

Monolityczny izolator wsporczy z kompozytu ceramiczno-polimerowego

Streszczenie. Przewiedziono konstrukcję i podstawowe parametry eksploatacyjne monolitycznego izolatora wsporczo wykonanego z kompozytu ceramiczno-polimerowego (polimerobetonu) według nowatorskiej technologii promieniowego formowania wirowego. Omówiono wyniki wybranych testów elektrycznych i mechanicznych, przewidzianych w zakresie badań konstrukcyjnych oraz prac technologicznych, nowego typu izolatora przeznaczonego do pracy w warunkach napowietrznych. Na podstawie analizy dotychczasowych wyników badań prognozuje się, że opracowana nowatorska konstrukcja i technologia wytwarzania, w najbliższej perspektywie, pozwoli na uruchomienie produkcji monolitycznych izolatorów z kompozytu ceramiczno-polimerowego. W pierwszym etapie przewidziano produkcję izolatorów stacyjnych (wnętrzowych i napowietrznych), a w niedalekiej przyszłości również wsporczych oraz wiszących izolatorów do napowietrznych linii elektroenergetycznych.

Abstract. This paper presents the construction and the basic performance parameters of the monolithic insulator made of ceramic-polymeric composite (polymer concrete) based according to innovative technology of radial vortex forming. The chosen electrical and mechanical tests' results for the new type of insulator designed to operate in overhead conditions provided for the study and technological work were presented. By analysis of the received results is predicted to introduce the monolithic insulator made of ceramic-polymeric composite made on proposed method soon. In the first stage of the work will be production of the envisaged substation insulators (operate in indoor and overhead conditions), and the next steps will be post-insulators, and string insulators for overhead lines (**The post monolithic insulator made of the ceramic-polymeric**).

Słowa kluczowe: izolatory, ceramika polimerowa, beton polimerowy

Keywords: electrical insulators, ceramic-polymeric, polymer concrete

Wstęp

Kompozyty ceramiczno-polimerowe (CP) do zastosowań elektrotechnicznych, określane także jako: elektrotechniczne betony polimerowe, elektroizolacyjne betony polimerowe, polimerobeton, (ang. *polymer concrete, polymer ceramic material*), rozpoczęto wykorzystywać już w latach 60-70 ubiegłego stulecia, a izolatory z tych materiałów są eksploatowane obecnie w elektroenergetyce [1-11].

Materiały ceramiczno-polimerowe są stosowane do produkcji różnego typu średnio i wysokonapięciowych izolatorów wewnętrznych i napowietrznych, oraz izolatorów przepustowych do turbogeneratorów [1-3, 9-11]. Materiały CP znalazły również zastosowanie przy produkcji przekładników prądowych, jako obudowy ograniczników przepięć, a nawet przy wykonywaniu transformatorów o izolacji suchej [11]. Izolatory te zostały zainstalowane na liniach przesyłowych w wielu krajach: USA, Brazylia, Tajlandia, Indie, Tajwan, Anglia oraz Polska (linia średniego napięcia 20 kV, rejon przemysłowy Głogowa) [1, 2, 10, 11].

Od wielu lat w Instytucie Elektrotechniki, Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego we Wrocławiu, wykonywane są badania nad opracowaniem oryginalnej receptury kompozytu typu CP, jako dielektrycznej kompozycji konstrukcyjnej dla urządzeń i wyrobów przeznaczonych dla elektroenergetyki. Wyniki dotychczasowych prac zostały wykorzystane do produkcji izolatorów monolitycznych, a także izolatorów z rdzeniem polimerobetonowym i kłozkami wykonanymi z elastomeru silikonowego (rysunek 1).



Rys 1. Przykłady opracowanych konstrukcji izolatorów z kompozytu ceramiczno-polimerowego [opr. własne]

Jak wykazały dotychczasowe badania i doświadczenia eksploatacyjne izolatory z polimerobetonu są odporne na długotrwałe narażenia elektryczne, mechaniczne i termomechaniczne zachodzące podczas ich eksploatacji. Jak przedstawiono w publikacji [11], izolatory stacyjne z CP sprawdzają się również w obszarach, w których występują wstrząsy sejsmiczne. Powierzchnia izolatora nie wymaga dodatkowego szklwienia, ma stosunkowo dobre właściwości hydrofobowe, dobrze sprawdza się w strefach o dużym zapyleniu (zabrudzeniu) i jest odporna na długotrwałe działanie łuku elektrycznego (wyładowania pelzne i erozja nie tworzą ścieżek przewodzących) [6, 7, 9]. Z punktu technologicznego istotne jest także to, że okucia można montować bezpośrednio w materiale CP podczas wytwarzania izolatora [5].

