

Nieznormalizowane wymagania i kryteria oceny kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych do sieci 110 kV i 220 kV

Streszczenie. Znormalizowane metody prób kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych sprowadzają się wyłącznie do obciążeń statycznych. W eksploatacji występują jednak zarówno obciążenia statyczne, jak i zmienne. Są to głównie obciążenia zginające. Obciążenia zginające powodują ugięcie izolatorów kompozytowych znacznie większe, niż izolatorów ceramicznych. Stąd konieczność wprowadzenia nieznormalizowanych wymagań w zakresie ich dopuszczalnego ugięcia i odporności na obciążenia zmienne.

Abstract. Standard methods for testing composite station post insulators combine static loads only. However under operation conditions these insulators are subjected to static and variable loads. These are mainly cantilever loads. Bending of composite station post insulator can be much bigger than for ceramic ones. Introduction of non standard tests and requirements for evaluation of permissible bending limits and resistance to variable loads for these insulators is necessary. (**Non standard requirements and criteria for evaluation of composite station post insulators applied to 110 kV and 220 kV electrical power grids.**)

Słowa kluczowe: izolatory kompozytowe, wsporcze izolatory stacyjne, zmęczeniowe próby mechaniczne, prąd zwarcia.

Keywords: composite insulators, station post insulators, fatigue mechanical tests, short-circuit current.

doi:10.12915/pe.2014.10.27

Wprowadzenie

Izolatory kompozytowe należą do grupy izolatorów polimerowych, które są jednym z czterech rodzajów stosowanych obecnie izolatorów elektroenergetycznych, co schematycznie pokazano na rysunku 1.



Rys.1. Podział izolatorów elektroenergetycznych ze względu na rodzaj materiału, z którego wykonano ich część izolacyjną

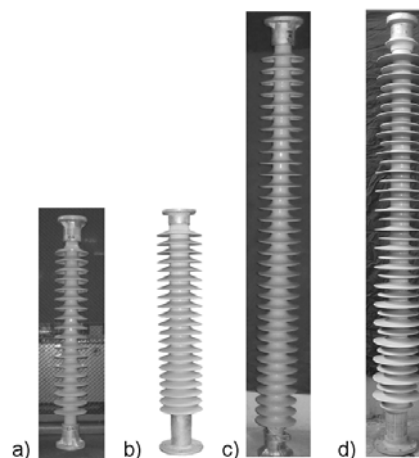
Do podgrupy izolatorów kompozytowych należą również kompozytowe wsporcze izolatory stacyjne. Izolatory te obejmuje norma PN-EN 62231 [1], opracowana jako polska wersja normy IEC 62231 i EN 62231. Zakres tej normy ogranicza się do izolatorów stosowanych w sieciach o najwyższym dopuszczalnym napięciu od powyżej 1 kV do 245 kV włącznie. Norma wyrobu dla tych izolatorów jest w IEC w fazie opracowania [2]. W odróżnieniu od dość szczegółowo znormalizowanych ceramicznych izolatorów wsporczych, niektóre właściwości kompozytowych izolatorów wsporczych nie zostaną w niej uwzględnione. Należy do nich dopuszczalne ugięcie przy obciążeniu zginającym oraz odporność na zmienne obciążenia zginające. Opracowanie takich nieznormalizowanych wymagań i kryteriów oceny było właśnie celem badań przeprowadzonych w Instytucie Energetyki.

Jedną z najważniejszych właściwości izolatorów wsporczych jest ich mechaniczna wytrzymałość na zginanie. W normie [1] przewidziano szereg prób mechanicznych, jednak wyłącznie przy obciążeniu statycznym. Natomiast w eksploatacji nie występują jedynie obciążenia statyczne. Na przykład przy zwarcia oddziałują na izolatory wsporcze dynamiczne i cykliczne siły zginające [3] często przewyższające ich znamionowe obciążenie zginające SCL (ang. *Specified Cantilever Load*) [1]. Takie obciążenia mogą spowodować nie tylko trwałe uszkodzenie izolatorów kompozytowych (ceramicznych także), ale także znaczne ich ugięcie [4, 5].

Badania kompozytowych izolatorów wsporczych przy obciążeniu statycznym

W 2010 r. rozpoczęto w Instytucie Energetyki prace badawcze, zmierzające do określenia dopuszczalnego ugięcia oraz do opracowania jakościowego i ilościowego kryterium oceny wytrzymałości kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych przy obciążeniu zmiennym. Pierwsza część prac dotyczyła izolatorów do sieci 110 kV i 220 kV [4, 5].

