

ZABEZPIECZENIA TRANSFORMATORÓW SŁUPOWYCH STACJI NAWIETRZNYCH

Andrzej WOLNY

Politechnika Gdańska

tel: 58 347 1911 e-mail: awolny@ely.pg.gda.pl

Streszczenie: Z okazji 65. rocznicy powstania Wydziału Elektrycznego Politechniki Gdańskiej przedstawiono problematykę zabezpieczania transformatorów rozdzielczych i stosowaną aparaturę opracowaną w tej uczelni.

Słowa kluczowe: odgromniki gazowydmuchowe, bezpieczniki gazowydmuchowe.

1. WPROWADZENIE

Co pewien czas ponawia się pytanie o cel zabezpieczania transformatorów rozdzielczych od strony wysokiego napięcia w sieciach napowietrznych, ze względu na koszt i pewne kłopoty eksploatacyjne. Po wojnie, i nieco później, gdy jakość izolacji transformatorów nie była wysoka, a remonty transformatorów opłacalne, potrzeba zapobiegania zwarciom wewnętrznym i ograniczania ich skutków wydawały się oczywiste i ekonomicznie uzasadnione.

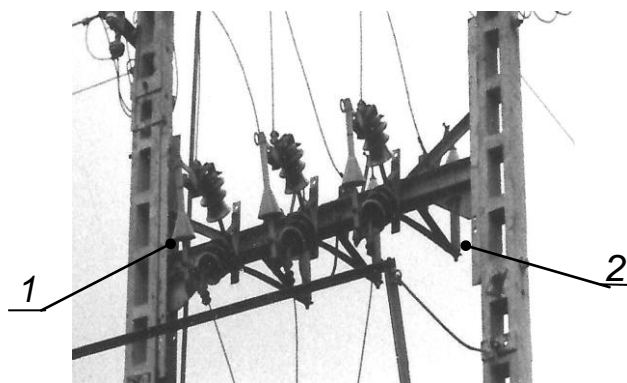
Z czasem, jakość transformatorów poprawiała się, izolacja łatwiej wytrzymywała znaczne przepięcia, cena malała, a koszty remontów rosły. Zaczęto, więc rezygnować z zabezpieczeń. Obecnie, gdy wzrasta troska o środowisko naturalne, zwiększone niebezpieczeństwo rozszczelnienia lub nawet eksplozji kadzi transformatora po powstaniu zwarcia wewnętrznego i utrzymywaniu się go przez pewien czas, staje się powodem ponownego zainteresowania się problematyką zabezpieczeń.

Gdy odbudowywano kraj po wojnie i intensywnie elektryfikowano wieś oraz kolej. Polska nie miała łatwego dostępu do rynków światowych, co utrudniało, a czasem uniemożliwiało zakup niezbędnych urządzeń za granicą. Konieczne okazało się, więc szybkie opracowanie i wyprodukowanie aparatury niezbędnej do rozbudowy rozległej sieci rozdzielczej o umiarkowanej mocy przesyłowej.

Prace nad aparaturą do zabezpieczenia transformatorów SN instalowanych w napowietrznych stacjach słupowych podjął w 1951 r. prof. dr hab. inż. Stefan Grudziecki z Politechniki Gdańskiej, a w roku 1953 wyprodukowano już 2000 odgromników wydmuchowych w Zakładzie Remontowym Energetyki w Gdańsku. Wkrótce opracowano także bezpieczniki gazowydmuchowe i uruchomiono ich produkcję w tym samym zakładzie. Aparaty te, ulepszone kilkakrotnie, produkowano przez ponad 50 lat. Nawet dziś znajdują odbiorcę bezpieczniki oparte na idei

prof. Grudzieckiego, o konstrukcji dostosowanej do nowych materiałów i technologii, a produkcję odgromników zakończono dopiero w 2007 r.

