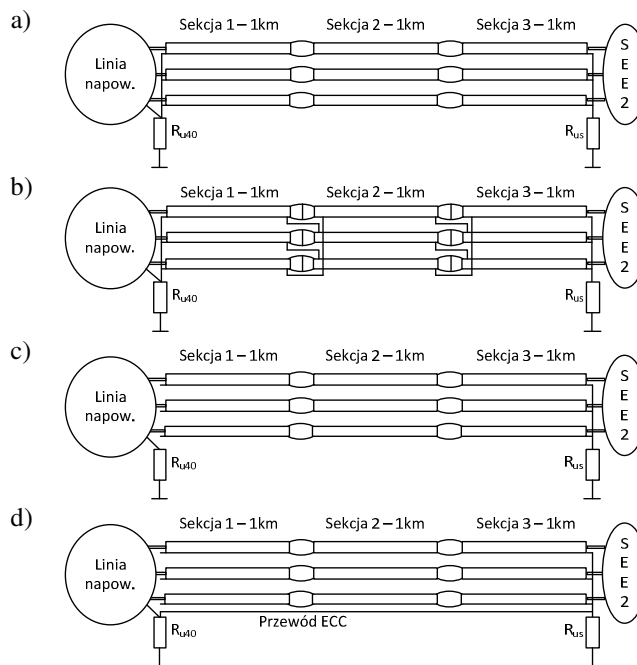
i rezystancję uziemienia słupa wynoszącą 10 Ω. Impedancje własne i wzajemne modelu linii obliczone zostały na podstawie wymiarów geometrycznych słupów oraz danych katalogowych przewodów fazowych i przewodu odgromowego.

Z kolei przyjęto, że linia kablowa o długości 3 km zbudowana jest z kabli z żyłą miedzianą, typu XRUHKXS 1x1000mm<sup>2</sup>. Kable te posiadają żyłę powrotną zbudowaną z drutów miedzianych owiniętych taśmą miedzianą. Przekrój żyły powrotnej wynosi 95 mm<sup>2</sup>. Przyjęto płaski układ przewodów, z odstępami 20 cm.



Rys. 1. Analizowana linia napowietrzno-kablowa

W referacie przyjęto różne konfiguracje połączeń żył powrotnych kabli. Uproszczone schematy poszczególnych wariantów przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Analizowane sposoby pracy żył powrotnych:

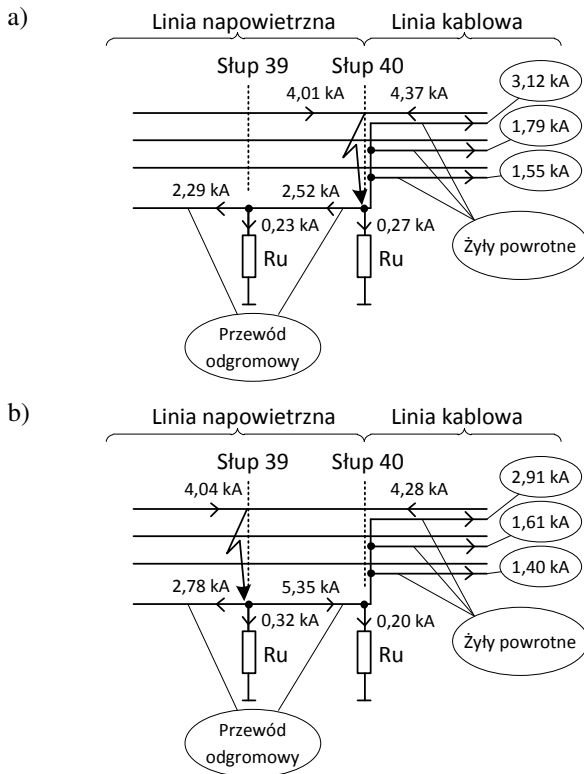
- a) obustronne uziemienie, b) obustronne uziemienie z przeplotem żył powrotnych, c) jednostronne uziemienie, d) jednostronne uziemienie oraz dodatkowy przewód ECC.

### 4. ROZPŁYW PRĄDÓW ZWARCIOWYCH

Dla układów pracy żył powrotnych przedstawionych na rysunku 2 wykonano obliczenia rozptyłu prądów zwarciovych w przypadku zwarcia jednofazowego na słupie 39 i słupie 40, tj. na przedostatnim i ostatnim słupie linii przed odcinkiem linii kablowej (rys. 1).