Na rysunku 2 pokazano przykłady kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych, przeznaczonych do sieci 110 kV i 220 kV, jakie były przedmiotem badań.

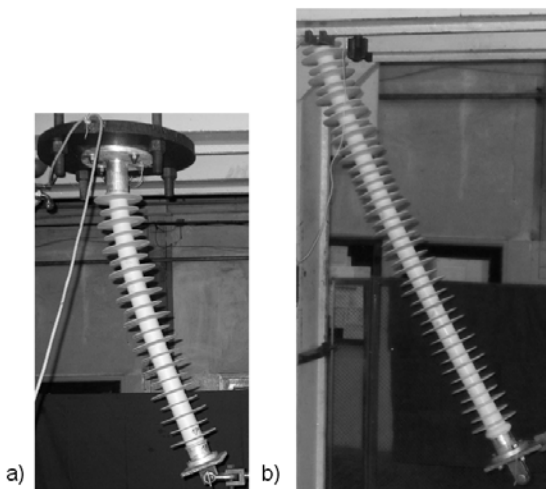


Rys.2. Przykłady kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych; a) i b) do sieci 110 kV; c) i d) do sieci 220 kV

Badane kompozytowe izolatory wsporcze pochodziły od różnych producentów i różniły się nie tylko właściwościami mechanicznymi (różne wartości SCL i MDCL (ang. *Maximum Design Cantilever Load*)), ale także wymiarami, sposobem nakładania osłony na szkłoepoksydowy rdzeń, czy też materiałem i wykonaniem okuć.

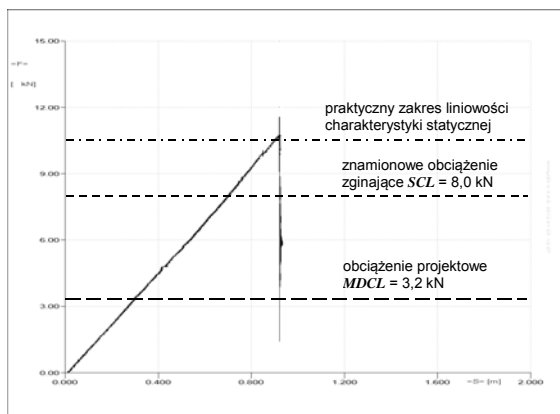
W pierwszej fazie badań izolatory poddano próbom mechanicznym przy obciążeniu statycznym zgodnie z normą [1]. Celem tych prób było określenie zależności ugięcia izolatora od obciążenia zginającego oraz wyznaczenie obciążenia niszczącego. Sprawdzone także ugięcie resztkowe po zdjęciu 96-godzinnej obciążenia zginającego o wartości $1,1 \times MDCL$.

Na rysunku 3 pokazano ugięcie w chwili zniszczenia kompozytowego wsporczy izolatora stacyjnego 110 kV i 220 kV, podczas próby wytrzymałości przy obciążeniu statycznym.



Rys.3. Ugięcie w chwili zniszczenia kompozytowego wsporczy izolatora stacyjnego w próbie wytrzymałości na zginanie; a) izolator do sieci 110 kV; b) izolator do sieci 220 kV

Podczas próby rejestrowano ugięcie izolatora w zależności od przyłożonej siły zginającej. Na rysunku 4 pokazano taką zależność na przykładzie izolatora do sieci 220 kV.



Rys.4. Przykład charakterystyki statycznej przy obciążeniu zginającym jednego z badanych typów kompozytowych wsporczy izolatorów stacyjnych do sieci 220 kV

Na rysunku 4 zaznaczono, deklarowany przez producenta, poziom zginającego obciążenia projektowego MDCL i poziom znamionowego obciążenia zginającego SCL (z porównania wartości MDCL i SCL wynika, że dla tego izolatora producent przyjął współczynnik bezpieczeństwa 2,5). Z zamieszczonej charakterystyki statycznej wynika także, że obciążenie niszczące było większe od SCL, co spełnia wymagania normy [1].