Wydają się, że dzięki swym dobrym właściwościom elektroizolacyjnym, stosunkowo wysokiej wytrzymałości mechanicznej na rozciąganie i zginanie, niskim kosztem materiałowym oraz energooszczędności procesu produkcji, izolatory wykonane z kompozytu ceramiczno-polimerowego stanowią alternatywę do izolatorów: porcelanowych, epoksydowych, kompozytowych (rdzeń żywiczny zbrojony włóknem mineralnym) w osłonie z termoplastu. Uruchomienie seryjnej produkcji izolatorów stanowić będzie odpowiedź na oczekiwania szeroko rozumianego rynku elektroenergetycznego [1, 2, 3, 10, 11].

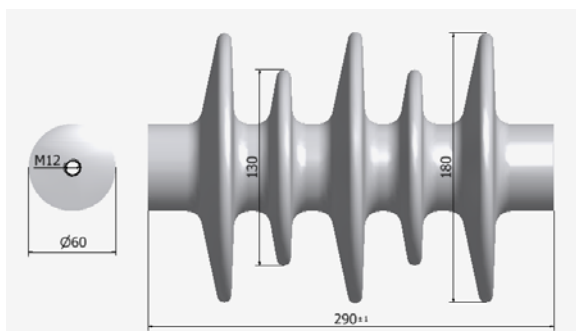
Kompozyt ceramiczno-polimerowy

W skład kompozytu ceramiczno-polimerowego (CP) wchodzi napelnicze nieorganiczne o dobranej granulacji (stanowiące 60-90% wagowych kompozycji) oraz lepiszcze organiczne o zawartości 10-40% wagowych. Lepiszcze składa się z 90-97% wagowych metakrylanu alkilu, zwłaszcza metakrylanu metylu. Dodaje się również: 3-8% wagowych regulatora lepkości w postaci kopolimeru szczepionego na bazie mieszaniny metakrylanu metylu i akrylanu butylu z dodatkiem akrylanu etylu i z 1-3% wagowych środków sieciujących, przyspieszających, sprzęgających i inicjujących. Po utwardzeniu kompozycji (polimeryzacji) otrzymuje się materiał kompozytowy

charakteryzujący się wysoką odpornością na starzenie i oddziaływanie czynników atmosferycznych, w tym UV, o wysokiej odporności na działanie łuku elektrycznego i prądów peizających. Dzięki czemu materiał ten może być stosowany do wytwarzania elementów elektroizolacyjnych stosowanych wewnątrz, a także na zewnątrz pomieszczeń.

Wytwarzanie izolatorów z kompozytu ceramiczno-polimerowego w technologii formowania wirowego

Dotychczasowa technologia wytwarzania monolitycznych izolatorów z ceramiki polimerowej (izolatory CP) oparta była na ich odlewaniu w jednorazowych cienkościennych formach z tworzyw sztucznych, polipropylenowych (PP) lub polietyleno-tereftalanowych (PET) [1, 2, 4-7]. W formach tych uzyskuje się izolatory o stosunkowo małych kloszach (rys. 1), co przekłada się na trudności w uzyskaniu odpowiedniej wytrzymałości elektrycznej w deszczu oraz wymaganej drogi upływu i wykorzystaniu tych izolatorów w warunkach napowietrznych (zwłaszcza w wyższych strefach zabrudzeniowych) tak, aby spełnione były wymagania ogólnie przyjętych standardów [12-17]. W celu sprawdzenia zmodyfikowanej technologii wykonania izolatora CP, podjęto się próby opracowania konstrukcji monolitycznego wsporczo izolatora stacyjnego z CP o napięciu znamionowym 20 kV (AC, 50 Hz) i o właściwościach umożliwiających zastosowanie go w pierwszej, drugiej i warunkowo w trzeciej strefie zabrudzeniowej (bez konieczności stosowania dodatkowej hydrofobowej warstwy zewnętrznej). W oparciu: o stan wiedzy w literaturze przedmiotu [3,9, 10-12, 18], własne doświadczenia technologiczne [1, 2, 4-8] oraz uwzględniając wymagania norm przedmiotowych [13-17] zaprojektowano monolityczny izolator wsporczy roboczo oznaczony PIA-4-280-655 (gdzie: PIA - polimerobetonowy izolator aparatowy, 4 - wytrzymałwane obciążenie zginające w kN, 280 - długość całkowita w mm, 655 - minimalna droga upływu w mm). Wizualizację izolatora przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wizualizacja opracowanego izolatora z ceramiki polimerowej typu PIA-4-280-655 [opr. własne]

