

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej



mgr inż. Piotr Oramus

**Badania nad ograniczeniem łuku elektrycznego
w łącznikach elektroenergetycznych niskiego napięcia**

Researches on Limitation of Electric Arc in Low Voltage Switches

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Promotor: dr hab. inż. Marek Florkowski

Kraków, 2017

SPIS TREŚCI

1	WPROWADZENIE.....	3
2	METODY OGRANICZAJĄCE ENERGIĘ ŁUKU WRAZ Z WYBRANYMI WYNIKAMI BADAŃ.....	7
2.1	CZASOWA KONTROLA NAPĘDU STYKÓW ŁĄCZNIKA	7
2.2	DOŁĄCZANIE PASYWNYCH ELEMENTÓW RÓWNOLEGLE DO ŁĄCZNIKA	9
2.3	ŁĄCZENIE HYBRYDOWE	12
3	WYNIKI Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ DLA OGRANICZANIA EROZJI ŁUKOWEJ.....	14
4	PODSUMOWANIE.....	18
5	WYBRANA LITERATURA	21

1 Wprowadzenie

Problematyka pracy doktorskiej związana jest z zagadnieniami ograniczania łuku elektrycznego w łącznikach elektroenergetycznych niskiego napięcia. Jest to aktualny problem naukowy w projektowaniu układów łączeniowych nowej generacji o zwiększonej niezawodności.

Praca ma charakter interdyscyplinarny i obejmuje zarówno badania elektryczne nad ograniczaniem energii łuku elektrycznego w łącznikach niskiego napięcia, jak również badania materiałowe nad ograniczaniem erozji łukowej powierzchni styków badanych łączników. Badania elektryczne zostały przeprowadzone dla ograniczania energii łuku elektrycznego zarówno za pomocą pasywnych elementów dołączonych równolegle do stycznika, jak również za pomocą układu hybrydowego, którego konstrukcja została oparta o energoelektroniczne elementy, umożliwiając tym samym przeprowadzenie komutacji łączeniowego prądu do półprzewodnikowej gałęzi w chwili zapłonu łuku elektrycznego. W toku przeprowadzonych badań, łączenie hybrydowe okazało się być najskuteczniejszym sposobem dla ograniczania energii łuku i z tego powodu metoda ta została wybrana do przeprowadzenia badań nad ograniczaniem erozji łukowej. W dobie ciągłego rozwoju energoelektroniki, przydatność wyników badań dla ograniczania niekorzystnych zjawisk związanych ze skutkami niekorzystnego oddziaływania łuku elektrycznego na elementy konstrukcji łączników mechanicznych wydaje się być szczególnie istotna i może być wykorzystana do projektowania doskonalszych tzw. konstrukcji hybrydowych, czyli łączników mechanicznych połączonych z elementami półprzewodnikowymi.

Teza pracy doktorskiej została sformułowana następująco:

Możliwe jest ograniczenie łuku elektrycznego oraz erozji łukowej w łącznikach elektrycznych poprzez zastosowanie zewnętrznych układów służących do komutacji prądowej oraz do synchronicznego wyłączania prądu. Istotą pracy jest przedstawienie ilościowego i jakościowego wpływu stosowania różnych metod ograniczających łuk elektryczny w przerwie międzystykowej łącznika, podczas operacji przerywania prądu.

Thesis: Limitation of electric arc and electric arc erosion in electric switches is possible by application of external systems to current commutation, as well as, through application of system for controlled-time current interruption. The aim of this research paper is to present qualitative and quantitative influence of various methods for limitation of electric arc burning between contacts of LV electric relay during current interruption process.

Łuk elektryczny towarzyszący operacjom łączeniowym przeprowadzanym w mechanicznych łącznikach elektroenergetycznych definiowany jest jako utrzymujący się w medium gaszeniowym kanał plazmy pomiędzy stykami operowanego łącznika. Podczas operacji przerywania prądu, tuż po rozejściu się styków operowanego łącznika mechanicznego, energia zgromadzona w indukcyjności obwodu wymusza przepływ prądu przez medium gaszeniowe w postaci łuku elektrycznego, tworząc tym samym dogodne warunki do jej rozładowania. W trakcie otwierania styków, tuż przed momentem utraty ich styczności, styki połączone są ze sobą jedynie za pośrednictwem niewielkiej powierzchni. W konsekwencji prowadzi to do powstania lokalnie dużej gęstości prądu przepływającego przez zestyk, co w efekcie powoduje stopienie części materiału stykowego. W skutek tego, topniejący materiał stykowy praktycznie wybucha, prowadząc do zainicjowanej wylądowania gazowego pomiędzy stykami w formie łuku elektrycznego. W konsekwencji powoduje to wzrost ciśnienia i temperatury w przestrzeni międzystykowej operowanego łącznika. W rozłączanym obwodzie prąd płynie do momentu, gdy łuk elektryczny nie zostanie ugaszony pomiędzy stykami. Można więc stwierdzić, że łuk

elektryczny jest złożonym zjawiskiem, a procesy mu towarzyszące związane są z zagadnieniami elektrycznymi, materiałowymi, mechanicznymi i termicznymi.

Jak wspomniano powyżej, materiał stykowy topi się, a powierzchnia stykowa ulega degradacji wskutek termicznego oddziaływania łuku elektrycznego na styki łącznika – zjawisko to definiowane jest jako erozja łukowa. W warunkach eksploatacyjnych, gdy łącznik wykonuje znaczną liczbę operacji łączeniowych, erozja łukowa ma istotny wpływ na zdolność łączeniową, trwałość i niezawodność działania łącznika. Z uwagi na fakt, iż od poprawnego działania układu stykowego łącznika zależy niezawodność nie tylko samego łącznika, ale także funkcjonowania całych obwodów elektrycznych, w których stosowane są łączniki mechaniczne, styki aparatów łączeniowych powinny być utrzymywane w dobrej kondycji przez cały swój czas eksploatacji. Jest to szczególnie istotne w trakcie trwania stanów zwarciovych, kiedy istnieje prawdopodobieństwo zaspawania zestyków w trakcie przepływu prądów zwarciovych przez układ stykowy ze zdegradowanymi powierzchniami stykowymi. Dlatego, z wyżej wymienionych powodów, ograniczenie energii łuku jest istotnym zagadnieniem i stanowi przedmiot rozprawy doktorskiej.

W pierwszej części pracy doktorskiej przedstawiono podstawy teoretyczne mechanizmu powstawania łuku elektrycznego oraz tworzenia się erozji łukowej w łącznikach niskiego napięcia. Następnie, zaprezentowano metody ograniczania energii łuku wraz z przykładami badań przeprowadzonych w tej dziedzinie. W dalszej części pracy, przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych przez autora nad ograniczaniem energii łuku w zaprojektowanym układzie pomiarowym.

Dla realizacji celu pracy wykonano program badań eksperymentalnych obejmujący długoczasowe cykle oddziaływania łuku elektrycznego na materiał stykowy łączników dla wybranej metody wspomagającej gaszenie łuku elektrycznego. Dokonano porównania efektywności metod pasywnych oraz metody hybrydowej z zastosowaniem elementów energoelektronicznych dla ograniczania łuku elektrycznego, przeprowadzono analizę ograniczania energii łuku dla rozpatrywanych topologii. Pomiary wykonano w indukcyjnym obwodzie prądu przemiennego, w celu porównania ich skuteczności dla dwóch różnych napięć zasilających obwód (12 V oraz 230 V). Badania prowadzone były dla następujących konfiguracji: łączenie synchroniczne z precyzyjnie określoną chwilą separacji styków badanego stycznika, dołączanie pasywnych elementów RC oraz elementów z nieliniową charakterystyką napięciowo-prądową równoległe do stycznika oraz dołączanie aktywnych elementów półprzewodnikowych do styków operowanego łącznika (tzw. łączenie hybrydowe). W dalszej części pracy zaprezentowano wyniki badań materiałowych dla ograniczania erozji łukowej oraz przedstawiono propozycję konfiguracji łączenia hybrydowego, które zostało zidentyfikowane jako metoda dająca najlepsze efekty dla ograniczania energii łuku w rozpatrywanym układzie.

