



Jerzy BIELECKI, Jacek WAŃKOWICZ

Instytut Energetyki, Warszawa

## Propozycja modelu mechanicznej wytrzymałości kompozytowych izolatorów liniowych przy obciążeniach cyklicznych

**Streszczenie.** Źródłem zmiennych obciążeń w liniach elektroenergetycznych są drgania przewodów spowodowane wiatrem. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że drgania te w znacznym stopniu obniżają długotrwałą wytrzymałość izolatorów kompozytowych. Znajomość modelu wytrzymałości mechanicznej izolatorów przy obciążeniach cyklicznych pozwala na ocenę ich jakości i trwałości, a tym samym na właściwy ich dobór.

**Abstract.** (Proposal of mechanical strength model for composite long rod insulators subjected to cyclic loads). Variable loads in overhead power lines are created by conductors vibrations of wind pressure origin. Results of conducted investigations described in this paper show that vibration of conductors imparted on composite insulators can significantly reduce its life under operation condition. Evaluation of quality and prolonged mechanical strength of composite insulators can be done on the basis of a relationship between mechanical load and number of cycles applied to the insulators. Knowledge of this relationship can increase probability of correct selection of composite insulators to operation conditions.

**Słowa kluczowe:** izolatory elektroenergetyczne, izolatory kompozytowe, próby mechaniczne, wytrzymałość zmęczeniowa  
**Keywords:** power insulators, composite insulators, mechanical tests, fatigue strength.

### Wstęp

Problem odporności wysokonapięciowych izolatorów elektroenergetycznych na obciążenia cykliczne jest zagadnieniem stosunkowo nowym, a występujące niekiedy awarie izolatorów kompozytowych mogą wynikać z braku rozpoznania tego problemu [1]. Od kilku lat w Instytucie Energetyki prowadzi się prace badawcze nad wytrzymałością długopniowych izolatorów liniowych na tego typu obciążenia. W pierwszej fazie badań próbom poddawano izolatory ceramiczne; prace nad zmęczeniową wytrzymałością tworzywa porcelanowego jeszcze trwają. W 2003 r. rozpoczęto badania nad wytrzymałością kompozytowych izolatorów liniowych przy cyklicznie zmieniającym się obciążeniu. Z uwagi na złożony charakter części izolacyjnej, zmęczeniowe badania izolatorów kompozytowych mają daleko większe znaczenie przy prognozowaniu ich trwałości w eksploatacji, niż tego typu oceny wynikające ze zmęczeniowych prób izolatorów ceramicznych. Głównym celem badań było określenie wpływu zmiennych obciążeń na trwałość izolatorów i zaproponowanie na podstawie wyników tych badań modelu mechanicznej wytrzymałości kompozytowych izolatorów liniowych przy obciążeniach cyklicznych. Propozycja ta zakłada, że model ten można będzie wykorzystywać do oceny i doboru izolatorów kompozytowych do pracy w warunkach narażenia na obciążenia zmienne.

Prace badawcze o wskazanym powyżej zakresie i celu są rzeczą bardzo istotną [2] i uwzględnianą w dokumentach normalizacyjnych. W najnowszej normie europejskiej z zakresu budowy linii napowietrznych EN 50341-1 [3], której polskim odpowiednikiem jest – przyjęta tzw. metodą uznania, czyli w języku angielskim – PN-EN 50341-1 (U), w rozdziale dotyczącym izolatorów (p. 10.8.1) znajduje się zapis, który można przetłumaczyć następująco:

.... w szczególnych wypadkach może się jednak okazać konieczne sprawdzenie właściwości zmęczeniowych (izolatorów). Przeprowadza się wówczas odpowiednie próby, których sposób wykonania podaje się w dokumentacji technicznej lub uzgadnia między nabywcą a dostawcą. Nie jest również wykluczone, że próby wytrzymałości zmęczeniowej zostaną wprowadzone do zakresu

znormalizowanych badań izolatorów. Takie propozycje złożono już w 2001 r. Znajomość zachowania się izolatorów przy obciążeniach cyklicznych (zmęczeniowych) staje się więc niejako koniecznością, zwłaszcza tam, gdzie doświadczenia z eksploatacji potwierdzają występowanie narażeń spowodowanych występowaniem drgań eolskich.

