

# Metoda symulacyjnego wyznaczania rezystancji połączeń przewodów ochronnych w dołowych sieciach górniczych niskiego napięcia

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono metodę symulacyjnego wyznaczania rezystancji zastępczej połączeń przewodów ochronnych dedykowaną dla dołowych sieci górniczych niskiego napięcia. Metoda opiera się na adaptacji istniejącego zastępczego jednofazowego modelu takiej sieci przeznaczonego do obliczeń rozprywu prądów i napięć w różnych stanach pracy sieci. Na podstawie istniejącego modelu jest generowany nowy model uwzględniający specyfikę połączeń przewodów ochronnych, a następnie uruchamiany jest autorski algorytm pozwalający na wyznaczenie zastępczej rezystancji wszystkich połączeń przewodów ochronnych w danej sieci (począwszy od końca każdego przewodu aż do górnego transformatora 6 kV). Algorytm wykorzystuje kombinację analizy grafu obwodu oraz symulacyjnego wyznaczania rozprywu prądów i napięć w zmodyfikowanym modelu obwodowym sieci. Przedstawioną metodę zilustrowano przykładem obliczeniowym.

**Abstract.** The paper presents a method of computer based determination of the equivalent resistance of protective conductor connections in low-voltage underground mining networks. The method is based on the adaptation of the existing equivalent single-phase model of such a network designed for the calculation of currents and voltages in different states of the network (nominal working conditions, short circuit current flow, etc.). Based on the existing model, a new model is generated that takes into account the specificity of protective wires connections and an original algorithm is launched that allows determination of the equivalent resistance of all protective conductor connections (starting from the end of each conductor up to the 6 kV transformer). The algorithm uses a combination of circuit graph analysis and modified nodal analysis used for determination of current and voltage flows in the newly generated circuit model of the network. The presented method is illustrated by an exemplary network analysis. (**Simulation method of determining the resistance of connections of protective wires in low-voltage underground mining networks**).

**Słowa kluczowe:** stan ustalony, analiza komputerowa, model obwodowy, graf obwodu, górnicza sieć dołowa niskiego napięcia, wyznaczanie rezystancji przewodów ochronnych.

**Keywords:** steady state, computer analysis, circuit model, circuit graph, low voltage underground mining network, protective wires resistance.

## Wstęp

Dołowe sieci górnicze stanowią specyficzny i wymagający rodzaj sieci elektrycznych zarówno pod względem projektowym, jak i wykonawczym [1, 2]. Składa się na to wiele czynników, z których główne to:

1. Bardzo trudne warunki środowiskowe (wilgoć, zagrożenie pożarem/wybuchem, zapylenie, zagrożenie zalaniem) i związany z nimi układ sieci z izolowanym punktem gwiazdowym (sieć IT). Wymusza to stosowanie elementów składowych sieci (kable, łączniki, stacje transformatorowe, itd.) w specjalnych wykonaniach (np. przeciwwybuchowych), jak i stosowanie dodatkowej aparatury zabezpieczającej (np. ciągła kontrola stanu izolacji przez zabezpieczenia upływowe czy też stosowanie systemu uziemiających przewodów ochronnych).
2. Tymczasowy charakter sieci (częsta rekonfiguracja i rozbudowa), co z kolei wymusza częste przeliczenie wszystkich parametrów sieci (rozprywy prądów i napięć w różnych stanach pracy, dobór zabezpieczeń) oraz wykonywanie szeregu pomiarów kontrolnych po każdej zmianie konfiguracji.
3. Mnogość zaleceń, praktyk i regulacji branżowych regulujących sposoby projektowania sieci, jej zestawiania oraz wykonywania pomiarów kontrolnych (w tym znaczna liczba dokumentów normatywnych [3, 4, 5]).

