

doi:10.15199/48.2023.10.41

Wykorzystanie transformaty falkowej sygnałów pomiarowych do identyfikacji stanu pracy linii napowietrznych WN o zwiększonej obciążalności dopuszczalnej podczas zwarć łukowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki analiz dotyczących oceny poprawności działania opracowanego algorytmu detekcji stanu pracy linii elektroenergetycznych wysokich napięć (WN) o zintensyfikowanych zdolnościach przesyłowych podczas wystąpienia zwarć łukowych. Opisano wybrany model łuku pierwotnego, odpowiedni do odwzorowania początkowych stanów zwarć wielkopiędowych w liniach WN. Po implementacji wybranego rozwiązania w modelu symulacyjnym, dokonano oceny poprawności detekcji zwarć łukowych przez opracowany algorytm.

Abstract. The paper presents the results of analyses concerning the evaluation of the correctness of the developed algorithm for distinguishing the operating states of overhead HV transmission lines with increased capacity during arc faults. The research focused on a primary arc model appropriate for modelling high-current short circuits in HV lines. After the implementation of the selected arc model solution in the simulation model, the correctness of arc fault detection by the developed algorithm was evaluated. (The use of wavelet transform in signals processing to identify the operating state of HV overhead lines with increased capacity during arc faults).

Słowa kluczowe: przekształcanie sygnałów pomiarowych, transformata falkowa, napowietrzne linie WN, zwarcia łukowe.

Keywords: measurement signals processing, wavelet transform, HV overhead line, arc faults.

Wstęp

Ze względu na rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną, ogólnie obserwuje się wzrost obciążenia linii, m. in. linii WN. Stąd coraz większym zainteresowaniem cieszy się intensyfikacja zdolności przesyłowych linii, która umożliwia, bez długotrwałego procesu inwestycyjnego w nowe ciągi liniowe, szybkie zwiększenie dopuszczalnego obciążenia. Uzyskiwane zwiększenie obciążalności prądowej może sięgać (a nawet przekraczać) dwukrotność tradycyjnych rozwiązań. Konsekwencją takich warunków pracy linii może być nieprawidłowe działanie automatyki zabezpieczeniowej (szczególnie zabezpieczeń odległościowych) [1], w tym zagrożenie nieselektywnych wyłączników w stanach zwiększonej obciążalności linii lub ograniczenie zdolności wykrywania zwarć pośrednich.

Dla ograniczenia tych negatywnych skutków intensyfikacji zdolności przesyłowych linii, opracowano modyfikację zabezpieczenia odległościowego AKOL. Jej ważną częścią jest algorytm detekcji stanu pracy linii KDESZ, który ma skutecznie rozróżniać dopuszczalne stany pracy od stanów zakłóceń (zwarciowych) [1], [2]. Opracowany algorytm wykorzystuje przekształcenie falkowe będące transformata czasowo-częstotliwościową, cechującą się możliwie dużą rozdzielczością zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości, co umożliwia w krótkim czasie prawidłową identyfikację pracy linii. Jego ważną cechą jest uzyskiwanie decyzji o stanie pracy linii w czasie kilku ms, znacznie krótszym od czasu wyznaczania składowych impedancji, co umożliwia blokowanie wysyłania sygnału wyłączającego lub zezwolenie na jego wysłanie przez zabezpieczenie AKOL. Do opracowania i testowania AKOL i KDESZ wykorzystywano m.in. sygnały prądowe i napięciowe uzyskiwane w stanach zwarć o stałej, statycznej rezystancji przejścia.

Z kolei zwarcia łukowe charakteryzuje duża dynamika zmian prądu i napięcia, ponadto są to przebiegi silnie odkształcone. Takie właściwości powodują, że należy przeanalizować poprawność działania opracowanego algorytmu rozróżniania stanu pracy linii KDESZ bazującego na cechach wysokoczęstotliwościowych sygnałów dla takich zakłóceń. Ze względu na dużą dynamikę zmienności cech łuku oraz losowość tego typu zjawiska, ich dokładne modelowanie jest utrudnione.

W analizach literaturowych skupiono się na ocenie dostępnych modeli łuku, odpowiednich do odwzorowania zwarć w liniach WN. Po wyborze modelu możliwie dobrze odwzorowującego dynamikę zwarcia łukowego w linii, zaimplementowano go w opracowanym modelu symulacyjnym. Następnie dokonano oceny poprawności detekcji zwarć łukowych przez sformułowany algorytm detekcji pracy linii.

