

Algorytm wykrywania iskrzenia w detektorach AFDD

Streszczenie. W artykule przedstawiono detektory iskrzenia AFDD stanowiące dodatkową ochronę przeciwpożarową instalacji elektrycznej przed skutkami iskrzenia i wylądowania łukowego w obrębie tego samego przewodu (zakłócenie szeregowo). W referacie skupiono się na przedstawieniu zasady działania i detekcji wylądowania łukowego przez te urządzenia. Zaprezentowano algorytm funkcjonowania detektorów i sposób podejmowania decyzji o wyłączeniu stanu awaryjnego. Wskazano na wady oraz zalety detektorów AFDD oraz przedstawiono zasadność ich stosowania jako urządzenia dodatkowego przy ochronie przeciwpożarowej.

Abstract. The article presents AFDD (Arc Fault Detection Devices) detectors, which provide additional fire protection for electrical installations against the effects of sparking and arcing within the same conductor (series fault). The paper focuses on explaining the principle of operation and arc fault detection by these devices. It outlines the algorithm of how the detectors function and the method for making decisions about switching to a fault state. The article also highlights the advantages and disadvantages of AFDD detectors and discusses their relevance as additional devices for fire protection (**Arc Fault Detection in AFDD Devices**)

Słowa kluczowe: AFDD, łuk elektryczny, dodatkowa ochrona przeciwpożarowa
Keywords: AFDD, electrical arc, additional fire protection

Wstęp

Występowanie pożarów w wyniku awarii instalacji elektrycznej stanowi realne zagrożenie, któremu trzeba skutecznie przeciwdziałać. W instalacjach elektrycznych istnieją różne przyczyny, które mogą prowadzić do powstania pożaru. Jednym z potencjalnych zagrożeń jest pojawienie się iskrzenia lub łuku elektrycznego, które mogą występować w instalacji równolegle (w obrębie dwóch przewodów) lub szeregowo (w obrębie jednego przewodu). Łuk elektryczny to wylądowanie elektryczne które jeśli jest stabilne, może prowadzić do lokalnego wzrostu temperatury uszkodzenia izolacji, co z kolei może stanowić przyczynę pożarów. Gdy łuk osiąga stan stabilnego palenia, jedynym sposobem na jego zgaszenie jest interwencja przeciwpożarowa. Dlatego kluczowe staje się zapobieganie wystąpieniu łuku elektrycznego [1].

Pożary wywołane przez prąd elektryczny według statystyk europejskich stanowią około 30% wszystkich pożarów i ten stosunek praktycznie nie uległ zmianie przez wiele lat (rys.1.). W połowie tych przypadków, przyczyną pożaru jest uszkodzenie odbiornik energii, a w około 30% przypadków problem jest instalacja elektryczna [2].

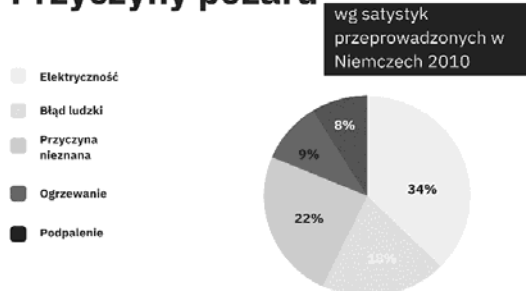
Detektory iskrzenia AFDD (ang. Arc Fault Detection Device), zwane także przeciwpożarowymi detektorami iskrzenia, są urządzeniami zabezpieczającymi instalacje niskiego napięcia przed pojawieniem się łuku elektrycznego. Działają one poprzez wykrywanie iskrzenia spowodowanego m.in. uszkodzeniami mechanicznymi przewodów czy poluzowanymi stykami. Dostępne na rynku modele detektorów mogą mieć różną konstrukcję, z jednym (AFDD), dwoma (AFDD+MCB) lub trzema modułami (AFDD+MCB+RCD). Urządzenia te stanowią dodatkową warstwę ochrony przeciwpożarowej, umożliwiając wczesne reagowanie na potencjalne zagrożenia.

Aby zapewnić ochronę przeciwpożarową, detektory AFDD muszą reagować we wczesnej fazie powstawania łuku, czyli na etapie iskrzenia. Istotne jest, aby były zdolne do wykrywania potencjalnie niebezpiecznych sytuacji, ale jednocześnie nie reagowały na naturalne iskrzenie, które może występować w normalnej pracy urządzeń, np. silników komutatorowych.