Do oceny skuteczności ograniczania łuku w łączniku wykorzystano zmierzone czasy łukowe oraz obliczone energie łuku elektrycznego dla rozpatrywanych metod. Przeprowadzono także rejestrację dynamiczną układu stykowego badanego stycznika z użyciem szybkiej kamery. W dalszej części pracy przedstawiono wyniki badań morfologicznych powierzchni stykowych przeprowadzonych dla styków wymontowanych z łączników biorących udział w badaniach. W badaniach erozji łukowej wykorzystano styczniki, które wykonały w sumie 200 000 operacji łączeniowych. W celu oceny stopnia erozji powierzchni badanych styków wykorzystano mikroskop optyczny, profilometr, oraz metodę skaningowej mikroskopii elektronowej połączoną z mikroanalizą pozwalającą na identyfikację (powierzchniową i objętościową) pierwiastków

chemicznych wchodzących w skład badanego materiału. Szczegółowy zakres prac przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Zakres prac przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej

Krok 1	Opracowanie stanowiska laboratoryjnego
	Zdefiniowanie funkcjonalności stanowiska laboratoryjnego
	Dobór parametrów elementów wykorzystanych do przeprowadzenia badań
	Zdefiniowanie kolejności łączeniowej dla łączenia hybrydowego
	Zaprojektowanie stanowiska laboratoryjnego
	Zaprojektowanie systemu opartego na mikrokontrolerze do sterowania stanowiskiem
	Instalacja szybkiej kamery
Krok 2	Testy elektryczne przeprowadzone w obwodzie zasilanym ze źródła 12 V
	Przeprowadzenie pomiarów rozłączania prądu dla czasowej kontroli napędu styków łącznika
	Przeprowadzenie pomiarów dla dołączenia pasywnych elementów równolegle do operowanego łącznika
	Przeprowadzenie pomiarów dla łączenia hybrydowego
Krok 3	Testy elektryczne przeprowadzone w obwodzie zasilanym ze źródła 230 V
	Przeprowadzenie pomiarów rozłączania prądu dla czasowej kontroli napędu styków łącznika
	Przeprowadzenie pomiarów dla dołączenia pasywnych elementów równolegle do operowanego łącznika
	Przeprowadzenie pomiarów dla łączenia hybrydowego
	Wykonanie obserwacji ograniczania energii łuku za pośrednictwem szybkiej kamery
Krok 4	Badania materiałowe
	Przeprowadzenie 200 000 operacji rozłączania prądu przez 4 styczniki (badania wykonane na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie)
	Przeprowadzenie obserwacji erozji łukowej
	Obserwacja erozji łukowej za pośrednictwem mikroskopu optycznego
	Pomiary chropowatości powierzchni stykowych przeprowadzone przy pomocy profilometru
	Pomiary przeprowadzone za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej sprzężonej z mikroanalizą pozwalającą na identyfikację pierwiastków chemicznych w powierzchniach stykowych
Krok 5	Analiza wyników pomiarowych
	Analiza wyników testów elektrycznych przeprowadzonych w obwodzie zasilanym 12 V
	Analiza wyników testów elektrycznych przeprowadzonych w obwodzie zasilanym 230 V
	Analiza wyników z testów materiałowych

Wyniki przeprowadzonych badań zostały opublikowane w artykułach naukowych [11-15].
Ogólny zakres rozprawy doktorskiej wraz z wybranymi wynikami badań oraz głównymi
konkluzjami został przedstawiony w niniejszym autoreferacie.

2 Metody ograniczające energię łuku wraz z wybranymi wynikami badań

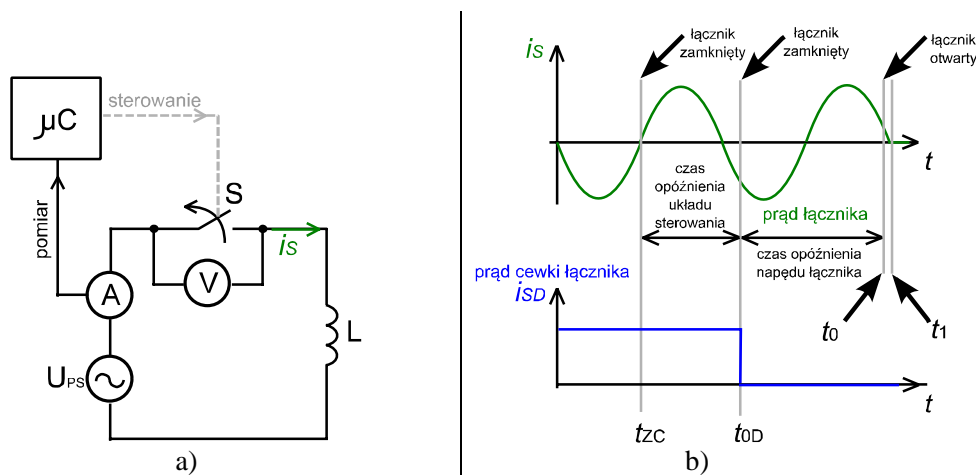
Metody ograniczające energię łuku w łącznikach prądu przemiennego można podzielić na dwie zasadnicze grupy: metody wymagające ingerencji w konstrukcję łącznika (np. zmiana parametrów komory gaszeniowej łącznika, parametrów układu stykowego łącznika, układu napędowego łącznika) oraz metody niewymagające ingerencji w konstrukcję łącznika (związane z zastosowaniem dodatkowych elementów wspomagających gaszenie łuku elektrycznego, np. takich jak: układ do czasowej kontroli napędu styków, dołączanie pasywnych elementów równoległe do łącznika, aplikacja półprzewodnikowych elementów umożliwiających komutację prądu do równoległej gałęzi zewnętrznej w trakcie przerywania prądu, czyli tzw. łączenie hybrydowe).

W ramach rozprawy doktorskiej poddano badaniom metody ograniczające energię łuku, które nie wymagają ingerencji w konstrukcję łącznika, takie jak: czasowa kontrola napędu styków łącznika, dołączanie pasywnych elementów równoległe do łącznika (gask RC oraz pasywne elementy półprzewodnikowe z nieliniową charakterystyką napięciowo-prądową), zastosowanie łączenia hybrydowego. Badania przeprowadzono w indukcyjnym obwodzie prądu przemiennego zasilanym napięciem 12 V oraz 230 V. W trakcie badań mierzono prąd łącznika, prąd komutujący do gałęzi dołączonej równoległe do łącznika, oraz napięcie pomiędzy stykami łącznika. Na podstawie zmierzonych wielkości obliczono moc i energię łuku elektrycznego oraz moc i energię rozpraszaną na równoległej gałęzi dołączonej do łącznika.

2.1 Czasowa kontrola napędu styków łącznika

W obwodzie prądu przemiennego, prąd i napięcie osiąga dwukrotnie wartość zera w trakcie jednego okresu. W momencie, gdy styki łącznika rozchodzą się podczas procesu przerywania prądu, łuk elektryczny zapala się pomiędzy stykami łącznika, a jego ugaszenie może nastąpić w momencie, gdy wartość prądu płynącego w obwodzie osiągnie zero (o ile zapewniona jest odpowiednia zdolność wyłączeniowa łącznika). Energia łuku elektrycznego zależy od rozłączanej mocy oraz od czasu palenia się łuku elektrycznego. Z tego powodu, z punktu widzenia możliwości ograniczania energii łuku elektrycznego, styki łącznika powinny zacząć rozchodzić się tuż przed spodziewanym naturalnym przejściem prądu przez zero – zapewni to możliwość szybkiego ugaszenia łuku elektrycznego (znacząco skróci czas łukowy), a tym samym ograniczy wartość energii łuku elektrycznego. Stosowanie czasowej kontroli rozejścia się styków zapewnia także możliwość ograniczenia przepięć łączeniowych – metoda ta ogranicza zarówno napięcie łuku, jak również wartości maksymalne napięcia powrotnego. Czasowa kontrola napędu łącznika była także przedmiotem badań przedstawionych w literaturze [1, 4, 5, 6].

W celu przeprowadzenia badań, opracowano system umożliwiający kontrolę czasu otwarcia styków łącznika w precyzyjnej chwili czasowej względem wartości chwilowej prądu płynącego w obwodzie. System został zbudowany w oparciu o układ mikroprocesorowy, który na podstawie pomiaru prądu płynącego w obwodzie oraz znanego czasu inercji (czasu inercji mechanicznej łącznika oraz czasu inercji układu sterowania) jest w stanie dokonać czasowej kontroli układu napędowego łącznika, otwierając styki precyzyjnie w określonej chwili czasowej. Uproszczony schemat układu laboratoryjnego wraz z uproszczonym przebiegiem czasowym prądu łącznika oraz prądu cewki napędu łącznika podczas przerywania prądu przedstawiono na Rysunku 1.



