

doi:10.15199/48.2022.10.25

## Zjawiska przebiegiowe w elektroenergetycznych kablach SN ze szczególnym uwzględnieniem sposobu pracy ich żyły powrotnej

**Streszczenie.** Dobór sposobu pracy żyły powrotnej kabli elektroenergetycznych wiąże się zarówno z poprawieniem bezpieczeństwa pracy, jak i z wystąpieniem strat przesyłowych w tych układach. W niniejszej pracy przedstawione zostanie wykorzystanie specjalnego rodzaju pracy żyły powrotnej kabla średniego napięcia, pozwalające na zminimalizowanie strat przesyłowych, z uwzględnieniem ewentualności wystąpienia w układzie przebiegu ziemnozwarciowych. Przedstawione zostaną badania terenowe oraz symulacyjne, które pozwoliły na określenie poziomu tych przebiegów.

**Abstract.** Selecting the method of cable screen operation is associated with both the improvement of safety and the occurrence of transmission losses in these system. This paper presents the use of a special type of operation of medium voltage cable screen, which allows to minimize transmission losses, taking into account the possible ground fault overvoltage. Field and simulation tests that allows to determine the level of this overvoltages will be presented. (*Overvoltage phenomena in MV power cable lines according to operation of cable screens.*)

**Słowa kluczowe:** przebiegi ziemnozwarciowe, żyły powrotne, sieci średniego napięcia, symulacja komputerowa  
**Keywords:** ground fault overvoltages, metallic cable screen, MV cable lines, computer simulation

### Wstęp

Zminimalizowanie strat przesyłowych w sieciach elektroenergetycznych to problem o istotnym znaczeniu ekonomicznym, dlatego poszukiwane są różne metody jego rozwiązania, wiążące się z przyczynami występowania tych strat. Linie kablowe są szczególnym przypadkiem, w którym, oprócz strat w żyłach roboczych, można wyróżnić również straty w metalowych powłokach [1]. Dla żyły powrotnej można wyróżnić straty wynikające z przepływu prądu powrotnego oraz występowania prądów wirowych. Te drugie, będące zgodnie z literaturą [2], tylko w niewielkim stopniu odpowiedzialne za straty przesyłowe mogą zostać pominięte, natomiast przepływ prądu żyłą powrotną stanowi istotny problem, a w jego rozwiązaniu może być pomocna zmiana sposobu uziemienia żyły powrotnej.

Badania przedstawione poniżej, są jednym z wyników współpracy Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej ze spółką dystrybucyjną Enea Operator S.A. W ramach części z przeprowadzonych badań, jako metodę ograniczenia strat przesyłowych w liniach kablowych, zaproponowano jednostronne odziemienie żył powrotnych jednej, bądź dwóch faz, przy czym zaznaczono, że takie rozwiązanie może wpłynąć na zmianę parametrów w takim układzie [3]. Szczególnie istotne, z punktu widzenia napięć indukowanych w tych żyłach, wydawało się pozbawienie ich uziemienia i związana z tym możliwość wystąpienia przebiegu.

### Żyła powrotna kabla SN i ich rola

W związku ze zwiększeniem wydajności przesyłu energii elektrycznej przez linie kablowe, proponuje się zmianę sposobu konfiguracji połączeń lub sposobu uziemienia żył powrotnych kabli elektroenergetycznych. Opisywane w literaturze metody to między innymi uziemienie jednostronne, cross-bonding czy cross-bonding z transpozycją [4-6]. Metody te mają na celu zminimalizowanie strat przesyłowych, ale tym samym mogą być związane z wystąpieniem szeregu niepożądanych zjawisk.

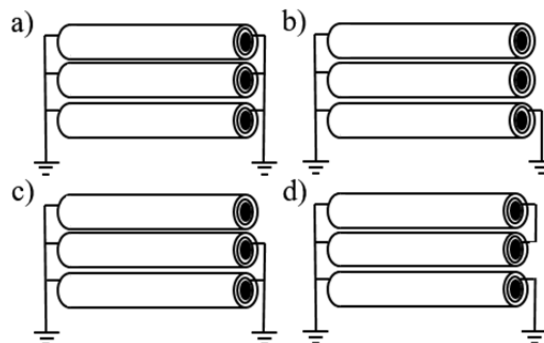
Z punktu widzenia wytrzymałości elektrycznej powłok kabli elektroenergetycznych, ważnym, a niepożądanym zjawiskiem są przebiegi. W sieciach elektroenergetycznych wyróżniamy przebiegi zewnętrzne, w tym przebiegi wywołane wyładowaniami atmosferycznymi i przebiegi indukowane oraz przebiegi wewnętrzne. Te ostatnie wynikają z występowania zjawisk

zakłóceń i najczęściej związane są z przepływem prądów powrotnych przez żyły powrotne w trakcie wystąpienia zwarcia doziemnego w kablu [7].