W normie IEC 60364-4-42 wskazano na korzyści z użycia tych urządzeń w miejscach o dużym natężeniu ruchu ludzi, w obiektach podatnych na pożar (zakłady papiernicze) oraz tam, gdzie przechowywane są wartościowe historycznie lub kulturowo eksponaty (muzea).

Wprowadzenie detektorów iskrzenia nie tylko poprawia ochronę przeciwpożarową, ale także zwiększa ogólny poziom bezpieczeństwa w instalacjach elektrycznych [3]. Norma IEC 62606 określa natomiast parametry i wymagania odnośnie działania detektorów iskrzenia i charakterystyki czasowo-prądowe [4].

Przyczyny pożaru



Rys1. Statystyki dotyczące przyczyn pożarów [2]

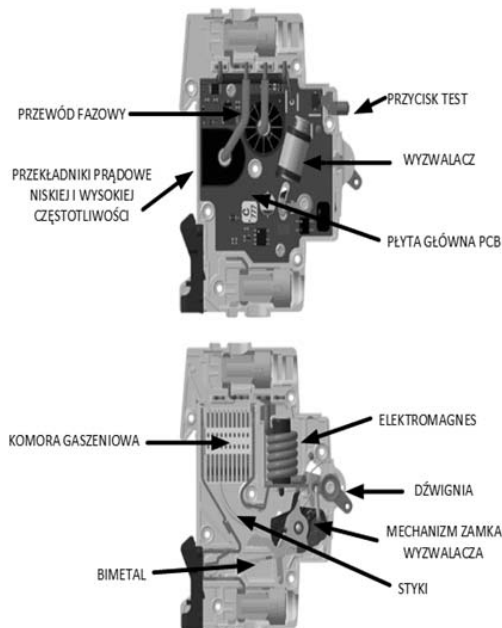
Budowa detektora AFDD

Detektory AFDD są urządzeniami przeznaczonymi do montażu na szynie DIN w rozdzielniczy zasilającej poszczególne odbiory energii elektrycznej. Projektowane są zgodnie z obowiązującymi standardami dotyczącymi aparatury modułowej instalowanej w rozdzielnicach niskiego napięcia i zwykle nie odstają wymiarami od klasycznych wyłączników nadprądowych czy różnicowoprądowych. Różnice pojawiają się w budowę wewnętrzną, bowiem detektory iskrzenia są aparatami o dużym stopniu złożoności. Zasadniczo budowę wewnętrzną można podzielić na dwie części: część elektroniczną i mechaniczną (rys. 2).

Część mechaniczna odpowiedzialna jest za przeprowadzenie bezpiecznego procesu załączania napięcia i wyłączania zasilania w przypadku wykrycia stanu awaryjnego. Budowa tej sekcji niczym nie różni się od klasycznego wyłącznika nadprądowego i można w niej wyróżnić:

- styki ruchome i nieruchome,

- terminale służące do przyłączenia przewodów,
- komorę gaszeniową,
- cewkę elektromagnesu,
- element termobimetalowy,
- mechanizm dźwigni,
- wskaźniki.



Rys.2 Budowa wewnętrzna detektora AFDD, opracowanie własne na podstawie [5]

Detekcja iskrzenia w instalacji elektrycznej przeprowadzana jest na podstawie zaawansowanej analizy przebiegu prądu obciążenia zarówno w dziedzinie czasu jak i w dziedzinie częstotliwości.

Część elektroniczna jest zatem najważniejszym elementem detektora AFDD i to od niej zależy jakość i skuteczność detekcji wyładowań łukowych w instalacji. Zbudowana jest najczęściej w oparciu o jedną płytę drukowaną PCB na której umieszczone są sensory (przekładniki prądowe) oraz mikroprocesor dokonujący analizy sygnałów i podejmujący decyzję w oparciu o zaimplementowany wielokryterialny algorytm. Część elektroniczna zasilana jest z miniaturowego zasilacza impulsowego znajdującego się na tej samej płycie PCB.