Słupowe stacje napowietrzne instalowane są w sieciach rozdzielczych 15 kV lub 20 kV, zwykle na końcu linii, w pobliżu grupy odbiorców energii zasilanych niskim napięciem. Odległość stacji od GPZ wynosi zwykle od 1 km do kilkunastu kilometrów, rzadko do kilkudziesięciu (np. 30 km). Stacje wyposażane są w niewielkie transformatory, zazwyczaj o mocy od 160 kVA do 400 kVA. Tak, więc w „sieciach wiejskich” prądy znamionowe transformatorów po stronie SN wahają się w przedziale od 4 A do 16 A, rzadko więcej, zaś prądy zwarciove w miejscu zainstalowania transformatora od kilkuset amperów do kilku kiloamperów. Warunki te określają podstawowe wymagania napięciowo-prądowe, jakim powinna sprostać aparatura zabezpieczająca. Ponieważ koszty wymiany niewielkiego transformatora są umiarkowane, więc uzasadniona ekonomicznie cena aparatury, będąca na ogół ułamkiem wartości transformatora musi być naprawdę niska. Podstawowym zadaniem prof. Grudzieckiego było, więc opracowanie tanich, lecz niezawodnych (instalowane w wielu punktach systemu) urządzeń chroniących transformatory przed przepięciami atmosferycznymi i łączeniowymi, a także przed skutkami zwarc wewnątrznych i na wejściu transformatora. Stację słupową wyposażoną w opracowaną przez niego aparaturę pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Stacja słupowa 15 kV / 0,4 kV wyposażona w aparaturę zabezpieczeniową opracowaną na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej: 1 – odgromnik wydmuchowy OWG-18, 2 – bezpieczniki WBGN [1]

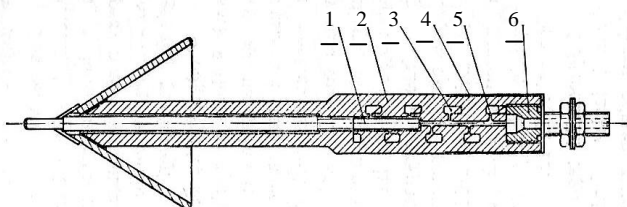
2. ZABEZPIECZENIE PRZECIWPRIĘCIOWE TRANSFORMATORA STACJI SŁUPOWEJ SN/nn

Najtańszym zabezpieczeniem przeciwprzebieciowym jest iskiernik. Posiada on jednak wiele wad. Przede wszystkim poziom ochrony jest niezbyt stabilny ze względu na silną zależność charakterystyki zapłonowej $U_p = f(t)$ od biegunowości i szybkości narastania napięcia. Drugą bardzo istotną wadą, może jeszcze ważniejszą, jest wywoływanie zwarcia w czasie działania, które musi być wyłączane wyłącznikiem w GPZ. Cierpią, więc wszyscy odbiorcy zasilani za pośrednictwem tej stacji, a także zwiększają się koszty eksploatacyjne w związku z szybszym zużywaniem się kosztownego wyłącznika. W Polsce, w latach 50. XX w alternatywą mogły być krajowe odgromniki zaworowe, zawierające bloki warystorowe SiC, których koszt był jednak znaczny, więc ich wykorzystanie w sieciach „wiejskich” byłoby nieuzasadnione. Dziś stosujemy przystępne tlenkowe ograniczniki napięcia.

W pierwszej połowie XX w, w wielu krajach, w sieciach rozdzielczych stosowano odgromniki wydmuchowe, które można nazwać ulepszonymi iskiernikami, ze względu na to, że oprócz przerwy iskrowej posiadają komory gaszeniowe, wyłączające samodzielnie prądy następcze, bez pomocy wyłącznika w GPZ. Komory te są tanie i proste, ale posiadają wysoką dolną granicę wyłączenia, a charakterystyki zapłonowe iskierników stosowanych w takim odgromniku niewiele się różnią od charakterystyk iskiernika zwykłego.

W Politechnice Gdańskiej opracowano konstrukcję odgromnika wydmuchowego o polepszonych parametrach dzięki wystudiowaniu kształtów komory gaszeniowej, doborowi materiału o pożądanych właściwościach dielektrycznych i gaszeniowych oraz starannemu ukształtowaniu rozkładu pola elektrycznego.