Jak wykazały analizy i wstępne próby wykonanie prototypowego izolatora typu PIA-4-280-655 jest bardzo trudne przy wykorzystaniu form z tworzyw sztucznych i dotychczasowej technologii (zagęszczania wibracyjnego kompozycji CP) [5]. Dlatego dobrano nowe materiały konstrukcyjne, opracowano projekt i na jego podstawie wykonano prototypową formę. Ze względu na wymagania opracowanej nowatorskiej technologii formowania wirowego, formę wykonano, jako dwudzielną o symetrycznych blokach. Ponadto, oba bloki są złożone z segmentów, co czyni formę w pełni rozbieralną (ułatwia to czyszczenie i przygotowanie powierzchni do formowania kolejnych egzemplarzy oraz umożliwia stosunkowo łatwe wprowadzanie modyfikacji w konstrukcji izolatora). Bardzo ważnym etapem prac, ze względu na specyfiką

opracowanej kompozycji polimerowej (silna adhezja, mała lepkość żywicy, właściwości „ścierne” wypełniacza) było dobranie odpowiednich środków rozdzielających i poślizgowych do przygotowania powierzchni formy przed właściwym procesem formowania. Zarówno opracowana forma, jak i stanowisko do promieniowego formowania wirowego izolatorów stanowią prototypowe rozwiązania technologiczne.

Integralnymi elementami stanowiska są: wirówka stołowa i automatyczna szafa sterująca. Wirówka umożliwia osiowe i promieniowe wirowe formowanie izolatorów. Szafa sterująca umożliwia zdalne prowadzenie procesu zgodnie ze wcześniej przyjętymi parametrami (ilość cykli wirowania, prędkość i czas wirowania w poszczególnym cyklu). Zasadniczym etapem prac było dobranie optymalnych parametrów technologicznych formowania wirowego izolatora, takich jak: prędkość wirowania, czas wirowania, sposób podawania kompozycji, w tym wielkości porcji mieszanki. Parametry te mają wpływ na odpowietrzenie mieszanki polimerobetonu, dokładne wypełnienie formy kompozycją oraz jej zagęszczenie, a tym samym na wytrzymałość mechaniczną otrzymanego izolatora.

Eksperymentalne dobranie parametrów promieniowego formowania wirowego pozwoliło na uzyskanie izolatorów z kompozytu CP o powtarzalnych parametrach technicznych i gładkiej powierzchni zewnętrznej.

Zachęcające wyniki prób nad opracowaniem technologii formowania wirowego izolatorów z kompozytu ceramiczno-polimerowego skłoniły autorów do wykonania prototypowej serii izolatorów typu PIA-4-280-655.

Wybrane badania wsporczo izolatora CP typu PIA-4-280-655

Wykonaną partię izolatorów typu PIA-4-280-655, poddano wybranym badaniom elektrycznym i mechanicznym.

Mając na uwadze rodzaj materiału izolatora (monolit z kompozytu ceramiczno-polimerowego) jak i docelowe przeznaczenie izolatora (jako zamiennik obecnie stosowanych izolatorów porcelanowych) wykonano badania w oparciu o znormalizowane wymagania stawiane izolatorom kompozytowym według PN-EN 62231 [17] i izolatorom porcelanowym według PN-EN 60168 [19].

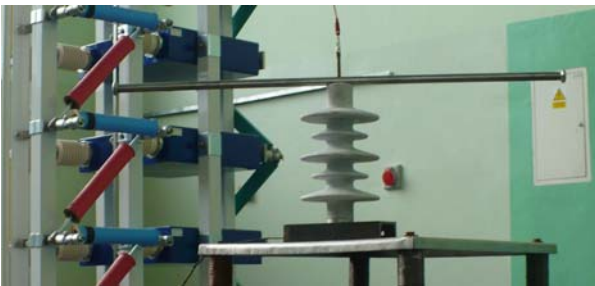
Próba napięciem wytrzymałym udarowym piorunowym na sucho

Próby napięciem udarowym piorunowym wykonano przy użyciu stanowiska firmy Haefely, złożonym z: generatora udarowego typ SGSA 700-35 (700 kV, 35 kJ) wyposażonego w dzielnik napięcia, zdalnego układu sterowniczo-pomiarowego typ GC 223 wraz z oprogramowaniem typu HiAS 743 (do analizy i archiwizacji danych w pamięci komputera). Stanowisko to (rys. 3) jest w pełni zautomatyzowane (parametry próby, wymuszanie i rejestrację prowadzi się z pulpitu układu sterowniczo-pomiarowego). Izolator do badań umieszczono w hali wysokich napięć i kondycjonowano w warunkach otoczenia przez 4 godziny (temperatura 22 ± 3 °C, wilgotność: $50\% \pm 10\%$, ciśnienie 1000 hPa ± 15 hPa).