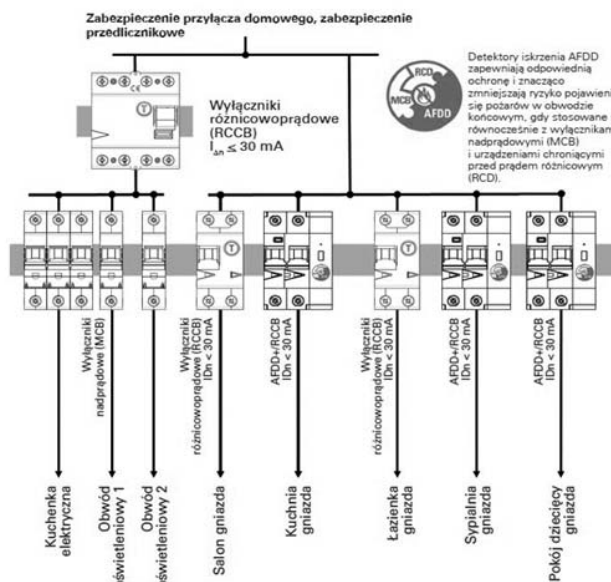
Do analizy sygnałów prądowych wykorzystuje się dwa przekładniki prądowe. Pierwszy (m.cz./LF) dokonujący pomiaru prądu obciążenia w dziedzinie niskiej częstotliwości 50 Hz, oraz drugi (w.cz./HF) dokonujący analizy sygnału prądowego w dziedzinie wysokiej częstotliwości – rzędu 10 MHz – w zależności od przyjętego algorytmu detekcji. Dodatkowo część elektroniczna wyposażona jest w wyzwalacz współpracujący z mechanizmem zamka w części mechanicznej oraz przycisk inicjujący automatyczny test urządzenia. W przypadku modułu detektora AFDD zainicjowanie testu nie powoduje wyłączenia aparatu, tak jak ma to miejsce w wyłącznikach różnicowoprądowych.

W detektorach AFDD wyposażonych dodatkowo w wyłącznik różnicowoprądowy, do zaprezentowanego wcześniej zestawu dołączany jest moduł służący do wykrywania prądów upływowych. Część mechaniczna jest wspólna dla wszystkich modułów.

Zasada działania

Aby detektor iskrzenia pracował w skuteczny sposób muszą być spełnione podstawowe zasady dotyczące:

- sposobu montażu detektora – zasilanie i odbiory powinny być podłączone do detektora zgodnie z oznaczeniami producenta,
- maksymalnej długości przewodów – przyjmuje się, że proces detekcji iskrzenia jest skuteczny gdy długość przewodów w instalacji odbiorczej od detektora nie przekracza 70 metrów,
- minimalnego progu zadziałania – detektory wykrywają iskrzenie, które jest udziałem prądu obciążenia powyżej 2,5 A.

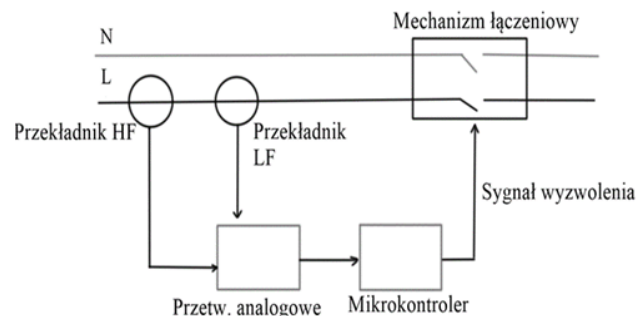


Rys.3 Przykład instalacji elektrycznej z zastosowaniem detektora AFDD w budownictwie mieszkaniowym [1]

Wykrywanie wyładowania łukowego w instalacjach elektrycznych jest zadaniem złożonym [6]. Rozwój tego rodzaju wyładowania jest zależny od wielu czynników, takich jak:

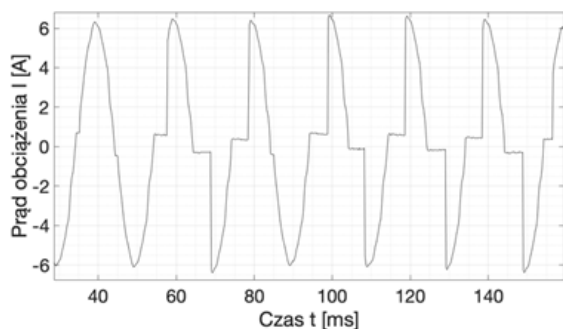
- wartość napięcia,
- rodzaj obciążenia i wartość prądu obciążenia
- odległość między elementami przewodzącymi,
- rodzaj materiału,
- temperatura i wymiana ciepła z otoczeniem.

