



Jerzy BIELECKI¹, Andrzej GNATEK²

Instytut Energetyki, Warszawa (1), Zakłady Porcelany Elektrotechnicznej ZAPEL S.A., Boguchwała (2)

Badania mechanicznej wytrzymałości ceramicznych izolatorów osłonowych w ujemnych temperaturach

Streszczenie. Izolatory osłonowe stanowią zwykle integralne części urządzeń elektrycznych. Podczas eksploatacji są poddawane złożonym naprężeniom mechanicznym zależnym również od warunków środowiskowych. W niektórych rejonach temperatura otoczenia izolatorów osłonowych może dochodzić do $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Stąd konieczność sprawdzenia, czy w takiej temperaturze nie nastąpi obniżenie mechanicznej wytrzymałości izolatora poniżej poziomu wytrzymałości znamionowej. Próby wykonano na ceramicznych izolatorach osłonowych produkcji ZPE ZAPEL S.A.

Abstract. (Mechanical strength test of ceramic hollow insulators performed at minus temperature). Hollow insulators are usually integral parts of electrical devices. During their operation they are impacted by complex mechanical stresses also depending on environmental conditions. In some regions the ambient temperature of hollow insulators can reach minus $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hence the necessity of verifying if in such temperature the mechanical strength of the insulator is decreased below the nominal withstand level. The tests were carried out on the hollow ceramic insulators produced by ZPE ZAPEL SA.

Słowa kluczowe: izolatory elektroenergetyczne, izolatory osłonowe, znamionowa wytrzymałość mechaniczna, badania izolatorów

Key words: power insulators, hollow insulators, nominal mechanical strength, insulators tests.

Wstęp

Ceramiczne izolatory osłonowe i osłony izolacyjne (zwykle przyjmuje się, że osłona izolacyjna nie jest wyposażona w metalowe okucia) [1] od dawna stosuje się w urządzeniach elektrycznych, takich jak wyłączniki, rozłączniki, przekładniki itp. Gabaryty oraz właściwości konstrukcyjne i mechaniczne izolatorów osłonowych zależą w głównej mierze od rodzaju urządzenia, do którego się je przeznacza. Szczególne wymagania stawia się izolatorom osłonowym przewidzianym do urządzeń na napięcie 110 kV i powyżej. Występujące w eksploatacji obciążenia mechaniczne izolatorów osłonowych mogą mieć charakter stały (wynikający z rodzaju urządzenia i sposobu jego zainstalowania) lub zmienny, którego źródłem są głównie czynności łączeniowe i występujące w sieci zjawiska dynamiczne (zwarcia, przepięcia). Dodatkowe naprężenia występują w osłonach, w których stale znajduje się gaz pod ciśnieniem. W przypadku urządzeń napowietrznych dochodzą również naprężenia spowodowane czynnikami atmosferycznymi, jak parcie wiatru, oblodzenie, czy temperatura. Z wyjątkiem ciśnienia wewnętrznego, obciążenia te zwykle wytwarzają w izolatorze momenty zginające. Największe naprężenia występują najczęściej w dolnym węźle montażowym, tj. w obrębie okucia, za które mocuje się izolator. Stąd istotną próbą w programie badań izolatorów osłonowych jest próba wytrzymałości na zginanie.

Znormalizowane próby izolatorów osłonowych

Podstawowym dokumentem normalizacyjnym dotyczącym ceramicznych izolatorów osłonowych i osłon izolacyjnych jest międzynarodowa norma IEC 62155:2003 [2]. Norma ta została przyjęta przez CENELEC jako EN 62155:2003, a także – tzw. metodą uznania, czyli w języku angielskim – przez Polskę, jako PN-EN 62155:2004 (U). Najprawdopodobniej w 2005 r. ukaże się jej polska wersja.

W normie IEC 62155, podobnie jak w większości innych norm z zakresu izolatorów elektroenergetycznych, właściwości ceramicznych izolatorów osłonowych sprawdza się w trzech rodzajach badań:

- badaniach typu;
- badaniach kontrolno-odbiorczych;
- badaniach wyrobu.

