

UPROSZCZONE MODELOWANIE LINII KABLOWYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA A NAPIĘCIA INDUKOWANE W ŻYŁACH POWROTNYCH – STUDIUM PRZYPADKU

Krzysztof DOBRZYŃSKI¹, Stanisław CZAPP², Jacek KLUCZNIK³, Zbigniew LUBOŚNY⁴

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 3471798, e-mail: krzysztof.dobrzynski@pg.edu.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 3471398, e-mail: stanislaw.czapp@pg.edu.pl
3. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 3471798, e-mail: jacek.klucznik@pg.edu.pl
4. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 3471641, e-mail: zbigniew.lubosny@pg.edu.pl

Streszczenie: Linie kablowe, obok linii napowietrznych, są jednym z podstawowych elementów składowych systemów elektroenergetycznych. Stosowane są głównie na terenach zurbanizowanych, gdzie prowadzenie linii napowietrznych jest mocno utrudnione lub wręcz niemożliwe. Linie kablowe wysokiego napięcia budowane są głównie z wykorzystaniem kabli, które oprócz żyły roboczej mają również współosiową żyłę powrotną. Istnieje kilka układów pracy takich linii, które różnią się sposobem uziemienia żył powrotnych i ewentualnym zastosowaniem przeplatania żył powrotnych i/lub żył roboczych. Budowa linii kablowej wysokiego napięcia każdorazowo powinna zostać poprzedzona analizą modelową, która pozwoli określić poziomy napięć i prądów indukowanych w żyłach powrotnych. Jak wynika z analiz, zbyt duże uproszczenia w modelowaniu mogą prowadzić do błędnego wnioskowania.

Słowa kluczowe: modelowanie linii kablowych, napięcie indukowane, żyły powrotne.

1. WSTĘP

Linie kablowe, obok linii napowietrznych, są jednym z podstawowych elementów składowych systemów elektroenergetycznych. Z uwagi na niższe koszty inwestycyjne, operatorzy systemów elektroenergetycznych chętniej stosują linie napowietrzne. Tym niemniej linie kablowe budowane są wszędzie tam, gdzie poprowadzenie linii napowietrznej jest utrudnione lub wręcz niemożliwe. Innym argumentem decydującym o budowie linii kablowej może być również konieczność zwiększenia pewności zasilania. Jednym z rozwiązań to potwierdzających, jest obecnie rozważane wykorzystanie metody tzw. płuzenia [1] przy budowie linii kablowych średniego napięcia. Metoda ta pozwala w relatywnie łatwy sposób położyć linię kablową na głębokości ok. 1 m. W terenach leśnych może to wydajnie ograniczyć liczbę wyłączeń spowodowanych warunkami pogodowymi. Jest to istotne z punktu widzenia zrealizowania wskaźników SAIDI i SAIFI, które obecnie propagowane jest przez URE [2] jako dążenie do osiągnięcia wskaźników uzyskiwanych w większości zachodnich systemów elektroenergetycznych.

2. UKŁADY PRACY LINII KABLOWYCH WN

Linie kablowe wysokiego napięcia zwykle budowane są z wykorzystaniem kabli mających współosiową żyłę powrotną. Linie te, z punktu widzenia żył powrotnych, mogą pracować w kilku różnych układach [3, 4]:

- z jednostronnie uziemionymi żyłami powrotnymi,
- z dwustronnie uziemionymi żyłami powrotnymi,
- z dwustronnie uziemionymi żyłami powrotnymi i dodatkowo przeplecionymi (ang. cross-bonding) w jednym miejscu (niepełny cross-bonding) lub w dwóch miejscach (pełny cross-bonding).

Do powyższych układów pracy dochodzi jeszcze możliwość zastosowania przeplecenia żył roboczych i poprowadzenie wzdłuż linii kablowej dodatkowego kabla, tzw. ECC (ang. *Earth Continuity Conductor*). Każdy z wymienionych powyżej sposobów uziemiania żył powrotnych wiąże się z określonymi zjawiskami, które należy przeanalizować podczas projektowania linii, przy czym głównymi wielkościami rozważanymi podczas projektowania linii kablowej są wartości napięć i prądów indukowanych w tych żyłach.