Następnie wykonano oględziny badanego izolatora. Przed właściwymi badaniami izolator montowano na stanowisku probierczym odwzorowującym warunki pracy i uwzględniającym wymagania normy PN-EN 60168, co pokazano na rysunku 4.



Rys. 3. Stanowisko do wysokonapięciowych prób napięciami udarowymi firmy Haefely [opr. własne]



Rys. 4. Izolator na stanowisku probierczym do prób napięciem udarowym piorunowym [opr. własne]

Badania wytrzymałanego napięcia udarowego piorunowego (1,2/50 μ s) wykonano piętnastoma udarami napięciowymi o wartości szczytowej 170 kV (dla każdej biegunowości), zgodnie z wymaganiami norm [17, 19, 20]. Wyniki sprawdzenia znamionowego napięcia wytrzymałanego udarowego piorunowego na sucho przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki sprawdzenia napięcia wytrzymałanego udarowego piorunowego w deszczu

Typ izolatora	Napięcie wytrzymałwane udarowe piorunowe, kV		Uwagi
	biegunowość		
	„+”	„-”	
PIA-4-28-655	170 \pm 1	170 \pm 1	15 udarów dla każdej biegunowości
	Wynik pozytywny	Wynik pozytywny	

Podczas prób żaden udar nie spowodował zewnętrznego przeskoku między okuciami. Nie wystąpiło przebicie żadnej części izolatora. Należy, zatem uznać, że badane izolatory przeszły sprawdzenie napięcia wytrzymałanego udarowego piorunowego na sucho dla biegunowości dodatniej i ujemnej z wynikiem pozytywnym [12, 13, 17, 19].

Próba napięciem wytrzymałwanym przemiennym o częstotliwości sieciowej w deszczu

Badania napięcia wytrzymałwanego przemiennego o częstotliwości sieciowej 50 Hz w deszczu wykonano bezpośrednio po próbach udarowym napięciem piorunowym. Do badań wykorzystano wysokonapięciowe stanowisko probiercze firmy TUR (napięcie probiercze do 150 kV, moc 100 kVA) oraz probierczą komorę deszczową do wytwarzania sztucznego deszczu o znormalizowanych parametrach. Badania wykonano zgodnie z wymaganiami norm [17, 19, 20].

Na rysunku 5 przedstawiono izolator w komorze deszczowej i widok stanowiska probierczego podczas próby.



Rys. 5. Izolator w komorze deszczowej podczas próby napięciowej i użyte wysokonapięciowe stanowisko probiercze wraz z pulpitem sterowniczym [opr. własne]

Do badanego izolatora znajdującego się w komorze pod deszczem przykładano napięcie probiercze o wartości skutecznej 70 kV i utrzymywano je przez 1 minutę. Po osiągnięciu napięcia 70 kV zaobserwowano wyładowania niezupełne „ślizgowe” rozwijające się od okucia dolnego (rys. 5). Niemniej jednak wynik tej próby należy uznać za pozytywny ponieważ podczas badania nie wystąpił przeskok, nie wystąpiło przebicie izolatora ani żadnego jego elementu [12, 13, 17, 19].

Próba odporności na prądy pelzające i erozję

Z serii prototypowych izolatorów wybrano losowo dwa i poddano je 1000 h próbie starzenia klimatycznego w mgie solnej, jeden izolator zamontowano pionowo drugi poziomo. Izolatory starzono pod napięciem częstotliwości sieciowej o wartości 19,3 kV \pm 0,25 kV (zgodnie z normą PN-EN 62217 [21] jest to wynik dzielenia drogi upływu wyrażonej w milimetrach przez 34,6 co odpowiada jednostkowej drodze upływu 20 mm/kV). Zastosowano specjalny wysokonapięciowy układ probierczy, który wyposażono w zabezpieczenie nadprądowe pozwalające na wyłączenie zasilania w przypadku mogących wystąpić w trakcie próby zwarć i wyładowań o prądach upływu większych od 250 mA (wartości skutecznej po stronie wysokiego napięcia). Wysokonapięciowy układ probierczy przy obciążeniu prądem o wartości skutecznej 250 mA wykazywał spadek napięcia nie większy niż 5% wartości zadanej. Wyznaczona, na podstawie danych znamionowych izolatora i w oparciu o wytyczne podane w normie PN-EN 62217, zawartość NaCl w wodzie demineralizowanej wynosiła 4 kg/m³ (gdy stosunek drogi upływu l do drogi przeskoku $A/l > 3$ i średnica rdzenia 50 mm $< \phi < 150$ mm). Wymagany strumień solanki o wydatku 1,0 dm³/h i rozmiarze kropeł 5-10 μ m zapewniał specjalny układ rozpylania wyposażony w dyszę SUF1 firmy Spraying System Co (natężenie przepływu rozpylanej mgły solnej - solanki w ciągu godziny powinno wynosić ok. 0,4 dm³ na każdy m³ komory).