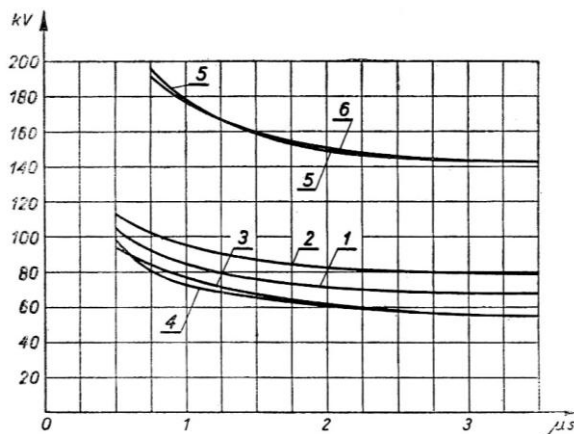
Dużą zdolność wyłączalną przy równoczesnym obniżeniu dolnej granicy wyłączenia uzyskano przez zastosowanie komory śrubowej (rys. 2.) o zmiennym przekroju kanału 3 i 5 „nawiniętej” na prostym kanale cylindrycznym o niewielkiej średnicy oraz wykorzystaniu ebonitu jako materiału gazującego. Kanał śrubowy pozwala na utrzymanie długiego łuku przy niewielkim odstępie między elektrodami i łagodzi niekorzystny wpływ osadu półprzewodzącego powstającego w czasie działania odgromnika. Wąski kanał cylindryczny służy do intensywnego chłodzenia łuku przy małych prądach następczych.



Rys. 2. Odgromnik wydmuchowy OWS 18 stosowany w sieci 15 kV ($U_{rm} = 18$ kV, $I_w = 65$ kA, $I_g = 2$ kA), którego ważniejsze elementy pokazano na przekroju: 1, 6 – elektrody iskiernika wewnętrznego, 2 – rura gazująca, 3 – kanał śrubowy, szeroki, 4 – ekran metalizowany, 5 – kanał śrubowy wąski [2]

Kompensację wpływu biegunowości napięcia na przebieg charakterystyk zapłonowych uzyskano dzięki materiałowi o dużej przenikalności dielektrycznej,

wykorzystaniu ekranu metalicznego na zewnątrz komory gaszeniowej oraz zastosowaniu dwóch szeregowych przerw iskrowych, jednej wewnątrz komory gaszeniowej, a drugiej – na zewnątrz w powietrzu.



Rys. 3. Charakterystyki napięciowo-czasowe odgromników z komorą śrubową na 15 kV (1 ÷ 4) oraz 30 kV (5, 6): 1 i 2 – rura ebonitowa – impulsy +/-, 3 i 4 – ulepszona rura z materiału o dużej przenikalności dielektrycznej – impulsy +/-, 5 i 6 – rura ebonitowa – impuls +/- [1]

Pokazane na rysunku 3. charakterystyki zapłonowe różnych odgromników wydmuchowych pokazują, że wpływ biegunowości przebiegu na poziom ochrony może być zredukowany przez odpowiedni dobór materiału komory gaszeniowej. Charakterystyki 3, 4, 5 i 6 dotyczą opracowanego odgromnika z rurą ebonitową. Widać brak zależności od biegunowości napięcia (linie 3 i 4 oraz 5 i 6 praktycznie pokrywają się).

Po uruchomieniu produkcji nowych odgromników przeprowadzono badania ich zachowania się w sieci oraz porównano ich skuteczność i awaryjność z odgromnikami innych typów i wytwórców, w tym z produkowanymi za granicą. Stwierdzono, że liczba awarii transformatorów zmalała około dwukrotnie, a liczba uszkodzeń odgromników, w zależności od typu i producenta, też się wyraźnie zmniejszyła. Porównywano też krajowe odgromniki zaworowe (tablica 1. i tablica. 2.).