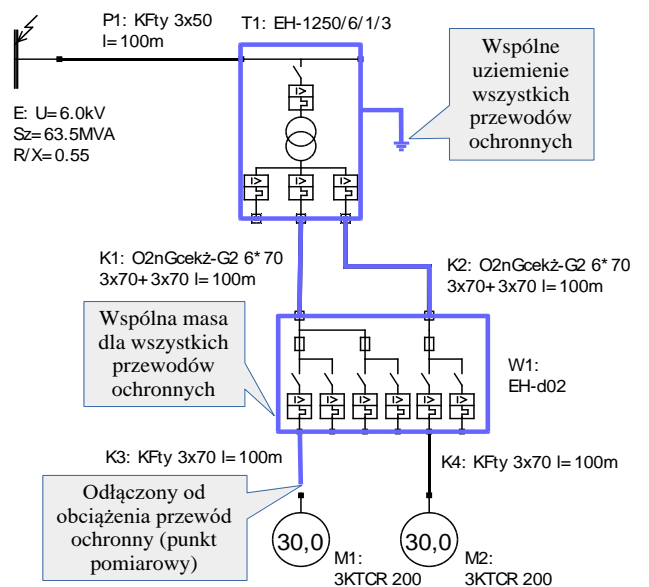
Wszystko to powoduje, że w praktyce inżynierskiej chętnie są stosowane narzędzia komputerowego wspomaganie projektowania sieci pozwalające na wygodne i przede wszystkim szybkie zestawienie schematu sieci i przeliczenie jej wszystkich wymaganych parametrów. Jednym z często wykorzystywanych do tego celu narzędzi był dostępny przez kilkanaście lat w wielu polskich kopalniach program SnN [6], a od 2021 roku jego następcą NextSnN [7, 8]. Oprogramowanie pozwala na zaprojektowanie dołowej sieci górniczej niskiego napięcia i przeprowadzenie szeregu analiz (prądy obciążeniowe i zwarciove, spadki napięć, pojemności doziemne, itd.) oraz

wyznaczenie zalecanych nastaw zabezpieczeń przeciążeniowych i zwarciowych. Oprogramowanie nie pozwala natomiast na wyznaczanie rezystancji zastępczej przewodów ochronnych, która to stanowi cenny punkt odniesienia w trakcie wykonywania pomiarów rezystancji uziemienia na poszczególnych odcinkach projektowanej sieci (od danego punktu sieci do uziemienia w najbliższym transformatorze 6 kV). Wartości tej rezystancji mają kluczowe znaczenie dla systemów bezpieczeństwa związanych z systemem uziemiających przewodów ochronnych (w literaturze branżowej często określanymi skrótowo SUPO) i są koniecznym i wymaganym dokumentami normatywnymi elementem podziemnych górniczych sieci dołowych niskiego napięcia [2, 5].

Niniejsza praca przedstawia autorską metodę symulacyjnego wyznaczania rezystancji zastępczej przewodów ochronnych będącą połączeniem analizy grafu obwodu oraz wykorzystania modelu obwodowego opartego na zmodyfikowanej metodzie potencjałów węzłowych [9] (ang. modified nodal analysis – MNA). Metoda została zaprojektowana w taki sposób, aby maksymalnie wykorzystać istniejący w programie NextSnN model sieci, który do tej pory nie uwzględniał przewodów ochronnych oraz dostępny silnik obliczeniowy programu oparty na MNA.

## Pomiary kontrolne rezystancji uziemienia przewodów ochronnych

Po każdej modyfikacji struktury dołowej sieci górniczej niskiego napięcia wykonuje się pomiary kontrolne mające sprawdzić poprawność połączeń systemu uziemiających przewodów ochronnych oraz skuteczność ich uziemienia [2, 5]. Sposób wykonywania pomiarów przedstawiono na przykładzie widocznym na Rys.1. Przedstawiony na Rys.1 fragment sieci składa się ze źródła E o napięciu 6 kV i mocy zwarciowej 63,5 MVA, kabla P1, stacji transformatorowej T1 o napięciach 6 kV/1 kV, kabli łączących stację transformatorową z łącznikiem W1 (K1 i K2) oraz dwóch silników o mocy 30 kW połączonych kablami K3 i K4.