Podobną zależność wyznaczono dla każdego z badanych typów izolatorów 110 kV i 220 kV. Z wyjątkiem jednego, dla każdego izolatora obciążenie niszczące było większe od SCL, a liniowość charakterystyki statycznej była zachowana prawie do zniszczenia. Znaczne różnice wystąpiły natomiast w wartości ugięć. W tabeli 1 zamieszczono jednostkowe ugięcia izolatorów (w zakresie zginającego obciążenia projektowego MDCL) w zależności

od względnej średnicy szkłoepoksydowego rdzenia (najmniejszą średnicę przyjęto za 1).

Tabela 1. Rzeczywiste ugięcie kompozytowych wsporczy izolatorów stacyjnych w zakresie MDCL (na podstawie badań)

Lp.	Izolatory do sieci o znamionowym napięciu 110 kV		Izolatory do sieci o znamionowym napięciu 220 kV	
	Średnica rdzenia [jednostka względna]	Jednostkowe ugięcie w zakresie MDCL [mm/kN]	Średnica rdzenia [jednostka względna]	Jednostkowe ugięcie w zakresie MDCL [mm/kN]
1.	1	16	1	89
2.	1	13	1	88
3.	1,2	6	1,4	16

Z danych zamieszczonych w tabeli 1 wynika, że różnice w ugięciu izolatorów są znaczne. W decydującym stopniu zależało to od średnicy ich szkłoepoksydowego rdzenia, choć istotną rolę odgrywała tu także konstrukcja dolnego węzła montażowego (materiał i konstrukcja okucia).

Jak wspomniano, celem prób statycznych było również sprawdzenie ugięcia resztkowego. W normie [1] podano jedynie, że po zdjęciu obciążenia zginającego o wartości $1,1 \times MDCL$ (działającego na izolator przez 96 godzin), nie powinny wystąpić pęknięcia, rozwarstwienia, ani trwałe odształcenia izolatora.

Na podstawie przeprowadzonych prób nie stwierdzono pęknięć i rozwarstwień, ale ugięcie resztkowe kompozytowych wsporczy izolatorów stacyjnych było bardzo zróżnicowane i wynosiło:

- dla izolatorów do sieci 110 kV – od 1 mm do 27 mm,
- dla izolatorów do sieci 220 kV – od 1 mm do 21 mm.

Propozycja dopuszczalnego ugięcia kompozytowych izolatorów wsporczych

Dla kompozytowych wsporczy izolatorów stacyjnych 110 kV i 220 kV (szczególnie przeznaczonych do aparatów elektrycznych, na przykład do odłączników) nie można dopuszczać dużych ugięć izolatorów, gdyż może to uniemożliwić pracę tych urządzeń. Dobierając odpowiednią konstrukcję (średnica rdzenia, okucia) lub parametry wytrzymałościowe, można jednak znacznie ograniczyć wartość ugięcia izolatora. Dotyczy to przede wszystkim zakresu nie większego niż MDCL, gdyż jest to obciążenie, którego z definicji nie powinno się przekraczać w eksploatacji.

Zamieszczone w tabeli 1 wyniki wskazują, że uzyskanie niewielkiego ugięcia jest możliwe. W tabeli 2. podano proponowane dopuszczalne wartości ugięcia kompozytowych izolatorów wsporczych zarówno jako ugięcie jednostkowe, jak i całkowite. Założono, że całkowite ugięcie przy obciążeniu MDCL można rozpatrywać zamiennie z ugięciem jednostkowym.

Biorąc pod uwagę, że w normie [1] określono dopuszczalną mimośrodowość kompozytowych izolatorów wsporczych, uznano za uzasadnione, aby trwałe ugięcie izolatora u_z (łącznie z mimośrodowością stwierdzoną przed obciążeniem), po zdjęciu 96-godzinnej obciążenia zginającego o wartości $1,1 \times MDCL$, nie przekraczało dopuszczalnej mimośrodowości e , określonej w milimetrach, jako $2(1+h)$, gdzie h oznacza wysokość izolatora w metrach, co można zapisać zależnością:

$$(1) \quad u_z \leq e$$

Tak obliczone proponowane dopuszczalne ugięcie resztkowe podano w tabeli 2, przyjmując znormalizowaną

wysokość izolatora wsporczo 110 kV równą 1220 mm, a izolatora 220 kV – 2300 mm.