Tablica 1. Liczba uszkodzeń transformatorów w Polsce

Rok	Transformatory chronione odgromnikami wydmuchowymi krajowymi	Transformatory chronione odgromnikami zaworowymi		Transformatory niechronione
		GZ 15/1,5 kA	GZ 15/10 kA	
1958	2,50	3,15	1,35	4,50
1959	1,46	2,21	1,25	3,31
1960	1,63	2,53	1,03	3,12
1961	1,91	3,0	1,54	5,91

Tablica 1. Liczba uszkodzeń odgromników w Polsce [%]

Rok	Odgromniki wydmuchowe				Odgromniki zaworowe			
	krajowe		zagraniczne		GZ 15/1,5 kA		GZ 15/10 kA	
	w sezonie	poza sezonem	w sezonie	poza sezonem	w sezonie	poza sezonem	w sezonie	poza sezonem
1958	0,20	0,01	0,42	0,03	0,27	0,09	0,25	0,18
1959	0,09	0,01	0,05	0,10	0,31	0,10	0,15	0,06
1960	0,09	0,04			0,24	0,05	0,23	0,06
1961	0,15	0,04			0,35	0,06	0,29	0,04

Przez szereg lat produkowano i instalowano około 2500 odgromników wydmuchowych rocznie. W latach 90. XX w. zapotrzebowanie na nie zaczęło obniżać się ze

względu na spadek cen nowych, tlenkowych ograniczników przepięć o lepszych charakterystykach ochrony. Produkcja odgromników wydmuchowych opracowanych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej na początku lat 50. Zakończyła się w roku 2007.

3. ZABEZPIECZENIE ZWARCIOWE PO STRONIE WYSOKIEGO NAPIĘCIA TRANSFORMATORA

Potrzeba stosowania zabezpieczeń nadprądowych na wejściu transformatora od strony linii SN jest często dyskutowana, gdyż przed skutkami przeciężeń i zwarć transformator musi być chroniony po stronie niskonapięciowej, zaś po stronie SN zabezpieczenie może działać tylko w przypadku zwarć na zaciskach transformatora, zwarć na odcinku transformator – zabezpieczenie nn, zwarć wewnętrznych lub niezadziałania zabezpieczeń po stronie nn. Są to rzadkie przypadki, więc inwestowanie w zabezpieczenia wszystkich transformatorów, gdy tylko kilka procent z nich będzie działać, może okazać się nieekonomiczne. Zysk, jaki wynika z ograniczenia skutków zwarcia wewnętrznego i tym samym zmniejszenia kosztów naprawy transformatora nie wszystkich przekonuje, gdyż koszt produkcji nowych transformatorów został obniżony, a jakość znacząco wzrosła.

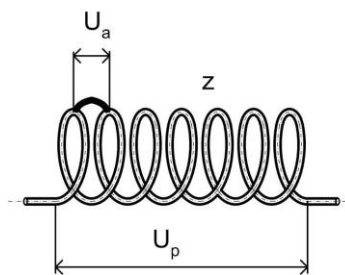
Obecnie istotnym powodem stosowania takich zabezpieczeń, jak wspomniano we wprowadzeniu, może być dbałość o środowisko naturalne zagrożone w przypadku uszkodzenia kadzi transformatora w wyniku zwarć wewnętrznych, najczęściej wywołanych przepięciami, szczególnie, gdy jakość izolacji nie jest doskonała. Zagrożeniem jest wówczas ciśnienie wynikające z gazowania oleju pod wpływem energii palącego się łuku i możliwość rozszczelnienia kadzi. Jeśli, więc nawet w nielicznych przypadkach zwarcie wewnętrzne transformatora doprowadzi do eksplozji kadzi wypełnionej olejem, to skutki dla środowiska są fatalne. Warto, więc zainwestować w stosunkowo niedrogi zabezpieczenia nadprądowe.

W przypadku zwarć między wyprowadzeniami, lub do kadzi prąd jest duży i każde zabezpieczenie przeciwzwarciowe, np. w GPZ powinno zadziałać poprawnie. Można, więc pominąć zabezpieczenie w pobliżu transformatora. Jeśli jednak wystąpi zwarcie międzyzwojowe, to prąd zakłócenia może być niewielki i odległe zabezpieczenia nie będą skuteczne.