Badania te wykonuje się zarówno dla osłon powszechnie stosowanych w urządzeniach elektrycznych, (nie zawsze poddawanych ciśnieniu wewnętrznemu) jak i dla osłon, w których stale znajduje się gaz pod ciśnieniem. Nie wchodząc w szczegółowy zakres poszczególnych rodzajów badań, należy stwierdzić, że – oprócz standardowych prób, jak oględziny, sprawdzenie wymiarów, czy próba porowatości czerepu ceramicznego – mechaniczną wytrzymałość izolatorów osłonowych sprawdza się przede wszystkim w próbie ciśnieniowej i w próbie na zginanie. Próby wytrzymałości mechanicznej (z wyjątkiem badań wyrobu) wykonuje się po próbie odporności na nagłe zmiany temperatury. W normie nie przewiduje się szczególnych warunków prób wytrzymałości mechanicznej i wszystkie przeprowadza się w temperaturze otoczenia.

Zgodnie z normą [2], próby izolatorów osłonowych na zginanie wykonuje się bez ciśnienia wewnętrznego. Izolator mocuje się do montażowej płyty maszyny probierczej w sposób stosowany w eksploatacji. Siłę zginającą przykłada się do wolnego końca izolatora, tak aby kierunek obciążenia przecinał oś izolatora i był do niej prostopadły. Wynik próby uznaje się za dodatni, jeżeli została osiągnięta założona wartość momentu zginającego (najczęściej znamionowego). Następnie, w celu określenia rzeczywistej wytrzymałości badanego izolatora osłonowego, obciążenie zginające zwiększa się aż do zniszczenia izolatora.

Jest rzeczą niezwykle ważną dla uznania wyniku próby mechanicznej za dodatni, aby obciążenie znamionowe nie spowodowało uszkodzeń izolatora osłonowego, a w szczególności pęknięć części ceramicznej (w tym również odprysków porcelany na zewnętrznych jej krawędziach od strony zamocowania) i uszkodzeń spoiwa. Okucia również nie powinny ulec pęknięciu, choć dopuszcza się ich plastyczne odkształcenia.

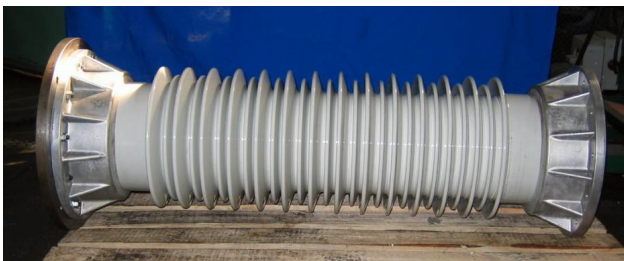
Przedmiot badań

Do badań przeznaczono 2 sztuki izolatorów osłonowych typu **PWME-110B0** (wyróżnik oznaczenia przyjęty przez producenta; międzynarodowa norma dotycząca podziału i oznaczeń izolatorów osłonowych jest obecnie w fazie projektu roboczego). Części izolacyjne izolatorów wykonano z porcelany elektrotechnicznej rodzaju C130

i pokryto jasnoszarym szkliwem, a ich końce były gryskowane. Do końców części ceramicznych zamontowano spoiwem cementowym metalowe okucia wykonane ze stopu aluminium. Izolatory wyprodukowano w ZPE ZAPEL S.A. w Boguchwale. Dla potrzeb badań izolatory oznaczono numerami **1/02/05** i **2/02/05**. Zgodnie z przedstawioną dokumentacją, główne znamionowe parametry techniczne izolatorów wynosiły:

- całkowita wysokość 1291 mm
- zewnętrzna średnica części ceramicznej 360 mm
- wewnętrzna średnica części ceramicznej 210 mm
- minimalna droga upływu 2850 mm
- znamionowa wytrzymałość na zginanie 20 kN
- masa 128 kg