Każdorazowo układ pracy linii kablowej powinien zostać dobrany do przewidywanych warunków pracy, tj. do długości linii, przesyłanej mocy, czy mocy zwarciowej w punkcie przyłączenia linii do systemu elektroenergetycznego.

3. OPIS PRZYKŁADOWEJ LINII KABLOWEJ WN

Budowa linii kablowych w zurbanizowanej przestrzeni wiąże się często z koniecznością krzyżowania się z innymi obiektami technicznymi, tj. drogami, wzniesieniami, trasami kolejowymi, czy wodnymi itp. W takich przypadkach istnieje konieczność zabezpieczenia kabla przed ewentualnymi uszkodzeniami [5], stąd w takich miejscach kable umieszczane są zwykle w odpowiednich rurach ochronnych. Taki zabieg powoduje, że w miejscu prowadzenia kabli w rurach ochronnych, zmienia się odległość pomiędzy poszczególnymi kablami. Nie pozostaje

to bez wpływu na poziomy indukowanych napięć i prądów w żyłach powrotnych. Z uwagi na zdefiniowaną objętość artykułu poniżej skupiono się na analizie napięć indukowanych.

Rozważanym obiektem jest linia kablowa o długości 12 km wykonana kablem XRUHAKXS 240 mm² z żyłą powrotną o przekroju 95 mm². Ponieważ producent zapewnia 1-kilometrową długość produkcyjną kabla, zatem co ok. 1 km zaplanowano zastosowanie mufy przelotowej. Z przestrzennego planu prowadzenia trasy kablowej wynika, w których miejscach i na jakiej długości należy zastosować rury ochronne, przy czym na całej długości linii kablowej zakłada się ułożenie trójkątne. Na odcinkach z bezpośrednim ułożeniem kabli w ziemi, kable stykają się ze sobą. Z kolei na odcinkach z rurami ochronnymi, każdy kabel przechodzi przez niezależną rurę ochronną, a rury również ułożone są w trójkąt.

Z punktu widzenia modelowania, każda zmiana sposobu ułożenia linii kablowej stanowi początek kolejnego odcinka w modelu. Dla rozważanej linii występuje 161 takich odcinków, przy czym odcinki o odmiennym ułożeniu od bezpośredniego w ziemi stanowią ok. 20% długości linii. Odcinki te ułożone są w rurach ochronnych o średnicy 16 cm.

W analizach założono dwa sposoby modelowania przedmiotowej linii:

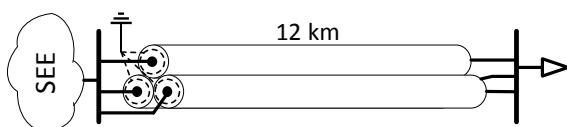
- dokładny – uwzględniający konieczność stosowania rur ochronnych na trasie linii i wynikającą z tego zmianę odległości pomiędzy osiami poszczególnych kabli,
- uproszczony, gdzie zakłada się na całej długości linii taki sam sposób ułożenia: trójkątny, kable bezpośrednio w ziemi, stykające się.

4. PORÓWNANIE MODELU DOKŁADNEGO I UPROSZCZONEGO

Na potrzeby porównania wyników z modelu dokładnego i uproszczonego rozważono wybrane sposoby pracy linii kablowej 110 kV: jednostronne uziemienie żył powrotnych, dwustronne uziemienie żył powrotnych i dwustronne uziemienie żył powrotnych z przeplataniem tych żył w dwóch miejscach. Każdorazowo analizowano napięcia indukowane w żyłach powrotnych dla stanu ustalonego i w przypadku wystąpienia zwarcia jednofazowego. W stanie ustalonym założono zmienność obciążenia linii kablowej od 0 MW do 75 MW, przy czym górna wartość stanowi obciążenie bliskie wartości dopuszczalnej dla kabla. Założono przy tym współczynnik $\text{tg } \varphi = 0$.

4.1. Uziemienie jednostronne żył powrotnych

Pierwszym rozważanym przypadkiem jest uziemienie jednostronne żył powrotnych, wykonane w punkcie zasilania linii kablowej (rys. 1).