Modelowanie łuku pierwotnego

Modele łuku można podzielić na: fizyczne, "black box" oraz oparte na grafice i diagramach [3]. Właściwego modelu łuku elektrycznego poszukiwano wśród modeli typu „black box”. Są one właściwe m.in. do symulacji łuku łączeniowego i zwarciowego. Opisują one, poprzez jedno lub kilka równań różniczkowych bilans energetyczny kolumny łuku, relacje pomiędzy konduktancją (rezystancją) łuku elektrycznego a wielkościami mierzonymi jak napięcie lub prąd łuku. Opisuje to np. równanie Sahy (zjonizowanie gazu przez promieniowanie pochodzące od temperatury):

$$(1) \quad \frac{dg}{dt} = \frac{G-g}{\tau},$$

gdzie: g – konduktywność dynamiczna łuku, G – statyczna konduktywność łuku, τ – stała czasowa łuku.

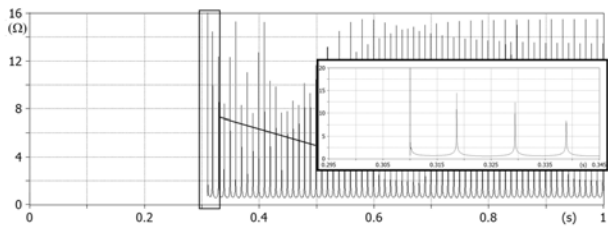
Wśród tej grupy modeli najczęściej wykorzystywane są: Cassie, Mayr, Habedank (szeregowo połączone Cassie i Mayr) oraz Schwarz [3] - [5]. Dla zamodelowania łuku pierwotnego w miejscu zwarcia w napowietrznej linii WN wykorzystano model Cassiego. Równanie go opisujące określone jest wzorem:

$$(2) \quad \frac{dg}{dt} = g \frac{1}{\tau} \left(\frac{u_{arc}^2}{U_{arc}^2} - 1 \right) = \frac{1}{\tau} \left(\frac{i_{arc}^2}{g U_{arc}^2} - g \right),$$

gdzie: g – konduktywność dynamiczna łuku, τ – stała czasowa łuku, u_{arc} – napięcie łuku, U_{arc} – napięcie łuku w stanie ustalonym, i_{arc} – natężenie prądu łuku.

W modelu tym zakłada się, że łuk ma stałą temperaturę i jest chłodzony przez konwekcję wymuszoną. Oznacza to, że pole przekroju łuku jest proporcjonalne do natężenia prądu przez niego przepływającego, przy stałej wartości napięcia na łuku. Model ten jest odpowiedni dla analiz wystąpienia łuku elektrycznego dla dużych wartości natężenia prądu, więc jest właściwy dla zastosowań modelowania łuku pierwotnego w pierwszych chwilach trwania zwarcia w napowietrznych liniach WN. Jest także stosunkowo prosty w implementacji programowej [6].

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy przebieg czasowy rezystancji łuku elektrycznego uzyskany przy wykorzystaniu zależności (2).



Rys.1. Przykładowy uzyskany przebieg czasowy rezystancji łuku elektrycznego dla modelu Cassiego

Model symulacyjny

Analiz rozpoznania stanu pracy linii w zmiennych warunkach pracy dokonano z wykorzystaniem modelu symulacyjnego układu sieciowego przedstawionego na rysunku 2a. Dotyczą one rozróżniania stanów zakłóceńowych pracy linii (wymagających wyłączenia linii) w tym wykrywania zwarc łukowych od stanów dopuszczalnych (wymagających pozostawienia linii w pracy).

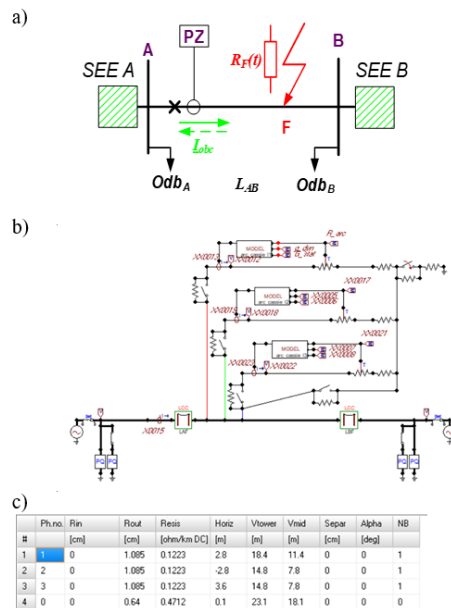
Model symulacyjny dla wyznaczania wartości chwilowych napięć i prądów utworzono w oprogramowaniu ATP-EMTP (ATPDraw). Modele łuku elektrycznego zostały utworzone z wykorzystaniem modułu MODELS [6], [7]. Wizualizację modelu przedstawiono na rysunku 2b.