Rysunek 1. Uproszczony schemat układu laboratoryjnego (a); uproszczone przebiegi czasowe prądu łącznie i_S oraz prądu cewki napędu łącznie i_{SD} podczas przerywania prądu (b)

Układ pomiarowy przedstawiony na Rysunku 1 został wykorzystany do przeprowadzenia badań w obwodzie zasilonym z napięciowego źródła 12 V oraz 230 V. Wyniki zamieszczone w pracy pozwalają stwierdzić, że czasowa kontrola chwili rozejścia się styków operowanego łącznie jest w stanie znacząco ograniczyć energię łuku elektrycznego.

Z przeprowadzonych badań wynika, że aby zminimalizować energię łuku łączeniowego, najbardziej dogodnie warunki do tego celu panują w chwili, gdy wartość prądu płynącego w obwodzie osiąga naturalne przejście prądu przez zero. Tak więc, aby zminimalizować wartość energii łuku elektrycznego, rozejście styków powinno nastąpić tuż przed spodziewanym przejściem prądu przez zero. Powyższa zależność zachodzi w analizowanym obwodzie niezależnie od napięcia zasilania (zarówno w obwodzie zasilonym napięciem 12 V oraz 230 V). Jednakże, z praktycznego punktu widzenia, do celu zapewnienia najkorzystniejszych warunków dla ograniczania energii łuku, należy również uwzględnić rozrzut inercji mechanicznej operowanego łącznie, który podczas przeprowadzonych badań utrzymywał się na poziomie poniżej 1 ms w stale ustalonych warunkach środowiskowych.

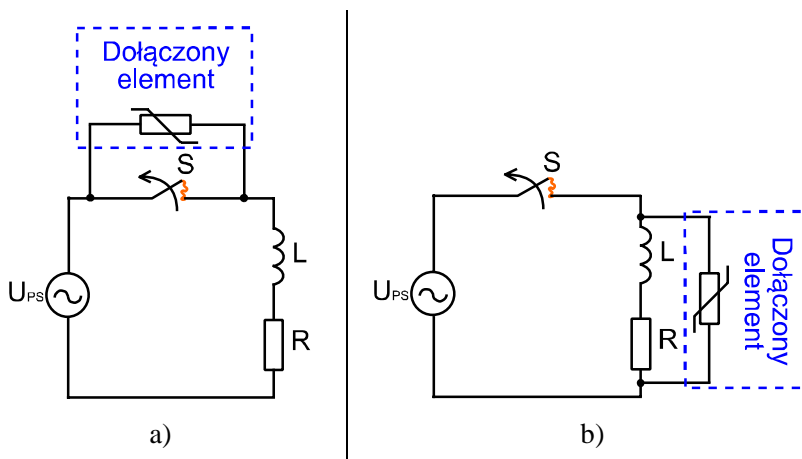
Największa energia łuku została zaobserwowana w obwodzie zasilonym ze źródła napięciowego 230 V w chwili, gdy styki otwierały się w 35° okresu prądowego. Natomiast, w przypadku obwodu zasilonego ze źródła napięciowego 12 V, największa energia łuku została zaobserwowana w chwili, gdy styki otwierały się w 90° okresu prądowego. Różnica pomiędzy obiema sytuacjami wynika z charakterystyk napięciowo-prądowych łuku elektrycznego. W przypadku, gdy prąd rozłączany był w obwodzie indukcyjnym zasilonym przez źródło napięcia 12 V, wówczas po rozejściu się styków operowanego łącznie można było zaobserwować silnie odkształcony przebieg prądu łuku i gwałtownie rosnące napięcie łuku elektrycznego sięgające kilkakrotnie napięcia zasilania. Zjawiska te spowodowane były rezystancją łuku, która szybko osiągała znaczne wartości, prowadząc tym samym do silnej deformacji rozłączonego prądu. Natomiast w sytuacji, gdy prąd rozłączany był w obwodzie indukcyjnym zasilonym przez źródło napięcia 230 V, wówczas przebieg prądu był znacznie mniej odkształcony, a napięcie łuku nie osiągało znacznych wartości w porównaniu do napięcia zasilania obwodu. W tym przypadku wartość rezystancji łuku oraz szybkość narastania rezystancji były znacznie mniejsze, niż w przypadku, gdy obwód zasilony był ze źródła napięciowego 12 V. Dodatkowym negatywnym

efektem zakrzywienia krzywej prądu jest powstawanie znacznych przepięć łączeniowych widocznych w napięciu powrotnym.

Różnica w charakterze rezystancji łuku w obwodzie zasilanym ze źródeł 12 V oraz 230 V związana jest z intensywnością procesów jonizacyjnych zachodzących w przerwie międzystykowej po rozejściu się styków. W obwodzie zasilanym przez źródło napięciowe 12 V, gdy rozłączana moc jest znacznie mniejsza, wartość rezystancji łuku osiąga duże wartości i szybciej narasta, ponieważ procesy jonizacji w przerwie międzystykowej operowanego łącznika przebiegają w sposób mniej intensywny, niż w przypadku rozłączania prądu w obwodzie zasilanym ze źródła 230 V, gdzie rozłączana moc jest znacznie większa. Dlatego też, wartość rezystancji łuku oraz jej szybkość narastania są znacznie mniejsze w obwodzie zasilanym ze źródła napięciowego 230 V, gdzie rozłączona moc jest znacznie większa, a procesy jonizacyjne zachodzące w przerwie międzystykowej łącznika przebiegają bardziej intensywnie, wpływając tym samym na obniżenie rezystancji łuku oraz tempa jej narastania. W praktyce przekłada się to na stosunkowo niewielkie napięcie łuku elektrycznego w odniesieniu do napięcia zasilania (poniżej wartości napięcia zasilania), oraz mniejszą deformację prądu łuku, co również znajduje odzwierciedlenie w mniejszej wartości napięcia powrotnego.

2.2 Dołączanie pasywnych elementów równoległe do łącznika

Innym sposobem umożliwiającym ograniczenie energii łuku elektrycznego jest stosowanie pasywnych elementów (takich jak dławik RC lub pasywne nieliniowe elementy półprzewodnikowe) dołączonych równoległe do operowanego łącznika, lub też dołączonych równoległe do łączonego obciążenia, zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 2.



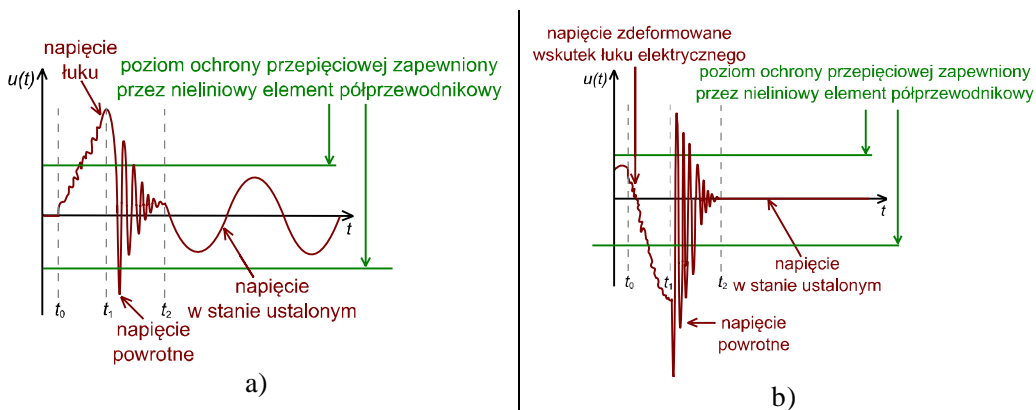
Rysunek 2. Umieszczenie dołączonego elementu w obwodzie: a) element dołączony równoległe do operowanego łącznika, b) element dołączony równoległe do łączonego obciążenia

Dołączając element równoległe do operowanego łącznika (Rysunek 2a) należy wziąć pod uwagę brak pełnej separacji galwanicznej obwodu oraz wielkość prądu upływu, który płynie w obwodzie, gdy operowany łącznik jest otwarty. W sytuacji przedstawionej na Rysunku 2b, dodatkowy prąd upływu płynie przez zastosowany element w czasie, gdy operowany łącznik jest zamknięty. Z uwagi na fakt, iż większą skuteczność ograniczania energii łuku można uzyskać w sytuacji, gdy dodatkowy element dołączony jest możliwie blisko operowanego łącznika, do przeprowadzania badań zdecydowano wybrać sytuację przedstawioną na Rysunku 2a. W trakcie

przeprowadzonych badań w celu ograniczania energii łuku, do operowanego łącznika dołączano zarówno gasik RC, jak również pasywne elementy półprzewodnikowe (warystor, diody Zenera, dwukierunkowy Transil) z nieliniową charakterystyką napięciowo-prądową.