Rys. 1. Jednostronne uziemienie żył powrotnych

Dla powyższego układu największe napięcia indukowane w żyłach powrotnych występują na nieziemionym końcu linii kablowej. Porównując wyniki uzyskane dla obu modeli

należy zauważyć, że wartości te wyraźnie się różnią, przy czym w modelu dokładnym (rys. 2) uzyskuje się wartości większe w porównaniu z modelem uproszczonym (rys. 3). Wyniki te są spodziewane, ponieważ odsuwanie kabli od siebie zwiększa napięcie indukowane w żyłach powrotnych, co znajduje uzasadnienie w zależnościach pozwalających wyznaczyć te napięcia w układzie jednostronnie uziemionym [3]:

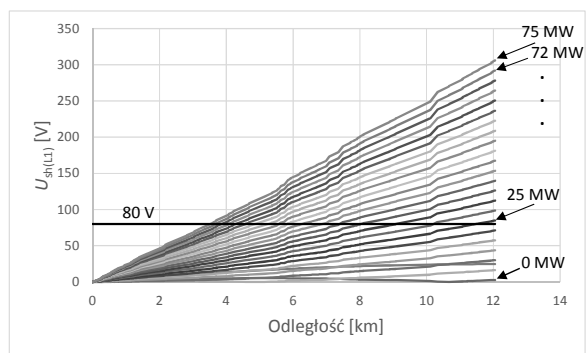
$$\underline{U}_{L1p} = j\omega \cdot \underline{I} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \left[-\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2D_{s1-2}^2}{d \cdot D_{s1-3}} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left(\frac{2D_{s1-3}}{d} \right) \right] \quad (1)$$

$$\underline{U}_{L2p} = j\omega \cdot \underline{I} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{4D_{s1-2} \cdot D_{s2-3}}{d^2} \right) + j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left(\frac{D_{s2-3}}{D_{s1-2}} \right) \right] \quad (2)$$

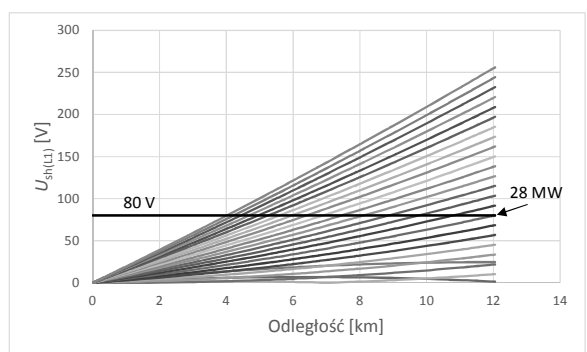
$$\underline{U}_{L3p} = j\omega \cdot \underline{I} \cdot 2 \cdot 10^{-7} \left[-\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2D_{s2-3}^2}{d \cdot D_{s1-3}} \right) - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left(\frac{2D_{s1-3}}{d} \right) \right] \quad (3)$$

gdzie: U_{L1p} , U_{L2p} , U_{L3p} – napięcia indukowane w żyłach powrotnych kabli odpowiednio fazy L1, L2, L3, I – prąd w żyłce roboczej, d – średnia średnica żyły powrotnej, D_{s1-2} , D_{s2-3} , D_{s1-3} – odległość pomiędzy osiami kabli odpowiednio w fazach L1-L2, L2-L3, L1-L3.

W stanach normalnych (obciążenie robocze) istotnym elementem jest ochrona przeciwporażeniowa, z punktu widzenia której napięcie indukowane nie powinno przekraczać wartości 80 V [6]. Uwzględniając to wymaganie należy zauważyć, że gdyby projektować linię kablową na moc przesyłaną równą 25 MW, to wykorzystanie modelu uproszczonego prowadzi do mylnego wniosku o spełnieniu tego warunku.

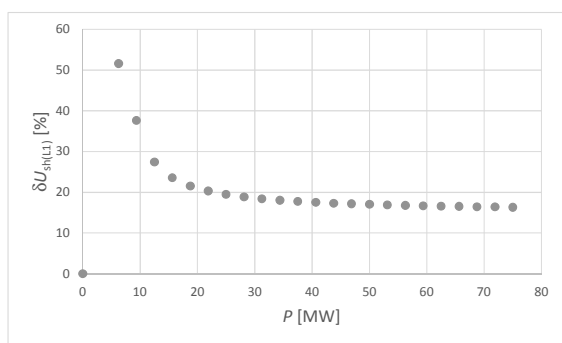


Rys. 2. Napięcia indukowane w żyłce powrotnej kabla fazy L1. Jednostronne uziemienie. Stan ustalony. Model dokładny