Zmierzone wymiary izolatorów były zgodne z deklarowanymi przez producenta. Jeden z przeznaczonych do badań izolatorów osłonowych pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Widok izolatora osłonowego typu PWME-110B0

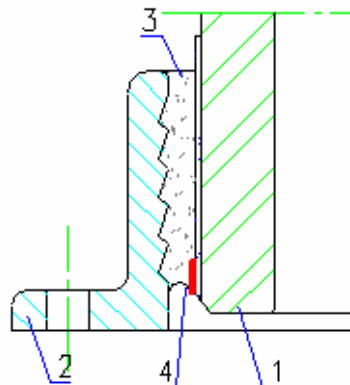
Jak zaznaczono we wstępie, na izolator osłonowy działa w eksploatacji złożony układ obciążeń. Zakładając pracę izolatora w temperaturze otoczenia rzędu $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, należało także uwzględnić naprężenia wynikające z różnych wartości współczynników rozszerzalności cieplnej zastosowanych materiałów. Biorąc pod uwagę wszystkie źródła naprężeń, o niezawodności izolatora osłonowego, decydować będzie nie tylko rodzaj zastosowanego tworzywa ceramicznego, kształt, wymiary i jakości wykonania części ceramicznej, ale w znacznym stopniu konstrukcja węzła montażowego, czyli układu *ceramika-spoivo-okucie*.

Zaobserwowano, że w izolatorach osłonowych eksploatowanych w niskich temperaturach naprężenia wywołane różnymi skurczami materiałów w węźle montażowym mogą powodować, biegnące w głąb czerepu, pęknięcia przy dolnej krawędzi części ceramicznej, zwane niekiedy pęknięciami dyskowymi. (Przy niewłaściwie dobranych parametrach węzła, pęknięcia takie mogą wystąpić także w wyższych temperaturach.) W celu uniknięcia powstawania takiego zjawiska, w przeznaczonych do badań izolatorach zastosowano następujące rozwiązanie konstrukcyjno-technologiczne węzła montażowego [3]:

- na stykające się ze spoiwem powierzchnie części ceramicznej i okucia nałożono powłoki dylatacyjne z lakieru bitumicznego;
- na dolnej zewnętrznej krawędzi części ceramicznej wykonano fazę o szerokości co najmniej 5 mm;
- powyżej fazy nałożono taśmę bawełnianą, dodatkowo zwiększającą grubość warstwy dylatacyjnej w obszarze końca części ceramicznej. [4]

Wymaganą sztywność węzła montażowego zapewniono również dzięki konstrukcji okucia, dobierając odpowiednią jego wysokość, kształt oraz materiał. Jako podstawowy składnik spoiwa zastosowano szybkostrawny cement portlandzki. Szczegółowy opis wpływu tych parametrów na sztywność i wytrzymałość węzła montażowego

przedstawiono w [3] i [5]. Przekrój tak wykonanego węzła montażowego pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Konstrukcja węzła montażowego izolatora osłonowego typu PWME-110B0 (dostosowanego do pracy w niskich temperaturach)
1 – część ceramiczna, 2 – okucie, 3 – spoiwo, 4 – taśma bawełniana

Opis próby wytrzymałości w niskiej temperaturze

Główną trudnością, na jaką napotkano planując wykonanie próby na zginanie tych izolatorów w temperaturze $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, było znalezienie odpowiedniego stanowiska badawczego. W niektórych ośrodkach wykonywano podobne próby, lecz przy możliwości obniżenia temperatury do $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6]. Zważywszy na gabaryty przeznaczonego do badań izolatora osłonowego (odpowiednia pojemność komory chłodniczej) i wartość temperatury oraz fakt dużej pojemności cieplnej porcelany założono, że schładzanie izolatora mogłoby nastąpić poza maszyną probierczą, a cały eksperyment składałby się wtedy z następujących faz:

- schłodzenie izolatora do temperatury ok. $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ i przetrzymanie go w niej przez co najmniej 6 h;
- wyjęcie izolatora z komory chłodniczej i przetransportowanie na stanowisko badawcze;
- zamontowanie izolatora w maszynie probierczej;
- obciążenie izolatora siłą 20 kN przez 60 s;
- zwiększenie obciążenia zginającego aż do zniszczenia izolatora.

