



Jerzy BIELECKI

Instytut Energetyki, Warszawa

## Metody badań wytrzymałości zmęczeniowej izolatorów ceramicznych

**Streszczenie.** Źródłem zmiennych obciążeń w liniach elektroenergetycznych są spowodowane wiatrem drgania przewodów. Znormalizowane próby umożliwiają sprawdzenie wytrzymałości izolatorów przy obciążeniach statycznych. Przedstawione w referacie metody badań pozwalają na ocenę wytrzymałości izolatorów przy obciążeniach zmiennych.

**Abstract.** (The test methods of fatigue strength of ceramic insulators) Variable loads in overhead power lines are created by conductors vibrations of wind pressure origin. The present standard tests allow to evaluate insulators strength at static loads. Test methods introduced in this report enable to estimate insulators strength at variable loads.

**Słowa kluczowe:** izolatory elektroenergetyczne, próby mechaniczne, porcelana elektrotechniczna, zmęczenie materiałów.

**Keywords:** insulators, mechanical tests, electrotechnical porcelain, fatigue of materials.

### Wstęp

Już dość dawno zaobserwowano, że elementy konstrukcyjne poddawane przez dłuższy czas zmiennym obciążeniom mechanicznym (obciążeniom cyklicznym) ulegają zniszczeniu przy wartościach naprężeń na ogół znacznie mniejszych, (choć nie dotyczy to wszystkich materiałów) niż ich wytrzymałość statyczna i, co istotne, zniszczenie to następuje po określonej liczbie cykli zmian obciążenia. Ten rodzaj obniżenia się wytrzymałości materiału pod wpływem działania zmieniających się w czasie obciążeń przyjęto nazywać jego zmęczeniem. Wieloletnie badania tego procesu doprowadziły do konkluzji, że zmęczenie materiału jest wynikiem powstawania w nim odkształceń plastycznych [1]. Dążenie do zapewnienia coraz większego bezpieczeństwa urządzeń, ciągłego podwyższania ich niezawodności i trwałości spowodowała, że odporność materiałów na zmieniające się okresowo obciążenia stała się bardzo istotną właściwością.

Badania zjawiska zmęczenia dotyczyły głównie metali, jako materiałów konstrukcyjnych powszechnie stosowanych w technologii budowy maszyn. Wiele z tych badań – szczególnie dla nowych lub nieseryjnych konstrukcji wykonuje się rutynowo w dalszym ciągu.

Zagadnienie zmęczenia materiałów kruchych, a do takich należy porcelana elektrotechniczna, nie jest dotychczas dokładnie rozpoznane. Podstawowa trudność wynika przede wszystkim z dużej sztywności tych materiałów (a tym samym z bardzo niewielkich odkształceń przy mechanicznych obciążeniach), a to z kolei wymaga poszukiwania takich metod eksperymentalnych, które pozwoliłyby w wiarygodny sposób określić odpowiedź materiału ceramicznego na wymuszenie w postaci zmiennego w czasie naprężenia.

### Narażenia mechaniczne izolatora

Jedną z najważniejszych właściwości izolatora jest jego wytrzymałość mechaniczna. Dotychczasowe znormalizowane wymagania dotyczą tzw. wytrzymałości statycznej, czyli odporności na stałe w czasie obciążenie o określonej wartości. W eksploatacji takie obciążenia pochodzą głównie od naciągu i ciężaru przewodów oraz osprzętu. Statyczną wytrzymałość wiszących izolatorów liniowych sprawdza się, obciążając je siłą rozciągającą narastającą wolno ze stałą prędkością. Sposób przeprowadzania takich prób jest opisany w normach.

W liniach elektroenergetycznych występują jednak jeszcze (potwierdzone wieloma pomiarami) obciążenia zmienne spowodowane eolnymi drganiami przewodu. Drgania te przenoszą się na łańcuchy izolatorów, a następnie na poszczególne ich ogniwa (izolatory). Brak jest jednak informacji [2, 3], czy drgania te wpływają na obniżenie wytrzymałości porcelany elektrotechnicznej, a tym samym wykonanego z niej izolatora. Nie można jednak wykluczyć, że wielokrotnie stwierdzone trudne do wytłumaczenia przypadki zerwań izolatorów długopniowych były skutkiem oddziaływania tych zmiennych naprężeń.