### Przedmiot badań i przyjęta metoda prób

Do prób przeznaczono kompozytowe wiszące izolatory liniowe, w których okucia były zamontowane na szkłoepoksydowym rdzeniu metodą zaciskania. (Jedna partia składała się z okutych rdzeni, bez ostony).

Na rysunku 1 przedstawiono widok stanowiska badawczego z przygotowanym do prób izolatorem.



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego z zamontowanym do prób izolatorem kompozytowym do linii 110 kV

Parametry i charakter obciążeń cyklicznych przyjmowano podobne, jak w dotychczas wykonywanych badaniach [4, 5, 6].

Obciążenie rozciągające izolator miało przebieg harmoniczny. W każdym wypadku starano się, aby amplituda drgań utrzymywała się na poziomie 25 % obciążenia średniego, przy częstotliwości zmian obciążenia równej 7 Hz. Przyjęto także, że dla założonych parametrów obciążenia cyklicznego izolator powinien wytrzymać długostrwale 2 miliony cykli. W przeciwnym wypadku wynik próby uznawano za ujemny.

Jako wielkości odniesienia przeznaczone do wykorzystania w analizie wyników prób przyjęto:

- maksymalną wartość siły rozciągającej –  $F_{max}$ ,
- liczbę wytrzymałych cykli.

Analizę zmierzającą do opracowania modelu wytrzymałości wiszących izolatorów kompozytowych przy obciążeniach cyklicznych oparto na wynikach czterech partii izolatorów wykonanych przez trzech różnych wytwórców:

- wytwórca I
  - partia A (izolatory przeznaczone do linii 110 kV)
  - partia B (izolatory przeznaczone do linii 220 kV)
    - średnica rdzeni izolatorów 20 mm,
    - $SML = 120$  kN;
- wytwórca II
  - partia C (izolatory przeznaczone do linii 110 kV)
  - średnica rdzeni izolatorów 20 mm,
  - $SML = 120$  kN
- wytwórca III
  - partia D (okute fragmenty rdzeni izolatorów przeznaczonych do linii 400 kV)
  - średnica rdzeni izolatorów 24 mm,
  - $SML = 210$  kN.

### Wyniki prób wytrzymałości przy obciążeniu cyklicznym

W celu uzyskania informacji o rzeczywistej wytrzymałości izolatorów, jeden izolator (rdzeń) z każdej partii poddawano niszczącej próbie wytrzymałości przy obciążeniu statycznym. Wszystkie izolatory przeszły te próby z wynikiem dodatnim, ulegając uszkodzeniu (wysunięcie się rdzenia z okucia) zawsze powyżej znamionowego obciążenia mechanicznego.

Próby obciążeniem cyklicznym rozpoczynano przy obciążeniu maksymalnym na poziomie  $SML$ . Następnie starano się ustalić takie obciążenie maksymalne, które izolator wytrzyma długostrwale, czyli przez założone 2 miliony cykli. Dla mniejszej liczby cykli było to obciążenie niszczące. Wyniki prób przedstawiono w tabelach 1, 2, 3 i 4., podając je już jako współrzędne wykresów zależności obciążenia niszczącego od liczby wytrzymałych cykli. Jako rzędne podano bezwzględną wartość obciążenia maksymalnego oraz wytrzymałość względną  $F_{max}/SML$ .

Tabela 1. Wyniki prób zmęczeniowych izolatorów z partii A

Numer izolatora	Współrzędne		
	X	Y	
	liczba wytrzymałych cykli	$F_{max}$	$F_{max}/SML$
3	11.100	124 kN	103 %
4	160.000	60 kN	50 %
5	2.000.000	40 kN	33 %

Tabela 2. Wyniki prób zmęczeniowych izolatorów z partii B

Numer izolatora	Współrzędne		
	X	Y	
	liczba wytrzymałych cykli	$F_{max}$	$F_{max}/SML$
4/II	15.000	123 kN	103 %
2/II	232.600	60 kN	50 %
3/II	2.000.000	40 kN	33 %