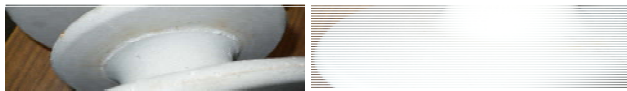
Temperatura podczas badania we wnętrzu komory wynosiła 23°C + 5°C, a całkowity czas starzenia klimatycznego w mgie solnej wynosił 1004 godziny.

W trakcie trwania próby starzenia klimatycznego w mgie solnej prowadzono ciągłą rejestrację pomiaru prądu upływu oraz pojawiających się okresowo prądów „ślizgowych” (wyładowań niezupełnych). Zarejestrowane wybrane maksymalne wartości prądu wyładowań niezupełnych i prądu upływu zestawiono w tabeli 2.

Po zakończeniu próby starzenia klimatycznego izolatory typu PIA-4-280-655 poddano oględzinom i wykonano dokumentację fotograficzną, a przykładowe fotografie zamieszczono na rysunku 6.

Tabela 2. Wybrane maksymalne wartości prądu upływu zarejestrowane podczas starzenia klimatycznego w mgle solnej pod napięciem 19,3 kV.

Czas od rozpoczęcia starzenia, h	Max. prąd wyładowań niezupełnych, mA	Max. prąd upływu, mA
3	5,2	1,15
498	60,4	2,34
999	63,50	3,18



Rys. 6. Widok erozji na powierzchni izolatorów po 1000 h narażenia [opr. własne]

W wyniku oględzin: nie stwierdzono wypalonych ścieżek, występowania śladów pełnych, nie wystąpiła erozja na wskroś, nie stwierdzono również pęknięć w strukturze izolatora. Rdzeń izolatora i klosze nie zostały przebite. Zaobserwowano natomiast stosunkowo niewielką powierzchniową erozję materiału rdzenia i kloszy od strony wewnętrznej dolnej. (patrz lewa fotografia na rysunku 6). Stwierdzono, że erozja jest równomierna na całej powierzchni rdzenia i klosza. Istotne jest, że głębokość erozji w żadnym miejscu kloszy oraz wzdłuż rdzenia, jak i po średnicy nie przekracza 1 mm (norma [21] dopuszcza erozję do 3 mm).

Wobec powyższego i zgodnie z kryterium oceny podanym PN-EN 62217:2013-06 punkt 9.3.3.8 można stwierdzić, że izolatory typu PIA-4-280-655 przeszły próbę starzenia klimatycznego w mgle solnej z wynikiem pozytywnym.

Próba dyfuzji wody

Z rdzeni nośnych prototypowych izolatorów do badań wycięto próbki o wysokości 30 mm, które oczyszczono alkoholem izopropylowym. Następnie próbki umieszczono w szklanym naczyniu z wrzącą dejonizowaną wodą o zawartości 0,1 % NaCl i gotowano przez 100 h (zgodnie z PN-EN 62217 punkt 9.4.2.3).

Po gotowaniu wykonano próbę napięciową przy napięciu probierczym o wartości skutecznej 12 kV zgodnie z PN-EN 62217 punkt 9.4.2.4. Zastosowany system elektrod i parametry wysokonapięciowego układu probierczego były zgodne z wymaganiami norm [19-21]. Wyniki badania dyfuzji wody przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki i ocena próby dyfuzji wody

Lp	Oznaczenie próbek	Prąd upływu, mA	Napięcie, kV	Ocena
1	PIA I	< 1,0	12,0	pozytywna
2	PIA II			pozytywna
3	PIA III			pozytywna
4	PIA IV			pozytywna
5	PIA V			pozytywna
6	PIA VI			pozytywna

Podczas próby napięciowej nie wystąpiło przebicie żadnej próbki i nie zaobserwowano żadnego przeskoku powierzchniowego. Rejestrowany w ciągu całej próby prąd, dla żadnej próbki, nie przekroczył wartości skutecznej 1 mA. Zatem, zgodnie z kryterium oceny podanym w normie PN-EN 62217 punkt 9.4.2.5 izolatory typu PIA-4-280-655 przeszły próbę dyfuzji wody z wynikiem pozytywnym i w badanym zakresie spełniają wymagania normy [17].

Próba penetracji barwnikiem

Próbę dyfuzji wody przeprowadzono na 10 próbkach o wysokości 10 mm wyciętych z rdzeni nośnych prototypowych izolatorów, które wygładzono drobnym papierem ściernym i oczyszczono alkoholem izopropylowym. Następnie próbki umieszczono w szklanym naczyniu na stalowych kulkach zalanych 1% roztworem barwnika w alkoholu metylowym (2-3 mm nad poziom kulek).