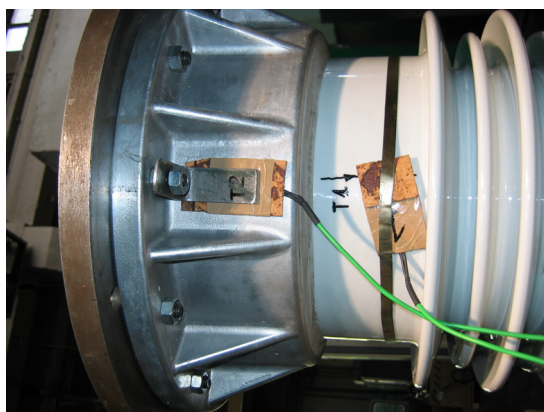
Metoda taka byłaby do zaakceptowania pod warunkiem, że w czasie od wyjęcia izolatora z komory chłodniczej do jego zniszczenia, temperatura żadnej części izolatora nie wzrosłaby powyżej $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Najkorzystniejsze warunki przeprowadzenia takiej próby były w Laboratorium Badawczym Huty Stalowa Wola S.A. Znajdująca się tam komora chłodnicza pozwalała na obniżenie temperatury do ok. $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, a wyposażenie stanowiska badawczego do prób wytrzymałościowych zapewniało szerokie możliwości sterowania i rejestracji przebiegu siły i przemieszczenia.

Zanim przystąpiono do zasadniczych prób, zachowanie się węzła montażowego w czasie zamrażania i narastania temperatury oraz po jego wyjęciu z komory chłodniczej sprawdzono na specjalnie przygotowanym fragmencie dolnej części izolatora osłonowego (z dolnym okuciem). Temperaturę (mierzoną za pomocą termopar na porcelanie i na okuciu) takiej części obniżono do $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nie stwierdzono żadnych uszkodzeń, a od chwili wyjęcia z komory okucie osiągnęło temperaturę $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ po ok. 8 min. Przeprowadzona „na sucho” próba z izolatorem wykazała, że czas całej próby mechanicznej nie przekracza 4 min. Wykonanie próby w takich warunkach uznano więc za uzasadnione.

Przed rozpoczęciem zamrażania izolatora osłonowego przeprowadzono dokładne oględziny ze szczególnym zwróceniem uwagi na czołowe szlifowane płaszczyzny części ceramicznej. Nie stwierdzono żadnych usterek, ani wad. Następnie do kołnierza dolnego okucia izolatora zamocowano śrubami (jednakowy moment dokręcania każdej śruby zapewniono kluczem dynamometrycznym) technologiczną płytę stalową. Płyta wystawała poza krawędź kołnierza na tyle, aby podczas próby wytrzymałości można za nią mocować izolator w uchwytach maszyny probierczej.

Do dolnego okucia i do części ceramicznej (kilka centymetrów od krawędzi okucia) zamocowano (z odpowiednim dociskiem) termopary T1 i T2 – rysunek 3., dzięki którym kontrolowano temperaturę przez cały czas trwania próby (aż do zniszczenia izolatora). Zapis zmian temperatury odtworzono później komputerowo.



Rys. 3. Widok zamocowanych na izolatorze osłonowym termopar (od strony dolnego okucia)

W celu zminimalizowania wzrostu temperatury izolatora po późniejszym jego wyjęciu z komory termicznej, dolny węzeł montażowy i prawie całą część ceramiczną izolatora owinięto tzw. folią bąbelkową.