Tabela 3. Wyniki prób zmęczeniowych izolatorów z partii C

Numer izolatora	Współrzędne		
	X	Y	
	liczba wytrzymałych cykli	$F_{max}$	$F_{max}/SML$
2/I	21.700	129 kN	108 %
3/I	920.000	60 kN	50 %
4/I	2.030.000	50 kN	42 %

Tabela 4. Wyniki prób zmęczeniowych rdzeni z partii D

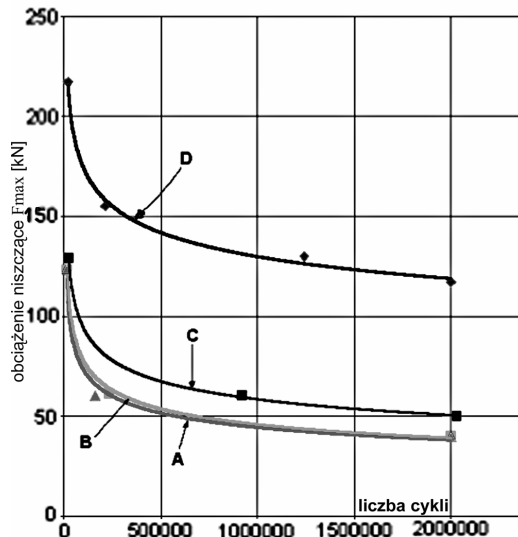
Numer izolatora	Współrzędne		
	X	Y	
	liczba wytrzymałych cykli	$F_{max}$	$F_{max}/SML$
2R/III	18.900	217 kN	103 %
4R/III	211.700	155 kN	74 %
5R/III	1.240.000	130 kN	62 %
6R/III	2.000.000	117 kN	56 %

### Koncepcja modelu wytrzymałości

W pierwszej kolejności postanowiono nanieść wyniki prób na układ współrzędnych, odkładając

- na osi odciętych (oś O-x) – liczbę wytrzymałych cykli
- na osi rzędnych (oś O-y) – wartość odpowiadającego im maksymalnego obciążenia niszczącego w kiloniutonach.

Otrzymane w ten sposób punkty aproksymowano funkcją potęgową dla każdej partii izolatorów, wykorzystując do tego celu program EXCEL. Podstawą analizy były otrzymane w ten sposób wykresy zmiany wytrzymałości w zależności od parametrów obciążenia cyklicznego. Dawało to już pewien pogląd na różnice w wytrzymałości badanych izolatorów (a w zasadzie szkłoepoksydowych rdzeni wraz z okuciami – osłona silikonowa nie miała wpływu na ich wytrzymałość). Już na podstawie tak sporządzonych zależności graficznych można było zaobserwować, że wykresy te dla izolatorów wykonanych według tej samej technologii niemal się pokrywały – rysunek 2.



Rys. 2. Wyniki prób wytrzymałości izolatorów kompozytowych przy obciążeniach cyklicznych w wartościach rzeczywistych w skali liniowej przy aproksymacji funkcją potęgową

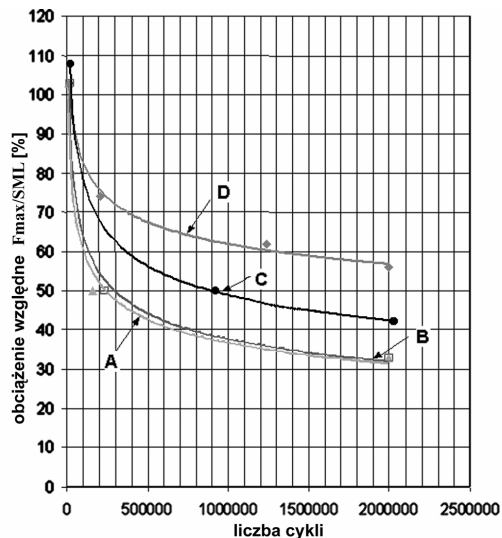
Poszukiwano jednak efektywniejszej metody (modelu) w założeniu takiej, która pozwoli na porównanie jakości (czy też wytrzymałości) rdzeni bez względu na ich średnicę i  $SML$ . Trudno z wykresów przedstawionych na rysunku 2 wywnioskować o różnicach w trwałości izolatorów, czyli porównać wpływ obciążeń cyklicznych na ich wytrzymałość. Metodę analizy, a tym samym koncepcję modelu wytrzymałości postanowiono oprzeć o wytrzymałość względną tj.

