

## Bezstykowy hybrydowy ogranicznik prądów zwarciovych

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono budowę bezstykowego hybrydowego ogranicznika prądów zwarciovych. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych z uwzględnieniem zagadnienia jak najkrótszego wyłączenia zwarcia poprzez odpowiedni dobór czasów sterowania tranzystorem IGBT.

**Abstract.** The article discusses the operation and main characteristics of contactless hybrid current limiter (**Contactless hybrid current limiter**). The results from experiments which take into account the fastest short circuit removal by the IGBT's on-time control was presented.

**Słowa kluczowe:** bezpiecznik krótkotopikowy, ogranicznik prądów, tranzystor IGBT, krzywa V

**Keywords:** contactless hybrid current limiter, CHCL, ultrashort fuse, V-curve

### Wstęp

Wraz z rozwojem cywilizacji wzrasta uzależnienie od urządzeń elektrycznych i elektronicznych. Zwiększająca się liczba urządzeń powoduje konieczność zapewnienia odpowiedniej mocy elektrycznej zasilającej. Urządzenia elektroniczne wymagają dostawy energii elektrycznej o określonej jakości, głównie bez zapadów napięcia. Zwiększająca się moc urządzeń skutkuje potrzebą budowy stacji elektroenergetycznych o dużych prądach roboczych i tym samym o dużych wartościach prądów zwarciovych. W przypadku zwarcia awaryjnego obok skutków cieplnych i elektrodynamicznych powstaje zanik napięcia, który będzie się przenoślił na inne obwody systemu elektroenergetycznego. W takim przypadku istotne jest szybkie wyłączenie obwodu powodującego zwarcie. Dotychczasowe rozwiązania opierały się na klasycznym zestyku umieszczonym w różnego rodzaju urządzeniach i środowiskach umożliwiających zgaszenie łuku elektrycznego. Masywny styk przystosowany do przewodzenia znacznych prądów roboczych wymuszał konieczność zastosowania odpowiedniego napędu otwierającego zestyk, a to z kolei wydłużało czas działania całego aparatu – nawet do blisko 100 ms. W takim przypadku aparat ogranicza jedynie skutki cieplne bez ograniczenia skutków elektrodynamicznych.

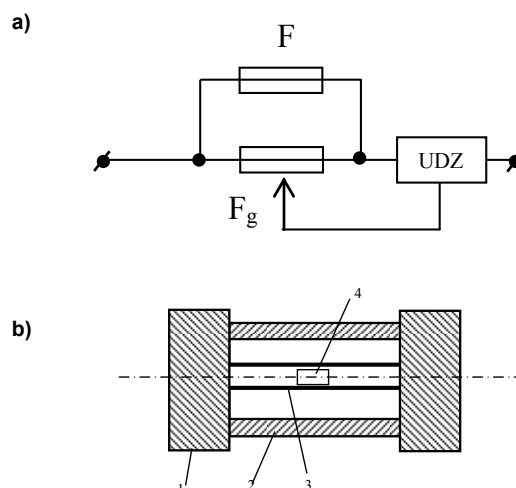
Rozwój elektroniki stwarza możliwość budowy nowych urządzeń elektroenergetycznych dotychczas niemożliwych do skonstruowania. Nowe przyrządy półprzewodnikowe o coraz większych dopuszczalnych parametrach mają zastosowanie w obwodach silnoprądowych. Granicą możliwości stosowania elementów półprzewodnikowych są straty ciepła wytwarzane w czasie przepływu znacznych prądów. Poszukiwanie aparatu o dużej szybkości działania, małych stratach i dużej obciążalności dało wynik w postaci szeregu rozwiązań ograniczników hybrydowych. W przypadku połączenia łącznika zestykowego z elementem półprzewodnikowym, uzyskany w ten sposób wyłącznik hybrydowy łączy w sobie cechy klasycznego wyłącznika (małe straty i duża obciążalność) z szybkością łącznika półprzewodnikowego.

### Koncepcje łączników hybrydowych

Wyłączniki hybrydowe składają się z dwóch głównych równoległych gałęzi: jedna służy do przewodzenia prądów roboczych, a druga służy do chwilowego przejęcia prądu zwarciovego i doprowadzenia do jego wyłączenia. Poniżej przedstawiono przykładowe rozwiązania takich łączników. Niektóre z tych aparatów wymagają stosowania układów detekcji zwarć (UDZ).