Dołączenie gasika RC równolegle do operowanego łącznika ogranicza stromość napięcia powrotnego dU/dt oraz wartości przepięć łączeniowych podczas przerywania prądu. Stosowanie dwójnika RC do ograniczania stanów łączeniowych było przedmiotem badań przedstawionych w literaturze [3, 9]. Celem stosowania gasików RC równolegle do operowanego łącznika jest stworzenie możliwości rozładowania energii zgromadzonej w indukcyjnych elementach rozłączanego obwodu. W czasie, gdy łuk elektryczny pali się pomiędzy stykami operowanego łącznika, część prądu z gałęzi operowanego łącznika może przekomutować do gałęzi równoległej z gasikiem RC, ograniczając tym samym energię łuku elektrycznego. W literaturze nie istnieje uniwersalny wzór pozwalający dobrać w optymalny sposób wartości rezystancji oraz pojemności gasika RC w rozpatrywanym obwodzie elektrycznym, a dotychczasowe rozważania na ten temat oparte są jedynie na empirycznych zależnościach i wskazówkach. Z tego powodu, w celu dobrania pożądanych wartości rezystancji i pojemności gasika do przeprowadzenia badań, wykonano symulacje komputerowe z zaimplementowanym modelem łuku elektrycznego [14].

Pasywne nieliniowe elementy półprzewodnikowe mogą być stosowane do ograniczania energii łuku elektrycznego w sytuacji, gdy wartość napięcia łuku jest większa od napięcia źródła zasilania. Sytuacja ta została przedstawiona na Rysunku 3.



Rysunek 3. Przebiegi czasowe napięć podczas przerywania prądu: a) nieliniowy element dołączony równolegle do operowanego łącznika, napięcie wzdłuż łącznika, b) nieliniowy element dołączony równolegle do obciążenia, napięcie na obciążeniu

Jak pokazano na Rysunku 3a, dołączenie nieliniowego elementu półprzewodnikowego równolegle do operowanego łącznika może ograniczać wartość napięcia łuku, o ile napięcie łuku przekroczy poziom ochrony przepięciowej zapewniony przez stosowany element półprzewodnikowy. Należy również wspomnieć, iż wartość napięcia powrotnego po ugaszeniu łuku elektrycznego może również zostać ograniczona przez nieliniowy element półprzewodnikowy, poprawiając tym samym parametry gaszeniowe łącznika. Tak więc, stosując pasywne elementy z nieliniową charakterystyką napięciowo-prądową dołączone równolegle do operowanego łącznika, możliwe jest polepszenie warunków łączeniowych operowanego łącznika z dwóch kluczowych powodów. Po pierwsze, tego typu rozwiązanie może spowodować ograniczenie energii łuku elektrycznego poprzez zapewnienie możliwości komutacji prądu do gałęzi równoległej w trakcie palenia się łuku elektrycznego (w czasie pomiędzy t_0 a t_1 , zgodnie z Rysunkiem 3a). Po drugie, możliwe jest również polepszenie warunków elektroizolacyjnych w

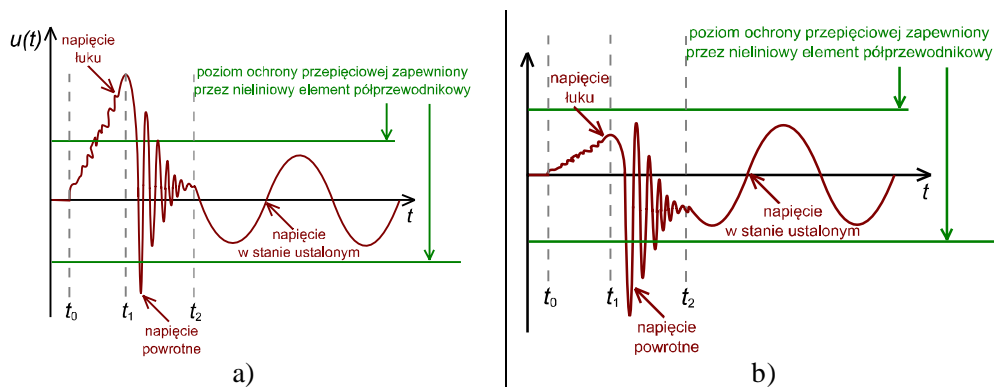
przerwie międzystykowej łącznika, poprzez ograniczenie wartości napięcia powrotnego (w czasie pomiędzy t_1 a t_2 , zgodnie z Rysunkiem 3a), minimalizując tym samym możliwość wystąpienia ponownego zapłonu łuku.

Parametry nieliniowego elementu półprzewodnikowego dołączonego równolegle do operowanego łącznika muszą być tak dobrane, aby zapewnić możliwie mały prąd upływu płynący w obwodzie, kiedy operowany łącznik jest otwarty, a równocześnie zapewnić możliwość przeprowadzenia szybkiej komutacji prądu do gałęzi równoległej w sytuacji, gdy napięcie wzdłuż operowanego łącznika przekracza wartość napięcia źródła zasilania, zapewniając tym samym możliwość ograniczenia energii łuku elektrycznego.

W toku przeprowadzonych badań, następujące elementy były dołączane równolegle do operowanego łącznika: gasik RC, warystor, połączenie diod Zenera oraz dwukierunkowa szybka dioda (Transil). Badania przeprowadzone zostały w obwodzie zasilanym źródłem napięciowym 12 V oraz 230 V.

W obwodzie zasilanym za pomocą źródła napięciowego 12 V, w którym napięcie łuku znacznie przewyższało napięcie źródła zasilania, zaobserwowano zróżnicowaną skuteczność wpływu badanych elementów dołączonych równolegle do operowanego łącznika. Najlepsze efekty dla ograniczania energii łuku otrzymano dla zastosowania odpowiednio: gasika RC, warystora, połączonych diod Zenera, oraz dwukierunkowej diody (Transil).

W obwodzie zasilanym za pomocą źródła napięciowego 230 V, w którym napięcie łuku nie przewyższało wartości napięcia źródła zasilania, jedynie dołączenie gasika RC spowodowało nieznaczne ograniczenie energii łuku, natomiast dołączenie pasywnych elementów półprzewodnikowych nie wpłynęło w żaden sposób na ograniczanie energii łuku elektrycznego. W tym przypadku, dołączenie nieliniowych pasywnych elementów półprzewodnikowych okazało się być pomocne jedynie do ograniczania wartości napięcia powrotnego w rozłączanym obwodzie. Przebiegi napięcia na stykach łącznika podczas przerywania prądu przedstawiono na Rysunku 4 dla obu sytuacji, w których badany obwód zasilony był źródłem napięciowym 12 V oraz 230 V.

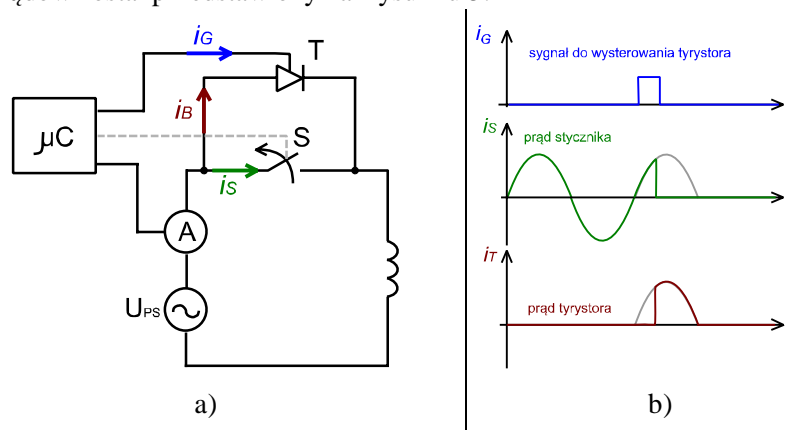


Rysunek 4. Przebiegi czasowe napięcia łukowego podczas przerywania prądu: a) obwód zasilony źródłem napięciowym 12 V, b) obwód zasilony źródłem napięciowym 230 V

Zgodnie z powyższym, należy podkreślić, iż stosowanie pasywnych elementów, takich jak gasiki RC czy pasywne nieliniowe elementy półprzewodnikowe do ograniczania energii łuku powinno być szczegółowo analizowane dla każdego indywidualnego przypadku, ponieważ w zależności od parametrów obwodu, stosowanie wyżej wymienionych elementów może dawać zupełnie różne rezultaty.