Prace badawcze prowadzone od dwóch lat w Instytucie Energetyki są z jednej strony próbą określenia właściwości porcelany elektrotechnicznej, jaką jest jej wytrzymałość zmęczeniowa, a jednocześnie mają na celu opracowanie takich metod badawczych, które pozwoliłyby na ocenę wytrzymałości przy obciążeniach cyklicznych konkretnych typów izolatorów.

Ostatnio pojawiły się również propozycje wprowadzenia prób zmęczeniowych do programu znormalizowanych badań izolatorów [4].

### Warunki prób izolatorów przy obciążeniu cyklicznym

Na podstawie wykonanych dotychczas badań (zarówno na niewielkich rozmiarów porcelanowych kształtkach jak i na ceramicznych izolatorach długopniowych) próby zmierzające do określenia wytrzymałości izolatorów przy obciążeniach cyklicznych podzielono na dwie grupy:

- próby wytrzymałości granicznej – pozwalające na zorientowanie się przy jakich parametrach obciążenia cyklicznego następuje zniszczenie izolatora
- próby wytrzymałości długotrwałej – wykonywane przy obciążeniu cyklicznym o takich parametrach, które izolator wytrzyma bez uszkodzenia przez znaczną liczbę cykli (możliwych do wystąpienia w przewidywanym okresie eksploatacji).

Z wystarczającą do celów praktycznych dokładnością rzeczywiste obciążenia oddziałujące na wiszący izolator podczas eksploatacji można odwzorować harmoniczną funkcją czasu (sinusoidą) z nałożoną składową stałą. Do podstawowych wielkości charakteryzujących tego typu obciążenie należą:

- obciążenie średnie  $F_m$
- amplituda obciążenia  $F_a$
- obciążenie maksymalne  $F_{max}$
- obciążenie minimalne  $F_{min}$

Powyższe parametry dobiera się zwykle w zależności od znamionowej (statycznej) wytrzymałości izolatora oraz od rodzaju próby (np. określenie wytrzymałości granicznej). Za najważniejszą wartość częstotliwości zmian cyklicznego obciążenia probierczego w tego typu próbach uznano 7 Hz (co oczywiście nie wyklucza prowadzenia badań przy innych częstotliwościach) [5, 6].

Przy ustalaniu parametrów obciążeń cyklicznych (zmęczeniowych) ważną wielkością jest również współczynnik stałości obciążenia definiowany jako stosunek obciążenia średniego i amplitudy. Jego wartość dość dobrze odzwierciedla tzw. ostrość próby [2].

Próby izolatorów przy obciążeniu cyklicznym (próby zmęczeniowe) wykonuje się na stanowisku badawczym pozwalającym nie tylko na poddanie izolatora zmiennym obciążeniom o założonych parametrach, ale również na:

- stałą kontrolę parametrów obciążenia,
- płynną (lub z niewielkimi skokami) zmianę parametrów obciążenia
- zapisanie parametrów i wartości obciążenia niszczącego.

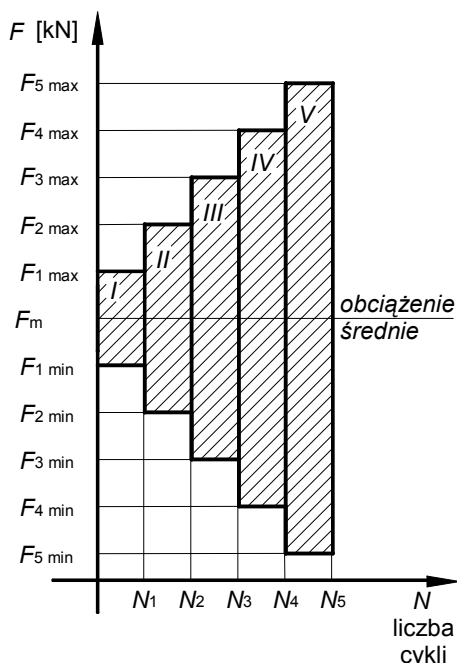
### Próba wytrzymałości granicznej

Izolatory przeznaczone do próby wytrzymałości granicznej przy obciążeniach cyklicznych należy pobrać z partii, która przeszła z wynikiem dodatnim badania kontrolno-odbiorcze (wszystkie izolatory w partii przedstawionej do odbioru były wcześniej poddane mechanicznej próbie wyrobu).