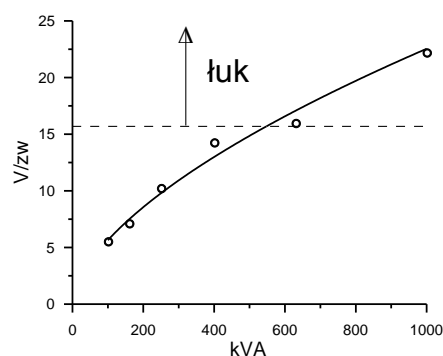
Natężenie prądu łuku przy zwarciu międzyzwojowym zależy od liczby zwojów w uzwojeniu. Przy ich dużej liczbie, a więc małej mocy transformatora, prąd niewiele się różni od prądu roboczego, a łuk może zgasnąć samoczynnie, gdyż jest intensywnie chłodzony olejem. Aby łuk mógł się zapalić musi się na nim utrzymać napięcie, co najmniej 15 V, jeśli przyjmujemy, że łuk jest krótki i o wartości napięcia łukowego decydują jedynie spadki przyelektrodowe, (rys. 4).

Zależność między napięciem zwojowym typowego transformatora SN/nn stacji słupowych stosowanych w Polsce, a jego mocą pokazano na rysunku 5. Widać tu wyraźnie, iż dopiero powyżej 400 kVA zwarcie między pojedynczymi zwojami jest groźne. Przy mniejszych mocach, łuk musi obejmować więcej zwojów, aby mógł się utrzymać przez dłuższy czas, co jest mniej prawdopodobne.

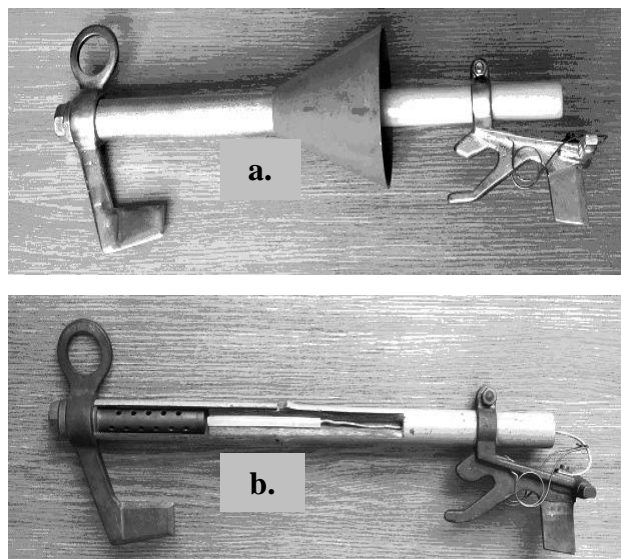
W latach 50. i 60. XX wieku relacje cen i jakości były zupełnie inne niż obecnie i dlatego w Polsce powszechnie stosowano po stronie SN kosztowne i ciężkie bezpieczniki piaskowe.



Rys. 4. Napięcie łukowe między zwojami zwartymi



Rys. 5. Typowe napięcia zwojowe w krajowych małych transformatorach SN/nn [4]



Rys. 6. Bezpiecznik gazowydmuchowy WBG 17,5: a. – osłona bezpiecznika kompletna, b. – przekrój (bez daszka) z widocznym stykiem górnym i tzw. otuliną na topiku

Żeby obniżyć znacząco koszt zabezpieczeń, w Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych Politechniki Gdańskiej opracowano bezpieczniki gazowydmuchowe, (rys. 6.), doskonalsze od stosowanych wówczas na świecie, uzyskując pełnozakresowe wyłączenie i koszt działania nawet kilkunastokrotnie niższy niż w przypadku bezpieczników piaskowych.

Zaletą nowych bezpieczników było to, że po zadziałaniu wymieniano tylko prościutką, a więc bardzo taną, wkładkę składającą się z topika zakończonego elementem stykowym i elektrodą linkową. Najkosztowniejsze części bezpiecznika, jak osłona (korpus) wraz ze stykami, w przeciwieństwie do bezpieczników piaskowych, były wielokrotnego użytku.