Zjawiska wynikające z przepływu prądów zakłóceń przez żyły powrotne są szczególnie dobrze zbadane dla kabli WN [2, 4], natomiast o wiele rzadziej w literaturze można spotkać opis tych zjawisk dla kabli w sieciach SN. W przypadku zwarcia doziemnych, w sieciach ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym, nie ma potrzeby uwzględniania wpływu prądu powracającego z udziałem ziemi. Analiza rozptyłów prądów zwarcia doziemnego w kablowych sieciach SN, pracujących z punktem uziemionym nieskutecznie, wymaga uwzględnienia prądu powracającego przez ziemię, a co za tym idzie, urządzenia pracujące w punkcie neutralnym tej sieci. Oznacza to uwzględnienie współczynnika redukcyjnego, który pozwoli na wyznaczenie jaka część prądu spływa do ziemi [8].

### Badanie zjawisk przebiegowych

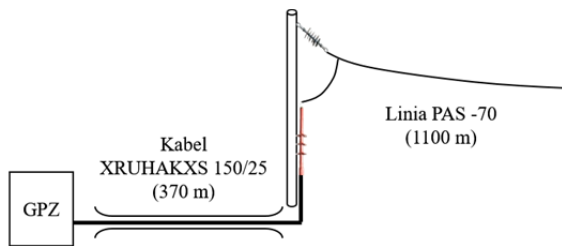
Praca żył powrotnych rozpatrywana w ramach tych badań jest wariacją dotyczącą uziemienia obustronnego. Na rysunku nr 1 przedstawione zostały rozpatrywane w trakcie badań terenowych oraz symulacyjnych warianty pracy żyły powrotnej. Warianty te uwzględniają omówione wcześniej badania nad stratami energii elektrycznej.



Rys.1. Rozpatrywane sposoby pracy żyły powrotnej kabli elektroenergetycznych: a) uziemienie obustronne, b) uziemienie obustronne z nieuziemioną jednostronnie jedną z faz; c) uziemienie obustronne z nieuziemionymi jednostronnie dwiema fazami; d) uziemienie obustronne jednej z faz i połączenie dwóch nieuziemionych faz

Zgodnie z analizami zamieszczonymi w literaturze [3], podczas pracy bezzakłóceńowej nie ma ryzyka wystąpienia znaczących przepięć, natomiast w stanach zakłóceńowych wartości przepięć mogą sięgać nawet kilku kilowoltów. Aby zweryfikować tę tezę, wykonane zostały badania terenowe oraz symulacyjne. Ze względu na potrzebę porównania tych dwóch metod badawczych, do wykonania symulacji wykorzystano wybrany fragment rzeczywistej sieci elektroenergetycznej, w którym wykonano wcześniej próby zwarciove.

Badania terenowe zostały przeprowadzone w sieci przedstawionej na rysunku 2. W trakcie badań terenowych modyfikację sposobu uziemienia żył powrotnych wykonywano na słupie z głowicą kablową. Na specjalnie przygotowanym pomoście umieszczono wysokonapięciowy dzielnik rezystancyjny. Dzielnik ten został specjalnie skonstruowany na potrzeby prowadzonych testów, a przekładnia dzielnika została tak dobrana, aby w sposób bezpieczny i precyzyjny można było rejestrować przebiegi napięcia generowane w nieziemionych żyłach powrotnych kabli podczas prób zwarciowych. Pomiar odbywał się za pomocą wysokiej klasy oscyloskopu cyfrowego MDO 3104 firmy Tektronix, którego częstość próbkowania wynosi 5 GS/s. W trakcie badań zwarcie jednofazowe wykonywane było we fragmencie linii napowietrznej. Badania wykonano bezobciążeniowo.



Rys.2. Schemat badanego fragmentu sieci

### Badanie terenowe

Badania wykonano dla wariantów dobranych z uwzględnieniem warunków sieci, w której wykonywane były badania terenowe przy założeniu sposobów pracy żył powrotnej elektroenergetycznego kabla SN, które pozwalają na minimalizację strat przesyłowych. Wszystkie warianty przedstawione zostały w tabeli nr 1.