Zasada działania detektora AFDD opiera się na analizie sygnałów prądowych w dziedzinie niskiej częstotliwości prądu 50 Hz (rys. 4.) i wysokiej częstotliwości prądu poddawanej badaniu transformatą Fouriera (FFT). Iskrzenie w instalacji elektrycznej jest bowiem widoczne w przebiegu prądu poprzez pojawienie się specyficznego odkształcenia przebiegu prądu obciążenia nazywanego ramionami (ang. shoulders).



Rys.4 Schemat ideowy detektora AFDD, opracowanie własne

Kształt tego odkształcenia różni się od kształtu naturalnego iskrzenia, które ma miejsce w instalacjach elektrycznych między innymi w uniwersalnym silniku komutatorowym. Pojawienie się ramion w kształcie przepływającego w obwodzie prądu obciążenia jest jednym z wskaźników branych przez wyłącznik pod uwagę w wykrywaniu szeregowego iskrzenia w instalacji (rys.5).



Rys. 1. Przebieg prądu podczas iskrzenia, opracowanie własne

Równolegle do tego analizie poddawane jest widmo prądu w zakresie wysokiej częstotliwości rzędu kilkunastu lub kilkudziesięciu MHz – w zależności od przyjętego algorytmu detekcji i producenta aparatu. Korzystając z FFT (Fast Fourier Transform) i obserwując prąd obciążenia w funkcji częstotliwości można zauważyć pojawienie się peaków w widmie prądu podczas występującego iskrzenia. W zależności od przyjętej strategii uwidocznienie się artefaktów w obserwowanym selektywnie wąskim paśmie częstotliwości może potwierdzić, że w danej instalacji doszło do niepożądanego iskrzenia a nie iskrzenia naturalnego, spowodowanego podłączeniem specyficznego odbiornika.

Sygnaly z obu przekładników prądowych trafiają w pierwszej kolejności do przetwornika analogowo-cyfrowego A/D i wzmacniacza sterującego a następnie na wejścia mikrokontrolera, gdzie poddawane są właściwej analizie.

Po spełnieniu warunków określonych przez algorytm zaprogramowany w mikrokontrolerze następuje podjęcie decyzji o wyłączeniu napięcia poprzez podanie sygnału na wyzwalacz współpracujący z mechanizmem zamka wyłącznika.

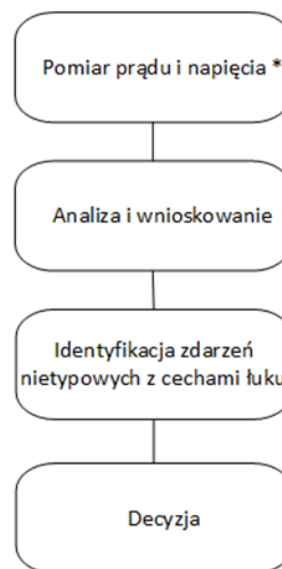
Algorytm detekcji

Nie ma jednego uniwersalnego algorytmu detekcji na podstawie którego działają wszystkie detektory AFDD. Program z algorytmem zaimplementowany w danym urządzeniu jest chroniony przez producentów i z punktu widzenia użytkownika stanowi czarną skrzynkę wykonującą określone zadania. Opisywane w literaturze algorytmy dają jednak pewne ogólne pojęcie na podstawie których przesłanek i w jaki sposób podejmowane są decyzje o wykryciu wyładowania łukowego. Niezależnie od producentów proces detekcji opiera się na pomiarze prądu obciążenia (rzadziej prądu i napięcia), przetwarzaniu danych pomiarowych, identyfikacji zdarzeń (artefaktów) i decyzji, tak jak to przedstawiono na rys. 6.

Warto zaznaczyć, że żaden z algorytmów nie zapewnia 100% wykrywalności zdarzeń związanych ze stanem awaryjnym i zawsze jest pewnym kompromisem między niechcianym wyłączeniem a niepowodzeniem w wykryciu zwarcia łukowego.

Detektory AFDD są podatne na wynik fałszywie dodatni (gdy występuje niepożądane zadziałanie) i fałszywie ujemny (gdy występuje wyładowanie łukowe, a nie zostaje

podjęta decyzja o wyłączeniu). Proces detekcji opiera się na obserwacji pewnych cech prądu obciążenia, które mogą być współdzielone z innymi stanami i warunkami pracy sieci i instalacji elektrycznej.