Próbie wytrzymałości granicznej można przeprowadzić metodą stałego obciążenia średniego lub niezmiennego współczynnika stałości obciążenia.

Metoda stałego obciążenia średniego polega na tym, że do obciążenia średniego dodaje się stopniowo, co ustaloną liczbę cykli, obciążenie zmienne o coraz większej amplitudzie, aż do zniszczenia izolatora.

Przebieg zmian obciążenia cyklicznego w tej próbie przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie zakresu zmian obciążenia cyklicznego w metodzie stałego obciążenia średniego

Parametry próby należy przyjąć takie, aby przewidywane zniszczenie izolatora na ostatnim stopniu (stopnie oznaczono na rysunku cyfrą rzymską) nastąpiło

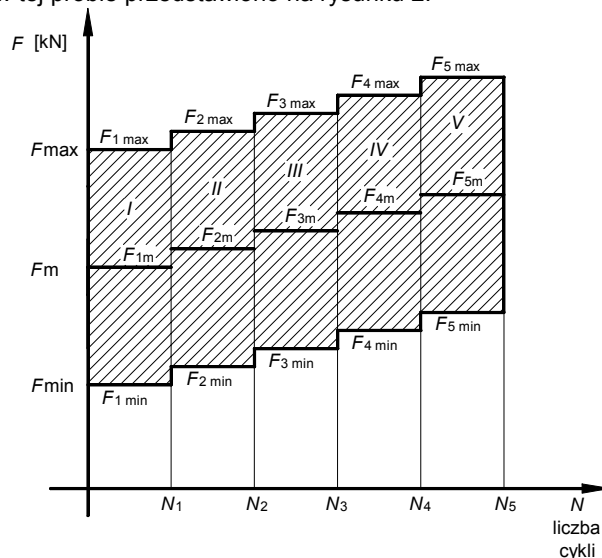
bez konieczności zwiększania obciążenia średniego tzn. aby wartość amplitudy zmian obciążenia, przy której nastąpi zniszczenie izolatora, nie zbliżyła się zbytnio do wartości obciążenia średniego.

Poziom niszczącego obciążenia maksymalnego można oszacować na przykład na podstawie wyników prób wytrzymałości mechanicznej wykonywanych w ramach badań kontrolno-odbiorczych – w przeprowadzonych tego typu próbach zniszczenie części ceramicznej izolatora dobrej jakości następowało zwykle w pobliżu jego rzeczywistej wytrzymałości statycznej.

Liczba cykli wytrzymywanych na każdym stopniu nie powinna być mniejsza niż 10 tys., natomiast zmiany amplitudy im będą mniejsze (np. podwyższanie o 5 kN na każdym stopniu), tym uzyska się dokładniejsze informacje. Zaleca się tak dobierać obciążenie średnie, aby liczba stopni nie była za duża, jednak przy niewielkim wzroście amplitudy na każdym stopniu, nie zawsze jest to możliwe.

Metoda niezmiennego współczynnika stałości obciążenia polega na utrzymaniu stałej ostrości próby na każdym stopniu (stały stosunek obciążenia średniego i amplitudy).

Przybliżony przebieg zmian obciążenia cyklicznego w tej próbie przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przybliżony zakres zmian obciążenia cyklicznego w metodzie niezmiennego współczynnika stałości obciążenia

Zaleca się przyjmować wartość współczynnika stałości obciążenia na poziomie 1,5 lub niższym (oczywiście zawsze większym od 1). Pozostałe parametry obciążenia cyklicznego oblicza się ze znanych zależności [2], przyjmując na każdym stopniu większe (na ogół o stałą wartość) obciążenie maksymalne ( $F_{max}$ ). Liczbę cykli i zmiany amplitudy na każdym stopniu można przyjmować według podobnych zasad, co w poprzedniej metodzie. Próbie należy kontynuować, aż do zniszczenia izolatora.