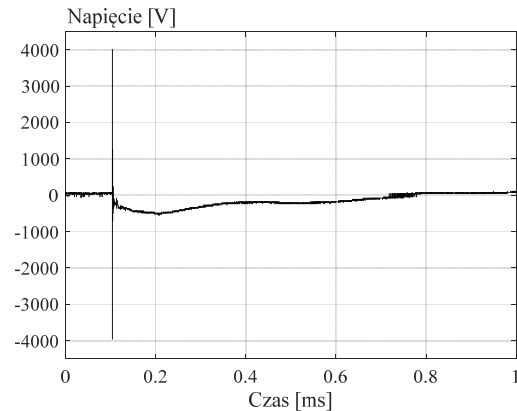
Tabela 1. Opis wariantów badań

Sposób pracy poszczególnych żył powrotnych w fazach L1, L2,L3	Rodzaj zwarcia
Wariant 1 faza L1 odziemiona, fazy L2 oraz L3 uziemiona	jednofazowe w fazie L1
Wariant 2 fazy L1 i L2 odziemione, faza L3 uziemiona	jednofazowe w fazie L1
Wariant 3 fazy L1 i L2 odziemione i połączone ze sobą, faza L3 uziemiona	jednofazowe w fazie L1

Pierwszy pomiar wykonano dla uziemionych wszystkich faz. Zgodnie z oczekiwaniami na żyłę pojawiło się niewielkie napięcie, sięgające wartości szczytowej ok. 60 V.

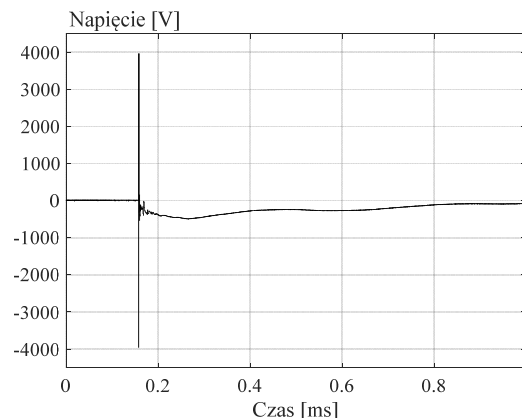
Wszystkich zmian dokonywano na końcu kabla, dlatego napięcia pojawiające się na żyłach powrotnych w trakcie trwania zwarcia zmierzone zostały przy słupie z głowicą kablową i dotyczą tylko odziemionych faz. Na rysunku 3 przedstawiony został przebieg dla wariantu 1. Jak widać na przedstawionym rysunku, w nieziemionej żyłce powrotnej pojawiło się przepięcie o stromym przebiegu początkowym, które w sposób aperiodyczny zanikało w czasie kilkuset

milisekund. Maksymalna wartość napięcia pojawiającego się na żyłce L1 to ok. 4 kV.

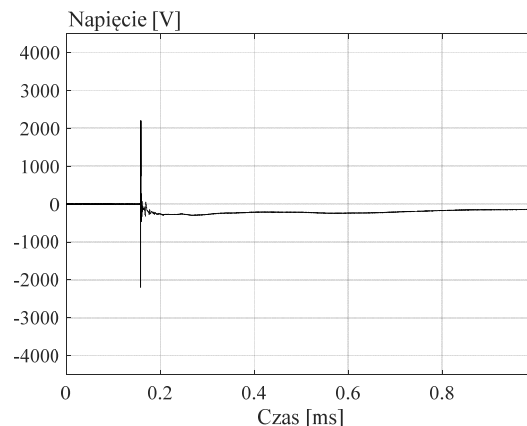


Rys.3. Przebieg napięcia indukowanego w nieziemionej żyłce powrotnej fazy L1 w trakcie zwarcia w fazie L1

Wariant 2 zakłada jednostronne odziemienie żył powrotnych dwóch faz, a zatem możliwe były do uzyskania dwa przebiegi – dla fazy L1 oraz dla fazy L2, które przedstawione zostały odpowiednio na rysunkach 4 oraz 5. Jak widać przebiegi przyjmują kształt podobny do uzyskanego w pierwszej konfiguracji, natomiast nieznacznie różnią się co do wartości. W kulminacyjnym momencie, na żyłce powrotnej fazy L1 przepięcie wyniosło 4 kV, zaś w fazie sąsiedniej wartość ta osiągnęła przeszło 2 kV.