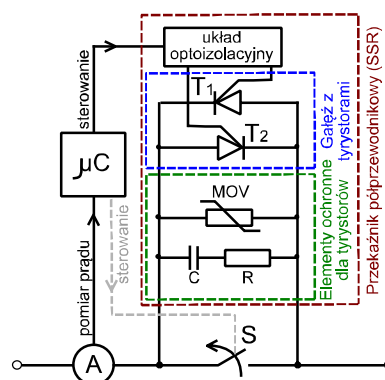
2.3 Łączenie hybrydowe

Ostatnia spośród przanalizowanych w pracy metod ograniczania energii łuku to tzw. łączenie hybrydowe. Metoda ta łączy ze sobą zalety łączników mechanicznych z półprzewodnikowymi, umożliwiając tym samym przeprowadzenie operacji łączeniowej ze znacznie ograniczoną energią łuku elektrycznego. Hybrydowe konstrukcje łączników mechanicznych połączonych z elementami półprzewodnikowymi, pełniące różne funkcje zostały opisane w literaturze [7, 17]. W prezentowanej metodzie, do łącznika mechanicznego dołączany jest łącznik półprzewodnikowy, który umożliwia komutację prądu do równoległej gałęzi podczas operacji rozłączania prądu. Oba łączniki kontrolowane są przy pomocy układu opartego na mikrokontrolerze, który jest w stanie otworzyć styki mechanicznego łącznika w zadanym momencie orazysterować półprzewodnikowy łącznik w taki sposób, aby zapewnić komutację prądu do gałęzi równoległej tak szybko, jak to tylko możliwe. Dzięki temu, energia łuku może być ograniczona do minimum (w praktyce komutacja prądu następuje, gdy tylko napięcie łuku przekracza minimalne napięcie przewodzenia elementu półprzewodnikowego). Uproszczony schemat rozłączonego obwodu podczas łączenia hybrydowego wraz z uproszczonymi przebiegami prądów został przedstawiony na Rysunku 5.



Rysunek 5. Sekwencja łączeniowa podczas łączenia hybrydowego

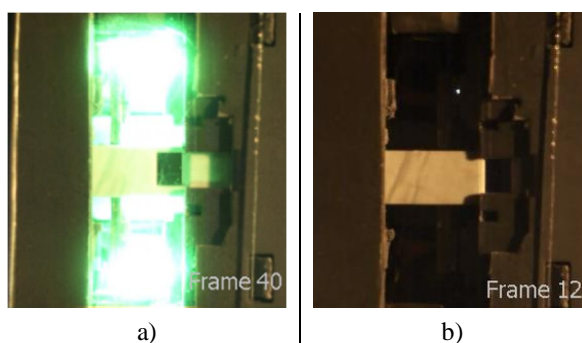
Półprzewodnikowy łącznik użyty do badań został przedstawiony w uproszczeniu na Rysunku 5 w celu zwiększenia czytelności schematu, jednak w praktyce do badań użyto przekaźnika półprzewodnikowego, którego uproszczony schemat przedstawiono na Rysunku 6.



Rysunek 6. Uproszczony schemat przekaźnika półprzewodnikowego wykorzystanego do badań

Badania nad łączeniem hybrydowym przeprowadzono zarówno w obwodzie testowym zasilanym za pomocą źródła napięciowego 12 V oraz 230 V. Niezależnie od wartości źródła zasilania, wyniki ograniczania energii łuku dla łączenia hybrydowego okazały się być porównywalne – zastosowanie łączenia hybrydowego pozwoliło ograniczyć energię łuku elektrycznego o ponad 99% w porównaniu do sytuacji, gdy łącznik operowany był bez żadnych metod ograniczających energię łuku. Można zatem stwierdzić, iż zastosowanie łączenia hybrydowego pozwala skutecznie ograniczyć energię łuku niezależnie od parametrów obwodu.

W celu zaprezentowania skuteczności łączenia hybrydowego dla ograniczania energii łuku, wykonano obserwację układu stykowego operowanego łącznika zainstalowanego w testowym układzie zasilanym ze źródła 230 V dla dwóch sytuacji: kiedy prąd był rozłączany przez operowany łącznik bez żadnych metod wspomagających ograniczanie energii łuku oraz podczas łączenia hybrydowego. W obu przypadkach ruch styków operowanego łącznika rozpoczynał się w 35° okresu prądowego. Klatki z zarejestrowanych filmów przedstawiające moment, w którym łuk elektryczny palił się najintensywniej przedstawiono na Rysunku 7.



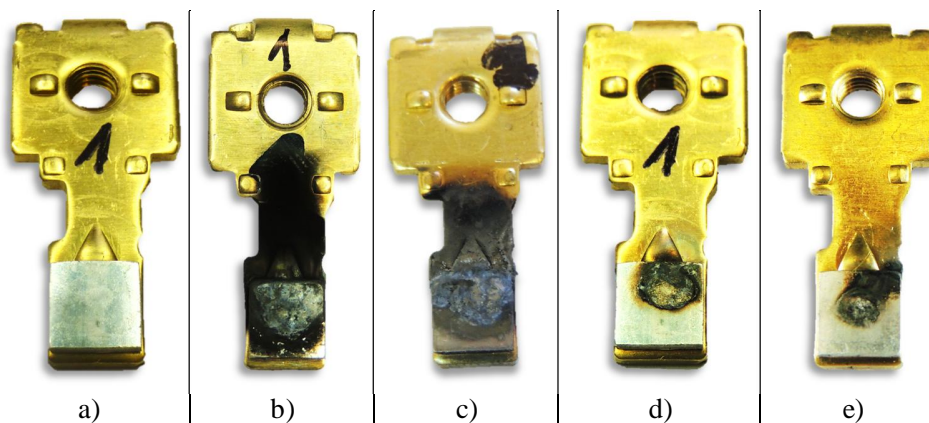
Rysunek 7. Porównanie intensywności łuku elektrycznego w czasie, gdy łuk jest najbardziej intensywny: a) prąd przerywany przez łącznik bez żadnych metod wspomagających ograniczanie energii łuku; b) prąd podczas łączenia hybrydowego

W trakcie przeprowadzonych badań, łączenie hybrydowe zostało zidentyfikowane jako metoda dająca najlepsze rezultaty dla ograniczania energii łuku, niezależnie od parametrów badanego obwodu. Z tego powodu, łączenie hybrydowe zostało wybrane do przeprowadzenia dalszych badań nad ograniczaniem erozji łukowej w łącznikach.

3 Wyniki z przeprowadzonych badań dla ograniczania erozji łukowej

Łączenie hybrydowe zostało wybrane do przeprowadzenia badań nad ograniczaniem erozji łukowej, jako najbardziej skuteczna metoda ograniczania energii łuku elektrycznego spośród wszystkich przanalizowanych metod w toku przeprowadzonych badań nad ograniczaniem energii łuku. W celu zweryfikowania skuteczności zastosowania łączenia hybrydowego na ograniczenie erozji łukowej, przeprowadzono w sumie 200 000 operacji łączeniowych w testowym obwodzie. Do tego celu wykorzystano w sumie 4 styczniki: 2 styczniki przerywające prąd bez żadnych metod wspomagających ograniczanie energii łuku oraz 2 styczniki z zaimplementowanym łącznikiem hybrydowym. Każdy ze styczników wykorzystanych do badań wykonał 50 000 operacji łączeniowych w obwodzie testowym. Erozja łukowa powierzchni styków powstająca podczas przeprowadzania operacji łączeniowych związana była jedynie z łukiem powstającym podczas rozłączania prądu – w celu wyeliminowania łuku elektrycznego powstającego podczas zamykania łącznika (spowodowanego możliwymi odskokami styków), w testowym obwodzie zastosowano dodatkowy łącznik, który załączał prąd w obwodzie dopiero, gdy styki badanego łącznika były zamknięte.

Do oceny erozji łukowej wykorzystano mikroskop optyczny, profilometr oraz skaningowy mikroskop elektronowy wraz z mikroanalizą EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) pozwalająca na identyfikację (zarówno ilościową jak i jakościową) pierwiastków chemicznych wchodzących w skład badanej powierzchni stykowej. Aby zapewnić możliwie dużą energię łuku elektrycznego, badania przeprowadzono w obwodzie zasilonym ze źródła napięciowego 230 V, a styki operowanego łącznika rozdzielane były w 35° okresu prądowego. Stan wybranych powierzchni styków wymontowanych z przebadanych styczników zaprezentowano na Rysunku 8. Każdy z testowanych styczników wykonał 50 000 operacji łączeniowych.