Na rysunku 3 przedstawiono schemat rozptyłu prądów zwarciovych dla pierwszego rozpatrywanego przypadku, tj. obustronnego uziemienia żył powrotnych kabla. Dla powyższego układu rozpatrzono dwa charakterystyczne przypadki. Przy zwarciu na ostatnim słupie obserwowane są największe wartości prądów zwarciovych w żyłach powrotnych. Na skutek występowania sprzężeń i nierównych odległości pomiędzy kablami obciążenie żył

powrotnych nie jest symetryczne, a największe wartości prądów obserwowane są dla żyły powrotnej kabla odpowiadającego fazie w jakiej wystąpiło zwarcie. Wartość prądu w tej żyły jest około dwukrotnie większa niż w pozostałych żyłach powrotnych.



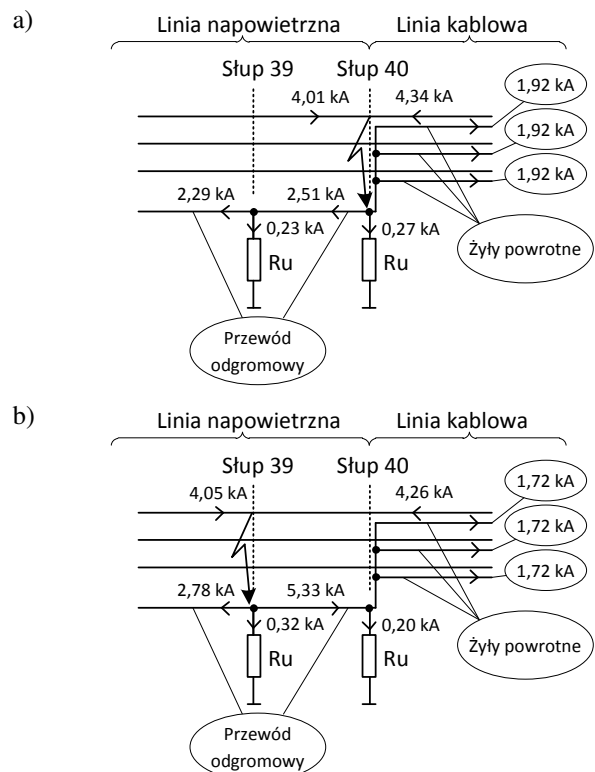
Rys. 3. Rozpływ prądów zwarciovych w przypadku obustronnego uziemienia żył powrotnych: a) zwarcie jednofazowe na słupie 40, b) zwarcie jednofazowe na słupie 39

Z punktu widzenia warunków zwarciovych dla przewodu odgromowego w ostatnim przęśle, najgorszym przypadkiem jest zwarcie na przedostatnim słupie linii napowietrznej (rys. 3b). Wówczas przez przewód odgromowy pomiędzy słupami 39 i 40 płynie znacząca część prądu zwarciovego w kierunku stacji B. Prąd ten następnie dzieli się na trzy żyły powrotne linii kablowej. Podobnie jak we wcześniejszym przypadku, prądy zwarciovce płynące przez poszczególne żyły powrotne nie są równe.