Na potrzeby analiz w stanach zwarciovych, zmianie podlegały: miejsce zwarcia, warunki początkowe przedzakłóceńowe (charakter i wartość prądu obciążenia linii, w tym parametry źródeł zastępczych), chwila wystąpienia zwarcia, liczba faz objętych zwarcie oraz parametry bazowe łuku dynamicznego w miejscu zwarcia (lub rezystancja przejścia dla modelu o stałej rezystancji). Natomiast dla analiz w stanach dopuszczalnej zmienności obciążenia zmianie podlegały: warunki początkowe (charakter i wartość prądów obciążeń, parametry źródeł zastępczych) oraz kierunek zmian przepływu prądu obciążenia - zwiększanie i zmniejszanie mocy czynnej i biernej.

W badaniach przyjęto czas trwania symulacji równy 1000 ms, a zwarcia inicjowano w około 320 ms symulacji. Linie zamodelowano z wykorzystaniem modelu JMarti (model falowy o parametrach zależnych od częstotliwości i stałej macierzy transformacji) o danych obiektowych przedstawionych na rysunku 2c. Dla symulacji zmienności obciążenia linii w dopuszczalnym zakresie, zmian obciążenia linii dokonywano w ramach jednej symulacji dwukrotnie (dołączanie i wyłączanie dodatkowych obciążeń na początku i końcu linii) w odstępach 200 ms rozpoczynając w 200 ms od początku symulacji (rys. 5a).

Otrzymane sygnały prądowe z początku linii stanowią dane wejściowe dla opracowanego algorytmu detekcji stanu pracy linii, utworzonego w pakiecie Matlab. Jego zadaniem jest szybka detekcja stanu pracy linii, w czasie znacznie

krótszym od wyznaczania składowych impedancji przez zabezpieczenia odległościowe [1], [2].

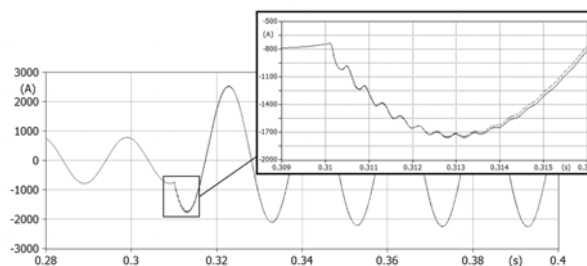


Rys.2. Układ symulacyjny do wyznaczania sygnałów pomiarowych dla celów rozpoznawania stanu pracy linii: a) schemat, b) model, c) parametry geometryczne i materiałowe linii dla modelu JMarti

Wyniki

W efekcie przeprowadzonych w programie ATP-EMTP symulacji otrzymano bazę blisko 10 tysięcy sygnałów pomiarowych prądów trzech faz dla punktu PZ (rys. 2a), w różnych stanach pracy linii, obejmujące zarówno zmiany prądu obciążenia linii w zakresie wartości dopuszczalnych jak i w stanach niedopuszczalnej pracy - zwarciovych. Uzyskane wartości chwilowe prądów, podawano na opracowany algorytm detekcji stanu pracy linii.

Porównanie przykładowych przebiegów czasowych prądów na początku linii w fazie zwarcie dla zwarcia L1E na 40km (80% dla modelu łuku dynamicznego i ze stałą rezystancją ($R_F = 1\Omega$) przedstawiono na rysunku 3. Zauważalne jest duże podobieństwo przebiegów czasowych prądów dla obu sposobów odwzorowania rezystancji przejścia w miejscu zwarcia dla przyjętej stałej wartości rezystancji mimo dużej dynamiki zmian rezystancji m.in. w początkowych chwilach zakłócenia (rys. 1).