Ogranicznik wybuchowy (rys. 1) [1] składa się z toru prądowego o dużym przekroju  $F_g$  oraz bezpiecznika

pomocniczego F służącego do wyłączenia prądu zwarciovego poprzez rozproszenie energii zgromadzonej w obwodzie w cieplnej energii łuku. Zadziałanie przy określonym prądzie znamionowym jest możliwe poprzez układ detekcji prądu zadanego (nastawczego) i następnie po zainicjowaniu ładunku wybuchowego przerywającego tor główny. Po przerwaniu toru głównego następuje przerzut prądu do gałęzi pomocniczej, powodując stopienie topika w bezpieczniku F i ograniczenie prądu zwarciovego.



Rys. 1. Bezpiecznik wybuchowy:

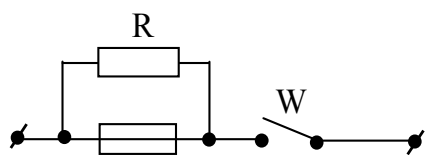
a) schemat układu, b) konstrukcja toru prądowego (1 – zacisk prądowy, 2 – obudowa, 3 – tor prądowy, 4 – materiał wybuchowy).

Ogranicznik z bezpiecznikiem wielokrotnego działania [2] składa się z bezpiecznika PFF, w którym topik wykonano z materiału o niskiej temperaturze topnienia, jak np. sól, umieszczony jest w obudowie wytrzymałej wysokie ciśnienie (rys. 2). Po przekroczeniu prądu granicznego tor główny ulega stopieniu i odparowaniu, a prąd zaczyna płynąć w równoległym rezystorze R i jest pręzerń ograniczony. Po ostygnięciu, tor główny z powrotem staje się przewodzący. Aby zapobiec ponownemu załączeniu uszkodzonego obwodu szeregowo z ogranicznikiem dodano wyłącznik W.

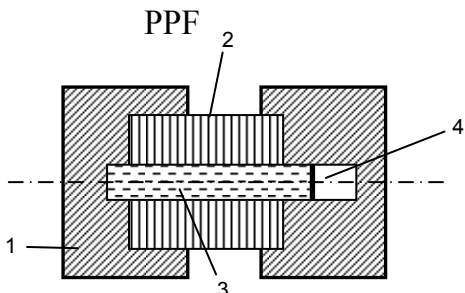
Ogranicznik z bezpiecznikiem dwuścieżkowym (rys. 3) to konstrukcja badana m.in. na Politechnice Gdańskiej w Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych [3]. Aparat stanowią dwa bezpieczniki, jeden krótki o intensywnym chłodzeniu osiowym w kierunku zacisków prądowych i tym samym umożliwiający uzyskanie dużej obciążalności prądowej, oraz drugi bezpiecznik do ograniczenia prądu zwarciovego. Bezpiecznik krótki z

uwagi na małą długość nie posiada wystarczającej zdolności łączeniowej, ale jest zwarty topikiem o dużej długości pozwalającej na zgaszenie łuku.

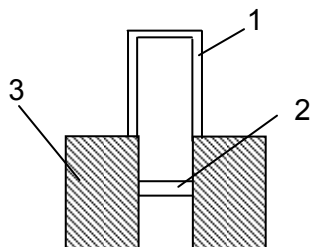
a)



b)

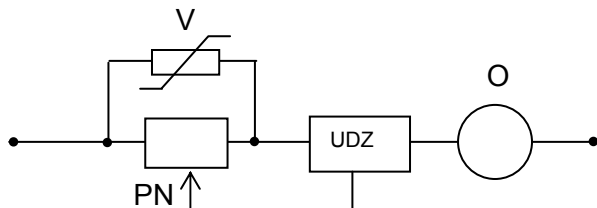


Rys. 2. Ogranicznik z bezpiecznikiem wielokrotnym PPF, 1 – zaciski prądowe, 2 – obudowa, 3 – sód metaliczny, 4 – komora kompensacyjna.



Rys. 3. Ogranicznik z bezpiecznikiem dwuścieżkowym, 1 – bezpiecznik pomocniczy, 2 – bezpiecznik krótki, 3 – zaciski prądowe.

Ogranicznik z łącznikiem półprzewodnikowym [4] (rys. 4) składa się z gałęzi głównej wykonanej z łącznika półprzewodnikowego, którym może być tranzystor (lub tyrystor) wraz z równoległym warystorem ograniczającym przepięcia. Problemem takiego łącznika są jednak straty w półprzewodniku PN, a także problemy z wyłączeniem tyrystora w obwodach prądu stałego.

