

Politechnika Poznańska

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Instytut Elektroenergetyki
Zakład Urządzeń Rozdzielczych i Instalacji Elektrycznych

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Karol Nowak

ELIMINOWANIE ŁUKU AWARYJNEGO I OGRANICZANIE SKUTKÓW ZWARCIOWYCH Z WYKORZYSTANIEM ŁĄCZNIKÓW HYBRYDOWYCH



Promotor: dr hab. inż. Jerzy Janiszewski, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr inż. Grzegorz Dombek

Poznań, 2022

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	3
2. Wykaz głównych publikacji naukowych stanowiących rozprawę doktorską.....	7
3. Wykaz dodatkowych prac związanych z rozprawą doktorską.....	8
4. Cel i hipoteza badawcza pracy.....	9
5. Zakres i metodyka przeprowadzonych badań.....	11
5.1. Autorska metoda rozwiązania problemu naukowego.....	11
5.2. Zakres prac prowadzących do rozwiązania problemu badawczego.....	11
5.3. Źródła zasilania i przyrządy pomiarowe stosowane podczas prac badawczych.....	15
6. Wyniki badań skuteczności działania łącznika hybrydowego.....	17
6.1. Ograniczanie oddziaływań elektrodynamicznych prądów zwarciovych w obwodach zabezpieczonych łącznikiem hybrydowym.....	17
6.2. Ograniczanie erozji torów prądowych poddanych działaniu łuku elektrycznego.....	18
6.3. Ograniczenie zagrożeń powodowanych akustycznym oddziaływaniem łuku elektrycznego.....	20
6.4. Ograniczenie zagrożeń powodowanych wzrostem ciśnienia w zamkniętych obudowach urządzeń elektrycznych.....	22
6.5. Ograniczenie strefy rażenia łukiem elektrycznym.....	25
7. Wnioski i praktyczne znaczenie pracy doktorskiej.....	28
Literatura.....	29

1. WPROWADZENIE

Jedną z najczęściej spotykanych odmian zwarć elektrycznych stanowią zwarcia łukowe, w których palący się łuk określany jest mianem łuku zakłóceniewego lub łuku awaryjnego. Zwarcia te stanowią jedno z najpoważniejszych stanów awaryjnych, w jakich mogą znaleźć się urządzenia rozdzielcze, z uwagi na bezpośrednie zagrożenie zdrowia lub nawet życia osób znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie awarii oraz znaczne straty materialne wywołane niszczącym działaniem łuku awaryjnego [1-3].

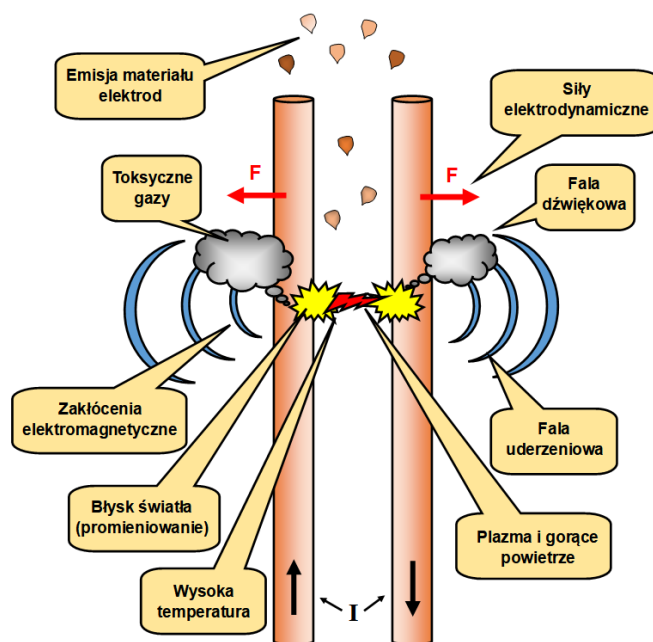
Występowaniu elektrycznego łuku awaryjnego może towarzyszyć (nawet w odległości kilku metrów od źródła łuku) m.in. bardzo wysoka temperatura, oślepiający błysk światła, gwałtowne rozprzestrzenianie się plazmy i gorącego powietrza otaczającego wyładowanie, gwałtowna zmiana ciśnienia powietrza lub innego gazu izolacyjnego, fala dźwiękowa o dużym natężeniu (przekraczającym nawet 160 dB), emisja we wszystkich kierunkach gorących odłamków i stopionych drobin metalu, wydzielanie dużych ilości toksycznych gazów, czy też powstanie przewodzących warstw na powierzchniach materiałów [4-6].

Nie mniej istotne z punktu widzenia przepływu prądu o dużej wartości jest silne nagrzewanie torów prądowych, powstawanie dużych sił dynamicznych między elementami, w których płyną prądy zwarciovowe, niszczenie konstrukcji wsporczych urządzeń elektroenergetycznych, powstanie zakłóceń elektromagnetycznych, a nawet możliwość utraty stabilności systemu (np. przez utratę synchronizacji generatorów) [7-9].

Zobrazowanie zagrożeń jakie mogą wystąpić podczas zapłonu łuku elektrycznego i przepływie prądu zwarciovego przedstawiono na rysunku 1.

Rys. 1. Możliwe skutki zapłonu łuku elektrycznego i przepływu prądu zwarciovego.

Zagrożenie powodowane wyładowaniem łukowym zależy od energii zakłócenia. Na wartość energii łuku ma wpływ napięcie, prąd, czas trwania wyładowania łukowego, a także odległość od źródła łuku. Dla układów trójfazowych większość zwarć łukowych rozpoczyna się jako zwarcia jednofazowe, a następnie rozwija się w zwarcia trójfazowe, co powoduje znaczny wzrost uwalnianej energii. Podkreśla to znaczenie wczesnego wykrycia łuku w celu szybkiego usunięcia zakłócenia łukowego i ograniczenia skutków zwarciovych [10].



Przyczyny wypadków związanych z łukiem elektrycznym są różne. Najczęściej występujące to: błędy ludzkie, złe połączenia, nieprawidłowo dobrane przyrządy, błędnie zaprojektowane urządzenia elektroenergetyczne, brak przeglądów i konserwacji, korozja elementów konstrukcji, starzenie materiałów izolacyjnych, przepięcia czy nawet udział zwierząt [11,12]. Do jednych z najczęstszych i najbardziej niebezpiecznych wypadków związanych z łukiem elektrycznym, dochodzi w sytuacji prac konserwacyjnych lub instalacji urządzeń w rozdzielnicach elektrycznych. Odbywa się to zwykle przy otwartych drzwiach szafy rozdzielczej [13]. W tej sytuacji nawet łukoochronna konstrukcja rozdzielnic nie może spełniać swojego zadania.

Nie tylko w obwodach wielkopiędowych łuk elektryczny może stanowić zagrożenie dla osób i mienia. Równie niebezpieczne może okazać się zakłócenie łukowe, występujące w układach zasilania niskiego napięcia i „dostępnych” tam sieciowych prądach zwarciowych. Na rysunku 2 przedstawiono reprezentatywną sekwencję kadrów rejestracji filmowej dla łuku awaryjnego palącego się w instalacji elektrycznej o napięciu znamionowym 230/400 V. Opis przebiegu zdarzenia oraz analizę efektywności eliminacji łuku przedstawiono w **Publikacji III** rozprawy. W wyniku zapłonu łuku elektrycznego następuje wzrost ciśnienia wewnątrz obudowy elektrycznej puszkowej instalacyjnej (aż do jej rozszczelnienia), powstanie ogłuszającej fali akustycznej, gwałtowny wzrost temperatury, wyrzut do otoczenia produktów pierwotnych i wtórnych łuku awaryjnego w postaci par metali i kropli pochodzących z erozji elektrod. Zanik wyładowania elektrycznego w 25 ms nie oznacza wcale końca niebezpieczeństwa stworzonego wystąpieniem łuku awaryjnego. Eksplodujący materiał z elektrod stwarza realne zagrożenie oparzeniem i pożarem nawet po upływie ok 500 ms od chwili zgaszenia łuku elektrycznego, czego przykładem jest ostatnia klatka przedstawionej rejestracji, na której nadal widoczne są rozgrzane krople metalu.

Często stosowane praktyczne zasady ochrony łukowej, polegają na zwiększeniu odległości od miejsca wystąpienia wyładowania lub zapewnieniu mechanicznej bariery między operatorem (osobą), a łukiem oraz skróceniu czasu trwania zakłócenia lub zmniejszeniu prądu łuku [14,15]. W przypadku konieczności przebywania pracowników technicznych w pobliżu urządzeń narażonych na wystąpienie wyładowania łukowego (np. podczas prac konserwacyjnych rozdzielnic elektrycznych) dla zapewnienia ich bezpieczeństwa, stosuje się ochronę pasywną lub aktywną [14-16].

Pasywnymi środkami zmniejszającymi zagrożenie powodowane łukiem elektrycznym jest sprzęt ochrony osobistej, urządzenia wysuwne i rozdzielnice łukoodporne z urządzeniami obniżającymi ciśnienie. Z punktu widzenia bezpieczeństwa, rozdzielnica łukoodporna zapewnia ochronę personelu tylko w przypadku zamkniętych drzwi rozdzielnic. Należy jednak mieć na uwadze, że podczas prac konserwacyjnych lub rozruchowych drzwi rozdzielnic elektrycznych są najczęściej otwarte, a więc nie ma ochrony przed skutkami łuku awaryjnego [17].

Aktywna ochrona polega na ograniczeniu prądu zwarciego lub ograniczeniu czasu trwania wyładowania łukowego. Ograniczenie prądu w miejscu zwarcia, można zrealizować dobierając w obwodach zasilania transformatory o wysokiej wartości napięcia zwarcia lub stosując dławiki ograniczające prąd. Dużym mankamentem takiej ochrony jest zwiększony koszt wytwarzania tych elementów oraz straty energii. Szerzej stosowaną metodą jest instalowanie bezpieczników, które zapewniają nie tylko ograniczenie prądu, ale także szybką eliminację zakłócenia. Niestety, poważną wadą tego typu zabezpieczenia jest to, że ich szybkość działania uzależniona jest od wartości przepływającego prądu. Palący się łuk elektryczny przy prądach przeciążeniowych, może doprowadzić do znacznego wydłużenia czasu zadziałania bezpiecznika, a przy prądzie znamionowym nawet do jego braku zadziałania [18].



Rys. 2. Kluczowe klatki rejestracji zapłonu i rozwoju wyładowania łukowego ($I_m = 1250A$, $U = 400V$) [Publikacja III, fig. 10].

Korzystnym rozwiązaniem z punktu widzenia obwodu zasilania jest metoda ograniczająca czas łukowy [19]. Eliminatory łuku wyposażone w energoelektroniczne łączniki wykonawcze, włączane do obwodu jako układy bocznikujące obwód elektryczny powyżej miejsca dotkniętego zakłóceniem, spełniają warunek skrócenia czasu łukowego i mogą być wykorzystane do efektywnej ochrony obwodów przed skutkami powstania łuku awaryjnego, zwarcowego, a także palącego się przy prądach roboczych i przeciążeniowych [20].

W przedstawianej dysertacji skupiono się głównie na wykorzystaniu innowacyjnego, autorskiego opracowania łącznika hybrydowego, który pracując w układzie bocznikującym miejsce dotknięte stanem awaryjnym ma za zadanie eliminację łuku awaryjnego i ograniczanie skutków zwarciovych.

2. WYKAZ GŁÓWNYCH PUBLIKACJI NAUKOWYCH STANOWIĄCYCH ROZPRAWĘ DOKTORSKĄ

Publikacja I: Karol Nowak, Jerzy Janiszewski, Grzegorz Dombek: „**Thyristor Arc Eliminator for Protection of Low Voltage Electrical Equipment**”, *Energies* 2019, 12(14), 2749; indeksowany w bazie Web of Science; 5-letni Impact Factor 3.333; 140 pkt. MEiN; wkład własny w pracę: 60%. Karol Nowak był odpowiedzialny za przygotowanie stanowiska badawczego, opracowanie koncepcji i metodyki badań, przeprowadził indywidualnie większość zaplanowanych, laboratoryjnych prac badawczych. Zarejestrował wyniki badań, a następnie opracował je w postaci tabel i wykresów. Był odpowiedzialny za przegląd tematycznie związanych artykułów naukowych, opracowanie pierwszej wersji manuskryptu oraz udzielenie odpowiedzi na recenzje.