Rys.6. Algorytm detekcji realizowany przez AFDD, opracowanie własne na podstawie [7]

Podstawą działania większości algorytmów jest pomiar prądu, a następnie na etapie analizy w czasie rzeczywistym – poszukiwanie cech związanych z wyładowaniem łukowym w sygnale prądowym. Do wykrycia niebezpiecznego wyładowania łukowego w instalacji używa się więcej niż jednego wskaźnika wskazującego na możliwość rozwoju wyładowania. Bada się między innymi:

- kształt prądu obciążenia i pojawienie się specyficznych ramion,
- wartość skuteczną prądu obciążenia,
- zmienność prądu poprzez różniczkowanie sygnału,
- szum i artefakty w zakresie wysokich częstotliwości,
- powtarzalność zdarzeń.

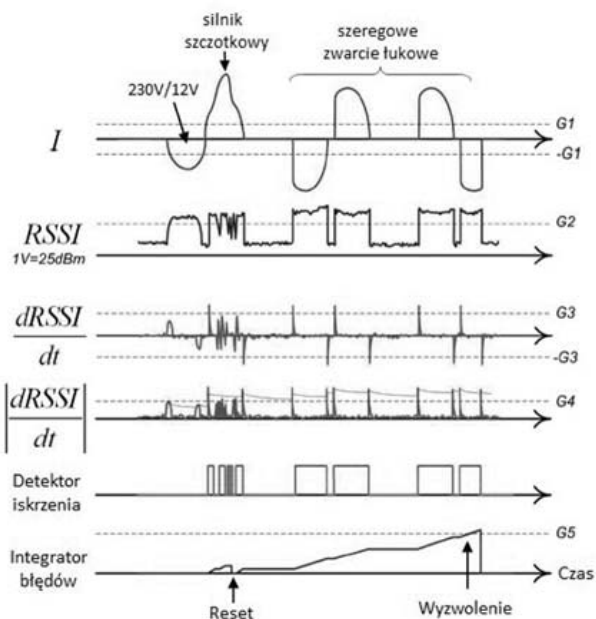
W literaturze opisanych jest wiele metod wykrywania wyładowania łukowego, różniących się między sobą wykorzystywanymi wskaźnikami i używanym aparatem matematycznym.

Największą popularność ze względu na wysoką skuteczność detekcji i stosunkowo niewielką złożoność obliczeniową zyskał algorytm detekcji polegający na analizie sygnału wysokoczęstotliwościowego i zmienności prądu obciążenia. Charakteryzuje się on niemal 96% skutecznością, jednakże jej wadą jest to, że powoduje wyniki fałszywie ujemne podczas użytkowania silników komutatorowych. Sam algorytm może być zaimplementowany na mikroprocesorze typu STM, co jest dużą zaletą tego rozwiązania [8]. Zasada działania tego typu algorytmu przedstawiona została na rys. 7.

W detektorze w czasie rzeczywistym mierzony jest prąd obciążenia oraz sygnał wysokiej częstotliwości w wąskim oknie skanowania, który ze względu na zastosowaną teorię analizy sygnałów oznaczony jest jako RSSI (Received Signal Strength Indication - Wskaźnik Mocy Odbieranego Sygnału). Aby nastąpiło wykrycie i potwierdzenie pojawienia się iskrzenia, muszą być spełnione przez określony czas następujące warunki:

1. Wartość skuteczna prądu obciążenia powyżej 2,5 A (próg G1).

2. Kształt prądu obciążenia z wyraźnymi ramionami (przerwami w przepływie prądu).
3. Moc szumu w obserwowanym zakresie wysokiej częstotliwości powyżej określonego progu G2.



Rys. 7. Analiza sygnałów realizowana przez AFDD, opracowanie własne na podstawie [2]

Wskaźnik RSSI poddawany jest różniczkowaniu, dzięki czemu można obserwować jego zmienność. Na podstawie zmienności RSSI rozróżnia się iskrzenie naturalne (komutatorowe) od wyładowania łukowego podlegającego detekcji. W przypadku iskrzenia komutatorowego sygnał z modułu różniczki RSSI ma większą częstotliwość, co wykorzystywane jest do resetowania integratora błędów, aby zapobiec niewłaściwemu zadziałaniu detektora.

Powtarzalny sygnał RSSI połączony z specyficznym kształtem prądu jest podstawą do podjęcia decyzji o zadziałaniu detektora. Zdarzenia są uprzednio sumowane w integratorze błędów i po przekroczeniu progu G5 podawany jest sygnał do wyzwolenia mechanizmu.