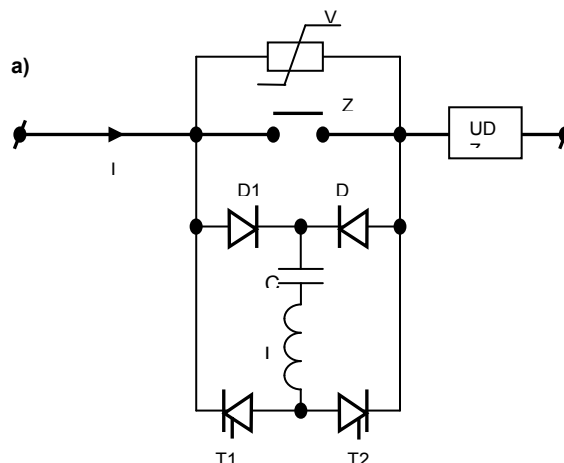


Rys. 4. Ogranicznik z łącznikiem półprzewodnikowym PN.

Zestykowy ogranicznik hybrydowy [5] (rys. 5), Zbudowany jest z gałęzi głównej w której użyto zestyk metaliczny (Z), dzięki czemu uzyskuje się niskie straty i dużą obciążalność aparatu. Gałęzią pomocniczą jest układ L, C, T1 (T2), D2 (D1). W zależności od polaryzacji prądu głównego włączony zostaje tyrystor T1 (T2), a napięcie początkowe obwodu LC powoduje przejście diody D2 (D1) do stanu przewodzenia. Następuje wtedy przerzucenie prądu  $I$  z gałęzi zestyku Z do gałęzi diod D1 i D2. Spowoduje to, że napięcie na otwierającym się zestyku nie przekroczy wartości kilku woltów. Z uwagi na zastosowanie

układu pomocniczego T, L, C zestyk nie musi posiadać zdolności łączeniowej (komór gaszeniowych), jedynie w czasie działania układu pomocniczego musi otworzyć się na odległość umożliwiającą wytrzymanie napięcia powrotnego panującego w układzie zasilającym. Aby to uzyskać łącznik musi się otworzyć na odległość ok. 1 cm w czasie, np. 0,5 ms. Uzyskać to można przez zastosowanie napędu elektrodynamicznego (rys.5 b). Z uwagi na brak łuku układ ogranicznika nadaje się do systemów trakcyjnych prądu stałego. Może jednak też być wykonany jako symetryczny, jak przedstawiono na rysunku 5a.

a)

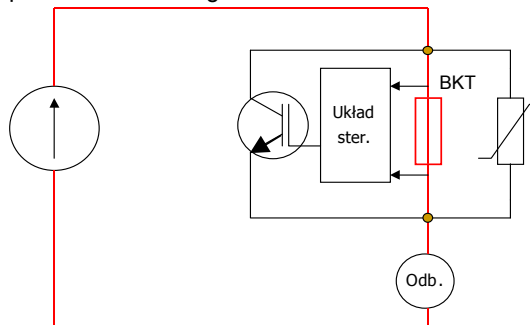


b)



Rys. 5. Łącznik hybrydowy a) schemat toru głównego wraz z układem komutacji, b) przykład realizacji układu sterowania napędu indukcyjno-dynamicznego zestyku w trójfazowym łączniku próżniowym [11].

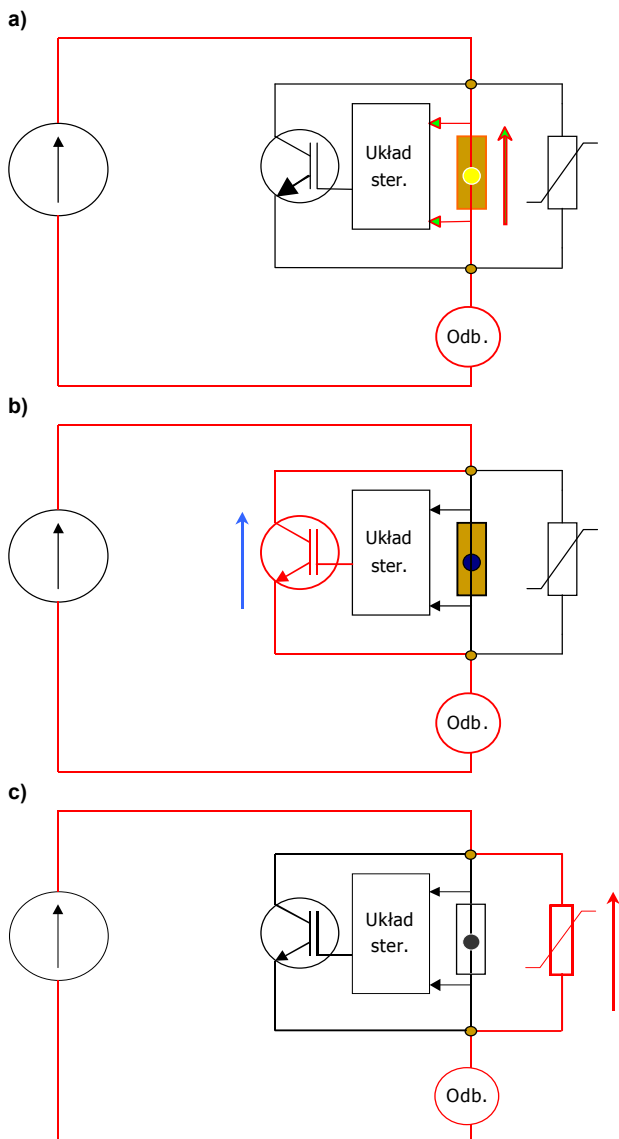
Bezestykowy hybrydowy ogranicznik prądu (rys. 6) powstał przez modyfikację polegającą na zastąpieniu zestyku (Z) wraz z układem napędowym przez bezpiecznik krótkotopkowy (BKT) o dużej obciążalności [6]. Gałęzią pomocniczą umożliwiającą wyłączenie prądu zwarciovego jest tranzystor IGBT wraz z równoległym warystorem. Z uwagi na niewielką długość (ok. 1 mm) bezpiecznik BKT nie posiada zdolności gaszenia łuku.