Publikacja II: Karol Nowak, Jerzy Janiszewski, Grzegorz Dombek: „**A Multi-Sectional Arc Eliminator for Protection of Low Voltage Electrical Equipment**”, *Energies* 2020, 13(3), 605; indeksowany w bazie Web of Science; 5-letni Impact Factor 3.333; 140 pkt. MEiN; wkład własny w pracę: 60%. Karol Nowak był odpowiedzialny za przygotowanie stanowiska badawczego, opracowanie koncepcji i metodyki badań. Przeprowadził indywidualnie większość zaplanowanych, laboratoryjnych prac badawczych. Dla kilku autorskich rozwiązań eliminatora łuku zarejestrował serie wyników badań, a następnie opracował je w postaci tabel i wykresów. Był odpowiedzialny za przegląd tematycznie związanych artykułów naukowych, opracowanie pierwszej wersji manuskryptu oraz udzielenie odpowiedzi na recenzje.

Publikacja III: Karol Nowak, Jerzy Janiszewski, Grzegorz Dombek: „**The Possibilities to Reduce Arc Flash Exposure with Arc Fault Eliminators**”, *Energies* 2021, 14(7), 1927; indeksowany w bazie Web of Science; 5-letni Impact Factor 3.333; 140 pkt. MEiN; wkład własny w pracę: 60%. Karol Nowak był odpowiedzialny za opracowanie sposobu rejestracji i metodyki badań oddziaływań łuku elektrycznego w awaryjnych stanach pracy sieci elektroenergetycznej. Przeprowadził indywidualnie większość zaplanowanych, laboratoryjnych prac badawczych, a także zebrał oraz dokonał analizy zarejestrowanych przebiegów i rejestracji fotograficznych. Wykonał obliczenia matematyczne związane z energią łuku elektrycznego i niebezpieczną strefą jego rażenia. Był odpowiedzialny za przegląd tematycznie związanych artykułów naukowych, opracowanie pierwszej wersji manuskryptu oraz udzielenie odpowiedzi na recenzje.

Publikacja IV: Karol Nowak, Jerzy Janiszewski, Grzegorz Dombek: „**A New Short-Circuit Hybrid Device for the Protection of Low-Voltage Networks From the Effects of an Arc Fault**”, *IEEE Access* 2022, vol. 10, pp. 88678-88691; indeksowany w bazie Web of Science; 5-letni Impact Factor 4.676; 100 pkt. MEiN; wkład własny w pracę: 80%. Karol Nowak był

odpowiedzialny za opracowanie koncepcji i metodyki badań ograniczania skutków oddziaływania łuku awaryjnego i przepływu prądów zwarciovych na wyposażenie i otoczenie rozdzielnic elektroenergetycznych. Przeprowadził indywidualnie większość zaplanowanych, laboratoryjnych prac badawczych. Zarejestrował wyniki badań, a następnie opracował tabele i wykresy. Wykonał obliczenia matematyczne związane z elektrodynamiką torów prądowych, erozją materiałową oraz natężeniem dźwięku w otoczeniu wieloprądowego łuku elektrycznego. Był odpowiedzialny za przegląd tematycznie związanych artykułów naukowych, opracowanie pierwszej wersji manuskryptu oraz udzielenie odpowiedzi na recenzje.

3. WYKAZ DODATKOWYCH PRAC ZWIĄZANYCH Z ROZPRAWĄ DOKTORSKĄ

Artykuły naukowe, patent i zgłoszenie patentowe, które nie są częścią rozprawy, ale mają istotny wkład dla tematu rozprawy:

Praca V: Karol Nowak: „Mikroprocesorowy sterownik tyrystorowy”, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering - 2018, Issue 95, s. 77-86.

Praca VI: Karol Nowak, Jerzy Janiszewski, Andrzej Książkiewicz: „Wieloprądowe syntetyczne źródło do badań zwarciovych”, Kalejdoskop I, monografia konferencyjna 2021, wydawnictwo Cekona, s. 104-119.

Praca VII: Andrzej Książkiewicz, Grzegorz Dombek, Karol Nowak: „Electrodynamic Contact Bounce Induced by Fault Current in Low-Voltage Relays”, Energies 2019, 12(20), 3926.

Praca VIII: Andrzej Książkiewicz, Grzegorz Dombek, Karol Nowak: „Change in Electric Contact Resistance of Low-Voltage Relays Affected by Fault Current”, Materials 2019; 12(13), 2166.

Praca IX: Karol Nowak, Jerzy Janiszewski, Łukasz Drużyński: „Półprzewodnikowy eliminator łuku elektrycznego w układach niskiego napięcia”, Kalejdoskop I, monografia konferencyjna 2021, wydawnictwo Cekona, s. 120-146.

Patent I: Jerzy Janiszewski, Karol Nowak: „Układ zwiernika hybrydowego”, data zgłoszenia: 29.11.2018, **nr zgłoszenia P.427948.**

Zgłoszenie patentowe I: Jerzy Janiszewski, Karol Nowak: „Układ zwiernika hybrydowego”, data zgłoszenia: 29.11.2018, **nr zgłoszenia P.427947.**

4. CEL I HIPOTEZA BADAWCZA PRACY

Celem niniejszej pracy było opracowanie koncepcji eliminowania łuku awaryjnego i ograniczania skutków zwarciovych z wykorzystaniem łącznika hybrydowego. Taki łącznik, stanowiący połączenie elementów półprzewodnikowych i zwiernika mechanizmowego, mógłby zostać wykorzystany do budowy szybkiego eliminatora łuku elektrycznego o dużej obciążalności prądowej.

Jednym z wielu rozwiązań konstrukcyjnych eliminatorów łuku są układy bocznikujące. Zaletą tych urządzeń, w porównaniu z układami wyłączającymi, jest duża szybkość działania. Opracowana konstrukcja łącznika hybrydowego jest układem bocznikującym zakłócenie powyżej miejsca jego wystąpienia. Stanowi ona połączenie wielu półprzewodnikowych gałęzi zwierających i łącznika mechanizmowego (zwiernika).

Spodziewane efekty celu badawczego związane z wykorzystaniem łącznika hybrydowego to:

- praktycznie bezzwłoczne eliminowanie łuku awaryjnego w uszkodzonym obwodzie,
- skrócenie czasu oddziaływania skutków cieplnych w zabezpieczonym obwodzie,
- ograniczenie oddziaływania elektrodynamicznego prądów zwarciovych,
- ograniczenie erozji torów prądowych poddanych działaniu łuku elektrycznego,
- ograniczenie zagrożenia powodowanego akustycznym oddziaływaniem łuku elektrycznego,
- ograniczenie wzrostu ciśnienia gazów wewnątrz zamkniętych obudów urządzeń elektrycznych powstającego w wyniku zapłonu łuku elektrycznego,
- zmniejszenie niebezpiecznej strefy rażenia łukiem elektrycznym.

Główna hipoteza badawcza przyjęta w dysertacji zakłada, że przy aktualnym stanie wiedzy, istnieją techniczne możliwości opracowania konstrukcji łącznika hybrydowego, pozwalającego na szybkie i skuteczne eliminowanie awaryjnego łuku elektrycznego oraz efektywne ograniczanie skutków powodowanych wyładowaniami łukowymi i przepływami prądów zwarciovych.

W ramach realizacji wyżej przedstawionego celu rozprawy doktorskiej oraz weryfikacji postawionej hipotezy, przeprowadzone badania koncentrowały się na powiązanych ze sobą cząstkowych etapach badawczych:

- sprawdzenie możliwości wykorzystania przeciwsobnie połączonych tyrystorów i autorskiego rozwiązania programowalnego sterownika mikroprocesorowego w charakterze eliminatora łuku elektrycznego oraz analiza efektywności działania zabezpieczenia łukoochronnego dla zmiennego charakteru obciążenia. Zagadnienia te przedstawiono w **Publikacji I** i pracy V,
- zwiększenie możliwości prądowych eliminatora łuku elektrycznego (łącznika półprzewodnikowego) poprzez zastosowanie autorskiego opracowania układu

kaskadowo połączonych i sekwencyjnie sterowanych wielu gałęzi półprzewodnikowych. Wyniki badań i pełną analizę przedstawiono w **Publikacji II**,

- sprawdzenie (w oparciu o wytyczne międzynarodowego standardu IEEE 1584) czy poprzez zastosowanie konstrukcji opracowanego wielosekcyjnego eliminatora łuku możliwe jest zmniejszenie strefy rażenia łukiem elektrycznym oraz obniżenie kategorii zagrożenia. Skuteczność tego rozwiązania przedstawiono w **Publikacja III**,
- zbadanie wpływu działania wielosekcyjnego eliminatora łuku na ograniczenie przyrostów ciśnienia wewnątrz zamkniętych obudów urządzeń elektrycznych dotkniętych zakłóceniem łukowym. Obszar tych badań przedstawiono w **Publikacji III**,
- opracowanie kompletnego autorskiego rozwiązania łącznika hybrydowego, stanowiącego równoległe połączenie wielu sekcji półprzewodnikowych z łącznikiem mechanizmowym, który może zostać wykorzystany jako wieloprądowy zwiernik hybrydowy, ograniczający skutki powstałego łuku awaryjnego i przepływu prądu zakłócieniowego. Zagadnienia te zostały przedstawione w **Publikacji IV oraz dwóch zgłoszeniach patentowych, z których jeden uzyskał pozytywną akceptację Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej.**

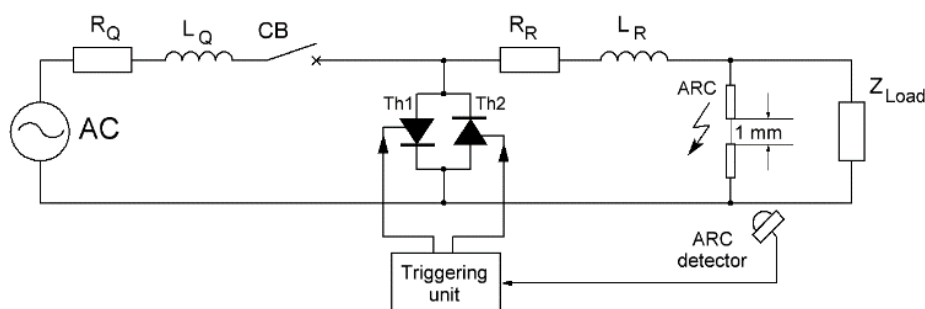
5. ZAKRES I METODYKA PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

5.1. Autorska metoda rozwiązania problemu naukowego

Analiza literatury przedmiotu prowadzi do istotnego wniosku, że najbardziej efektywną metodą ograniczania skutków zwarciovych i łukowych jest skracanie czasu przepływu prądu w obwodzie dotkniętym awarią. Efekt ten można uzyskać przez bocznikowanie uszkodzonego obwodu urządzeniem o możliwie krótkim czasie zadziałania przy zachowaniu możliwie dużej obciążalności prądowej. Taki efekt, można uzyskać przez zastosowanie łącznika hybrydowego, w którym sekcja półprzewodnikowa (o ograniczonej obciążalności prądowej) odpowiada za szybkość komutacji urządzenia, a część mechanizmowa (o zwłocznym zadziałaniu) pozwala na uzyskanie odpowiednio wysokiej obciążalności zwarciovowej. W konsekwencji oczekuje się powstanie szybkiego hybrydowego zwiernika, współpracującego z działającymi ze znacznymi opóźnieniami, typowymi zabezpieczeniami sieciowymi.