Rys. 1. Przykład pomiaru zastępczej rezystancji uziemienia dla wybranego fragmentu sieci zasilającej i przewodu K3

Typowy pomiar kontrolny przeprowadza się na wszystkich końcach linii zasilających (przy odbornikach) względem uziemienia znajdującego się w stacji transformatorowej. Dla przykładu przedstawionego na Rys.1 punktem pomiarowym jest dolny zacisk przewodu ochronnego kabla K3, który został odłączony od obciążenia. Kolorem niebieskim na Rys.1 zaznaczono elementy o wspólnym potencjale leżące na ścieżce łączącej przewód ochronny kabla K3 z uziemieniem w stacji transformatorowej. Można zauważyć, że w tym wypadku rezystancja zastępcza przewodów ochronnych dla kabla K3 będzie równa:

$$(1) R_{z3} = R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

gdzie  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$  to rezystancje przewodów ochronnych odpowiednio kabli K1, K2 i K3. Rezystancja  $R_{z3}$  to jedynie rezystancja zastępcza przewodów ochronnych, a nie rezystancja zastępcza całego uziemienia (tutaj w trakcie pomiarów dojdzie jeszcze rezystancja samego uziomu oraz rezystancje styków w miejscach połączeń), jednakże już znajomość samej rezystancji zastępczej przewodów jest cenną informacją w trakcie dokonywania pomiarów, gdyż pozwala ocenić jej wpływ na sumaryczny wynik pomiaru.

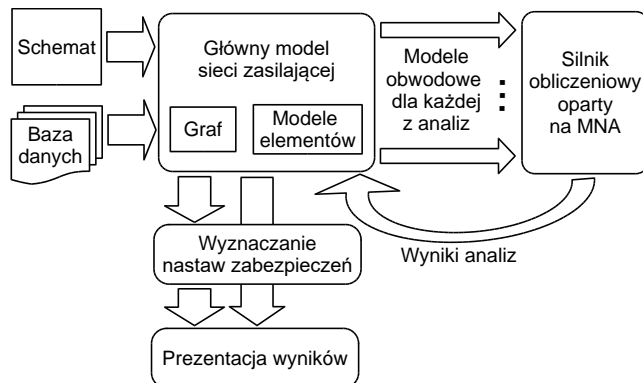
Istotne i charakterystyczne jest, że dla każdego łącznika znajdującego się na ścieżce połączeń przewodów ochronnych, wszystkie podłączone do niego przewody ochronne są podłączone do wspólnej masy (niebieska ramka wokół łącznika). Stanowi to istotną różnicę w stosunku do przewodów roboczych, dla których nie ma takiego połączenia. W przykładzie z Rys.1 równoległe połączenie przewodów dla kabli K1 i K2 wystąpi więc jedynie dla ich przewodów ochronnych.

### Zaimplementowany w programie NextSnN model sieci zasilającej i jego ograniczenia

Punktem wyjścia do dalszych rozważań jest sposób modelowania dolowej sieci elektrycznej niskiego napięcia przyjęty w oprogramowaniu NextSnN [7], którego sposób działania przedstawiono na Rys.2.

Główny model projektowanej sieci zasilającej jest konstruowany na podstawie schematu elektrycznego tej sieci stworzonego przez projektanta oraz istniejącej bazy danych elementów. Głównymi elementami modelu są graf sieci oraz wybrane z bazy danych konkretne modele elementów w niej występujących. Graf obwodu jest grafem skierowanym o

umownym kierunku góra-dół, gdzie na samej górze sieci znajduje się źródło zasilania sieci, a na samym dole podłączane obciążenia (silniki, zespoły transformatorowe, itd.). Należy tutaj zaznaczyć, że co do zasady program pozwala na projektowanie sieci o topologii promieniowej, tzn. ścieżka z dowolnego punktu w górę sieci jest zawsze jednoznacznie określona (graf sieci nie zawiera cykli/konturów zamkniętych).