Rys. 6. Bezestykowy hybrydowy ogranicznik prądu w trakcie normalnej pracy.

## Zasada działania ogranicznika z bezpiecznikiem BKT

Układ sterowania mierzy spadek napięcia na bezpieczniku i gdy przekroczy on poziom progowy wytwarzany jest impuls bramkowy sterujący tranzystorem IGBT. W okresie przedłukowym topik ulega podgrzaniu do temperatury topnienia co objawia się zwiększonym przyrostem spadku napięcia na topiku (rys. 7 a).



Rys. 7. Zasada działania bezstykowego ogranicznika prądów zwarciovych – kolorem czerwonym pokazano obwody przepływu prądu w kolejnych etapach, a) czas przedłukowy, detekcja rozpadu topika, b) załączenie tranzystora IGBT, przejęcie prądu zwarciovego, c) ograniczenie prądu zwarciovego przez warystor.

Podczas tego etapu jest wymagane opóźnienie sterowania tranzystora takie, aby topik wytopił się na odległość stanowiącą przerwę izolacyjną. Za krótki czas spowoduje wytopienie zbyt małej przerwy, za długi spowoduje z kolei wytopienie okuć i nadmierną ilość par metali (plazmy) wymagających schłodzenia aby nie przewodzić prądu.

Na rys. 7 b przedstawiono etap przejścia prądu przez tranzystor IGBT. W tym czasie przerwa po topiku stygnie. Zbyt krótki czas przewodzenia tranzystora i zwierania przerwy po topiku powoduje, że po wyłączeniu tranzystora napięcie powrotne przebijie plazmę powstałą z par metalu topika. Plazma przestaje przewodzić przy temperaturze poniżej 3000 K [9] i staje się gorącym gazem. Prąd

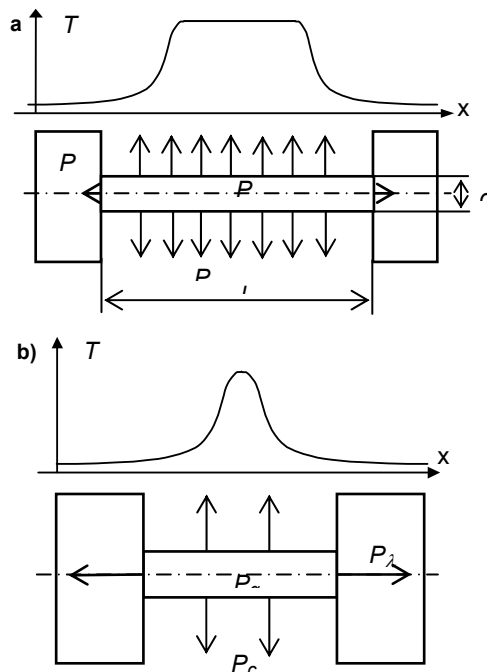
zwarciovowy w tym czasie jeszcze narasta. Ostatnim etapem jest wyłączenie tranzystora i włączenie w obwód warystora, który ogranicza prąd zwarciovowy (rys. 7 c).

Jak widać poprawne działanie ogranicznika krótkotopikowego zależy od dwóch czasów: czasu łukowego pozwalającego wytopić topik na odpowiednią długość oraz czasu przewodzenia tranzystora pozwalającego na ostygnięcie przerwy po topiku. Wydłużenie czasów powoduje z jednej strony pewność wyłączenia, ale też powoduje nadmierny łączny czas ograniczenia prądu zwarciovego – suma czasów składa się z czasu wytapiania topika i czasu przewodzenia tranzystora.