Próba polegała na wizualnej ocenie penetracji barwnika na wskroś do górnej krawędzi próbek i pomiarze czasu penetracji barwnika (czas obserwacji do 15 minut). Próbę penetracji barwnikiem wykonano zgodnie z pkt 9.4.1 normy PN-EN 62217.

Zgodnie z kryterium oceny podanym w normie PN-EN 62217 punkt 9.4.1.2 materiał, z którego wykonano izolatory typu PIA-4-280-655 przeszedł próbę penetracji barwnikiem z wynikiem pozytywnym i w badanym zakresie spełnia wymagania normy [17].

Próba wytrzymałości na zginanie

Zgodnie z wymaganiami norm [16, 17] obciążenie mechaniczne niszczące izolator powinno być większe od znamionowej wytrzymałości na zginanie (zadeklarowaną przez producenta klasą wytrzymałości izolatora).

Próbę wytrzymałości na zginanie wykonano w oparciu o punkt 9.3.1 PN-EN 62231:2008 i punkt 5.2.4 normy PN-EN 60168:1999 na maszynie wytrzymałościowej. Wyniki prób zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki próby wytrzymałości na zginanie izolatorów

Oznaczenie izolatora	Obciążenie wytrzymałowe, kN	Obciążenie niszczące, kN	Ocena
1	4,0	5,5	pozytywna
3		5,1	pozytywna
5		5,2	pozytywna

Izolatory poddane próbie wytrzymałości na zginanie wytrzymały obciążenie równe 4,0 kN, a obciążenie niszczące było większe od 5,0 kN. Zatem uzasadnione wydaje się stwierdzenie, że izolator typu PIA-4-280-655 może odpowiadać klasie H4-170 zgodnie z wyróżnikami oznaczenia izolatora wsporczego tablica III normy PN-IEC 60273 [16].

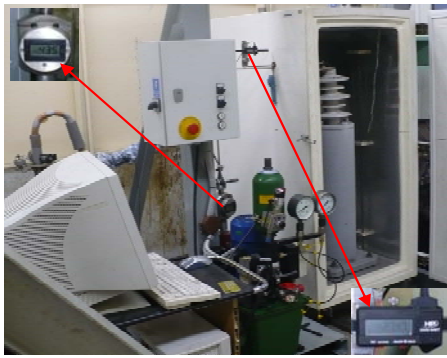
Narażenia termomechaniczne

Kondycjonowanie termomechaniczne badanego izolatora wykonano na stanowisku do przeprowadzania prób termomechanicznych wyposażonym w oprzyrządowanie do akwizycji, w pamięci komputera, podstawowych parametrów procesu.

Kondycjonowanie termomechaniczne przeprowadzono zgodnie z punktem 8.2.4 normy PN-EN 62231, tj. badany obiekt zamocowano w pozycji pionowej, dolnym okuciem do płyty układu mocowania, a obciążenie zginające przyłożono prostopadle do osi wzdłużnej badanej próbki.

Widok stanowiska do prób termomechanicznych, wraz z zamontowanym izolatorem, przedstawiono na rysunku 7.

Obciążenie zginające zadawał układ hydrauliczny z siłownikiem, sterowany mikroprocesorowym presostatem, a przyłożoną siłę mierzono przy pomocy cyfrowego tensometru. Izolator był poddany statycznym długotrwałym obciążeniom zginającym wynoszącym 4,3 kN. Oszacowana względna niepewność zadanego obciążenia zginającego była mniejsza niż $\pm 2,5\%$.



Rys.7. Widok stanowiska do prób termomechanicznych [opr. własne]

Zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 62231 kondycjonowanie termomechaniczne przeprowadzono w dwóch 24. godzinnych cyklach. Na jeden 24. godzinny cykl składają się okresy: gorący, zimny i przejściowy (grzanie, chłodzenie). Temperatura okresów gorących wynosiła +50°C, a zimnych -35°C i była utrzymywana co najmniej przez 8 godzin. Pod koniec pierwszego cyklu zmieniano kierunek przyłożenia obciążenia do izolatora na przeciwny (podczas przechodzenia z okresu ciepłego do zimnego i gdy temperatura osiągała temperaturę otoczenia).

W trakcie próby rejestrowano w sposób ciągły temperaturę procesu, a wyniki zapisywano w pamięci komputera. Oszacowana niepewność utrzymywania temperatury na stałym poziomie w okresach kondycjonowania była mniejsza niż 3K. W trakcie badania wykonano również pomiar i ciągłą rejestrację ugięcia izolatora w stosunku do pozycji wyjściowej, zarówno podczas przykładania i utrzymywania obciążenia zginającego, jak i po jego zdjęciu (pomiar po czasie nie krótszym niż 5 minut). Do pomiaru ugięcia zastosowano układ cięgnowy zespolony z głębokościomierzem cyfrowym (rys. 7). Maksymalne, zmierzone odkształcenia dla poszczególnych cykli temperaturowych w trakcie kondycjonowania termomechanicznego izolatora podano w tabeli 5.