$F_{max}/SML$  wyrażona w procentach. Graficznie sprowadzało się to do tego, że na poszczególnych osiach odkładano:

- na osi odciętych liczbę wytrzymałych cykli,
- na osi rzędnych iloraz maksymalnego cyklicznego obciążenia niszczącego (lub wytrzymanego) i znamionowego obciążenia mechanicznego, tj.

$$F_{max}/SML,$$

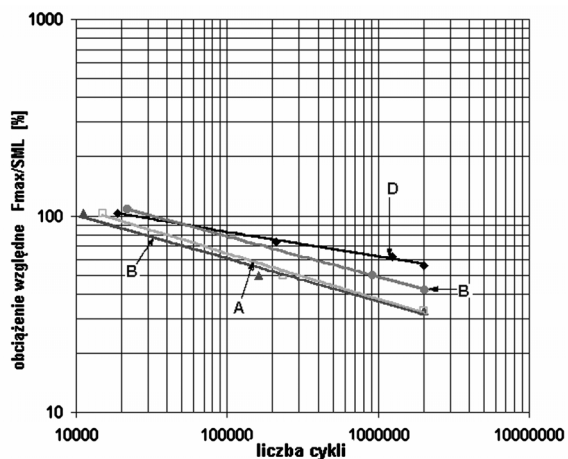
zachowując nadal liniowe skale na obydwu osiach. Tak sporządzony wykres przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zależność wytrzymałości izolatorów od liczby cykli, po aproksymacji funkcją potęgową, w wartościach względnych na osi rzędnych i w skali liniowej na obu osiach

Różnice między badanymi izolatorami zaobserwowane już na rysunku 2 są widoczne również na powyższym wykresie, jednak mają jakby punkt wspólny w okolicy  $F_{max}/SML$ , co pozwala już dostrzec wyraźnie różnice w wytrzymałości długotrwałej.

Okazało się, że różnice uwidaczniają się najlepiej przy logarytmicznych skalach obydwu osi – otrzymano linie proste (stąd aproksymacja funkcją potęgową) o określonych kątach nachylenia – rysunek 4.



Rys. 4. Zależność wytrzymałości izolatorów od liczby cykli, po aproksymacji funkcją potęgową, w wartościach względnych na osi rzędnych i w skali logarytmicznej na obu osiach

Proste pokazane na rysunku 4. proponuje się nazywać charakterystykami zmęczeniowymi izolatorów kompozytowych w skali podwójnie logarytmicznej. Na podstawie wzajemnego położenia otrzymanych prostych można nie tylko oszacować zmianę wytrzymałości izolatorów

w zależności od liczby cykli zmian obciążenia, ale również, w znacznie lepszym stopniu niż w skali liniowej, zauważyć różnice w wytrzymałości poszczególnych typów izolatorów (rdzeni). Przede wszystkim zwraca uwagę kąt nachylenia tych prostych do osi O-x, różny dla każdego typu izolatora.

#### Analiza liczbowa

Analizie liczbowej poddano otrzymane w programie EXCEL funkcje aproksymujące. Analiza ta jest jednocześnie opisem zaproponowanego modelu wytrzymałości izolatorów kompozytowych przy obciążeniach cyklicznych.

Przykładowo przedstawia się obliczenia dla wyników uzyskanych na izolatorach z partii A.

Otrzymałą aproksymującą funkcję potęgową:

$$y(x) = 761,88 x^{-0,2196}$$

zlogarytmowano obustronnie, otrzymując:

$$\lg y = \lg 761,88 - 0,2196 \lg x$$

Następnie, w celu zobrazowania liniowego charakteru tej zależności w skali logarytmicznej, wprowadzono niewiadome pomocnicze:

$$\lg y = z$$

$$\lg x = t$$

i otrzymano zależność funkcyjną:

$$z(t) = 2,8818 - 0,2196 t$$

w powyższym wzorze  $z(t)$  oznacza zlogarytmowane wartości obciążenia względnego, natomiast,  $t$  – zlogarytmowane wartości liczby cykli.