## Praktyczna realizacja bezstykowego ogranicznika CHCL

Praktyczna realizacja CHCL jest uzależniona od dostępności przyrządów półprzewodnikowych dostatecznie wielkiej mocy i szybkości działania. Ze względu na łatwość sterowania i bezpieczeństwo zbudowanego modelu wytypowano tranzystor typu IGBT w obudowie elektroizolowanej. W dalszej części przedstawiono główne zagadnienia związane z pracą ogranicznika:

- zachowanie się bezpiecznika krótkotopikowego w warunkach obciążalności długotrwałej – dopuszczalna gęstości prądu,
- dobór czasu łukowego czyli wytapiania topika - wyznaczenie czasu opóźnienia dla tranzystora IGBT,
- dobór czasu połukowego na odbudowanie wytrzymałości powrotnej dla napięcia układu zasilającego,
- optymalna relacja czasów łukowego i połukowego,
- wytrzymałość napięciowa po zadziałaniu ogranicznika (wytrzymałość statyczna).



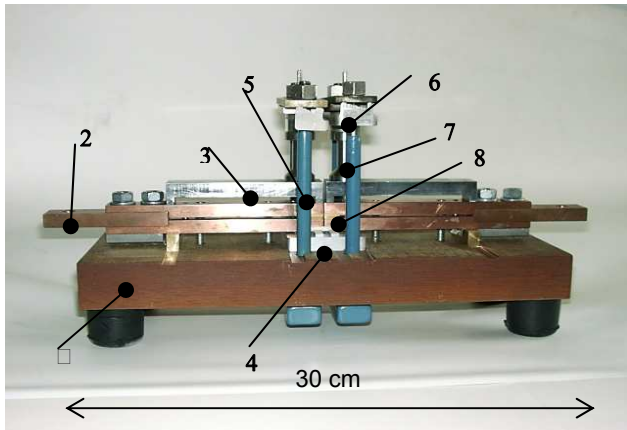
Rys. 8. Porównanie rozkładów temperatury w topikach, a) długim, b) krótkim. Pokazano bilans mocy strat  $P_\lambda$ ,  $P_q$ ,  $P_c$ .

## Zachowanie się bezpiecznika krótkotopikowego (BKT) w warunkach obciążalności długotrwałej

Jak wcześniej napisano wymiary topika wpływają na jego obciążalność - topik krótki może posiadać dużą obciążalność prądową jeżeli będzie intensywnie chłodzony osiowo do zacisków prądowych. Dodatkową cechą takiego topika jest jego mała całkowita masa i pojemność cieplna,

co powoduje stromą charakterystykę czasowo – prądową. W przypadku topika długiego dominuje chłodzenie z jego powierzchni bocznej, czego efektem jest stała płaska część na wykresie rozkładu temperatury. W topiku krótkim występuje jedynie maksimum (rys. 8 a, b).

Obliczono, że stosunek  $l/d$  mniejszy od 3 można uznać jako graniczny dla definicji bezpiecznika o krótkim topiku tzn. w rozkładzie temperatury wzdłuż osi topika nie występuje część płaska [10].



Rys. 9. Model bezpiecznika do badania obciążalności długotrwałej [7]: 1 – podstawa, 2 – zaciski, 3 – docisk, 4 – podpórka, 5 – wspornik, 6 – sprężyna dociskowa ze wskaźnikiem, 7 – stempel dociskowy, 8 – złożone szczęki do mocowania topika.

Za pomocą laboratoryjnego modelu aparatu z rys. 9 zmierzono obciążalność topika. Dla topika wykonanego z folii srebrnej o przekroju  $0,07 \text{ mm}^2$  i długości 1 mm prąd graniczny wynosił 176 A, związku z tym gęstość prądu wynosiła  $2571 \text{ A/mm}^2$ . Mierząc czasy do przetopienia topika dla innych wartości prądów, a także posiłkując się metodami obliczeniowymi pola temperatury w oprogramowaniu FLUX (obliczenia metodą elementów skończonych), wyznaczono przykładowe charakterystyki czasowo – prądowe (tab. 1).

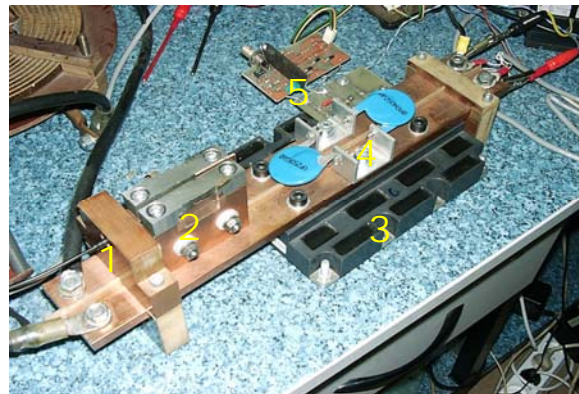
Tabela 1. Charakterystyki czasowo prądowe bezpieczników krótkich dla  $d = 0,3 \text{ mm}$ .