Tabela 5. Zarejestrowane maksymalne wartości odkształceń podczas kondycjonowania termomechanicznego izolatora typu PIA-4-280-655

Maksymalne zarejestrowane odkształcenie	okres I temp. - 35°C	okres II temp. +50°C	okres III temp. - 35°C	okres IV temp. +50°C
Pod obciążeniem 4,3 kN	25,87 mm	26,79 mm	26,19 mm	27,47 mm
Odształcenie trwałe po zdjęciu obciążenia, pomiar po czasie nie krótszym niż 5 minut	-	1,55 mm	-	2,16 mm

Po narażeniu termomechanicznym izolatora nie stwierdzono widocznych mechanicznych uszkodzeń takich jak pęknięcia czy rozwarstwienia, a trwałe odkształcenia wyniosły mniej niż 1% wysokości.

Badany izolator typu PIA-4-280-655 przeszedł wstępne narażenie termomechaniczne z wynikiem pozytywnym i w badanym zakresie spełnia wymagania normy [17].

Podsumowanie

W wyniku realizacji prac koncepcyjnych, konstruktorskich, technologicznych oraz optymalizacyjnych

opracowano nowatorską konstrukcję izolatora stacyjnego typu PIA-4-280-655 wytworzonego w procesie promieniowego formowania wirowego z nowoopracowanego kompozytu ceramiczno-polimerowego. Opracowany kompozyt nie zawiera substratów zakwalifikowanych jako materiały niebezpieczne, a więc nie stanowi zagrożenia dla środowiska naturalnego. Ponadto opracowana technologia produkcji jest mniej energochłonna w stosunku do powszechnie stosowanych technologii produkcji porcelanowych izolatorów, wymagających bardzo wysokich temperatur spiekania.

Należy zaznaczyć, że wykonane prace optymalizacyjne, w ramach realizacji projektu, doprowadziły do uzyskania produktu finalnego o planowanych, a nawet lepszych parametrach niż zakładano. Reasumując, na podstawie dotychczas wykonanych prac, można stwierdzić że:

- Opracowana technologia wirowego, promieniowego formowania monolitycznych izolatorów z kompozytu ceramiczno-polimerowego może okazać się odpowiednia do produkcji różnego typu izolatorów (przeznaczonych do pracy w warunkach napowietrznych i wnetrzowych) w elektroenergetycznych liniach i stacjach.
- Konstrukcja izolatora typu PIA-4-280-655 spełnia wymagania stawiane tego typu izolatorom, co potwierdziły zaprezentowane wyniki badań.
- Opracowana konstrukcja izolatora typu PIA-4-280-655 może stanowić alternatywę dla, obecnie powszechnie stosowanych, porcelanowych wsporczych izolatorów stacyjnych średniego napięcia (do 30 kV).
- Konstrukcję i technologię wytwarzania objęto ochroną patentową [22].

Badania finansowane w ramach realizacji projektu: **NCBiR Program Badań Stosowanych Nr PBS1/B4/1/2012.**

LITERATURA

- [1] Świerzyzna Z., Paściak G., Mazurek B., Olejnik J., *Modification of the composition and technology of the processing of ceramic-polymer insulators*, Materials Science-Poland, Vol. 27, No. 4/2, 2009.
- [2] Olejnik J., Skoczylas M., Kwiatkowski K., *Polskie izolatory z ceramiki polimerowej*, Urządzenia dla energetyki - 30.05. 2008, dostępny on-line http://www.urzadzenia dlaenergetyki.pl/index.php?option=com_content&task=view&id=147, stan na styczeń 2014.
- [3] Perry E. R., Torres, R., *Generator Bushing Maintenance: Designs & Renovation*, Power Engineering, Nov 2006, Vol. 110 Issue 11, p. 96, 2006.
- [4] Gasperowicz A., Stankiewicz J., Jerzmański D., Mielcarek W. *Optymalizacja lepszcza organicznego do elektroizolacyjnego betonu polimerowego*, Dokumentacja Techniczna IEI-OTIME, 1995 r.
- [5] Gasperowicz A., Stankiewicz J., W. Błażejowski. *Próby technologiczne otrzymywania izolatorów z betonu polimerowego*, Dokumentacja Techniczna IEI-OTIME, 1996 r.
- [6] Stankiewicz J., Świerzyzna Z., Miernik H. *Niskolepkie żywice metakrylanowe jako materiał na izolatory z polimerobetonu*; Postępy w Elektrotechnologii, 6. Konferencja Naukowa; Jamrozowi Polana 20-22 września 2006
- [7] Gasperowicz A., Traczewski A. *Właściwości mechaniczne prototypów izolatorów napowietrznych z nowego, energooszczędnego materiału kompozytowego*; V Seminarium Techniczne „Materiały i układy elektroizolacyjne w przemyśle” 26-28 kwietnia 2000 r
- [8] Patent RP nr 190300 *Dielektryczna kompozycja konstrukcyjna*. A. Gasperowicz, A. Traczewski, J. Stankiewicz, B. Mundzia, J. Karatowicz. 9 listop. 2005
- [9] Chrzan K.L., Seifert J., *Postępy w konstrukcji i technologii izolatorów kompozytowych*, Postępy w Elektrotechnologii, 6. Konferencja Naukowa; Jamrozowi Polana 20-22 września 2006,
- [10] Gunasekaran M., Duguid T.P., *Polymer concrete high voltage insulation in the UK*, Electrical Insulation, Conference Record of