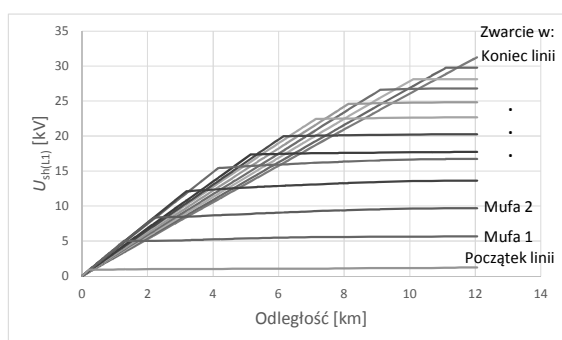
Rys. 3. Napięcia indukowane w żyłce powrotnej kabla fazy L1. Jednostronne uziemienie. Stan ustalony. Model uproszczony

W rozważanym przypadku procentowa różnica pomiędzy modelem dokładnym a uproszczonym ($(U_{dok} - U_{upr})/U_{dok}$) została przedstawiona na rysunku 4. Błąd ten maleje wraz ze wzrostem przesyłanej mocy i ustala się na wartości ok. 18%.

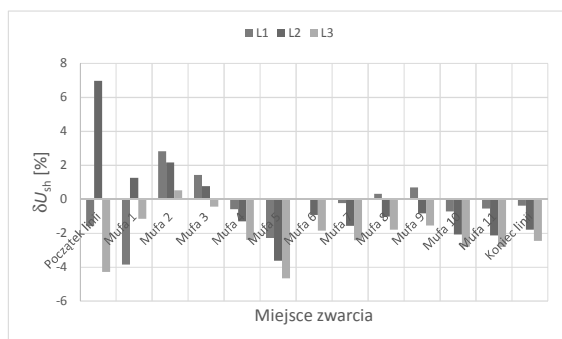


Rys. 4. Różnica napięcia indukowanego w żyłę powrotnej kabla fazy L1 pomiędzy modelem dokładnym i uproszczonym. Stan ustalony

Pewne różnice obserwowane są również w przypadku analizy zwarć jednofazowych. W tym przypadku zamodelowano zwarcia jednofazowe na początku lub na końcu linii kablowej oraz w każdej mufie przelotowej. Napięcie indukowane w żyłach powrotnych narasta wraz z przesuwaniem się miejsca zwarcia od punktu zasilania do końca linii, osiągając wartość ponad 31 kV (rys. 5). Procentowe różnice pomiędzy modelem dokładnym i uproszczonym dla fazy L1 przedstawiono na rysunku 6 i są one mniejsze niż dla stanu ustalonego.



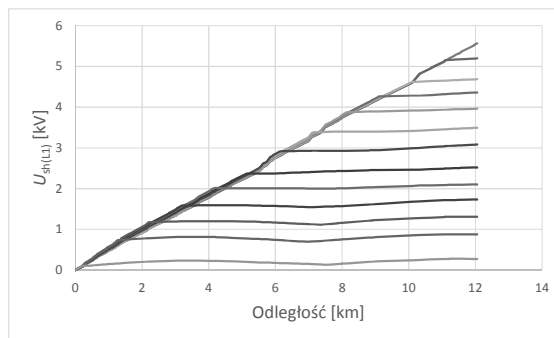
Rys. 5. Napięcie indukowane w żyłę powrotnej kabla fazy L1. Zwarcie 1-fazowe. Model dokładny



Rys. 6. Różnica napięcia indukowanego w żyłach powrotnych pomiędzy modelem dokładnym i uproszczonym. Zwarcie 1-fazowe

Wartość jaką w tym przypadku osiąga napięcie indukowane (31 kV) jest wartością zdecydowanie przekraczającą bezpieczny poziom napięcia dla nieprzewodzącej zewnętrznej powłoki kabla, która powszechnie przyjmowana

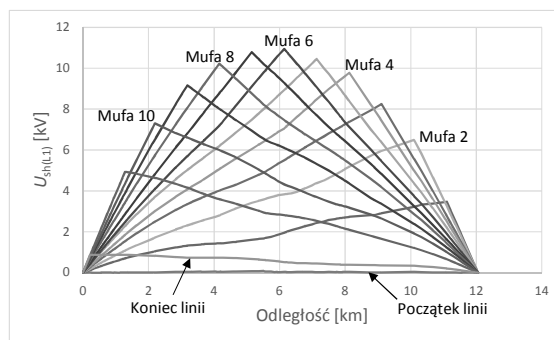
jest na poziomie 5 kV. Rozwiązaniem, które może skutecznie obniżyć wartości napięć indukowanych, jest np. poprowadzenie wzdłuż linii kabla ECC (rys. 7).