Proces gaszenia łuku łączeniowego przez bezpieczniki gazowydmuchowe jest zupełnie inny, trudniejszy, niż przez bezpieczniki piaskowe. Bezpieczniki gazowydmuchowe dobrze wyłączają tylko umiarkowane prądy. Jeśli prąd wzrasta – ciśnienie powstające wskutek rozkładu materiału ścianek komory pod wpływem ciepła łuku rozrywa komorę, zaś przy małym prądzie – gazowanie ścianek jest słabe, chłodzenie łuku niewystarczające i prądu nie da się wyłączyć.

Po przeprowadzonych badaniach w Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych Politechniki Gdańskiej, konstrukcja bezpiecznika gazowydmuchowego nabrała innych kształtów. Cylindryczna komora osłony bezpiecznika otrzymała ścianki dwuwarstwowe: zewnętrzną, nośną, szklano-epoksydową oraz wewnętrzną, gazującą, ze specjalnego materiału [3], wynalezionego przez prof. Grudzieckiego, będącego kompozycją materiału organicznego i nieorganicznego utleniacza. Dzięki temu, wytrzymuje ona znacznie większe ciśnienie, a więc może wyłączyć większe prądy.

Ponadto, zredukowano tendencję do pokrywania się ścianek komory osadem sadzy, zwiększając wytrzymałość napięciową bezpiecznika. Małe prądy opanowano w ten sposób, że topik osłonięto cienką rurką (otuliną) z nowego, kompozytowego materiału i zwiększono stałą czasową napełniania komory gazem, przez takie ukształtowanie styku górnego, że stanowi on ściankę zbiornika schładzanego gazu generowanego w procesie łukowym. Dzięki temu przy „przechodzeniu prądu przez zero” (prąd przemienny) zawsze występuje podmuch dejonizujący plazmę połukową. Podstawowe części takiego bezpiecznika pokazano na rysunku 7.



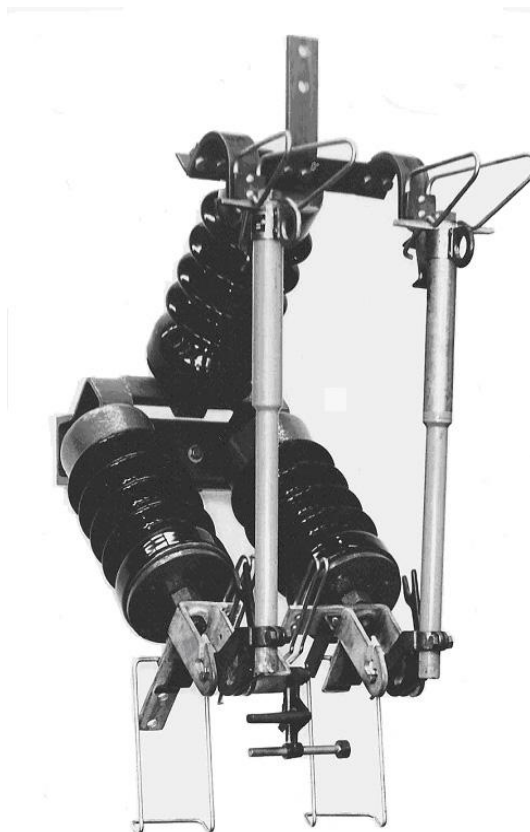
Rys. 7. Części bezpiecznika WBGN opracowanego w Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych Politechniki Gdańskiej: 1 – rura izolacyjna komory, 2 – osłona metalowa zbiornika gazów, 3 – topik, 4 – otulina, 5 – styk górny, rurowy ułatwiający schładzanie gazów, 6 – elektroda linkowa topika [1]

Dużym utrudnieniem w opracowywaniu polskich bezpieczników gazowydmuchowych był warunek postawiony przez energetykę dostosowania wkładek do istniejących podstaw bezpiecznikowych, przeznaczonych pierwotnie do bezpieczników piaskowych. Narzucało to konieczność pozostawiania wkładki bezpiecznikowej po jej zadziałaniu w podstawie bezpiecznikowej pod napięciem roboczym, przy zmiennych warunkach atmosferycznych, w czasie deszczu, mgły i rosy. Stawia to trudne do spełnienia wymagania izolacji bezpiecznika, szczególnie powierzchni wewnętrznej pokrywanej się półprzewodzącym osadem powstającym w czasie wyłączania prądu. Dzięki wynalazonemu materiałowi gazującemu zawierającemu tzw. „wodę krystaliczną” osad półprzewodzący został skutecznie zredukowany. Powierzchnię zewnętrzną osłonięto daszkiem.