- the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, June 2-7, 1992.
- [11] Gunasekaran, M. *Polymer concrete: A viable low-cost material for innovative power systems*, Properties and Applications of Dielectric Materials, 1997, Proceedings of the 5th International Conference, Volume 2, Seoul, Korea, 25 -30 May 1997
- [12] Wańkowicz J., Bielecki J., *Warunki techniczne doboru izolatorów kompozytowych do linii średnich napięć i 110 kV*, Wydawca: Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej, Warszawa 2003.
- [13] PN-EN 60071-1:2008 i PN-EN 60071-1:2008/A1:2010, *Koordinacja izolacji. Część 1: Definicje, zasady i reguły*.
- [14] PN-E 06303:1998, *Narażenie zabrudzeniowe izolacji napowietrznej i dobór izolatorów do warunków zabrudzeniowych*
- [15] PN-IEC 815:1998, *Wytyczne doboru izolatorów do warunków zabrudzeniowych* (norma wycofana, na czerwiec 2015 nie podano zamiennika - <http://sklep.pkn.pl/pn-iec-815-1998p.html?options=cart>).
- [16] PN-IEC 60273:2003, *Właściwości wewnętrznych i napowietrznych izolatorów wsporczych do sieci o znamionowych napięciu powyżej 1 000 V*.
- [17] PN-EN 62231:2008, *Kompozytowe wsporcze izolatory stacyjne na napięcia przemiennie powyżej 1000 V do 245 kV- Definicje, metody badań i kryteria oceny*.
- [18] Pohl Z. i inni, *Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [19] PN-EN 60168:1999 i PN-EN 60168:1999/A2:2002, *Badania izolatorów wsporczych wewnętrznych i napowietrznych ceramicznych lub szklanych do sieci o znamionowym napięciu powyżej 1 000 V*.
- [20] PN-EN 60060-1:2011 *Wysokonapięciowa technika probiercza – Część 1: Ogólne definicje i wymagania probiercze*.
- [21] PN-EN 62217:2013-6 *Wnętrzowe i napowietrzne izolatory polimerowe na znamionowe napięcie powyżej 1000 V - Ogólne definicje, metody badań i kryteria oceny wyników*.
- [22] Zgłoszenie patentowe nr P.411411 pt. *Sposób wytwarzania monolitycznych izolatorów z betonu polimerowego i urządzenie do wytwarzania monolitycznych izolatorów*

Autorzy: dr inż. Agnieszka Halama, Instytut Elektrotechniki, Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego We Wrocławiu, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55-61, 50-369 Wrocław, E-mail: halama@iel.wroc.pl; dr inż. Tadeusz Mączka, Instytut Elektrotechniki, Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego We Wrocławiu, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55-61, 50-369 Wrocław, E-mail, t.maczka@iel.wroc.pl; inż. Zbigniew Olech, Instytut Elektrotechniki, Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego We Wrocławiu, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55-61, 50-369 Wrocław, E-mail, z.olech@iel.wroc.pl; dr inż. Grzegorz Paściak, Instytut Elektrotechniki, Oddział Technologii i Materiałoznawstwa Elektrotechnicznego We Wrocławiu, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55-61, 50-369 Wrocław, E-mail: g.pasciak@iel.wroc.pl; mgr inż. Marek Skoczylas, NTI Nowoczesne Techniki Instalacyjne Sp. z o. o., ul. Portowa 1, 67-200 Głogów, mareks@nti.com.pl; mgr inż. Andrzej Wójcik, NTI Nowoczesne Techniki Instalacyjne Sp. z o. o., ul. Portowa 1, 67-200 Głogów, biuro@nti.com.pl