Rys. 2. Diagram sposobu działania oprogramowania NextSnN

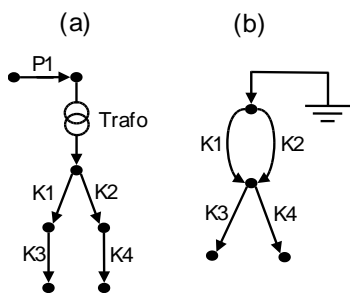
Na podstawie głównego modelu obwodu są następnie generowane obwodowe modele zgodne z metodą MNA dla każdej z dostępnych analiz (prądów obciążenia, znamionowych, zwarciovych, itd.). Po wygenerowaniu modeli silnik obliczeniowy implementujący metodę MNA przeprowadza symulację wszystkich modeli wyznaczając dla nich rozpyły prądów i napięć oraz wymagane dla danej analizy parametry wtórne takie jak np. moce czy rezystancje. Po zakończeniu pracy silnik obliczeniowy MNA zapisuje zwrotnie uzyskane wyniki analiz w głównym modelu sieci.

Następnie jest uruchamiany moduł wyznaczania nastaw zabezpieczeń, który na podstawie wyników symulacji uzyskanych z silnika obliczeniowego MNA wyznacza nastawy zabezpieczeń przeciążeniowych i zwarciovych zainstalowanych w projektowanej sieci.

W ostatnim etapie działania programu wszystkie uzyskane wyniki są odpowiednio formatowane i prezentowane do wglądu projektantowi.

Przedstawiony sposób działania programu umożliwia wykonywanie szeregu analiz projektowanej sieci, nie umożliwia jednak wyznaczania poszukiwanej rezystancji zastępczej przewodów ochronnych, ponieważ graf obwodu jest w tym przypadku inny niż dla pozostałych analiz. Aby zilustrować problem na Rys.3 przedstawiono dwa grafy dla fragmentu sieci przedstawionego na Rys.1: graf obowiązujący dla przewodów roboczych (aktualnie dostępny w modelu głównym sieci) oraz graf dla połączeń przewodów ochronnych. Można zauważyć, że nawet w tak prostym przypadku grafy wyraźnie się od siebie różnią. Ponadto graf dla przewodów ochronnych (Rys.3(b)) zawiera wspomniany kontur zamknięty zamykający się przez kable K1 i K2. Powoduje to niejednoznaczność ścieżki przejścia w górę sieci zarówno dla kabla K3 (ścieżka K3-K1 lub K3-K2), jak i K4 (ścieżka K4-K1 lub K4-K2), co znacznie komplikuje wyznaczanie rezystancji zastępczej na podstawie samej topologii obwodu wyznaczonej przez graf.

Należy tutaj również zaznaczyć, że przedstawiony na Rys.3 przykład został przytoczony jedynie w celach poglądowych. W praktyce projektowej struktura sieci jest zazwyczaj znacznie bardziej skomplikowana. Typowa sieć zawiera od jednej do kilku stacji transformatorowych, od kilku do kilkunastu łączników oraz od kilku do kilkudziesięciu obciążeń.



Rys. 3. Grafy połączeń przewodów roboczych (a) i przewodów ochronnych (b) dla przykładowego fragmentu sieci z Rys. 1

### Przyjęte założenia odnośnie wyznaczania rezystancji zastępczej przewodów ochronnych

Przy projektowaniu algorytmu wyznaczania rezystancji zastępczej przewodów ochronnych przyjęto następujące założenia:

1. Wyznaczana jest rezystancja zastępcza między przewodem ochronnym każdego z występujących na schemacie kabli dla napięcia niższego niż 6 kV a najbliższym (patrząc w górę sieci) transformatorem o napięciu 6 kV.
2. Węzły przyłączeniowe każdego łącznika i stacji transformatorowej są ze sobą połączone (osobno dla każdego łącznika/stacji transformatorowej).
3. Wszystkie uziemienia transformatorów 6 kV występujących na schemacie są podłączone do wspólnej masy odniesienia.
4. Dla aktualnie mierzonego kabla jego dolny koniec jest odłączony od danego łącznika/obciążenia.
5. Wyniki analizy prezentowane przez algorytm mają dostarczać informacji zarówno o rezystancji zastępczej między danym punktem pomiarowym a uziemieniem transformatora, jak i informować o kablach znajdujących się na ścieżce połączenia punktu pomiarowego z uziemieniem transformatora.