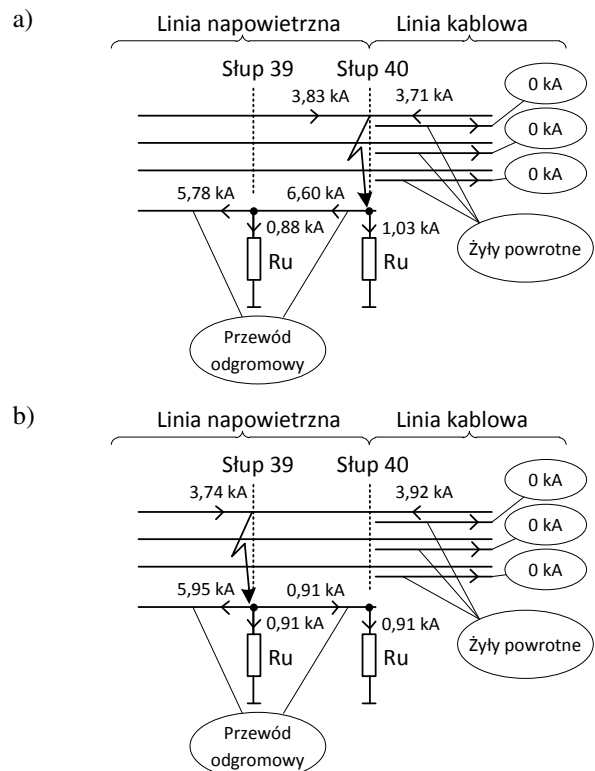
Podział prądów zwarciovych pomiędzy żyły powrotne będzie inny w przypadku zastosowania cross-bondingu żył powrotnych. Taki przypadek przedstawiono na rysunku 4. Można zauważyć, że zastosowanie przeplecenia żył powrotnych nie zmienia ani początkowego prądu zwarciovego, ani udziałów linii napowietrznej i kablowej w początkowym prądzie zwarciovym, ani też prądów w przewodach odgromowych. Przelecenie żył powrotnych symetryzuje natomiast prądy płynące w żyłach powrotnych i powoduje istotne zmniejszenie wartości prądu dla żyły powrotnej kabla odpowiadającego fazie w jakiej wystąpiło zwarcie.

Z kolei na rysunku 5 przedstawiono rozpływ prądów zwarciovych w sytuacji, gdy żyły powrotne uziemione są jednostronnie w stacji B. W takim przypadku widoczne jest wyraźne zwiększenie wartości prądu płynącego w przewodach odgromowych przy zwarciovach w końcowej części linii napowietrznej. Wobec braku połączenia przewodów odgromowych ze stacją B prąd zwarciovycy „wraca” w kierunku stacji A przewodami odgromowymi oraz uziomami słupów. Widoczny jest tu również

kilkukrotny wzrost prądów w uziomach słupów w pobliżu miejsca zwarcia względem układu obustronnie uziemionego. Jednostronne uziemienie żył powrotnych skutkuje też zwiększeniem składowej zerowej zastępczej impedancji zwarciovyciej, w efekcie czego udział prądu od stacji B w początkowym prądzie zwarciovym jest mniejszy.

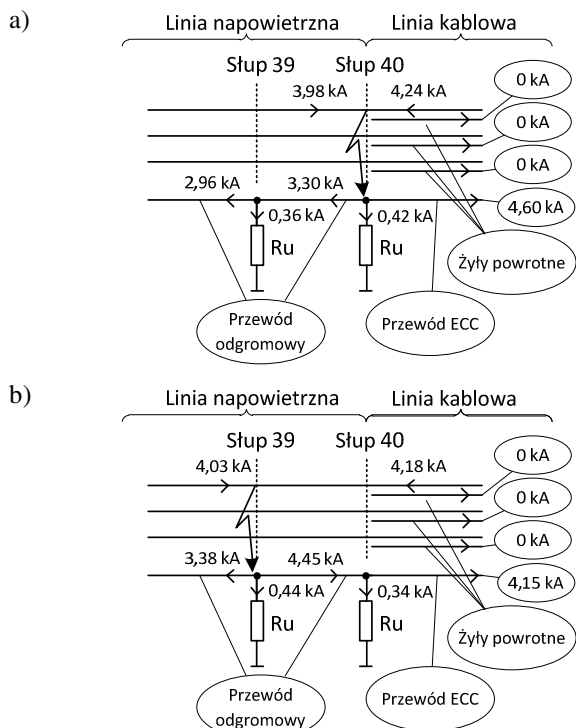


Rys. 4. Rozpływ prądów zwarciovych w przypadku obustronnego uziemienia żył powrotnych i zastosowaniu przeplotów żył powrotnych: a) zwarcie jednofazowe na słupie 40, b) zwarcie jednofazowe na słupie 39



Rys. 5. Rozpływ prądów zwarciovych w przypadku jednostronnego uziemienia żył powrotnych: a) zwarcie jednofazowe na słupie 40, b) zwarcie jednofazowe na słupie 39

Wpływ zastosowania dodatkowego kabla ECC, łączącego ostatni słup linii kablowej z uziomem stacji B, przedstawia rysunek 6. W analizach przyjęto, że przewód ECC (o przekroju 95 mm<sup>2</sup>, wykonany z aluminium) ułożony jest pomiędzy skrajnym a środkowym przewodem linii kablowej.