Istniało wiele odmian konstrukcyjnych bezpieczników gazowydmuchowych opracowanych w Katedrze Wysokich

Napięć i Aparatów Elektrycznych Politechniki Gdańskiej. Oprócz wersji dopasowanej do podstaw bezpieczników piaskowych, powstały też bezpieczniki wypadające, do instalowania na odciskach od pnia sieci, na wzór konkurencji zachodniej, lecz w formie ulepszonej, bo posiadające kilka równoległych, przełączanych wkładek, dzięki czemu można realizować ideę SPZ z wykorzystaniem bezpieczników.

Przykład takiego rozwiązania pokazano na rysunku 8. W podstawie bezpiecznikowej umieszczone są dwie wkładki, lecz prąd płynie tylko przez wkładkę lewą. Po zadziałaniu, wkładka ta wypada z górnych styków, obraca się wokół rozków na stykach dolnych i zamyka łącznik przełączając prąd na wkładkę prawą. Jeśli zakłócenie było przemijające, to po przerwie określonej przez czas opadania wkładki lewej (około 1 sekundy), zasilanie odbiorców jest kontynuowane.



Rys. 8. Bezpiecznik gazowydmuchowy dwukrotny, z wkładkami „wypadającymi” opracowany w Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych Politechniki Gdańskiej

4. PODSUMOWANIE

Bezpieczniki gazowydmuchowe opracowane w latach 50. i 60. XX wieku w Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych Politechniki Gdańskiej, po zmianach związanych z postępowaniem technologicznym, nadal są produkowane w Gdańsku. Produkcję odgromników wydumuchowych zakończono w 2007 r.

Obecnie, zabezpieczanie transformatorów przed przepięciami atmosferycznymi jest łatwo realizowane przy pomocy tlenkowych ograniczników napięcia. Z zabezpieczeń nadprądowych na ogół zrezygnowano. Wydaje się jednak, że troska o środowisko naturalne wymusi, podobnie jak to ma miejsce w innych krajach europejskich, powrót do zajęcia się tym problemem.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Stefan Grudziecki: Nowe odgromniki wydmuchowe 10–110 kV, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Acta Technika Gedanensia Nr 2, Piorun i ochrona odgromowa, cz. I, Zbiór prac Zakładu Wysokich Napięć Politechniki Gdańskiej pod redakcją S. Szpora, Gdańsk 1963, s. 153.
2. Stefan Grudziecki: Wyniki eksploatacyjne odgromników wydmuchowych 15 kV, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Acta Technika Gedanensia Nr 2, Piorun i ochrona odgromowa, cz. I, Zbiór prac Zakładu Wysokich Napięć Politechniki Gdańskiej pod redakcją S. Szpora, Gdańsk 1963, s. 177.
3. Stefan Grudziecki: Nowy materiał izolacyjno-gazujący, Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Acta Technika Gedanensia Nr 2, Piorun i ochrona odgromowa, cz. I, Zbiór prac Zakładu Wysokich Napięć Politechniki Gdańskiej pod redakcją S. Szpora, Gdańsk 1963, s. 189.
4. Andrzej Wolny: Zabezpieczanie małych transformatorów SN/nn - ocena skuteczności stosowanych środków, Seminarium GETRADE: „Stacje transformatorowo-rozdzielcze SN/nn”, Pol. Poznańska, Poznań 2004, s. 5÷14.

TRANSFORMERS PROTECTION IN OVERHEAD POLE POWER STATIONS

Key-words:: expulsion lightning arresters, expulsion fuses.

Protection of distribution transformers in overhead pole power stations has been shortly discussed and adequate lightning arresters, as well as fuses elaborated in Gdansk University of Technology has been presented on 65. anniversary of Electrical Faculty of GUT foundation.