5.2. Zakres prac prowadzących do rozwiązania problemu badawczego

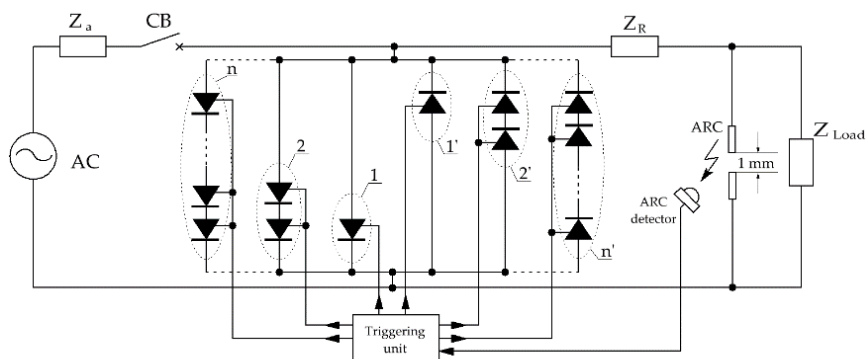
Początkowy zakres prac obejmował budowę stanowiska badawczego półprzewodnikowego eliminatora łuku elektrycznego, będącego połączeniem dwóch przeciwsośnie połączonych tyrystorów [Publikacja I]. Rysunek 3 przedstawia uproszczoną wersję zaprojektowanego obwodu badawczego. Zadaniem przedstawionego układu bocznikującego jest szybka eliminacja łuku zakłóceniewego, zapobiegająca dalszemu rozwojowi wyładowania elektrycznego. Spadek napięcia na przewodzących półprzewodnikach jest mniejszy od napięcia palącego się łuku elektrycznego, czego efektem powinno być jego zgaszenie. Przeciwsośne połączenie tyrystorów pozwala na zastosowanie eliminatora łuku w sieciach prądu przemiennego o mogącym pojawiać się losowo stanie awaryjnym.



Rys. 3. Obwód testowy z półprzewodnikowym eliminatorem łuku [Publikacja I, fig. 2].

Kolejny etap prac dotyczył problemu zwiększenia obciążalności prądowej półprzewodnikowej części eliminatora łuku przy zachowaniu jego skuteczności działania. Rozwiązaniem jest autorskie opracowanie stanowiące połączenie wielosekcyjnych półprzewodnikowych gałęzi bocznikujących wraz z ich sekwencyjnym sterowaniem

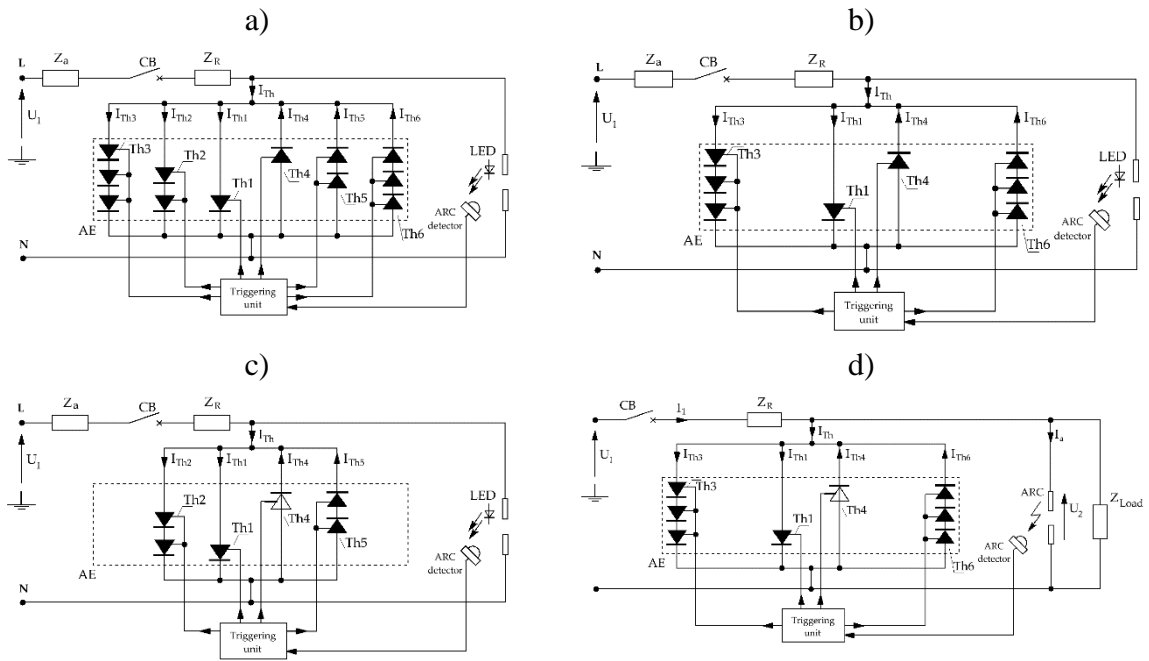
[Publikacje II i III]. Na rysunku 4 przedstawiono schemat ideowy wielosekcyjnego tyrystorowego eliminatora łuku elektrycznego (*MSAE* ang. *Multi- Sectional Arc Eliminator*).



Rys. 4. Schemat ideowy wielosekcyjnego eliminatora łuku (*MSAE*) w wykonaniu tyrystorowym [Publikacja II, fig. 2].

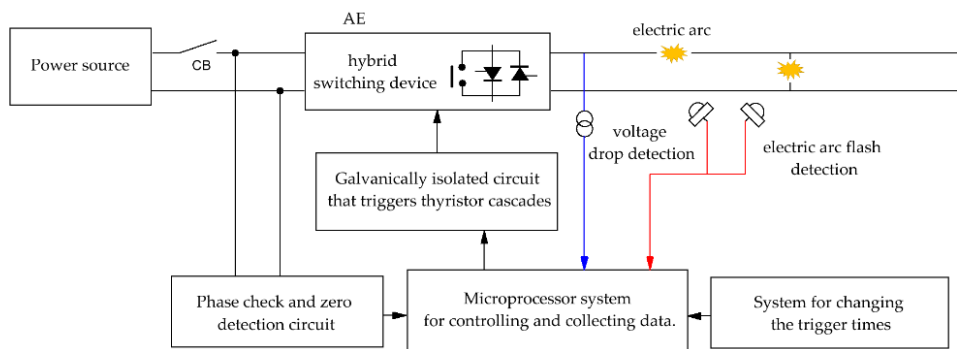
Poszczególne gałęzie bocznikujące wielosekcyjnego eliminatora łuku zbudowane są z wzrastającej liczby szeregowo połączonych elementów półprzewodnikowych ($1, 2, \dots, n$ oraz $1', 2', n'$). Aktywacja przedstawionego na rysunku 4 eliminatora łuku następuje przez wysterowanie tyrystorów w gałęzi bocznikującej najwyższego rzędu (n - dla polaryzacji dodatniej lub n' - dla polaryzacji ujemnej), a następnie w kolejnych gałęziach równoległych niższego rzędu $2, 1$ lub $2', 1'$. Warunkiem przejmowania przewodzenia prądu przez kolejne gałęzie bocznika półprzewodnikowego $n, \dots, 2, 1$ lub $n', \dots, 2', 1'$ jest odpowiednie sterowanie bramkami tyrystorów. Zadaniem szeregowo połączonych tyrystorów w gałęziach bocznikujących wyższego rzędu jest utrzymanie w stanie ich przewodzenia spadku napięcia wystarczającego do wysterowania elementów sekcji rzędu niższego. Cała procedura zapewnia przejście prądu zakłóceniewego w obwodach półprzewodnikowych przez czas, który jest niezbędny do zgaszenia powstałego łuku elektrycznego. W ten sposób uzyskuje się praktycznie bezzwłoczne zadziałanie eliminatora łuku oraz sukcesywne odciążenie jego półprzewodnikowych elementów wykonawczych. Ta ostatnia funkcjonalność powoduje wydłużenie czasu dysponowanego na otwarcie styków wyłącznika głównego w przypadku ponownych zapłonów łuku oraz wzrost całkowitej wytrzymałości obciążeniowej łącznika półprzewodnikowego.

Skuteczność działania zaproponowanego eliminatora łuku elektrycznego została sprawdzona i potwierdzona dla kilku możliwych rozwiązań konstrukcyjnych. Wybrane przykłady przedstawiono na rysunku 5. Różnice w budowie eliminatora łuku (łącznika półprzewodnikowego) mają znaczący wpływ na charakterystyki przejmowania prądu przez część półprzewodnikową. Wynika to głównie z ilości i rodzajów zastosowanych tyrystorów w poszczególnych gałęziach półprzewodnikowych. Dodatkowo każdy z zaprezentowanych rozwiązań, ze względu na odmienną budowę, wymaga innego sposobu sterowania. Złożoność rozwiązania i ilość tyrystorów ma również wpływ na koszt budowy takiego eliminatora łuku.



Rys. 5. Przykłady różnych rozwiązań konfiguracyjnych eliminatora łuku [**Publikacja II**]: a) trzysekcyjny [fig. 3], b) dwusekcyjny [fig. 6], c) dwusekcyjny z tyristorem o mniejszym spadku napięcia (Th4) [fig. 11], d) dwusekcyjny z tyristorem o mniejszym spadku napięcia i większą ilości szeregowych tyristorów w gałęzi najwyższego rzędu [fig. 15].

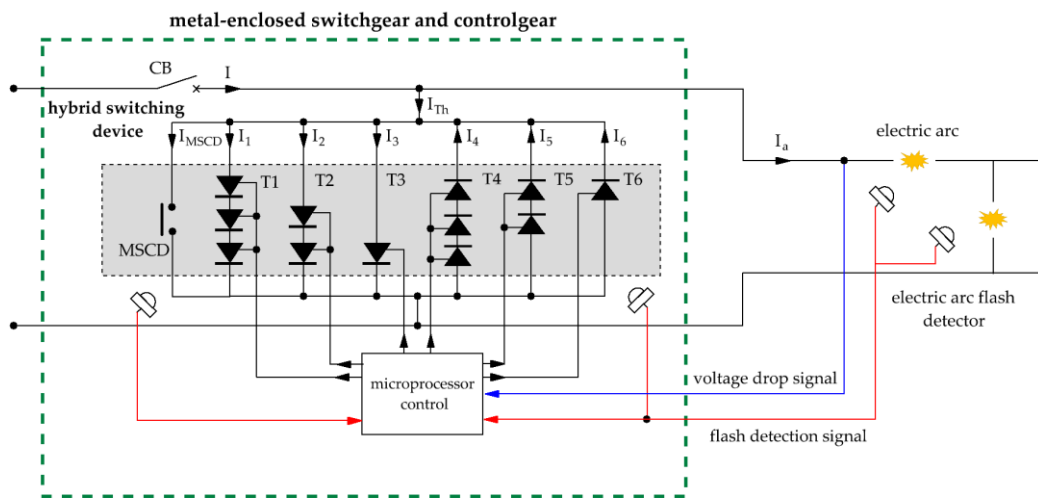
Ostatnia część pracy dotyczyła możliwości wykorzystania innowacyjnego autorskiego opracowania łącznika hybrydowego (z dodatkowym zwiernikiem mechanicznym), który współpracując z czujnikami detekcji łuku elektrycznego lub detektorami zwarcia może efektywnie eliminować wieloprądowy łuk elektryczny oraz ograniczać skutki przepływu prądu zwarciovego [**Publikacja IV, Patent I i Zgłoszenie patentowe II**]. Na rysunku 6 przedstawiono schemat blokowy zastosowania łącznika hybrydowego w roli eliminatora łuku elektrycznego.



Rys. 6. Schemat blokowy zastosowania łącznika hybrydowego w roli eliminatora łuku elektrycznego [**Publikacja IV, fig. 2**].