Rys.3. Przebiegi czasowe prądów na początku linii dla zwarcia L1E na 40km (80% długości linii) dla modelu łuku dynamicznego (linia ciągła) i ze stałą rezystancją $R_F = 1\Omega$ (linia przerywana),

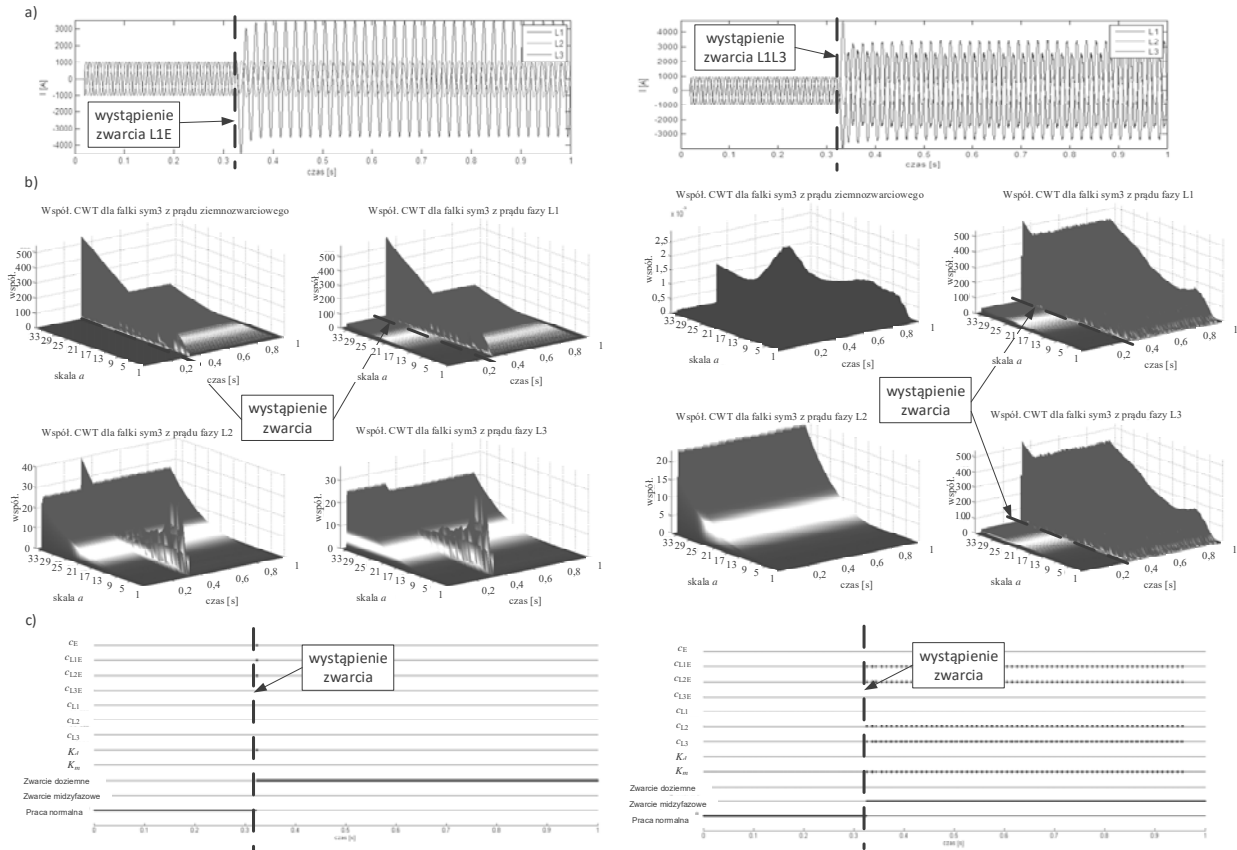
Zbiorcze wyniki poprawności detekcji stanu pracy linii zestawiono w tabelach 1 - 3. W tabeli 1 zawarto wyniki działania algorytmu dla zmiany obciążenia linii (czynnego i biernego) w szerokim zakresie, zarówno jego zwiększania jak i zmniejszania.

Tabela 1. Zestawienie skuteczności rozpoznania zmiany obciążenia linii jako stan pracy dopuszczalnej przez opracowany algorytm

Liczba przypadków	189
Liczba przypadków rozpoznanych jako obciążenie	189
Liczba przypadków rozpoznanych jako zwarcie	0
Poprawność identyfikacji	100 %

W tabelach 2 i 3 zestawiono wyniki skuteczności działania algorytmu dla przypadków wystąpienia różnych typów zwarć: o dynamicznie zmienianej rezystancji (łukowych o różnych parametrach bazowych łuku) jak i o stałej rezystancji.