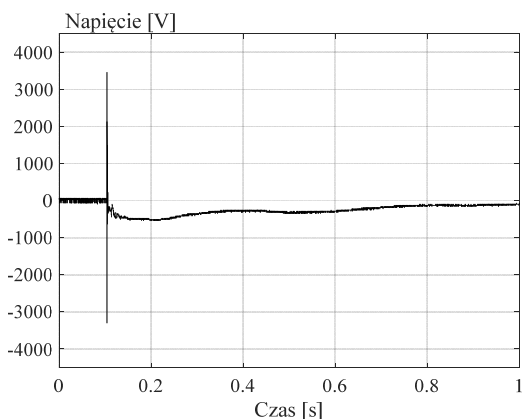


Rys.4. Przebieg napięcia indukowanego w nieziemionej żyłce powrotnej fazy L1 w trakcie zwarcia w fazie L1



Rys.5. Przebieg napięcia indukowanego w nieziemionej żyłce powrotnej fazy L2 w trakcie zwarcia w fazie L1

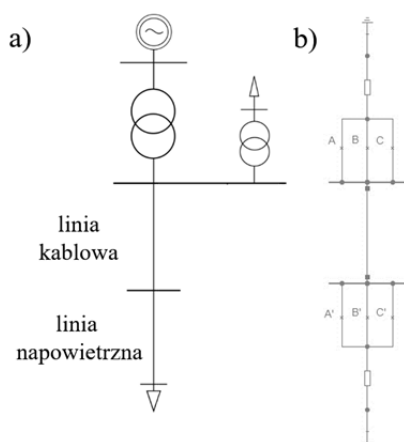
W trakcie ostatniego badania żyły powrotne faz L1 oraz L2 zostały ze sobą połączone, zatem otrzymano tylko jeden przebieg, który został przedstawiony na rysunku 6. Jak wynika z otrzymanego wykresu, przy połączeniu faz również pojawia się przepięcie ziemnozwarciowe, które swoje maksimum osiąga na poziomie około 3,5 kV.



Rys.6. Przebieg napięcia indukowanego w punkcie połączenia nieuziemionych żył powrotnych fazy L1 oraz L2 w trakcie zwarcia w fazie L1

### Badania symulacyjne

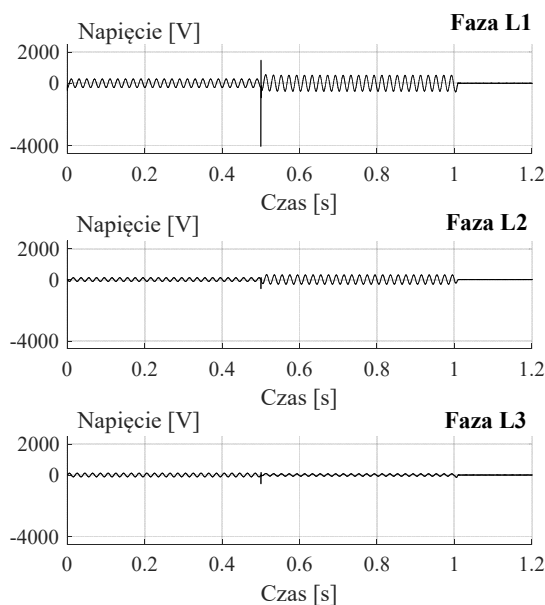
Wyniki badań terenowych wzmogły zainteresowanie możliwością pojawienia się niebezpiecznych przepięć ziemnozwarciowych również w innych konfiguracjach sieci. W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych należało zweryfikować model. Symulacje komputerowe dotyczące stanów nieustalonych w linii kablowo-napowietrznej przeprowadzone zostały z użyciem narzędzi programu DlgSILENT Power Factory. Sieć zamodelowana w programie stanowiła wierne odwzorowanie układu, w którym wykonywane były badania terenowe. Na rysunku nr 7 przedstawiony został schemat sieci wykorzystany do stworzenia modelu oraz model żyły powrotnej z programu Power Factory. Model ten w programie pozwala na manewrowanie sposobem uzziemienia poprzez zainstalowanie wyłączników między poszczególnymi fazami, a rezystancją uzziemienia. W trakcie badań symulacyjnych konfigurację zmieniano na końcu kabla, w celu porównania wyników z badaniami terenowymi i weryfikacji modelu.