Siłownik urządzenia probierczego ustawiono pionowo, tak aby było możliwe przyłożenie siły zginającej do krawędzi górnego okucia. Do układu sterowania podłączono komputer z kartą pomiarową umożliwiającą rejestrację przebiegu siły i przemieszczenia górnego okucia przez cały czas trwania próby.

Przygotowany do zamrożenia izolator umieszczono w komorze termicznej. Przewody od termopar wyprowadzono na zewnątrz komory i podłączono do miernika temperatury. Po osiągnięciu przez część ceramiczną i okucie temperatury ok. $-66\text{ }^{\circ}\text{C}$, izolator pozostawiono w komorze termicznej jeszcze przez ok. 6 godzin. Następnie izolator wyjęto z komory termicznej i po możliwie szybkim, tak aby zmiany temperatury był jak najmniejsze, przetransportowaniu go na stanowisko badawcze i zamontowano do przystawki maszyny wytrzymałościowej. Siłą zginającą przyłożono do kołnierza górnego okucia prostopadle do osi izolatora. Narastanie siły wynosiło około $0,5\text{ kN/s}$. Po osiągnięciu siły 20 kN (znamionowa wytrzymałość mechaniczna tego izolatora przyjęta jako obciążenie probiercze) utrzymano ją przez ok. 60 s , a następnie obciążenie zwiększano, aż do zniszczenia izolatora. Widok stanowiska badawczego z zamontowanym do prób izolatorem pokazano na rysunku 4. Zgodnie z oczekiwaniami, czas od chwili wyjęcia izolatora z komory chłodniczej do momentu jego zniszczenia nie przekroczył 4 min . Temperatura otoczenia wynosiła ok. $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

W ten sam sposób przeprowadzono próbę na obydwóch izolatorach.



Rys. 4. Izolator osłonowy zamontowany na stanowisku badawczym tuż przed rozpoczęciem próby (po wyjęciu z komory zamrażania)

Zmiany temperatury w czasie prób podano w tabeli 1, a uzyskane wartości siły niszczącej – w tabeli 2.

Tabela 1. Zmiany temperatury w czasie próby

Faza próby	Izolator osłonowy nr 1/02/05		Izolator osłonowy nr 2/02/05	
	część ceramiczna	dolne okucie	część ceramiczna	dolne okucie
	temperatura [°C]			
Przed wyjęciem z komory zamrażania	-67,3	-68,3	-67,3	-67,3
Rozpoczęcie obciążania siłą probierczą	-65,9	-63,6	-64,4	-61,3
Rozpoczęcie próby niszczącej	-65,0	-59,9	-63,4	-58,8

Jak wynika z danych zamieszczonych w tablicy 1, temperatura rosła na tyle wolno, że rozpoczęcie próby niszczącej nastąpiło w pobliżu $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zniszczenie izolatora, w każdym przypadku następowało po ok. 20 s , a temperatura okucia nie wzrosła powyżej $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (część ceramiczna nagrzewała się znacznie wolniej).

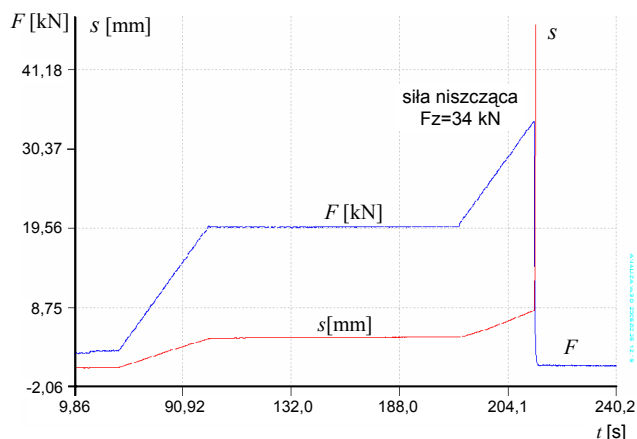
Tabela 2. Wyniki prób wytrzymałości mechanicznej

Numer izolatora osłonowego	1/02/05	2/02/05
Czas do osiągnięcia obciążenia probierczego 20 kN	40 s	
Czas utrzymania obciążenia probierczego	60 s	
Wynik próby obciążeniem probierczym	dodatni	
Wynik próby niszczącej	31 kN	34 kN

W obydwóch przypadkach zniszczenie części ceramicznej nastąpiło poniżej krawędzi dolnego okucia. Po przeprowadzeniu oględzin przełamów nie stwierdzono w nich żadnych wad czy usterek.