Rys. 6. Rozpływ prądów zwarciovych w przypadku jednostronnego uziemienia żył powrotnych i zastosowania przewodu ECC: a) zwarcie na słupie 40, b) zwarcie na słupie 39

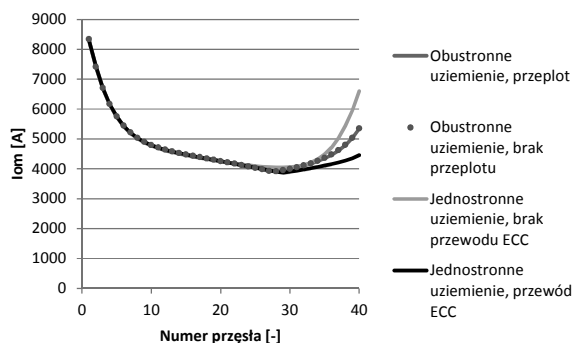
Zastosowanie dodatkowego przewodu ECC jest korzystne i powoduje zmniejszenie wartości prądów w przewodzie odgromowym przy zwarciach w końcowym odcinku linii napowietrznej. Jednocześnie zmniejszane są wartości prądów w uziomach słupów, co prowadzi do zmniejszenia napięć i ograniczenia zagrożenia porażeniowego.

## 5. PODSUMOWANIE

Na rysunku 7 przedstawiono maksymalne wartości prądów płynących w przewodach odgromowych na poszczególnych przęsłach. Rysunek potwierdza, że sposób pracy żył powrotnych wpływa na rozpływ prądów zwarciovych w linii. Wpływ ten widoczny jest najbardziej w pobliżu (5-10 przęseł) połączenia linii napowietrznej i kablowej.

Jednostronne uziemienie kabla, bez stosowania przewodu ECC jest bardzo niekorzystne i niezalecane. Powoduje znaczący wzrost prądów w przewodach

odgromowych. Z kolei zastosowanie żyły ECC pozwala na obniżenie wartości prądów w przewodach odgromowych. Relacje ilościowe pomiędzy prądami w przewodach odgromowych, w przypadku stosowania uziemienia jednostronnego z przewodem ECC i uziemienia obustronnego, zależą od rezystancji przewodu ECC. Stosowanie przeplecenia żył powrotnych przy obustronnym uziemieniu żył powrotnych nie wpływa na wartości prądów w przewodach odgromowych względem układu bez przepleceń. Przeplecenia symetryzują jedynie przepływy prądów w żyłach powrotnych.



Rys. 7. Wpływ sposobu uziemiania żył powrotnych na maksymalne wartości prądów płynących w przewodach odgromowych

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Żmuda K., Elektroenergetyczne układy przesyłowe i rozdzielcze. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016.
2. Gooi H., Sebo S., Distribution of Ground Fault Currents Along Transmission Lines - An Improved Algorithm, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems., vol. PAS-104, no. 3, 1985.
3. Klucznik J., Obliczanie rozptyłów prądów w przewodach odgromowych linii elektroenergetycznych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2017.
4. IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV, IEEE Std 575™-2014.
5. Czapp S., Dobrzyński K., Klucznik J., Lubośny Z., Analiza napięć indukowanych w żyłach powrotnych kabli wysokiego napięcia dla ich wybranych konfiguracji, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 53, Gdańsk, 2017.
6. Ametani A., A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 3, May 1980.

## EARTH WIRES CURRENTS CALCULATION IN UGC-OHL LINES

The high voltage overhead (OHL) and underground cable line (UGC) is analyzed in the paper. The paper presents the influence of the cable sheath earthing on the values of currents in case of earth faults, with particular focus on the currents flowing in the earth wires. It is shown that the selection of the earth wires for the overhead line should take into account not only the parameters of the cable line section, but also the method of the cable sheath earthing. The single point earthing with no earth continuity conductor (ECC) is particularly not recommended, because it leads to the earth wire currents and earth potential rise.

**Keywords:** Fault current distribution, earth faults, earth wires, overhead transmission lines, underground cable lines.