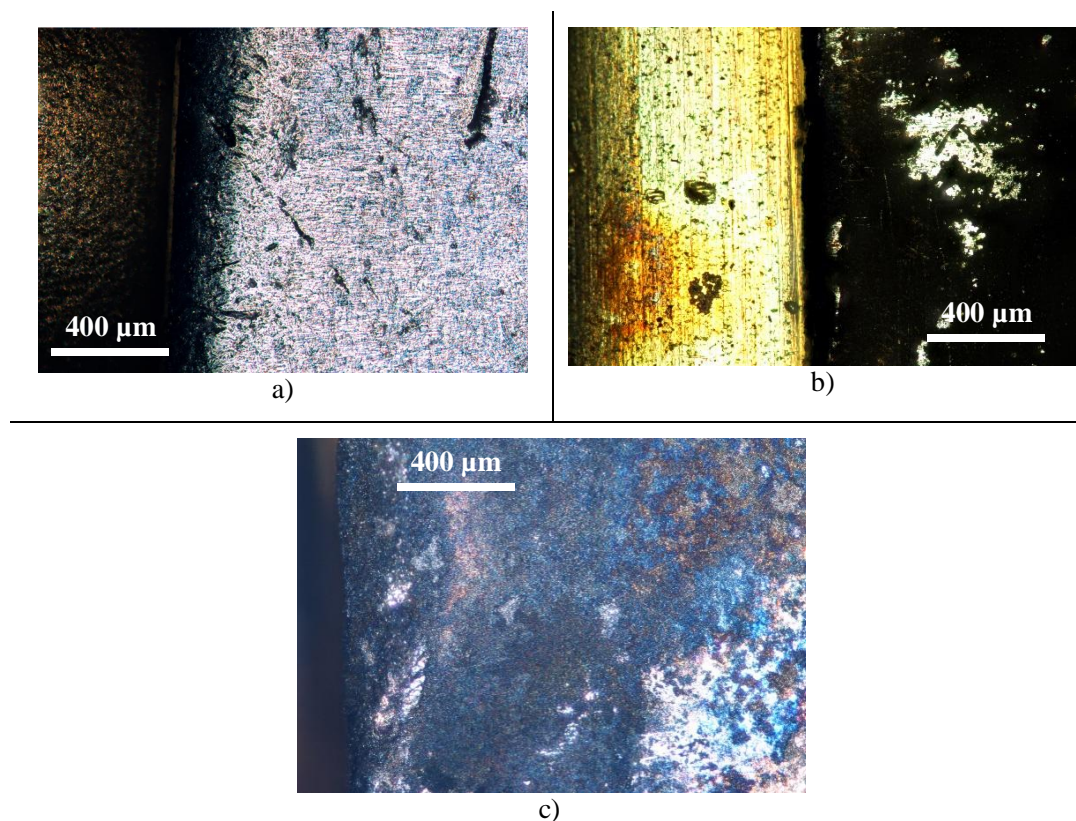


Rysunek 8. Stan powierzchni styków: a) nowy styk; b), c) styki wymontowane ze stycznika, który rozłączał prąd bez żadnych metod wspomagających ograniczanie energii łuku; d), e) styki wymontowane ze stycznika, który rozłączał prąd w konfiguracji łączenia hybrydowego

Jak widać na Rysunku 8b oraz na Rysunku 8c, stan obu styków wymontowanych z dwóch styczników, które rozłączały prąd bez żadnych metod wspomagających ograniczanie energii łuku jest podobny. Również stan powierzchni styków wymontowanych z dwóch styczników, które rozłączały prąd w konfiguracji łączenia hybrydowego jest zbliżony (odpowiednio Rysunek 8c oraz Rysunek 8d). Świadczy to o powtarzalności badanego zjawiska. Stan styków

wymontowanych ze styczników, które rozłączały prąd w konfiguracji łączenia hybrydowego jest wizualnie znacznie lepszy w porównaniu do stanu styków wymontowanych z dwóch styczników, które rozłączały prąd bez żadnych metod wspomagających ograniczanie energii łuku. W przypadku styków wymontowanych ze styczników, które rozłączały prąd w konfiguracji łączenia hybrydowego, można zaobserwować znacznie mniejszy obszar zdegradowanej powierzchni stykowej, mniejszy obszar pokryty warstwą wypalonego materiału stykowego, oraz zauważalnie mniejsze zniekształcenia w powierzchni stykowej spowodowane termicznym działaniem łuku elektrycznego. Można zatem stwierdzić, iż zastosowanie łączenia hybrydowego znacząco ograniczania erozję lukową styków.

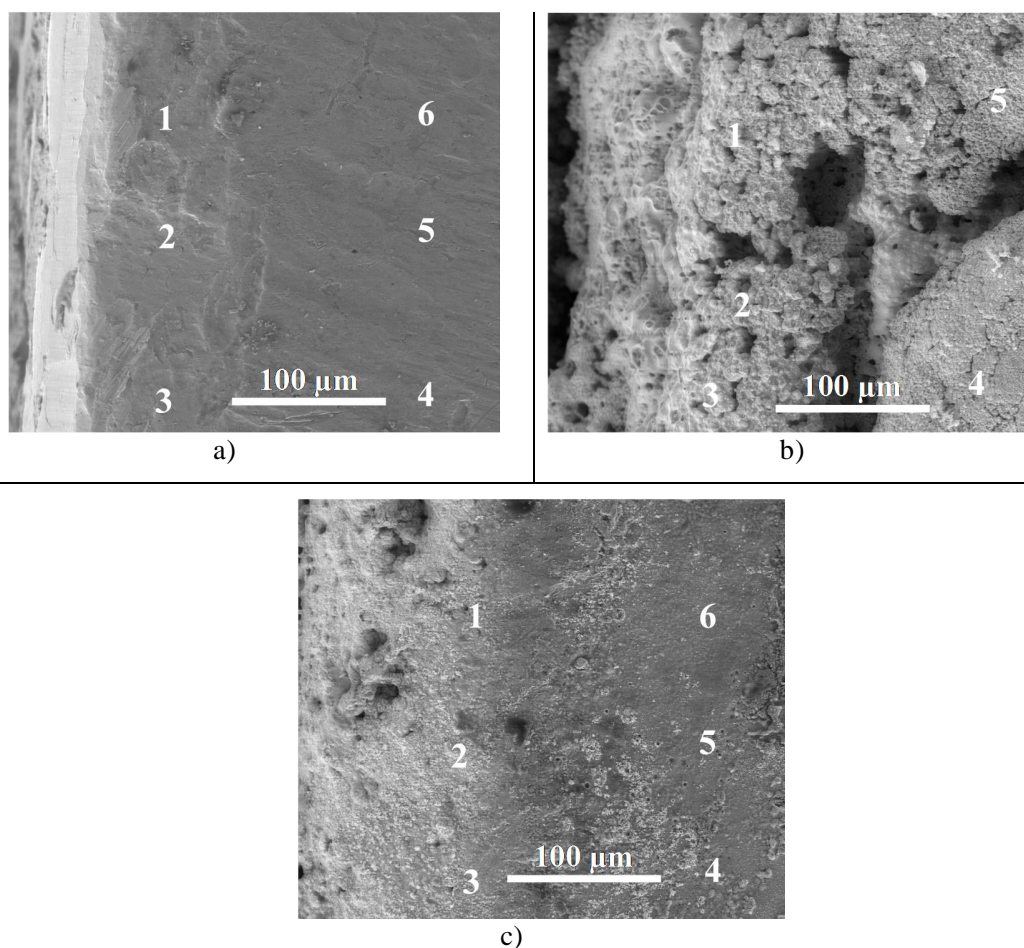
W celu przeprowadzenia dokładniejszych obserwacji analizowanych powierzchni stykowych, do badań wykorzystano mikroskop optyczny. Wybrane zdjęcia z obserwacji mikroskopowych powierzchni nowego styku, powierzchni styków wymontowanego ze stycznika, który rozłączał prąd bez żadnych metod wspomagających ograniczanie energii łuku oraz powierzchni styku wymontowanego ze stycznika, który rozłączał prąd w konfiguracji łączenia hybrydowego przedstawiono na Rysunku 9. Zaprezentowane zdjęcia zostały wykonane tuż przy krawędzi styku, w tym samym miejscu dla wszystkich styków, w miejscu gdzie powierzchnia stykowa okazała się być najbardziej zdegradowana.