Rys. 7. Napięcie indukowane w żyłę powrotnej kabla fazy L1. Zwarcie 1-fazowe. Model dokładny. Linia z kablem ECC

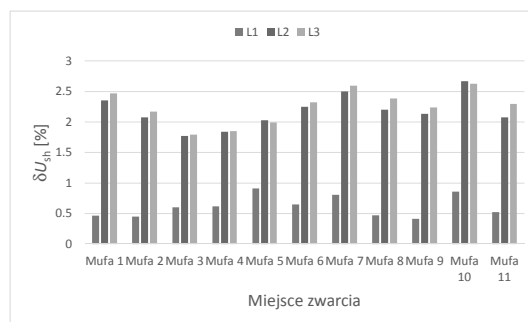
4.2. Uziemienie dwustronne żył powrotnych

Innym sposobem na ograniczenie napięć indukowanych w żyłach powrotnych, niż zastosowanie kabla ECC, jest obustronne uziemienie żył powrotnych (rys. 8). W tym przypadku otrzymuje się ok. trzykrotne obniżenie wartości napięć indukowanych, ale w dalszym ciągu jest to ponad dwukrotnie powyżej poziomu powszechnie przyjmowanego za bezpieczny (5 kV).



Rys. 8. Napięcie indukowane w żyłę powrotnej kabla fazy L1. Zwarcie 1-fazowe. Uziemienie dwustronne żył powrotnych. Model dokładny

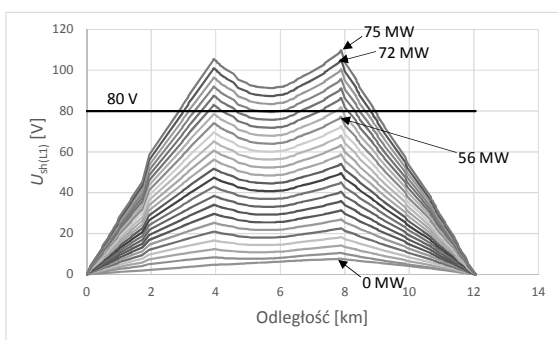
Różnice napięć indukowanych pomiędzy modelem dokładnym a uproszczonym są dla obustronnego uziemienia żył powrotnych niewielkie i nie przekraczają 3% (rys. 9), przy czym wartości uzyskane w modelu uproszczonym są mniejsze niż w modelu dokładnym. W zasadzie interesujące są tu wartości w połowie długości kabla (mufa 6), czyli tam, gdzie osiągają one największy poziom.



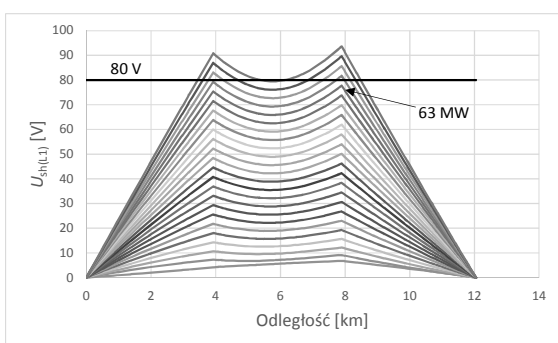
Rys. 9. Różnica napięcia indukowanego na nieziemionym końcu żyły powrotnej kabla fazy L1 pomiędzy modelem dokładnym i uproszczonym. Zwarcie 1-fazowe