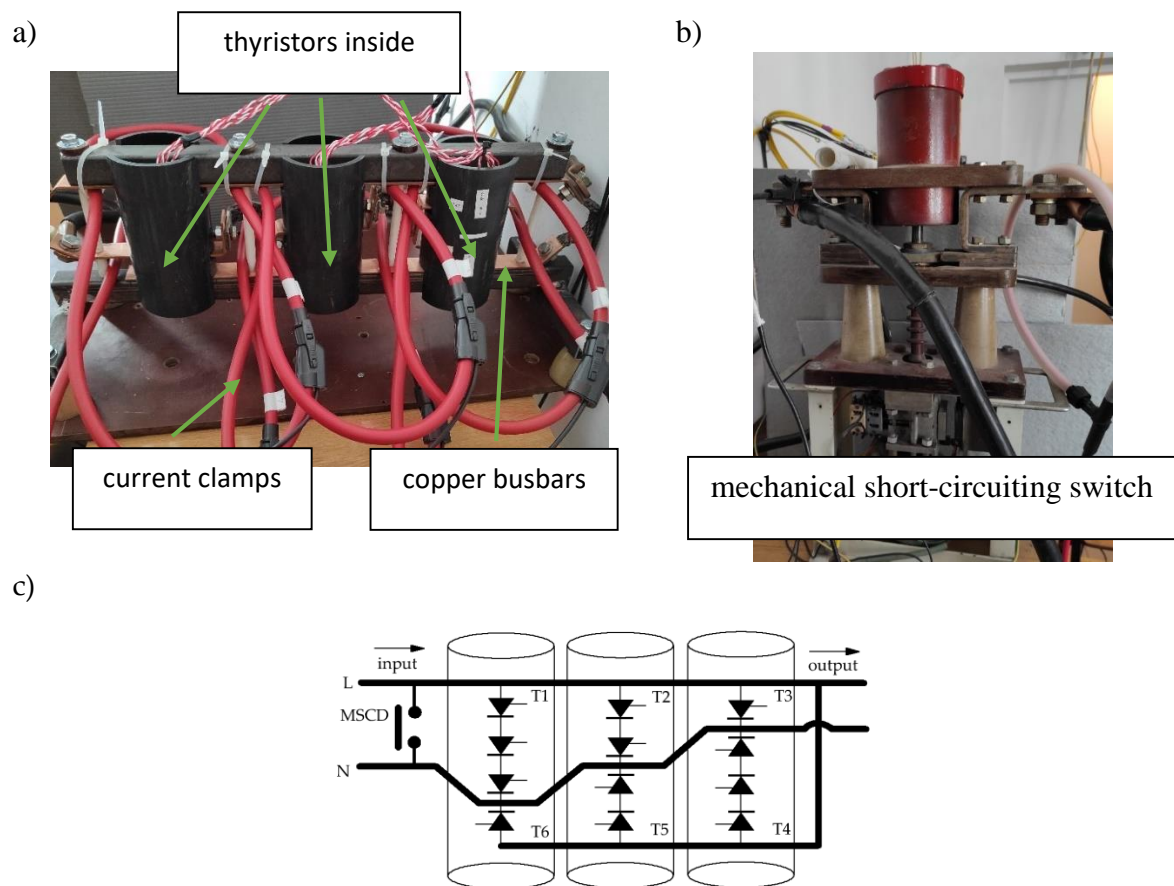
Zadaniem rozbudowanego mikroprocesorowego układu sterowania przedstawionego na rysunku 6 (autorski projekt), jest współpraca z układami: detekcji łuku elektrycznego, detekcji zera napięcia zasilającego i określenia polaryzacji półfali przepływającego prądu [praca V]. Precyzyjne określenie początku przepływu i polaryzacji przepływającego prądu, umożliwiają zaawansowane sterowanie wyzwalaniem tyrystorów i czasu załączenia zwiernika mechanicznego.

Na rysunku 7 przedstawiono schemat ideowy autorskiego rozwiązania hybrydowego eliminatora łuku przeznaczonego dla obwodów zasilanych jednofazowo. Przedstawiony schemat ideowy posłużył do zbudowania prototypu urządzenia pokazanego na rysunku 8. Większość zaprezentowanych w pracy wyników badań została wykonana przy wykorzystaniu prototypu urządzenia zbudowanego w oparciu o schemat z rysunku 7.



Rys. 7. Schemat ideowy eliminatora łuku w oparciu o łącznik hybrydowy [Publikacja IV, fig. 3].

Układ łącznika hybrydowego stanowi połączenie jednej sekcji mechaniczowej MSCD (ang. *Mechanical Short-Circuit Device*) z sześcioma półprzewodnikowymi gałęziami tyrystorowymi, oznaczonymi kolejno T_1 , T_2 i T_3 oraz T_4 , T_5 i T_6 . Aktywacja łącznika hybrydowego następuje w pierwszej kolejności przez wysterowanie gałęzi z największą liczbą szeregowo połączonych tyrystorów (T_1 dla polaryzacji dodatniej lub T_4 dla polaryzacji ujemnej). W dalszej kolejności następuje wysterowanie kolejnych gałęzi równoległych o zmniejszającej się liczbie szeregowo połączonych tyrystorów. Jako ostatnia zamyka się gałąź zwiernika mechanicznego MSCD. Poprzez odciążenie, możliwe jest bezłukowe przejście prądu przez łącznik zestykowy.



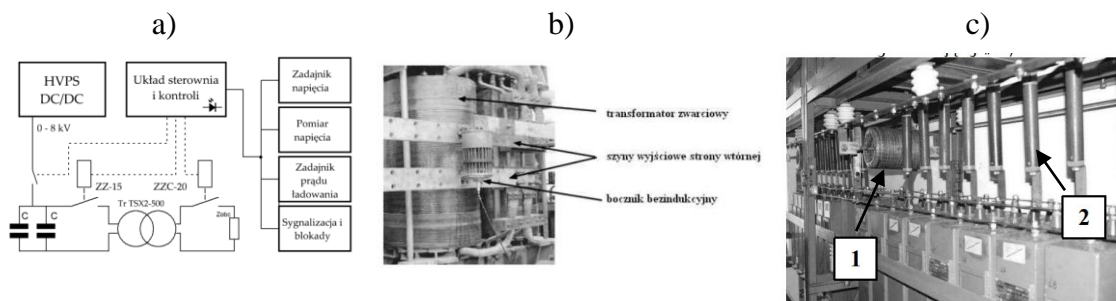
Rys. 8. Łącznik hybrydowy w rozwiązaniu praktycznym: a) półprzewodnikowa część łącznika hybrydowego, b) zwiernik mechaniczny, c) sposób montażu tyrystorów [Publikacja IV, fig. 6].

Łącznik hybrydowy (rys. 8) zbudowany jest w oparciu o tyrystory DCR1910F14-1974 (Dynex Semiconductor) oraz zwiernik mechaniczny ZZC-15. Wartość prądu ciągłego w stanie załączenia I_T dla pojedynczego tyrystora wynosi 2700 A. Zwiernik mechaniczny charakteryzuje się zdolnością łączeniową na poziomie 30 kA. Z tego powodu oraz ze względów bezpieczeństwa i możliwych do wystąpienia niebezpiecznych skutków oddziaływania łuku elektrycznego, amplitudy prądów zakłóceń w badaniach eksperymentalnych zostały ograniczone do 30 kA.

5.3. Źródła zasilania i przyrządy pomiarowe stosowane podczas prac badawczych

Badania eksperymentalne realizowane w ramach pracy doktorskiej zostały przeprowadzone w laboratoriach urządzeń elektroenergetycznych Politechniki Poznańskiej. W zakresie prądów probierczych do ok 1,5 kA próby wykonano w obwodach zasilanych bezpośrednio z sieci energetycznej niskiego napięcia 230/400V. Na potrzeby prób łukowych i zwarciovych o prądach do 30 kA, pomieszczenia badawcze wyposażono w wielkopiędowe syntetyczne źródło zasilania. Do jego budowy wykorzystano 48 wysokonapięciowych ($U_n = 10$ kV) kondensatorów impulsowych, połączonych równolegle w 6 sekcji (0,8 mF/sekcję) oraz dwa równolegle połączone transformatory zwarciovye TSX2-500. Spodziewane wartości

szczytowe prądów użytkowych (po stronie wtórnej transformatorów) wynoszą ponad 100 kA [praca VI]. Rysunek 9 przedstawia uproszczony schemat blokowy zaprojektowanego źródła wieloprądowego, widok na pojedynczy transformator zwarciovy, bocznik prądowy i baterię kondensatorów impulsowych o energii magazynowanej 250 kJ.



Rys. 9. Wieloprądowe syntetyczne źródło zasilania: a) schemat blokowy, b) transformator zwarciovy TSX2-500, c) bateria kondensatorów impulsowych wraz z zabezpieczeniami zwarciovy (1-2) [praca VI, rys. 2,3 i 6].

Niezbędna podczas prac badawczych rejestracja wielu sygnałów pochodzących z różnych punktów pomiarowych wymagała opracowania, zbudowania i zsynchronizowania wielokanałowego stanowiska pomiarowego. Wiązało się to z koniecznością skompletowania m.in.:

- czterech oscyloskopów Volcraft DSO-1084,
- oscyloskopowych przystawek prądowych AC/DC PAC22 Chauvin Arnoux o zakresie pomiarowym do 1400 A,
- cewek Rogowskiego AmpFlex A110-120 o zakresie pomiarowym do 30 kA,
- cewek Rogowskiego CWT300 o zakresie pomiarowym do 60 kA,
- różnicowych sond wysokonapięciowych Pintek DP-50 o zakresie pomiarowym do 2300 V_{rms} AC i DC,
- napięciowych sond Voltcraft PP-350 o zakresie wejściowym 1500 V,
- czujników ciśnienia PA_21G firmy Keller o zakresie pomiarowym do 6 bar.

Graficzna rejestracja skutków przepływu prądu zwarciovy i zapłonu łuku elektrycznego została wykonana za pomocą szybkiej kamery Chronos 1.4 firmy Kron Technologies. Rejestracje do 40000 klatek/sekundę pozwoliły na dokładną analizę obserwowanych zjawisk w 25 μs przedziałach czasowych.

Pomiary natężenia dźwięku generowanego w wyniku zapłonu łuku elektrycznego wykonane zostały profesjonalnym miernikiem SW-1000 firmy Sauter o klasie dokładność 1, zakresie pomiarowym 136 dB oraz możliwością rejestracji dźwięku w trybie „Impuls”.

Pomiary masy elektrod wykonane przed próbą badawczą i jej ubytku po próbie, zrealizowano za pomocą analitycznej wagi AS 110/c/2 firmy Radwag, o zakresie do 110 g i błędzie pomiarowym ±0,4 mg.

6. WYNIKI BADAŃ SKUTECZNOŚCI DZIAŁANIA ŁĄCZNIKA HYBRYDOWEGO

6.1. Ograniczanie oddziaływań elektrodynamicznych prądów zwarciovych w obwodach zabezpieczonych łącznikiem hybrydowym

Oddziaływania elektrodynamiczne w torach prądowych i układach stykowych łączników elektrycznych, są wywołane przepływającym przez nie prądem elektrycznym [21]. Siły elektrodynamiczne osiągają największe wartości podczas przepływu prądów zwarciovych. W czasie zwarcia płynący prąd może przekraczać setki razy prąd znamionowy, a więc siły elektrodynamiczne mogą być dziesiątki tysięcy razy większe od sił występujących w znamionowych warunkach pracy [praca VII].

Skutkiem działania siły elektrodynamicznej jest wystąpienie niebezpiecznych naprężeń, dodatkowych naciągów i wychyleń przewodów giętkich, a także odkształcenia przewodów szynowych. Najbardziej widoczne i destrukcyjne skutki działania prądów zwarciovych występują w rozdzielniach, gdzie odległości między przewodami są niewielkie [22].

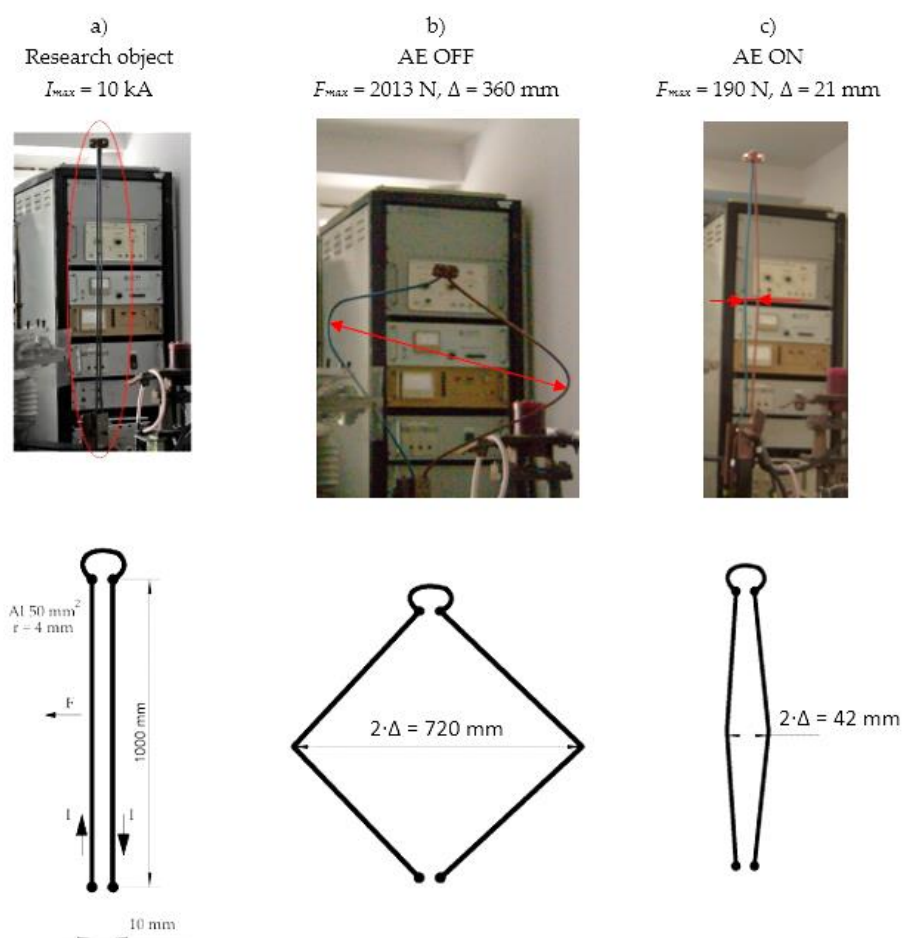
Na rysunku 10 przedstawiono przykładowy efekt skuteczności ograniczania elektrodynamicznych skutków zwarciovych w układzie z łącznikiem hybrydowym [Publikacja IV]. Podczas eksperymentu wykorzystano dwa równoległe aluminiowe tory prądowe o długości $l = 1000$ mm, średnicy $d = 8$ mm, oddalone od siebie o $a = 2$ mm. Rysunek 10a przedstawia obiekt badań przed wykonaniem próby zwarciovej. Rysunek 10b to efekt skutków elektrodynamicznych podczas przepływu prądu zwarciovej o amplitudzie 10 kA i braku zabezpieczenia obwodu łącznikiem hybrydowym (AE OFF). W chwili największego oddziaływania siły elektrodynamicznej na tory prądowe, jej obliczona wartość wynosiła ponad 2 kN. Na skutek działania siły elektrodynamicznej, nastąpiło odkształcenie torów prądowych, a zmierzona odległość między środkami przewodów z początkowych 10 mm, wzrosła do 720 mm.