Wady i zalety

Niewątpliwie do zalet detektorów iskrzenia należy minimalizacja liczby i ryzyka występowania pożarów poprzez wykrywanie i zapobieganie powstaniu łuku elektrycznego. AFDD posiadają milisekundowe czasy zadziałania, co pozwala na błyskawiczne reagowanie w przypadku wykrycia zagrożenia. Kompaktowy rozmiar i niewielkie gabaryty, zbliżone do standardowego osprzętu zabezpieczeniowego niskiego napięcia sprawiają, że nie zajmuje dużo miejsca w rozdzielnicy. Dzięki działaniu AFDD minimalizuje się ryzyko uszkodzenia elementów instalacji elektrycznej, co przekłada się na większą niezawodność i trwałość instalacji.

Mimo licznych zalet, AFDD ma pewne wady. Jednym z głównych ograniczeń jest minimalny prąd, przy którym urządzenie może wyłączyć chroniony obwód, wynoszący

2,5 A. Może to stanowić pewne ryzyko, ponieważ w instalacjach niskiego napięcia, zwłaszcza z obciążeniem indukcyjnym lub pojemnościowym, mogą występować stabilne iskrzenia nawet przy niższych prądach [9]. Różnicowane algorytmy wykrywania iskrzenia, które w głównej mierze zależą od producenta wpływają na skuteczność ochrony. Algorytmy są złożone i uwzględniają nie tylko analizę przebiegu prądu, ale także analizę sygnałów. Nieodpowiednio dobrany algorytm może być przyczyną nieskutecznego działania detektora iskrzenia AFDD

Uwagi i wnioski

W niniejszej pracy głównym obszarem zainteresowania było przedstawienie detektorów iskrzenia AFDD jako urządzeń do minimalizacji ryzyka wystąpienia pożarów spowodowanych awariami instalacji elektrycznych. Kluczowym elementem efektywnego działania tych urządzeń jest algorytm detekcji, który determinuje o ich skuteczności.

Detektory iskrzenia AFDD stanowią znaczący krok w kierunku zwiększenia bezpieczeństwa instalacji elektrycznych przed zagrożeniami pożarowymi. Mimo zalet, takich jak szybka reakcja i niewielkie gabaryty, istnieje potrzeba uwzględnienia ograniczeń, takich jak minimalny prąd działania oraz różnice w skuteczności algorytmów między producentami. Dlatego też, wybór i konfiguracja detektorów AFDD wymaga dokładnego zrozumienia ich działania i dostosowania do konkretnych warunków i wymagań instalacji

Author: dr inż. Michał Czosnyka, Politechnika Wroclawska, Instytut Energoelektryki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27,50-370 Wrocław
Email: michal.czosnyka@pwr.edu.pl
dr inż. Joanna Budzisz Politechnika Wroclawska, Instytut Energoelektryki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27,50-370 Wrocław
Email: joanna.budzisz@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] EATON, „Pożary spowodowane przez urządzenia elektryczne w instalacjach niskiego napięcia. Przewodnik po normie IEC 60364”. 2020.
- [2] SIEMENS, „5SM6 AFD Unit. Technology Primer”. 2012.
- [3] „IEC 60364-4-42 Instalacje elektryczne niskiego napięcia -- Część 4-42: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa -- Ochrona przed skutkami oddziaływania cieplnego”. 2011.
- [4] „IEC 62606 General requirements for arc fault detection and protection devices (AFDDs)”. 2018.
- [5] ABB, „AFDD Technical Guide. Arc fault phenomena and functioning of AFDDs”. 2018.
- [6] C. E. Restrepo, „Arc Fault Detection and Discrimination Methods”, w Electrical Contacts - 2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, IEEE, wrz. 2007, s. 115–122. doi: 10.1109/HOLM.2007.4318203.
- [7] H. D. Vu, „Arc fault detection with machine learning”, Eng. Sci. Phys. Univ. Lorraine, 2019.
- [8] K. Yang, R. Zhang, J. Yang, C. Liu, S. Chen, i F. Zhang, „A Novel Arc Fault Detector for Early Detection of Electrical Fires”, Sensors, t. 16, nr 4, s. 500, kwi. 2016, doi: 10.3390/s16040500.
- [9] J. Budzisz, „Skuteczność działania AFDD przy niskich prądach obciążenia”, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, t. 1, nr 1, s. 166–168, sty. 2023, doi: 10.15199/48.2023.01.31.