Tabela 2. Proponowane dopuszczalne ugięcia kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych przy statycznym obciążeniu zginającym

Lp.	Propozycja dopuszczalnego ugięcia	Izolatory do sieci o znamionowym napięciu	
		110 kV	220 kV
1.	Największe ugięcie w zakresie MDCL [mm]	40	80
2.	Największe jednostkowe ugięcie w zakresie MDCL [mm/kN]	6	16
3.	Największe ugięcie resztkowe u_z po próbie 96-godzinnej [mm]	4,4	6,6

W przypadku mniejszej średnicy rdzenia, jedynym sposobem ograniczenia ugięcia jest przyjęcie odpowiednio mniejszych wartości znamionowych obciążeń. Wiąże się to jednak z ryzykiem znacznych przemieszczeń górnego końca izolatora przy pojawieniu się nieprzewidzianych znacznych sił zginających.

Badania kompozytowych izolatorów wsporczych przy zginającym obciążeniu wahadłowym

Zarówno izolatory do sieci 110 kV jak i 220 kV poddawano cyklicznemu zginającemu obciążeniu wahadłowemu, przyłożonemu do górnego okucia. To zmienne obciążenie probiercze można zapisać w postaci funkcji czasu

$$(2) \quad F(t) = F_a \sin \omega t$$

gdzie: F_a – amplituda zmian obciążenia zginającego (jest to jednocześnie wartość probierczego obciążenia maksymalnego), $\omega = 2\pi f$ – częstość zmian obciążenia (f – częstotliwość drgań) [4, 5].

Badane izolatory 110 kV i 220 kV różniły się prawie dwukrotnie wysokością, a także ugięciem jednostkowym. Wymagało to odpowiedniego przygotowania stanowiska badawczego: o ile izolatory 110 kV można było obciążać bezpośrednio za pomocą tłoczyska hydropulsatora [5], do prób zmęczeniowych izolatorów 220 kV należało zastosować dodatkową dźwignię, pozwalającą uzyskać większe ugięcie izolatora – rysunek 5.

Podczas prób rejestrowano komputerowo przebieg obciążenia i ugięcia izolatora. Rejestrowano również liczbę cykli zmian obciążenia.

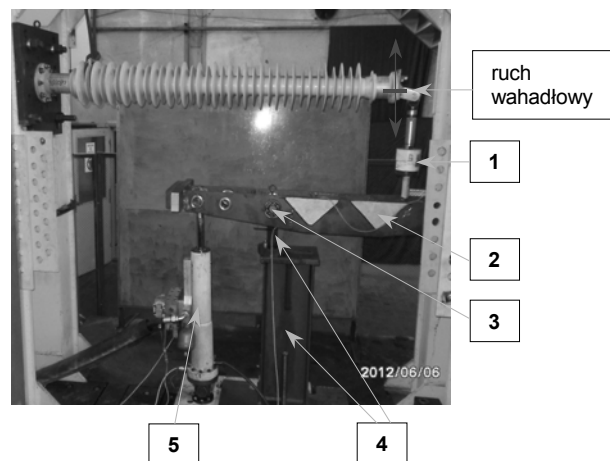
Po określonej liczbie cykli zmian obciążenia zginającego, które starano się utrzymywać na niezmiennym poziomie przez cały czas trwania próby, ugięcie izolatora zaczynało wzrastać lub zaczynały się pojawiać pierwsze oznaki uszkodzenia (na przykład pęknięcia okucia). Uznawano to za pierwsze oznaki trwałego uszkodzenia izolatora, mimo że izolator wytrzymywał nieraz jeszcze wiele cykli, a ugięcie wzrastało dość wolno.

Jako rezultat próby izolatora wsporczo dla danego poziomu obciążenia przyjmowano:

- liczbę cykli do pierwszych oznak trwałego uszkodzenia N (zmienna niezależna – x)
- maksymalną wartość cyklicznego zginającego obciążenia wahadłowego $F_{\max} = F_a$, lub jego względną wartość, w odniesieniu do MDCL – $F_{\max}/MDCL$ (zmienna zależna – y) [4, 5].

Nanosząc w układzie współrzędnych punkty, których współrzędne stanowiły wyniki prób kolejnych izolatorów danego typu (od danego producenta), otrzymywano pewien

zbiór punktów o nieznannej zależności. Niezależnie od przyjętej skali i przy uwzględnieniu przyjętych założeń,



Rys.5. Przykład kompozytowego wsporczo izolatora stacyjnego do sieci 220 kV, zamontowanego na stanowisku badawczym do próby przy cyklicznym zginającym obciążeniu wahadłowym; 1 – czujnik siły; 2 – dźwignia dwustronna; 3 – ułożyskowana oś obrotu dźwigni dwustronnej; 4 – wsporniki dźwigni dwustronnej; 5 – hydropulsator

wzajemne położenie naniesionych na układ współrzędnych punktów sugerowało dla danego typu izolatorów wyrażną prawidłowość, czyli otrzymywano skorelowane zbiory punktów. Najlepsze odwzorowanie (najwyższy współczynnik determinacji, nie mniejszy niż 0,8) uzyskano za pomocą funkcji potęgowej i tę funkcję wybrano do aproksymacji.