Dla tego samego obiektu badań i warunków zwarciovych, w układzie, w którym zadziałał łącznik hybrydowy (AE ON), obliczona wartość działającej siły wynosiła zaledwie 190 N. Zmierzona wartość odkształcenia przewodów między ich środkami z początkowych 10 mm, wzrosła do zaledwie 42 mm (rysunek 10c).

Z analizy wyników badań eksperymentalnych wynika, że zastosowanie łącznika hybrydowego pozwala na znaczne skrócenie czasu trwania zakłócenia zwarciovej. Powoduje to ograniczenie amplitudy prądu w obwodzie dotkniętym zakłóceniem, a tym samym zmniejszenie skutków oddziaływania elektrodynamicznego. Przeprowadzone dla omawianego przypadku obliczenia sił elektrodynamicznych, występujących podczas przepływu prądu zwarciovej 10 kA wykazały, że zastosowanie zaproponowanego przez autora rozwiązania ochrony z wykorzystaniem łącznika hybrydowego skutkuje zmniejszeniem oddziaływania elektrodynamicznego między torami prądowymi o prawie 90%. Podobnie, zmierzone wartości

odkształcenia torów prądowych podczas przepływu prądu zwarciovego w układzie z łącznikiem hybrydowym zmalały o prawie 94%.

Szczegółowy opis procesu badawczego i wyniki badań opisano w **Publikacji IV**.



Rys. 10. Próba oceny skutków elektrodinamicznych podczas przepływu prądu zwarciovego o amplitudzie 10 kA w układzie równoległych aluminiowych torów prądowych: a) obiekt badań przed wykonaniem eksperymentu, b) obiekt badań po próbie zwarciovowej, c) obiekt badań po próbie zwarciovowej w układzie z łącznikiem hybrydowym, (Δ - strzałka ugięcia toru prądowego) [Publikacja IV, fig. 7].

6.2. Ograniczanie erozji torów prądowych poddanych działaniu łuku elektrycznego

Palący się łuk elektryczny i przepływający przez tory prądowe urządzeń i aparatów elektroenergetycznych prąd zakłócienny, powodują występowanie różnorodnych niebezpiecznych zjawisk fizycznych i chemicznych. Energia cieplna wydzielana w awaryjnym łuku elektrycznym, może powodować znaczne uszkodzenia urządzeń znajdujących się wewnątrz i na zewnątrz rozdzielnic, a także stanowić zagrożenie dla otoczenia [23]. Zwarcia łukowe i przepływy przez styki elektryczne prądu o znacznej wartości mogą wpływać na stan ich powierzchni, a tym samym na wartość rezystancji przejścia styku elektrycznego [praca VIII].

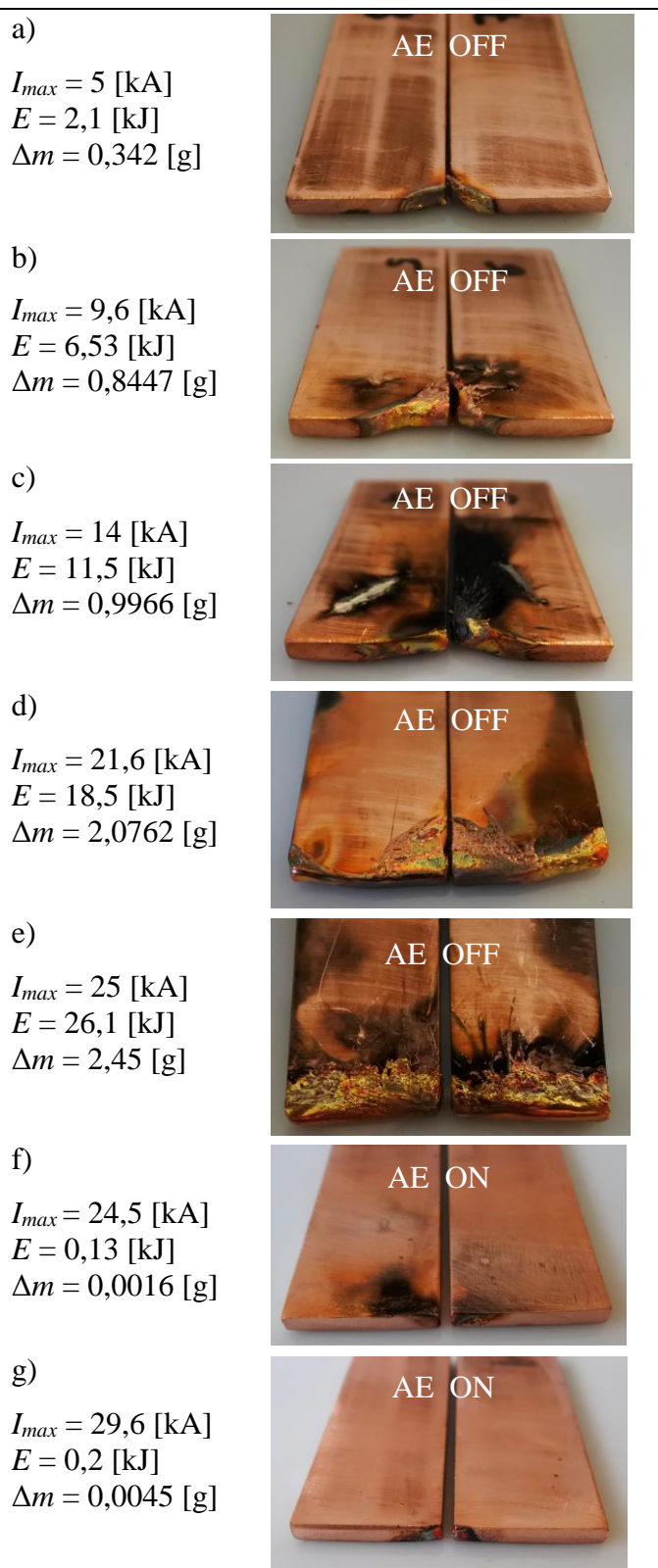
Rys. 11. Skutki erozji łukowej na miedzianych elektrodach w układzie bez aktywnego (AE OFF) i z aktywnym (AE ON) łącznikiem hybrydowym (I_{max} – zmierzona wartość prądu zakłócenia, E – obliczona energia łuku elektrycznego, Δm – wagowy ubytek masy elektrod) [Publikacja IV, fig. 10].

Pod pojęciem erozji łukowej materiału na ogół rozumie się wagowy lub objętościowy ubytek masy elektrod Δm oraz degradację i zmianę właściwości powierzchni elektrod wskutek różnych zjawisk i procesów związanych z występowaniem łuku elektrycznego.

Graficzne rejestracje (rys. 11a-g), przedstawiają erozję materiału miedzianych elektrod dla różnych wartości prądu zakłócającego, a tym samym różnych energii łuku [Publikacja IV]. Zaprezentowany eksperyment wykonano dla dwóch warunków probierczych: bez aktywnego łącznika hybrydowego (rysunki 11a-e, AE OFF) i z łącznikiem hybrydowym, wykorzystanym w roli eliminatora łuku elektrycznego (rysunki 11f-g, AE ON).

Należy dodać, że w obwodzie z zainstalowanym łącznikiem hybrydowym (AE ON), podczas zwarcia łukowego z prądem w zakresie od 5 do 20 kA, nie uwydatniły się widoczne uszkodzenia elektrod, a pomiar erozji mieścił się w granicach

błędu przyrządu pomiarowego ($\pm 0,4$ mg). Mierzalny i widoczny ubytek materiału, pojawia się dopiero przy amplitudzie prądu około 25 kA (rys. 11f). W obwodzie bez zainstalowanego łącznika hybrydowego (AE OFF), widoczne i mierzalne ubytki materiału, można było już zaobserwować dla prądów około 5 kA (rys. 11a). Porównując, widoczne uszkodzenia i pomiary ubytku materiału dla elektrod przedstawionych na rysunku 11e (bez eliminatora łuku) i 11f

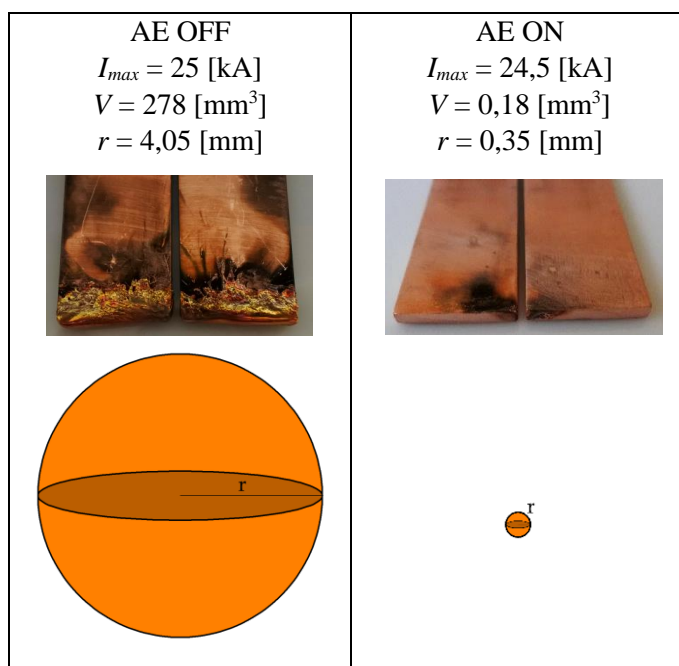


(z eliminatorem łuku), można dostrzec skuteczność ograniczania erozji, która jest mniejsza o ponad 2 rzędy wielkości.

Rysunek 12 przedstawia graficzne porównanie obliczonej wartości ubytku objętości V materiału elektrod w układzie bez i z łącznikiem hybrydowym. Erozja materiału elektrod została przedstawiona w postaci kul o promieniu r (z zachowaniem wspólnej skali dla obu rysunków). Przyrównując ubytek objętościowy dla obu przykładów, otrzymujemy ponad 1500-krotnie mniejszą wartość erozji materiału w układzie z zastosowanym łącznikiem hybrydowym. Krople płynnego metalu stanowią poważne zagrożenie pożarowe, dlatego ograniczenie ich ilości i masy, jest potwierdzenie istoty roli eliminatora łuku dla poprawy ochrony przeciwpożarowej.

Rys. 12. Graficzne przedstawienie objętości materiału wyrzuconego z elektrod do otoczenia [Publikacja IV, fig. 12].

Reasumując, przeprowadzonych serii eksperymentów i analizy zebranych danych wynika, że zastosowanie łącznika hybrydowego powoduje znaczne zmniejszenie energii łuku (nawet 200 krotne), ograniczenie erozji materiału elektrod (w zakresie prądów probierczych do 30 kA nawet 1500 krotnie) oraz widoczne zmniejszenie degradacji powierzchni elektrod.