Przykładowe analizowane przebiegi czasowe sygnałów dla stanów zwarciowych i dopuszczalnych, wraz z działaniem algorytmu detekcji stanu pracy linii przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4 i 5.



Rys.4. Działanie algorytmu identyfikacji stanu pracy linii dla zwarć łukowych z dynamicznie zmienianą rezystancją: jednofazowego na 30 km (po lewej) oraz dwufazowego na 40 km (po prawej):

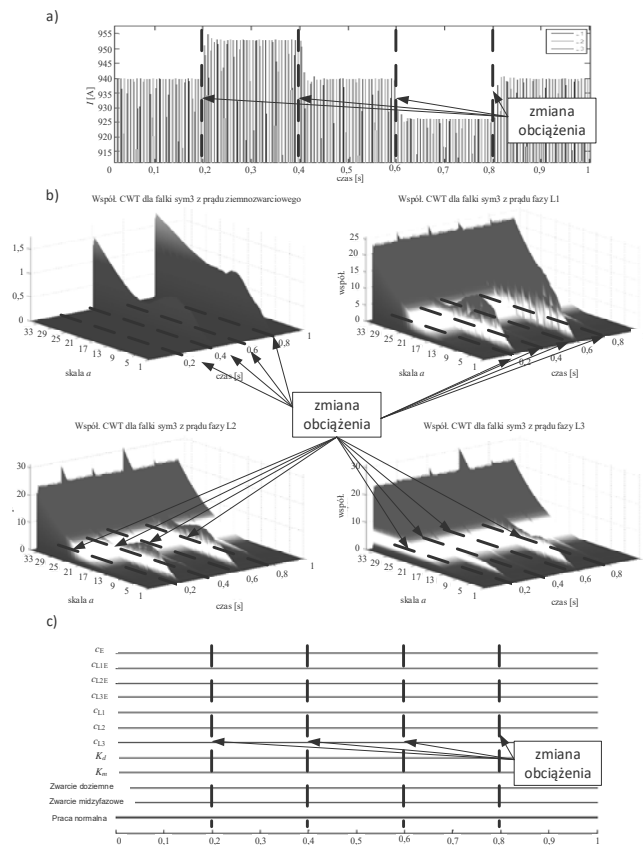
a) przebiegi czasowe chwilowych wartości prądów fazowych, b) wyznaczone transformaty falkowe dla prądów ziemnozwarciowego i fazowych, c) przebiegi czasowe dwustanowych warunków cząstkowych i decyzji końcowych: $c_E, c_{L1E}, c_{L2E}, c_{L3E}$ – warunki cząstkowe dla wykrywania zwarć doziemnych, c_{L1}, c_{L2}, c_{L3} – warunki cząstkowe dla wykrywania zwarć międzyfazowych, K_d, K_m – warunki dla określenia stanu zwarcia doziemnego lub międzyfazowego, Zwarcie doziemne, Zwarcie m-f, Praca normalna - decyzje końcowe o stanie zwarcia lub normalnym.

Tabela 2. Zestawienie skuteczności wykrywania zwarć łukowych o dynamicznie zmiennej rezystancji $R_F = var$ w zależności od jego rodzaju i miejsca wystąpienia

Rodzaj zwarcia	Miejsce zwarcia, km					
	1	10	20	30	40	49
1F	252	252	247	239	243	243
2F	252	252	252	252	252	252
3F	252	252	252	252	252	252
2F+E	252	252	252	252	252	252
Suma wykrytych zwarć	1008	1008	1003	995	999	999
Liczba przypadków	1008	1008	1008	1008	1008	1008
Poprawność identyfikacji, %	100	100	99,5	98,7	99,1	99,1
Średnia poprawność identyfikacji	99,4 %					

Tabela 3. Zestawienie skuteczności wykrywania zwarć o stałej rezystancji $R_F = const$ w zależności od jego rodzaju i miejsca wystąpienia