Porównując obydwie metody można zauważyć, że metoda stałego obciążenia średniego lepiej odwzorowuje rzeczywisty stan naprężeń podczas eksploatacji izolatora – w rzeczywistości siły pochodzące od naciągu oraz ciężaru przewodów i osprzętu w zasadzie się nie zmieniają. Zastrzeżenie warunków próby (coraz większa amplituda) pozwala także na skrócenie czasu trwania całej próby, co zdecydowanie wpływa na obniżenie kosztów badań.

Metoda niezmiennego współczynnika stałości obciążenia wydaje się przydatniejsza przy rutynowym badaniu izolatorów o oszacowanej wcześniej wytrzymałości zmęczeniowej. Zwiększając wtedy liczbę cykli na każdym stopniu można dokładniej ocenić wytrzymałość graniczną danego izolatora przy stałej ostrości próby.

### Próba wytrzymałości długotrwałej

Podobnie jak do próby wytrzymałości granicznej, izolatory przeznaczone do próby długotrwałej wytrzymałości przy obciążeniach cyklicznych również należy pobrać z partii, która przeszła z wynikiem dodatnim badania kontrolno-odbiorcze, a każdy izolator w tej partii przeszedł wcześniej z wynikiem dodatnim mechaniczną próbę wyrobu.

Metoda próby polega na poddaniu izolatora ustalonymu obciążeniu cyklicznemu (parametry obciążenia:  $F_m$ ,  $F_a$ ,  $F_{max}$  i  $F_{min}$  nie zmieniają się w czasie próby) przez określoną liczbę cykli. Podczas wykonywania próby nie powinno wystąpić żadne uszkodzenie izolatora, jak i jakiegokolwiek jego elementu.

Próby taką wykonuje się rutynowo w firmie NGK na izolatorach kołpakowych o znamionowej wytrzymałości  $F_N = 120$  kN, przyjmując następujące parametry próby [6]:

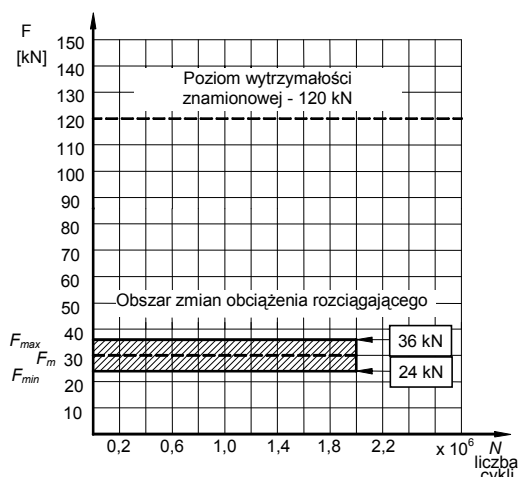
$$F_m = 25 \% F_N$$

$$F_a = 5 \% F_N$$

$$F_{max} = 30 \% F_N$$

$$F_{min} = 20 \% F_N$$

Liczbę wytrzymałych cykli przyjęto równą 2 mln, a częstotliwość zmian obciążenia na poziomie bliskim 7 Hz. Schematyczny przebieg zmian obciążenia w tej próbie przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schematyczne przedstawienie zakresu zmian obciążenia cyklicznego w próbie wytrzymałości długotrwałej według wymagań NGK

Na podstawie wykonanych w Instytucie Energetyki badań [5], dla ceramicznych izolatorów długopniowych proponuje się następujące, ostrzejsze, warunki próby:

$$F_m = 40 \% F_N$$

$$F_a = 10 \% F_N$$

$$F_{max} = 50 \% F_N$$

$$F_{min} = 30 \% F_N$$

Częstotliwość zmian obciążenia – 7 Hz, a liczba wytrzymałych cykli – 2 mln.

Po wyjęciu izolatora z uchwytów maszyny wytrzymałościowej należy przeprowadzić jego oględziny i sprawdzenie wymiarów (również okuć). Izolator nie powinien wykazywać żadnych zmian w stosunku do wyników oględzin i sprawdzenia wymiarów przed próbą. Wszelkie ewentualne zmiany należy odnotować. Wystąpienie zmian stanowi podstawę do uznania wyniku próby za ujemny, ale jednocześnie skłania do wnikliwego wyjaśnienia przyczyny takiego rezultatu.