Lp.	$I$ [A]	$t$ [s]		
		$l = 1$ [mm]	$l = 2$ [mm]	$l = 5$ [mm]
1	92			3600
2	100			0,123
3	200			0,01
4	215		3600	
5	300		0,0065	
6	388	3600		
7	500	0,0028		
8	1 k	0,0004	0,0004	0,0004
9	2 k	0,0001	0,0001	0,0001
10	5 k	16 $\mu$	16 $\mu$	16 $\mu$
11	10 k	4 $\mu$	4 $\mu$	4 $\mu$

Z charakterystyk wynika duża szybkość działania bezpiecznika krótkiego, kilkukrotnie większa od klasycznych bezpieczników topikowych. Można zauważyć, że wszystkie charakterystyki zbiegają się do wspólnego punktu – jest to asymptota wynikająca z adiabatycznego nagrzewania się materiału przy dużych wartościach prądu. Charakterystyka bardzo stromo przechodzi od prądu granicznego do asymptoty krzywej Meyera i można uznać, że jest to cechą charakterystyczną BKT.

*Wpływ czasu łukowego czyli wytapiania się topika jako czas opóźnienia włączenia tranzystora IGBT*

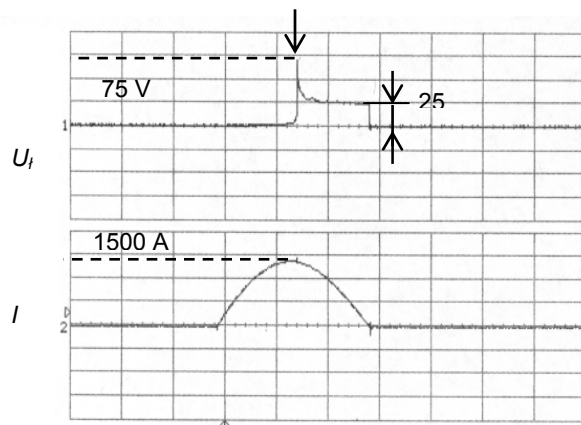
Rozpoznanie zjawisk w ograniczniku oraz pomiary łącznego czasu działania ogranicznika wykonano w układzie bezstykowego ogranicznika prądów jak na rys. 6. Układ laboratoryjny składał się z tranzystora IGBT 2400A/1200V, warystora, układów sterowania i zasilania (rys. 10).



Rys. 10. Bezstykowy hybrydowy ogranicznik prądów [8], 1 – wyjście światłowodu, 2 – zacisk topika krótkiego, 3 – tranzystor IGBT, 4 – warystory, 5 – sterowanie i zabezpieczenie tranzystora, Na zdjęciu nie pokazano układu pomiaru napięcia z topika.

Przykładowe pomiary wykonywano dla prądu 1500 A. Przebieg napięcia łukowego przedstawiono na rys. 11. Zmierzono długość szczeliny po topiku krótkim w funkcji czasu przewodzenia prądu topika.

Skracając czas łukowy można otrzymać różne długości przerwy po topiku np. dla czasu łukowego 15  $\mu\text{s}$  szczelina wynosi 0,5 mm, a pełne wytopienie topika na długość 1 mm następuje po czasie 30  $\mu\text{s}$ . Większy czas nie wpływa na zwiększenie szczeliny i tym samym na wytrzymałość napięciową ogranicznika po jego zadziałaniu.



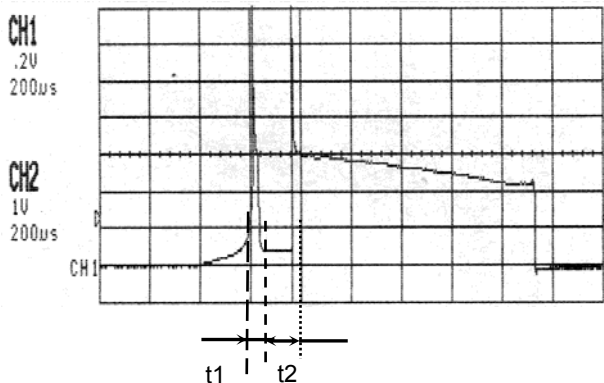
Rys. 11. Przebieg napięcia łukowego na topiku na tle prądu topika, podstawa czasu 200  $\mu\text{s}$ . Strzałką pokazano moment rozpadu topika i pojawienie się napięcia użytego do wyzwolenia układu sterowania tranzystorem IGBT.