Przedstawione założenia wynikają z wcześniej opisanego sposobu dokonywania pomiarów kontrolnych, jak i z konsultacji z kadrą inżynierską przeprowadzającą takie pomiary i uwzględniają rekomendowany zestaw danych przydatnych w praktyce pomiarowej.

### Proponowana metoda wyznaczania rezystancji zastępczej przewodów ochronnych

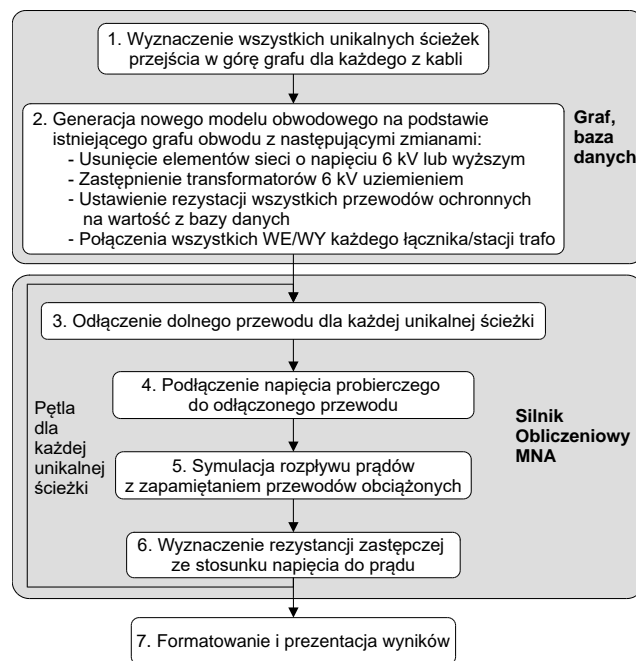
Algorytm proponowanej metody wyznaczania rezystancji zastępczej, który spełnia przyjęte założenia, przedstawiono na Rys.4.

W pierwszej kolejności, na podstawie istniejącego grafu obwodu, są znajdowane wszystkie unikalne ścieżki przejścia w górę sieci do najbliższego transformatora 6 kV począwszy od każdego kabla dla poziomu napięć mniejszego niż 6 kV. Ponieważ ścieżki są znajdowane dla grafu określonego dla przewodów roboczych (sieć promieniowa), nie ma tutaj problemu z wieloznacznością ścieżek łączących dwa punkty sieci. Tak określone ścieżki noszą nazwę ścieżek głównych i pozwalają w prosty sposób zorientować się projektantowi w układzie połączeń między danym punktem pomiarowym a uziemieniem w stacji transformatorowej.

Następnie na podstawie tego samego grafu i danych z bazy jest generowany nowy model obwodowy, w którym wszystkie elementy sieci powyżej transformatorów 6 kV zostają pominięte, same transformatory 6 kV zostają zastąpione uziomami, rezystancje wszystkich połączeń, które tworzą występujące kable, zostają ustawione na

rezystancje ich przewodów ochronnych, a wejścia i wyjścia każdego łącznika i stacji transformatorowej (dla napięć niższych niż 6 kV) są podłączone do wspólnej masy, osobnej dla każdego łącznika/stacji transformatorowej. W ten sposób zostaje wygenerowany model obwodowy zgodny z metodą MNA, który odpowiada grafowi obwodu dla połączeń przewodów ochronnych jednak bez generowania samego grafu dla tej kombinacji połączeń.

W krokach 3-6 do dalszej analizy zostaje wykorzystany istniejący silnik obliczeniowy oparty na MNA. Dla każdej wyznaczonej unikalnej ścieżki przejścia jest symulacyjnie wyznaczana rezystancja zastępcza. Na wyznaczanie tej ścieżki składają się następujące operacje: odłączenie od dołu przewodu znajdującego się na końcu ścieżki (krok 3), podłączenie w to miejsce źródła napięcia probierczego (krok 4), symulacyjne wyznaczenie rozptyłu prądów i napięć przez silnik MNA (krok 5) z zapamiętaniem przewodów obciążonych (zapamiętywane są przewody, dla których płynący prąd jest większy od 1% wartości prądu płynącego przez probiercze źródło zasilania). W szóstym kroku, na podstawie prądu płynącego przez źródło probiercze i występującego na nim napięcia, jest wyznaczana rezystancja zastępcza rozważanego połączenia przewodów ochronnych. Dzięki zapamiętaniu przewodów obciążonych można w łatwy sposób określić, które przewody faktycznie biorą czynny udział w uziemieniu danego punktu pomiarowego bez wykonywania dodatkowych analiz struktury sieci zasilającej (analiz grafu obwodu).