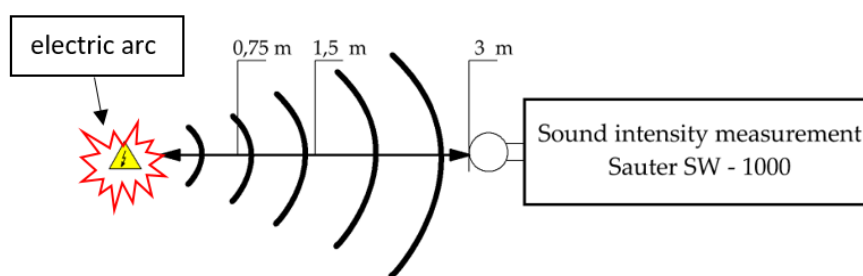


Opis przebiegu zdarzeń, wyniki badań i pełną analizę przedstawiono w **Publikacji IV**.

6.3. Ograniczenie zagrożeń powodowanych akustycznym oddziaływaniem łuku elektrycznego

Podczas zapłonu łuku elektrycznego i w jego dalszych etapach palenia się, następuje w otoczeniu wyładowania nagły wzrost ciśnienia i powstaje fala dźwiękowa, której natężenie może prowadzić do uszkodzenia, a nawet utraty słuchu. Przeciętny łuk o natężeniu prądu rzędu kilku do kilkunastu kiloamperów i długości od kilkunastu do kilkudziesięciu centymetrów, generuje w odległości 1 m od łuku, ciśnienie akustyczne o wartościach dochodzących do 150 dB, czyli znacznie przewyższających poziom progu bólu, wynoszący 120 dB [24]. Jeszcze bardziej niebezpieczne są udary dźwiękowe, generowane w chwili zapłonu łuku w szczelnej obudowie lub osprzęcie kablowym.

Dla amplitud prądu łuku zakłóceńowego mieszczących się w zakresie od 5 do 20 kA, wykonano pomiary natężenia dźwięku w układzie bez łącznika hybrydowego (AE OFF) oraz z łącznikiem hybrydowym (AE ON). Rysunek 13 przedstawia sposób pomiaru natężenia dźwięku, pochodzącego od palącego się łuku elektrycznego. Pomiary natężenia dźwięku zostały wykonane w odległości 3 m od źródła dźwięku, ze względu na graniczny zakres pomiarowy zastosowanego miernika Sauter SW-1000.



Rys. 13. Pomiar natężenia dźwięku pochodzącego od łuku elektrycznego [Publikacja IV, fig. 14].

Przy dookólnej propagacji dźwięku i zmierzonej wartości jego natężenia w odległości 3 m od źródła, można w pewnym uproszczeniu obliczyć wartość natężenia w odległościach np. 1,5 m i 0,75 m. Odległości te, odpowiadają realnym odległościom pracy personelu technicznego od potencjalnego źródła łuku. Tabela 1 zawiera zmierzone (dla 3 m) i spodziewane (1,5 m) wartości natężenia dźwięku dla układu bez i z eliminatorem łuku w zakresie prądu łuku od 5 do 20 kA.

Tab. 1. Zmierzone i spodziewane wartości natężenia dźwięku w odległości 3 m i 1,5 m od źródła łuku w układach badawczych bez i z eliminatorem łuku [Publikacja IV, tab. 4].

$I_{a \max}$ [kA]	AE OFF		AE ON	
	Measured value	Expected calculation values for a measuring distance of 1.5 m	Measured value	Expected calculation values for a measuring distance of 1.5 m
	$\beta_{AE \text{ OFF } 3m}$ [dB]	$\beta_{AE \text{ OFF } 1.5m}$ [dB]	$\beta_{AE \text{ ON } 3m}$ [dB]	$\beta_{AE \text{ ON } 1.5m}$ [dB]
5	121	127	110	116
10	123	129	113	119
15	124.5	130.5	116.5	122.5
20	126.5	132.5	119.5	125.5

W tabeli 1 zastosowano następujące oznaczenia:

- $\beta_{AE \text{ OFF } 3m} / \beta_{AE \text{ OFF } 1,5m}$ – wartość natężenia dźwięku w odległości 3 m/1,5 m od źródła łuku w układzie bez łącznika hybrydowego (AE OFF),
- $\beta_{AE \text{ ON } 3m} / \beta_{AE \text{ ON } 1,5m}$ – wartość natężenia dźwięku w odległości 3 m/1,5 m od źródła łuku w układzie z łącznika hybrydowego (AE ON).

$I_{a \max}$ [kA]	$\beta_{AE \text{ ON } 3 \text{ m}} - \beta_{AE \text{ OFF } 3 \text{ m}}$ [dB]	I_2/I_1
5	- 11	13
10	- 10	10
15	- 8	6,5
20	- 7	5

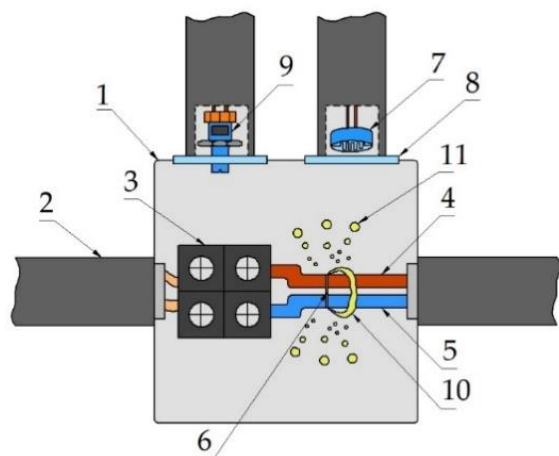
Tab. 2. Różnice poziomów natężenia dźwięku zmierzone w odległości 3 m od łuku elektrycznego i odpowiadające im stosunki natężeń dźwięków. (I_2/I_1 stosunek natężenia dźwięku) [Publikacja IV, tab. 5].

W tabeli 2 przedstawiono różnicę zarejestrowanych wartości natężenia dźwięku w odległości 3 m od źródła dźwięku dla układu bez i z zainstalowanym łącznikiem hybrydowym. Zastosowanie łącznika hybrydowego w roli eliminatora łuku powoduje znaczną redukcję natężenia dźwięku. W zakresie prądów 5 – 20 kA natężenie dźwięku wytworzonego zapłonem łuku elektrycznego może być mniejsze o wartość z przedziału 7 – 11 dB. Reasumując, analiza zebranych danych pomiarowych wykazała, że możliwe jest nawet 13-krotne zmniejszenie natężenia dźwięku jaki towarzyszy zapłonowi łuku elektrycznego.

Opis procesu badawczego i wyniki badań opisano szczegółowo w **Publikacji IV**.

6.4. Ograniczenie zagrożeń powodowanych wzrostem ciśnienia w zamkniętych obudowach urządzeń elektrycznych

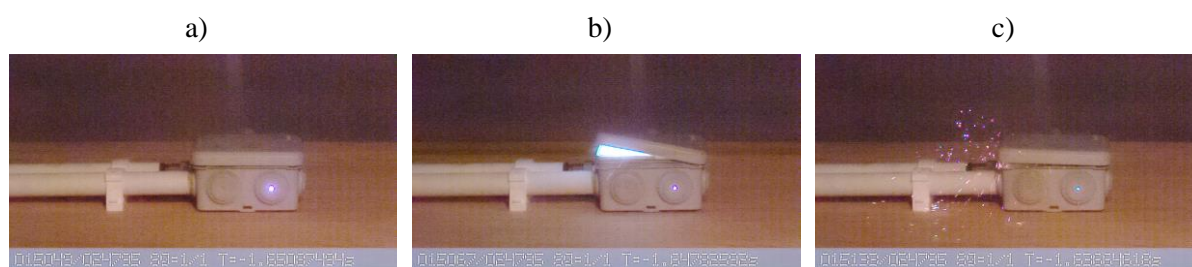
Przyrost ciśnienia wewnątrz zamkniętej obudowy (np. rozdzielnicy) jest przede wszystkim funkcją energii $e(t)$ pobieranej z sieci przez łuk elektryczny i przetwarzanej na ciepło. Część przeprowadzonych badań eksperymentalnych skupiona była na oszacowaniu przyrostu ciśnienia w osłonach szczelnych, niewyposażonych w klapy bezpieczeństwa, lecz posiadających membrany unoszące się w przypadku gwałtownego wzrostu ciśnienia wewnątrz przedziałów rozdzielnicy (obudowy) na skutek zwarć łukowych. Podjęto także próbę zweryfikowania zmierzonych przyrostów ciśnienia w odniesieniu do przyrostów obliczonych [Publikacja III].



Rys. 14. Źródło łuku elektrycznego wewnątrz puszkii łączeniowej: 1 – instalacyjna puszka natynkowa, 2 – rura PCV do wprowadzenia i wyprowadzenia przewodów zasilających, a także czujników pomiarowych, 3 – listwa zaciskowa umożliwiająca wymianę elektrod, 4 – przewód fazowy, 5 – przewód neutralny, 6 – element topikowy inicjujący zapłon łuku, 7 – detektor błysku łuku elektrycznego, 8 – ochrona detektora błysku, 9 – czujnik ciśnienia gazów wewnątrz obudowy, 10 – łuk elektryczny, 11 – krople erodowanego materiału elektrod [Publikacja III, fig. 2].

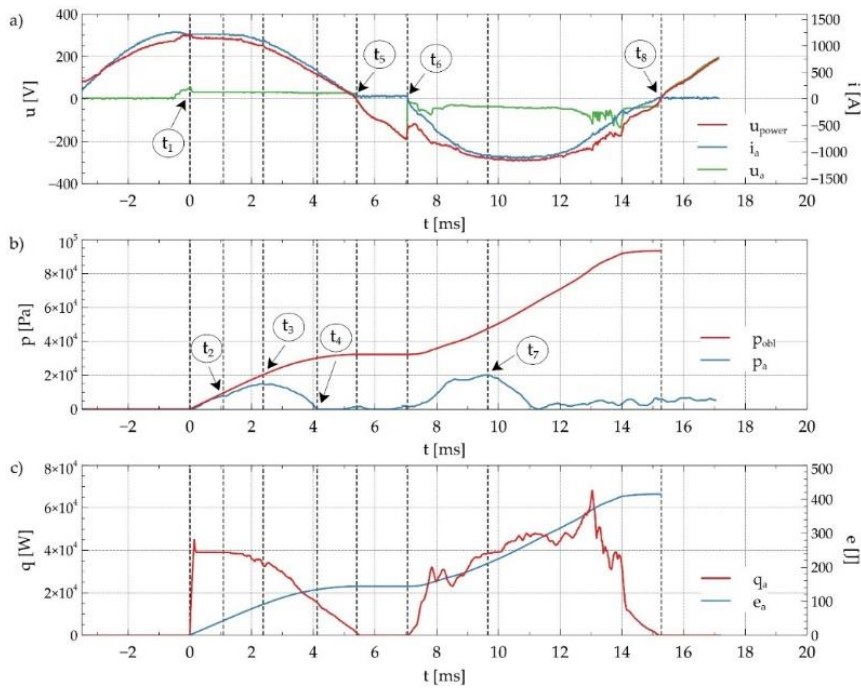
Na rysunku 14 przedstawiono budowę zaprojektowanego i wykonanego obiektu badań. Inicjacja łuku następowała w szczelnie zamkniętej obudowie puszki łączeniowej, pomiędzy dwoma miedzianymi elektrodami o średnicy $\phi = 2,21$ mm. Układ zasilany był napięciem przemiennym o wartości skutecznej 230 V. Amplituda prądu w obwodzie została ograniczona ze względów bezpieczeństwa do wartości 1300 A.

Reprezentatywne kadry z przykładowej rejestracji pokłatkowej, wykonanej za pomocą szybkiej kamery Chronos, przedstawiono na rysunkach 15a-c. Rejestracja fotograficzna pokazuje moment: zapłonu łuku w zamkniętej puszcze łączeniowej, palący się łuk w rozszczelnionej obudowie oraz emisję gorącego materiału elektrod na zewnątrz puszki łączeniowej. Podobną sytuację przedstawiono wcześniej na rysunku 2.