Rys.7. Model do badań symulacyjnych: a) fragment sieci badanej, b) model żyły powrotnej w programie Power Factory

Wszystkie przeprowadzone w tej części symulacje odpowiadały wariantom wykonanym w trakcie badań terenowych. Symulacja stanów nieustalonych wymagała ustawienia pewnej sekwencji działań. W 0,5 s symulacji następowało zwarcie, które trwało 0,5 s, a następnie było wyłączane poprzez odłączenie ciągu kablowo-napowietrzego. Zwarcie wykonywane było we fragmencie linii napowietrznej PAS, w odległości 100 m od głowicy kablowej. W programie nie ma możliwości pracy bez obciążenia, w związku z tym przebiegi nie mają charakteru aperiodycznego, a sinusoidalny. W przeciwieństwie do pomiaru w trakcie badań terenowych, w trakcie symulacji możliwy jest pomiar napięć we wszystkich żyłach powrotnych.

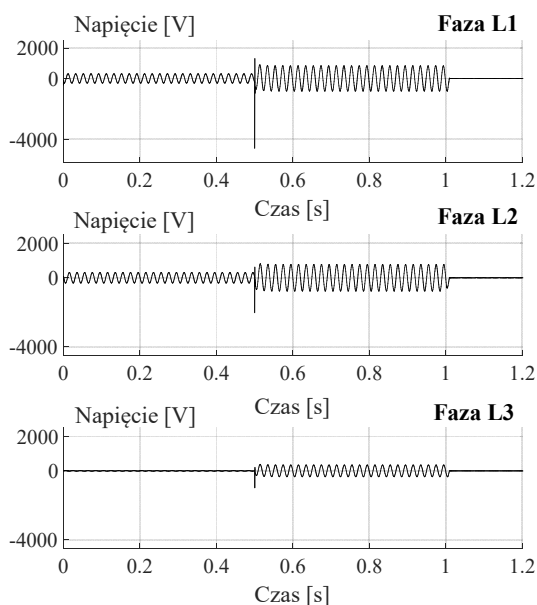
Wyniki dla wszystkich wariantów konfiguracji pracy żyły powrotnej linii kablowej zostały przedstawione na rysunkach 8, 9 oraz 10. W przypadku pierwszego z wariantów, w którym jednostronnie odziemiona zostaje faza L1, w której modelowane jest zwarcie, widać, że napięcia indukowane w żyłach powrotnych uziemionych są rzędu setek woltów, podczas gdy dla fazy L1 napięcie to wynosi aż 4059 V.



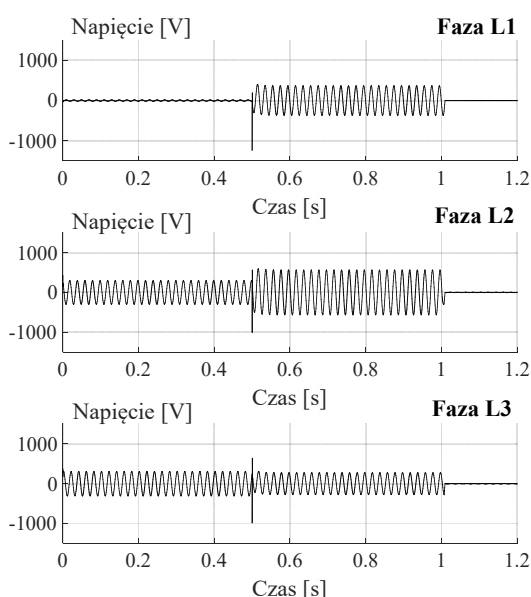
Rys.8. Przebiegi napięcia indukowanego w trakcie zwarcia w fazie L1 dla wszystkich faz linii kablowej – wariant 1

Konfiguracja pracy uzziemienia żyły powrotnej pozwalająca, zgodnie z literaturą, na utrzymanie najmniejszych strat przesyłowych, charakteryzuje się największymi przepięciami ziemnozwarciowymi w odziemionych żyłach. Poziomą napięć indukowanych w żyłach powrotnych jest zależny również od tego, czy w fazie płynie prąd zwarcia, co jak przedstawia przebieg dla fazy L1 na rysunku nr 9, w przypadku odziemionych dwóch żył powrotnych powoduje aż dwukrotny wzrost napięcia w doziemionej fazie.