*Czas połukowy jako czas przewodzenia tranzystora IGBT pozwalający na odbudowanie wytrzymałości powrotnej ogranicznika dla napięcia układu zasilającego*

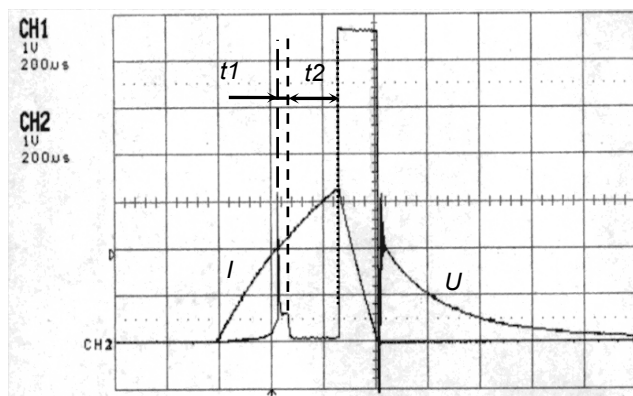
Po włączeniu tranzystora IGBT szczelina, w której był topik ulega schłodzeniu, a pary metalu po topiku ulegają rozproszeniu. Czas ten musi być odpowiednio długi i powiązany z czasem łukowym powodującym wytopienie topika i wydzielanie energii cieplnej. W pracy ogranicznika nadmierne skrócenie czasu powoduje ponowne przebicie przerwy po topiku i zapłon łuku (rys.12).

W przypadku prawidłowo dobranych czasów łukowego i połukowego następuje poprawne ograniczenie prądu zwarciovego (rys. 13), a całkowity czas ograniczenia prądu

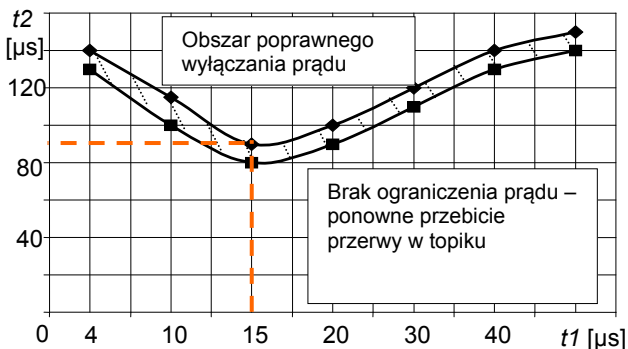
jest sumą czasów  $t_1$  i  $t_2$ . W systemie zabezpieczeń zależy na możliwie jak najszybszym odłączeniu awarii. Można też zauważyć, że od rozpadu topika (czyli sytuacji awaryjnej) do włączenia warystora ograniczającego prąd zwarciovu upływa czas 200  $\mu$ s. Przebieg napięcia na ograniczniku składa się z kilku okresów dla czasu normalnej pracy, przedłukowego, rozpadu topika, łukowego ( $t_1$ ), spadku napięcia na włączonym tranzystorze IGBT ( $t_2$ ) oraz na ograniczonym na warystorze i napięciu powrotnym. Z uwagi na bardzo krótki czas łączenia tranzystora IGBT może on przewodzić duże prądy bez uszkodzenia.



Rys. 12. Ponowny zapłon łuku i brak ograniczenia prądu zwarciovego z uwagi na zbyt krótki czas połukowy  $t_2$ .



Rys. 13. Poprawne zadziałanie ogranicznika: czas  $t_1$  wytapia topik na odpowiednią odległość, czas  $t_2$  pozwala na dejonizację i ostygnięcie przerwy po topiku dzięki temu ogranicznik wytrzymuje napięcie powrotne.



Rys. 14. Optymalny czas zadziałania ogranicznika bezstykowego wynosi 105  $\mu$ s (90  $\mu$ s + 15  $\mu$ s) „krzywa V”. Zwraca też uwagę obserwacja istnienia pasma nieokreślonego działania ogranicznika o stałej szerokości równej 10  $\mu$ s.

**Optymalna relacja czasów łukowego i połukowego oraz wpływ na najszybsze ograniczenie zwarcia**

W trakcie badań okazało się, że występuje wyraźne optimum dwóch czasów  $t_1$  i  $t_2$ . Wskazano wcześniej, że dłuższy czas łukowy wymaga dłuższego czasu połukowego,

z drugiej jednak strony zbyt krótki czas łukowy nie spowoduje wytopienia się topika i niezależnie od długości trwania czasu połukowego ogranicznik zawsze będzie ulegał ponownemu przebicciu. Przebieg optymalnego wzajemnego doboru czasów przedstawiono na rys. 14.