Rodzaj zwarcia	Miejsce zwarcia, km					
	1	10	20	30	40	49
1F	140	140	140	140	140	140
2F	136	128	124	135	130	105
3F	140	140	140	140	128	100
2F+E	140	140	140	140	132	102
Suma wykrytych zwarć	556	548	544	555	530	447
Liczba przypadków	560	560	560	560	560	560
Poprawność identyfikacji, %	99,3	97,9	97,1	99,1	94,6	79,8
Średnia poprawność identyfikacji	94,6 %					



Rys.5. Działanie algorytmu identyfikacji stanu pracy linii dla zmian obciążenia w dopuszczalnym zakresie:
 a) przebiegi czasowe chwilowych wartości szczytowych prądów fazowych, b) wyznaczone transformaty falkowe dla prądów ziemnozwarciowego i fazowych, c) przebiegi czasowe dwustanowych warunków cząstkowych i decyzji końcowych.

Wnioski i podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono, że opracowany algorytm rozróżniania stanu pracy linii skutecznie i szybko wykrywa zwarcia pośrednie. Z wypracowanych decyzji uzyskuje się informacje o wystąpieniu stanu zwarcia doziemnego, międzyfazowego lub pracy normalnej (obciążen dopuszczalnych w warunkach klasycznie określonej obciążalności jak i zintensyfikowanej zdolności przesyłowej).

Ze względu na przeprowadzanie symulacji w modelu utworzonym w innym oprogramowaniu (ATP-EMTP) niż badania opisane w [1] i [2] dokonano także sprawdzenia działania algorytmu dla stanów dopuszczalnych, w tym także podczas zmian obciążeń w zakresie zwiększonej

obciążalności dopuszczalnej. Wykazały one poprawność działania opracowanego algorytmu.

Prawidłowość podejmowanych decyzji na podstawie przeanalizowanych symulacji wynosi ponad 94% dla zwarcia o stałej rezystancji w miejscu zwarcia i ponad 99 % dla zwarcia łukowych z dynamicznie zmienianą rezystancją. Dla części przypadków zwarcie występujących w końcowych odcinkach linii zwarcie dwufazowe z ziemią było rozpoznawane jako jednofazowe, a dla zwarcia jednofazowych warunki kryterialne tylko nieznacznie przekraczały przyjęte wartości działania. Nie wpływa to na prezentowane statystyki, lecz stanowi bodziec do dalszych analiz i udoskonalania rozwiązania.

Wyższa skuteczności wykrywania zwarcia z dynamicznym łukiem elektrycznym wynika z wprowadzenia dodatkowego czynnika zwiększającego dynamikę zmian natężenia prądu w stanie zwarcia. Dla opracowanego algorytmu jest szczególnie ważny początkowy okres stanu zwarcia, dla którego, analiza składowych przejściowych natężenia prądu jest wykorzystywana dla detekcji stanu pracy linii.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Adrian Halinka, Politechnika Śląska, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: Adrian.Halinka@polsl.pl; dr inż. Marcin Niedopytalski, Politechnika Śląska, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: Marcin.Niedopytalski@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Halinka A., Niedopytalski M.: Wykorzystanie przekształceń falkowych w przetwarzaniu sygnałów pomiarowych dla celów automatyki elektroenergetycznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol 2022, No 12, 1-4
- [2] Niedopytalski M., Zabezpieczenie odległościowe linii wysokiego napięcia o adaptacji parametrycznej do zmiennych dopuszczalnych zdolności przesyłowych, *Rozprawa doktorska*, Gliwice, (2013)
- [3] CIGRE WG 13.01, "Practical application of arc physics in circuit breakers. Survey of calculation methods and application guide", *Electra*, No. 118, p.64-79, 1988
- [4] Chmielewski T., Oramus P., Florowski M.: Modelowanie łuku elektrycznego w analizach przecięć łączeniowych podczas przerywania prądu przy użyciu niskonapięciowych styczników elektromechanicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.92, No 2/2016, 202-205,
- [5] Yang F., Tang Z., Shen Y., Su L., Yang Z.: Parameter Determination Method of Cassie-Mayr Hybrid Arc Model Based on Magnetohydrodynamics Plasma Theory, *Frontiers in Energy Research*, 5 April 2022, Volume 10, Article 808289,
- [6] Haginomori E.: Applied ATP-EMTP to Highly-sophisticated electric power systems, August 2003
- [7] Grąkowski Ł., Gębczyk K.: Analysis of earth faults in the MV grid using the EMTP-ATP program, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 95 NR 2/2019, 146-149,