W ostatnim wariantcie żyły powrotne po stronie nieuziemionej zostały połączone, aby wyrównać potencjał. W modelu wykorzystywanym do symulacji możliwy był pomiar napięć w żyłach powrotnych, bez uwzględnienia punktu połączenia tych powłok, dlatego przedstawione na rysunku 10 przebiegi napięć w fazie L1 i L2 różnią się od siebie nieznacznie. Wpływ na taki stan rzeczy może mieć przede wszystkim fakt, że zwarcie występuje w fazie L1.



Rys.9. Przebiegi napięcia indukowanego w trakcie zwarcia w fazie L1 dla wszystkich faz linii kablowej – wariant 2



Rys.10. Przebiegi napięcia indukowanego w trakcie zwarcia w fazie L1 dla wszystkich faz linii kablowej – wariant 3

### Podsumowanie

Zestawienie wyników badań maksymalnych napięć wyindukowanych w żyłach powrotnych kabla elektroenergetycznego przedstawione zostało w tabelach 2, 3 oraz 4.

Porównując rezultaty badań terenowych oraz symulacyjnych można wnioskować, że sieć zamodelowana w programie Power Factory odzwierciedla rzeczywistą sieć, w której wykonywane były pomiary terenowe, a zatem model został pozytywnie zweryfikowany.

Tabela 2. Zestawienie wyników dla wariantu 1

Rodzaj badania	Faza	Poziom przepięcia [V]
terenowe	L1	4014
symulacyjne	L1	4059

Tabela 3. Zestawienie wyników dla wariantu 2

Rodzaj badania	Faza	Poziom przepięcia [V]
terenowe	L1	3957
	L2	2198
symulacyjne	L1	4590
	L2	2031

Tabela 4. Zestawienie wyników dla wariantu 3

Rodzaj badania	Faza	Poziom przepięcia [V]
terenowe	L1+L2	3459
symulacyjne	L1	1239
	L2	1008

Zarówno badania terenowe, jak i symulacyjne pozwalają spodziewać się występowania znacznych wzrostów napięć indukowanych w żyłach powrotnych dla nieziemionych żył powrotnych kabli elektroenergetycznych, szczególnie w przypadku, gdy zwarcie doziemne wystąpi w fazie z nieziemioną żyłą powrotną.

Chociaż napięcia nie przekraczają wartości bezpiecznej z punktu widzenia wytrzymałości napięciowej powłok kabla, zmiana konfiguracji pracy sieci, bądź rodzaj zwarcia, które wystąpi w linii kablowej może zwiększyć napięcia do poziomu niepożądanego.

**Autorka:** mgr inż. Aleksandra Schött-Szymczak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [aleksandra.schott-szymczak@put.poznan.pl](mailto:aleksandra.schott-szymczak@put.poznan.pl)

### LITERATURA

- [1] Novak B., Koller L., Berta I. Loss reduction in cable sheathing. *Proceedings of International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Granada, Spain, 23-25. March 2010
- [2] Barrett J. S., Anders G.J. Circulating current and hysteresis losses in screens, sheaths and armour of electric power cables – mathematical models and comparison with IEC Standard 287 *IEEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, Vol. 144, Issue 3, 1997, 101-110
- [3] Andruszkiewicz J., Lorenc, J., Łowczowski K., Weychan A., Zawodniak J. Energy losses' reduction in metallic screens of MV cable power lines and busbar bridges composed of single-core cable. *Maintenance and Reliability*, Lublin, Poland, Vol. 22, No. 1, 2020, 15-25
- [4] Czapp S., Dobrzyński K., Klucznik J., Lubośny Z. Analysis of induced voltages in sheaths of high voltage power cables for their selected configuration, *XVIII Międzynarodowa Konferencja Aktualne problemy w elektroenergetyce APE'17*, Jastrzębia Góra, Poland, 7-9 June 2017
- [5] Lin Y., Xu Z. Cable sheath loss reduction strategy research based on the coupled line model, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 5, Oct. 2015, 2303-2311
- [6] IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV; *IEEE Standard Association*: Piscataway, NJ, USA, 2014.
- [7] Gouramanis K. V., Kaloudas C. G., Papadopoulos T. A., Papagiannis G. K., Stasinou K., Sheath voltage calculations in long medium voltage power cables, *IEEE Trondheim PowerTech*, Trondheim, Norway, 2011, 1-7
- [8] Hoppel W. Sieci średnich napięć. Automatyka zabezpieczeniowa i ochrona od porażań, PWN: Warszawa, Polska, 2017