#### Wytrzymałość napięciowa statyczna ogranicznika

Po zadziałaniu ogranicznika przy powstałej przerwie rzędu 0,5 mm wytrzymuje ona odpowiednio napięcie 6,1 kV przy ciśnieniu gazu SF<sub>6</sub> wynoszącym 983 hPa, napięcie 1,83 kV (powietrze, 983 hPa) oraz 1,83 kV (SF<sub>6</sub>, 292 hPa). Topik umieszczono w komorze próżniowej. Pomiar ciśnienia dokonywano wakuometrem kompresyjnym McLeoda, a przestrzeń odpompowano dwustopniową pompą próżniową Unitra BL30.

#### Wnioski

Przedstawiono szereg rozwiązań aparatów ograniczających prąd zwarciovu jedno- i wielokrotnego zadziałania. Szczegółowo przedstawiono ogranicznik hybrydowy krótkotopikowy, który posiada dużą szybkość działania i jest w stanie wyłączać prąd 1500 A, napięcie 660 V w czasie 105  $\mu$ s. Wskazuje to na potencjalne możliwości techniczne tego typu ogranicznika w krytycznych miejscach sieci. Głównym zastosowaniem związanym z naturalną zdolnością do wyłączania bezłukowego mogą być sieci prądu stałego, np. trakcyjne, a w wykonaniu w postaci układu symetrycznego, także obwody dla napięcia przemiennego.

Składam podziękowanie dr inż. Markowi Pikonowi za wieloletnią współpracę i możliwość udziału we wspólnych eksperymentach prowadzonych do czasu likwidacji Katedry Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych Politechniki Gdańskiej, założonej przez prof. Stanisława Szpora w 1945 roku dla potrzeb odbudowy polskiej nauki i przemysłu.

Borys Semenowicz

**Autorzy:** dr inż. Borys Semenowicz, aktualnie Energa – Operator S.A. ul. Marynarki Polskiej 130, 80-557 Gdańsk, uprzednio Instytut Elektrotechniki Oddział w Gdańsku, e-mail: [bsemen@wp.pl](mailto:bsemen@wp.pl); mgr inż. Piotr Bogusławski, Instytut Elektrotechniki, Zakład w Gdańsku ul. Narwicka 1, 80-557 Gdańsk, e-mail: [piotr.boguslawski@iel.gda.pl](mailto:piotr.boguslawski@iel.gda.pl)

#### LITERATURA

- [1] Mioshi N., Fukushima O.: Ultra – high speed protection device – Fuji Ultrap Fuse. Fuji Electric Review, vol. 18, No 1
- [2] Itoh T., Miyamoto T.: Permanent Power Fuse. *IEEE Summer Power Meeting*, Los Angeles 1970 No CP 0-601-PWR
- [3] Stenc K.: Two – pass fuse with variety of insulations gases. *University of Technology in Gdansk 2001*
- [4] Tennakoon S. B., McEwan P. M.: Circuit topologies for thyristor circuit breakers. *Proceedings of 2<sup>nd</sup> Intern. Conference on Electr. Contacts, arcs, apparatus and applications*. May 1993
- [5] Collart P., Pellichero S.: „A new high speed DC circuit breaker: the DHR”. *IEE Colloquium organised by Professional Group P6 and P2*. Digest No. 1989/137 22 Nov. 1989
- [6] Wolny A., Semenowicz B., Leśniewski P.: Features of a short fuse, as a main current path of a contactless hybrid current limiter, *10<sup>th</sup> International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems*, Łódź 2002
- [7] Grant 4 T10A 079 22 „Bezpiecznik krótkotopikowy budowa modelu fizycznego i matematycznego” *Politechnika Gdańska*, Gdańsk 2003
- [8] Semenowicz B., Partyka R.: Dielectric strenght of the ultra-short fuse, *7<sup>th</sup> International Conference on Electrical Fuses and Their Application*, Gdańsk- Jurata, September 2003
- [9] Linhart J. G.: Fizyka plazmy. WNT Warszawa 1963
- [10] Semenowicz B. Bezpiecznik krótkotopikowy jako element bezstykowego hybrydowego ogranicznika prądów zwarciovych, Rozprawa doktorska, *Politechnika Gdańska* 2008
- [11] Opracowanie OG/906/DO-190/2015, System bezprzerwowego zasilania wrażliwych instalacji przemysłowych z superkondensatorowym magazynem energii elektrycznej – Materiały zebrane do Raportu nr 2, *Instytut Elektrotechniki*.