Rysunek 9. Obserwacje mikroskopowe powierzchni stykowych: a) powierzchnia nowego styku, b) powierzchnia styków wymontowanego ze stycznika, który rozłączał prąd bez żadnych metod wspomagających ograniczanie energii łuku; c) styk wymontowany ze stycznika, który rozłączał prąd w konfiguracji łączenia hybrydowego

Jak widać na Rysunku 9, obserwacje mikroskopowe pozwalają stwierdzić, iż podobnie jak na Rysunku 8, powierzchnia styku wymontowanego ze stycznego, który rozłączał prąd w konfiguracji łączenia hybrydowego jest znacznie bardziej zdegradowana w porównaniu do powierzchni styku wymontowanego ze stycznego, który rozłączał prąd w konfiguracji łączenia hybrydowego. Mocno wypalona czarna warstwa materiału stykowego jest widoczna na Rysunku 9b, natomiast Rysunek 9c przedstawia obszar styku z licznymi przebarwieniami, jednak nie są one tak znaczne, jak na Rysunku 9b.

W celu przeprowadzenia ilościowej analizy erozji łukowej, badania powtórzone dla analizowanych próbek z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego SEM (Scanning Electron Microscope) wraz z mikroanalizą EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) pozwalająca na identyfikację (zarówno ilościową jak i jakościową) pierwiastków chemicznych wchodzących w skład badanej powierzchni stykowej. Wybrane obrazy uzyskane w toku badań przeprowadzonych za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego przedstawiono na Rysunku 10.



Rysunek 10. Obserwacje ze skaningowego mikroskopu elektronowego powierzchni stykowych: a) powierzchnia nowego styku, b) powierzchnia styków wymontowanego ze stycznego, który rozłączał prąd bez żadnych metod wspomagających ograniczanie energii łuku; c) styk wymontowany ze stycznego, który rozłączał prąd w konfiguracji łączenia hybrydowego

Jak widać na Rysunku 10, obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego powierzchni stykowych pozwalają potwierdzić obserwacje przedstawione na Rysunku 8 oraz na Rysunku 9. Stopień degradacji powierzchni stykowych jest znacznie większy na Rysunku 10b (w obserwowanym obszarze powierzchni stykowej można zaobserwować znaczne pęknięcia oraz wgłębienia w zewnętrznej warstwie materiału stykowego) w porównaniu do Rysunku 10c (gdzie obserwowany obszar powierzchni stykowej jest zdeformowany w nieznacznym stopniu, nie ma również żadnych zauważalnych szerokich pęknięć, ani znacznych wgłębień).

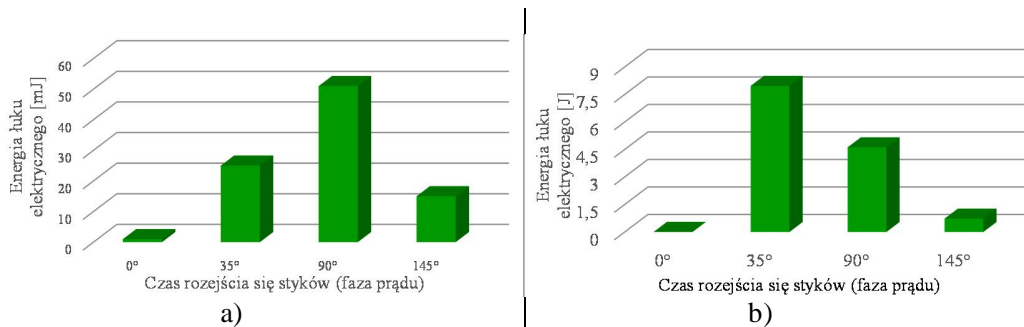
Mikroanaliza składu pierwiastków chemicznych badanych powierzchni stykowych została przeprowadzona w miejscach oznaczonych numerami na Rysunku 10. Na podstawie uzyskanych danych obliczono wartości średnie zawartości pierwiastków w badanych powierzchniach styków. W trakcie przeprowadzonych analiz, zidentyfikowano w powierzchniach stykowych srebro i cynę, oraz w nieznacznych ilościach węgiel, tlen, a także miedź. W toku przeprowadzonych analiz spostrzeżono, iż zawartość srebra w powierzchniach analizowanych próbek maleje wraz ze stopniem degradacji powierzchni stykowych (najwięcej srebra zawierała powierzchnia nowego styku, natomiast najmniej srebra zawarte było w powierzchni styku wymontowanego ze stycznika, który rozłączał prąd bez stosowania żadnych metod wspomagających ograniczanie energii łuku). Obecność cyny zaobserwowano jedynie dla styków, które zostały wymontowane ze styczników po testach łączeniowych, przy czym zawartość cyny zwiększała się wraz ze wzrostem stopnia degradacji powierzchni stykowych. Zawartość węgla nieznacznie rosła wraz ze stopniem zdegradowania powierzchni stykowej, natomiast zawartość tlenu i miedzi była porównywalna w przebadanych próbkach (poza próbką z powierzchnią styku wymontowanego ze stycznika, który rozłączał prąd bez stosowania żadnych metod wspomagających ograniczanie energii łuku, gdzie zawartość tlenu była dwukrotnie większa w porównaniu do pozostałych przebadanych styków, co może świadczyć o zachodzących intensywnie procesach utleniania powierzchni).

Badania analizowanych powierzchni stykowych przeprowadzone za pomocą profilometru również potwierdziły również zróżnicowany stopień degradacji analizowanych próbek. W trakcie badań przeprowadzonych z użyciem profilometru mierzono parametry profili chropowatości analizowanych powierzchni stykowych.

Badania nad rozwojem erozji łukowej w łącznikach mechanicznych były także przedmiotem prac naukowych opublikowanych w literaturze [2, 8, 10, 16, 18, 19].

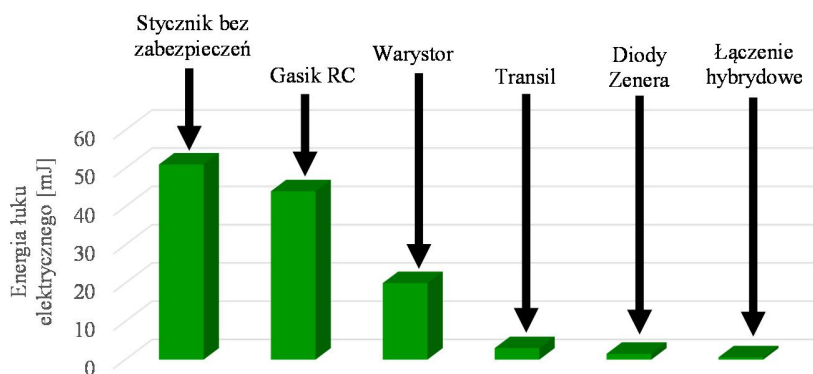
4 Podsumowanie

W toku przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastosowanie łączenia synchronicznego daje dobre rezultaty dla ograniczania energii łuku, jednak z praktycznego punktu widzenia powtarzalność uzyskanych efektów może zależeć od czynników zewnętrznych (np. warunków środowiskowych), w których stycznik pracuje. Szczegółowe wyniki z przeprowadzonych badań przedstawiono w formie wykresów z obliczonymi energiami łuku dla różnych chwil separacji styków na Rysunku 11.

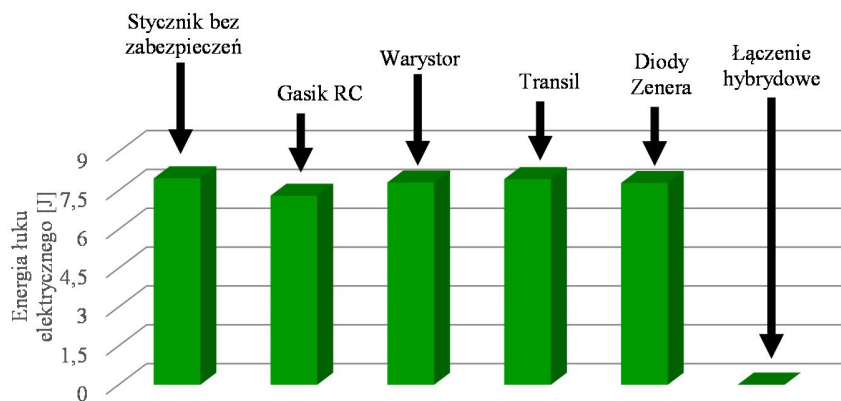


Rysunek 11. Obliczone energie łuku dla różnych chwil się styków: a) obwód testowy zasilony ze źródła 12 V; b) obwód testowy zasilony ze źródła 230 V

W trakcie badań dotyczących dołączania pasywnych elementów równoległe do operowanego łącznika wykazano, że zastosowanie elementów pasywnych do ograniczania energii łuku może dawać różne rezultaty zależne od parametrów rozpatrywanego obwodu. Z tego powodu, zastosowanie pasywnych elementów do ograniczania energii łuku powinno być analizowane w indywidualny sposób dla każdego obwodu, w którym istnieje konieczność ograniczania energii łuku. Szczegółowe wyniki z przeprowadzonych badań przedstawiono w formie wykresów z obliczonymi energiami łuku dla różnych rozpatrywanych metod na Rysunku 12 i 13 dla obwodu testowego zasilanego ze źródła 12 V oraz 230 V.