Otrzymana funkcja jest funkcją liniową (wykres jest linią prostą), a tangens kąta nachylenia tej prostej do osi O-x jest równy  $-0,2196$ . Zakładając, że rozpatrujemy kąt ostry między prostą a osią O-x, a także uwzględniając nieparzystość funkcji tangens, interesujący nas kąt wynosi

$$\alpha_1 = 12,38^\circ$$

Postępując w ten sam sposób otrzymano kąt nachylenia do osi O-x wykresów sporządzonych dla pozostałych partii izolatorów (rdzeni). Dla lepszego porównania podaje się je według podziału partii:

- technologia I  
partia A –  $\alpha_a = 12,38^\circ$   
partia B –  $\alpha_b = 13,17^\circ$
- technologia II  
partia C –  $\alpha_c = 11,71^\circ$
- technologia III  
partia D –  $\alpha_d = 7,20^\circ$ .

Porównując otrzymane kąty nachylenia wykresów dla poszczególnych partii izolatorów można zauważyć wyraźny wpływ technologii wykonania na trwałość izolatorów – im mniejszy kąt, tym mniejszy wpływ obciążenia cyklicznego na wytrzymałość izolatorów.

#### Kryteria oceny

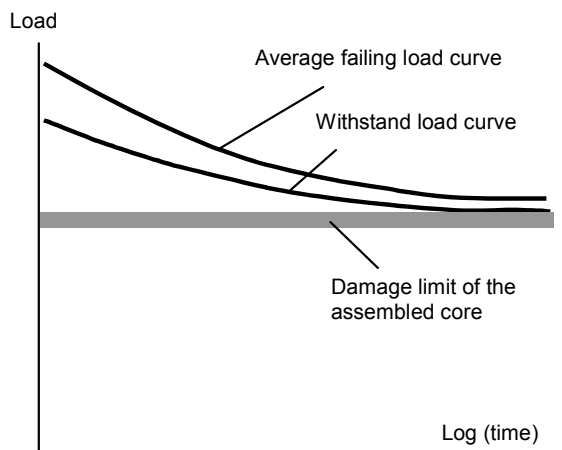
Tak opisaną logarytmiczną charakterystykę zmęczeniową izolatorów kompozytowych proponuje się przyjąć za model ich wytrzymałości przy obciążeniach cyklicznych, a dwa jej parametry, tj. kąt nachylenia do osi O-x oraz maksymalne obciążenie względne ( $F_{max}/SML$ ) wytrzymałwane przy np. 2 mln cykli przyjąć za wielkości, na podstawie których ocenia się i porównuje wytrzymałość izolatorów. W związku z tym, w celu oceny wytrzymałości i trwałości izolatorów kompozytowych przy obciążeniach cyklicznych, a tym samym i ich jakości należy:

- określić długotrwałą wytrzymałość izolatora kompozytowego dla 2 mln cykli zmian obciążenia; im wyższa jest ta wytrzymałość, tym izolator wykazuje lepszą odporność na obciążenia cykliczne – proponuje się, aby poziom akceptacji przyjmować nie niższy niż ok. 60 % *SML*;
- wyznaczyć charakterystykę zmęczeniową izolatora w skali podwójnie logarytmicznej; im mniejszy jest kąt ostry między charakterystyką zmęczeniową izolatora, a osią O-x, tym wykazuje on większą odporność na obciążenia cykliczne, a tym samym należy oczekiwać jego wyższej niezawodności i trwałości – jako akceptowalny proponuje się przyjmować ten kąt nie większy niż 10°.

### Obecne tendencje w normalizacji właściwości izolatorów kompozytowych

W opracowanych dotychczas dokumentach normalizacyjnych, a zwłaszcza w normie IEC 61109 [7] (polski odpowiednik – PN-IEC 61109:1999) nie przewidziano sprawdzania wytrzymałości izolatorów kompozytowych przy obciążeniach zmiennych. Koncepcję oceny długotrwałej wytrzymałości izolatorów oparto w tej normie na wynikach prób statycznych o określonej wartości siły i przebiegu jej narastania. Na tej podstawie sporządza się odpowiednie wykresy zależności wytrzymywanego obciążenia od – podanego w skali logarytmicznej – czasu. Użytkownik też sporządza wykres podobnej funkcji, przyjmując za podstawę występujące w eksploatacji obciążenia izolatora. Wykresy te (w postaci linii prostych) wykorzystuje się przy doborze izolatora do określonych warunków pracy.