Po zdjęciu płyty z kołnierza dolnego okucia przeprowadzono również oględziny szlifowanej powierzchni czołowej części ceramicznej. W żadnym izolatorze nie stwierdzono pęknięć ani odprysków tworzywa. Nie stwierdzono również wykruszenia spoiwa cementowego ani jego pęknięć.

Na rysunku 5 przedstawiono komputerowo zarejestrowany w czasie próby przebieg zmian siły zginającej i przemieszczenie górnego końca izolatora nr 2/02/05.



Rys. 5. Zarejestrowany przebieg zmian siły F i przemieszczenia s dla izolatora osłonowego nr 2/02/05

Podsumowanie

Przeprowadzone badania mechanicznej wytrzymałości ceramicznych izolatorów osłonowych w ujemnych temperaturach wykazały, że próbę taką można wykonać zamrażając izolator w osobnej komorze chłodniczej, a następnie przenosząc go na stanowisko probiercze. Warunkiem efektywności próby jest krótki czas jej przeprowadzenia. W czasie próby bezwzględnie należy kontrolować temperaturę węzła montażowego (część ceramicznej i okucia). Wskazana jest również rejestracja przebiegu siły i przemieszczenia.

Badania wykazały, że właściwie zaprojektowany i wykonany izolator osłonowy zachowuje swoje właściwości wytrzymałościowe z „dobrym zapasem” w stosunku do parametrów znamionowych. Należy jednak zaznaczyć, że

zniszczenie tego typu izolatorów osłonowych badanych w warunkach normalnych (20 °C) następowało przy sile zginającej między 40 kN a 50 kN. Tak więc podczas eksploatacji w ujemnych temperaturach może wystąpić obniżenie się rzeczywistej wytrzymałości izolatora. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że mimo zmniejszenia, ma ona nadal wystarczający zapas.

LITERATURA

- [1] PN-E-02051:2002, Izolatory elektroenergetyczne – Terminologia, klasyfikacja i oznaczenia
- [2] IEC 62155:2003, Hollow pressurized and unpressurized ceramic and glass insulators for use in electrical equipment with rated voltages greater than 1000 V
- [3] Gnatek A., Sobczyk M., Problematyka wytrzymałościowa węzłów montażowych izolatorów wsporczych i aparaturowych, VI Konferencja – Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce – NIWE'2000, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Zeszyt 36, seria Konferencje nr 11, Wrocław 2000
- [4] Catalog No. 91, Technical guide NGK Insulators Ltd 1974.
- [5] Bielecki J., Drozd A., Współczesne tendencje w projektowaniu i technologii porcelanowych izolatorów wysokonapięciowych, V Konferencja – Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce – NIWE'97, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Zeszyt 32, seria Konferencje nr 9, Wrocław 1997
- [6] Jerzmański D., Stankiewicz J., Ocena właściwości mechanicznych napowietrznych izolatorów wysokonapięciowych na podstawie badań termomechanicznych, VI Konferencja – Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce – NIWE'2000, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Zeszyt 36, seria Konferencje nr 11, Wrocław, 2000.

Autorzy: mgr inż. Jerzy Bielecki, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, e-mail: jerzy.bielecki@ien.com.pl; mgr inż. Andrzej Gnatek, Zakłady Porcelany Elektrotechnicznej ZAPEL S.A., ul. Techniczna 1, 36-040 Boguchwała, e-mail: andrzej.gnatek@zapel.com.pl