Rysunek 12. Wyniki z przeprowadzonych badań nad ograniczaniem energii łuku za pomocą dołączonych równoległe do operowanego łącznika pasywnych elementów, obwód testowy zasilony ze źródła 12 V

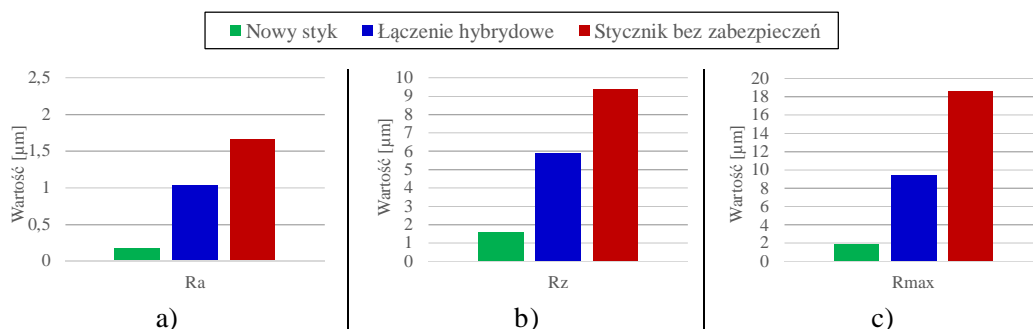


Rysunek 13. Wyniki z przeprowadzonych badań nad ograniczaniem energii łuku za pomocą dołączonych równolegle do operowanego łącznika pasywnych elementów, obwód testowy zasilony ze źródła 230 V

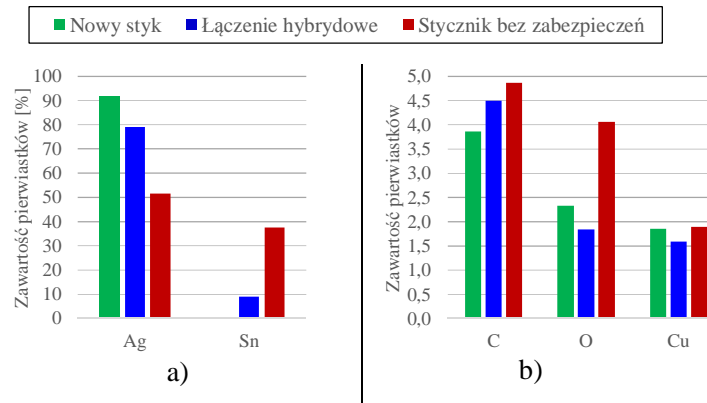
Efektom pracy uzyskanym w oparciu o program wykonanych badań eksperymentalnych oraz analizy morfologiczne powierzchni materiałów stykowych i analizę energii łuku oraz przebiegów czasowych, jest propozycja układu łącznika hybrydowego, zawierającego programowalny moduł sterujący elementami półprzewodnikowymi.

W pracy wykazano, że łączenie hybrydowe pozwala skutecznie ograniczyć energię łuku niezależnie od parametrów obwodu, dlatego też metoda ta została wybrana do dalszych badań nad ograniczaniem erozji łukowej.

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają stwierdzić, że zastosowanie łączenia hybrydowego skutecznie ogranicza erozję łukową. Zostało to potwierdzone zarówno podczas obserwacji mikroskopowych powierzchni styków, jak również w toku analiz profilów chropowatości oraz analiz składu chemicznego zewnętrznych warstw badanych powierzchni styków. Szczegółowe wyniki z przeprowadzonych badań przedstawiono na Rysunku 14 i 15.



Rysunek 14. Zmierzone parametry chropowatości powierzchni: a) Średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii średniej; b) Wysokość chropowatości według dziesięciu punktów profilu; c) Maksymalna wysokość chropowatości w całej długości próbki



Rysunek 15. Średnia zawartość procentowa pierwiastków chemicznych w analizowanych powierzchniach styków

Wyniki pracy mogą zostać wykorzystane w projektowaniu nowych generacji łączników hybrydowych niskiego napięcia oraz w badaniach naukowych.

5 Wybrana literatura

- [1] Bartosik M., Lasota R., Wójcik F.: *Nowa rodzina synchronizowanych wyłączników próżniowych SWT do systemów trakcji kolejowej zasilanych wysokimi napięciami przemiennymi*, Technika Transportu Szynowego 10/2007, pp. 41-52
- [2] Borkowski P.: *Nowoczesne metody badań zestyków elektrycznych*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2013
- [3] Faranda R., Giussani M., Testin G.: *RC filter to protect industrial arc furnace transformers during switching-off*, EE'07 Proceedings of the 2nd IASME/WSEAS international conference on Energy and environment, Portoroz, Slovenia, pp. 146-152, 2007
- [4] Guilin Z., Xi Ch.: *A Novel Synchronous Switch Method Based on Kalman Filter*, International Journal of Future Generation Communication and Networking Vol. 8, No. 2, pp. 33-44, 2015
- [5] Horinouchi K., Tsukima M., Tohya N., Inoue T., Sasao H.: *Synchronous Controlled Switching by Vacuum Circuit Breaker (VCB) with Electromagnetic Operation Mechanism*, IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004
- [6] Kulas S. J.: *Synchronous switching of power systems*, Proceedings of the 2nd IASME / WSEAS International Conference on Energy & Environment (EE'07), Portoroz, Slovenia, pp. 209-211, 2007
- [7] Karady G. G., Heydt G. T.: *Novel concept for medium voltage circuit breakers using microswitches*, IEEE Trans. Power Del., Vol. 21, No. 1, pp. 536–537, 2006
- [8] Ma H., Tian Y., Geng Y., Wang Z.: *Anode Erosion Pattern Caused by blowing Effect in Constricted Vacuum Arcs Subjected to Axial Magnetic Field*, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.: 43 Issue: 8, pp. 2329-2334, 2015
- [9] Maksić M., Matvoz D., Kosmač J., Papič I.: *Circuit Breaker Switching Transients at Arc Furnace Installation*, International Conference on Power Systems Transients (IPST2009) in Kyoto, Japan, pp. 1-6, 2009
- [10] Nikic D., Day A. C.: *Arc erosion of aluminum and titanium in presence of high currents*, 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC), 2013
- [11] Oramus P., Florkowski M.: *Investigation into limitation of electric arc energy in LV switch installed in AC circuit through application of time-controlled contact separation*, International Transactions on Electrical Energy Systems, 2017, Early View, <https://doi.org/10.1002/etep.2400>
- [12] Oramus P., Florkowski M.: *Limitation of Electric Arc Energy in LV Switches During Inductive Current Interruption*, IEEE Transactions on Power Delivery, ISSN: 0885-8977, Volume: 32, Issue: 4, August 2017, pp. 1946-1953
- [13] Oramus P., Florkowski M., Rybak A., Sroka J.: *Investigation into Limitation of Arc Erosion in LV Switches through Application of Hybrid Switching*, IEEE Transactions on Plasma Science, Volume: 45, Issue: 3, March 2017, pp. 446-453
- [14] Oramus P., Chmielewski T., Kuczek T., Florkowski M.: *Simulations of electric arc behavior in hybrid LV switches*, IEEE Conference Publications, Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), June 26-July 1 2016, ISBN: 978-1-5090-5310-0, 2016, pp. 1-5
- [15] Oramus P., Chmielewski T., Kuczek T., Florkowski M.: *Application of Bidirectional Transient Voltage Suppressor for Electric Arc Suppression in LV Switches – Simulation*

- and Laboratory Case Study*, IEEE Conference Publications, Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), June 25-30 2017, ISBN: 978-1-5386-1528-7, pp. 1-7
- [16] Pons F.: *Electrical Contact Material Arc Erosion: Experiments and Modeling Towards the Design of An AgCdO Substitute*, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 2010
- [17] Shukla A., Demetriades D. G.: *A survey on Hybrid Circuit-Breaker Topologies*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, Issue 2, pp. 627-641, 2015
- [18] Zhao L., Li Z., Zhou Y.: *Arc Erosion Characteristics of Nanocrystalline CuCr Contact Material*, 1st International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST), pp. 594-597, 2011
- [19] Zhou X., Cui X., Chen M., Zhai G.: *Evaporation Erosion of Contacts Under Static Arc by Gas Dynamics and Molten Pool Simulation*, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 43, Issue 12, pp. 4149-4160, 2015