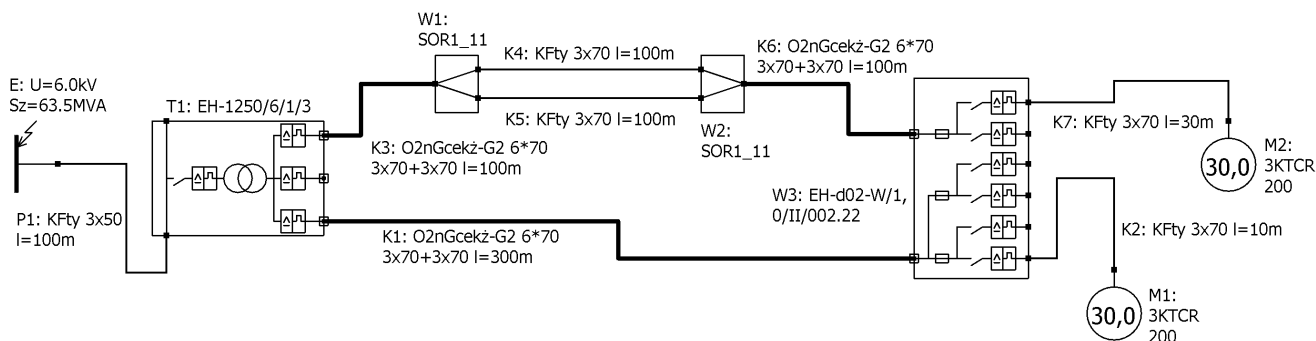


Rys.4. Proponowany algorytm wyznaczania rezystancji zastępczej przewodów ochronnych

Po powtórzeniu kroków 3-6 dla wszystkich unikalnych ścieżek, silnik MNA kończy swoją pracę, a uzyskane wyniki są formatowane i prezentowane w postaci tabeli.

### Przykład obliczeniowy

Na Rys.5 przedstawiono fragment dołowej sieci zasilającej który wykorzystano do zilustrowania działania zaproponowanego algorytmu. W Tab.1 podano wyniki pracy algorytmu uzyskane dla kabli K2 i K7.



Rys.5. Przykładowy fragment sieci dołowej wykorzystany do obliczeń rezystancji zastępczej przewodów ochronnych

Tabela 1. Wyniki wyznaczania rezystancji zastępczej przewodów ochronnych dla schematu z Rys.5 (kable K2 i K7)

Połączenie	Ścieżka główna	Wszystkie przewody łączące, Ohm	Rezystancja zastępcza połączenia, Ohm
K2 - [T1/uziom]	K2-K1-[T1/uziom]	K1(0,3),K2(0,01),K3(0,1),K4(0,1),K5(0,1),K6(0,1)	0,1464
K7 - [T1/uziom]	K7-K6-K5-K3-[T1/uziom]	K1(0,3),K3(0,1),K4(0,1),K5(0,1),K6(0,1),K7(0,03)	0,1664

Dla łatwiejsze interpretacji wyników przedstawionych w Tab.1 założono jednakową rezystancję jednostkową wszystkich przewodów ochronnych równą 1 Ohm/km.

Rezystancje zastępcze połączeń przewodów ochronnych przy punktach pomiarowych umieszczonych na końcach kabli K2 i K7 można wyznaczyć z następujących zależności:

$$(2) R_{z2} = \frac{R_1 \left( R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} + R_6 \right)}{R_1 + R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} + R_6} + R_2 = 0,1464 \Omega$$

$$(3) R_{z7} = \frac{R_1 \left( R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} + R_6 \right)}{R_1 + R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} + R_6} + R_7 = 0,1664 \Omega$$

gdzie rezystancje  $R_1$ - $R_7$  odpowiadają rezystancjom przewodów ochronnych odpowiednio kabli K1-K7 (trzecia kolumna Tab.1). Wyniki uzyskane z obliczeń określonych zależnościami (2) i (3) są w pełni zgodne z wyznaczonymi przez proponowany algorytm (kolumna 4 Tab.1).