Obecnie norma IEC 61109 jest nowelizowana. Już w pierwszym projekcie znowelizowanego dokumentu (36B/233/CD z 2004-04-16), w oparciu o badania przy obciążeniach cyklicznych, zmieniono model długotrwałej wytrzymałości izolatorów kompozytowych, wprowadzając pojęcie granicy wytrzymałości (*damage limit*) – rysunek 5.



Rys. 5. Model wytrzymałości długotrwałej izolatorów kompozytowych według projektu nowelizacji normy IEC 61109

Na powyższym wykresie jedynie skala czasu na osi odciętych jest w skali logarytmicznej. Po zlogarytmowaniu obciążenia na osi rzędnych, wykres najprawdopodobniej stanie się linią prostą.

### Podsumowanie

Zaproponowany model mechanicznej wytrzymałości wiszących kompozytowych izolatorów liniowych przy obciążeniach cyklicznych jest w znacznej mierze zgodny z obecnymi doświadczeniami i tendencjami światowymi. Według przyjętej koncepcji wytrzymałości można w dość prosty sposób dokonać oceny danego typu izolatora kompozytowego. Do wykreślenia charakterystyki zmęczeniowej w skali podwójnie logarytmicznej wystarczy w zasadzie wyznaczyć dwa punkty i następnie ekstrapolować ją na interesujący zakres cykli. W niezwykle istotny sposób skraca to czas wykonywania prób zmęczeniowych, ponieważ nie jest konieczne przeprowadzanie próby aż do 2 mln cykli. Jednak im więcej punktów, tym dokładniej można dobrać funkcję aproksymującą. Zaleca się więc wyznaczać co najmniej trzy punkty.

Analiza wyników przeprowadzonych badań pozwala również na stwierdzenie, że w jakości i trwałości produkowanych izolatorów kompozytowych występują istotne różnice, a na podstawie dotychczas znormalizowanych metod sprawdzania ich właściwości nie można tego właściwie ocenić.

### LITERATURA

- [1] Argasińska H., Wyszogrodzki Z., Zjawiska dynamiczne w łańcuchach izolatorowych wywołane drganiami przewodów. *Energoprojekt-Kraków S.A.*, Kraków 2001 r. (na prawach rękopisu)
- [2] Changfu Sun i in., Study on the mechanical properties of composite insulators under dynamic load. *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Rotterdam 2003*.
- [3] EN 50341-1:2001, Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV – Part 1: General requirements - Common specifications
- [4] Bielecki J., Ocena wytrzymałości izolatorów ceramicznych przy obciążeniach cyklicznych. *Elektroenergetyka – technika, ekonomia, organizacja*, nr 2'03. Wyd. PSE S.A. Warszawa 2003, 41-48
- [5] Bielecki J., Metody badań zmęczeniowej wytrzymałości izolatorów ceramicznych. *Materiały IX Sympozjum EUI'2003, Zakopane*; materiały konferencyjne – Zeszyt specjalny czasopisma „Przegląd Elektrotechniczny” nr 1/2003, 19-21
- [6] Bielecki J., Stankiewicz J., Wańkiewicz J., Próba oceny wpływu obciążeń cyklicznych na wytrzymałość izolatorów kompozytowych. *VII Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe – IW-2004, Poznań-Będlewo – maj 2004*, Zeszyt specjalny czasopisma „Przegląd Elektrotechniczny” nr 1/2004, 12-14
- [7] IEC 61109:1992, Composite insulators for a. c. overhead lines with nominal voltage greater than 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria + A1:1995

**Autor:** mgr inż. Jerzy Bielecki, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, e-mail: [jerzy.bielecki@ien.com.pl](mailto:jerzy.bielecki@ien.com.pl), dr hab. inż. Jacek Wańkiewicz, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, e-mail: [jacek.wankowicz@ien.com.pl](mailto:jacek.wankowicz@ien.com.pl)