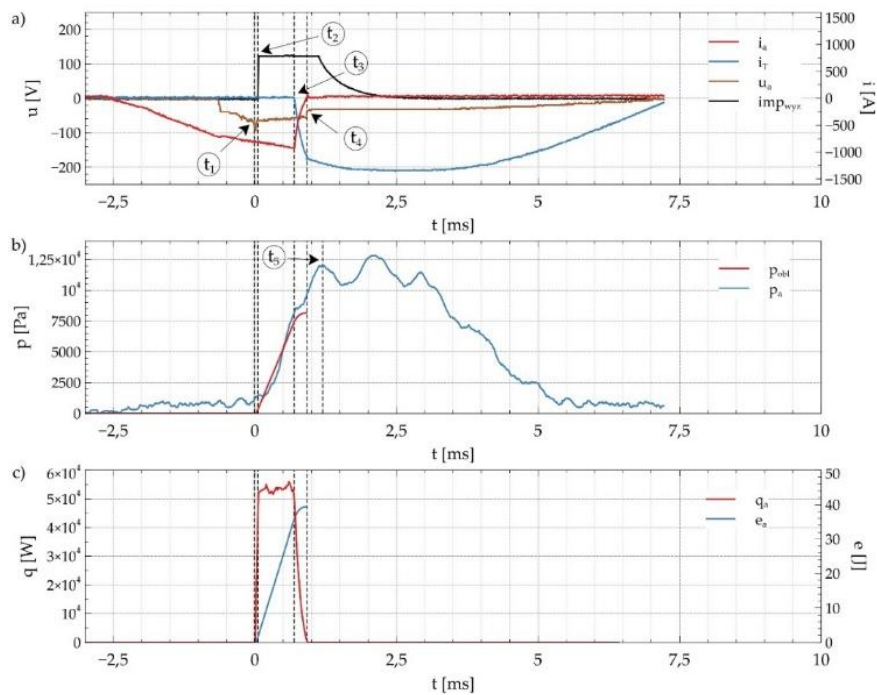
Rys. 15. Rejestracja fotograficzna skutków istnienia łuku w układzie bez i z eliminatorem łuku: a) zapłon łuku elektrycznego, b) rozwój łuku elektrycznego, c) emisja gorącego materiału elektrod na zewnątrz puszki łączeniowej ($I_m = 1300$ A, $U = 230$ V, elektrody Cu-Cu) [wybrane kadry z Publikacji III, fig. 5].

Dzięki synchronizacji szybkiej kamery filmowej Chronos z pozostałymi urządzeniami rejestracyjnymi, kadry zdjęciowe z rysunku 15 są skorelowane z przebiegami przedstawionymi na rysunku 16. Pierwszy zapłon łuku elektrycznego wewnątrz szczelnie zamkniętej puszki instalacyjnej jest powodem wzrostu ciśnienia w jej wnętrzu. W chwili $t_3 = 2,3$ ms zmierzone ciśnienie gazów wewnątrz puszki łączeniowej osiąga maximum ok 15 kPa. Dla tej samej chwili czasowej, obliczeniowa wartość ciśnienia wynosi 20 kPa, a krzywa tego przebiegu pokrywa się z krzywą zmierzonego ciśnienia (rysunek 16b). Znając charakterystykę energii łuku i wiedząc, że przyrost ciśnienia jest przede wszystkim funkcją tej energii, można z dużą dokładnością wyznaczyć krzywą ciśnienia wewnątrz szczelnej obudowy. Obliczony p_{obl} i zmierzony p_a przyrost ciśnienia dla przeprowadzonego eksperymentu został przedstawiony na rysunku 16b. Przebieg przyrostu ciśnienia obliczonego i zmierzonego przestają się pokrywać w miarę upływu czasu od chwili otwarcia obudowy (dla przedstawionego eksperymentu po czasie 2,3 ms). Dalsza próba porównywania obu wielkości nie daje miarodajnych wyników. Na skutek otwarcia obudowy puszki łączeniowej, ciśnienie w jej wnętrzu zaczyna się obniżać. Gdyby nie doszło do rozszczelnienia obudowy puszki łączeniowej, obliczeniowy przyrost ciśnienia może osiągnąć wartość 94 kPa.



Rys. 16. Przebiegi czasowe zakłócenia łukowego w obwodzie bez łącznika hybrydowego: a) napięcie zasilania u_{power} , napięcie łuku u_a , prąd łuku i_a , b) zmierzone p_a i obliczonego p_{obl} ciśnienia wewnątrz puszkii łączeniowej, c) energia e_a i moc q_a pobierana przez łuk [Publikacja III, fig. 4].

Dla tych samych warunków badawczych przeprowadzono eksperyment porównawczy, w którym wykorzystano łącznik hybrydowy jako eliminator łuku elektrycznego. Przebiegi istotnych wielkości pomiarowych pokazuje rysunek 17.



Rys. 17. Przebiegi czasowe zakłócenia łukowego w obwodzie z łącznikiem hybrydowym: a) napięcie na łuku u_a , prąd w gałęzi łuku i_a , prąd w gałęzi eliminatora łuku i_r , impuls detekcji błysku łuku imp_{wyz} , b) zmierzone p_a i obliczone p_{obl} ciśnienie wewnątrz puszkii instalacyjnej, c) moc pobierana przez łuk q_a i energia e_a wydzielana w łuku [Publikacja III, fig. 12].

Na rysunku 17b przedstawiono przyrost ciśnienia zmierzonego p_a i obliczonego p_{obl} wewnątrz puszki instalacyjnej, w której doszło do zapłonu łuku. Podczas przepływu prądu w obwodzie (chwila $t_1 = 0$ ms) następuje zapłon łuku elektrycznego. W chwili $t_2 = 0,05$ ms następuje detekcja błysku, a w chwili $t_3 = 0,69$ ms zaczyna przewodzić bocznikujący układ łącznika hybrydowego. Od momentu pojawienia się łuku do momentu jego całkowitego zgaszenia mija czas łukowy $t_a = 0,9$ ms. W trakcie trwania eksperymentu nie stwierdzono rozszczelnienia puszki instalacyjnej.

Przyrost zmierzonego ciśnienia Δp_a wewnątrz zamkniętej obudowy puszki instalacyjnej, od momentu zapłonu łuku ($t_1 = 0$ ms) do całkowitego przejścia przewodzenia przez bocznikujący układ łącznika hybrydowego ($t_4 = 0,9$ ms), jest współliniowy z przyrostem wartości obliczonej Δp_{obl} (rysunek 17b). W chwili całkowitego przejścia przewodzenia przez łącznik i zgaszenia łuku elektrycznego, wartość zmierzonego ciśnienia wynosi $p_a = 9,7$ kPa, a obliczonego $p_{obl} = 8,1$ kPa. Zgaszony łuk elektryczny nie powoduje dalszego wzrostu ciśnienia wewnątrz puszki instalacyjnej. W układzie bez łącznika hybrydowego, obliczona wartość ciśnienia wskazywała przyrosty do 94 kPa. Zastosowanie szybkiego eliminatora łuku, w postaci łącznika hybrydowego, powoduje prawie dwunastokrotne zmniejszenie spodziewanego ciśnienia wewnątrz zamkniętej puszki łączeniowej.

Reasumując, zastosowanie łącznika hybrydowego znacząco skraca czas palenia się łuku elektrycznego, co w konsekwencji zmniejsza energię łuku i ciśnienie wewnątrz obudowy. Brak rozszczelnienia obudowy podczas palenia się łuku, skrócenie czasu łukowego oraz zmniejszenie energii powodują:

- ograniczenie ubytku materiału elektrodowego,
- ograniczenie przyrostu temperatury wewnątrz obudowy,
- brak wyrzutu do otoczenia plazmy, gorących gazów, dymu i kropli metali,
- brak ogłuszającej fali dźwiękowej.

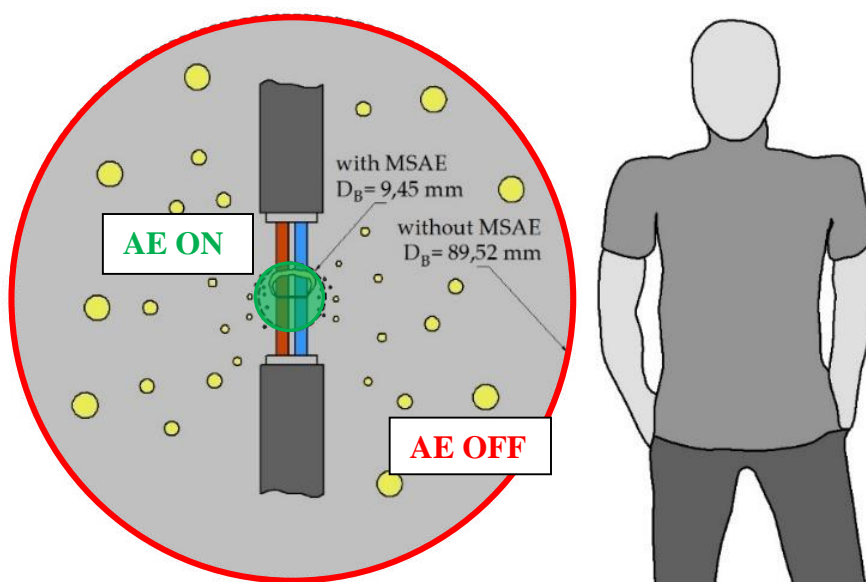
Poruszone zagadnienia w sposób szczegółowy zostały opisane i przedstawione w **Publikacji III**.

6.5. Ograniczenie strefy rażenia łukiem elektrycznym

Kategoria zagrożenia rażeniem łukiem elektrycznym jest ściśle związana z wartością energii łuku. Istnieje kilka metod [25-27] za pomocą których można oszacować wartość tej energii oraz innych parametrów charakteryzujących skutki łuku w miejscu analizy. Jedną z najbardziej uniwersalnych jest metoda opisana w opracowaniu “IEEE 1584 Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations” [28-30]. Wynikające z tego opracowania kategorie (od 0 do 4) pozwalają zaproponować środki ochrony pracownika, adekwatne do poziomu zagrożenia. Opierając się na metodzie IEEE 1584, można również obliczyć odległość granicy strefy rażenia łukiem elektrycznym.

W celu określenia wpływu zadziałania eliminatora łuku na kategorię zagrożenia i strefę rażenia przeprowadzono eksperymenty w układzie zbliżonym do przedstawionego na rysunku 6 [Publikacja III]. Założono, że dla przeprowadzonego eksperymentu układ zasilany będzie jednofazowo napięciem 230 V, prąd łuku zostanie ograniczony do 1,3 kA, a odległość części ciała osoby od źródła łuku wynosi 50 mm (osoba znajduje się w bezpośrednim kontakcie z puszką instalacyjną, np. wykonując czynności sprawdzające). Dla tak przyjętych założeń i obwodu niewyposażonego w układ łącznika hybrydowego (wzrost MSAE) zasięg strefy rażenia D_B sięga prawie 90 mm od miejsca zapłonu łuku elektrycznego. Zastosowanie zabezpieczenia łukoochronnego (MSAE) w postaci łącznika hybrydowego znacznie skraca zasięg niebezpiecznej strefy rażenia HRC do zaledwie 9,45 mm. Zastosowanie układu łącznika hybrydowego zmniejszyło prawie dziesięciokrotnie strefę możliwego zagrożenia ze strony łuku elektrycznego dla personelu technicznego. Na rysunku 18 zobrazowano zasięg niebezpiecznej strefy rażenia podczas wyładowania łukowego w układzie bez i z zainstalowanym łącznikiem hybrydowym.

Dla rozpatrywanego przypadku, analiza zagrożenia w układzie, w którym doszło do zakłócenia łukowego wyposażonego w urządzenie łukoochronne (łącznik hybrydowy), wykazała, że mieści się on w kategorii zagrożenia 0. Dla tej kategorii, ze względu na znikomą wartość energii łuku nie ma konieczności stosowania specjalistycznych środków ochrony osobistej z wyjątkiem rękawic i okularów ochronnych. Brak eliminatora łuku, wydłużenie czasu palenia i wzrost energii łuku powoduje podwyższenie kategorii do 1. Dla tej kategorii zagrożenia konieczne jest stosowanie odzieży odpornej na łuk elektryczny, specjalnych skórzanych rękawic i ochraniaczy na nogi oraz używanie hełmów ochronnych z przyłbicą.