Wyznaczona (zastosowana) potęgowa funkcja aproksymująca wyraża się zależnością

$$(3) \quad y(x) = ax^{-b}$$

gdzie: x – zmienna niezależna (liczba cykli obciążenia do zniszczenia izolatora); y – zmienna zależna (maksymalna wartość obciążenia w procentach lub w kiloniutonach); a – współczynnik stały; b – wykładnik funkcji potęgowej.

Różnica postaci charakterystyk wyraża się przede wszystkim w wykładniku funkcji potęgowej. W skali podójnie logarytmicznej funkcja potęgowa ma postać linii prostej, a wykładnik ten odpowiada wówczas tangensowi jej kąta nachylenia do osi $0-x$, czyli współczynnikiem kierunkowemu prostej.

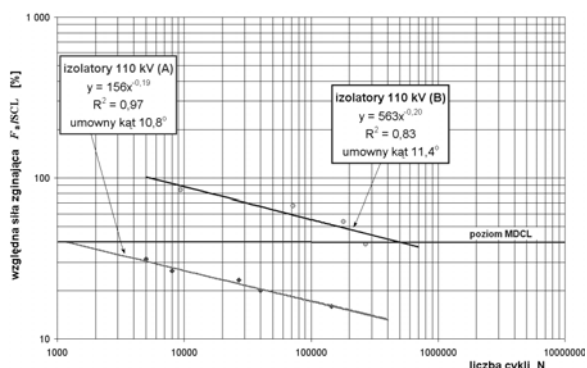
Tak sporządzony wykres aproksymującej funkcji potęgowej proponuje się nazywać charakterystyką zmęczeniową danego typu badanych izolatorów wsporczych, czyli modelem ich wytrzymałości przy cyklicznym zginającym obciążeniu wahadłowym.

Dla jednoznaczności rozważań, dodatni kąt ostry, wynikający z wartości tak rozumianego wykładnika funkcji potęgowej, przyjęto nazwać umownym kątem nachylenia charakterystyki zmęczeniowej.

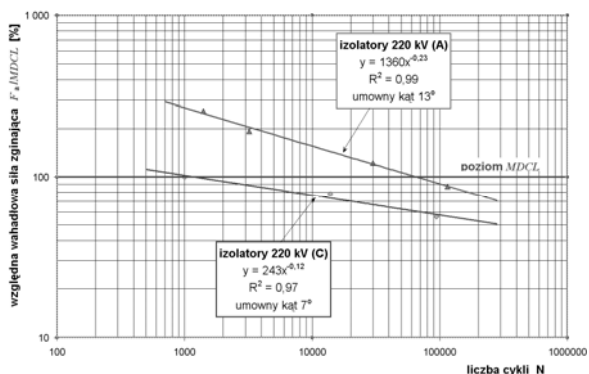
Na rysunku 6 pokazano przykład charakterystyk zmęczeniowych wyznaczonych dla dwóch różnych kompozytowych izolatorów wsporczych 110 kV, a na rysunku 7 – dla izolatorów 220 kV, przyjmując względną skalę na osi rzędnych.

Na rysunku 6 i 7 zaznaczono poziom deklarowanego przez producenta maksymalnego zginającego obciążenia projektowego MDCL. Można więc zauważyć, że różnice w zachowaniu się izolatorów przy obciążeniu zmiennym są znaczne, a nawet 1000 cykli obciążenia wahadłowego może

doprowadzić do spadku wytrzymałości izolatora poniżej MDCL.



Rys.6. Przykładowe charakterystyki zmęczeniowe wyznaczone dla dwóch różnych typów kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych do sieci 110 kV



Rys.7. Przykładowe charakterystyki zmęczeniowe wyznaczone dla dwóch różnych typów kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych do sieci 220 kV

Zalecane kryteria oceny odporności kompozytowych izolatorów wsporczych przy obciążeniu zmiennym

Na podstawie rezultatów prac badawczych zaleca się, aby kompozytowe wsporcze izolatory stacyjne, przeznaczone do sieci 110 kV i 220 kV, miały sprawdzoną odporność na zginające cykliczne obciążenie wahadłowe.