### Podsumowanie

Dzięki wykorzystaniu istniejącego grafu obwodu jedynie do określenia unikalnych ścieżek połączeń dla każdego potencjalnego punktu pomiarowego i wykorzystaniu silnika obliczeniowego MNA do wykonania pozostałych operacji (wyznaczenia wszystkich przewodów biorących udział w danym połączeniu uziemiającym i wyznaczenia jego rezystancji zastępczej), udało się uniknąć generowania dodatkowego grafu obwodu i żmudnej analizy połączeń uziemiających w celu wyznaczenia ich rezystancji zastępczej.

Wykorzystanie modelu obwodowego zgodnego z MNA ma również tę zaletę, że w razie potrzeby umożliwia łatwą rozbudowę modelu przewodów ochronnych o inne parametry (np. pojemność lub indukcyjność).

Prezentowana metoda jest na tyle ogólna, że może być wykorzystana w każdym oprogramowaniu symulacyjnym bazującym na grafie obwodu i silniku obliczeniowym opartym na MNA lub podobnym (np. SPICE) i może być wykorzystana

wszędzie gdzie zachodzi potrzeba wyznaczania rezystancji zastępczej przewodów ochronnych o podobnym układzie połączeń.

**Autorzy:** dr inż. Michał Lewandowski, Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10,44-100 Gliwice, e-mail: [michal.lewandowski@polsl.pl](mailto:michal.lewandowski@polsl.pl)  
mgr inż. Andrzej Bauerek, Ośrodek Pomiarów i Automatyki S.A., ul. Hagera 14A, 41-800 Zabrze, e-mail: [andrzejbauerek@opa.pl](mailto:andrzejbauerek@opa.pl)

### LITERATURA

- [1] Gawor P., Sieci elektroenergetyczne zakładów górniczych, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice (2013)
- [2] Ignac-Nowicka J., Wpływ górniczych warunków pracy na zabezpieczenia przeciwporażeniowe prądem, *Systemy wspomaganie w inżynierii produkcji - górnictwo perspektywy i zagrożenia*, zeszyt 1(13)/2016, PA NOVA SA., Gliwice (2016)
- [3] Lebecki K., Woliński A., Normalizacja w górnictwie, *Systemy wspomaganie w inżynierii produkcji - górnictwo perspektywy i zagrożenia*, zeszyt 1(13)/2016, PA NOVA SA., Gliwice (2016)
- [4] PN-G-42044:2000, Środki ochronne i zabezpieczające w elektroenergetyce kopalnianej - Zabezpieczenia ziemnozwarciowe: Wymagania i zasady doboru, *Polski Komitet Normalizacyjny* (kwiecień 2000)
- [5] PN-G-42041:1997, Środki ochronne i zabezpieczające w energetyce kopalnianej-System uziemiających przewodów ochronnych: Wymagania, *Polski Komitet Normalizacyjny* (grudzień 1997)
- [6] Miśkiewicz K., Boron S., Cholewa A., Uwagi o programie komputerowym SNN wspomagającym projektowanie kopalnianych sieci elektroenergetycznych, *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, R. 48 (2010), 31-36
- [7] OPA S.A., NextSnN - program do obliczeń sieci niskiego napięcia, <https://opa.pl/aktualnosci/nextsnn-program-do-obliczen-sieci-niskiego-napiecia/> (dostęp: 01.08.2024).
- [8] Lewandowski M., Buła D., Uproszczony model transformatora trójuzwojeniowego dla potrzeb wyznaczania nastaw zabezpieczeń w dołowych sieciach górniczych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 100 NR 1/2024, 245-248
- [9] DeCarlo, R.A.; Lin, P.M.; *Linear Circuit Analysis: Time Domain, Phasor and Laplace Transform Approaches*, Oxford University Press (2001)