4.3. Uziemienie dwustronne żył powrotnych z przeplataniem żył powrotnych

Wadą dwustronnego uziemienia żył powrotnych jest indukowanie się w tych żyłach prądów, które zwiększają w ten sposób sumaryczne straty przesyłowe linii kablowej. Straty te wzrastają wraz ze wzrostem mocy przesyłanej linią. Skutecznym środkiem ograniczającym indukowane prądy jest wykonanie przeplecenia żył powrotnych. Porównując wyniki dla takiego układu pracy linii kablowej, to większe napięcia indukowane w stanie ustalonym uzyskuje się w modelu dokładnym (porównaj rysunek 10 i rysunek 11). Odnosząc wyniki do wymagania poziomu napięcia 80 V, należy zauważyć, że według modelu uproszczonego można przesyłać moc do wartości 63 MW (rys. 11), a według modelu dokładnego wartość ta jest mniejsza o 7 MW (rys. 10).

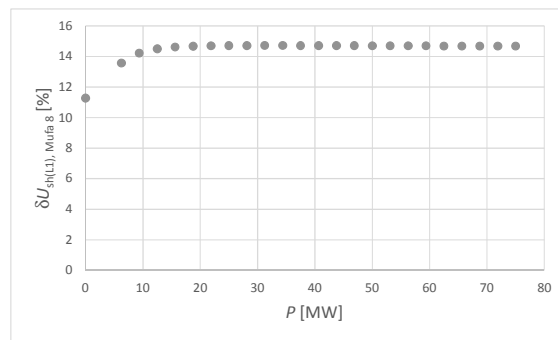


Rys. 10. Napięcia indukowane w żyłce powrotnej kabla fazy L1. Dwustronne uziemienie. Stan ustalony. Model dokładny



Rys. 11. Napięcia indukowane w żyłce powrotnej kabla fazy L1. Dwustronne uziemienie. Stan ustalony. Model uproszczony

Największe poziome napięcie indukowanych w żyłkach powrotnych występują w miejscu ich przepleceń. Porównując wartości otrzymane w miejscu zainstalowania mufy 8 dla modelu uproszczonego i dokładnego (rys. 12), można zauważyć, że w takim układzie pracy linii kablowej różnice w otrzymanych wynikach kształtują się na poziomie 15%.



Rys. 12. Różnica napięcia indukowanego w żyłce powrotnej kabla fazy L1 pomiędzy modelem dokładnym i uproszczonym. Mufa 8. Stan ustalony

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Projektowanie linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia w zurbanizowanym terenie często wymusza stosowanie linii kablowych. Krzyżowanie się projektowanej linii kablowej z innymi obiektami technicznymi, tj. drogami, trasami kolejowymi, czy wodnymi, wymusza stosowanie ochrony kabli przed uszkodzeniami mechanicznymi, np. w postaci dedykowanych rur ochronnych. To powoduje, że na tych odcinkach ułożenie linii kablowej odbiega od pierwotnie przyjętego. W zależności od procentowego udziału takich odcinków w prowadzonej linii, może to w mniejszym lub większym stopniu wpłynąć na wartości napięć indukowanych w żyłkach powrotnych kabli. Pokazane w artykule przykłady sygnalizują, że istnieją wyraźne różnice pomiędzy wynikami otrzymanymi w modelu dokładnym i uproszczonym.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Kwidziński L., Układanie w liniach kablowych SN kabla AXAL-TT-PRO metodą płużenia, Konferencja ELNiKSiNN, PTPiREE, 17.18.10.2018, Wisła
2. URE, Regulacja jakościowa w latach 2018-2025 dla Operatorów Systemów Dystrybucyjnych, Warszawa, 17 września 2018 r.
3. IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV, IEEE Std 575™-2014.
4. Czapp S., Dobrzyński K., Klucznik J., Lubośny Z., Analiza napięć indukowanych w żyłkach powrotnych kabli wysokiego napięcia dla ich wybranych konfiguracji, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 53, Gdańsk, 2017.
5. Norma SEP-E-004: 2014. Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe. Projektowanie i budowa.
6. EN 50522:2010 Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c.

SIMPLIFIED MODELING OF HIGH VOLTAGE POWER CABLES VS. INDUCED SHEATH VOLTAGES – CASE STUDY

The construction of a high voltage cable lines should be preceded by a model analysis, which will allow to determine the levels of voltages and currents induced in their sheaths. In turn, the accuracy of modeling and the simplifications adopted in the model may lead to wrong conclusions.

Keywords: modeling of cable line, induced voltage, sheath-bonding systems.