Jako zasadę należy przyjąć, że ocenę odporności kompozytowych izolatorów wsporczych na cykliczne obciążenia mechaniczne przeprowadza się na podstawie charakterystyki zmęczeniowej, wyznaczonej empirycznie dla danego typu izolatora. Częstotliwość obciążenia pobierczego należy przyjmować mniejszą od częstotliwości drgań własnych izolatora [5].

Zalecane wymagania przy stosowaniu oceny odporności kompozytowych izolatorów wsporczych na obciążenia wahadłowe zamieszczono w tabeli 3.

Zróznicowanie zalecanej liczby cykli obciążenia do zniszczenia izolatora wynika zarówno z naprężeń w dolnym okuciu znacznie wzrastających dla izolatorów o większej wysokości, jak i z faktu, że im wyższe napięcie sieci, tym zwarcia zdarzają się rzadziej.

Należy także przyjąć, że w zakresie wskazanej liczby wytrzymałych cykli obciążenia wahadłowego, charakterystyka zmęczeniowa powinna przebiegać powyżej poziomu MDCL.

Tabela 3. Proponowane wymagania dla kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych w zakresie odporności na cykliczne zginające obciążenie wahadłowe

Lp.	Zalecana wartość kryterialna	Izolatory do sieci o znamionowym napięciu	
		110 kV	220 kV
1.	Liczba wytrzymałych cykli obciążenia wahadłowego na poziomie nie mniejszym niż MDCL	4000	2000
2.	Największy umowny kąt nachylenia charakterystyki zmęczeniowej	10°	

Podsumowanie

Zginające cykliczne obciążenie wahadłowe ma istotny wpływ na mechaniczną wytrzymałość i trwałość kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych. Może doprowadzić do zniszczenia izolatora przy wartości siły zginającej mniejszej od ich rzeczywistej wytrzymałości statycznej (obciążenia niszczącego), a nawet przy wartości na poziomie deklarowanych znamionowych obciążeń.

Podobnie jak dla kompozytowych wiszących izolatorów liniowych [6], również dla kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych przeprowadzenie prób wytrzymałości mechanicznej przy obciążeniu zmiennym (wahadłowym) wydaje się niezbędne. Konieczne jest także przyjęcie wymagań w zakresie dopuszczalnego ugięcia pod obciążeniem.

Takiej oceny izolatorów, a tym samym i ich właściwego doboru do określonych warunków eksploatacji nie można przeprowadzić tylko na podstawie wymagań i prób znormalizowanych.

LITERATURA

- [1] PN-EN 62231:2008P, Kompozytowe wsporcze izolatory stacyjne na napięcia przemiennie powyżej 1000 V do 245 kV – Definicje, metody badań i kryteria oceny [IEC 62231:2006, Composite station post insulators for substations with a.c. voltages greater than 1000 V up to 245 kV – Definitions, test methods and acceptance criteria]
- [2] Dok. IEC 36C/190/CDV z 2013-10-18, project IEC 62231-1 Composite station post insulators for substations with AC voltages greater than 1000 V up to 245 kV – Part 1: Dimensional, mechanical and electrical characteristics
- [3] Szadkowski M., Układ izolacyjny szyn giętkich rozdzielni WN i NN w warunkach przepływu prądu zwarciovego, *Przegląd Elektrotechniczny-Konferencje*, R.3 (2005) nr.1, 272-275
- [4] Bielecki J., Szadkowski M., Wańkowicz J., Koncepcja badań mechanicznej wytrzymałości kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych przy obciążeniu zmiennym, *Przegląd Elektrotechniczny-Konferencje*, (2012), nr.5a, 100-103
- [5] Bielecki J., Wańkowicz J., Wytrzymałość kompozytowych wsporczych izolatorów stacyjnych przy obciążeniu zmiennym, *Przegląd Elektrotechniczny-Konferencje*, (2012), nr.11b, 120-125
- [6] Wańkowicz J., Bielecki J., Models of long-term mechanical strength of long rod composite insulators, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Volume 17, (2010), No.2, 360-367

Autorzy: dr inż. Jerzy Bielecki, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, E-mail: jerzy.bielecki@ien.com.pl; prof. dr hab. inż. Jacek Wańkowicz, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, E-mail: jacek.wankowicz@ien.com.pl.