Rys. 18. Strefa rażenia awaryjnym łukiem elektrycznym w obwodzie z i bez MSAE (amplituda prądu łuku 1300 A) [Publikacja III, fig. 14].

W tabeli 3 (dla porównania) oprócz obliczonych wartości strefy rażenia D_B i kategorii zagrożenia HRC dla prądu łuku 1,3 kA (wg. IEEE 1584), przedstawiono spodziewane parametry obliczeniowe D_B i HRC dla prądów 10 i 20 kA. Dla tak dużych amplitud prądów (10 i 20 kA) w obwodzie bez łącznika hybrydowego, rozwijające się w czasie zakłócenie łukowe, powoduje przekroczenie bezpiecznej wartości energii łuku (wg. IEEE 1584 [28-30]) w wyniku czego niedopuszczalne jest przebywanie personelu technicznego w obszarze urządzenia, w którym doszło do zapłonu łuku elektrycznego. Natomiast dla tych samych wartości prądów (10 i 20 kA), szybkie zadziałanie łącznika hybrydowego (rzędu 1 ms) powoduje znaczne ograniczenie energii łuku, a wartość kategorii zagrożenia pozwala na dobranie odpowiedniego ubrania ochronnego i wyznaczenie bezpiecznej strefy poza strefą rażenia.

Wyniki badań i pełną analizę przedstawiono w **Publikacji III**.

Tab. 3. Spodziewane parametry obliczeniowe (wg. IEEE 1584) stref i kategorii zagrożenia trzech wartości prądu łuku [**Publikacja III, tab. 6**].

t_a [s]	$I_a = 1,3$ kA				$I_a = 10$ kA				$I_a = 20$ kA			
	D_B [mm]		HRC		D_B [mm]		HRC		D_B [mm]		HRC	
	MSAE ON	MSAE OFF	MSAE ON	MSAE OFF	MSAE ON	MSAE OFF	MSAE ON	MSAE OFF	MSAE ON	MSAE OFF	MSAE ON	MSAE OFF
0,001	22,5	22,5	0	0	67,7	67,7	1	1	98,4	98,4	2	2
0,005	NO ARC FAULT	50,2	NO ARC FAULT	1	NO ARC FAULT	151,3	NO ARC FAULT	3	NO ARC FAULT	220,0	NO ARC FAULT	3
0,010		71,0		1		214,0		3		311,2		
0,020		100,4		2		302,6		DANGEROUS!		440,1		
0,030		123,0		2		370,6		DANGEROUS!		539,0		
0,040		142,0		3		427,9		DANGEROUS!		622,4		
0,050		158,8		3		478,4		DANGEROUS!		695,8		
0,060		174,0		3		524,1		DANGEROUS!		762,3		
0,070		187,9		3		566,1		DANGEROUS!		823,3		
0,080		200,9		3		605,2		DANGEROUS!		880,2		
0,090		213,1		3		641,9		DANGEROUS!		933,6		
0,100	224,6	3	676,6	DANGEROUS!	984,07							

7. WNIOSKI I PRAKTYCZNE ZNACZENIE PRACY DOKTORSKIEJ

W rozprawie doktorskiej zostały przedstawione procedury i efekty eliminacji zagrożeń powodowanych pojawieniem się w obwodach zasilających zdarzeń awaryjnych w postaci zapalenia się łuku elektrycznego lub zaistnienia stanów zwarciovych. Do zbadania poprawności idei oraz postawionych założeń, wynikających z tematu i hipotezy badawczej rozprawy, wykorzystano autorski projekt łącznika hybrydowego pracującego w roli zwiernika. Jest to urządzenie umożliwiającym bardzo szybkie z bocznikowanie obwodu elektrycznego dotkniętego zakłóceniem łukowym, mające na celu stworzenie alternatywnej – uprzywilejowanej drogi dla przepływu prądu. Efektem tego jest bardzo szybka eliminacja powstałego łuku elektrycznego lub przepływu prądu zwarciovego w dotkniętym awarią obwodzie i zmniejszenie powstałych szkód na skutek rozwijającego się stanu awaryjnego.

Badania eksperymentalne z wykorzystaniem łącznika hybrydowego wykazały, że jest możliwe:

- gaszenie i skrócenie czasu palenia się łuku elektrycznego,
- zmniejszenie ilości energii wydzielanej w łuku,
- ograniczanie oddziaływań elektrodinamicznych prądów zwarciovych,
- ograniczanie erozji torów prądowych poddanych działaniu łuku elektrycznego,
- ograniczenie zagrożeń powodowanych akustycznym oddziaływaniem łuku elektrycznego,
- ograniczenie ciśnienia gazów wewnątrz zamkniętych obudów urządzeń elektroenergetycznych,
- znaczne skrócenie czasu oddziaływania skutków cieplnych w zabezpieczonym obwodzie,
- zmniejszenie niebezpiecznej strefy rażenia łukiem elektrycznym.

Przedstawione przez doktoranta wyniki badań i obliczeń w cyklu publikacji, dotyczących eliminacji łuku elektrycznego i ograniczania skutków zwarciovych z wykorzystaniem łączników hybrydowych, potwierdzają skuteczność działania autorskiej konstrukcji łącznika hybrydowego. Zaproponowane urządzenie w rozwiązaniu przemysłowym, może przyczynić się do ochrony zdrowia lub życia osób narażonych na działanie łuku elektrycznego, ale również w znacznym stopniu zminimalizuje straty materialne, wynikające z uszkodzeń powodowanych przepływem prądu zwarciovego lub zapłonem łuku elektrycznego.

Zrealizowany cel i uzyskane wyniki badań pozwoliły na **potwierdzenie postawionej hipotezy badawczej**.

Przy aktualnych cenach i dostępności komponentów, opracowana konstrukcja wielkopięradowego łącznika hybrydowego jest konstrukcją dość drogą. Potencjalne obszary jej wykorzystania będą zatem dotyczyły:

- obiektów o znaczeniu strategicznym (np. militarnym),
- obiektów o znacznej wartości materialnej,

- rozwijającej się gałęzi pojazdów elektrycznych,
- układów trakcyjnych
- obiektów, w których można spodziewać się podwyższonego ryzyka eksploatacyjnego (górnictwo).

W zabezpieczeniach obwodów prądu stałego przedstawione rozwiązanie można uprościć do wersji unipolarnej. Skuteczność działania takiego układu, w tym także zdolność łączeniowa i szybkość działania będą celem dalszych prac badawczych.

LITERATURA

- [1] Kaźmierczak M.: „Zwarcia łukowe – doświadczenia eksploatacyjne w polskiej energetyce zawodowej i przemysłowej”, *Elektroenergetyka – współczesność i rozwój*, nr 2 (8), 2011.
- [2] Volger J.: „Arc fault protection as seen by employers’ liability insurance associations”, *The arc-fault demonstration in the head office of the Moeller GmbH*, Bonn 2008.
- [3] ABB, Protection against electric arc Integration between Arc Guard System™ TVOC-2 and SACE Emax 2, online:
https://library.e.abb.com/public/fc33af751d664dad932e9c7344cffe0/1SDC007407G0203_revB_Protection%20against%20electric%20arc%20.pdf , available 17.02.2022r.
- [4] Lu, Q.; Ye, Z.; Zhang, Y.; Wang, T.; Gao, Z. Analysis of the Effects of Arc Volt–Ampere Characteristics on Different Loads and Detection Methods of Series Arc Faults. *Energies* 2019, 12, 323, doi:10.3390/en12020323.
- [5] Yin, Z.; Wang, L.; Zhang, Y.; Gao, Y. A Novel Arc Fault Detection Method Integrated Random Forest, Improved Multi-Scale Permutation Entropy and Wavelet Packet Transform. *Electronics* 2019, 8, 396, doi:10.3390/electronics8040396.
- [6] Paul, S.; Jewell, W. Optimization Methodology for Minimizing the Arc Flash Incident Energy; 2018; p. 6;.
- [7] J.C. Das: „Power System Analysis - Short-Circuit Load Flow and Harmonics”, <https://doi.org/10.1201/9780203908952>
- [8] Kasikci, Ismail. Short circuits in power systems: A practical guide to IEC 60909-0. John Wiley & Sons, 2018.
- [9] Tleis, Nasser. Power systems modelling and fault analysis: theory and practice. Elsevier, 2007.
- [10] H.B. Land, C.L Eddins, J.M. Klimek, 2004, “Evolution of Arc Fault Protection Technology at APL”, *Johns Hopkins APL Technical Digest*, Volume 25, Number 2, 2004.

- [11] Kaźmierczak M.: „Zwarcia łukowe – doświadczenia eksploatacyjne w polskiej energetyce zawodowej i przemysłowej”, *Elektroenergetyka – współczesność i rozwój*, nr 2 (8), 2011.
- [12] Volger J.: „Arc fault protection as seen by employers’ liability insurance associations”, *The arc-fault demonstration in the head office of the Moeller GmbH, Bonn* 2008.
- [13] Szadkowski, M., Warachim, A., Dekarz, K., „Minimalizacja skutków zwarć łukowych w stacjach wewnętrznych SN”, *Energetyka*, 2015, nr 12, str. 791—797
- [14] PA Scarpino, A. Reatti i F. Grasso, „AC Arc Flash Analysis: a new derivation method”, *2018 AEIT International Annual Conference*, 2018, s. 1-4, doi: 10.23919/AEIT.2018.8577341.
- [15] Kumpulainen, Lauri & Dahl, Samuel. (2009). Selective arc-flash protection. 1 - 4. 10.1049/cp.2009.0900.
- [16] Ghulam Amjad Hussain, „Methods for Arc-Flash Prediction in Medium Voltage and Low Voltage Switchgear”, *Aalto University publication series DOCTORAL DISSERTATIONS 221/2015*
- [17] R.A. Jones, D.P. Liggett, M. Capelli-Schellpfeffer, T. Macalady, L.F. Saunders, R.E., Downey, B. McClung, A., Smith, S., Jamil, V. Saporita, 2000, “Staged tests increase awareness of arc-flash hazards in electrical equipment”, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. 36, No 2, March/April 2000.
- [18] T. Dugan, 2007, “Reducing the arc flash hazard”, *IEEE Industry Applications Magazine*, p. 51-58, May/June 2007.
- [19] J. A. Kay, L. Kumpulainen, „Maximizing Protection by Minimizing Arcing Times in Medium -Voltage Systems”, *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 49, no. 4, july/august 2013
- [20] Ghulam Amjad Hussain, „Methods for Arc-Flash Prediction in Medium Voltage and Low Voltage Switchgear”, *Aalto University publication series DOCTORAL DISSERTATIONS 221/2015*
- [21] J. Turowski, „Elektrodynamika Techniczna”. WN-T, Warszawa 1993
- [22] S. Kulas, „Tory prądowe i układy zestykowe, OWPW, Warszawa 2008
- [23] Królikowski C.: *Inżynieria łączenia obwodów elektrycznych wielkiej mocy. WPP*, Poznań 1998.
- [24] Bohdan Koch, Jan Maksymiuk, „Łukoodporność rozdzielnic osłoniętych i symulacja zwarć łukowych”, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2007.
- [25] Mohla, D.; Lee, W.; Phillips, J.; Marroquin, A. Introduction to IEEE Standard. 1584 IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations- 2018 Edition. In *Proceedings of the 2019*

IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC); September 2019; pp. 1–12.

[26] Mohla, D.; Lee, W.-J.; Phillips, J.; Marroquin, A. Introduction to IEEE Standard 1584: Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, 2018 Edition. *IEEE Industry Applications Magazine* 2020, 26, 64–76, doi:10.1109/MIAS.2020.2982574.

[27] Gammon, T.; Matthews, J. Conventional and Recommended Arc Power and Energy Calculations and Arc Damage Assessment. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2003, 39, 594–599, doi:10.1109/TIA.2003.811775.

[28] IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. IEEE Std 1584-2018 (Revision of IEEE Std 1584-2002) 2018, 1–134, doi:10.1109/IEEESTD.2018.8563139.

[29] IEEE 1584-2018 - IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations Available online: <https://standards.ieee.org/standard/1584-2018.html> (accessed on 17 January 2021).

[30] Mohla, D.; Lee, W.-J.; Phillips, J.; Marroquin, A. Introduction to IEEE Standard 1584: Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations, 2018 Edition. *IEEE Industry Applications Magazine* 2020, 26, 64–76, doi:10.1109/MIAS.2020.2982574.