Następnie izolator należy poddać próbie wytrzymałości obciążeniem statycznym (narastającym liniowo z niewielką prędkością) według znormalizowanych metod. Wartość siły niszczącej powinna mieścić się w granicach wyników prób

mechanicznych wykonywanych w ramach badań typu i kontrolno-odbiorczych

### Podsumowanie

Sprawdzanie odporności izolatorów na obciążenia cykliczne, czy też, używając terminów stosowanych w mechanice – ich wytrzymałości zmęczeniowej, jest nowym problemem zarówno teoretycznym jak i empirycznym. Przy coraz większych wymaganiach stawianych niezawodności przesyłania energii dobór izolatorów o wszechstronnie potwierdzonej niezawodności wydaje się jednak nieodzowny. Jeżeli, co bardzo prawdopodobne, próby zmęczeniowe znajdują się w programie znormalizowanych badań izolatorów (i to zarówno ceramicznych jak i kompozytowych), zdobyte dotychczas doświadczenia i opracowane wstępnie metody badań zmęczeniowych mogą okazać się bardzo przydatne.

Bardzo istotną rzeczą jest strona finansowa prób zmęczeniowych. Pomijając koszt specjalnego stanowiska badawczego, decydującą rolę odgrywa tu czas trwania takich prób. Przy 2 mln cykli 7 Hz, próba wytrzymałości długotrwałej wymaga prawie 80 godzin nieprzerwanej pracy urządzenia probierczego. Stąd przeprowadzanie takich prób powinno dotyczyć izolatorów przeznaczonych do szczególnie trudnych warunków lub do najbardziej odpowiedzialnych linii. Uzasadnione wydaje się także poddawanie tym badaniom izolatorów o nowej, niesprawdzonej dotychczas, konstrukcji.

Omówione metody badań zmęczeniowej wytrzymałości izolatorów ceramicznych, choć pozwalają na ocenę ich jakości i niezawodności, sprowadzają się w zasadzie do obserwacji zewnętrznych skutków działania obciążenia cyklicznego. Zagadnieniem trudniejszym, ale jednocześnie dającym znacznie więcej informacji jest pomiar naprężeń w obciążanym izolatorze jeszcze przed jego zniszczeniem. W celu zorientowania się w możliwościach pomiarowych, na jednym izolatorze wykonano taką wstępną próbę, wykorzystując tensometry naklejone w kilku punktach okucia i części ceramicznej. Zastosowana aparatura umożliwiła śledzenie i zapis naprężeń w ciągu pierwszych kilku tysięcy cykli. Uzyskane wyniki mieściły się w granicach szacunkowych obliczeń i choć na podstawie jednej próby trudno formułować konkretne wnioski, wydaje się jednak, że w dalszych pracach należałoby uwzględnić również i ten kierunek badań.

### LITERATURA

- [1] Kaleta J., Kocańda D., Skorupa M., Topoliński T., Metody doświadczalne w zmęczeniu materiałów i konstrukcji – Badania podstawowe, *Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy*, Bydgoszcz 2000
- [2] Kocańda S., Szala J., Podstawy obliczeń zmęczeniowych. PWN, Warszawa 1985
- [3] Ranachowski J., Święcki Z., Łas T., Ceramika w technice wysokich napięć. PWN, Warszawa, 1970
- [4] De Tourreil C., The future of testing insulators: what will be required, *Insulator News and Market Report* (2002). January/February, 52-60
- [5] Bielecki J., Ocena wytrzymałości izolatorów ceramicznych przy obciążeniach cyklicznych. *Elektroenergetyka – technika, ekonomia, organizacja*, nr 2'03. Wyd. PSE S.A. Warszawa 2003
- [6] Matsuura Y., Suzuki Y., Arakawa K., Tanaka K., Techniczne względy perspektywicznych właściwości izolatorów przelotowych oraz metody ich laboratoryjnej oceny, *Canadian Electrical Association, Sympozjum na temat izolatorów. Montreal*, 28 marca 1990

**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)